

(مقاله مروری)

مواد غیرهمگن در مهندسی مایکروویو: کاربردها، تحقق پذیری و استخراج مشخصات الکترومغناطیسی

علی عبدالعالی^۱، محمد کیانی^۲، مجید طیرانی^۳

abdolali@iust.ac.ir

- ۱- دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران
 ۲- دانشجوی دکتری مهندسی برق-مخابرات میدان دانشگاه علم و صنعت ایران
 ۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در این مقاله، مطالعه ای جامع بر روی تحقق پذیری و استخراج مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن در محدوده فرکانسی مایکروویو و کاربردهای آن در مهندسی و علوم به انجام رسیده است. ابتدا، مفاهیم و تعاریف مواد غیرهمگن به عنوان یکی از دسته های اصلی از محیط های پیچیده الکترومغناطیسی ارائه می شود. سپس، کاربردهای این مواد در مهندسی مایکروویو از قبیل لنزهای با تغییر تدریجی ضریب شکست، جاذب های الکترومغناطیسی و رادوم آنتن معرفی می شود. در گام بعدی، روش های پیاده سازی این مواد به تفصیل شرح داده می شود. طراحی ادوات و رسیدن به کاربردهای متنوع، منوط داشتن دانش و اطلاعات دقیق از مشخصات الکترومغناطیسی است. در قسمت آخر، روش هایی که برای بازیابی و اندازه گیری مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن در محدوده فرکانسی مایکروویو ارائه شده است، معرفی می گردد. مقالات متعددی که در بیان کاربردها و توسعه روش های تحقق پذیری و اندازه گیری مواد غیرهمگن در سالیان اخیر به چاپ رسیده است، این وادی را به عنوان یکی از موضوعات پرطرفدار برای مهندسان مایکروویو تبدیل کرده است. با توجه به کاربردهایی که برای محیط های غیرهمگن اشاره شد، بکارگیری این مواد در سامانه های نظامی و دریایی می تواند موجب افزایش توان دفاعی و نظامی کشور شود. بنابراین، مواردی که در بیان اهمیت محیط های غیرهمگن ارائه شد، لازم می دارد که یک مرور جامع بر روی این مواد در مهندسی مایکروویو صورت پذیرد تا موجب آشنایی بیشتر محققان با این زمینه شود و راهگشای تحقیقات آتی باشد. در این تحقیق، در قالب یک مقاله مروری، به این مهم پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: مواد غیرهمگن، مهندسی مایکروویو، تحقق پذیری، مشخصات الکترومغناطیسی،



تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲

DOI: 10.22034/IJMT.2022.540681.1713

صص ۱-۱۱

۱- مقدمه

کلیدی و مهم در حوزه مواد غیرهمگن تبدیل شده است [۲۷-۱۴].

رسیدن به کاربردهایی که برای مواد غیرهمگن بیان شد، مستلزم داشتن دانش و آگاهی مناسب از مشخصات الکترومغناطیسی این مواد است. مساله استخراج مشخصات الکترومغناطیسی مواد، یکی از موضوعات کاربردی و مهم در حوزه مهندسی مایکروویو می باشد. روش های متعددی برای بازیابی و اندازه گیری پروفایل ناهمگنی مواد پیشنهاد داده شده است [۲۹-۳۸].

با توجه به کاربردهایی که برای مواد غیرهمگن از قبیل ماده جاذب راداری و رادوم معرفی شد، به وضوح مشاهده می شود که، بکارگیری این مواد در سامانه ها و سازه های نظامی و دریایی می تواند تاثیر بسزایی در بهبود عملکرد این سامانه ها از نقطه نظر جنگ الکترونیک داشته باشد و موجبات پیشرفت و افزایش روزافزون توان دفاعی و نظامی کشور گردد [۳۹-۴۰]. بنابراین، مواردی که در اهمیت موضوع مواد غیرهمگن در مهندسی مایکروویو بیان شد، موید این امر است که مطالعه جامع در این حوزه می تواند موجب آشنایی هر چه بیشتر و بهتر محققان شود و راهگشای تحقیقات علمی و عملی برای اعتلا و پیشرفت کشور در زمینه های دانشگاهی و نظامی و دفاعی گردد.

در این مقاله، کاربردها، روش تحقق پذیری و بازیابی و اندازه گیری مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن به طور جامع معرفی می شود و به چالش های پیش رو در آنها پرداخته می شود. در قسمت اول، مفاهیم مواد غیرهمگن معرفی می شود. سپس، کاربردهای این مواد در مهندسی مایکروویو به تفصیل شرح داده می شود. در قسمت بعد، روش های تحقق پذیری عملی و چالش های پیش رو با آن معرفی می شود. در قسمت آخر نیز، روش های پیشنهادی برای بازیابی و اندازه گیری مشخصات الکترومغناطیسی این مواد ارائه می شود.

۲- تعریف ماده غیرهمگن

ماده ای که ضریب گذردهی الکتریکی، ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی و یا هر دو این مشخصات با مکان تغییر کنند، غیرهمگن نامیده می شود. نمونه هایی از مواد غیرهمگن که در طبیعت وجود دارند، می توان به جو زمین و یخ های قطبی اشاره کرد. با توجه به اینکه تغییرات مکانی مشخصات الکترومغناطیسی نسبت به چند بعد از مکان

مواد غیرهمگن یکی از دسته های اصلی محیط های پیچیده الکترومغناطیسی هستند [۱]. محیط های پیچیده ساختارهای کامپوزیتی هستند که تفاوت آنها با یک محیط (ساده) متداول، در روابط ساختاری است. این روابط ساختاری پیچیده می تواند درجه آزادی بالاتری را در طراحی ادوات مایکروویو فراهم کند، که به کمک آن می توان به کاربردهای متنوع و جدیدی رسید. از جمله این کاربردها می توان به نهان سازها، کاهش سطح مقطع راداری، افزایش بهره و پهنای باند آنتن ها و ادوات پسیو مایکروویو اشاره کرد [۲-۸]. این مواد با توجه به روابط ساختاری حاکم، به دسته های مختلفی از قبیل، ناهمسانگرد، غیرهمگن، دوهمسانگرد، پاشنده فرکانسی و متامتریال تقسیم می شوند.

ماده غیرهمگن، ماده ای است که ضریب گذردهی الکتریکی و/یا ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی آن با مکان تغییر می کند. تغییرات مکانی مشخصات الکترومغناطیسی موجب می شود که توزیع میدان ها و مشخصات ذاتی موج الکترومغناطیسی از قبیل امپدانس موج و ضریب شکست در این مواد در مقایسه با ماده ساده و همگن، متفاوت باشد. استخراج مشخصات موج الکترومغناطیسی و تابعیت میدان ها در این مواد، در قالب بررسی برهم کنش امواج الکترومغناطیسی و مواد غیرهمگن در مقالات متعددی به انجام رسیده است [۹-۱۴]. تغییر توزیع میدان ها و مشخصات ذاتی موج در این مواد به کاربردهای متنوع و جذابی در مهندسی مایکروویو منتج شده است. از جمله این کاربردها می توان به لنزهایی با تغییر تدریجی ضریب شکست [۱۵-۲۳]، جاذب های الکترومغناطیسی [۲۴] و پوشش های رادوم آنتن اشاره کرد [۲۵-۲۸].

کارایی و عملکرد مناسب ادوات مبتنی بر مواد غیرهمگن و رسیدن به نتایج و کاربردهای مطلوب، در گرو همسانی مشخصات الکترومغناطیسی استفاده شده در محیط شبیه سازی نرم افزاری و آزمایش های عملی است. کاهش دقت در تحقق پذیری عملی پروفایل ناهمگنی، می تواند موجب بروز خطا و اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی شود. به همین دلیل، تحقق پذیری عملی و پیاده سازی یک ماده با مشخصات الکترومغناطیسی متغیر از موضوعات

$$\left\{ \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(-\frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial A}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \phi} \right) \right] \right\} - \omega^2 \varepsilon(r) \mu(r) A = \mu(r) \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A}{\mu(r)} \right) \right) \quad (9)$$

در روابط فوق، A و F به ترتیب پتانسیل های برداری الکتریکی و مغناطیسی هستند. به سادگی دیده می شود که توزیع مکانی میدان ها و مشخصات ذاتی موج مانند امپدانس موج و ضریب شکست در یک ماده غیرهمگن با یک محیط ساده متفاوت است. این تفاوت می تواند به عنوان درجه آزادی بالاتر در طراحی ادوات در مهندسی میکروویو نمود پیدا کند و به کاربردهای متنوعی منتج گردد که در قسمت بعد به آن پرداخته می شود.

۱- کاربردهای محیط غیرهمگن

یکی از کاربردهای مواد غیرهمگن در مهندسی میکروویو، در طراحی لنزها (متمرکز کننده ها) می باشد. لنزهایی که که از مواد غیرهمگن در ساختار آنها استفاده شده است، بر پایه مفهوم تغییر تدریجی ضریب شکست استوار هستند [۲۳]-[۱۵]. در این ساختارها، ضریب شکست لنز در لایه خارجی برابر با محیط پیرامون می باشد و به صورت تدریجی و با انتشار در ماده غیرهمگن، به مقدار بیشینه خود تبدیل می شود. این تغییر تدریجی ضریب شکست موجب می شود تا جبهه موج تابشی بر لنز به صورت تدریجی تغییر جهت داده و در ناحیه دور، توان الکترومغناطیسی را در یک راستا متمرکز سازد. نمونه هایی از این لنزهای مبتنی بر مواد غیرهمگن، لنز لونبرگ و لنز چشم ماهی ماکسول و لنز ایتون هستند. ضریب شکست این لنزها برای ساختارهای کروی و استوانه ای به صورت زیر تعریف می شود.

$$n(r) = 2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \quad (10)$$

لنز چشم ماهی ماکسول

$$n(r) = \frac{N}{\left(1 + \frac{r^2}{a^2}\right)} \quad (11)$$

لنز ایتون

باشد، ماده غیرهمگن می تواند یک بعدی، دوبعدی و یا سه بعدی باشد. در رابطه ۱، مشخصات الکترومغناطیسی یک ماده غیرهمگن در حالت کلی نمایش داده شده است. در این رابطه، r نشان دهنده بردار مکان می باشد.

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon(r) = \varepsilon(x, y, x) \\ \mu = \mu(r) = \mu(x, y, x) \end{cases} \quad (1)$$

با جایگذاری پارامترهای الکترومغناطیسی در معادلات ماکسول، فرم کلی معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی حاکم بر انتشار موج در ماده غیرهمگن به صورت زیر در می آید [۴۱].

$$\nabla \times \mu^{-1}(r) \nabla \times E(r) - \omega^2 \varepsilon(r) E(r) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \varepsilon^{-1}(r) \nabla \times H(r) - \omega^2 \mu(r) H(r) = 0 \quad (3)$$

برای یک ماده غیرهمگن یک بعدی، معادلات دیفرانسیل انتشار موج در دستگاه های مختصات دکارتی، استوانه ای و کروی به صورت زیر تغییر می کند. [۹-۱۴]

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{\mu(z, \omega)} \frac{\partial \mu(z)}{\partial z} \right) \frac{\partial E(z)}{\partial z} + \left(\omega^2 \varepsilon(z) + \beta_x^2 \right) E(z) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 H(z)}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{\varepsilon(z, \omega)} \frac{\partial \varepsilon(z)}{\partial z} \right) \frac{\partial H(z)}{\partial z} + \left(\omega^2 \varepsilon(z) + \beta_x^2 \right) H(z) = 0 \quad (5)$$

دستگاه مختصات استوانه ای

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial F}{\partial \rho} \right) \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 F}{\partial \phi^2} - \left(\frac{1}{\varepsilon(\rho)} \frac{d\varepsilon(\rho)}{d\rho} \right) \frac{\partial F}{\partial \rho} \quad (6)$$

$$+ \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu(\rho) \varepsilon(\rho) F$$

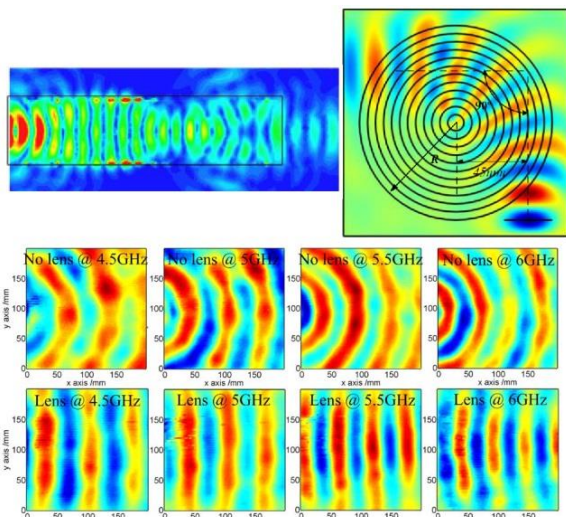
$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial A}{\partial \rho} \right) \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A}{\partial \phi^2} - \left(\frac{1}{\varepsilon(\rho)} \frac{d\varepsilon(\rho)}{d\rho} \right) \frac{\partial A}{\partial \rho} \quad (7)$$

$$+ \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu(\rho) \varepsilon(\rho) A$$

دستگاه مختصات کروی

$$\left\{ \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(-\frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial F}{\partial \phi} \right) \right] \right\}$$

$$- \omega^2 \varepsilon(r) \mu(r) F = \mu(r) \varepsilon(r) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{F}{\varepsilon(r)} \right) \right) \quad (8)$$



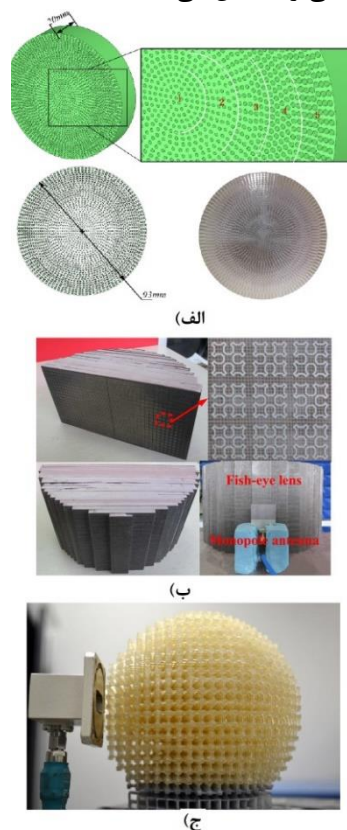
شکل (۲) عملکرد لنزهای غیرهمگن مبتنی بر تغییر ضریب

تدریجی ضریب شکست در تمرکز توان الکترومغناطیسی [۲۰-۲۳] یکی از کاربردهای دیگر مواد غیرهمگن، در طراحی جاذب های الکترومغناطیسی می باشد. در صنایع نظامی از جمله کاربردهای دریایی، به منظور کاهش اثرات مخبر سیگنال های مزاحم که از طریق دشمن ارسال می گردد، از جاذب های الکترومغناطیسی استفاده می شود. تحقیقات متعددی در سالهای اخیر در محاسبه و کاهش سطح مقطع راداری سامانه های و سازه های دریایی از قبیل کشتی ها به انجام رسیده است، که این امر موید اهمیت مساله سطح مقطع راداری و کاهش آن در مخابرات دریایی و جنگ الکترونیک می باشد [۴۷-۴۲]. جاذب ها با جذب توانی که توسط دشمن به سمت سامانه های خودی تابیده می شود، می توانند این سامانه ها را از دید رادار و جنگ افزارهای دشمن پنهان کنند. تحقیقات متعددی اساس جاذب های مبتنی بر مواد غیرهمگن، بر پایه جذب تدریجی موج در حین انتشار در ماده غیرهمگن می باشد. همانگونه که در شکل ۳ نمایش داده شده است، در مرز جاذب و محیط پیرامون، قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی کمترین مقدار خود را دارد. با دور شدن از مرز انتشار در ماده غیرهمگن، مقدار قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی افزایش می یابد که این امر موجب جذب تدریجی موج می شود، به قسمی که توان بازگشتی کمینه می گردد. عملکرد این جاذب برای تابش موج صفحه ای و در زوایای مختلف در شکل ۴ نمایش داده شده است.

با توجه به کاربردهایی که از محیط های غیرهمگن به عنوان ماده جاذب راداری ارائه شد، بکارگیری از این مواد

$$n(r) = \sqrt{\frac{a}{r} - \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1}} \quad (12)$$

در رابطه (۱۱)، N مقدار ضریب شکست در مرکز لنز می باشد. در این روابط، a نشان دهنده شعاع لنز می باشد. به سادگی دیده می شود که در مرز لنز و محیط پیرامون، ضریب شکست n برابر با ۱ و ضریب شکست فضای آزاد می باشد و با انتشار در ماده غیرهمگن، به صورت تدریجی زیاد می شود. از آنجاییکه عمدتاً مواد غیرمغناطیسی هستند، این لنزها ساختارهای عایقی (دی الکتریکی) هستند. در شکل ۱، نمونه هایی از این لنزها نمایش داده شده است. شکل ۲ نیز عملکرد این لنزها در تمرکز توان الکترومغناطیسی را نمایش می دهد.



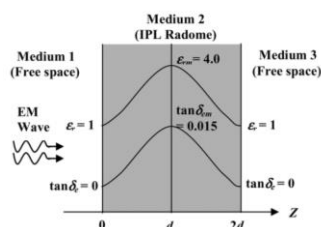
شکل (۱) لنزهای غیرهمگن مبتنی

تغییر ضریب تدریجی ضریب شکست الف) لونیبرگ [۲۰]
ب) چشم ماهی ماکسول [۲۱]
ج) ایتون [۲۳]



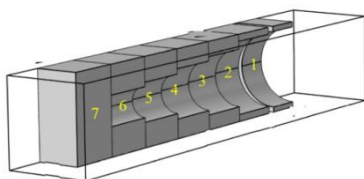
شکل (۵) نمونه هایی از کاربرد رادوم در کشتی ها و ناوهای دریایی [۳۹-۴۰]

رادوم ها، رفتار فیلتری دارند، به قسمی که در محدوده فرکانسی آنتن، توان الکترومغناطیسی را از خود عبور می دهند و در فرکانس های خارج از محدوده کاری آنتن، مانند بازتاب دهنده توان الکترومغناطیسی عمل می کنند. رادوم های متشکل از مواد غیرهمگن، بر مبنای تطبیق امپدانس تدریجی موج کار می کنند. به این معنی که، امپدانس ماده غیرهمگن در مرز با امپدانس محیط پیرامون برابر است و با رفتن به سمت مرکز لایه رادوم، امپدانس تدریجی افزایش می یابد. نمونه ای از پروفایل غیرهمگنی رادوم که بر مبنای تطبیق تدریجی امپدانس موج استوار است، در شکل ۵ نمایش داده شده است. [۲۵]



شکل (۶) پروفایل تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی

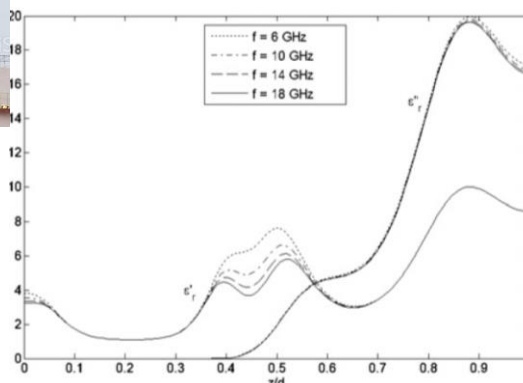
رادوم غیرهمگن مبتنی بر تطبیق تدریجی امپدانس [۲۵] نمونه ای از تحقق پذیری رادوم های غیرهمگن که بر مبنای مفهوم تطبیق تدریجی امپدانس کار می کند، در شکل ۱ نمایش داده شده است. این ساختار بر مبنای دی الکتریک سوراخکاری چندلایه پیاده سازی شده است.



شکل (۷) - شماتیک تحقق پذیری رادوم غیرهمگن مبتنی بر

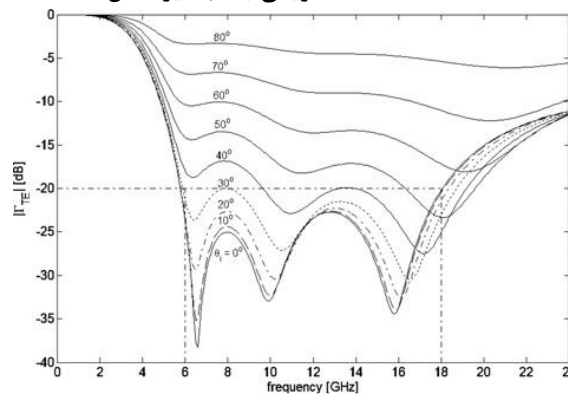
تطبیق تدریجی امپدانس [۲۸]

در کاهش سطح مقطع راداری کشتی ها و ناوها می تواند نقش بسزایی در بالابردن توان دفاعی داشته باشد، به قسمی که می توان از کاهش سطح مقطع راداری کشتی ها و جنگ افزارهای دریایی به عنوان یکی از موضوعات و زمینه های کاربرد در فعالیت های تحقیقاتی آتی در زمینه مخابرات دریایی اشاره کرد.



شکل (۳) قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی

الکتریکی جاذب غیرهمگن [۲۴]



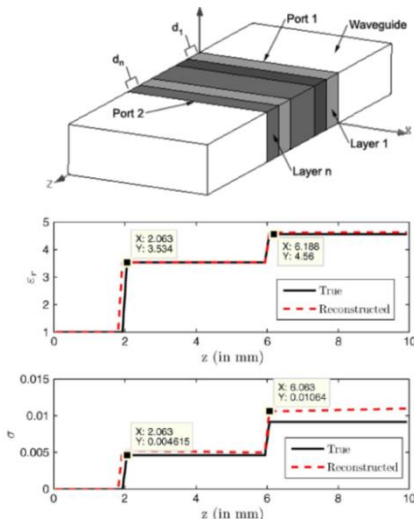
شکل (۴) ضریب بازتاب جاذب غیرهمگن به ازای موج

صفحه ای با زوایای تابش مختلف [۲۴]

رادوم ها دسته دیگری از ادوات در مهندسی مایکروویو هستند که در ساختار آنها از مواد غیرهمگن بهره گرفته می شود [۲۵-۲۸]. رادوم ها که به عنوان پوشش آنتن به کار برده می شوند، در صنایع نظامی و دریایی کاربرد فراوانی دارند. این پوشش ها، ضمن حفظ مشخصات تشعشعی، از آنتن در برابر آسیب های محیطی همانند بارش باران محافظت می کند تا شرایط جوی مختلف، در عملکرد آنتن خللی وارد نگردد. نمونه هایی از رادوم هایی که در کشتی ها و ناوهای دریایی بکار برده شده است، در شکل ۵ نمایش داده شده است [۳۹-۴۰].

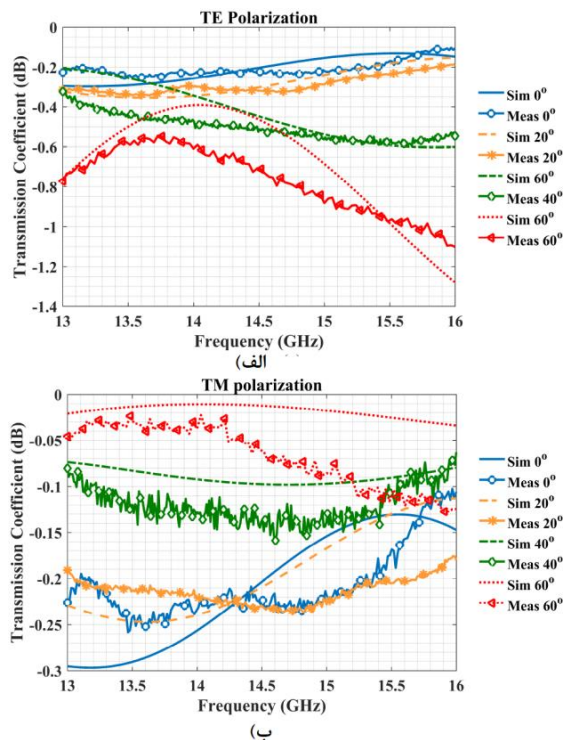
همانگونه که در مقدمه بیان شد، مواد غیرهمگن ساختارهای کامپوزیتی هستند که در طبیعت وجود ندارند و در محیط آزمایشگاهی ساخته می شوند. رسیدن به نتایج مطلوب در آزمایش های عملی، منوط به دقت تحقق پذیری پروفایل ناهمگنی و همسانی پروفایل پیاده سازی شده با معادل آن در محیط شبیه سازی است. افزایش دقت تحقق پذیری پروفایل ناهمگنی، می تواند خطای بین اندازه گیری و شبیه سازی را کمینه کند و نتایج مطلوبی در محیط نرم افزار بدست آمد، در آزمون های عملی نیز حاصل گردد. بنابراین، اهمیت مساله تحقق پذیری مواد غیرهمگن در مهندسی میکروویو اجتناب ناپذیر است. در این قسمت راهکارهایی که برای تحقق پذیری مواد غیرهمگن در مهندسی میکروویو پیشنهاد شده است، معرفی می گردد.

اولین روشی که برای تحقق پذیری مواد غیرهمگن در مهندسی میکروویو بکار برده شد، ساختارهای چندلایه بود. در این روش از تحقق پذیری، پروفایل ناهمگنی با تقریب تکه ای خطی بازسازی می شود. این روش تحقق پذیری، ساده ترین و کاربردی ترین تحقق پذیری مواد غیرهمگن است که امروزه نیز کاربرد زیادی در مهندسی میکروویو دارد. شماتیک تحقق پذیری چندلایه برای تقریب تکه ای خطی پروفایل ناهمگنی شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل (۹) تحقق پذیری چندلایه ماده غیرهمگن برحسب تقریب تکه ای خطی [۲۷]

یکی از مشکلات اصلی این روش، افزایش خطا بین منحنی غیرهمگنی مطلوب و منحنی پیاده سازی شده عملی برای پروفایل های با تغییرات سریع است. مشکل

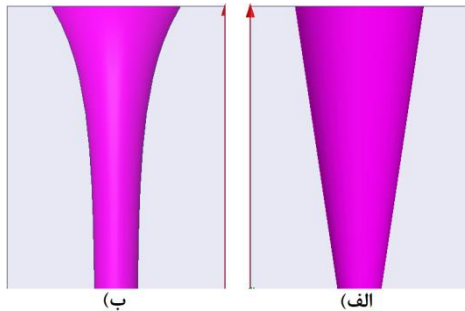


شکل (۸) ضریب انتقال شبیه سازی و اندازه گیری رادوم غیرهمگن تحت زوایای تابش مختلف برای (الف) پلاریزاسیون TE (ب) پلاریزاسیون TM [۲۸]

یکی از مناطقی که در آن تغییرات شرایط جوی و محیطی دارای تغییرات زیادی است، دریا می باشد. بنابراین، یکی از کاربردهایی که در آن نیاز به رادوم برای تثبیت عملکرد مناسب آنتن در شرایط جوی و محیطی ضروری است، سامانه های مخابراتی دریایی و همچنین در سازه های دریایی مانند کشتی ها که در آن از آنتن به منظور برقراری ارتباط مخابراتی است، می باشد. با توجه آنچه که در این قسمت درباره عملکرد مناسب رادوم های ساخته شده از محیط های غیرهمگن بیان شد [۲۵-۲۸]، بکارگیری از این مواد در ساختار رادوم ها می توانند به عنوان یک موضوع کاربردی و جدید مد نظر محققان و مهندسان میکروویو قرار گیرد. به انجام رسیدن این تحقیقات، می تواند پیشرفت ها آتی در زمینه تولید نسل جدیدی از رادوم برای کاربردهای نظامی بالادست در سامانه های دریایی را تضمین نماید و زمینه ساز ارتقا توان نظامی و دفاعی کشور باشد.

۲- تحقق پذیری مواد غیرهمگن

ضخامت نمونه است. در این روش، می توان با منحنی های مختلفی که برای تغییرات شعاع سوراخکاری در راستای ضخامت بکار برده می شود، به پروفایل های ناهمگنی دلخواه رسید. نمونه هایی از این روش تحقق پذیری در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل (۱۱) تحقق پذیری پروفایل غیرهمگنی پیوسته با شعاع سوراخکاری متغیر تحت تابع الف) خطی ب) نمایشی

۳- استخراج مشخصات الکترومغناطیسی

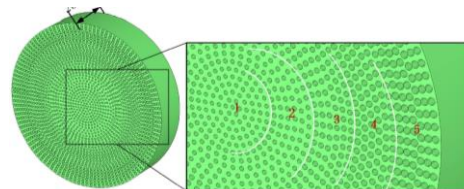
طراحی ادوات میکروویو که مواد غیرهمگن در ساختار آنها بکار رفته است، نیازمند داشتن دانش و آگاهی دقیق از مشخصات الکترومغناطیسی است. وجود خطا بین مقادیر مطلوب و مقادیر اندازه گیری شده مشخصات الکترومغناطیسی ماده غیرهمگن می تواند موجب بروز خطا بین نتایج شبیه سازی و اندازه گیری شود و بنابراین، پیش از ساخت ادوات، لازم است تا مشخصات الکترومغناطیسی محیط غیرهمگنی که در آن به کار برده شده است، اندازه گیری شود. در این قسمت روش هایی که برای اندازه گیری و استخراج مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن ارائه شده است، معرفی می گردد.

اولین و ساده ترین روشی که برای اندازه گیری مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن استفاده شده است، روش فضای آزاد است [۲۸-۳۰]. اساس استخراج مشخصات الکترومغناطیسی، بر پایه کمیته سازی اختلاف پارامترهای پراکندگی اندازه گیری و تحلیل تئوری و یا شبیه سازی استوار است. نمونه ای از سامانه اندازه گیری فضای آزاد برای ماده غیرهمگن در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. اگرچه روش پیشنهادی از کالیبراسیون ساده ای برخوردار است، اما معایبی نیز دارد که در ادامه بیان می شود. یکی از معایب این روش، نیاز به لنز برای ایجاد موج تابشی صفحه ای است. در بسیاری از موارد، تولید موج صفحه ای

دیگر این روش تحقق پذیری، پوشش مناسب محدوده تغییرات ماده غیرهمگن می باشد. این مشکل به این معنی است که چون مواد موجود و در دسترس برای تحقق پذیری دارای مشخصات الکترومغناطیسی مشخصی هستند، تمامی مقادیر لازم از مشخصات الکترومغناطیسی برای لایه های مختلف، که نیاز است تا به کمک آن بتوان به صورت مناسب پروفایل غیرهمگنی را تحقق بخشید، وجود ندارد. این مشکلات موجب می شود تا اختلاف بین منحنی غیرهمگنی مطلوب و منحنی تحقق پذیرفته افزایش یابد که این امر موجب اختلاف بین نتایج اندازه گیری و شبیه سازی می شود و بازدهی عملی ساختار در مقایسه با شبیه سازی بسیار پایین خواهد بود.

مشکل دیگر این تحقق پذیری ها، در فرکانس های بالا بروز می یابد. با توجه به قضیه محیط معادل در الکترومغناطیس، می بایست ضخامت لایه ها در مقایسه با طول موج بسیار کم باشد. پر واضح است که برای یک ساختار چندلایه، با افزایش فرکانس، ضخامت در مقایسه با طول موج متناظر افزایش می یابد که این امر موجب عدم دقت فرض محیط معادل می شود و بازدهی ساختار در فرکانس های بالاتر کاهش می یابد.

پایاده سازی مواد غیرهمگن به کمک ساختارهای سوراخکاری شده، مشکل پوشش محدوده تغییرات مشخصات الکترومغناطیسی را تا حد زیادی برطرف کرد [۲۱-۲۰]. شماتیک این روش تحقق پذیری در شکل نمایش داده شده است. در این روش با تغییر شعاع سوراخکاری در لایه های مختلف، مشخصات الکترومغناطیسی مطلوبی که مورد نیاز است، بدست می آید. در این روش تحقق پذیری نیز می بایست با افزایش فرکانس، ابعاد سلول واحد کاهش یابد که این امر بر پیچیدگی و هزینه پیاده سازی عملی می افزاید.



شکل (۱۰) تحقق پذیری ماده غیرهمگن با ساختار چندلایه سوراخکاری شده [۲۰]

یک روش جدید که توسط نویسندگان برای تحقق پذیری پروفایل ناهمگنی پیوسته پیشنهاد شده است، ساختارهای سوراخکاری شده با شعاع سوراخکاری متغییر در راستای

روش، تحریک موده‌های مرتبه بالاتر در محل اتصال موجبر صفحه موازی و خط انتقال تحریک است.

روش دیگر برای اندازه‌گیری مشخصات ماده غیرهمگن، استفاده از نمونه تحت آزمون به عنوان زیرلایه خطوط انتقال صفحه ای می‌باشد [۳۳-۳۴]. از آنجاییکه فرکانس قطع مود TEM در خطوط انتقال صفحه ای صفر است، این روش برای اندازه‌گیری‌های پهن باند مناسب است. یکی از معایب این روش، بارگذاری ماده تحت آزمون در زیرلایه و در مسیر انتشار موج الکترومغناطیسی است که پیاده‌سازی مکانیکی این سامانه اندازه‌گیری را دشواری سازد. مساله تحریک موده‌های مرتبه بالاتر در فرکانس‌های میکروویو نیز از دیگر معایب این روش است. سامانه اندازه‌گیری موجبری برای استخراج مشخصات ماده غیرهمگن نیز از روش‌های پرکاربرد در حوزه میکروویو می‌باشد [۳۵-۳۸]. با توجه به اینکه نمونه در موجبر بارگذاری می‌شود، دیواره‌های هادی نیز محیطی را حذف می‌کند. نمونه مورد نیاز دارای اندازه کوچک است. سامانه اندازه‌گیری موجبری مشخصات الکترومغناطیسی ماده غیرهمگن در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل (۱۴) سامانه اندازه‌گیری موجبری برای ماده غیرهمگن [۳۸]

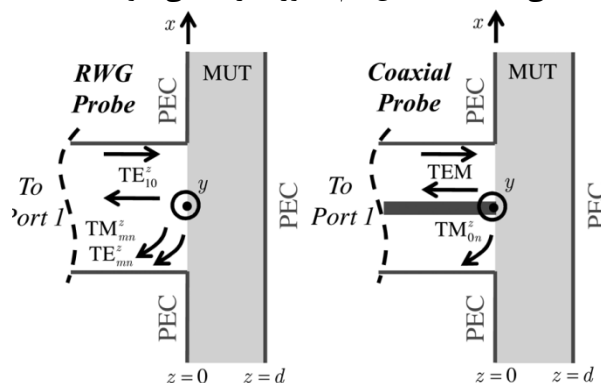
در اکثر مقالاتی که از روش اندازه‌گیری موجبری برای استخراج مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن بهره گرفته می‌شود، بازسازی پروفایل ناهمگنی از طریق تقریب تکه‌ی خطی انجام می‌شود. همچنین، در این روش‌ها، اساس بازیابی پارامترهای الکترومغناطیسی بر پایه کمینه

در فضای محدود اتاق تست آنتن پیچیده است. علاوه بر این، نویز محیطی یا کلاتر نیز می‌تواند دقت اندازه‌گیری را تحت تاثیر قرار دهد. اشکال دیگر این روش، استفاده از نمونه ای با ابعاد محدود است. از آنجاییکه تحلیل تئوری برای نمونه با ابعاد بی‌نهایت انجام می‌شود، استفاده از نمونه با ابعاد محدود، موجب بروز خطا بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی می‌شود. این خطا باعث کاهش دقت استخراج مشخصات ماده غیرهمگن شود.



شکل (۱۲) سامانه اندازه‌گیری فضای آزاد برای ماده غیرهمگن [۲۸]

روش دیگری که در استخراج مشخصات مواد غیرهمگن کاربرد دارد، روش غیرمخرب بر پایه موجبر صفحه موازی می‌باشد [۳۱-۳۲]. نمونه ای از این سامانه اندازه‌گیری در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. مطابق با شکل ۱۲، در این روش، موجبر صفحه موازی توسط یک موجبر مستطیلی یک خط انتقال هم‌محور تحریک می‌شود.



شکل (۱۳) سامانه اندازه‌گیری غیرمخرب برای ماده غیرهمگن [۳۱]

در این روش مانند فضای آزاد، تحلیل تئوری برای نمونه با ابعاد بی‌نهایت انجام می‌شود. اگرچه برخلاف روش فضای آزاد، مشکل نویز محیطی در این روش برطرف شده است، اما در این روش نیز، اندازه‌گیری با نمونه ای با ابعاد محدود انجام می‌شود که موجب بروز خطا در استخراج مشخصات الکترومغناطیسی می‌شود. از معایب دیگر این

کاربردهای محیط غیرهمگن در مهندسی میکروویو و پیشرفت‌ها در تحقق پذیری و استخراج مشخصات الکترومغناطیسی این مواد غیرهمگن در قالب یک مطالعه جامع در این مقاله ارائه شد. ابتدا، کاربردهای مواد غیرهمگن به عنوان یکی از دسته‌های اصلی از محیط‌های پیچیده الکترومغناطیسی معرفی شد. سپس، روش‌های تحقق پذیری این مواد به تفصیل شرح شد. در قسمت آخر، روش‌هایی که برای بازیابی و اندازه‌گیری مشخصات الکترومغناطیسی مواد غیرهمگن در محدوده فرکانسی میکروویو ارائه شده است، معرفی گردید. با توجه به تحقیقات متعددی که در بیان کاربردها و توسعه روش‌های تحقق پذیری و اندازه‌گیری مواد غیرهمگن در سالیان اخیر به انجام رسیده است، این وادی را به عنوان یکی از موضوعات پرطرفدار برای مهندسان میکروویو تبدیل کرده است. با بکارگیری از مواد غیرهمگن در صنایع نظامی و دفاعی، می‌توان به کاربردهای متنوع و جذاب اشاره شده از این مواد مانند جاذب‌های راداری و پوشش‌های رادوم در سامانه‌های و سازه‌های نظامی همانند مخابرات دریایی رسید و موجبات افزایش توان دفاعی و نظامی را فراهم آورد. مطالعه و مرور جامعی که در این مقاله بر روی مواد غیرهمگن در مهندسی میکروویو انجام شد، می‌تواند موجب آشنایی بیشتر محققان با این زمینه شود و راهگشای تحقیقات علمی و عملی برای اعتلا و پیشرفت کشور در زمینه‌های دانشگاهی و نظامی و دفاعی گردد.

۷- منابع

- [۱] عبدالعالی، علی و ظریفی، داود، مقدمه‌ای بر انتشار امواج در محیط‌های پیچیده الکترومغناطیسی، چاپ اول، ۱۳۹۸، انتشارات انتشارات دانشگاه کاشان و مرسل.
- [۲] A.A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach and Y. M. Ostryzhnyi, "A tunable compact polarizer in a circular waveguide," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۷, no. ۲, pp. ۵۹۲-۵۹۶, Feb. ۲۰۱۹.
- [۳] A P. Saghati, J. S. Batra, J. Kameoka and K. Entesari, "A metamaterial-inspired wideband microwave interferometry sensor for dielectric spectroscopy of liquid chemicals," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۵, no. ۷, pp. ۲۵۵۸ - ۲۵۷۱, Jul. ۲۰۱۷.
- [۴] J. Yamauchi, T. Ueda, Y. Kubo and T. Itoh, "Enhancement of phase-shifting nonreciprocity in

سازی اختلاف پارامترهای پراکندگی تحلیلی تئوری/شبه‌سازی و اندازه‌گیری است. در این روش‌ها، به حل دقیق و تئوری مساله پراکندگی معکوس و برقراری ارتباط بین پروفایل ناهمگنی و پارامترهای پراکندگی پرداخته نمی‌شود.

همانگونه که در بیان شد، در روش‌های موجبری که در مراجع [۳۵-۳۷] ارائه شد، از کمینه‌سازی اختلاف بین پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده و تحلیل تئوری و یا شبه‌سازی، برای استخراج مشخصات الکترومغناطیسی بهره‌گرفته شده است. در این مقالات، از روش‌های تقریبی برای محاسبه ضرایب پراکندگی استفاده شده است. همچنین، در این مقالات، پروفایل ناهمگنی به صورت تقریب تکه‌ای خطی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، با وجود متغیرهای زیاد در بهینه‌سازی، به دلیل وجود کمینه‌های محلی، خطای استخراج مشخصات افزایش می‌یابد. برخلاف روش‌های پیشین، پارامترهای پراکندگی از حل تئوری مساله مستقیم و به کمک روش دقیق محاسبه شده است [۳۷]. همچنین، در این مقاله، برای اولین بار، ارتباط مشخصات الکترومغناطیسی و پارامترهای پراکندگی، در قالب مساله پراکندگی معکوس و به کمک روش تحلیلی و با روابط ریاضی فرم بسته بدست آمده است. مساله پراکندگی معکوس، به کمک روش فضای حالت و سری پینوبیکر حل می‌شود. در این تحقیق، در مساله معکوس، پروفایل ناهمگنی، در قالب بسط سری تیلور و فوریه بازنویسی می‌شود. برای استخراج هر یک از این ضرایب مجهول در سری تیلور مشخصات الکترومغناطیسی، نیاز به یک داده پراکندگی مستقل است. به منظور افزایش تعداد داده‌های پراکندگی مستقل که موجب افزایش دقت بازسازی پروفایل ناهمگنی می‌شود، از تغییر عرض موجبر استفاده شده است. درستی فرضیه تغییر عرض موجبر برای رسیدن به داده‌های پراکندگی مستقل به کمک روابط دقیق و فرم بسته به اثبات رسیده است. تصدیق آزمایشگاهی روش پیشنهادی نیز به کمک داده‌های اندازه‌گیری به اثبات رسیده است.

۴- نتیجه‌گیری

- Taylor's series method," Journal of Electromagnetic Waves and Applications., vol. ۲۸, no. ۱۳, pp. ۱۶۴۲-۱۶۶۰, ۲۰۱۴.
- [۱۵] Lou, Y. H. Zhu, Y. X. Fan, G. F. Lei, W. Lu, W. Z. and Wang, X. C., "Design of Ku-band flat luneburg lens using ceramic ۳-D printing," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۲۰, No. ۲, pp. ۲۳۴ - ۲۳۸, Feb, ۲۰۲۱.
- [۱۶] Feng, Y. P. QU, S. W. and Yang, S. "Defocused cylindrical Luneburg lens antenna with phased array antenna Feed," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۷, no. ۹, pp. ۶۰۰۸ - ۶۰۱۶, Sep ۲۰۱۹.
- [۱۷] Liu, P. A. Zhu, X. W. Zhang, Y. Jiang, Z. H. Wang, X. Hong, W. and LE, T. H. . "A novel E-plane-focused cylindrical luneburg lens loaded with metal grids for side lobe level reduction," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۸, no. ۲, pp. ۷۳۶ - ۷۴۴, Feb ۲۰۲۰.
- [۱۸] Budhu, J. and Rahmat-Samii, Y. "A novel and systematic approach to inhomogeneous dielectric lens design based on curved ray geometrical optics and particle swarm optimization," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۷, no. ۶, pp. ۳۶۵۷ - ۳۶۶۹, Jun ۲۰۱۹.
- [۱۹] Mirmozaffari, M. Tursunniyaz, M Luyen, H. Booske, J. H. and Behdad, N. "A multi-beam tapered cylindrical luneburg lens," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۸, no. ۸, pp. ۵۰۶۰ - ۵۰۶۵, Aug ۲۰۲۱.
- [۲۰] Qu, B. Yan, S. Zhang, A. Wang, F. and Xu, Z., "۳-D printed cylindrical luneburg lens for dual polarization," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۲۰, No. ۶, pp. ۸۷۸ - ۸۸۲, Jun, ۲۰۲۱.
- [۲۱] Xu, H. X, Wng, G. M. Tao, Z. and Cai, T., "An octave-bandwidth half maxwell fish-eye lens antenna using three-dimensional gradient-index fractal metamaterials," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۲, no. ۹, pp. ۴۸۲۳-۴۸۲۸, Sep ۲۰۱۴.
- [۲۲] Fuchs, B. Palud, S. Le Coq, L. Lafond, O. Himdi, M. and Rondineau, S., "Scattering of spherically and hemispherically stratified lenses fed by any real source," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۵۶, no. ۲, pp. ۴۵۰-۴۶۰, Feb ۲۰۰۸.
- [۲۳] Du, G. Liang, M. Sabory-Garcia, R. A. Liu, G. and Xin, H., "۳D printing implementation of an X-band eaton lens for beam deflection," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۱۵, pp. ۱۴۸۷ - ۱۴۹۰, Jan, ۲۰۱۶.
- [۲۴] Khalaj-Amirhosseini, M. "Use of dielectric inhomogeneous planar layers as optimum microwave absorber," IET Microw., Antennas Propag., vol. ۴, no. ۱۲, pp. ۲۲۲۸-۲۲۳۳, ۲۰۱۰.
- [۲۵] Nair, R. U. Shashidhara, S. and Jha, R. M., "Novel inhomogeneous planar layer radome design for airborne applications," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۱۱, pp. ۸۵۴ - ۸۵۶, Jul, ۲۰۱۲.
- [۲۶] Xu, W. Li, P. Wang, C. Zhou, J. and Qiu, Y., "Electromagnetic performance analysis of microstrip-line-based metamaterials by using a combination of their curvatures and asymmetrical insertion of stubs," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۵, no. ۱۲, pp. ۵۱۲۳ - ۵۱۳۲, Dec. ۲۰۱۷.
- [۲۷] A. Keivaan, M. H. Fakheri, A. Abdolali, and H. Oraizi, "Design of coating materials for cloaking and directivity enhancement of cylindrical antennas using transformation optics," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۱۶, pp. ۳۱۲۲-۳۱۲۵, ۲۰۱۷.
- [۲۸] A. Nagulu, T. Dinc, Z. Xiao, M. Tymchenko, D. L. Sounas, A. Alu, and H. Krishnaswamy, "Nonreciprocal components based on switched transmission lines," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۶, no. ۱۱, pp. ۴۷۰۶-۴۷۲۵, Nov. ۲۰۱۸.
- [۲۹] H. Turki, L. Huitema, T. Monediere, B. Lenior, and C. Breuil, "New concept validation of low-loss dual-band stripline circulator," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۷, no. ۳, pp. ۸۴۵-۸۵۰, Mar. ۲۰۱۹.
- [۳۰] S. Fakhte, H. Oraizi, and L. Matekovits, "High gain rectangular dielectric resonator antenna using uniaxial material at fundamental mode," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۵, no. ۱, pp. ۳۴۲-۳۴۷, Jan. ۲۰۱۷.
- [۳۱] Khalaj-Amirhosseini, M., "Analysis of lossy inhomogeneous planar layers using Taylor's series expansion," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. ۵۴, No. ۱, ۱۳۰-۱۳۵, Jan. ۲۰۰۶.
- [۳۲] Kiani, M. Abdolali, Ali. and Safari, M., "Radially inhomogeneous spherical structures; analysis of EM scattering using Taylor's series method and their notable applications," AEU international journal of electronics and communications, ۸۰, pp. ۱۹۹-۲۰۹, ۲۰۱۷.
- [۳۳] Kiani, M. Abdolali, Ali. and Safari, M., "Analytical method for analysis of electromagnetic scattering from inhomogeneous spherical structures using duality principles," Phys. Rev. E., ۹۷, ۰۳۲۱۳۷, ۲۰۱۸.
- [۳۴] Kiani, M. Abdolali, Ali. and Salary, M. M., "EM scattering from cylindrical structures coated by materials with inhomogeneity in both radial and azimuthal directions," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۳, no. ۳, pp. ۱۱۱۸-۱۱۲۸, Mar ۲۰۱۵.
- [۳۵] Abdoali, Ali. Kiani, M. and Salary, M. M., "Numerical analysis of scattering from cylindrical structures coated by layers having inhomogeneity in both radial and azimuthal directions," IET Microw., Antennas Propag., vol. ۹, no. ۵, pp. ۴۷۲-۴۸۵, ۲۰۱۵.
- [۳۶] Kiani, M. Abdolali, Ali. and Salary, M. M., "Analysis of scattering from cylindrical structures coated by radially inhomogeneous layer using

- [۳۷] Hasar, U. C. Buldu, G. Kaya, Y. and Ozturk, G., "Determination of Effective Constitutive Parameters of Inhomogeneous Metamaterials With Bianisotropy," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۶, no. ۸, pp. ۳۷۴۴ - ۳۷۴۴, Aug. ۲۰۱۸.
- [۳۸] Kiani, M. Abdolali, Ali. and Tayarani, M., "A Novel Waveguide Approach for Electromagnetic Characterization of Inhomogeneous Materials," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۶, no. ۱۰, pp. ۴۶۵۸ - ۴۶۶۵, Oct. ۲۰۱۸.
- [۳۹] آدمی، دیوید، جنگ الکترونیک، چاپ اول، ۱۳۸۵، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- [۴۰] آدمی، دیوید، جنگ الکترونیک در مخابرات، چاپ اول، ۱۳۹۳، چاپ اول، انتشارات صنایع هوا فضا وابسته به سازمان صنایع هوا فضا.
- [۴۱] Chew, W. C., "Waves and Fields in Inhomogeneous Media," IEEE Press, New York, ۱۹۹۰.
- [۴۲] رادکانی، نفیسه و ذاکری، بیژن، استخراج علائم شناساگری اهداف دریایی و روش های بهبود آن به همراه نتایج تست های میدانی، جنگ الکترونیک در مخابرات، فصلنامه صنایع الکترونیک، دوره ۸، شماره ۱، صفحات ۲۳-۳۳، بهار ۱۳۹۶.
- [۴۳] علوی، سید محمد و شاه ولدی، مرتضی، بررسی نقش سطح مقطع راداری در محاسبات برد رادار برای آشکارسازی اهداف دریایی، کنفرانس ملی چشم انداز ۱۴۰۴ و پیشرفتهای تکنولوژیک علوم مهندسی ۱۳۹۴.
- [۴۴] H. Chen, M. Zhang, Y. Zaho, and W.Luo., "An efficient slope-deterministic facet model for SAR imagery simulation of marine scene," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۵۸, no. ۱۱, pp. ۳۷۵۱ - ۳۷۵۶, Nov ۲۰۱۰.
- [۴۵] M. Sun, J. Xie, Z. Ji, and W. Cai, "Second-order ocean surface cross section for shipborne HFSWR," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۱۴, pp. ۸۲۳-۸۲۶, ۲۰۱۴.
- [۴۶] Y. Zaho, X.F. Yuan, M. Zhang, and H. Chen., "Radar scattering from the composite ship-ocean scene: facet-based asymptotical model and specular reflection weighted model," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۲, no. ۹, pp. ۴۸۱۰ - ۴۸۱۵, Sep ۲۰۱۴.
- [۴۷] M. Zhang, Y. Zaho, J. X. Li., and P. B. Wei., "Reliable approach for composite scattering calculation from ship over a sea surface based on FBAM and GO-PO models," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۵, no. ۲, pp. ۷۷۵ - ۷۸۴, Feb ۲۰۱۷.
- inhomogeneous airborne radomes for circular polarization applications," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۱۱, pp. ۷۴ - ۷۸, Nov, ۲۰۱۸.
- [۲۷] Mohammed Yazeen P.S., Vinisha C. V., Vandana S., Suprava M., and Raveendranath U. Nair., "Electromagnetic performance analysis of graded dielectric inhomogeneous streamlined airborne radome," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ۶۵, no. ۵, pp. ۲۷۱۸ - ۲۷۲۳, May ۲۰۱۷.
- [۲۸] Ghiasvand, F. Heidar, H. Kazerooni, M. and Hamidi, E., "Optimal design and implementation of inhomogeneous planar radome by perforating the host material," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. ۶۸, No. ۵, pp. ۳۷۵۱ - ۳۷۵۹, May, ۲۰۲۰.
- [۲۹] Faget, X. Liman, A. Dieudonné, E. Enoch, S. and Malléjac, N., "Free-space characterization of the permeability of inhomogeneous magneto-dielectric materials," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۵, no. ۱۲, pp. ۵۰۳۵-۵۰۴۵, Dec. ۲۰۱۷.
- [۳۰] Zwick, T. Haala, J. and Wiesbeck, W., "A genetic algorithm for the evaluation of material parameters of compound multilayered structures," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۵۰ no. ۴, pp. ۱۱۸۰-۱۱۸۷, Apr ۲۰۰۲.
- [۳۱] Bakhtiari, S. Qaddoumi, N. Ganchev, S. I. and Zoughi, R., "Microwave noncontact examination of disbond and thickness variation in stratified composite media," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۴۲ no. ۳, pp. ۳۸۹-۳۹۵, Mar ۱۹۹۴.
- [۳۲] Ghasr, M. T. Simms, D. and Zoughi, R., "Multimodal solution for a waveguide radiating into multilayered structures—dielectric property and thickness evaluation," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. ۵۸, no. ۵, pp. ۱۵۰۵-۱۵۱۳, May. ۲۰۰۹.
- [۳۳] Kiang, J. F., "Microstrip lines on substrates with segmented or continuous permittivity profiles," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۴۵ no. ۲, pp. ۲۲۹ - ۲۳۵, Feb ۱۹۹۷.
- [۳۴] Gamlath, C. D. Benton, D. M. and Cryan, M. J., "Microwave Properties of an Inhomogeneous Optically Illuminated Plasma in a Microstrip Gap," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۳ no. ۲, pp. ۳۷۴ - ۳۸۳, Feb ۲۰۱۵.
- [۳۵] Baginski, M. E. Faircloth, D. L. and Deshpande, M. D., "Comparison of two optimization techniques for the estimation of complex permittivities of multilayered structures using waveguide measurements," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۵۳ no. ۱۰, pp. ۳۲۵۱-۳۲۵۹, Oct ۲۰۰۵.
- [۳۶] Kilic, E. Siart, U. and Eibert, T. F., "Regularized ۱-D Dielectric Profile Inversion in a Uniform Metallic Waveguide by Measurement and Simulation," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. ۶۰, no. ۵, pp. ۱۴۳۷-۱۴۴۳, May. ۲۰۱۲.