

## استفاده از حل معادلات انتگرالی در تحلیل یک آنتن پهن باند میکرواستریپی

احمد حسین بیگ<sup>۱</sup>، جواد سلیمان میگونی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۹	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷	
<b>واژگان کلیدی:</b> آنتن پهن باند میکرواستریپی، تابع گرین، روش ممان، معادلات انتگرالی سطحی-حجمی.	در این مقاله شیوه طراحی و تحلیل تمام موج یک ساختار آنتنی پهن باند میکرواستریپی، با استفاده از حل معادلات انتگرالی حجمی - سطحی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. توزیع جریانهای روی عناصر فلزی و زیرآیند دی الکتریکی با استفاده از بسط این جریانها به توابع پایه تقریب زده می شود. ضرایب مجهول از حل معادلات تلفیقی انتگرالی حجمی - سطحی قابل محاسبه است. نتایج مربوط به تلفات بازگشتی و الگوی تشعشعی آنتن پهن باند ۳،۵ تا ۵،۱۰ گیگاهرتز با استفاده از این روش مورد ارزیابی و صحت گذاری قرار گرفته است. نمونه ای از آنتن مورد نظر ساخته شده است و مقایسه نتایج آن با روش ارائه شده و نیز با تحلیل نرم افزار CST آورده شده است. نتایج رضایت بخش شبیه سازی و ساخت آنتن، از سرعت بالا و کارآمد بودن روش تحلیل آنتن حکایت دارد.

### ۱- مقدمه

گیری این روش محدودیت هایی از لحاظ تخصیص حافظه زیاد به علت مدل سازی  $PML^3$ ، ایجاد می نماید. روشی دیگر جهت تحلیل مسائل الکترومغناطیسی، فرمول بندی معادلات انتگرالی سطحی با استفاده از توابع داپادپک گرین مربوط به ساختار است. مزیت این روش کاهش تعداد مجهول های مسأله است زیرا تنها سطوح قسمت های فلزی ساختار مش بندی شده و بنابراین در حل معادله انتگرالی، نیازی به اختصاص دادن توابع پایه به تمام ساختار نبوده و کافی است توابع پایه به بخش هایی از ساختار که مش بندی شده اند اختصاص یابد. اما باید توجه داشت که این روش مستلزم پیدا کردن تابع گرین ساختار می باشد که معمولاً به جز برای ساختارهای متعارف و معمولی، کاری پیچیده و مشکل است. جهت تحلیل تمام موج ساختارهای الکترومغناطیسی، همچنین می توان از روش معادلات انتگرالی مرکب بهره جست. در

تحلیل ساختارهای گوناگون الکترومغناطیسی از جمله آنتن ها، با استفاده از روش های تحلیلی و عددی توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است [۴-۱]. به طور کلی روش های تحلیل مسائل الکترومغناطیسی را می توان به دو دسته شامل معادلات تفاضلی یا معادلات انتگرالی تقسیم کرد. هرکدام از این روش ها مزایا و معایبی دارند. به عنوان مثال، روش  $FDTD^2$  که یکی از روش های شناخته شده جهت تحلیل ساختارهای الکترومغناطیسی می باشد با بهره گیری از روش تفاضل محدود در حوزه زمان می تواند جهت بدست آوردن پاسخ در پهنای باندی وسیع استفاده شود. هر چند که بکار

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: javad.meiguni@semnan.ac.ir

۱. استادیار گروه مخابرات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات ۲. استادیار گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان.

<sup>۱</sup> Finite Difference Time Domain

<sup>۲</sup> Perfect Matched Layer

شود را می توان برای هر دو نوع سطوح بسته و باز به کار برد؛ این در حالی است که تنها برای سطوح بسته قادر به نوشتن معادلات MFIE می باشیم [۶]. هنگامی که در فرمول بندی معادله انتگرالی میدان الکتریکی، از توابع پتانسیل مغناطیسی برداری و پتانسیل الکتریکی استفاده می شود، به معادله حاصل، معادله انتگرالی مخلوط پتانسیل MPIE<sup>۵</sup> گفته می شود. دسته معادلاتی که از توابع پتانسیل کمکی بهره گرفته و به فرم معادلات انتگرالی مخلوط پتانسیل ختم می شوند، از لحاظ تکیینی ضعیفتر بوده و به راحتی بیشتری در روش ممان فرمول بندی می شوند [۶].

در این مقاله با استفاده از توابع پایه RWG<sup>۶</sup> و SWG<sup>۷</sup>، روابط مربوط به روش ممان جهت تحلیل یک ساختار فلز-دی الکتریک استخراج و بیان می شود. توابع پایه RWG و SWG، توابع پایه برداری مرتبه اول می باشند که منجر به بیان دقیق رفتار میدان می شوند. همچنین در این مقاله یک آنتن پهن باند طراحی و ساخته شده است و با استفاده از معادلات انتگرالی مرکب مورد تحلیل قرار گرفته است. مقایسه نتایج بدست آمده از این روش و نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار CST Microwave Studio و نیز نتایج اندازه گیری، حکایت از سرعت و دقت بالای روش ارائه شده دارد.

## ۲- تئوری

### ۲-۱- حل معادلات انتگرالی حجمی-سطحی

در این بخش، روابط مربوط به حل معادلات انتگرالی مخلوط پتانسیل حجمی-سطحی با استفاده از روش ممان در حوزه مکان ارائه می شود. در تمامی این معادلات انتگرالی، تابع گرین فضای آزاد استفاده شده است. به منظور انجام روش ممان، سطوح فلزی با استفاده از مثلث های خطی مش بندی شده و توابع پایه مثلثی RWG [۶]، جهت محاسبه جریان های مجهول روی لبه های

این روش، ساختارهای شامل مواد دی الکتریک و فلزی با استفاده از ترکیب معادلات انتگرالی حجمی و سطحی مدل می شوند. معادلات انتگرالی حجمی مربوط به محیط دی الکتریک بوده و معادلات انتگرالی سطحی بر روی سطوح فلزی اجرا می شوند. در این روش به علت مش بندی کل ساختار (تمام حجم و سطح ساختار)، می توان تمامی ساختارهای ناهمگن و با ابعاد محدود را تحلیل نمود. مزیت دیگر این روش استفاده از تابع گرین فضای آزاد در معادلات انتگرالی سطحی و حجمی است که سبب ساده تر شدن معادلات و روابط می شود. در این روش، از آنجایی که ممکن است سطوح فلزی با ماده دی الکتریک همپوشانی داشته باشند، ملاحظات خاصی جهت مش بندی دقیق ساختار بایستی در نظر گرفته شود.

یکی از روش های حل معادلات انتگرالی، استفاده از روش عددی ممان (MoM) است. در این روش، دستگاه معادلات انتگرالی ساختار الکترومغناطیسی که شامل جریان ها و بارهای سطحی و یا حجمی مجهول در حوزه فرکانس است به فرم ماتریسی تبدیل و حل می شود [۵]. از آنجا که در روش ممان منابع الکترومغناطیسی کمیات مورد توجه هستند، این روش در حل مسائل آنتنی و پراکندگی بسیار کارآمد است. انتخاب توابع بسط مناسب برای تخمین مجهولات مسأله در روش ممان که معمولاً از جنس جریانهای الکتریکی و مغناطیسی هستند، و همچنین نوشتن معادلات انتگرالی مناسب در شرایط مرزی مسأله ملاحظات خاص خود را دارد.

با توجه به نوع تحریک یک ساختار الکترومغناطیسی توسط منبع الکتریکی یا مغناطیسی، می توان معادله انتگرالی را به صورت معادله انتگرالی میدان الکتریکی EFIE<sup>۲</sup>، معادله انتگرالی میدان مغناطیسی MFIE<sup>۳</sup> و یا ترکیبی از این دو نوع یعنی معادله انتگرالی CFIE<sup>۴</sup> بیان کرد. معادلات انتگرالی که به فرم EFIE استخراج می

<sup>۱</sup> Method of Moment

<sup>۲</sup> Electric Field Integral Equation

<sup>۳</sup> Magnetic Field Integral Equation

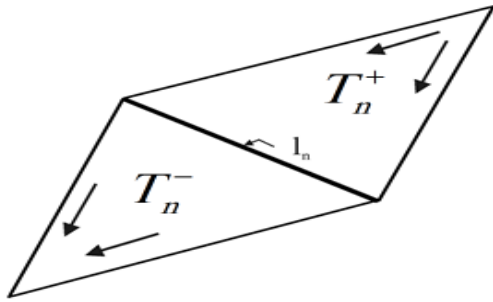
<sup>۴</sup> Combined Fields Integral Equation

<sup>۵</sup> Mixed Potential Integral Equation

<sup>۶</sup> Rao-Wilton-Glisson

<sup>۷</sup> Schaubert-Wilton-Glisson

صفر است. در شکل زیر تصویر این توابع پایه آورده شده است.



شکل ۱- تابع پایه RWG

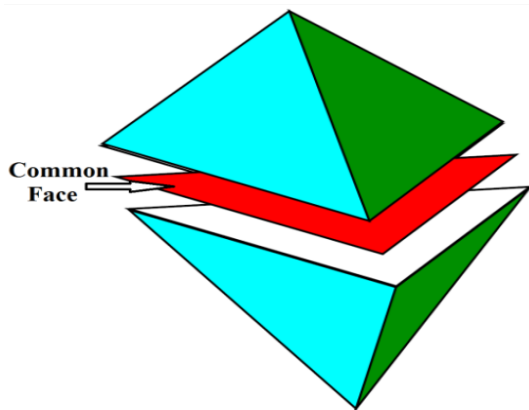
روابط مربوط به توابع پایه SWG نیز به صورت زیر است [۶].

$$\mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{a_n}{3V_n^+} \boldsymbol{\rho}_n^{+V}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^+ \\ \frac{a_n}{3V_n^-} \boldsymbol{\rho}_n^{-V}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^- \end{cases} \quad (5)$$

$$\nabla_V \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}) = \begin{cases} +\frac{a_n}{V_n^+}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^+ \\ -\frac{a_n}{V_n^-}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^- \end{cases} \quad (6)$$

$$(\mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}) = 1; \text{ on face } n \quad (7)$$

توابع پایه SWG مشابه توابع پایه RWG هستند، با این تفاوت که به جای در نظر گرفتن دو مثلث مجاور که با هم یک لبه مشترک دارند، بایستی دو سلول چهار وجهی مجاور که با هم یک وجه مشترک دارند (شکل ۲ Error! Reference source not found. در این صورت مجهولات مسأله را به وجه های مشترک بین چهار وجهی ها اختصاص می دهیم.



(الف)

مشترک بین دو سلول مجاور استفاده می شوند. همچنین، حجم دی الکتریک توسط سلول های چهاروجهی به گونه ای مش بندی می شود که سلول های مثلثی مربوط به سطوح فلزی بر وجوه بیرونی چهاروجهی ها منطبق شوند. در این حالت به منظور محاسبه چگالی شار الکتریکی مجهول، توابع پایه SWG [۶ و ۷]، به وجوه چهاروجهی ها اختصاص داده می شوند. بدین ترتیب می توان جریان سطحی یا  $\mathbf{J}_s$  و چگالی شار الکتریکی یا  $\mathbf{D}$  را با استفاده از توابع پایه متناظرشان به صورت زیر بسط داد:

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{N_M} I_n \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}), \quad (1)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{N_D} D_n \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}), \quad (2)$$

در روابط بالا،  $N_M$  تعداد لبه های غیر مرزی مربوط به سطوح فلزی مش بندی شده با مثلث و  $N_D$  تعداد وجوه مربوط به چهاروجهی های دی الکتریک هستند. ضرایب  $I_n$  و  $D_n$  ضرایب مجهولی هستند که با استفاده از فرمولبندی مخلوط پتانسیل سطحی-حجمی بدست می آیند.  $\mathbf{f}_n^V$  و  $\mathbf{f}_n^S$  به ترتیب بیانگر توابع پایه RWG و SWG می باشد. روابط مربوط به توابع پایه RWG به صورت زیر است [۶].

$$\mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \boldsymbol{\rho}_n^{+S}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \boldsymbol{\rho}_n^{-S}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^- \end{cases} \quad (3)$$

$$\nabla_S \cdot \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}) = \begin{cases} +\frac{l_n}{A_n^+}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^+ \\ -\frac{l_n}{A_n^-}; & \mathbf{r} \text{ in } T_n^- \end{cases} \quad (4)$$

که در آن، هر دو سلول مثلثی مجاور هم  $T_n^+$  و  $T_n^-$  دارای مساحت های  $A_n^+$  و  $A_n^-$  هستند، و  $l_n$  به عنوان لبه مشترک بین آن دو مثلث، در نظر گرفته می شود. همچنین  $\boldsymbol{\rho}_n^{+S} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_n^+$  بردار متصل کننده رأس آزاد مثلث  $T_n^+$  به نقطه مشاهده و  $\boldsymbol{\rho}_n^{-S} = \mathbf{r}_n^- - \mathbf{r}$  بردار متصل کننده نقطه مشاهده به رأس آزاد مثلث  $T_n^-$  هستند. تابع پایه در خارج از دو مثلث مجاور  $T_n^+$  و  $T_n^-$

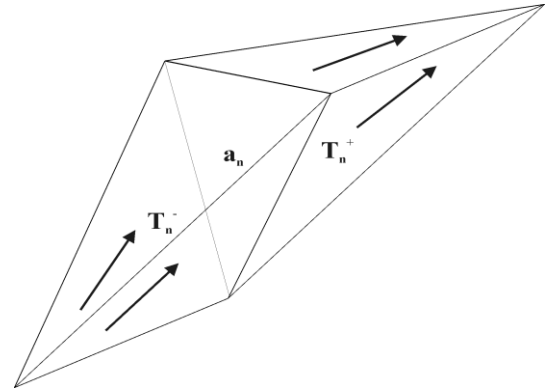
$$Z_{mm}^{DD} = \left[ \begin{array}{l} -\frac{\omega^2 \mu}{4\pi} \int_V \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}') K_n g \, d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ \left\{ \begin{array}{l} \int_V \int_V (\nabla \cdot \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r})) (\nabla \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}')) K_n g \, d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ + \int_V \int_V (\nabla \cdot \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r})) \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}') (\nabla K_n(\mathbf{r}')) g \, d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ - \int_{\Omega^V} \int_V (\mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}) (\nabla \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}')) K_n g \, d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ - \int_{\Omega^V} \int_V (\mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}) \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}') (\nabla K_n(\mathbf{r}')) g \, d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \end{array} \right\} \\ + \int_V \frac{1}{\hat{\epsilon}(\mathbf{r}')} \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}') d\mathbf{r} \end{array} \right] \quad (14)$$

که در آن  $\omega = 2\pi f$  فرکانس زاویه ای تحلیل ساختار می باشد. همان طور که از روابط مربوط به عناصر ماتریس امپدانس دیده می شود، بخش زیادی از محاسبات مربوط به محاسبه انتگرال های دوگانه سطحی-حجمی است. این انتگرال ها با استفاده از روش انتگرال گیری گوسی محاسبه می شوند.

پس از محاسبه ماتریس امپدانس، ضرایب مجهول در بسط چگالی شار الکتریکی  $D(\mathbf{r})$  در چهار وجهی های دی الکتریک و همچنین ضرایب مجهول در بسط جریان های سطحی  $\mathbf{J}_s$  روی فلز به دست می آیند. در این صورت می توان مشخصات مورد نظر در ساختار الکترومغناطیسی را محاسبه نمود.

### ۲-۲- روش مدل کردن پروب تغذیه

در تمامی آنتن ها با هر نوع تحریک از جمله تحریک تزویج مجاورتی و یا تزویج روزنه ای، از پروب کابل هم محور جهت تغذیه اولیه آنتن استفاده می شود. لذا جهت مدل سازی دقیق مسائل آنتنی، بایستی کابل هم محور نیز مدل شود. در عمل هادی بیرونی کابل هم محور به صفحه زمین متصل شده و هادی داخلی آن یا مستقیماً به عنصر تشعشع کننده فلزی آنتن و یا به خط انتقال تغذیه وصل می شود. در این بخش، سه روش مدل سازی پروب تغذیه ارائه می شود. در تمامی این روش ها، مدل مغزی داخلی کابل هم محور از یک طرف به صفحه زمین و از طرف دیگر به عنصر تشعشع کننده و یا به خط انتقال تغذیه آنتن متصل می شود. یکی از این روش ها، در نظر گرفتن و مش بندی استوانه ای فلزی با سطح مقطع دایره



(ب)

شکل ۲- تابع پایه SWG در نماهای مختلف

در نهایت پس از اجرای روش ممان، ماتریس زیر حاصل می شود که با استفاده از آن می توان مقادیر مجهول  $D$  و  $I$  را بدست آورد:

$$\begin{bmatrix} v^V \\ v^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{DD} & Z^{MD} \\ Z^{DM} & Z^{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ I \end{bmatrix} \quad (8)$$

در رابطه بالا،  $v^V$  و  $v^S$  مؤلفه های تحریک (ولتاژ) بوده و بر حسب توابع پایه به صورت زیر بیان می شوند:

$$v_m^V = \int_V \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}^i d\mathbf{r} \quad (9)$$

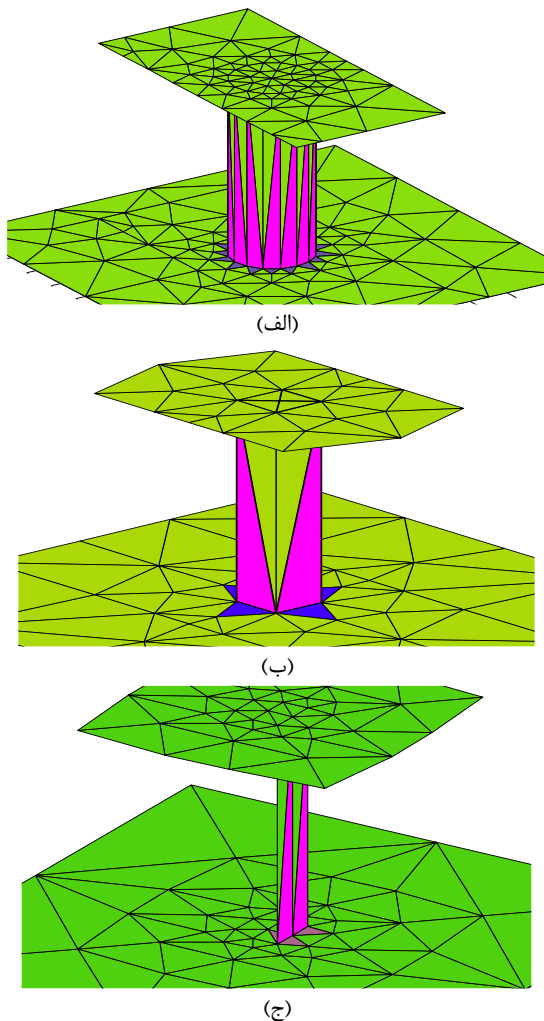
$$v_m^S = \int_V \mathbf{f}_m^S(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_{\tan}^i d\mathbf{r} \quad (10)$$

همچنین عناصر ماتریس امپدانس از روابط زیر بدست می آیند:

$$Z_{mn}^{MD} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{V_m} \int_{S_n} \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}') g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ - \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \left[ \int_{V_m} \int_{S_n} (\nabla \cdot \mathbf{f}_m^V(\mathbf{r})) (\nabla \cdot \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}')) g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \right. \\ \left. - \int_{\Omega_{S_n}} \int_{V_m} (\mathbf{f}_m^V(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}) (\nabla \cdot \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}')) g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \right] \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$Z_{mn}^{DM} = \left[ \begin{array}{l} -\frac{\omega^2 \mu}{4\pi} \int_{S_m} \int_{V_n} \mathbf{f}_m^S(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}') K_n(\mathbf{r}') g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ + \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[ \int_{S_m} \int_{V_n} (\nabla \cdot \mathbf{f}_m^S(\mathbf{r})) (\nabla \cdot \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}')) K_n(\mathbf{r}') g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \right. \\ \left. + \int_{S_m} \int_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{f}_m^S(\mathbf{r})) \mathbf{f}_n^V(\mathbf{r}') (\nabla K_n(\mathbf{r}')) g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \right] \end{array} \right] \quad (12)$$

$$Z_{mn}^{MM} = \left[ \begin{array}{l} \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{S_m} \int_{S_n} \mathbf{f}_m^S(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}') g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \\ - \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int_{S_m} \int_{S_n} (\nabla_s \cdot \mathbf{f}_m^S(\mathbf{r})) (\nabla_s \cdot \mathbf{f}_n^S(\mathbf{r}')) g d\mathbf{r}' d\mathbf{r} \end{array} \right] \quad (13)$$



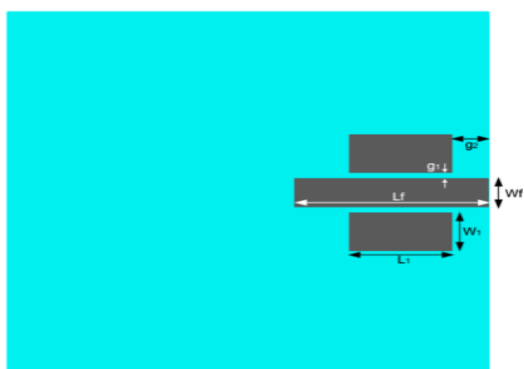
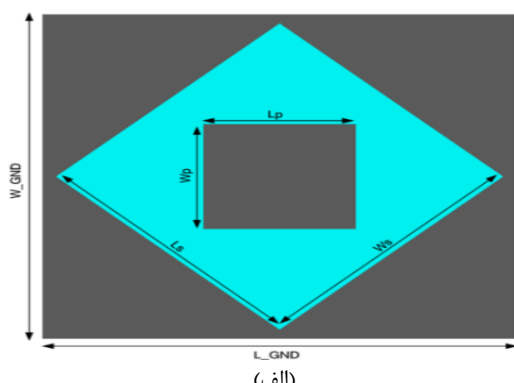
شکل ۳- روش های مدل سازی پروب تغذیه، (الف) مدل استوانه با سطح مقطع دایروی، (ب) مدل استوانه با سطح مقطع مربعی، (ج) مدل نواری.

### ۳- نتایج ساخت و اندازه گیری آنتن پهن باند

در این بخش به تحلیل یک آنتن پهن باند میکرواستریپ روزنه ای با یک عنصر تشعشع کننده پارازیتیک می پردازیم. ساختار این آنتن در شکل ۴ و ابعاد آن در جدول ۱ آورده شده است. این آنتن توسط یک خط انتقال میکرواستریپ ۵۰ اهم که زیر دی الکتریک زیر آیندی به ارتفاع ۰,۵۰۸ میلیمتر قرار گرفته است تغذیه می شود. خط انتقال نیز توسط یک پروب کابل هم محور که بین خط و صفحه زمین متصل شده، تحریک می شود. بر روی صفحه زمین، یک روزنه مربعی شکل ایجاد شده است.

ای با قطر و طولی برابر با قطر و طول هادی داخلی کابل هم محوری است که در طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که این مدل دقیقاً بیان کننده شکل ظاهری هادی داخلی پروب تغذیه است، نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده با استفاده از این روش از دقت بالایی برخوردار می باشند. در روشی دیگر می توان هادی داخلی استوانه ای شکل با سطح مقطع دایره ای را با استوانه ای با سطح مقطع مربعی تقریب زده و مدل سازی کرد. در این حالت ضلع مربع، برابر با قطر سطح مقطع دایره ای استوانه در نظر گرفته می شود. با وجود اینکه در مدل سازی شکل پروب تغذیه در این روش از تقریب استفاده شده است، ولی نتایج حاصل از استفاده از مش بندی پروب استوانه ای با سطح مقطع مربعی نیز بسیار دقیق خواهند بود. روش دیگر مدل سازی پروب تغذیه، استفاده از نواری دو بعدی با عرضی برابر با دو برابر قطر هادی داخلی کابل هم محور است [۸]. به علت استفاده از نواری دو بعدی در این روش، پیاده سازی و مش بندی این نوع پروب ساده تر از دو روش قبل انجام می پذیرد. شایان ذکر است که در هر سه روش ذکر شده، لبه های پروب مدل شده در محل اتصال آن به صفحه زمین و همچنین خط انتقال یا عنصر تشعشع کننده، بایستی بر روی لبه ای در هر کدام از صفحات اتصالی منطبق شود. پس از انتخاب یکی از مدل های بیان شده جهت پروب و مش بندی آن، به لبه هایی از پروب که به صفحه زمین متصل شده اند، ولتاژ یک ولت اختصاص می دهیم. به این ترتیب، ماتریس تحریک آنتن که در روش ممان به آن نیازمندیم، تشکیل می شود. در شکل ۳ سه روش مدل سازی پروب نشان داده شده است. در این شکل ها، صفحه زیرین صفحه زمین است.

شایان ذکر است که تعداد سلول های چهاروجهی ایجاد شده توسط نرم افزار CST، ۱۸۹،۶۳۷ بوده که در مقایسه با تعداد سلول های ایجاد شده توسط روش بیان شده بسیار بیشتر می باشد. همچنین یک نمونه از این آنتن ساخته شده (شکل ۵) و مورد تست و اندازه گیری قرار گرفته است.



(ب)

شکل ۴- آنتن میکرواستریپ روزنه ای با عنصر تشعشع کننده پارازیتیک؛ (الف) دید از بالا، (ب) دید از پشت.

جدول ۱- ابعاد آنتن میکرواستریپ روزنه ای با عنصر تشعشع کننده پارازیتیک.

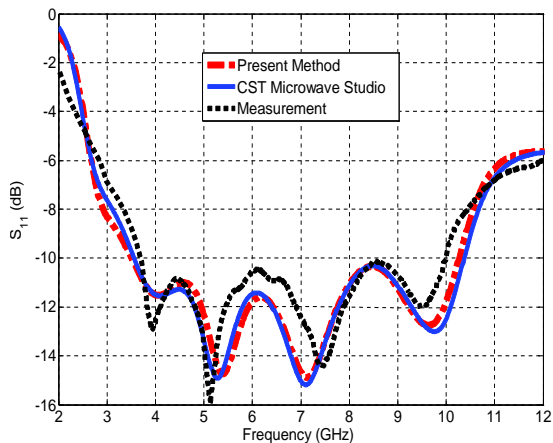
جهت افزایش پهنای باند، یک عنصر تشعشع کننده پارازیتیک مربعی وسط روزنه قرار گرفته است. همچنین جهت بهبود تطبیق امپدانس آنتن، دو عنصر فلزی پارازیتیک در دو طرف خط انتقال میکرواستریپ قرار گرفته اند. از آنجایی که ساختار این آنتن متشکل از ماده دی الکتریک و سطوح فلزی است، از معادلات حجمی- سطحی مرکب ( $VSIE^1$ ) و روش ممان به همراه توابع پایه RWG و SWG جهت تحلیل آن استفاده می شود [۹-۱۰]. برای این منظور، حجم دی الکتریک را توسط سلول های چهار وجهی و سطوح فلزی را توسط سلول های مثلثی مش بندی می کنیم. جهت دستیابی به پاسخی دقیق، گوشه های روزنه و لبه های عنصر تشعشع کننده و خط انتقال، با مثلث های کوچک تری نسبت به بقیه ساختار مش بندی شده اند. از آنجایی که سلول های مثلثی مربوط به سطوح فلزی، بر وجوه بیرونی چهاروجهی های مربوط به حجم دی الکتریک منطبق هستند، مش بندی دی الکتریک نیز غیریکنواخت می باشد. همچنین، مش بندی ایجاد شده، برای تمامی فرکانس های تحلیل یکسان می باشد. انتخاب ابعاد سلول ها، از قاعده خاصی تبعیت نکرده و یک انتخاب مناسب می تواند با روش آزمون و خطا صورت پذیرد. تجربه نشان داده است، در حل عددی ساختارهای الکترومغناطیسی، لازم است تا قسمت های کوچکتر (مانند مغزی پروب کواکسیال) و نیز ناپیوستگیهای خطوط انتقال با مثلث های کوچکتری مش بندی شوند.

ساختار مش بندی شده طرح پیش رو، از ۴۹۴۴ سلول چهار وجهی و ۱۴۰۲ سلول مثلثی مرتبط با سطوح فلزی تشکیل شده است که منجر به ایجاد تعداد ۱۱۶۵۰ وجه بین سلول های چهار وجهی و ۱۹۲۶ لبه غیر مرزی بین مثلث های فلزی می شود. جهت بررسی صحت و دقت این روش، آنتن مذکور را توسط نرم افزار CST شبیه سازی نموده و پاسخ های حاصل از این نرم افزار را با پاسخ های به دست آمده از روش VSIE مقایسه نمودیم.

<sup>1</sup> Volume Surface Integral Equation

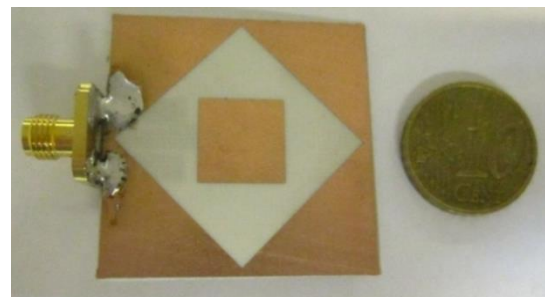
افزار CST به ترتیب برابر با  $4.43\text{dB}$  و  $5.79\text{dB}$  به دست می آید. همان گونه که مشاهده می شود، تطابق بسیار خوبی بین پاسخ های حاصل از روش ارائه شده، نرم افزار CST و اندازه گیری وجود دارد. توزیع جریان سطحی الکتریکی روی آنتن که با استفاده از روش تحلیل ارائه شده به دست آمده، در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین در این شکل، نماهای بالا و پایین آنتن مش بندی شده آورده شده است.

بر حسب تعداد نقاط مورد تحلیل در بدست آوردن پاسخ امپدانس ورودی آنتن و یا الگوی تشعشی آن، می توان سرعت این روش را در مقایسه با پکیج های تجاری موجود مانند CST مقایسه کرد. بعنوان نمونه با یک کامپیوتر با مشخصات پردازشگر  $2.86\text{ GHz}$  Core ۲ Quad و با تخصیص ۶۰ نقطه در تقسیمات  $\theta$ ، می توان منحنی های پترن تشعشی را در حدود ۷ دقیقه بدست آورد. از لحاظ حافظه اشغالی نیز طرح پیش رو حدود  $300\text{ MB}$  از حافظه RAM سیستم را اشغال می کند (که در مقایسه با پکیج های تجاری که بیش از  $3\text{ GB}$  از حافظه را اشغال می کنند بسیار کار آمد است).

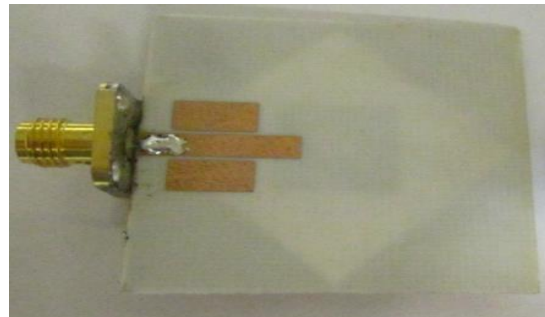


شکل ۶- تلف بازگشتی آنتن مایکرواستریپ روزنه ای با عنصر تشعشع کننده پارازیتیک.

W_GND	۳۷mm
L_GND	۳۷mm
Ws	۲۴.۷mm
Ls	۲۴.۷mm
Wp	۱۲mm
Lp	۱۲mm
Wf	۳mm
Lf	۱۵mm
W1	۴mm
L1	۸mm
g1	۰.۵mm
g2	۲.۸mm



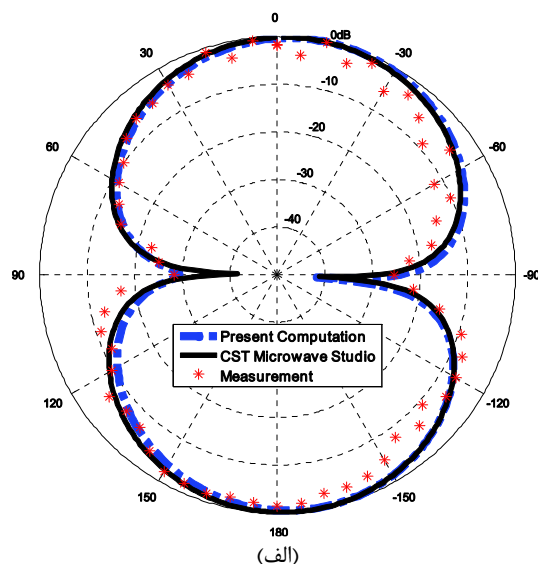
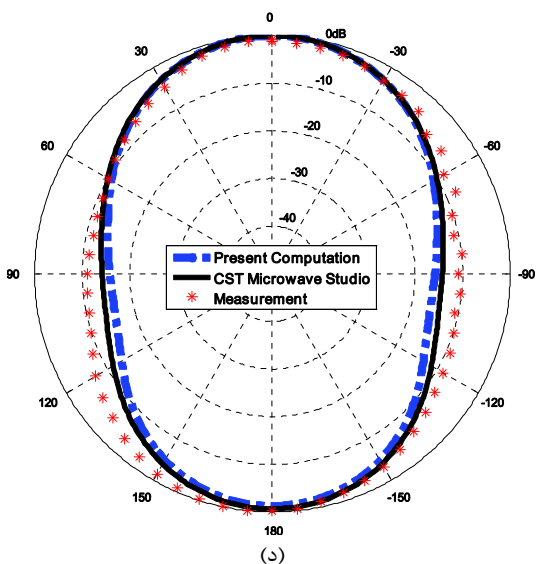
(الف)



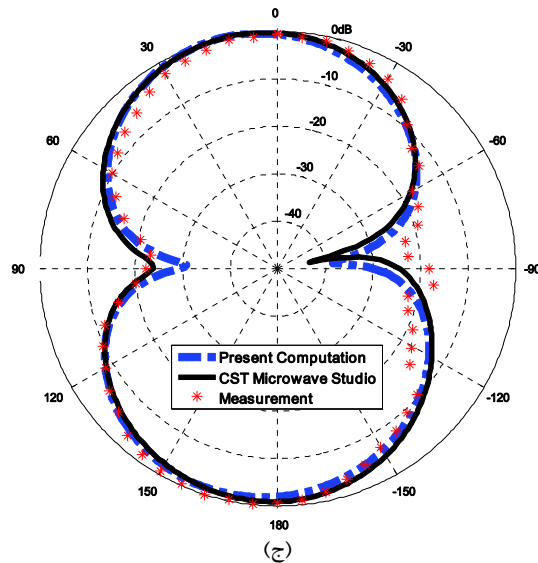
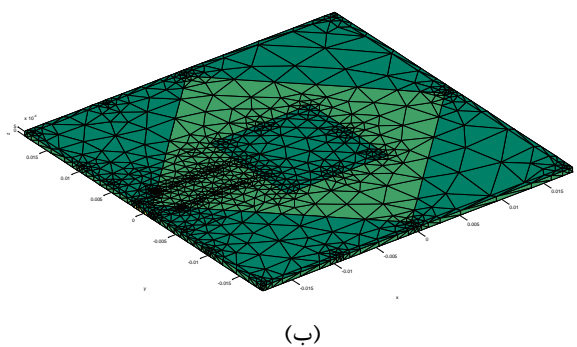
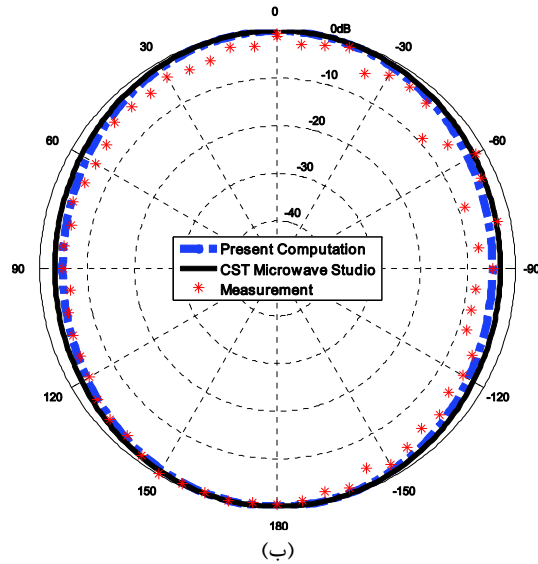
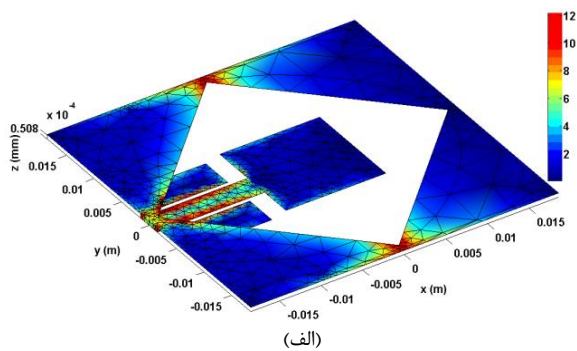
(ب)

شکل ۵- آنتن پهن باند ساخته شده: (الف) تصویر روی آنتن، (ب) تصویر پشت آنتن

شکل ۶ تلف بازگشتی و شکل ۷ الگوهای تشعشی آنتن را نشان می دهند. بهره آنتن با استفاده از حل معادلات انتگرالی VSIE در فرکانس های  $4\text{ GHz}$  و  $7\text{ GHz}$  به ترتیب برابر با  $4.58\text{ dB}$  و  $5.51\text{ dB}$  و با استفاده از نرم



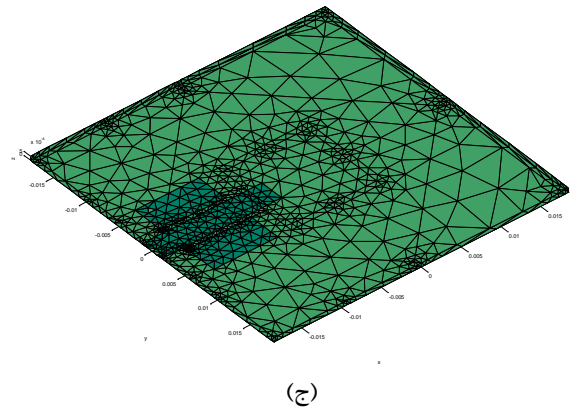
شکل ۷- الگوهای تشعشی آنتن میکرواستریپ روزنه ای با عنصر تشعشع کننده پارازیتیک؛ (الف) در صفحه E و  $f=4\text{GHz}$  (ب) در صفحه H و  $f=4\text{GHz}$  (ج) در صفحه E و  $f=7\text{GHz}$  (د) در صفحه H و  $f=7\text{GHz}$



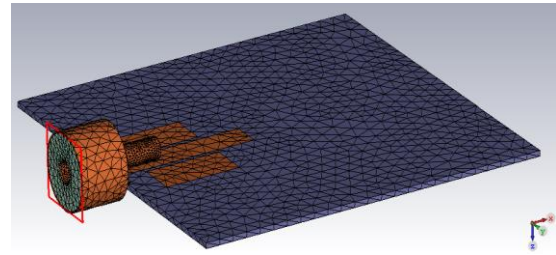


#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به معرفی روش های تحلیل ساختارهای الکترومغناطیسی پرداخته شد. سپس به بیان روش حل ساختارهای الکترومغناطیسی با استفاده از مش بندی سطح و حجم ساختار و بکارگیری تابع گرین فضای آزاد پرداخته شد. برای مسأله پیش رو که یک ساختار آنتنی با پهنای باند امیدانسی بین ۳,۵ تا ۱۰,۵ گیگاهرتز است، این روش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از انجام شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار CST در مقایسه با نتایج حاصل از کدهای رایانه ای و نمونه ساخته شده محصول، از سرعت عمل و دقت روش ارائه شده حکایت دارد.



(ج)



(د)

شکل ۸- (الف) توزیع جریان سطحی الکتریکی روی آنتن مایکرواستریپ روزنه ای با عنصر تشعشع کننده پارازیتیک، (ب) آنتن مش بندی شده دید از بالا، (ج) آنتن مش بندی شده دید از پایین، (د) نمای مش بندی شده آنتن در نرم افزار CST.

#### ۵- مراجع

- [1] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, IEEE Press Series on Electromagnetic Waves, ۱۹۹۵.
- [2] C. T. Tai, *Dyadic Green's Functions in Electromagnetics Theory*, IEEE Press Series on Electromagnetic Waves, 1994.
- [3] J. V. Bladel, *Electromagnetic Fields*, second edition, IEEE press, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [4] S. K. Khamas, "Electromagnetic Radiation by Antennas of Arbitrary Shape in a Layered Spherical Media," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 12, pp. 3827–3834, Dec. 2009.
- [5] W. C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2008.
- [6] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 30, pp. 409–418, May 1982.
- [7] D. H. Schaubert, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "A tetrahedral modeling method for electromagnetic scattering by arbitrarily shaped inhomogeneous dielectric bodies," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-32, no. 1, pp. 77-85, January 1984.
- [8] J. P. Damiano and A. Papiernik, "Survey of analytical and numerical models for probe-fed microstrip antennas," *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, Vol. 141, no. I, pp. 15–21, Feb. 1994.
- [9] P. V. Betziosa, I. S. Karanasioub, and N. K. Uzunogluc, "Analysis of a dielectric resonator antenna by applying a combined semi-analytical method and simulation," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol.21, issue 14, pp. 1983-1994, 2007.

- [10] T. Fortakia, L. Djouaneb, F. Chebarab, and A. Benghalia, "Radiation of a rectangular microstrip patch antenna covered with a dielectric layer," *International Journal of Electronics*, vol.95, issue 9, pp. 989-998, ۲۰۰۸.