

# تسریع روش SEMN برای تحلیل آنتنهای میکرواستریپ محدود

احد توکلی  
دانشیار

عظیم فرد  
دانشجوی دکتری

دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

روش SEMN (Surface Equivalence principal and Multiport Network) روشی با توانایی منحصر به فرد جهت تحلیل آنتنهای میکرواستریپ با هر شکل و هر نوع دی الکتریک از طریق محاسبه میدانهای الکترومغناطیسی مماسی سطوح مرزی است که از به هم آمیختن اصل تعادل سطحی (Surface Equivalence) و تئوری تحلیل شبکه‌های چند دهانه‌ای (Multiport Network Theory) بدست آمده است. اگر چه تنها تقریب به کار گرفته شده در این روش، قطعه‌بندی سطوح مرزی اجسام همگن تشکیل دهنده هندسه مساله با قطعات مستطیلی است، اما به علت کندی محاسبه تزویج متقابل تمامی قطعات مرزی با همدیگر تحلیل ساختارهای با ابعاد بزرگتر از طول موج از لحاظ مدت زمان انجام محاسبات غیر اقتصادی جلوه می‌کند. در این مقاله با هدف فراهم نمودن امکان ساختارهای بزرگ هندسی، به ویژه آنتنهای آرایه محدود میکرواستریپ، فرمولبندیهای EFIE (Electric Field Integral Equation) و MFIE (Magnetic Field Integral Equation) روش SEMN موشکافی شده و دو راه حل مناسب تسریع محاسبات ارائه شده است. بر اثر اعمال این روشها سرعت محاسبات لاقط پنجاه برابر گشته است.

## کلمات کلیدی

آنتنهای میکرواستریپ، آنتن بیج میکرواستریپ، تابع گرین فضائی دپادیک، آنتنهای آرایه میکرواستریپ

## Modification of the SEMN Method for Analysis of Finite Microstrip Antennas

Azim Fard  
Ph.D. Student

A. Tavakoli  
Associate Professor

Electrical Engineering Department,  
Amirkabir University of Technology

### Abstract

*The Surface Equivalence principle and Multiport Network method (SEMN) has been previously developed for analysis of arbitrary shaped printed antennas. The SEMN method calculates boundaries tangential field components using the surface equivalence principle and multiport network theory. However, the computation time for analysis of multi-wavelength large microstrip antennas by the SEMN method, in spite of its generality, makes it impractical. Here, the electric field integral equation (EFIE) and magnetic field integral equation (MFIE) of SEMN method are modified and the two new techniques which speed up the calculation by fifty times the original SEMN approach is introduced. This enables us to analyze large structures and arrays. The modified SEMN method is then applied to*

two microstrip patch antennas and the calculated results are compared with measurements and other methods. The analysis is in good agreement with other solutions.

## Keywords

Microstrip antennas, Microstrip patch antenna, spatial domain dyadic Green's function, EFIE, MFIE, SEMN, Microstrip array antennas

## مقدمه

آنتنهای میکرواستریپ به سبب سبکی، سادگی نسبی ساخت، تطابق پذیری بالا با محیط پیرامون خود، ارزانی نسبی و کارایی کافی از دیر باز مورد توجه مهندسان و بازار مصرف بوده است. به همین علت روشهای متعددی برای تحلیل اینگونه آنتنها به کار گرفته شده است. در صورتیکه روشهای تحلیل تمام موج ساختارهای میکرواستریپی به معنای دقیق خود، یعنی بدون در نظر گرفتن هیچگونه فرض ساده کنندگی، مانند صفحه زمین با ابعاد نامحدود، ضخامت کم زیرآیند، شرط مرزی دیواره مغناطیسی و ... در نظر بگیریم، دیده می شود که علی رغم مقالات متعدد حاوی تحلیل تمام موج برای ناحیه راه دور، تحلیل تمام موج حاوی نتایج میدان راه نزدیک فقط در یکی دو مقاله با استفاده از روش FDTD ارائه گردیده است [۱ و ۲]. حتی با استفاده از روشهای تقریبی نظیر بسط مدی (Modal Expansion) تنها در یک مقاله گزارش شده است [۳]. علاوه بر این در هیچیک از مقالات فوق فرمولبندی کلی برای تحلیل محیط مرکب دلخواه ارائه نشده است. همچنین تعداد بسیار زیاد مجهولات و محاسبات، حتی برای ابعاد الکتریکی محدود، به عنوان مهمترین نقص این روشها ذکر گردیده است [۴]. روش SEMN در بر دارنده اطلاعات راه نزدیک و دور آنتن بدون محدودیت هندسی است که در رساله دکترای آقای دکتر توکل همدانی مفصلاً توضیح داده شده و بر روی چند منعکس کننده و آنتن با تغذیه مستقیم و مجاورتی (slot coupled) به شکل موفقیت آمیزی اعمال شده است [۵ و ۶]. در این مقاله نخست روش SEMN اجمالاً توضیح داده شده و سپس تکنیکهای به کار رفته جهت تسریع آن، بدون آنکه بر جامعیت روش لطمه ای وارد شود، توضیح داده می شود. کارایی و یکسان بودن نتایج تولید شده توسط روشهای ذکر شده، با اعمال بر روی دو نمونه آنتن میکرواستریپ و مقایسه آن با روش اولیه به اثبات رسیده است.

## ۱- روش SEMN

روش SEMN مشتمل بر دو دسته عملیات تحلیل الکترومغناطیسی و تحلیل شبکه ای می باشد [۵]. در مرحله تحلیل الکترومغناطیسی، ماتریسهای ادمیتانس و منبع میدان مغناطیسی یا ماتریسهای امپدانس و منبع میدان الکتریکی قطعات، بسته به اینکه فرمولبندی MFIE یا EFIE به کار گرفته شده باشد، بدست می آید. در مرحله تحلیل شبکه ای با اعمال شرایط مرزی الکترومغناطیسی مماسی در سطوح مرزی و ترکیب ماتریسهای مشخصه اجسام دی الکتریک مختلف، کلیه میدانهای الکترومغناطیسی مماسی دو سوی سطوح مرزی بدست می آید. این میدانهای مماسی در اقدام بعدی می توانند برای تعیین میدانهای الکترومغناطیسی راه دور و نزدیک درون و برون سطوح مرزی به کار روند. جزئیات روش به قرار زیر است: فضای کلی  $V$  را متشکل از تعدادی جسم دی الکتریک خطی، همسانگرد و همگن که هر کدام می توانند منابع جریان الکتریکی و مغناطیسی مستقل در درون سطح مرزی خود داشته باشند در نظر بگیرید، محاسبات EFIE و MFIE به ترتیب بر مبنای دو معادله انتگرالی زیر استوار خواهد بود:

$$\mathbf{n}(\bar{r}) \times \bar{\mathbf{E}}(\bar{r}) = \mathbf{n}(\bar{r}) \times \left[ \iint_S \left[ \bar{\mathbf{G}}_e(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{\mathbf{J}}_e(\bar{r}') + \bar{\mathbf{G}}'_e(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{\mathbf{M}}_e(\bar{r}') \right] ds' + \bar{\mathbf{E}}_S(\bar{r}) \right] \quad i$$

$$\mathbf{n}(\bar{r}) \times \bar{\mathbf{H}}(\bar{r}) = \mathbf{n}(\bar{r}) \times \left[ \oint_S \left[ -\bar{\mathbf{G}}'_e(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{\mathbf{J}}_e(\bar{r}') + \frac{\varepsilon}{\mu} \bar{\mathbf{G}}_e(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{\mathbf{M}}_e(\bar{r}') \right] ds' + \bar{\mathbf{H}}_s(\bar{r}) \right] \quad \text{ii}$$

که در آن  $\bar{\mathbf{G}}'_e(\bar{r}, \bar{r}')$  و  $\bar{\mathbf{G}}_e(\bar{r}, \bar{r}')$  توابع گرین الکتریکی و مغناطیسی فضائی دیادیکی،  $\bar{\mathbf{E}}_s(\bar{r})$  و  $\bar{\mathbf{H}}_s(\bar{r})$  میدان تحریک الکتریکی و مغناطیسی القاء شده توسط منابع جریان الکتریکی و مغناطیسی مستقل درونی،  $\mathbf{n}(\bar{r})$  بردار عمود بر سطح به سمت داخل،  $\bar{\mathbf{M}}_e(\bar{r}) = -\mathbf{n}(\bar{r}) \times \bar{\mathbf{E}}(\bar{r})$  و  $\bar{\mathbf{J}}_e(\bar{r}) = \mathbf{n}(\bar{r}) \times \bar{\mathbf{H}}(\bar{r})$  منابع جریان الکتریکی و مغناطیسی معادل سطحی بر روی سطح درونی  $S$ ،  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  و  $\mu = \mu_0 \mu_r$  پارامترهای ساختاری جسم همگن درون  $S$  و  $\bar{\mathbf{E}}(\bar{r})$  و  $\bar{\mathbf{H}}(\bar{r})$  میدانهای الکتریکی و مغناطیسی نقاط  $\bar{r}$  واقع شده بر روی سطح داخلی مرز  $S$  هستند. هر کدام از معادلات انتگرالی ۱ و ۲ به تنهایی قادر به حل مسأله آنتن بوده و حاوی تمام میدانهای الکترومغناطیسی مماسی می باشد. برای حل معادله های انتگرالی فوق باید سطوح مرزی که اعم از هادی یا دی الکتریک، به قطعات مستطیلی شکل با ابعاد کوچکتر از  $0.03\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$  که هر کدام دارای دستگاه مختصات محلی با محور  $z$  عمود بر قطعه می باشد، تقسیم شود. اگر  $N$  تعداد کل قطعات سطوح مرزی  $S$  باشد معادلات انتگرالی ۱ و ۲ به شکل ماتریسی زیر باز نویسی می شوند:

$$[\mathbf{E}_t] = [\mathbf{G}_e][\mathbf{H}_t] + [\mathbf{G}'_e][\mathbf{E}_t] + [\mathbf{E}_s] \quad \text{iii}$$

$$[\mathbf{H}_t] = [\mathbf{G}'_e][\mathbf{H}_t] - \frac{\varepsilon}{\mu} [\mathbf{G}_e][\mathbf{E}_t] + [\mathbf{H}_s] \quad \text{iv}$$

معادلات خطی ۳ و ۴ برای هر دو طرف سطح مرزی  $S$  نوشته شده و پس از ترکیب شدن با همدیگر در نتیجه اعمال شرایط مرزی مماسی، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی مماس بر سطح داخلی و خارجی مرز  $S$  را تولید خواهد نمود. اجزای معادلات ۳ و ۴ به ترتیب زیر هستند:

$$[\mathbf{E}_t] = [[\mathbf{E}_{ij}]]_{N \times 1}, [\mathbf{H}_t] = [[\mathbf{H}_{ij}]]_{N \times 1}, [\mathbf{E}_s] = [[\mathbf{E}_{sj}]]_{N \times 1}, [\mathbf{H}_s] = [[\mathbf{H}_{sj}]]_{N \times 1} \quad \text{v}$$

$$[\mathbf{G}_e] = [[\mathbf{G}_{ej}]]_{N \times N}, [\mathbf{G}'_e] = [[\mathbf{G}'_{ej}]]_{N \times N} \quad \text{vi}$$

$$[\mathbf{E}_{ij}] = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{xj}(o_j) \\ \mathbf{E}_{yj}(o_j) \end{bmatrix}, [\mathbf{H}_{ij}] = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{xj}(o_j) \\ \mathbf{H}_{yj}(o_j) \end{bmatrix}, [\mathbf{E}_{sj}] = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{sxj}(o_j) \\ \mathbf{E}_{syj}(o_j) \end{bmatrix}, [\mathbf{H}_{sj}] = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{sxj}(o_j) \\ \mathbf{H}_{syj}(o_j) \end{bmatrix} \quad \text{vii}$$

$$[\mathbf{G}_e]_{im} = -j60\pi\mu_r(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{z}_i)[I_m] \left\{ \int_{S_i} \bar{\mathbf{g}}(R_x, R_y, R_z, \varepsilon_r, \mu_r) ds_i \right\} [s_i] \quad \text{viii}$$

$$[\mathbf{G}'_e]_{im} = -0.5\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{z}_i)[I_m] \left\{ \int_{S_i} \bar{\mathbf{g}}'(R_x, R_y, R_z, \varepsilon_r, \mu_r) ds_i \right\} [s_i] \quad \text{ix}$$

$$[\mathbf{E}_s]_m = -j0.2\pi\mu_r f [I_m] \left\{ \int_{L_s} \bar{\mathbf{g}}(R_x, R_y, R_z, \varepsilon_r, \mu_r) dl_s \right\} [l_s] \quad \text{x}$$

$$[\mathbf{H}_s]_m = -\frac{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}{600} f [I_m] \left\{ \int_{L_s} \bar{\mathbf{g}}'(R_x, R_y, R_z, \varepsilon_r, \mu_r) dl_s \right\} [l_s] \quad \text{xi}$$

که در آن:

$$\overline{\overline{g}}(R_x, R_y, R_z, \epsilon_r, \mu_r) = \left( \left( 1 - \frac{1}{kR} \left( j + \frac{1}{kR} \right) \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{R^2} \left( 1 - \frac{3}{kR} \left( j + \frac{1}{kR} \right) \right) \begin{bmatrix} \overline{R}_x^2 & \overline{R}_x \overline{R}_y & \overline{R}_x \overline{R}_z \\ \overline{R}_y \overline{R}_x & \overline{R}_y^2 & \overline{R}_y \overline{R}_z \\ \overline{R}_z \overline{R}_x & \overline{R}_z \overline{R}_y & \overline{R}_z^2 \end{bmatrix} \right) \frac{e^{-jkR}}{R} \quad .xii$$

$$\overline{\overline{g}}'(R_x, R_y, R_z, \epsilon_r, \mu_r) = \left( \left( j + \frac{1}{kR} \right) \begin{bmatrix} 0 & -\overline{R}_z & \overline{R}_y \\ \overline{R}_z & 0 & -\overline{R}_x \\ -\overline{R}_y & \overline{R}_x & 0 \end{bmatrix} \right) \frac{e^{-jkR}}{R^2} \quad .xiii$$

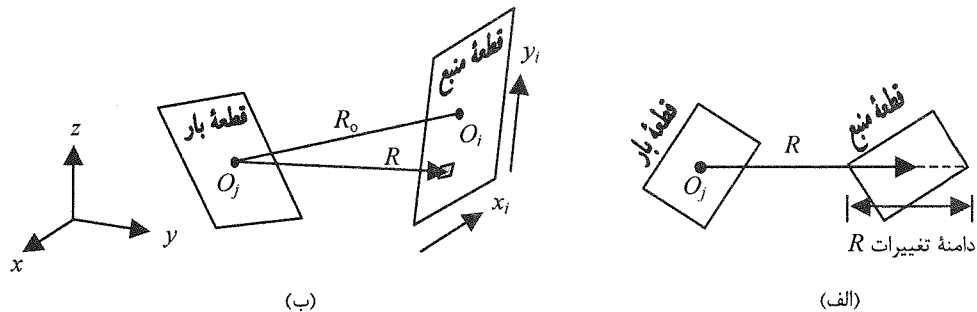
$$, k = 2\pi\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad , R = [R_x^2 + R_y^2 + R_z^2]^{1/2} \quad , R_x = x_{o_m} - x_i \quad , R_y = y_{o_m} - y_i \quad , R_z = z_{o_m} - z_i \quad ds_i = dx_i dy_i \quad .xiv$$

$$[s_i] = \begin{bmatrix} y_{ix} - x_{ix} \\ y_{iy} - x_{iy} \\ y_{iz} - x_{iz} \end{bmatrix} \quad , [I_m] = \begin{bmatrix} x_{mx} & x_{my} & x_{mz} \\ y_{mx} & y_{my} & y_{mz} \end{bmatrix} \quad , [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sx} \\ I_{sy} \\ I_{sz} \end{bmatrix} \quad .xv$$

در روابط فوق اندیسه‌های  $i$  و  $m$  به ترتیب مربوط به قطعات منبع و بار،  $S_i$  سطح قطعه نام،  $n_i$  بردار یکه عمود بر قطعه نام به سمت داخل،  $L_s$  پروب جریان الکتریکی،  $f$  فرکانس به مگاهرتز، اندیسه‌های مختصاتی  $x$  و  $y$  در رابطه  $\gamma$  مربوط به دستگاه مختصات محلی هر قطعه و اندیسه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  در روابط ۸ تا ۱۵ مربوط به دستگاه مختصات عمومی است. در رابطه ۱۵ عناصر  $a_{pq}$  ماتریسه‌های  $[s_i]$  و  $[I_m]$  بیانگر تصویر بردار یکه  $a$  دستگاه مختصات محلی قطعه نام در راستای محور  $q$  از دستگاه مختصات عمومی و عناصر بردار  $[I_s]$  تصویر بردار یکه پروب جریان در راستای محورهای دستگاه مختصات عمومی است. تمام ابعاد هندسی استفاده شده در روابط فوق نسبت به طول موج فضای آزاد نرمالیزه شده‌اند. تزویج خودی قطعات، زمانیکه در روابط ۸ و ۹،  $i = m$  باشد، به صورت تحلیلی محاسبه شده است [۷ و ۶]. بایستی توجه داشت که هر سطحی دارای دو سو بوده و خارج از هر سطح بسته، درون سطح یا سطوح اجسام همگن دیگر خواهد بود. در عین حال سطح داخلی و بیرونی خارجیت‌ترین سطح در فاصله بینهایت قرار گرفته و نیازی به قطعه بندی نخواهد داشت. ویژگی مهم ماتریسه‌های مشخصه  $[G_e]_{im}$  و  $[G_e']_{im}$  ناحیه درونی هر جسم دی‌الکتریک همگن، استقلال آن از مشخصات سایر اجسام دی‌الکتریک شرکت کننده در تحلیل می‌باشد. به همین علت از آنها می‌توان برای تحلیل ساختارهای دیگری که در آن به کار گرفته خواهند شد استفاده کرد. از طرف دیگر در یک هندسه  $N$  قطعه‌ای محاسبه ماتریسه‌های تزویج  $[G_e]_{im}$  و  $[G_e']_{im}$  به علت نیاز به محاسبه  $2N(9N-2)$  عدد انتگرال دوگانه عددی وقتگیرترین بخش از محاسبات الکترومغناطیسی می‌باشد به گونه‌ای که بدون در نظر گیری تقارن ساختاری و قطعه بندی یکنواخت سطوح مرزی، تحلیل یک آنتن تک عنصره چندین روز به طول خواهد انجامید.

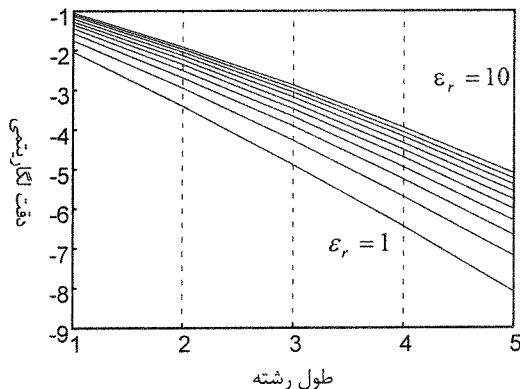
## ۲- تسریع روش SEMN

برای غلبه بر کندی محاسبات تزویج متقابل قطعات دو روش به شکل موفقیت‌آمیزی به کار بسته شده است. در روش اول تلاش شده است تا انتگرالهای دوگانه روابط ۸ و ۹ به صورت غیر عددی برآورد شوند. پیچیدگی توابع گرین دیاپیکلی به اندازه‌ای است که انتگرالهای دوگانه محدود در روابط ۸ و ۹ فاقد هر گونه پاسخ تحلیلی بسته هستند. بنابر این باید تقریب مناسبی اعمال شود. بزرگترین مانع جهت حل تحلیلی انتگرالهای دوگانه حضور ضریب نمائی  $e^{-jkR}$  در تابع گرین است که خوشبختانه با به کارگیری تدبیر ویژه‌ای می‌توان آنرا با یک سری تیلور کوتاه جایگزین نمود. در شکل ۱ هندسه محاسبه تزویج متقابل عنصر نام و نام به تصویر کشیده شده است.



شکل (۱-الف) دامنه تغییرات  $R$  به هنگام انتگرال گیری و ب- هندسه محاسبه توزیع متقابل عنصر  $\Delta m$  و  $\Delta z$ .

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است تغییرات فاصله مرکز قطعه بار و نقطه انتگرال گیری روی قطعه منبع در بدترین حالت محدود به قطر قطعه منبع یعنی  $0.03\sqrt{2}\lambda_0$  می باشد. بنابراین  $R$  را می توان به دو جزء ثابت  $R_0$  و متغیر  $\Delta R = R - R_0$  تفکیک کرده و بخش ثابت را به صورت یک ضریب نمائی ساده  $e^{-jkR_0}$  از ضریب نمائی  $e^{-jkR}$  خارج کرد. مقدار ثابت  $R_0$  برابر با نصف مجموع مقادیر حداکثر و حداقل  $R$  خواهد بود. حال ضریب نمائی باقیمانده را می توان توسط یک سری کوتاه با دقت مناسبی تقریب زد. تعداد جملات شرکت کننده در این سری بستگی به  $k$  (یا  $\epsilon_r$ )، میزان تغییرات  $R$  و دقت نسبی مورد نظر دارد. در شکل ۲ طول رشته برحسب لگاریتم دقت بسط و ضریب دی الکتریک  $\epsilon_r$  برای بزرگترین قطعه مجاز نشان داده شده است.



شکل (۲) لگاریتم دقت بسط تیلور ضریب نمائی بر حسب طول رشته (رابطه ۱۵) در دی الکتریکهای مختلف.

بنابراین باتوجه به شکل می توان از رشته ای به طول چهار با دقت خوبی برای دی الکتریکهای متعارف استفاده کرد. به عبارت دیگر:

$$e^{-jkR} = e^{-jkR_0} e^{-jk(R-R_0)} \cong e^{-jkR_0} \sum_{i=0}^4 \frac{k^i (R-R_0)^i}{i!} \quad \text{XVI}$$

پس از جایگزینی رابطه ۱۶ در توابع گرین، ۱۵ عدد انتگرال دوگانه در روابط ۸ و ۹، و به همین تعداد انتگرال یک گانه در روابط ۱۰ و ۱۱ تولید می شود که تمامی انتگرالها به جز سه انتگرال یک گانه به صورت تحلیلی حل می شوند. با انتگرال گیری از توابع گرین تقریبی، دقت بسط ضریب نمائی مختل نمی گردد. در نتیجه محاسبات وابسته به توابع گرین از دقت کافی برخوردار خواهد بود. مدت زمان محاسبه توزیع دو قطعه مستطیلی به کمک توابع گرین تقریب زده شده چند صد برابر بهتر از انتگرال گیری

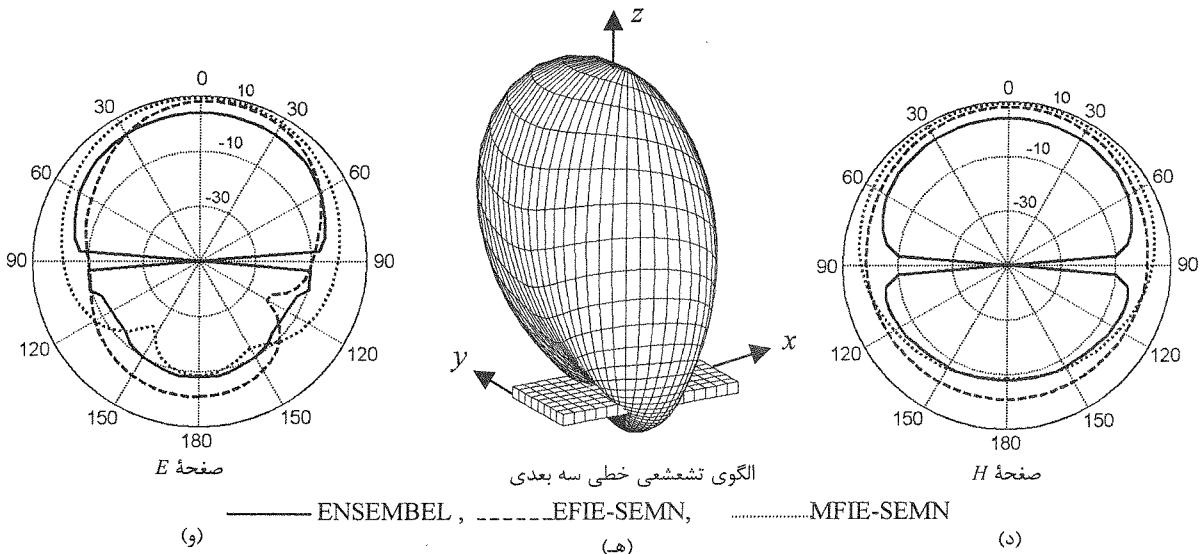
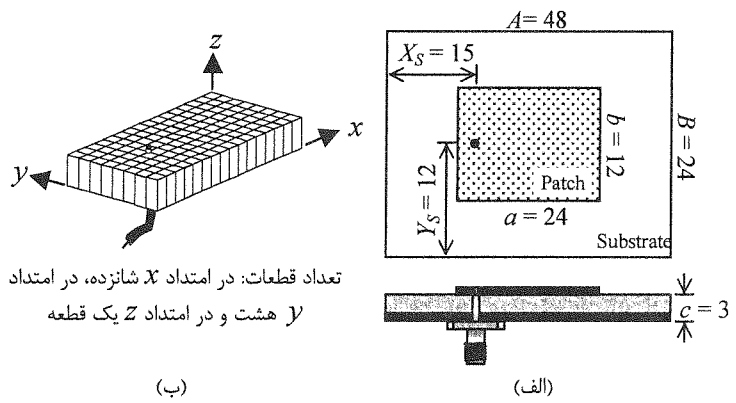
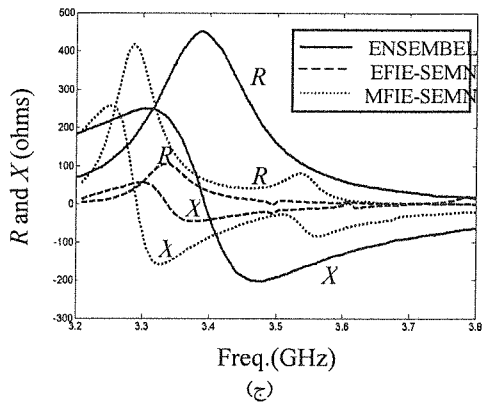
کاملاً عددی گشته است که خود نوید بخش افزایش شگرف سرعت محاسبات است.

روش دوم در پاسخ به این سوال که آیا می‌توان از انتگرال گیری صرف نظر کرد؟ شکل گرفته است. صرف نظر از انتگرال گیری به معنای عدم متوسط گیری تزویج بین نقطه میانی قطعه بار و تمام نقاط قطعه منبع و جایگزینی آن با مقدار تزویج بین مراکز دو قطعه می‌باشد. بدیهی است که در صورت تحقق، سرعت محاسبات بیشترین افزایش را خواهد داشت. اما این تقریب زمانی قابل اعمال خواهد بود که اختلاف تزویج مرکز قطعه بار و نقاط قطعه منبع در فاز و دامنه قابل اغماض باشد. اگرچه اختلاف فاز کمیات مختلف در سطح یک قطعه با محدود کردن ابعاد آن به  $0.03\lambda_0$  قابل اغماض شده است اما از اختلاف دامنه آنها در فواصل نزدیک دو قطعه نمی‌توان چشم پوشی کرد. به همین منظور باید حداقل فاصله لازم جهت تجویز صرف نظر کردن از انتگرال گیری با تحلیل خطای حاصل از این نوع تقریب بدست آید. بزرگترین خطای نسبی عناصر ماتریسهای  $3 \times 3$  تحت انتگرال دوگانه روابط ۸ و ۹ تقریباً به ترتیب  $2p$  و  $p$  می‌باشد که  $p$  نسبت دامنه تغییرات  $R$  به فاصله مراکز قطعات بار و منبع است. خطاهای نسبی برای بدترین حالت محاسبه شده و در عمل دقت این روش بالاتر از مقادیر بدبینانه فوق خواهد بود و با پیشروی محاسبات دقت‌های فوق مختل نیز نمی‌گردد. عدم وابستگی مقادیر فوق به  $\epsilon_r$  و  $\mu_r$  از نکات جالب توجه نتایج فوق بوده و راه را برای تعمیم این روش برای تمام دی الکتریکها می‌گشاید. نتایجی که در بند بعد ارائه خواهد شد موید امکان استفاده از این روش در فواصل بیش از پنج قطعه بین قطعات بار و منبع است. این روش از این پس روش AIM (Adaptive Integration Method) نامیده می‌شود.

### ۳- نتایج عددی

در این بخش دو آنتن پچ میکرواستریپی توسط روشهای فوق مورد آزمون قرار گرفته و نتایج بدست آمده با روش SEMN اولیه، نرم افزارهای تجاری و اندازه گیری مقایسه می‌شود. نخست آنتن پچ میکرواستریپی با ابعاد ذکر شده در شکل ۳ با سه روش SEMN اولیه، SEMN تسریع شده با روش اول و نرم افزار تجاری معروف ENSEMBEL (<http://www.ansoft.com>) مورد بررسی قرار می‌گیرد. امیدانس ورودی بدست آمده توسط SEMN اولیه و سریع کاملاً بر هم منطبق شده و تفکیک پذیر نیست. علاوه بر این نتایج فرمولبندی MFIE با نتایج نرم افزار ENSEMBEL به جز جابجائی کم فرکانس کار همخوانی خوبی نشان داده است. در اشکال ۳ (د) و (و) الگوهای تشعشی لگاریتمی صفحات  $H$  و  $E$  با نتایج ENSEMBEL در فرکانس تشدید  $3.29\text{GHz}$  مقایسه شده است. در این اشکال روش SEMN با توجه به اینکه ابعاد آنتن محدود است، پیشگونی واقعیت‌تری نسبت به آنچه که در عمل انتظار می‌رود ارائه کرده است. سرعت انجام محاسبات الکترومغناطیسی با روش SEMN سریع، بیش از پنجاه برابر شده است. مدت زمان لازم برای تحلیل آنتن در یک فرکانس برابر با سیزده دقیقه بر روی یک کامپیوتر PIII 600MHz می‌باشد.

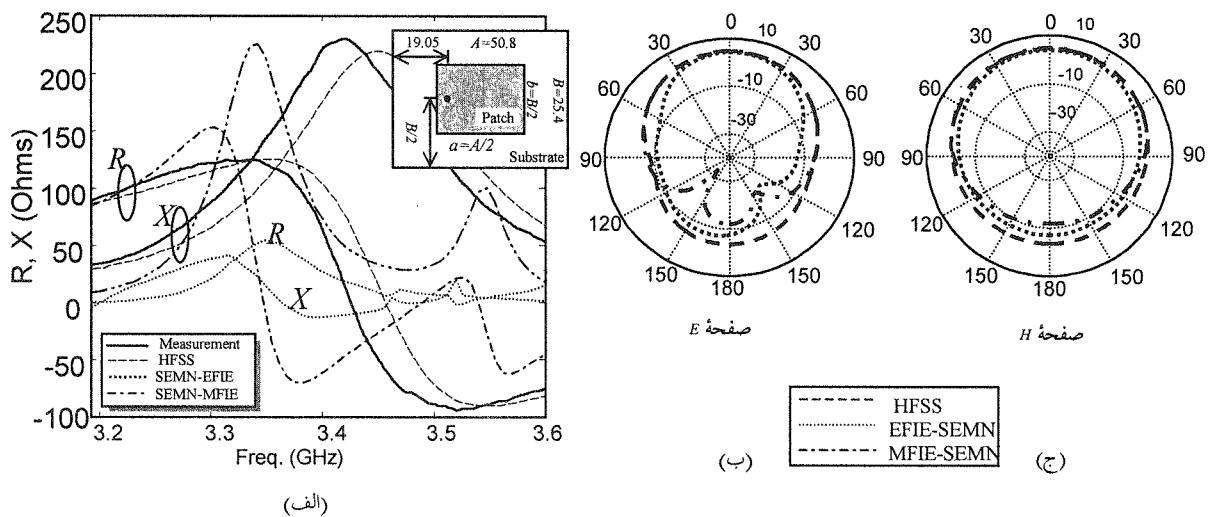
شکل ۴ امیدانس ورودی یک پچ میکرواستریپی که ابعاد آن در گوشه شکل نشان داده شده است توسط روشهای مختلف به نمایش گذارده شده است. در این آنتن  $\epsilon_r = 2.5$  بوده و ضخامت زمینه دی الکتریک  $3.175$  میلی متر است. قطعه بندی این آنتن مانند مثال قبل بوده و مانند مثال قبل در این حالت نیز نتایج بدست آمده به کمک توابع گرین تقریب زده شده کاملاً منطبق بر نتایج بدست آمده از روش SEMN اولیه می‌باشد. امیدانس ورودی ناشی از اعمال روش تسریع AIM به تنهایی برای  $\rho = \Delta R/R < 0.2$  کاملاً منطبق بر نتایج قبلی می‌گردد. از مقایسه نتایج HFSS (<http://www.ansoft.com>)، SEMN و اندازه‌گیری به نظر می‌رسد که تولیدات روش SEMN-MFIE نسبت به روش SEMN-EFIE و HFSS و اندازه گیری نزدیکتر است، به جز اندکی لغزش فرکانسی. مدت زمان صرف شده توسط نرم افزار HFSS در هر فرکانس بر روی یک کامپیوتر PIII 600MHz بین ۸ تا ۱۰ ثانیه می‌باشد. الگوهای تشعشی صفحات  $H$  و  $E$  در فرکانس تشدید روش SEMN-MFIE ترسیم شده‌اند. به همراه نتایج صفحات  $H$  و  $E$  روش SEMN تولیدات نرم افزار تجاری HFSS نیز برای مقایسه ارائه شده‌اند. اعمال همزمان دو روش تسریع ارائه شده در این مقاله موجب افزایش ۹ درصدی سرعت محاسبات نسبت به مدت زمان انجام محاسبات با استفاده از تابع گرین تقریب زده شده (روش اول) است بدون آنکه خطای اضافه‌ای در دقت محاسبات نسبت به حالت استفاده از روش تسریع اول رخ دهد.



شکل (۳- الف) آنتن پیچ میکرواستریپی، ب- قطعه بندی آنتن، ج- امپدانس ورودی، د- پترن تشعشی صفحه  $H$ ، ه- پترن تشعشی خطی سه بعدی و و- پترن تشعشی صفحه  $E$ . ابعاد بر حسب میلیمتر بوده و  $\epsilon_r = 3$  است.

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله دو روش عمومی برای تسریع روش SEMN اولیه پیشنهاد گشته و با موفقیت بر روی دو نمونه آنتن پیچ میکرواستریپ به کار بسته شد. افزایش سرعت حداقل پنجاه برابری انجام محاسبات الکترومغناطیسی به کمک این روشها مختص آنتنهای پیچ میکرواستریپی نبوده و به هیچ وجه بر کلیت روش SEMN لطمه‌ای وارد نکرده است و از همان فرضیات و تقریبهای اولیه این روش استفاده می‌کند. نتایج تصویر شده کاملاً منطبق بر نتایج SEMN اولیه بوده و با نتایج اندازه‌گیری و نرم افزارهای تجاری معروف ENSEMBEL و HFSS همخوانی خوبی نشان داده است. از طرف دیگر به علت افزایش فوق العاده سرعت محاسبات توسط این روشها، امکان تحلیل آنتنهای آرایه‌ای فراهم گردیده است.



شکل (۴- الف) امپدانس ورودی و ابعاد آنتن پیچ میکرواستریپ، ب- پترن تشعشی صفحه E  
ج- پترن تشعشی صفحه H. ابعاد بر حسب میلیمتر بوده و  $\epsilon_r = 2.5$  است.

## مراجع

- [1] E. A. Navarro, N. T. Sangary, C. Wu and J. Litva "Analysis of a coupled patch antenna with application in personal communications," IEE Proc. Microw. Antennas Propag., Vol. 142, Dec. 1995, pp. 495-497.
- [2] B.S. Yildirim and El-B. El-Sharawy, "FDTD analysis of a shorted and truncated microstrip antennas for mobile communication systems," in Dig. IEEE AP-S Int. Symp., Montreal, July 1997 pp. 1856-1859.
- [3] A.K. Bhattacharyya, "Effects of ground plane truncation on the impedance of a patch antenna," IEE proceeding-H, Vol. 138, pp. 560-564, Dec. 1991.
- [4] E. Arvas, A. Rahhal-Arabi, A. Sadigh and S. M. Rao, "Scattering from multiple conducting and dielectric bodies of arbitrary shape," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 33, pp. 29-36, Apr. 1991.
- [5] F.Tavakkol-Hamedani, A.Tavakoli, L.Shafai, "Analysis of finite-microstrip structures using surface equivalence principle and multiple network theory (SEMN)," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 50, pp. 1128-1137, Aug. 2002.

[۶] فرزاد توکل همدانی، "تحلیل آنتنهای چندلایه میکرواستریپ محدود با استفاده از اصل هم ارزی سطحی و تئوری شبکه چندتایی پایان نامه دوره دکتری (Ph.D.)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اسفند ۱۳۷۸

- [7] F.T. Hamedani and A. Tavakoli, "Computation of self-coupling matrices in analysis of complex structures by surface equivalence principle and multiple network theory (SEMN)," in Dig. IEEE AP-S Int. Symp., Atlanta, June 1998, pp. 1914-1917.