

اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید آنتن ریزنوار حلقوی دایروی و مربعی

ضرغام رستمی^۱، مهرداد نجفی نوکاشتی^۲

استادیار دانشکده فوا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، zrostami@ihu.ac.ir

۲ مدرس ارشد دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه افسری امام حسین (ع)

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۳۱

چکیده

آنتن‌های ریزنوار حلقوی دایروی و مربعی به دلیل انعطاف‌پذیری و کاربردهای گسترده، به عنوان گیرنده، فرستنده و راه‌انداز دستگاه‌های فعال و غیرفعال طراحی و ساخته می‌شوند. در این مقاله، برای تعیین ضریب ثابت عایقی دینامیکی و همچنین فرکانس تشدید آنتن‌های ریزنوار حلقوی دایروی و مربعی، از مدل MWM استفاده شده است. نتایج به دست آمده از MWM، در مقابل نتایج تجربی و روش‌های تئوری دیگر، تعامل بسیار خوبی را برقرار داشته است. در این مدل، دقت در تعیین فرکانس تشدید تک‌لایه برای مد غالب، حدود ۰/۵ درصد است. همچنین با این مدل، اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید مد غالب و مدهای مرتبه بالاتر ساختار ریزنوار حلقوی دایروی و مربعی را می‌توان به دست آورد که با مدل‌های دیگر قابل محاسبه نمی‌باشد. در ادامه، محاسبات مقایسه‌ای اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید دو آنتن ریزنوار حلقوی دایروی و مربعی، انجام شده و مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از پارامترهای یکسان دخیل در طراحی آن‌ها متفاوت است و به همین دلیل، هر کدام برای کاربرد خاصی، طراحی و ساخته می‌شوند که برای حفاظت از مدارات ریزنوار الکترونیکی، مخابراتی و آنتن به طراحان پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه

مدل ولف بهینه‌شده، روش تغییرات، فرکانس تشدید، ریزنوار، زیرلایه، اثر پوشش

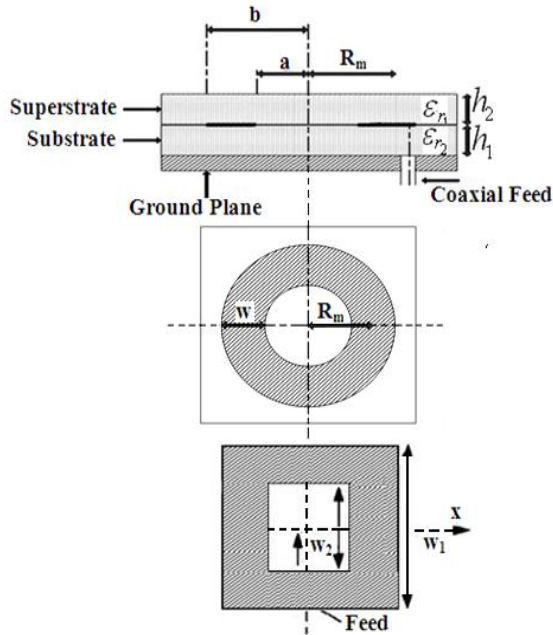
مقدمه

عرض زیرلایه‌ی (سابستریت) آنتن ریزنوار مستطیلی با استفاده از تکنیک PSO^۲ مورد بررسی قرار گرفته است [۴،۳]. برای کوچک-سازی آنتن و پهنای باند بهینه از زیرلایه ساختار زمینی شکاف‌دار H شکل مستطیلی و مربعی ریزنوار در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز، با استفاده از نرم‌افزار HFSS پارامترهایی مانند؛ ضریب انعکاس، پهنای‌باند و بهره، به صورت مقایسه‌ای محاسبه شده و در مقایسه بعضی از پارامترها؛ مانند ضریب انعکاس و پهنای باند، آنتن ریزنوار مربعی بهتر از مستطیلی به دست آمده است [۵]. چون پهنای باند باریک در آنتن‌های ریزنوار باعث محدودیت در کاربرد آن‌ها می‌شود، لذا از تکنیک تغییر در ضخامت زیرلایه جهت افزایش پهنای باند آنتن ریزنوار مربعی استفاده شده است [۶]. همچنین آنتن مربعی ریزنوار باند L و کاربرد آن در سامانه‌های بی‌سیم و پارامترهایی مانند VSWR، تلفات جابجایی و راندمان تشعشعی

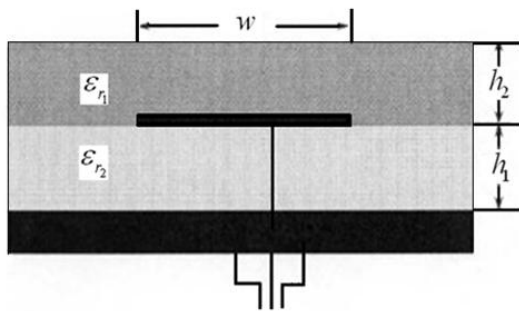
به‌کارگیری تشدیدکننده‌های ریزنوار با شکل ظاهری متفاوت در مدارات یکپارچه مایکروویوی، غیرقابل انکار می‌باشد. ریز نوارها به صورت عنصر تکی و یا ترکیبی در بخش‌هایی از نوسان‌سازها، سیرکولاتورها، تزویج‌گرها و فیلترها به کار برده می‌شوند. اهمیت عملکرد آن‌ها برای توسعه روش‌های تحلیلی عددی نیز بسیار مناسب است. نتایج دقیق پارامترهای به دست آمده از تجزیه و تحلیل و طراحی، به ساختار ساده مدل‌ها وابسته است [۲،۱]. اکنون با توسعه فن‌آوری، تشدیدکننده‌های ریزنوار به صورت خطوط انتقال و سپس مدل‌سازی آن‌ها به عنوان آنتن فرستنده و گیرنده، نظر محققین را بیشتر به خود جلب نموده است. برای طراحی آنتن ریزنوار مستطیلی بهینه، پارامترهایی مانند VSWR^۱، پارامترهای S، پهنای باند، فرکانس کار و شعاع نسبی و توسعه آن-ها بسیار مهم است. آثار این پارامترها در طراحی ابعاد طول و

2 Substrate
3 Particle Swarm Optimization

1 Voltage Standing Wave Ratio



شکل ۱. ساختار کلی ریزنوار آنتن حلقوی دایروی و مربعی



شکل ۲. ساختار کلی ریزنوار چندلایه‌ای معادل

مدل‌سازی تبدیل ساختار مربعی به مربع حلقوی

با استفاده از شکل (۲ و ۱) داریم:

$$w'_{\text{eff}} = w_{1\text{eff}} + \frac{w_{2\text{eff}}}{2} \quad (3)$$

$w_{1\text{eff}}$ طول بیرونی و $w_{2\text{eff}}$ عرض درونی موثر مربع حلقوی معادل می‌باشد که مدل ساختاری آن در شکل (۲ و ۱) نشان داده شده است.

$$f_r = f_{mn} = \frac{1}{2} \frac{v}{\sqrt{\epsilon_{\text{dyn}}}} \left[\left(\frac{n}{w'_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{m}{w'_{\text{eff}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در آن m و n تعداد مدهای انتشار یافته در طول و عرض مربع حلقوی است.

ضریب ثابت دینامیکی قطعه پوشش لایه بالایی (سوپرستریت) را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. علی‌الرغم این‌که بسیاری از پارامترهای طراحی آنتن ریزنوار در مراجع مختلف تجزیه و تحلیل و محاسبه شده است، ولی اثر پوشش بر روی پارامتر مهمی مانند؛ فرکانس تشدید و ضریب ثابت عایقی موثر و دینامیکی انجام نشده است که ما در این مقاله به آن پرداخته‌ایم.

فرمولاسیون کلی مدل

مدل ولف و همکاران، یک مدل محفظه‌ای است و برای تعیین فرکانس تشدید آنتن ریزنوار، تنها برای ساختار مستطیلی تک‌لایه کاربرد دارد، و با اعمال طول و شعاع موثر، مدل مذکور بهینه شده است [۸]. برای محاسبه ضریب ثابت دینامیکی که در تعیین فرکانس تشدید آنتن چندلایه‌ای ریزنوار نقش اساسی دارد، از ترکیب مدل محفظه‌ای بهینه‌شده ولف و همکاران و روش تغییرات (VM) [۹] و همچنین تکنیک ^۵TTL استفاده شده که آن-را ^۱MWM نامیده‌ایم [۱۰]. نتایج فرکانس تشدید به دست آمده از MWM در مقایسه با نتایج مدل تمام موج هم‌خوانی خوبی داشته، ولی مدل تمام موج، بسیار پیچیده و زمان‌بر است [۱۰].

تعیین فرکانس تشدید ساختار آنتن ریزنوار مستطیلی

فرکانس تشدید آنتن ریزنوار مستطیلی برابر است با [۱۰]:

$$f_r = f_{mn} = \frac{1}{2} \frac{v}{\sqrt{\epsilon_{\text{dyn}}}} \left[\left(\frac{n}{L_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{m}{w_{\text{eff}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

مدل‌سازی تبدیل ساختار مستطیلی به مربع

برای تبدیل ساختاری تعیین فرکانس تشدید از مربعی به ساختار مربع حلقوی، با استفاده از شکل (۱) داریم:

$$\text{که در آن } w_{\text{eff}} = L_{\text{eff}}$$

$$f_r = f_{mn} = \frac{1}{2} \frac{v}{\sqrt{\epsilon_{\text{dyn}}}} \left[\left(\frac{n}{w_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{m}{w_{\text{eff}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$R_1 = 1 + \frac{2h_1}{\pi \varepsilon_{r1} R} \quad (11)$$

$$R_2 = \left[\ln \frac{R}{2h_1} + 1.41 \varepsilon_{r1} + 1.77 + \left(\frac{h_1}{R} \right) (0.2668 \varepsilon_{r1} + 1.65) \right]$$

$$R_{eff} = R \left(R_1 R_2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

که در آن؛ R شعاع آنتن حلقوی و h_1 ضخامت زیرلایه است.

مدل‌سازی تبدیل ساختار دایروی به ساختار حلقوی

ما در این جا برای تبدیل ساختار دایروی به ساختار حلقوی، شعاع معادل آن را به قرار زیر مدل‌سازی کرده‌ایم:

$$\begin{aligned} W' &= W + h_1 \\ R &= R_m + w' \\ R_m &= a + \frac{b}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

R_m شعاع حلقه دایره‌ای است که متفاوت‌تر از شعاع ساختار دایروی یعنی $R_m = a + \frac{b}{2}$ می‌باشد و $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2}$ ضریب ثابت عایقی نسبی لایه زیرین است. اکنون ε_{dyn} (ضریب ثابت عایقی دینامیکی) میدان‌های لبه‌ای را به دست می‌آوریم. سپس ضریب ثابت عایقی دینامیکی با استفاده از روش تغییرات در حوزه تبدیل فوریه و با استفاده از تابع گرین، با روش TTL تعیین می‌گردد [۱۱].

$$\varepsilon_{dyn} = \frac{C_{dyn}(2R, h_1, h_2, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})}{C_{dyn}(2R, h_1, h_2, \varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 1)} \quad (13)$$

که در آن $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$ به ترتیب ضریب ثابت عایقی زیرلایه از چپ به راست پائینی و ضریب ثابت عایقی زیرلایه از چپ به راست بالایی بوده و $C_{dyn}(2R, h_1, h_2, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})$ و $C_{dyn}(2R, h_1, h_2, \varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 1)$ نیز کل ظرفیت دینامیکی در زیر

لایه بالایی و قطعه پرشده از هوا هستند.

ظرفیت دینامیکی ساختار حلقوی دایروی قطعه‌ای را که در آن همه میدان‌های لبه‌ای محاسبه می‌شود [۱۱] با استفاده از روش تغییرات داریم:

$$\varepsilon_{dyn} = \frac{C_{mstatic}(2R, h_1, \varepsilon_{r1})}{C_{fstatic}(2R, h_1, h_2, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})} \quad (14)$$

که در آن $C_{mstatic}(2R, h_1, \varepsilon_{r1})$ ظرفیت ساکن اصلی قطعه ریز نوار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_{mstatic} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} R^2}{\gamma h_1} \left[1 - \frac{J_{n-1}(K_r) J_{n+1}(K_r)}{J_n^2(K_r)} \right] \quad (15)$$

$$\varepsilon_{dyn} = \frac{C_{dyn}(\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})}{C_{dyn}(\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 1)} \quad (5)$$

هم‌چنین ضریب ثابت عایقی موثر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{eff}(W=L) = \left[\frac{Z_0(W=L, h_1, h_2, \varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 1)}{Z(W=L, h_1, h_2, \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2})} \right]^2 \quad (6)$$

طول و عرض موثر آنتن ریزنوار معادل نیز به ترتیب برابر است با W_{eff} و L_{eff} :

$$L_{eff} = L + \left[\frac{(W_{eq} - W)}{2} \right] \frac{\varepsilon_{eff}(W) + 0.3}{\varepsilon_{eff}(W) - 0.258} \quad (7)$$

W_{eq} عرض معادل از مدل موجبری تخت، تعیین می‌شود:

$$W_{eq} = \frac{120\pi h_1}{Z_{\varepsilon_{eff}}(W)} \quad (8)$$

که در آن $Z_{\varepsilon_{eff}}(W=L)$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z(W=L, h_1, \varepsilon_{r1}) = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_{eff}(W=L)}} \left[\frac{W=L}{h_1} + \right. \quad (9)$$

$$\left. + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W=L}{h_1} + 1.444 \right) \right]^{-1}$$

فرمولاسیون ساختار دایروی برای تعیین فرکانس تشدید

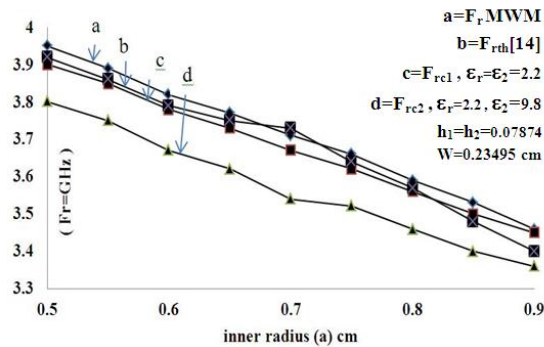
فرکانس تشدید ساختار ریزنوار دایروی با استفاده از فرمول زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$f_{nm} = \frac{X_{nm} V}{2\pi R_{eff} \sqrt{\varepsilon_{dyn}}} \quad (10)$$

که در آن X_{nm} ریشه مشتق lm امین تابع بسل مرتبه ln امین می‌باشد. مقدار عددی برای بعضی از m ها و n ها برابر است با: $X_{01}=3.832, X_{11}=1.841, X_{21}=3.054, X_{31}=4.201$ و سرعت نور V در فضای آزاد می‌باشد.

اکنون R_{eff} شعاع موثر را که توسط چو و همکاران [۱۲] بیان شده است، داریم:

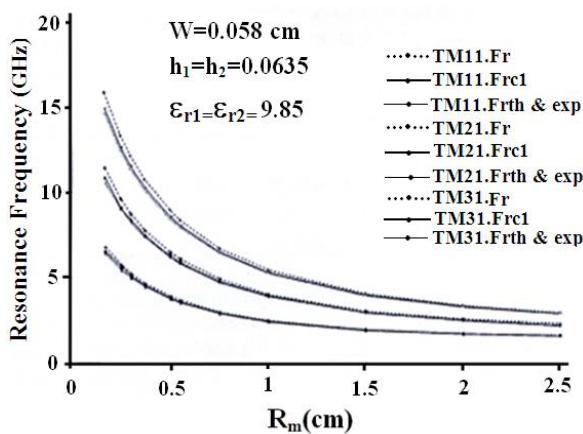
نتیجه به دست آمده از روش MWM برای فرکانس تشدید آنتن ریزنوار حلقوی تک لایه در مقایسه با نتایج به دست آمده از روش SDM [۱۴] برابری می کند که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. تعیین اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید

اثر عایق پوشش بالایی بر روی فرکانس تشدید آنتن ریزنوار حلقوی دایروی با روش MWM، نشان می دهد که عایق پوشش لایه بالایی، فرکانس تشدید را با شیب یکنواختی کاهش داده و هم-چنین برای اثبات روش، استفاده از پوشش عایق با ضریب ثابت عایقی بالاتر مانند آلومینا (Alumina)، اثر بیشتری بر روی فرکانس تشدید دارد که مرجع [۱۴] برای محاسبه اثر پوشش، کاربردی ندارد.

همچنین در مرجع دیگری [۱۵] اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید جهت اثبات قضیه با پارامترهای مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است، شکل (۴).



شکل ۴. تعیین فرکانس تشدید در مقابل شعاع درونی متغیر دایره حلقوی

در شکل (۴) $F_R, F_{Rth} \& exp, F_{RC1}$ به ترتیب؛ فرکانس تشدید ساختار حلقوی با پوشش، فرکانس تشدید تجربی و فرکانس تشدید اصلاح شده و بدون اصلاح MWM را نشان می دهد. در شکل فوق، ضریب ثابت عایقی و ضخامت لایه بالایی و پایینی یکسان با شعاع متغیر، نتایج اثر پوشش ناشی از MWM و مرجع

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{for } n=0 \\ 2 & \text{for } n \neq 0 \end{cases}$$

که در آن K عدد موج است. ظرفیت اصلی ساختار حلقه به وسیله لایه بالایی (سوپراستریت) تحت تاثیر قرار نگرفته است. برای مد پایه TM_{11} ، ظرفیت ساکن را به صورت زیر می توان به دست آورد:

$$C_{mstatic} = \frac{0.3525 \epsilon_0 \epsilon_{r1} \pi R^2}{h_1} \quad (16)$$

که در آن h_1 ضخامت زیر لایه می باشد.

برای محاسبه ظرفیت لبه ای، مدل انتقال ساختاری انجام می شود:

$$W = \frac{\pi R}{2H}, L = 2R$$

که نتایج دقیقی از فرکانس تشدید را به دست می دهد. ظرفیت لبه ای را می توان از فرمول زیر به دست آورد:

$$C_{fstatic} = \frac{1}{2} \left[\frac{Z_0(W, h_1, h_2, \epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1) L}{\sqrt{Z^2(w, h_1, h_2, \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})}} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}{h_1} \right] \quad (17)$$

$Z_0(2R, h_1, h_2, \epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1)$ و $Z(W_1, h_1, h_2, \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})$

در این جا، A مساحت سطح مرکزی قطعه و Z_0 امپدانس های مشخصه قطعه در امتداد عرضی $W=2R$ به ترتیب؛ زیر لایه هوا و عایق در نظر گرفته شده است. امپدانس مشخصه با استفاده از روش تغییرات همراه با تکنیک TTL نیز از تابع گرین محاسبه می-شود. بنابراین ظرفیت در واحد طول خط از عبارت زیر به دست می آید [۹]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\pi \epsilon_0} \int_0^\infty \frac{[f(\beta)]^2}{\beta} \frac{1}{Y} d\beta \quad (18)$$

که در آن، Q کل بار روی قطعه الصافی رسانا و $f(\beta)$ تبدیل فوریه تابع توزیع بار و Y تابع ادیمیتانس می باشد [۹].

$$Y = \epsilon_{r1} \coth(\beta h_1) + \epsilon_{r2} \left[\frac{\epsilon_{r2} + \coth(\beta h_2)}{1 + \epsilon_{r2} \coth(\beta h_2)} \right] \quad (19)$$

نتایج عددی

برای تعیین فرکانس تشدید آنتن ریزنوار حلقوی دایروی و اثر پوشش لایه بالایی بر روی فرکانس تشدید، پارامترهای زیر را در نظر می گیریم:

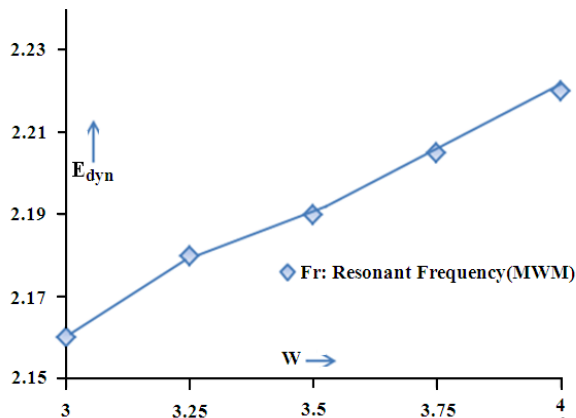
ضریب ثابت عایقی لایه پایینی $\epsilon_{r1} = 2.2$

ضخامت لایه پایینی $h_1 = 0.07874$ cm

عرض ریزنوار $w = 0.23495$ cm

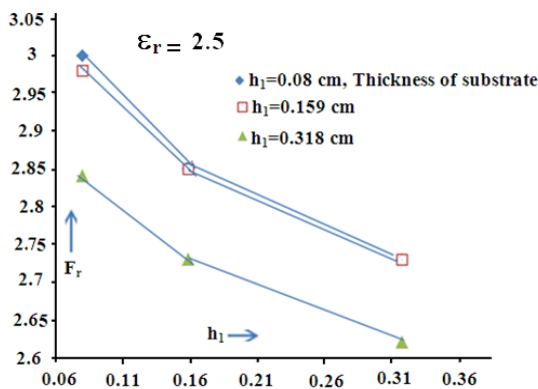
شعاع خارجی $d = 1.147$ cm

شعاع داخلی حلقه دایروی متغیر $a =$



شکل ۶. تغییر عرض ریزنوار مربع حلقوی در مقابل ضریب ثابت عایقی دینامیکی

و همچنین افزایش تغییر در ضخامت لایه بالایی که موجب کاهش فرکانس تشدید می‌شود در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷. تغییر ضخامت ساختار مربع حلقوی در مقابل فرکانس تشدید

مقایسه اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید ساختار حلقوی دایروی و مربعی

مقایسه اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید ساختار حلقوی دایروی و مربعی با پارامترهای یکسان، مانند؛ ضخامت لایه‌ها و ضریب ثابت عایقی یکسان، که در جدول (۱) نشان داده شده است در نظر گرفته می‌شود.

[۱۵] را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به دلیل برابر بودن ضریب ثابت عایقی لایه‌های بالایی و پایینی، تاثیر چشم‌گیری روی فرکانس تشدید دیده نمی‌شود.

اکنون برای تعیین فرکانس تشدید تک‌لایه، ساختار دیگری مانند ساختار مربع حلقوی را بررسی می‌کنیم که با استفاده از مرجع [۱۳] نتیجه به دست آمده برابری خود را به صورت زیر نشان می‌دهد.

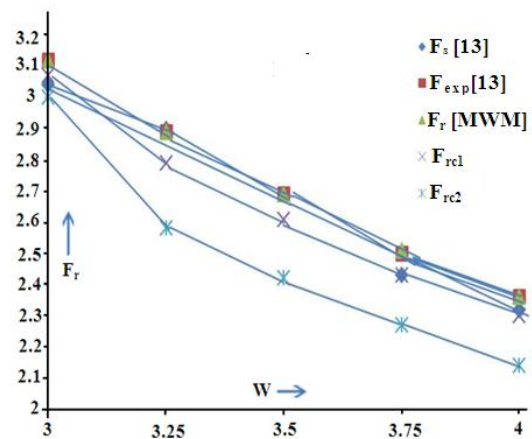
$$F_s[13]=F_{exp}[13]=F_r=3.04 \text{ GHz [MWM]}$$

در ادامه با استفاده از شکل (۲ا) و ساختار مربع حلقوی، معادل اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید را با داشتن پارامترهای زیر به دست می‌آوریم:

$$w=w_1+\frac{w_2}{2}=3+\frac{0.5}{2}=3.25 \text{ and } f_r=2.69 \text{ GHz}$$

h_2 ضخامت لایه بالایی و h_1 ضخامت لایه پایینی است که در آن $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=2.5$ و ضریب ثابت عایقی $h_1=h_2=0.159 \text{ cm}$ باشد.

در شکل (۵)، فرکانس تشدید با پوشش، کاهش کمتری را به صورت شیب ثابت نشان می‌دهد، ولی زمانی که ضریب ثابت عایقی لایه بالایی $\epsilon_{r1}=2.5$ و $\epsilon_{r2}=9$ و $h_1=h_2=0.159 \text{ cm}$ نظر گرفته می‌شود، اثر پوشش موجب کاهش فرکانس بیشتری شده که الگوی آن در شکل (۵) آمده است.



شکل ۵. اثر دو پوشش متفاوت بر روی فرکانس تشدید مربع حلقوی

همچنین، تغییر در عرض و ضریب ثابت عایقی دینامیکی موثر قطعه ریزنوار حلقوی مربعی که موجب تغییر در فرکانس تشدید می‌گردد، در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

دیگر، به نتایج عملی، نزدیک تر است. MWM هم‌چنین برای تعیین اثر پوشش عایقی مختلف بر روی فرکانس تشدید در ساختارهای حلقوی دایروی و مربعی که در سامانه‌ها برای کاربردهای خاصی به کار برده می‌شود، داده‌های جدیدی را ارائه می‌دهد که این نتایج برای طراحان و کاربرد آن در CAD بسیار مناسب است.

مراجع

- [1]Y.S. Wu & F.J. Rosenbaum, "Mode Chart for Microstrip Ring Resonator", IEEE Transaction on MTT, Jul.1973, Vol. 21, PP. 487-489.
- [2]G.S. Pintzos & R. Pregla, "A Simple Method for Computing the Resonant Frequency Ring Resonators", IEEE Transaction on MTT, Oct.1979, Vol. 26, No. 10.
- [3]J.S. Dahele & K.F. Lee, "Theory & Experiment on Microstrip Antenna with Girdgaps", IEEE Proceeding, Dec.1985, Vol.132 , No.7.
- [4]J.M. Singh & M. Mishra & P. Shorma, "Design Optimization of Microstrip Patch Antenna", International Journal of Emerging & Technology in Computer Science, Oct. 2013, Vol. 2, No. 5.
- [5]V.S. Melkeri & P.V. Hunagund & S. L. Mallikarjun, "Performance Analysis & Comparison of Square & Rectangular Antenna Embedded With Same DGS", Feb. 2015, Vol. 3, No. 2.
- [6]N.K. Joshi & M.U. Birare & N. Nahata, "Design of Microstrip Stacked Square Patch Antenna", International Journal of Engineering & Innovative Technology, Sep. 2012, Vol. 2, No. 3.
- [7]R.D. Kanphade & D.G. Wakade & N.T. Markad, "Square Patch Antenna: a Computer Aided Design Methodology", International Journal of Electronics & Communication Engineering, Oct. 2011, Vol. 4, PP. 483-489.
- [8]I. Wolff & N. Knoppick, "Rectangular & Circular Microstrip Disk Capacitor & Resonator", IEEE Transaction on MTT, Oct. 1974, Vol. 22, PP. 857-864.
- [9] R. Crampagne & M. Ahmadpanah & J.L.Guiraud, "A Simple Method for Large Class of MIC Lines Having Multilayered Dielectric Substrates", IEEE Transaction on MTT, Jan. 1981, Vol. 29, PP. 68-76.
- [10]A.K. Verma & Z. Rostamy, "Resonant Frequency of Uncovered & Coverd Rectangular Microstrip Patch Using MWM", IEEE Transaction on MTT, Jan. 1993, Vol. 41, No.1.
- [11]Z. Rostamy & E. Akbari, "Analysis of Resonant Frequency of Suspended Covered Circular Microstrip Patch by MWM", University of science & Technology International Journal of Sciences, Jan. 2003, Vol. 14, No. 1, PP. 89-91.
- [12]W. Chew & J.A. Kong, "Analysis of a Circular Microstrip Disk Antenna With a Thick Dielectric Substrate", IEEE Transaction on MTT, Jan. 1981, Vol. 29, No.1, PP. 68-76.
- [13]S.P. Mousavi, "Charactristics & Design of Microstrip Square Ring Antennas", the Department of

جدول ۱. نتایج عددی مقایسه اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید ساختار حلقوی دایروی و مربعی با پارامترهای یکسان

$F_r = 3.04 \text{ GHz}$ [13]	$F_r = 625 \text{ MHz}$ [3]	نتایج تجربی فرکانس تشدید (مگاهرتز) حلقه دایروی [۳] - بدون پوشش $\epsilon_{r1}=2.5, h_1=0.159\text{cm}$ و نتایج تجربی فرکانس تشدید (گیگاهرتز) حلقه مربعی [۱۳] - بدون پوشش $\epsilon_{r1}=2.5, h_1=0.159\text{cm}$
$F_r = 3.07 \text{ GHz}$	$F_r = 629 \text{ MHz}$	محاسبه فرکانس تشدید با روش MWM بدون پوشش $\epsilon_{r1}=2.5, h_1=0.159\text{cm}$
3.03 GHz	$F_r = 624 \text{ MHz}$	محاسبه فرکانس تشدید با روش MWM با پوشش $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 2.32$ $h_1 = h_2 = 0.159\text{cm}$
0.9 %	0.6 %	مقایسه درصد خطای اثر پوشش

جدول فوق، نتایج تئوری MWM و عملی دو نمونه از آنتن ریزنوار حلقوی دایروی و مربعی ناشی از مراجع [۳] و [۱۳] را نشان می‌دهد. هم‌چنین در این‌جا، اثر پوشش بر روی فرکانس تشدید در ساختار حلقوی مربعی نسبت به دایروی، درصد خطای بیشتری را از خود نشان می‌دهد که این موضوع به دلیل حساسیت جمع‌شدگی بیشتر میدان‌ها در زیرلایه پوششی نسبت به ساختار دایروی رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری:

ساختارهای متنوع آنتن‌های ریزنوار به دلیل عملکرد متفاوت، هر کدام برای کاربرد خاصی طراحی و ساخته می‌شوند. MWM، یک روش نرم‌افزاری بسیار دقیق است که در تعیین فرکانس تشدید مدهای غالب و مرتبه بالاتر برای قطعه‌های تک‌لایه و چندلایه ریزنواری با ساختارهای مختلف به کار برده می‌شود. در اغلب موارد، نتایج به دست آمده از روش MWM، نسبت به تئوری‌های

Electrical & Computer Engineering University of Manitoba Winnipeg Manitoba Canada, Aug. 1997.

[14]R. Rezaiesarlak & F.H. kashani, "Analysis of Capacitively Coupled Microstrip Ring Resonator Based on Spectral Domain Method", Progress in Electromagnetics Research Letters, Jan. 2008, Vol. 3, pp. 25-33.

[15]M.A. Soltan, "Extended Analysis of Closed Ring Microstrip Antenna", IEEE Proceeding, Feb. 1989, Vol. 136, No. 1.

