



## توسعه نانوآنتن های مدوله شده موج نشتی نوری به منظور شکل دهی نور

وحید غفاری | لیلا یوسفی\*

گروه مخابرات میدان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**چکیده:** در این پژوهش، به توسعه آنتن های موج نشتی در باند مخابرات نوری و طول موج 1550 nm به منظور شکل دهی نور به طور دلخواه پرداخته شده است. در این راهکار، با بهره مندی از موجبرهای دورگه پلاسمونیک که تلفات کم و قابلیت مجتمع سازی بهتری دارند، به سنتز آنتن های موج نشتی مدوله شده، خواهیم پرداخت. سنتز شکل پرتو در این آنتن ها با ایجاد تغییرات در ضخامت لایه سیلیکونی موجبر دورگه پلاسمونیک به دست می آید. تغییرات ایجاد شده در ساختار موجبر، تغییرات سرعت نور را به دنبال دارد و باعث می شود مقادیر متفاوت نشتی، به دست آیند. در نهایت، با مهندسی این مقادیر نشتی، به تامین شکل پرتو دلخواه می پردازیم. از مزایای راهکار پیشنهادی نسبت به پژوهش های پیشین، می توان به قابلیت جمع پذیری، تامین هر شکل پرتو دلخواه و پهنای باند بالای آنتن های پیشنهادی، اشاره کرد. از کاربردهای آن نیز می توان به مواردی چون سامانه های تشخیص فاصله به کمک نور، مخابرات نوری بی سیم و افزایش بازدهی سلول های خورشیدی، اشاره کرد.

**واژگان کلیدی:** شکل دهی نور، مخابرات نوری، آنتن های موج نشتی، موجبر دورگه پلاسمونیک.

\*lyousefi@ut.ac.ir

گرفته اند. در این ساختارها، آنتن به ساختار موجبری کوپل نشده است؛ پس نمی توانند برای کاربرد های مخابرات نوری مورد استفاده قرار گیرند. این موضوع در کارهای پیشین که در گروه پژوهشی ما انجام شده نیز مورد بررسی قرار گرفته و برای این منظور، نانوآنتن هایی با قابلیت مجتمع سازی، طراحی و پیشنهاد شده است [۸-۱۱]. ساختارهای پیشنهادی این قابلیت را داشتند که تطبیق امپدانس و مودی مناسبی با ساختار های موجبری پلاسمونیک فراهم آورند [۸-۱۲]. در [۸]، یک نانوآنتن مستطیلی با تغذیه موجبری پیشنهاد شد که قابلیت تامین جهت گیری حدود 5.2 dB را دارا بود. برای افزایش جهت گیری، در [۹]، یک آنتن دورگه پلاسمونیک موج نشتی پیشنهاد شد تا افزون بر قابلیت مجتمع پذیری، جهت گیری بالای 15.2 dB را نیز فراهم کند. پس از آن در [۱۰]، برای کنترل گلبرگ های کناری پرتو تابشی نور، از روش تیلور استفاده شد. برای تحقق روش پیشنهادی نیز از تغییرات عرض شکاف در موجبر

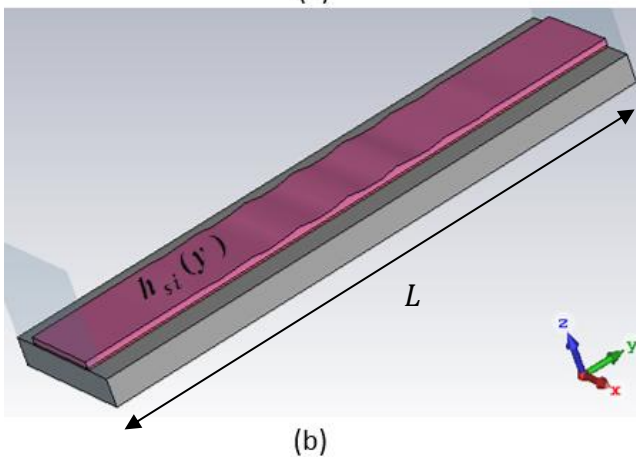
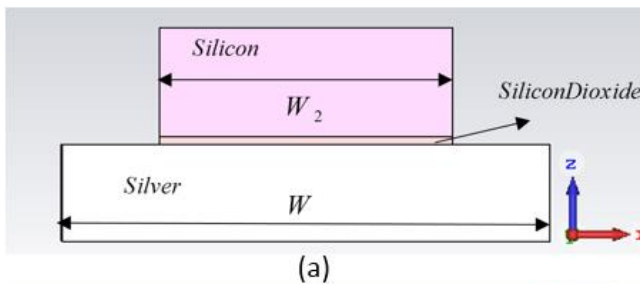
### ۱- مقدمه

نانوآنتن های نوری در یک دهه اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته اند. نانوآنتن های نوری این توانایی را دارند که با تمرکز نور در ابعاد نانو، برهم کنش بین ماده و نور را افزایش دهند [۱-۱۲]. آنتن های نوری می توانند در کاربردهای زیادی از جمله آشکارساز- های نوری [۱]، حسگرها [۲]، ارتباطات نوری مجتمع شده [۳]، طیف سنجی [۴]، تصویر برداری [۵]، سامانه های تشخیص فاصله به کمک نور [۶]، سلول های خورشیدی [۷] و مخابرات نوری بی سیم [۸-۱۲] مورد استفاده قرار بگیرند.

اگرچه ساختارهای متفاوتی برای تحقق نانوآنتن های نوری پیشنهاد شده اند، اما بیشتر نانوآنتن های نوری پیشنهادی برای متمرکز سازی نور و یا انعکاس نور از یک منبع نور نقطه ای مورد استفاده قرار

## ۲- روش محاسبات

آنتن نوری پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود؛ آنتن پیشنهادی براساس ساختارهای دورگه پلاسمونیک طراحی شده است؛ به طوریکه یک ماده با ضریب شکست کم (سیلیکون دی اکسید)، بین یک فلز (نقره) [۲۳] و یک ماده با ضریب شکست زیاد (سیلیکون) قرار گرفته است [۲۱ و ۲۲]. ساختارهای دورگه پلاسمونی، مود موجبری متمرکز و کم تلف  $TM$ ، را پشتیبانی میکنند [۸-۱۲] که سبب می شود تا آنتن نوری پیشنهادی، بازدهی بالایی داشته باشد. در این طراحی، ضخامت لایه سیلیکونی خط دورگه پلاسمونی  $(h_{Si}(y))$ ، مهندسی می شود تا امپدانس سطحی مدوله طراحی شده را فراهم کند. مقادیر پارامترهای نشان داده شده در شکل ۱ نیز به شرح زیر است  $W = 2000 \text{ nm}, W_2 = 1200 \text{ nm}, L = 8000 \text{ nm}, H_{Silver} = 200 \text{ nm}, H_{SiO_2} = 30 \text{ nm}$



شکل ۱: ساختار آنتن پیشنهادی (a) نمای از کنار (b) نمای از بالا.

در ادامه و در بخش ۲-۱، روش پیشنهادی برای تامین هر شکل پرتو دلخواه بیان می شود. سپس، در بخش ۲-۲ به طراحی سه آنتن با پرتوهای تابشی  $\theta_0 = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$  می پردازیم.

دورگه پلاسمونیک استفاده شد تا بتوان یک پرتو تابشی زاویه دار نسبت به جهت مستقیم آنتن با سطح گلبیگ کناری پایین به دست آورد [۱۰].

در این پژوهش، برای کنترل بیشتر الگوی تابشی آنتن نوری، یک آنتن موج نشتی نوری با امپدانس سطحی مدوله شده سینوسی پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، برای بهبود الگوی تابشی آنتن نوری و تامین هر شکل پرتو دلخواه از روش تبدیل فوریه استفاده شده است. برای تحقق روش امپدانس سطحی مدوله شده نیز از تغییرات ضخامت سیلیکون خط دورگه پلاسمونیک استفاده می شود. در نهایت، روش پیشنهادی برای تحقق سه جهت تابشی دلخواه با سطح گلبیگ کناری پایین استفاده شده و آنتنهای پیشنهادی به صورت تمام موج مورد بررسی قرار گرفته و صحت روش پیشنهادی اثبات شده است.

در مقایسه با نانوآنتنهای نوری گزارش شده در کارهای پیشین، آنتن پیشنهادی بازدهی بیشتری نسبت به آنتنهای پلاسمونیک [۱۵ و ۱۶ و ۱۸]، ابعاد کوچکتری نسبت به آنتنهای دی الکتریک [۱۹-۲۰] و سطح گلبیگ کمتری در پرتو تابشی خود نسبت به آنتنهای موج نشتی [۹ و ۱۵-۲۰] دارد. افزون بر این، آنتن پیشنهادی، تطبیق مناسبی را در کل باند مخابرات نوری دارا بوده و پهنای باند وسیع تری را نسبت به تمامی ساختارهای گذشته و در کل باند مخابرات نوری فراهم می کند. برای مقایسه بهتر، این موارد در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مقایسه آنتن پیشنهادی با پژوهش های گذشته

مرجع	بازدهی (%)	ابعاد آنتن ( $\mu\text{m}^3$ )	سطح گلبیگ (dB)	پهنای باند (%)
[۱۵]	۱۹	۴۰۰*۲۰۰	۱	-
[۱۶]	-	۷۸*۷۸	۴٫۵	۸٫۷
[۱۸]	۷۴	-	-	۵۰
[۱۹]	-	۶۰*۱	۱۴	-
[۲۰]	-	۵۰*۰٫۲۶	۸	-
پیشنهادی	۸۲	۸*۲	۱۶	۳۰<

آنتن پیشنهادی می تواند برای کاربردهای ارتباطات نوری مجتمع شده، سامانه های تشخیص فاصله به کمک نور با قابلیت مجتمع پذیری بالا، حسگرهای نوری و سلول های خورشیدی پلاسمونیک مناسب باشد.

## ۲-۱- بهبود روش امپدانس سطحی مدوله شده سینوسی به کمک تبدیل فوریه

در روش امپدانس سطحی مدوله شده، امپدانس سطحی آنتن به شکل یک ساختار پریودیک سینوسی به شکل زیر نمایش داده می‌شود [۱۳]:

$$X_s(y) = X_0 \left( 1 + M \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) \right) \quad (۱)$$

که در آن  $X_0$ ، میانگین امپدانس سطحی و  $M$ ، عدد ثابت مدولاسیون دامنه امپدانس سطحی است که یک مقدار ثابت نشتی را فراهم می‌کند. در این رابطه،  $a$  نیز دوره تکرار مدولاسیون برای کنترل جهت تابشی است. روش امپدانس سطحی مدوله شده سینوسی که در (۱) بیان شده است، تنها قادر است جهت تابشی و پهنای پرتو تابشی آنتن را کنترل کند [۱۳ و ۱۵-۱۶]. در این پژوهش، برای کنترل بیشتر پارامترهای پرتو تابشی، مانند سطح گلبگ کناری، ما این روش را به صورت زیر گسترش می‌دهیم:

$$X_s(y) = X_0 \left( 1 + M_{des} \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) \right) \quad (۲)$$

که در آن  $M_{des}$ ، توزیع مدولاسیون امپدانس سطحی طراحی شده برای تامین میدان الکتریکی دلخواه و در نتیجه، پرتو تابشی دلخواه برای آنتن است. با فرض آنکه سطح مدوله شده سینوسی در صفحه  $x-y$  قرار داشته باشد؛ میدان الکتریکی مود غالب (مود TM) در راستای  $Z$  بوده و می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از هارمونیک‌ها نوشته شود:

$$E_z(y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{-jk_{yn}y} \quad (۳)$$

که در آن  $n$ ، مرتبه هارمونیک فلوکه،  $A_n$  وزن مود مرتبه  $n$  ام و  $k_{yn}$  عدد موج مماسی مود فلوکه مرتبه  $n$  ام است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_{yn} = \beta_{sw} + \beta_m - j\alpha_m + \frac{2\pi n}{a} \quad (۴)$$

که در آن  $\beta_{sw}$  ثابت فاز امپدانس سطحی برای مرتبه صفر فلوکه و  $\beta_m$  و  $\alpha_m$  به ترتیب، ثابت‌های فاز و نشتی مرتبط با مدولاسیون امپدانس سطحی هستند. در [۱۳] رابطه بازگشتی برای

دست‌یابی به مقادیر فاز و نشتی در یک مدولاسیون ثابت سینوسی، محاسبه شده است که به صورت زیر قابل‌بازنویسی است:

$$D_n - \frac{1}{D_{n+1} - \frac{1}{D_{n+2} - \frac{1}{D_{n+3} - \dots}}} + \frac{1}{D_{n-1} - \frac{1}{D_{n-2} - \frac{1}{D_{n-3} - \dots}}} = 0, \quad (۵)$$

$$D_n = \frac{2}{M} \left( 1 - j \sqrt{\frac{k_0^2 - k_{yn}^2}{X_0 \omega \epsilon_0}} \right), n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots$$

در رابطه بالا،  $k_0$ ، عدد موج فضای آزاد،  $\omega$ ، فرکانس زاویه‌ای و  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی الکتریکی در فضای آزاد است.

برای تامین هر شکل پرتو دلخواه، به طور مثال کنترل سطح گلبگ کناری و پهنای تابشی آنتن، ما نیاز داریم تا سطح نشتی را کنترل کنیم. توزیع نشتی به کمک رابطه زیر به توزیع میدان الکتریکی بر سطح مرتبط می‌شود [۱۰]:

$$\alpha_m = \frac{|E_{des}(y)|^2}{2} / \left[ \frac{1}{1-R} \int_0^L |E_{des}(y')|^2 dy' - \int_0^y |E_{des}(y')|^2 dy' - \frac{1}{1-R} \frac{MTL}{MTR} \int_0^L |E_{des}(y')|^2 dy' - \frac{y}{L} \frac{MTL}{MTR} \int_0^L |E_{des}(y')|^2 dy' \right] \quad (۶)$$

که در آن  $L$ ، طول آنتن،  $R$ ، نسبت توان دریافتی در انتهای آنتن به توان ورودی آن و  $MTL$  و  $MTR$  به ترتیب بیشترین تلفات و توان تابشی برای کل ساختار آنتن هستند. توضیحات بیشتر در این زمینه در مرجع [۱۰] آورده شده است.  $E_{des}(y)$  نیز توزیع میدان الکتریکی مورد نیاز برای تامین شکل پرتو دلخواه (در این مقاله پرتو تابشی در سه جهت متفاوت) است که به کمک روش تبدیل فوریه به دست می‌آید [۱۴]. از سوی دیگر، جهت تابشی آنتن به کمک بخش حقیقی عدد موج مماسی و به صورت زیر کنترل می‌شود:

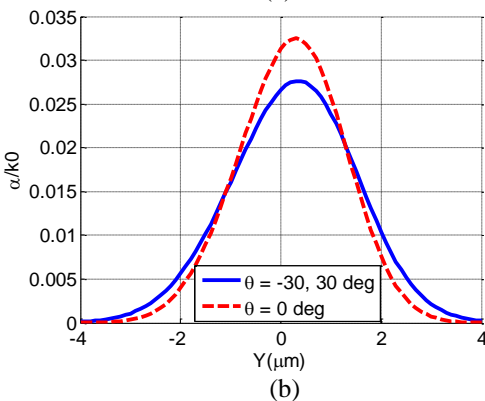
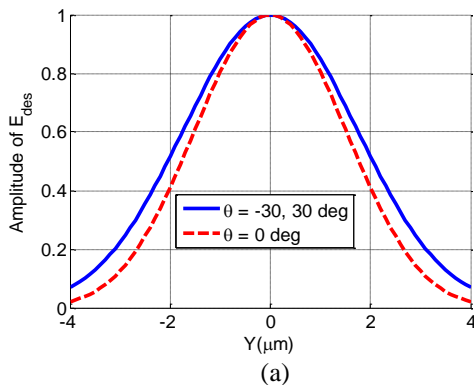
$$k_0 \sin(\theta_0) = \beta_{sw} + \beta_m - \frac{2\pi}{a} \quad (۷)$$

سپس، با استفاده از توزیع میدان الکتریکی، مقدار نشتی مورد نیاز با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود که در شکل ۲-b نمایش داده شده است.

پارامترهای مورد استفاده در این محاسبات به شرح زیر هستند:

$$R = 0.25, MTL = 0.1 \text{ wat}, MTR = 0.36 \text{ wat}, X_0 = 410 \Omega.$$

سپس، به کمک توزیع نشتی مورد نیاز، باید توزیع مدولاسیون امپدانس سطحی ( $M_{des}$ ) به دست آید. برای این منظور، به کمک رابطه (۵) مقادیر ثابت فاز و نشتی برای مدولاسیون‌های متفاوت امپدانس سطحی به دست می‌آید (شکل ۳-a, b). همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر ثابت فاز و نشتی با افزایش مدولاسیون امپدانس سطحی افزایش می‌یابد. در حقیقت، افزایش مدولاسیون می‌تواند به افزایش نشتی کمک کند.



شکل ۲: (a) توزیع دامنه برای فراهم کردن سطح گلبرگ کناری برای سه جهت تابشی  $\theta_0 = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$  و پهنای باند  $BW_{3dB} = 16.5^\circ$  و (b) توزیع نشتی مورد نیاز برای تامین مقادیر دامنه.

سپس، به کمک اطلاعات شکل‌های ۲-b و ۳-a، امپدانس سطحی مورد نیاز با رابطه (۲) به دست می‌آید. برای پرهیز از بی‌نظمی و شفافیت بیشتر تصاویر، نتایج به دست آمده از این

که در آن  $\theta_0$ ، زاویه جهت تابشی و  $\beta_{sw}$ ، عدد موج مماسی بدون تغییرات امپدانس سطحی است و به صورت زیر قابل بیان است:

$$\beta_{sw} = k_0 \sqrt{1 + \left(\frac{X_0}{Z_0}\right)^2} \quad (۸)$$

در رابطه بالا  $Z_0$  و  $k_0$ ، به ترتیب امپدانس و عدد موج فضای آزاد هستند. در روابط بالا باید به این نکته توجه کرد که ما تنها یک مود فلوکه ( $n = -1$ ) را در محاسبات پرتو تابشی آنتن، لحاظ کردیم که برای زوایای تابشی رو به عقب و مستقیم آنتن، فرض به‌طور کامل قابل قبول است؛ ولی در حالت تابش رو به جلو با پدیده مودهای ناخواسته مواجه خواهیم بود [۱۳ و ۱۴]. علت این امر، ظهور مودهای مرتبه بالاتر در حالت تابش رو به جلو است که این مودهای مرتبه بالاتر در حالت تابش مستقیم یا تابش رو به عقب امواج میرا شونده خواهند بود و بنابراین، در تشعشع راه دور آنتن ظاهر نخواهند شد [۱۳ و ۱۴].

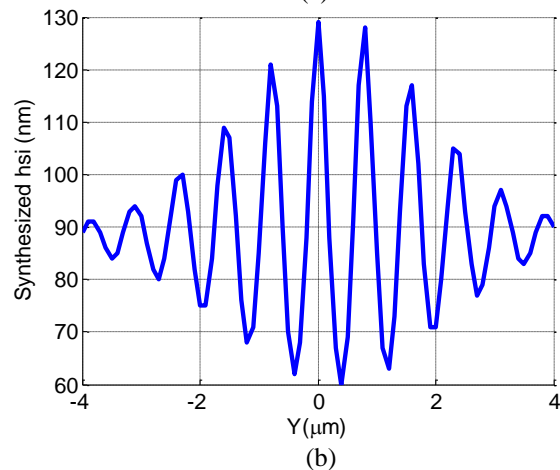
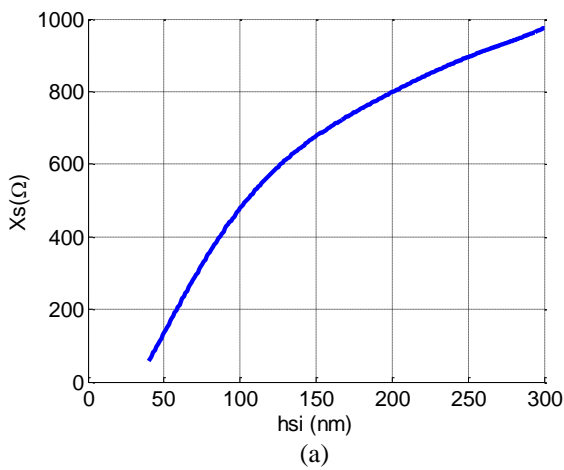
## ۲-۲- طراحی آنتن پیشنهادی با شکل پرتو دلخواه

آنتن پیشنهادی در طول موج مرکزی  $1550 \text{ nm}$  طراحی شده تا شکل پرتوی با پهنای باند  $BW = 16.5^\circ$  و سطح گلبرگ کناری  $SLL = -30 \text{ dB}$  را فراهم کند. برای آنکه توانمندی روش پیشنهادی در تامین هر شکل پرتو دلخواه نوری مشخص شود؛ سه راستای تابشی  $\theta_0 = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$  برای طراحی آنتن، در نظر گرفته شده است.

برای این منظور، باید ابتدا به کمک روابط (۷) و (۸)،  $a$  (دوره تکرار مدولاسیون) برای سه جهت تشعشعی متفاوت به دست آید ( $a_{-30} = 783, a_0 = 1048, a_{30} = 1583 \text{ nm}$ ) در این محاسبه، با توجه به کوچک بودن مقادیر  $\beta_m$  نسبت به  $\beta_{sw}$ ، از آن صرف‌نظر شد. سپس، به کمک روش تبدیل فوریه [۱۴]، توزیع دامنه  $E_{des}(y)$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود تا سطح لوب کناری  $SLL = -30 \text{ dB}$  و پهنای باند  $BW = 16.5^\circ$  را نیز فراهم کند (شکل ۲-a).

$$E_{des}(y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \vec{E}(\theta) e^{-jksin(\theta)y} k \cos(\theta) d\theta \quad (۹)$$

روش‌های پیشنهادی در گذشته بیشتر کند بوده و نیازمند محاسبات زیادی برای بررسی هر پارامتر بودند. به طوری که نه تنها ابعاد هر سلول واحد را تغییر می‌دادند، بلکه در روش آنالیز مود نیازمند تغییر فرکانسی نیز بودند تا بتوانند مود مورد نظر را در فرکانس مورد انتظار پیدا کنند، روشی که پیچیده و کند بود.



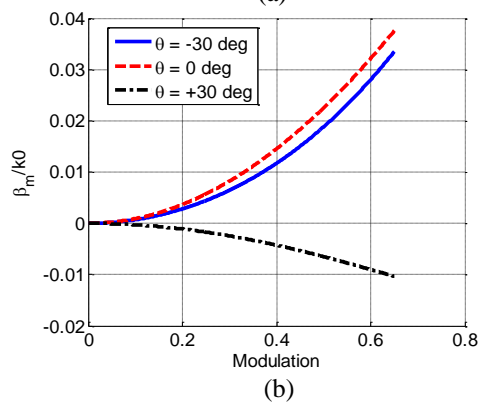
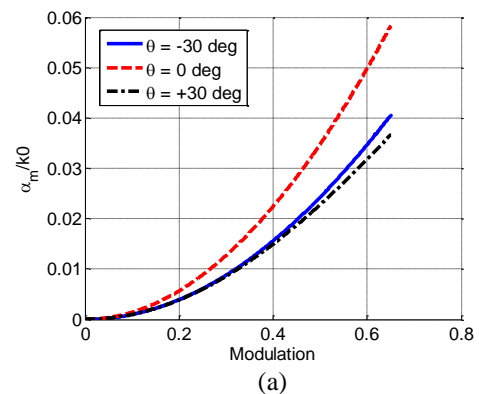
شکل ۵: (a) نتایج به دست آمده از شبیه سازی امپدانس سطحی برای مقادیر مختلف ضخامت سیلیکون موجبر دورگه پلاسمونیک و (b) سنتز  $h_{Si}(y)$  شده برای دست اابی به امپدانس سطحی ساختار نشان داده شده در شکل ۱.

در این مقاله، ما برای محاسبه امپدانس روشی جدید را پیشنهاد کردیم که سرعت بسیار بالایی داشته و در کمتر از چند دقیقه امپدانس سطحی برای تمامی پارامترها بدست می آید. در این روش، به کمک ضریب شکست موثر، امپدانس سطحی را به دست می آوریم:

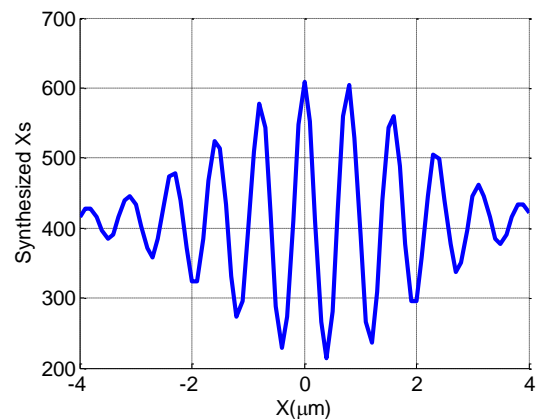
$$X_s = Z_0 \sqrt{n_{eff}^2 - 1} \quad (10)$$

که در آن،  $n_{eff}$  ضریب شکست موثر ساختار موجبر پلاسمونیک دورگه است که به صورت عددی و برای ضخامت‌های متفاوت

محاسبات فقط برای آنتن با جهت تابشی  $\theta_0 = -30^\circ$  نشان داده شده است (شکل ۴).



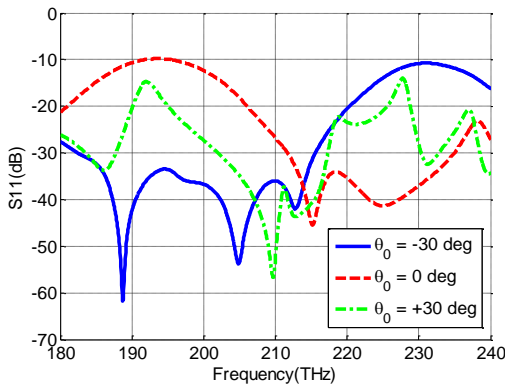
شکل ۳: مقادیر نرمالیزه شده  $\alpha_m$  (a) و  $\beta_m$  (b) برای مدولاسیون های مختلف امپدانس سطحی ساختار نشان داده شده در شکل ۱.



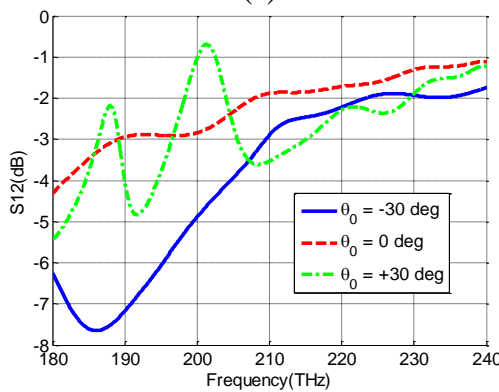
شکل ۴: امپدانس سطحی تهیه شده برای ساختار نشان داده شده در شکل ۱.

اکنون با دانستن امپدانس سطحی، باید آن را محقق کنیم. برای این منظور، از تغییرات ضخامت خط دورگه پلاسمونیک برای سنتز آنتن موج نشستی نوری، استفاده کرده ایم. در پژوهش‌های پیشین، روش‌های متفاوتی برای به دست آوردن امپدانس سطحی ساختارهای متفاوت پیشنهاد شده بود که از جمله آنها می‌توان به روش آنالیز مود ویژه [۱۵] و روش ورقه امپدانس [۱۶] اشاره کرد.

گلبرگ کناری پایینی را فراهم می‌کنند ( $S_{11} = -16, -27, -19 \text{ dB}$ ) عدم مطابقت کامل این پارامتر به مسائلی چون انتشار مودهای ناخواسته در موجبر دورگه پلاسمونیک (به غیر از مود  $TM$ )، انتشار مود انتشاری دوم فلوکه ( $n = -2$ ) ارتباط دارد.



(a)



(b)

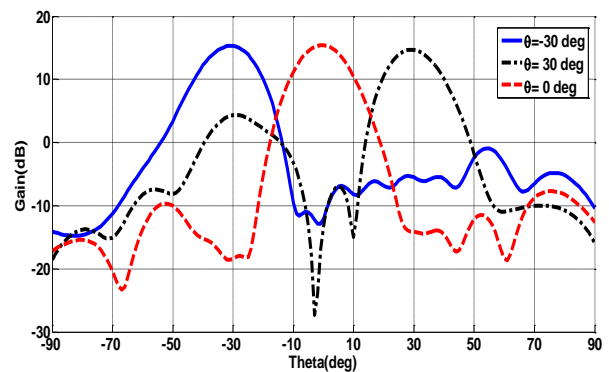
شکل ۷: پارامترهای  $S_{11}$  (a) و  $S_{12}$  (b) به دست آمده به کمک نرم افزار تمام موج CST برای آنتن‌های طراحی شده جهت تابش در سه راستای  $\theta_0 = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$ .

نتایج پارامتر پراکندگی نشان داده شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که آنتن طراحی شده دارای تطبیق مناسبی در کل باند مخابرات نوری است و پهنای وسیع  $180 - 240 \text{ THz}$  را با پارامتر تطبیق  $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$  پوشش می‌دهد (یعنی از باند O تا باند U). علت داشتن این پهنای باند بالا نیز بهره‌مندی از ساختارهای موجبری و تغییرات نرم امپدانسی در آن است. برای درک بهتر از نحوه عملکرد آنتن طراحی شده در کل باند فرکانسی، پرتو تابشی آنتن در سه فرکانس  $193.5, 210, 230 \text{ THz}$  در شکل ۸ ترسیم شده است. همانطور که از شکل پیدا است، پرتو تابشی آنتن در سایر فرکانس‌ها با یکدیگر متفاوت است. در حقیقت در آنتن‌های

موجبر دورگه پلاسمونیک و به صورت تمام موج به کمک نرم افزار CST محاسبه شده و سپس، امپدانس سطحی به کمک رابطه (۱۰) به دست می‌آید. نتایج به دست آمده برای این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۵-a نمایش داده شده است. سپس، به کمک نتایج نشان داده شده در شکل ۴ و شکل ۵-a می‌توان توزیع ضخامت‌های متفاوت سیلیکون خط دورگه پلاسمونیک،  $h_{si}(y)$  را برای دستیابی به امپدانس سطحی سنتز شده، به دست آورد. نتایج به دست آمده برای این منظور در شکل ۵-b نمایش داده شده است.

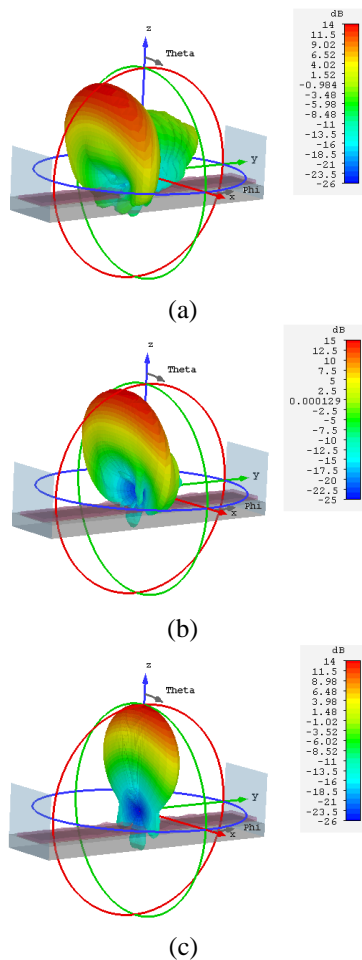
### ۳- نتایج و بحث

برای ارزیابی عملکرد آنتن‌های طراحی شده، در این بخش، نتایج به کمک نرم افزار تمام موج CST صحه‌گذاری می‌شوند. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۶ و ۷ نمایش داده شده است. در شکل ۶، پرتو تابشی آنتن‌های طراحی شده، نشان داده شده است و در شکل ۷، پارامترهای پراکندگی و تطبیق آنتن‌ها مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از پارامتر پراکندگی برای آنتن‌های با پرتو تابشی مستقیم، رو به جلو و رو به عقب نتایج مشابهی دارد.



شکل ۸: پرتو تابشی بدست آمده به کمک نرم افزار تمام موج CST برای آنتن‌های طراحی شده با جهت تشعشعی  $\theta_0 = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$ ، پهنای باند  $BW = 16.5^\circ$  و سطح گلبرگ کناری  $S_{11} = -30 \text{ dB}$ .

همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، هر سه آنتن طراحی شده دارای پرتو تابشی با جهت‌های تابشی طراحی شده ( $\theta_0 = -30.5^\circ, 0^\circ, +31^\circ$ ) و پهنای باند مورد انتظار ( $BW = 17.2^\circ, 16.5^\circ, 16.7^\circ$ ) هستند که مشابهت زیادی با جهت‌های مورد انتظار ( $\theta_0 = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$ ) و پهنای باند دلخواه ( $BW = 16.5^\circ$ ) دارد. افزون بر این، آنتن‌های طراحی شده سطح



شکل ۸: بهره کل به سمت آمده به کمک نرم افزار تمام موج CST برای آنتن طراحی شده در شکل ۱ در سه فرکانس (a) 193.5 THz، (b) 210 THz و (c) 230 THz

موج نشتی، تغییرات فرکانس منجر به تغییرات زاویه تابشی می شود و این مسئله در مراجع [۱۳-۱۶ و ۲۰] نیز بیان شده است.

همان طور که در شکل ۸ نیز مشاهده می شود، آنتن طراحی شده در فرکانس  $230 \text{ THz}$ ، دارای پرتو تابشی با زاویه صفر درجه است. در حقیقت یکی دیگر از مشکلات آنتن های موج نشتی، طراحی آنتن با زاویه تابشی مستقیم یا همان زاویه صفر درجه است. علت این امر نیز به عدم تطبیق آنتن و انعکاس های زیاد در ساختار آنتن باز می گردد [۷-۱۰]. یکی از مزیت های آنتن پیشنهادی، رفتار نرم و تغییرات آهسته امپدانس سطحی است که به کمک تغییرات نرم عرض خط موجبری دورگه پلاسمونکی به دست می آید (شکل ۱). این موضوع سبب می شود تا آنتن پیشنهادی بتواند در حالت زاویه افق آنتن یا همان صفر درجه نیز مشخصات تطبیق به نسبت بهتری نسبت به آنتن های موج نشتی رایج از خود نشان دهد (شکل ۷- فرکانس  $230 \text{ THz}$ ). علت تطبیق بالای آنتن در کل باند نوری نیز به همین جهت است. افزون بر این، هرچه دقت سلول های واحد (یا همان رزولوشن ساخت) بیشتر باشد، می توان به نتایج بهتری دست یافت و تطبیق بهتری از آنتن طراحی شده گرفت. ولی در این مقاله نویسندگان با توجه به محدودیت ساخت مقدار  $100$  نانومتر را برای این منظور در نظر گرفته اند.

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی جدید برای دستیابی به هر شکل پرتو دلخواه در باند نوری پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی، از روش تبدیل فوریه برای بهبود روش امپدانس سطحی مدوله شده استفاده شد. سپس، به کمک روش پیشنهادی، آنتن موج نشتی نوری در طول موج  $1550 \text{ nm}$  طراحی شد و به کمک تغییرات ضخامت خط دورگه پلاسمونکی تحقق یافت. نشان داده شد که آنتن طراحی شده قادر است تا تمامی باند مخابرات نوری را پوشش دهد و در عین حال پرتو تابشی مشخصی را با سطح گلبزرگ کناری مطلوبی فراهم کند.

## مراجع

- [1] L. Cao, J.-S. Park, P. Fan, B. Clemens, and M. L. Brongersma, "Resonant germanium nanoantenna photodetectors," *Nano letter*, 10, 1229–1233, 2010.
- [2] J.N. Anker, W.P. Hall, O. Lyandres, N.C. Shah, J. Zhao, and R.P. VanDuyne, "Bio-sensing with plasmonic nano-sensors," *Nature material*, 7, 442–453, 2008.
- [3] V. Ebrahimi, L. Yousefi, M. M. Taheri, "Enabling inter- and intra-chip optical wireless interconnect by the aid of hybrid plasmonic leaky-wave optical antennas," *Optical communications*, 382, 119-126, 2017.

photonic Applications," IEEE photonic technology letter, 27, 1092-1095, 2015.

[13] A. Oliner and A. Hessel, "Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surfaces," IRE transaction on antenna and propagation, 7, 201-208, 1959.

[14] C. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. San Francisco, Ed. 3rd, Hoboken, NJ: John Wiley, 2005.

[15] M. Esquius-Morote, J. S. Gómez-Díaz and J. Perruisseau-Carrier, "Sinusoidally Modulated Graphene Leaky-Wave Antenna for Electronic Beam-scanning at THz," IEEE transaction terahertz science and technology, 4, 116-122, 2014.

[16] M. Farmahini-Farahani and H. Mosallaei, "Functional-Graded Index Metasurfaces for Infrared Radiation and Guiding," IEEE transaction on nano-technology, 14, 75-81, 2015.

[17] X. Liu, and A. Alu, "Subwavelength leaky-wave optical nanoantennas: Directive radiation from linear arrays of plasmonic nanoparticles," Physic Review B, 82, 144305, 2010.

[18] Y. Wang, A. S. Helmy, and G. V. Eleftheriades, "Ultra-wideband optical leaky-wave slot antennas," Optics express, 19, 12392–12401, 2011.

[19] Q. Song, S. Campione, O. Boyraz, and F. Capolino, "Silicon-based optical leaky wave antenna with narrow beam radiation," Optics express, 19, 8735–8749, 2011.

[20] W. D. Sacher, Y. Huang, L. Ding, B. J. Taylor, H. Jayatilaka, G.-Q. Lo, and J. K. Poon, "Wide bandwidth and high coupling efficiency  $\text{Si}_3\text{N}_4$  on soi dual-level grating coupler," Optics express, 22, 10938–10947, 2014.

[4] L. Novotny, and S. J. Stranick, "Near-field optical microscopy and spectroscopy with pointed probes," Annular review physics chemistry, 57, 303-331, 2006.

[5] Q. Song, F. Qian, E. Tien, I. Tomov, J. Meyer, X. Sang, and O. Boyraz, "Imaging by silicon on insulator waveguides," Applied physics letter, 94, 231101–231101, 2009.

[6] C. K. Toth, "R&d of mobile lidar mapping and future trends," presented at the ASPRS annular conference, Baltimore, MD, USA, 2009.

[7] F. Taghian, V. Ahmadi, and L. Yousefi, "Enhanced Thin Solar Cells Using Optical Nano-Antenna Induced Hybrid Plasmonic Travelling-Wave," Journal of light-wave technology, 34, 1267-1273, 2016.

[8] L. Yousefi, and A. C. Foster, "Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna," Optics express, 20, 195111, 2012.

[9] L. Yousefi, "Highly directive hybrid plasmonic leaky wave optical nanoantenna," Progress electromagnetic research letter, 50, 85–90, 2014.

[10] M. A. Panahi, L. Yousefi and M. Shahabadi, "Highly Directive Hybrid Plasmonic Leaky-Wave Optical Antenna With Controlled Side-Lobe Level," Journal of light-wave technology, 33, 4791-4798, 2015.

[11] B. A. Nia, L. Yousefi and M. Shahabadi, "Integrated Optical-Phased Array Nanoantenna System Using a Plasmonic Rotman Lens," Journal of light-wave technology, 34, 2118-2126, 2016.

[12] M. Saad-Bin-Alam, M. I. Khalil, A. Rahman and A. M. Chowdhury, "Hybrid Plasmonic Waveguide Fed Broadband Nanoantenna for Nano-



[21] D. Dai, and S. He, “A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement,” *Optics express*, 17, 16646–16653, 2009.

[22] R. Salvador, A. Martinez, C. Garcia-Meca, R. Ortuno, and J. Marti, “Analysis of hybrid dielectric plasmonic waveguides,” *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 14, 1496–1501, 2008.

[23] P. B. Johnson and R.W. Christy, “Optical constants of the noble metals”, *Physic Review B*, 6, 4370–4379, 1972.



# Light Shaping using Modulated Optical Leaky wave Nano-Antennas

---

Vahid Ghaffari, Leila Yousefi\*

---

Department of Communication, School of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

**Abstract:** In this study, new optical leaky wave antennas are proposed to form light in an arbitrary manner for operation at the standard optical telecommunication wavelength of 1550 nm. The proposed antennas are designed based on hybrid plasmonic structures in which pattern synthesis is provided by modulation of the thickness of the silicon layer. The modulation of thickness changes the light velocity in the structure leading to different leakage rates through the antenna. Comparing the structure proposed in this paper with previously reported optical leaky wave antennas, the proposed design has the potential for integration with other devices and also provides any desired radiation pattern in wide bandwidth of operation. The proposed antennas can have applications in Light Detection and Ranging System (LIDARS), optical wireless communication, and solar cell efficiency improvement.

**Keywords:** Light Shaping, Optical Communication, Leaky wave Antennas, Hybrid Plasmonic waveguide.