

# چرخش پرتو آنتن فلزی دندانهای موج نشتی در فرکانس ثابت با استفاده از تغییر امپدانس سطحی

یعقوب قانع قره‌باغ<sup>۱</sup> مجید اخوت<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات- دانشگاه جامع امام حسین(ع)-تهران- ایران

[yqane@ihu.ac.ir](mailto:yqane@ihu.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات - دانشگاه جامع امام حسین(ع)-تهران - ایران

[Mokhovvat@ihu.ac.ir](mailto:Mokhovvat@ihu.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله به معرفی روش جدیدی از چرخش پرتو آنتن در فرکانس ثابت می‌پردازیم که بدون استفاده از شیفت دهنده فاز قادر به چرخش پرتو آنتن می‌باشد. با استفاده از تغییر امپدانس سطحی آنتن فلزی موج نشتی در فرکانس ثابت، می‌توان نشان داد که قادر به چرخش پرتو بدون استفاده از شیفت‌دهنده‌های فازی می‌باشیم. آنتن موج نشتی مورد نظر در این مقاله آنتن موج نشتی فلزی دندانهای است که امپدانس سطحی این آنتن با تغییر ارتفاع یا فاصله هوایی بین دندانها کنترل و در نتیجه پارامترهای اساسی آنتن موج نشتی به منظور چرخش پرتو در زاویه مورد نظر تغییر خواهند نمود. در این مقاله با شبیه‌سازی های صورت گرفته نشان می‌دهیم با تغییر ارتفاع دندانهای آنتن موج نشتی دندانهای، به میزان یک و نیم میلی‌متر در فرکانس ۱۰ GHz قادر به چرخش پرتو ۲۵ درجه‌ای از ۱۱ تا ۳۶ درجه خواهیم بود.

**واژه‌های کلیدی:** چرخش پرتو، آنتن موج نشتی، امپدانس سطحی، آنتن آرایه‌ای، ساختار دندانهای

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ قبول مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۲

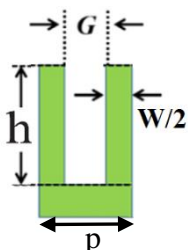
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰

نام نویسنده مسئول: مجید اخوت

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - اتوبان شهید بابایی - دانشگاه جامع امام حسین(ع) - دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات.

عمق ( $h$ ) را در اختیار داریم، می‌توانیم یکی را ثابت فرض نموده و با تغییر پارامتر بعدی امپدانس‌های مورد نظر را به دست آوریم. در این مقاله فاصله هوایی را ثابت فرض کرده و با تغییر عمق طراحی را انجام داده‌ایم.

البته تغییر طول سلول واحد ( $p$ ) نیز می‌تواند در محاسبه امپدانس آنتن و حتی کنترل امپدانس سطحی موثر باشد.



شکل (۱): سلول واحد آنتن موج نشستی دندانه‌ای

در موضوع چرخش پرتو آنتن‌های موج نشستی<sup>۲</sup>، روش مرور فرکانسی<sup>۳</sup> یکی از روش‌هایی است که چرخش پرتو را امکان‌پذیر می‌سازد. در این روش چرخش پرتو آنتن با استفاده از تغییر فرکانس حاصل خواهد شد. موضوع اصلی این مقاله ارائه راهکار جهت چرخش پرتو توان بالا<sup>۴</sup> در فرکانس ثابت و بدون مرور فرکانس می‌باشد. چرخش پرتو آنتن در فرکانس ثابت به روش‌های چرخش مکانیکی آنتن، استفاده از چندین آنتن مجزا و مستقل (که هر کدام دارای پرتو معین و در زاویه معلوم می‌باشند و با تحریک هر آنتن می‌توان زاویه پرتو را تغییر داد) یا با استفاده از آرایه‌ای از آنتن‌ها و مشروط به استفاده از شیفت‌دهنده فاز<sup>۵</sup> امکان‌پذیر خواهد بود که به آنتن‌های آرایه فازی مشهور می‌باشند. در این روش فاصله بین عناصر آرایه و همچنین فاز سیگنال رسیده به هر آنتن زاویه پرتو کل آرایه را تعیین خواهد نمود. استفاده از شیفت‌دهنده‌های فاز قابل کنترل در آرایه آنتن، کامل‌ترین نوع چرخش پرتو آنتن را محقق می‌نماید در عوض دارای پیچیدگی و هزینه بالایی می‌باشند، لذا نمی‌توان آنها را برای سیستم‌های ساده پیشنهاد نمود.

تمام روش‌های بیان شده قابل استفاده برای آنتن‌های رزونانسی، که در واقع تقریباً تمام آنتن‌های موجود هستند، می‌باشند. هدف ما در این مقاله معرفی آنتن‌های فلزی دندانه‌ای موج نشستی‌توان بالا است که بدون نیاز به شیفت‌دهنده‌های فاز و آنتن آرایه‌ای، قابلیت چرخش پرتو در فرکانس ثابت را دارا هستند.

ایده انتشار موج الکترومغناطیسی از سطح دارای امپدانس با مدولاسیون سینوسی را آقای اولیور در سال ۱۹۵۹ مطرح نمودند [۱]. آقای لی در فصل ۱۷ کتاب خود به معرفی این نوع آنتن پرداخته [۲] و پس از سال ۲۰۰۰ علاقه مندی به این نوع آنتن افزایش یافته و کتاب‌ها [۳-۴] و مقالات متعددی مانند مراجع [۵-۱۱] در حوزه آنتن‌های موج نشستی منتشر شده‌اند. در [۵، ۹] امپدانس آنتن توسط کنترل ظرفیت خازن متغیر، در [۶، ۱۰] آنتن با ساختار میکرواستریپی، در [۸] آنتن دندانه‌ای با عمق متغیر و پهنای دندانه ثابت و در [۱۱] آنتن شکافدار معرفی و بررسی شده‌اند. با توجه به ساختار آنتن‌های موج نشستی، چرخش پرتو آنتن علاوه بر تغییر فرکانس توسط کنترل امپدانس سطحی نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

کنترل مدولاسیون امپدانس سطحی در آنتن‌های موج نشستی، یکی از تکنیک‌های مورد استفاده به منظور ایجاد قابلیت انتشار موج از سطح آنتن به فضای آزاد در زاویه انتشار دلخواه است. در [۱۲] آنتن دندانه‌ای با قابلیت ایجاد پرتو در راستای عمود بر آنتن معرفی شده و در [۱۳] مدهای انتشاری امپدانس سطحی معرفی شده است.

## ۲- آنتن موج نشستی دندانه‌ای

سلول واحد آنتن موج نشستی دندانه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. از کنار هم قرار دادن تعدادی سلول واحد فلزی که در آن‌ها شیبی به عمق  $h$  و فاصله هوایی  $G$  ایجاد شده، آنتن موج نشستی تشکیل می‌یابد. با توجه به این که در این ساختار پارامتر متغیر فاصله هوایی ( $G$ ) و

با فرض  $M=0.2$  و تغییر مقدار  $x'$  از ۰.۶ تا ۲ حل معادله عمومی آنتن‌های موج نشستی، نتیجه در شکل ۲ نشان داده شده است. اگر فرکانس کار را برابر  $10\text{GHz}$  ( $k_0 = 2\pi/\lambda = 209.33$ ) و  $k_0 a = 5.917$  فرض کنیم، در نتیجه  $a = 28.25\text{mm}$  به دست خواهد آمد و با تغییر مقدار  $x'$  از ۰.۶ تا ۱.۶ انتظار چرخش پرتو از ۱۰ الی ۶۰ درجه را خواهیم داشت. برای مقادیر  $x'$  بزرگتر از ۱.۶ انتظار تشعشع نخواهیم داشت زیرا منحنی این مقادیر با محور  $k_0 a = 5.917$  قطع داده نمی‌شود. با توجه به این که مقدار  $x'$  برابر ۱.۶ و ۰.۶ در حالت بحرانی قرار دارد، مقدار  $x'$  از ۰.۸ تا ۱.۴ را بررسی می‌نماییم. در این صورت انتظار چرخش ۲۷ درجه‌ای پرتو از ۱۵ تا ۴۲ درجه را خواهیم داشت.

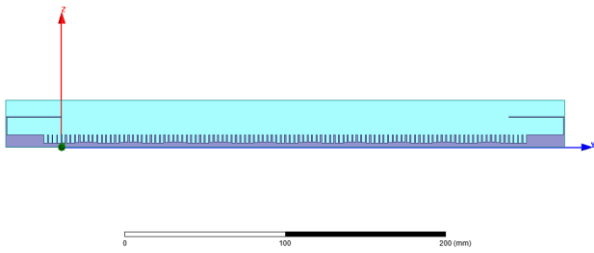
اگر بخواهیم هر دوره تناوب آنتن را به ۱۰ تکه مساوی تقسیم کنیم، مقدار ابعاد هر سلول واحد برابر  $p = 2.825\text{mm}$  خواهد بود. با استفاده از رابطه ۱ امپدانس سطح مورد نیاز به دست آمده و با فرض فاصله هوایی برابر  $G = 2\text{mm}$ ، برای محاسبه عمق سلول واحد از رابطه ۲ استفاده می‌کنیم [۴].

$$\eta_{surf}(x) = j\eta_0 X' \left[ 1 + M \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right] \quad (1)$$

$$h = \frac{1}{k_0} \arctan\left(\frac{\eta_{surf} p}{\eta_0 G}\right) \quad (2)$$

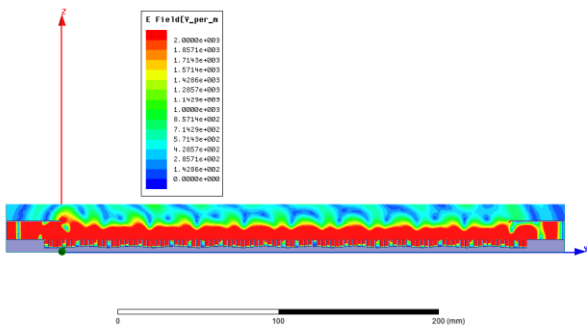
$$p = W + G$$

نتیجه محاسبه زاویه تشعشع پرتو، امپدانس و عمق سلول‌های واحد در شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. با کنار هم قراردادن ۱۰ دوره تناوب (یعنی ۱۰۰ عنصر واحد)، ساختار آنتن نهایی ایجاد می‌شود که در شکل ۵ نشان داده شده است.

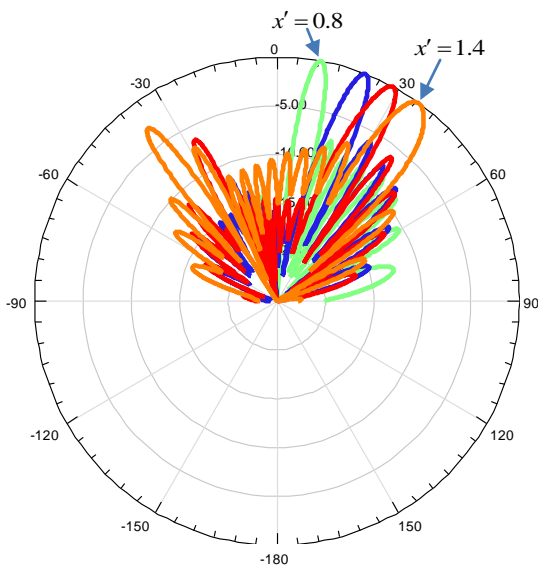


شکل (۵): ساختار نهایی آنتن موج نشستی دندانه‌ای با عمق متغیر

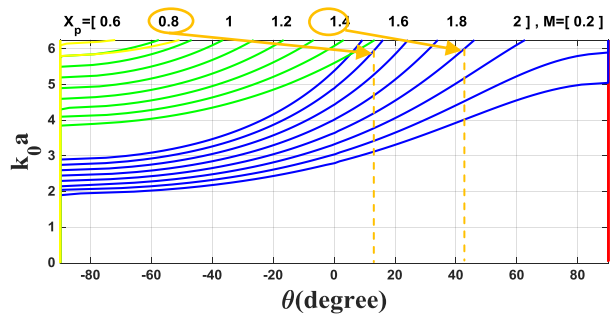
با توجه به این که آنتن موج نشستی دارای مد انتشاری TM است [۱۳]، بنابراین باید با ساختاری تحریک شود که قابلیت تحریک این مد را داشته باشد. با تحریک ساختار آنتن موج نشستی نهایی توسط موجبری که فاقد دیواره‌های جانبی است و مد انتشاری TEM را ایجاد می‌کند، آنتن را تحریک می‌کنیم [۴]. نمودار توزیع میدان الکتریکی آنتن موج نشستی نهایی در شکل ۶ و الگوی تشعشی آنتن موج نشستی با ساختار دندانه‌ای با عمق متغیر به ازاء  $x'$  از 0.8 تا 1.4 در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۶): نمودار توزیع میدان الکتریکی ساختار دندانه‌ای عمق متغیر

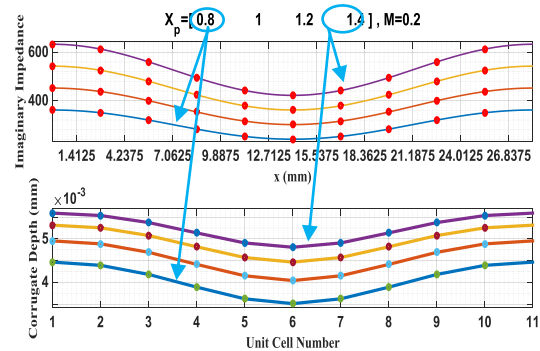


شکل (۷): نمودار الگوی تشعشی ساختار دندانه‌ای عمق متغیر



شکل (۲): نتیجه حل عددی معادله عمومی آنتن‌های موج نشستی و محاسبه زاویه تشعشع

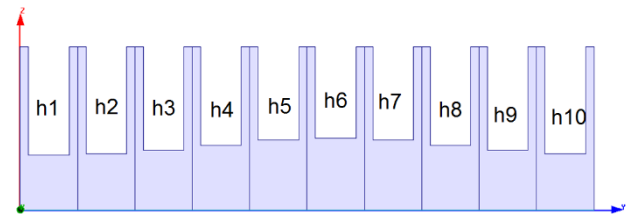
یک دوره تناوب از آنتن موج نشستی مورد نظر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۳): امپدانس و عمق سلول واحد

جدول (۱): نتایج عددی محاسبه عمق‌های سلول واحد

	$x' = 0.8$	$x' = 1$	$x' = 1.2$	$x' = 1.4$
h1(mm)	4.466	4.955	5.318	5.596
h2(mm)	4.392	4.887	5.257	5.540
h3(mm)	4.183	4.692	5.079	5.378
h4(mm)	3.889	4.414	4.820	5.140
h5(mm)	3.621	4.151	4.572	4.908
h6(mm)	3.510	4.041	4.466	4.809
h7(mm)	3.889	4.151	4.572	4.908
h8(mm)	4.183	4.414	4.820	5.140
h9(mm)	4.392	4.692	5.079	5.378
h10(mm)	4.466	4.887	5.257	5.54
$\theta^\circ$	15	22	31	42



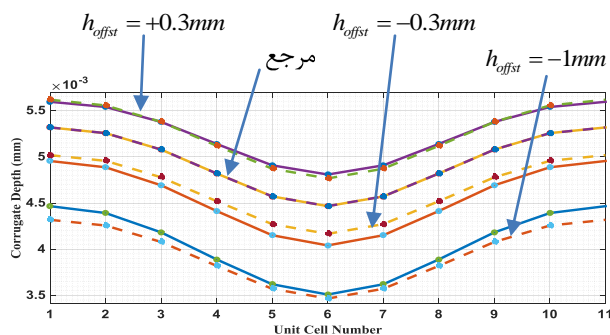
شکل (۴): یک دوره تناوب ساختار دندانه‌ای عمق متغیر و ۱۰ سلول واحد

جدول (۲): نتایج عددی تغییر عمق‌های سلول واحد به صورت

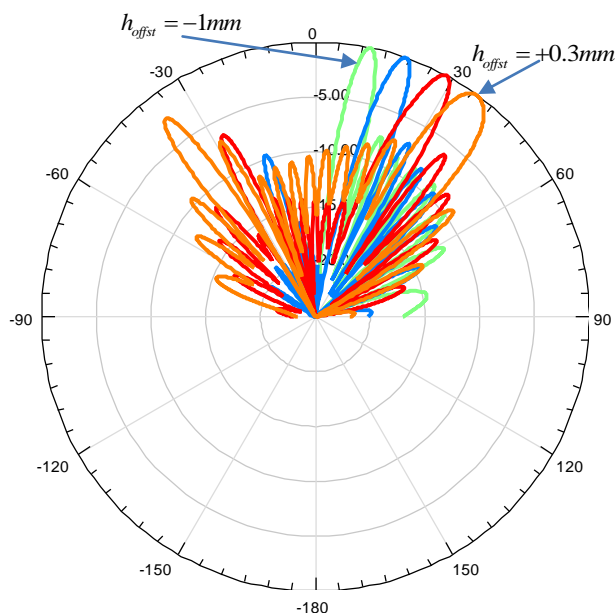
یکنواخت

	$h_{offset} = -1$	$h_{offset} = -0.3$	مرجع	$h_{offset} = +0.3$
<b>h1(mm)</b>	<b>4.318</b>	<b>5.018</b>	<b>5.318</b>	<b>5.618</b>
<b>h2(mm)</b>	<b>4.257</b>	<b>4.957</b>	<b>5.257</b>	<b>5.557</b>
<b>h3(mm)</b>	<b>4.079</b>	<b>4.779</b>	<b>5.079</b>	<b>5.379</b>
<b>h4(mm)</b>	<b>3.820</b>	<b>4.520</b>	<b>4.820</b>	<b>5.120</b>
<b>h5(mm)</b>	<b>3.572</b>	<b>4.272</b>	<b>4.572</b>	<b>4.872</b>
<b>h6(mm)</b>	<b>3.466</b>	<b>4.166</b>	<b>4.466</b>	<b>4.766</b>
<b>h7(mm)</b>	<b>3.572</b>	<b>4.272</b>	<b>4.572</b>	<b>4.872</b>
<b>h8(mm)</b>	<b>3.820</b>	<b>4.520</b>	<b>4.820</b>	<b>5.120</b>
<b>h9(mm)</b>	<b>4.079</b>	<b>4.779</b>	<b>5.079</b>	<b>5.379</b>
<b>h10(mm)</b>	<b>4.257</b>	<b>4.957</b>	<b>5.257</b>	<b>5.557</b>

به منظور مقایسه نتایج، الگوی تشعشی هر دو حالت را بر روی هم رسم و در شکل ۱۰ نمایش می‌دهیم.



شکل (۸): تغییرات عمق سلول‌های واحد به صورت یکنواخت



شکل (۹): نمودار الگوی تشعشی ساختار دندانه‌ای با تغییر عمق یکنواخت

در شکل ۱۰ الگوهای تشعشی با خطوط توپر برای حالت تغییر ارتفاع سلول‌های واحد اصلی و الگوهای تشعشی خط چین برای حالت

با توجه به شکل ۷ دیده می‌شود که پرتو آنتن در محدوده ۲۷ درجه از زاویه ۱۰ الی ۳۷ درجه جابجا می‌شود. البته با توجه به شکل ۲، انتظار داشتیم محدوده تشعشع از ۱۵ الی ۴۲ درجه باشد لیکن با ۵ درجه جابجایی کل پرتوها مواجه شدیم. دلیل این جابجایی ۵ درجه‌ای چرخش پرتوها، لحاظ نمودن ساختار بی‌نهایت در فرضیات معادله ۱ و طراحی و شبیه‌سازی ساختار آنتن موج نشستی به صورت ابعاد محدود است.

همچنین محدود بودن ابعاد ناحیه تشعشی در شبیه‌سازی، باعث به وجود آمدن پرتوهای دیده شده در زوایای منفی ناشی از انعکاس توان از ناحیه انتهایی آنتن و تشعشع موج بازگشتی دقیقاً در زوایای مقابل زاویه پرتو اصلی است. برای اجتناب از این مسئله باید طول آنتن را به اندازه‌ای اضافه نماییم تا حداکثر ده درصد توان تزریقی به انتهای آنتن برسد.

با توجه به جدول ۱، تغییرات ارتفاع سلول‌های مختلف برای تغییرات امیدانسی به ازای  $x'$  های مختلف یکسان نمی‌باشند همچنین دامنه تغییرات عمق مورد نیاز آنتن موج نشستی دندانه‌ای برای جابجایی ۲۵ درجه‌ای پرتو اصلی در سلول‌های اول یک پریود از آنتن و برابر ۱.۱۳mm و حداکثر این تغییرات عمق برای سلول‌های میانی پریود و برابر ۱.۲۹۹mm خواهد بود. این تغییرات نابرابر در اول و آخر یک دوره تناوب و یکسان نبودن تغییرات ارتفاع سلول‌های مختلف، نیازمند سیستم پیچیده‌ای جهت کنترل عمق‌های متغیر به منظور کنترل زاویه تشعشع پرتو در پیاده‌سازی این ایده می‌گردد.

حال اگر به این نکته توجه داشته باشیم که در یک آنتن حداقل ۱۰ دوره تناوب یا بیشتر مورد نیاز است، برای غلبه بر این پیچیدگی در پیاده‌سازی طرح، از تغییر عمق ثابت در کل آنتن استفاده می‌کنیم. به این معنی که در یک دوره تناوب، میزان تغییرات عمق در اول و وسط دوره تناوب را به صورت یکسان کنترل نماییم.

به عنوان مثال اگر تغییرات ارتفاع یک دوره تناوب آنتن با  $X' = 2$  را به عنوان مرجع انتخاب کنیم و تغییرات عمق را در کل دوره تناوب از -1mm تا +0.3mm (متناسب با  $X' = 2$ ) برای تمام عناصر سلول واحد یکسان اعمال نماییم، پیچیدگی کنترل عمق‌ها به یک مکانیزم ساده تبدیل خواهد شد.

برای بررسی تاثیر ساختار پیشنهادی، مقادیر عمق سلول‌های واحد آنتن طراحی شده با  $X' = 2$  را به صورت مرجع فرض نموده و با تغییر ارتفاع آفست یکسان از -1mm تا +0.3mm در کل آنتن نتایج حاصله را به دست آورده و با نتایج اصلی مقایسه می‌کنیم. عمق‌های جدید در جدول ۲ و به صورت خط چین در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

نتیجه حاصل از تغییرات یکنواخت عمق سلول‌های واحد در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، چرخش پرتو در اثر تغییرات یکنواخت عمق برابر ۲۶ درجه و از زاویه ۱۱ تا ۳۷ درجه خواهد بود.

### ۳- نتیجه‌گیری

روش‌های متعددی در رابطه با چرخش پرتو غیر از روش شیفت دهنده فاز متغیر همانند چرخش پرتو با استفاده از ماتریس باتلر [۱۴] که از شیفت دهنده فاز ثابت بهره می‌گیرند، وجود دارند.

با توجه به بررسی تاثیرگذاری پارامترهای قابل تغییر و هدف مقاله مبنی بر چرخش پرتو آنتن موج نشستی در فرکانس ثابت و بدون استفاده از شیفت دهنده فازو فقط با کنترل امپدانس سطحی آنتن فلزی موج نشستی، می‌توان از تغییر مقادیر  $x'$  و  $a$  به منظور چرخش پرتو و به طور همزمان تغییر مقدار  $M$  به منظور کنترل پهنای پرتو استفاده نمود. این تغییرات در امپدانس سطحی آنتن موج نشستی تاثیرگذار هستند.

در این مقاله به توجه به انتخاب ساختار دندانهای برای آنتن فلزی موج نشستی، نمی‌توان از تغییر دوره تناوب به منظور چرخش پرتو استفاده نمود و به چرخش پرتو آنتن در فرکانس ثابت و بدون استفاده از شیفت‌دهنده فاز و فقط با تغییر مقدار  $x'$  امپدانس سطح دست یافتیم.

تغییر مقدار  $x'$  به صورت تغییر عمق سلول‌های واحد در طول آنتن حاصل شد که به دلیل پیچیدگی کنترل تغییرات عمق سلول‌های واحد، از روش تغییر عمق سلول‌های واحد به طور یکنواخت و همزمان استفاده گردید.

نتیجه حاصل از این تغییرات امپدانس سطحی آنتن موج نشستی دندانهای، جابجایی ۲۶ درجه‌ای پرتو از ۱۱ الی ۳۷ درجه با تغییر ۱٫۳ میلی‌متری عمق سلول‌های واحد نشان داد.

نوآوری این مقاله معرفی آنتن فلزی دندانهای موج نشستی است که با توجه به ساختار آنتن قابلیت تحمل توان بالا و چرخش پرتو در فرکانس ثابت توسط تغییر عمق دندانها صورت می‌پذیرد و نیاز به زیرلایه دی‌الکتریک یا دیود جهت کنترل امپدانس سطحی آنتن موج نشستی ندارد.

### سپاسگزاری

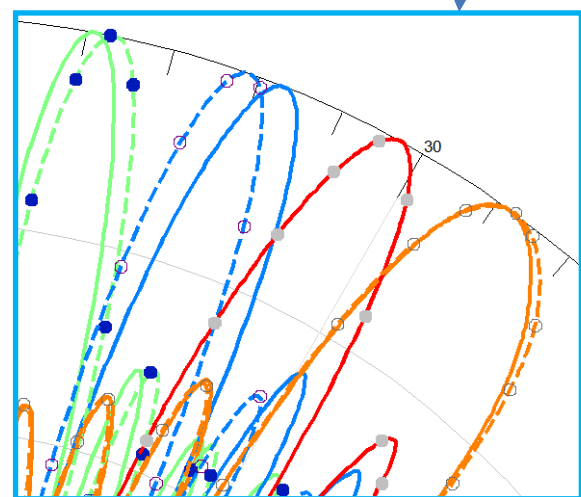
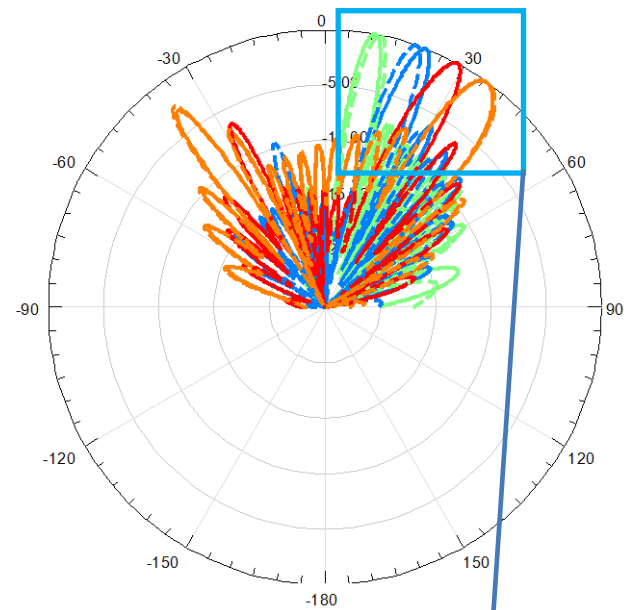
نویسندگان این مقاله از هم فکری اعضای هیئت تحریریه نشریه علمی-پژوهشی مهندسی برق و الکترونیک ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

### مراجع

- [1] A. Oliner and A. Hessel, "Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surface", IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 7, no. 5, pp. 201-208, December 1959.
- [2] Y. T. Lo, S. W. Lee, Antenna Handbook, Vol. 3, Chapman & Hall, 1993.
- [3] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] Z. N. Chen, D. Liu, X. Qing, *Handbook of Antenna Technologies*, Springer, 2016

تغییر ارتفاع سلول‌های واحد به صورت یکنواخت است. همانطور که دیده می‌شود روش تغییر ارتفاع یکنواخت به میزان بسیار زیادی با حالت اصلی تطبیق دارد. بنابراین به چرخش پرتو مورد نظر با ساختار ساده شده تغییر ارتفاع یکنواخت خواهیم رسید که با تقریب بسیار خوبی تاثیری برابر با تغییر  $X'$  دارد و کمک شایانی در پیاده‌سازی آن خواهد داشت.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها تایید کننده این موضوع گردید که می‌توان پرتو آنتن را در فرکانس ثابت و بدون استفاده از شیفت‌دهنده فاز در فضا چرخاند. باید به این موضوع توجه داشت که این روش چرخش پرتو در فضا با استفاده از مدولاسیون امپدانس سطحی و در ساختار آنتن‌های فلزی موج نشستی امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودار الگوی تشعشعی ساختار دندانهای با تغییر عمق یکنواخت (خط چین) در مقایسه با تغییر عمق غیر یکنواخت (خط پر)

- [5] Y. J. Guo, J. L. Gomez, R. Guzman, A. R. Weily, "Reconfigurable Leaky Wave Antennas", FERMAT, 2014
- [6] A. M. Patel, and A. Grbic, "A Printed Leaky-Wave Antenna Based on a Sinusoidally-Modulated Reactance Surface", IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 59, no. 6, June 2011.
- [7] P. Burghignoli, G. Lovat, and D. R. Jackson, "Analysis and optimization of leaky-wave radiation at broadside from a class of 1-D periodic structures", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, no. 9, pp. 2593-2604, September 2006.
- [8] A. H. Panaretos and D. H. Werner, "Spoof plasmon radiation using sinusoidally modulated corrugated reactance surfaces", optics express, vol. 24, no. 3, pp. 2593-2604, 8 Feb. 2016.
- [9] A. H. Panaretos and D. H. Werner, "Leaky wave antennas based on capacitively tuned modulated reactance surfaces", IEEE Antennas and Wireless propagation Letters, 2015.
- [10] G. Sh. Kong, H. F. Ma, B. G. Cai, T. J. cui, "Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic waveguide", Scientific Reports, July 2016.
- [11] M. Ettorre, A. Neto, G. Gerini, S. Maci, "Leaky-Wave Slot Array Antenna Fed by a Dual Reflector System", IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 56, no. 10, October 2008.
- [12] Iyemeh Uchendu and James Kelly, "Survey of Beam Steering Techniques Available for Millimeter Wave Applications." Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 68, pp35-54, 2016.
- [13] Dan Sievenpiper et al, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 47, no. 11, November 1999

[۱۴] امیر مهران‌افزا، پوریا براتی طرقي، علی پورزیا، "طراحی ماتریس باتلر ۴×۴ جهت شکل دهی پرتو آنتن در شبکه های آرایه فازی". مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۶، شماره ۴، ۱۳۹۸.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup>Beam Scanning  
<sup>2</sup>Leaky wave Antenna  
<sup>3</sup>Frequency Scan  
<sup>4</sup>High Power  
<sup>5</sup>Phase Shifter  
<sup>6</sup>corrugate