

## نگاهی جامع بر آنتنهای میکرواستریپ نصب شده بر روی بدنه های استوانه ای

حمیدرضا حسنی

گروه مهندسی برق

دانشگاه شاهد

[hassani@shahed.ac.ir](mailto:hassani@shahed.ac.ir)

محمد جهانبخت

گروه مهندسی برق

دانشگاه شاهد

[jahanbakht@shahed.ac.ir](mailto:jahanbakht@shahed.ac.ir)

**چکیده:** ایده آنتنهای میکرواستریپ، اولین بار در سال ۱۹۵۳ توسط Deschamp مطرح شد و تا به امروز به دلیل رشد تکنولوژی مدارهای چاپی و محدودیت روزافزون استفاده از آنتنهای پیچیده، استفاده از این نوع آنتنها کاربرد روزافزون داشته است. یکی از اصلی ترین خواص این آنتنها، انطباق یا Conformity آنهاست و اساسا به دلیل همین خاصیت، قلمرو رشد آنها به روی بدنه های غیر مسطح گسترش یافت. در این گزارش نیز سعی بر آن است که با معرفی این آنتنها روی بدنه های استوانه ای، خواننده را با اقسام این سازه و نحوه کار با آنها آشنا کنیم.

**کلمات کلیدی:** آنتن میکرواستریپ، بدنه / استوانه ای، تغذیه، پلاریزاسیون دایروی، ارایه، تحلیل عددی

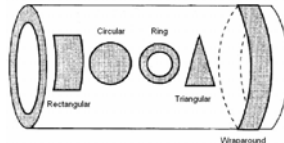
### ۱-مقدمه

در جستجو به دنبال دلایل توفیق این آنتن در مقایسه با سایر آنتنها، میتوان عمده مزایای روبرو را برشمرد: کوچکی، سبکی، طراحی و ساخت آسان، قیمت ارزان، قابلیت کار با MICها و ترکیب ساده با سایر مدارات الکترونیک. البته به مانند هر سازه ای، این ساختار هم به نوبه خود دارای معایبی میباشد: پهنای باند کم، تلفات بالای تغذیه و محدود به کار در توانهای پایین. البته عمده مزیت این آنتنها آن است که در صورت تقاضا، قابلیت انطباق با سطوح غیر مسطح را دارند. انطباق یا conformity بدان معناست که به سادگی روی بدنه سازه میزبان نصب شده و ویژگیهای ایرودینامیکی آنرا تغییر نمیدهند. در ادامه و در بخش دوم، انواع شکل پتچهای مرسوم را خواهید دید و انواع روشهای تغذیه این آنتنها را فرا خواهید گرفت. در بخش سوم هم با لزوم استفاده از پلاریزاسیون دایروی آشنا خواهید شد و برای چند شکل پتچ معمول، نحوه گرفتن این پلاریزاسیون را مشاهده خواهید کرد. به دلیل اهمیت خاص ارایه ها، بخش چهارم را به این موضوع اختصاص داده ایم. بخش پنجم هم به بررسی اجمالی انواع روشهای عددی در تحلیل این سازه ها میپردازد. نهایتا، بخش ششم را هم به نتیجه گیری از آنچه گفته شده است اختصاص داده ایم.

## ۲-انواع شکل patch و اقسام تغذیه

### ۱-۲ - انواع شکل patch

در طراحی انتهای میکرواستریپ، گستره وسیعی از اشکال پتچ قابل دستیابی است که امکان انتخاب بر اساس نوع کاربرد مورد نظر وجود دارد. رایجترین اشکال بکار برده شده، عبارتند از مستطیل، دایره، رینگ، مثلث و کمری. که در شکل ۱-۲ ملاحظه میکنید



شکل ۱-۲ - انواع شکل patch

در اغلب کاربردها روی بدنه های استوانه ای، نیاز به یک پترن همه جهته (omni directional) در صفحه پیرامونی استوانه است. نشان داده شده است که اگر یک کمری را در تعدادی نقاط بطور یکنواخت حول استوانه تغذیه کنیم، یک پترن همه جهته خواهیم داشت. از طرفی اگر از چند المان مجزا به جای کمری استفاده کنیم، هم تعداد نقاط تغذیه کمتری مورد نیاز است و هم وزن و حجم انتن کاهش خواهد یافت [۱]. نوع مستطیلی و دایروی، رایجترین سازه ها در بین این گونه میباشند که حجم تحقیقات انجام شده بر روی آنها، با هیچ شکل دیگری قابل مقایسه نیست. نوع مستطیلی دارای تحلیل ساده ای است و برای تشعشع همه سو یکسان، به تغذیه با فاز و دامنه یکسان نیاز دارد. پتچ دایروی هم در مواردی که نیاز به پلاریزاسیون دایروی باشد، بیشتر مورد توجه است. علاوه بر آن، در کاربردهای آرایه؛ به دلیل عدم تجمع بار در گوشه های سازه دایروی؛ Coupling کمتری با عناصر مجاور خواهیم داشت. این خاصیت زمانی جلب توجه میکند که ما انتن خود را برای beam scanning در یک آرایه فازی قرار دهیم. اینجاست که نبود این خاصیت در نوع مستطیلی و ... برای زوایای Scan پایین تولید اشکال میکند و ما نقاط کوری در scan خواهیم داشت [۲].

### ۲-۲ - اقسام تغذیه

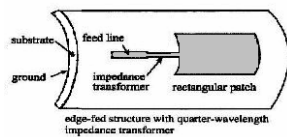
عموما در حوزه این انتنها، ۳ روش اصلی تغذیه وجود دارد. تغذیه با کابل کواکسیال (پروب)، تغذیه با خط انتقال میکرواستریپ و تغذیه با یک شکاف در زمین. سایر روشهای دیگر تغذیه همچون تغذیه با coplanar waveguide یا تغذیه با stripline هم وجود دارند که مزایای هر یک منحصر به فرد میباشد. مثلا در تغذیه با stripline میتوانید به تلفات کمتر در feedline ورودی دست یابید و یا در تغذیه به روش coplanar waveguide، میتوانید فرکانس کارکرد خود را تا رنج millimeter wave (فرکانس بالا) افزایش دهید و به اسانی هم در کنار عناصر فعال بکار گرفته میشوند [۳].

### ۱-۲-۲ - تغذیه با کابل کواکسیال

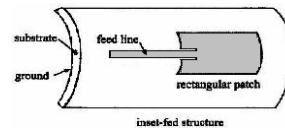
این ترکیب از نظر تحلیل، ساده ترین نوع تغذیه محسوب میشود. تشعشع مزاحم از تغذیه هم در این حالت بسیار کم است اما از آنجاییکه نیاز به سوراخکاری دارد، ما را در ساخت (خصوصا در تولید انبوه) دچار مشکل میکند. بعلاوه، عمده نقصان این روش، عدم توانایی کار در توانهای بالاست. که این عیب، از ویژگیهای ذاتی کابل هم محور نشأت میگیرد.

## ۲-۲-۲ - تغذیه با خط انتقال میکرواستریپ

این سبک تغذیه چنین است که یک خط ساده از هادی روی مدار چاپی، عهده دار انتقال موج شبه TEM به patch است. محل اتصال نهایی این خط به patch هم از جمله پارامتری تعیین کننده می باشد. هرچقدر که تحلیل این روش تغذیه دشوار مینماید اما ساخت آن بسیار آسان است. این ویژگی باعث شده است که در کاربردهای آرایه، سایر روشهای تغذیه منزوی شوند. اما همانطور که انتظار میرود، این سبک تغذیه هم دارای معایبی است که از جمله است مقاومت ورودی در لبه patch. این مقاومت، گاهی به ۱۰۰-۲۰۰ اهم میرسد و کار را برای یک تطبیق امپدانس دشوار میکند. ۲ سبک رایج برای تطبیق امپدانس را در شکلهای ۲-۲ و ۳-۲ ملاحظه میکنید

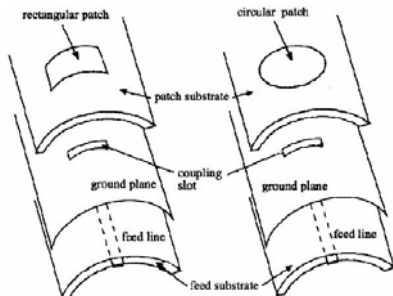


شکل ۳-۲ - تطبیق امپدانس با مبدل ربع موج

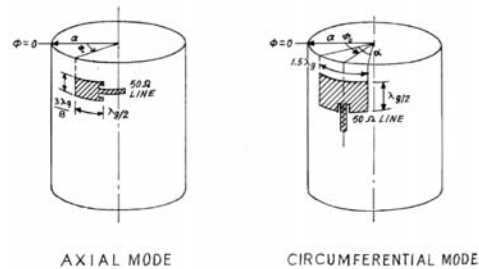


شکل ۲-۲ - تطبیق امپدانس با خط فرورفته

در این نوع تغذیه، ۲ روش برای ورود موج به انتن وجود دارد؛ محوری و محیطی و همانطور که در شکل ۴-۲ ملاحظه میشود، نوع Axial میدان  $E_\phi$  را تحریک میکند درحالیکه نوع Circumferential میدان  $E_\theta$  را برمی انگیزد. اختلاف دیگر این دو، در نحوه چیدمان است بگونه ای که نوع پیرامونی، دارای شبکه تغذیه ساده تری است و برای داشتن پترن همه جهته، نیاز به تعداد Patch کمتری دارد.



شکل ۵-۲ - نمایش نحوه تغذیه با slot



شکل ۴-۲ - دو سبک تغذیه محیطی و محوری

## ۲-۲-۳ - تغذیه با slot

در این سازه همانطور که در شکل ۵-۲ هم ملاحظه میکنید، انرژی از طریق یک خط، از منبع هدایت میشود تا از طریق روزنه ای در زمین به patch کوپل شود. اگرچه این سبک هم ساخت دشوار و هم تحلیل پیچیده ای دارد، اما در قیاس با ۲ روش قبل دارای مزایای برجسته ای است که از آن جمله اند: (۱) عدم حضور تشعشع مزاحم از تغذیه (۲) عدم اتصال مستقیم feed و patch، که این امر اثر راکتانس feed را از امپدانس ورودی انتن حذف میکند. (۳) ایده ال است که مدار تغذیه دارای ضریب دی الکتریک بالا باشد تا تشعشع از تغذیه حداقل گردد از طرفی برای داشتن مقاومت تشعشعی بالا در قسمت انتن، ناگزیر از انتخاب بستری با ضریب دی الکتریک پایین هستیم. این سبک از تغذیه قادر است که مارا به هر دو هدف برساند.

## ۳-۲ - پارامترهای مخرب تغذیه [۴]

عمده پارامترهای مخرب تغذیه را میتوان به دسته های روبرو تقسیم کرد: تلفات دی الکتریک و رسانا ؛ امواج سطحی و تشعشعات ناخواسته از ناپیوستگی ها. تمام این عوامل میتوانند side lobe level را تخریب کنند یا cross polarization را افزایش دهند. اما شاید بتوان با قطعیت، امواج سطحی را اصلی ترین عامل مخرب و گریزناپذیر در هر سازه ای نامید. این امواج که انرژی خود را از تغذیه ورودی میگیرند، بر روی substrate هدایت شده و علاوه بر اتلاف انرژی به شکل پراشیدگی از مرزها، coupling بین عناصر را هم افزایش میدهند. این کوپلینگ، امپدانس ورودی را از خود متاثر میکند و در فرکانس کارکرد شیفت ایجاد میکند. اصلی ترین راه مقابله با این پدیده، شاید ایجاد شیار روی دی الکتریک بستر باشد که اصطلاحاً به آن corrugation میگوییم. بعلاوه، در یک راه حل دیگر، نشان داده شده است که با یک چیدمان مناسب و خصوصاً متقارن ، میتوان اغلب این پارامترهای زیانبار را خنثی کرد.

## ۳-پلاریزاسیون دایروی

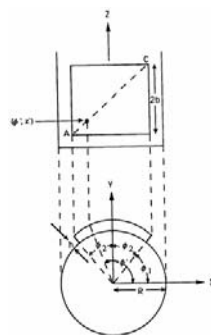
یونسفر لایه ای از جو زمین است که در آن گازهای تشکیل دهنده بر اثر تشعشعات فضای خارجی، خصوصاً خورشید، یونیزه هستند [۵]. به طور طبیعی در باندهای HF ، جهت پلاریزاسیون اصلی پس از عبور سیگنال از یونسفر گم میشود. از اینرو، سیگنالی که در یک انتن معمولی با پلاریزاسیون مشخص به شکل نویز از بین میرود، ممکن است در انتن دیگری که نسبت به پلاریزاسیون حساس نیست، ظاهر شود. آنچه از این متن برمی آید آن است که پلاریزاسیون سیگنال دریافتی در کاربردهای جو زمین تصادفی است و انتن ایده ال در این شرایط، انتنی است که پترن تشعشعی اش پلاریزاسیون دایروی دارد. به این ترتیب، تلفات انتقال به حداقل خواهد رسید. در انتنهای میکرواستریپ، نحوه تحریک این پلاریزاسیون برای اشکال مختلف patch فرق میکند. در patch دایروی؛ پلاریزاسیون دایروی را همانطور که در شکل ۳-۱ ملاحظه میکنید، با دو perturbation تحریک میکنند.



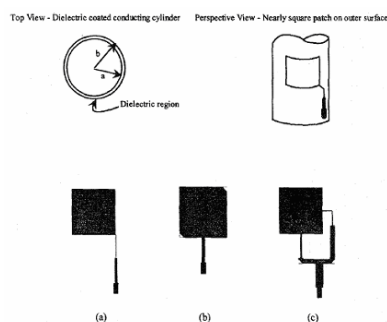
شکل ۳-۱ - تحریک پلاریزاسیون دایروی در patch دایروی

در patch مستطیلی هم بسته به نوع تغذیه استفاده شده، روشهای گوناگونی پیشنهاد شده است. اگر با استفاده از یک خط انتقال میکرواستریپ، انتن را تغذیه کرده باشیم، معمول است که یکی از ۳ گزینه در شکل ۳-۲ را برای حصول این پلاریزاسیون بکار برند. اما اگر از یک کابل کوکسیال برای تغذیه استفاده کرده باشیم، برای تحریک این پلاریزاسیون، محل پروب را روی قطر قرار میدهند. به این ترتیب دو مود متعامد  $TM_{10}$  ،  $TM_{01}$  با دامنه برابر و ۹۰ درجه اختلاف فاز تحریک میشوند. این حالت برای نیل به circular polarization لازم و کافیست.

در اهداف پلاریزاسیون دایروی معمولاً ۲ پارامتر را باید همزمان با هم در نظر گرفت. یکی خلوص پلاریزاسیون با تضمین ۹۰ درجه اختلاف فاز بین دو مولفه متعامد موج و دیگری تطبیق امپدانس با منبع برای انتقال حداکثر توان. تجربه نشان داده است که اگر فرکانس کارکرد خود را بدانیم، با تغییر ابعاد انتن (aspect ratio)  $w/l$  (نسبت عرض به طول patch) میتوان ۹۰<sup>۰</sup> اختلاف فاز را تضمین کرد. بعلاوه با جابجا کردن محل پروب روی قطر، میتوان به تطبیق امپدانس دلخواه رسید.



شکل ۳-۳ - تحریک پلاریزاسیون دایروی در *patch* مستطیلی تغذیه شده با *probe*

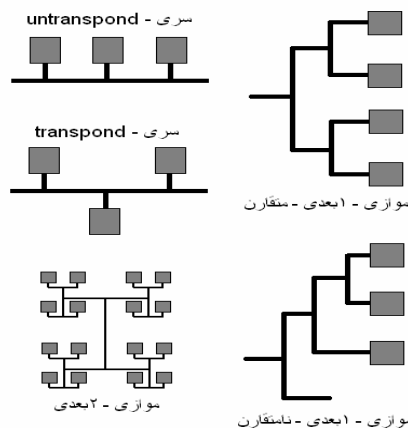


شکل ۲-۳ - تحریک پلاریزاسیون دایروی در *patch* مستطیلی تغذیه شده با خط انتقال

#### ۴- کوپلاژ متقابل و ارایه ها [۶]

برای Omni Directional کردن پترن، بالا بردن gain، ردیابی و Beam Scanning ناگزیر از کاربرد ارایه ها ایم. اینجا هم میتوان ارایه ها را از یک دید به خطی و صفحه ای و از دید دیگر به چیدمان یکنواخت و غیر یکنواخت تقسیم کرد. بهره گیری از آنها در کاربردهایی نظیر Phase scan و Time Delay scan و Frequency scan گزارش شده است. اما به دنبال هرگونه کاربردی هم که باشیم، معمولاً مراحل طراحی مشخص است به این ترتیب که ابتدا نوع هر المان را بر مبنای پهنای باند مورد نیاز و پلاریزاسیون مورد نظر تعیین میکنیم، سپس نوبت به انتخاب نحوه چیدمان عناصر میرسد. این کار را هم بر اساس پهنای باند و گین مطلوب خود پی میگیریم. طراحی تغذیه مناسب هم در انتهای کار جزو کارهای دقیق و پراهمیت است. این طراحی با در نظر گرفتن پهنای باند و تطبیق امپدانس صورت میگیرد.

تغذیه با خط میکرواستریپ در ارایه ها به ۲ نوع کلی سری و موازی تقسیم میشود. که در شکل ۴-۱ ملاحظه میکنید هر یک از این انواع دارای ویژگیهای خاصی است که طراح بر اساس نیاز خود، یکی از آنها را برمیگزیند. از جمله خواص آنها چنین است (۱) در نوع سری untranspond، اگر در انتهای مسیر یک بار تطبیق شده بگذاریم، انتن از نوع موج رونده



شکل ۴-۱ - انواع تغذیه ارایه ها با خط میکرواستریپ

یا traveling wave خواهد بود و پهنای باندش افزوده خواهد شد. بعلاوه، فاصله عناصر هم در این نوع،  $\lambda_g$  در نظر گرفته میشود. (۲) در نوع سری transpond هم به دلیل مسیر کوپلینگ، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز بین هر عنصر با دیگری وجود دارد. از اینرو فاصله عناصر را برای جبران این اختلاف فاز،  $\lambda_g/2$  در نظر میگیرند. (۳) عیب اصلی هر دو نوع سری انست که main beam انتن با تغییر فرکانس شیفت پیدا میکند. اما در هر ۳ گونه موازی هم، اگر فاصله پورت ورودی تا هر المان یکسان باشد، موقعیت المان مستقل از فرکانس بوده و نسبتاً باند وسیعتر است. (۴) عیب اصلی نوع تغذیه موازی هم، تلفات زیاد و بازده کم به دلیل خطوط انتقال طولانی است.

در صورتیکه سبک موازی ۱ بعدی و متقارن را برای چیدن عناصر خود برمیگزینید، معمول است که تعداد patch ها را چنین اختیار کنید [۷]

$$N > \frac{2\pi a \sqrt{\epsilon_1}}{\lambda_0} \quad (1)$$

که a شعاع، از مرکز تا زمین است. این انتخاب باعث میشود که به حداکثر پوشش در حریم پیرامونی انتن دست پیدا کنید. بعلاوه مورد دیگری که باید در نظر داشته باشید انست که، اثر منحنی بودن بدنه باعث میشود که اختلاف مسیر بیشتری (در مقایسه با تخت) بین ستونهای ارایه ایجاد شود. این اختلاف مسیر هم به نوبه خود، یک اختلاف فاز اینچینی تولید میکند

$$\Delta\Psi = k_0 b \left( \cos \frac{1.5S_\phi}{b} - \cos \frac{0.5S_\phi}{b} \right) \quad (2)$$

که b شعاع، از مرکز تا بالای substrate است و  $S_\phi$  هم فاصله patch ها در راستای  $\phi$  از یکدیگر است. یک راه جبران این اختلاف مسیر، تحریک patch ها با فاز متفاوت است. مثلاً میتوان در feed line تغذیه ورودی، این اختلاف فاز را با افزایش طول خط، متناسب با فاز مورد نیاز، به مقدار  $\Delta l$  جبران کرد که

$$\Delta l = \frac{\Delta\Psi}{k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

## ۵- روشهای تحلیل عددی

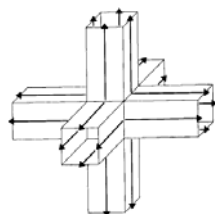
در این بخش، بسیار کلی و جامع به بررسی انواع روشهای عددی خواهیم پرداخت که در حل مسایلی از این دست ما را یاری میکنند. از جمله روشهای تحلیل گزارش شده، میتوان روشهای Full Wave، Cavity Model، T.L.M. را نام برد که در این میان روش full wave (تمام موج) خود شامل مجموعه ای از روشهای عددی برجسته دیگر است که از انجمله اند: F.D.T.D.، M.O.M.، Spectral Domain

### ۵-۱ Cavity Model

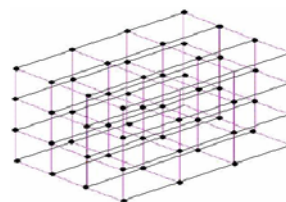
این روش مبتنی بر این مشاهدات است (۱) فاصله نزدیک patch، ground که باعث میشود تنها مولفه های میدان  $E_\rho$ ،  $H_\phi$ ،  $H_z$  را در زیر patch داشته باشیم و میدان در چنین شرایطی مستقل از  $\rho$  خواهد بود. (۲) جریان الکتریکی patch مولفه عمود به لبه ندارد که نشاندهنده ناچیز بودن میدان مغناطیسی در طول لبه های patch است و میتوان یک magnetic wall در دیواره های cavity در نظر گرفت بعلاوه دو electric wall نیز در محل patch و ground وجود دارند.

## ۲-۵ - F.D.T.D.

کلیات این روش هم چنین است (۱) روش عددی در حوزه زمان و مکان است. (۲) با توجه به فیزیک مساله، سازه را به شبکه ای از گره ها در حجم و یا سطح تقسیم میکنیم. شکل ۱-۵ را ملاحظه کنید. (۳) پتانسیلها در همه گره ها محاسبه می شوند.



شکل ۲-۵ - نمایش خطوط انتقال در تحلیل TLM



شکل ۱-۵ - نمایش گره ها در تحلیل FDTD

## ۳-۵ - T.L.M.

این روش هم مطابق شکل ۲-۵، مبتنی بر این موارد است (۱) استفاده از ماتریس خط انتقال (۲) معادل سازی معادلات میدان، با معادلات ولتاژ و جریان مربوط به یک خط انتقال دوسیمه (۳) برای ساختارهای ساده مناسب است.

## ۴-۵ - Spectral Domain و M.O.M.

این روش مبتنی بر اصول زیر است (۱) روش عددی در حوزه مکان یا طیف است که این انتخاب بر عهده کاربر میباشد. (۲) حجم محاسبات تحلیلی و کامپیوتری بسیار بالا در ازای دقت فوق العاده (۳) بیان معادلات میدان با دستگاه معادلات انتگرالی و در نهایت تبدیل دستگاه معادلات انتگرالی به معادلات ماتریسی.

مشکل اصلی آنجاست که تحلیل تمام موج در سازه های استوانه ای بسیار دشوار است زیرا اولاً بدست آوردن معادلات گرین سازه دشوار است و ثانياً توابع گرین سازه های غیر مسطح به آرامی همگرا میشوند.

## ۵-۵ - مقایسه روشهای عددی

(۱) روشهای Spectral Domain و MOM تنها زمانی که substrate ضخیم باشد؛ چون سایر روشها کارایی ندارند، بکار میرود. اما در کل به دلیل زمانبر بودن و پیچیدگی های خاص خود، کمتر استفاده میشود.

(۲) روش cavity model هم ساده است و هم دید فیزیکی خوبی میدهد اما نتایج آن تنها زمانی معتبر است که ضخامت substrate بسیار کمتر از طول موج باشد.

(۳) روش T.L.M. ساده ترین روش در تحلیل انتهای میکرواستریپ است که نتایج نسبتاً دقیقی ارائه میدهد.

(۴) بغیر از روشهای full wave سایر روشها با از دست دادن دقت، سادگی را حفظ میکنند بنابراین برای دی الکتریک های با  $\epsilon_r$  بالا یا ضخیم، قابل اعتماد نیستند

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این گزارش سعی بر آن بود تا با معرفی انتهای میکرواستریپ، توانایی های بالقوه آنها را برای نصب بر روی بدنه های غیر مسطح و خصوصاً استوانه ای را نشان دهیم. انواع و اقسام اشکال مختلف patch را به همراه مزایا و معایب هریک معرفی

کردیم. روشهای تغذیه این آنتن‌ها را نیز مشاهده نمودیم. سپس برای چند شکل patch با اهمیت‌تر، روشهایی را برای رسیدن به پلاریزاسیون دایروی مطرح کردیم. از آنجاییکه بسیاری از کاستی‌های این نوع آنتن‌ها را میتوان با آرایه کردن از بین برد، از اینرو ما نیز بخشی را به این مقوله اختصاص داده و در آن با انواع روشهای آرایه کردن به همراه روشهای مختلف تغذیه آرایه‌ها آشنا شدیم. معرفی روشهای گوناگون تحلیل عددی این سازه‌ها را نیز در واپسین بخش ملاحظه کردیم. خواننده در صورت تمایل به فعالیت بیشتر در این حوزه، با انبوهی از کارهای انجام نشده مواجه خواهد بود که از انجمله اند

- تحلیل Spectral Domain پتچ دایروی با هر ۳ نوع تغذیه (خط انتقال و پروب و slot) و تلاش بیشتر برای بهبود پلاریزاسیون دایروی خصوصا در تغذیه با slot
- تحلیل Spectral Domain یا T.L.M. و یا Cavity کمر بند تغذیه شده با خط میکرواستریپ یا slot
- کار برای یافتن توابع گرین مناسب‌تر که رفتار موج را بهتر مدلسازی کنند و در نتیجه زودتر همگرا شوند.
- در نظر گرفتن اثر Superstrate یا Stack در افزایش پهنای باند

## ۷- سپاسگذاری

با سپاس از خدمات و حمایت‌های مرکز تحقیقات مخابرات ایران

## ۸- مراجع

- [۱] R.E.Munson, "Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays", IEEE Trans. On Antennas and Propagation, January ۱۹۷۴
- [۲] K.A.Rutkowski, P.F.Wahid, C.G.Christodoulou, "Circular Microstrip Patch Antenna Array", IEEE, ۱۹۹۱
- [۳] W.Menzel, W.Grabherr, "a Microstrip Patch Antenna with Coplanar Feed Line", IEEE Microwave Guided Wave Lett. Vol.۱ Nov. ۱۹۹۱
- [۴] J.R.Wait, Electromagnetic Radiation from Cylindrical Structures, IEE Electromagnetic Ware Series, ۱۹۸۸
- [۵] زهرا امامی، آنتن‌ها ساختار و کاربرد، جلد دوم، انتشارات سروش، ۱۹۹۷
- [۶] ا.کلاته احمد، "کاربرد آرایه‌ها در بدنه‌های غیر مسطح"، سمینارهای دانشگاه علم و صنعت، شماره ۷۶۱ کارشناسی ارشد، ۱۳۸۲
- [۷] G.B.Hsieh, K.L.Wong, "Radiation Characteristics of Cylindrical Microstrip Arrays", IEEE ۱۹۹۹