

# آنالیز آنتن های تقریباً استوانه ای با استفاده از روش طیف پاسخهای دوبعدی (S2DS) و روش ماتریس خط انتقال (TLM)

کیوان فرورقی  
استادیار

زهرا اطلس باف  
دانشجوی دکترا

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

آنتن های زیادی با سطح مقطع استوانه ای وجود دارند که در کنار یا روی آنها تعدادی المان تابنده با طول محدود وجود دارند. این ساختارهای تقریباً استوانه ای را می توان به وسیله روش S2DS (Spectrum of 2D Solution) آنالیز نمود. به این ترتیب که با استفاده از تبدیل فوریه نسبت به محور استوانه (محور z)؛ مسئله الکترومغناطیسی سه بعدی اینگونه آنتن ها را می توان بعنوان یک سری مسائل دو بعدی با تغییرات هارمونی طولی ( $k_z$ ) در نظر گرفت و حل نمود. پاسخ سه بعدی مسئله بوسیله یک تبدیل معکوس فوریه از تعداد بسیار زیادی از پاسخهای عددی دو بعدی بدست می آید. در این مقاله برای بدست آوردن طیف پاسخهای دو بعدی از روش Transmission Line Matrix (TLM) در حالت دو بعدی آن استفاده شده است. این روش برای آنالیز ساختارهایی با هندسه نامنظم بسیار مؤثر و کارآمد می باشد.

## Analysis of Nearly Cylindrical Antennas by a Combination of TLM and S2DS

Z. Atlasbaf  
Ph. D. Student

K. Fourooraghi  
Assistant Professor

EE. Department,  
Tarbiat Moddarres University

## Abstract

*A two-dimensional Transmission Line Matrix (TLM) method has been used to calculate the radiation pattern of three-dimensional antennas that are nearly cylindrical. By applying the Spectrum of 2-Dimensional Solutions method (S2DS), the three-dimensional field solutions can be obtained from numerically obtained two-dimensional solutions. This method has been employed on a linear array of longitudinal waveguide slots when radiating into an exterior structure and the results have been verified by measurements and other methods.*

## Keywords

*Cylindrical antennas, spectrum of 2-dimensional solutions, transmission line matrix method, waveguide slot arrays.*

آنتن‌ها و پراکنده‌گرهایی که تقریباً استوانه‌ای می‌باشند؛ در مخابرات کاربرد زیادی دارند. در شکل (۱) تعدادی از ساختمانهای تقریباً استوانه‌ای نشان داده شده‌اند. همانطوریکه مشاهده می‌شود، این اجسام در امتداد محور  $z$  بسیار طویل بوده و می‌توان طول آنها را بی‌نهایت در نظر گرفت ولی منابع تابنده کوتاهی که در مجاورت آنها قرار دارند سه بعدی می‌باشند. بنابراین آنها را تقریباً استوانه‌ای می‌نامند. در شکل (۱) شکافهایی که بر روی دیواره‌های پهن و باریک موجبر قرار گرفته‌اند و به فضای آزاد یا ساختارهای دیگری می‌تابند را می‌توان با جریان مغناطیسی مدل نمود. شکل (۲) یک آرایه از شکافهای طولی بر روی دیواره پهن موجبر مستطیلی را نشان می‌دهد. شکافها به ناحیه‌ای بین دو صفحه موازی هادی *Baffles* می‌تابند. استفاده از صفحات *Baffles* بمنظور شکل دادن به بیم در صفحه تابش، افزایش گین، حذف بیم مرتبه دوم (*Second order Beam*) و یا حذف پلاریزاسیون متقابل مؤلفه‌های میدان استفاده می‌شود. یک روش بسیار مؤثر برای آنالیز چنین آنتن‌هایی، روش *S2DS* می‌باشد [۵]-[۱] که این روش بطور اختصار در قسمت ۲، توضیح داده خواهد شد. این آنتن‌ها زیر مجموعه‌ای از آنتن‌های تقریباً استوانه‌ای می‌باشند. *Gruenberg* [۲] اولین فردی بود که برای حذف لوبهای ثانویه از *Baffles* استفاده نمود. وی تابش شکاف طولی بین *Baffles* با ارتفاع نامحدود را محاسبه کرد. دکتر فرورقی شکافی با همان هندسه [۳] را با استفاده از روش ممان آنالیز نمود. سپس پترن تابشی آرایه خطی شکافهای طولی در دیواره پهن موجبر تابنده در *Baffles* مختوم به صفحه زمین محدود، توسط دکتر فرورقی و *Kildal* [۴] و [۵] محاسبه شد. در کلیه مراجع فوق، ساختارهای ذکر شده توسط روش *S2DS* آنالیز شدند ولی طیف پاسخهای دو بعدی بوسیله روش ممان محاسبه شدند. در روش ممان باید تابع گرین ساختار خارجی (خارج از موجبر تغذیه) بدست آورده شود و در مواردی که این ساختار هندسه نامنظم دارد، بسیار مشکل می‌باشد (شکل 1-d و 1-e و 1-f). در این مقاله برای بدست آوردن طیف پاسخهای دو بعدی از روش *TLM* استفاده شده است. در روش *TLM* برخلاف روش ممان از توابع گرین استفاده نشده است. این روش فرمولبندی ساده‌تری نسبت به روش ممان دارد و شکلهای هندسی پیچیده و مسائلی با مواد غیرهمگن را با این روش براحتی می‌توان حل کرد. در ادامه ابتدا روش طیف پاسخهای دو بعدی اجسام با مرزهای تقریباً استوانه‌ای به مسائل دو بعدی بررسی می‌گردد. سپس روش *TLM* با مفاهیم مش موازی، نحوه اعمال شرایط مرزی با مرزهای ثابت و متحرک، مرزهای جاذب، منابع خطا و... بررسی می‌گردد. در نهایت برای بررسی روش تلفیقی *TLM* و *S2DS* پترن تابشی شکاف طولی موجبری بین *Baffles* برای مثال محاسبه شده، سپس مقادیر حاصله با نتایج اندازه‌گیری شده، مقایسه می‌گردند.

## طیف پاسخهای دو بعدی

روش طیف پاسخهای دو بعدی (*S2DS*) روشی برای آنالیز آنتن‌ها و پراکنده‌گرهایی است که تقریباً استوانه‌ای می‌باشند. عبارتی سطح مقطع هندسی آنها با طول تغییری نداشته باشد ولی در نزدیکی این اجسام عناصر تابنده‌ای مانند منبع جریان الکتریکی و یا مغناطیسی وجود دارد (شکل ۱). لذا با این روش مسئله سه بعدی را می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه نسبت به محور استوانه‌ای (محور  $z$ ) به مسئله دو بعدی تبدیل کرد. در حوزه جدید، میدان و منابع مستقل از متغیر  $z$  هستند و دارای تغییرات هارمونی  $e^{-jk_z z}$  می‌باشند که  $k_z$  عدد موج طولی می‌باشد. تبدیل فوریه و معکوس آن عبارتند از:

$$\tilde{S}(\rho', k_z) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\rho', z) e^{jk_z z} dz \quad (1-a)$$

$$S(\rho', z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{S}(\rho', k_z) e^{-jk_z z} dz \quad (1-b)$$

در معادلات فوق  $S(\rho', z)$  منبع جریان الکتریکی و مغناطیسی بوده و  $\rho'$  مختصات عرضی می‌باشد. در حوزه جدید منبعهای دو بعدی نامحدود عبارتند از:  $j_z(\rho', k_z)e^{-jk_z z}$  و  $m_s(\rho', k_z)e^{-jk_z z}$ . در حوزه دو بعدی، طیف پیوسته  $k_z$  باید گسسته گردد و مسائل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی دو بعدی برای هر مقدار گسسته متغیر طیفی  $k_{zn}$  که  $n = 1, 2, \dots$  باید بصورت عددی حل شود. بدین ترتیب طیفی از پاسخهای دو بعدی بدست می‌آید. میدانهای الکتریکی و مغناطیسی سه بعدی بترتیب عبارتند از:

$$H(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{H}(\rho, k_z) e^{jk_z z} dz \quad (2-a)$$

$$E(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}(\rho, k_z) e^{-jk_z z} dz \quad (2-b)$$

که در عبارات فوق  $\tilde{E}(\rho, k_z)$  و  $\tilde{H}(\rho, k_z)$  پاسخهای مسئله دو بعدی و  $\rho$  مختصات عرضی می‌باشند. واضح است برای محاسبه انتگرالهای معادله (۲)، نمی‌توان بی‌نهایت پاسخ دو بعدی بدست آورد، لذا لازمست تا طیف  $k_z$  محدود گردد. جهت محاسبه امپدانس منبع، باید عکس تبدیل فوریه بدست آید و برای این منظور از روشهای تقریبی [۶] استفاده می‌شود. برای محاسبه پترن نیازی به عکس تبدیل فوریه نیست. انتگرالهای تابشی که در محاسبه میدان دور بکار می‌روند، دارای پاسخهای تحلیلی تقریبی می‌باشند [۷]. جزئیات مربوط به چنین پاسخهایی در مراجع [۷] و [۸] ذکر شده‌اند. میدان الکتریکی ناحیه دور بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{E}(r) = \left[ \bar{G}_j(\theta, \Phi) + \bar{G}_m(\theta, \Phi) \right] \frac{1}{r} e^{-jkr} \quad (3-a)$$

$$G_j(\theta, \phi) = \frac{jk\eta}{4\pi} \bar{g}_j(\phi, -k \cos \theta) \quad (3-b)$$

$$\bar{G}_m(\theta, \phi) = \frac{-jk}{4\pi} \bar{g}_m(\phi, -k \cos \theta) \times \hat{r} \quad (3-c)$$

که  $\bar{g}_j$  و  $\bar{g}_m$  انتگرالهای تشعشی مربوط به منابع جریان مغناطیسی و الکتریکی می‌باشند. این انتگرالها در نقاط فاز ثابت  $k_p = k \sin \theta$   $k_z = k \cos \theta$  پاسخهای تحلیلی دارند.

### روش ماتریس خط انتقالی (TLM)

روش TLM، توسط Johns و Akhtarzad [۱۲] - [۹] گسترش یافت و روشهایی برای مسائل حاوی دی الکتریک و تلفات ارائه شد. سپس Hoefler و سایر محققان [۱۷] - [۱۳] طرحها و توسعه‌هایی از قبیل گره‌های ساده، تکنیکهای تصحیح خط، مرزهای متحرک، تصحیح خطای ناشی از لبه‌ها و گوشه‌ها و... را به این روش افزودند.

عنصر اصلی روش TLM دو بعدی، گروه موازی (شکل ۳-a) متشکل از چهار خط انتقال بطول  $\frac{\Delta l}{2}$  است که دارای معادل الکتریکی شکل (۳-b) می‌باشد. در این روش پالسها در محل اتصال خطوط انتقال پراکنده شده و با انتقال آنها در ثابت زمانی  $\Delta t$  از یک گره به گره‌های بعدی، مسئله در حوزه زمان و مکان گسسته می‌گردد. در این روش میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بر حسب ولتاژ و جریان گره‌ها بدست می‌آید. جهت مدل کردن محیطی که با مواد دلخواه پر شده‌اند (ثابت دی

الکتريک و نفوذ پذيری مغناطیسی نسبی مخالف یک) استابهای خط انتقال به مدل همگن اضافه می‌شوند. دیوارهای الکتريکی و مغناطیسی مرزهای بدون تلف می‌باشند که توسط مدارهای اتصال کوتاه و یا باز در وسط دو گروه مدل می‌شوند. با استفاده از مرزهایی با موقعیت دلخواه، می‌توان مرزهای منحنی با شعاع انحناء کوچک را بدون افزایش تعداد گره‌ها، که نیازمند به حافظه بیشتر و زمان زیادتری برای عملگر الگوریتم TLM است، مدل کرد. در شکل (۴) مفهوم مرز با موقعیت دلخواه در روش TLM دو بعدی نشان داده شده است. شاخه مرزی که طولش  $\frac{\Delta l}{2}$  نیست با شاخه معادلی بطول  $\frac{\Delta l}{2}$  جایگزین می‌شود. با اینکار همزمانی تضمین می‌شود ولی ادمیتانس در شاخه مرزی متفاوت است و ماتریس پراکنندگی نیز تصحیح می‌گردد [۶].

بهنگام حل مسائلی با مرزهای نامحدود از قبیل تابش جسم در فضای آزاد، از مرزهای جاذب برای محدود کردن حوزه محاسبه استفاده می‌شود. در شکل (۵)، TLM دو بعدی با گره‌های موازی نشان داده شده است. مرز جاذب در  $x = 0 + \frac{\Delta l}{2}$  قرار دارد. ایمپالس  $(0 + 1/2, i_y)$   $v_3^{i_y}$  توسط مرز جاذب منعکس و دوباره به شبکه TLM تزریق می‌گردد، این مقدار انعکاسی عبارتست از:

$$v_3^{i_y}(0 + 1/2, i_y) = \sum_{i_1=1}^p \sum_{i_2=1}^p a_{i_1 i_2} (n+1/2 - i_2)^n v_3^{i_1}(0 + 1/2 - i_1, i_y) \quad (10)$$

مقادیر  $a_{i_1 i_2}$  بستگی به نوع مرز جاذب انتخابی دارد. مرز جاذب می‌تواند از بسط تیلور، Higdon [۱۳] و یا از روش میانگین و معادلات یکطرفه [۱۵] بدست آید.

یکی از منابع خطا در آنالیز ساختمانهایی با لبه‌ها و گوشه‌های تیز باروش TLM، خطای درشتی نامیده می‌شود. در این خطا گروه‌هایی که بصورت قطری قرار دارند، بطور مستقیم از مرزها تأثیر نمی‌پذیرد و نتایج بسمت فرکانسهای پایین تر شیفیت پیدا می‌کند. برای حل این معضل، گره‌ها را در گوشه‌ها و لبه‌ها تصحیح می‌نماید [۱۷] تا مستقیماً توسط استاب از مرز تأثیر پذیرند (شکل (۶)).

برای تحلیل آنتن‌هایی با مرزهای تقریباً استوانه‌ای، برنامه TLM دو بعدی تهیه شده که کلیه مواد فوق در تدوین آن در نظر گرفته شده است.

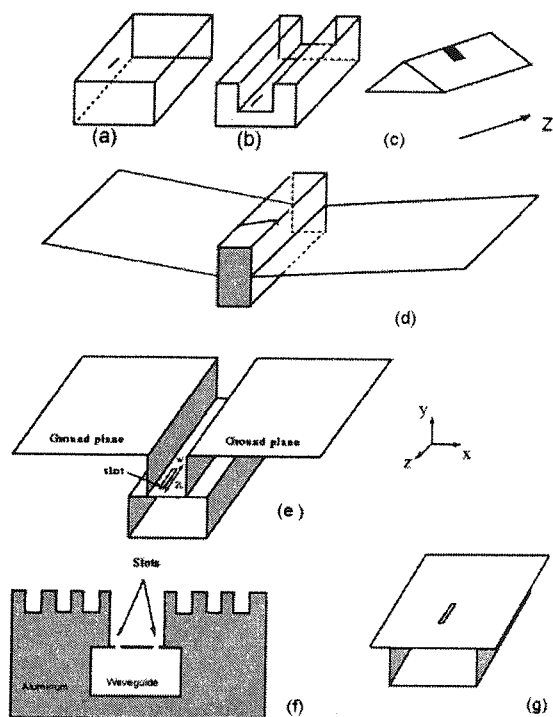
## نتایج عددی

برای بررسی کاربرد روش TLM و S2DS یک آرایه متشکل از شکافهای طولی بر روی موجبر مستطیلی هنگامیکه به یک ساختار خارجی می‌تابد (شکل ۲) در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از S2DS مسئله سه بعدی به یک مسئله دو بعدی تبدیل گردید (شکل ۷) که برای  $k_z=0$  توسط روش TLM و با استفاده از مش دوبعدی برای  $\frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{1}{80}$  حل شد. در در مسئله دو بعدی مرزهای جاذب با دهانه شکل از بالا دو برابر بزرگترین طول جسم  $(16\lambda)$ ، از پایین  $0.5\lambda$  و از لبه‌های دو طرف  $4\lambda$ ، فاصله دارد. این مرز از نوع مرز یکطرفه بدست آمده با روش میانگین از مرتبه دوم است. تعداد گامهای زمانی در این محاسبات ۱۵۰ برابر بزرگترین طول مسئله برحسب  $\Delta l$  نظر گرفته شده است. در مسئله (شکل ۷) با تزریق موج سینوسی با فرکانس 4.9GHz که توسط پالس گوسی مدوله شده است، تحریک شد. این پالس گوسی پهنای بقدر کافی باریک دارد تا فقط پهنای باند مود اصلی در موجبر را بپوشاند و بدین ترتیب فقط مود اصلی در موجبر منتشر گردد. سپس پاسخ فرکانسی مسئله دو بعدی در فرکانس 4.9GHz محاسبه شد. ابتدا میدان الکتريکی E در دهانه Baffles بدست آمد. در شکل (۸) دامنه و فاز میدان الکتريکی E در دهانه Baffles توسط دو روش TLM و ممان ترسیم گشته است. سپس جهت محاسبه میدان تابشی دور؛ میدان محاسبه شده با جریان معادل مغناطیسی جایگزین گشت. پس از آن با بکار بردن روابط تقریبی ذکر

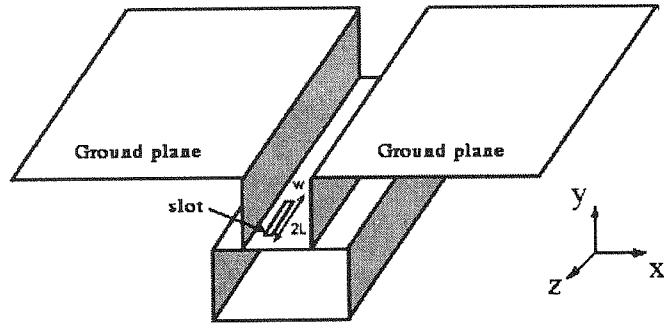
شده در قسمت ۲، پترن تابشی میدان دور E، محاسبه شد. در شکل (۹) میدان دور یک جفت شکاف که در فاصله  $\frac{\lambda_g}{2}$  یکدیگر قرار دارند و بین Baffles مختوم به صفحه زمین می‌تابند، مشاهده می‌شود. در این شکل میدان دور (GO) بدون در نظر گرفتن اثر صفحه زمین دیده می‌شود. بمنظور در نظر گرفتن اثر زمین محدود بطول  $8\lambda$ ، جریان الکتریکی القایی بر روی صفحات زمین و جریان مغناطیسی معادل در دهانه Baffles؛ هردو بدست آمدند. بعد از آن با استفاده از روابط (۲)، میدان دور تابشی در صفحه E بدست آمد. در شکل (۱۰) میدان دور تابشی بدست آمده با روش ممان که در آن اثر محدودیت زمینی بطول  $8\lambda$  با استفاده از روش UTD اعمال شده است [۵] و نتایج حاصل از روش S2DS و TLM وقتی که صفحات زمین محدود و بطول  $8\lambda$  باشند، دیده می‌شود. در شکل (۱۱) میدان دور تابشی اندازه‌گیری شده با میدان بدست آمده از روش ارائه شده از این مقاله مقایسه شده‌اند. همانطوریکه مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از این روش از دقت خوبی برخوردارند. در کلیه محاسبات فرکانس مورد نظر  $4.9\text{GHz}$  و  $a' = 0.4998\lambda$  و  $b' = 0.4998\lambda$  و فاصله شکاف تا محور تقارن موجبر  $9\text{mm}$  می‌باشند.

## جمع بندی

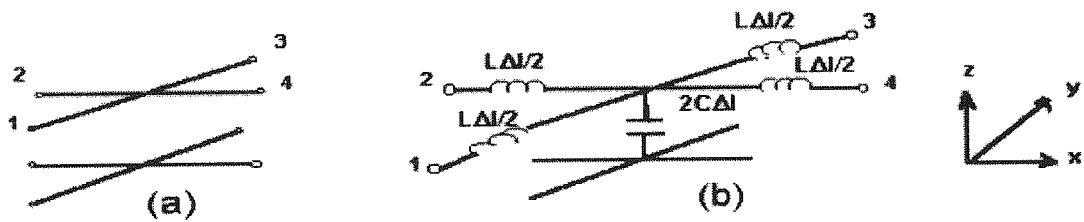
در این مقاله روش تلفیقی S2DS و TLM برای حل آنتن‌هایی با مرزهای تقریباً استوانه‌ای ارائه شد. با استفاده از این روش، مسائل پیچیده با ساختارهای نامنظم هندسی سه بعدی را می‌توان براحتی دو بعدی نموده و سپس مسئله بدست آمده را با استفاده از روش ساده و مؤثر TLM دو بعدی حل کرد. بزرگترین حسن این روش استفاده از 2D-TLM در بدست آوردن پاسخهای دو بعدی می‌باشد که بالاخص استفاده از آن در محاسبه میدان‌های ساختارهایی با هندسه نامنظم بسیار مؤثر بوده و حجم محاسبات کمتر و زمان انجام آن بسیار کوتاهتر می‌شود. صحت روش ارائه شده در این مقاله در مقایسه با اندازه‌گیری‌های عملی و دیگر روش‌ها تأیید گردید.



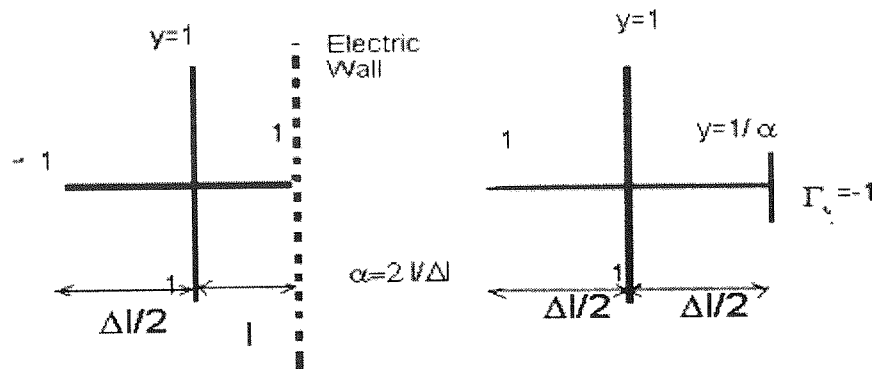
شکل (۱) آنتن‌هایی با مرزهای تقریباً استوانه‌ای.



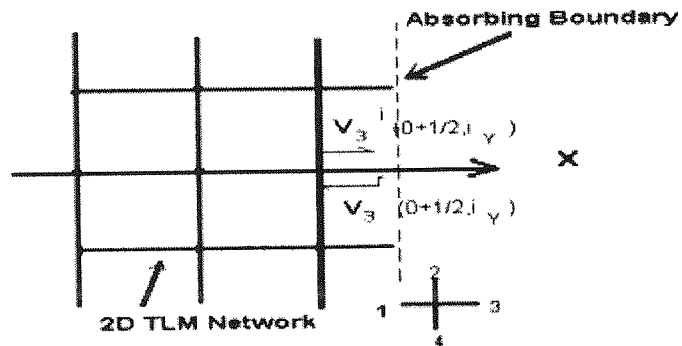
شکل (۲) آرایه‌ای از شکافهای طولی همراه Baffles.



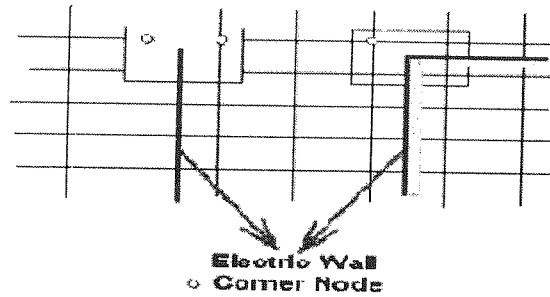
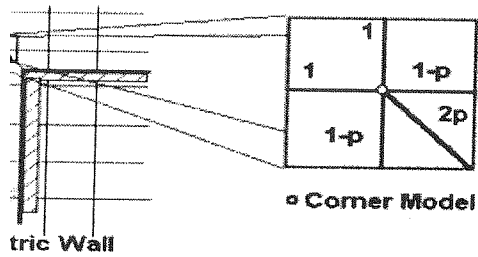
شکل (۳) مدل گره TLM دو بعدی: (a) گره موازی (b) معادل الکتریکی گره موازی.



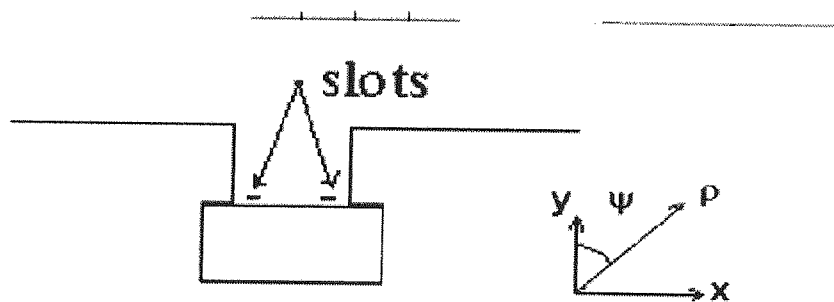
شکل (۴) مرز با موقعیت دلخواه.



شکل (۵) مرز جاذب.



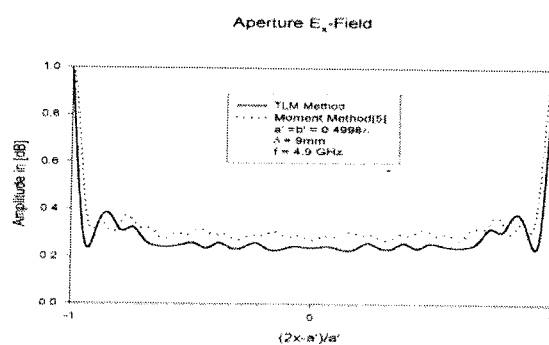
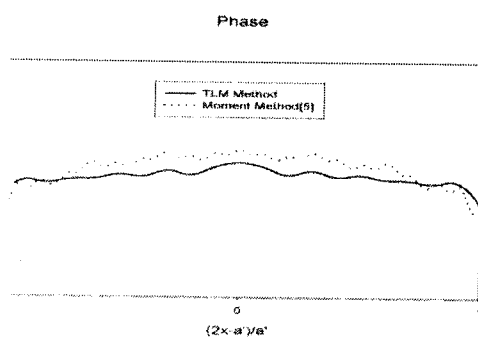
شکل (۶) مدل گره TLM در لبه‌های تیز.



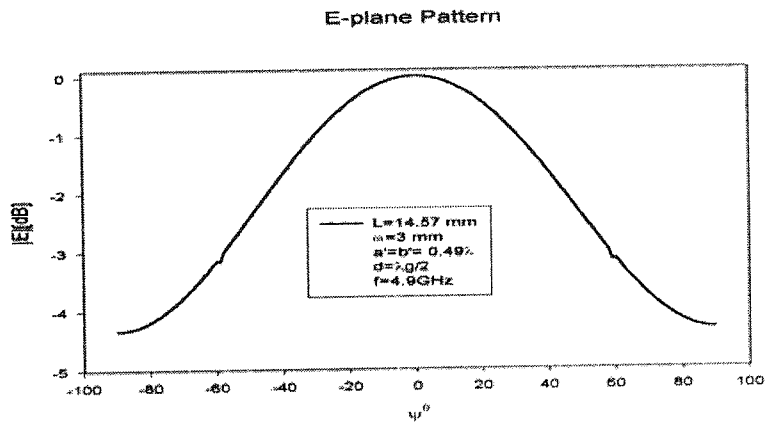
شکل (۷) مسئله دوبعدی.

شکل (۸-ب)

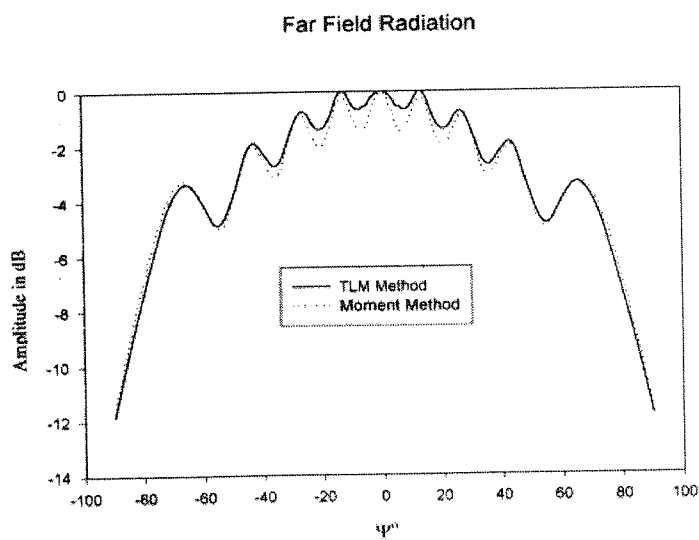
شکل (۸-ا)



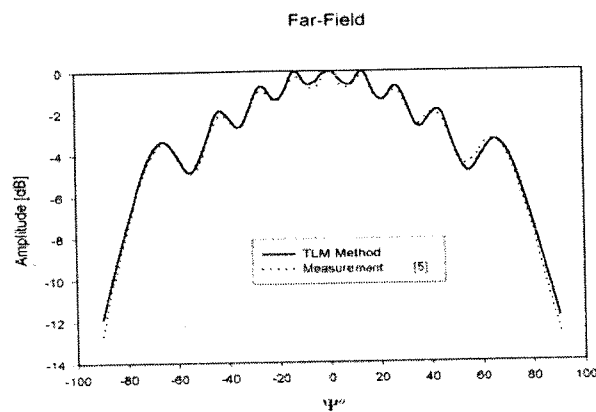
شکل (۸) میدان E ایجاد شده توسط یک جفت شکاف متقارن نسبت به محور تقارن و با  $k_z=0$ .  
 a- دامنه نرمالیزه شده b- تغییرات فاز



شکل (۹) پترن صفحه E وقتی یک جفت شکاف در دو طرف محور تقارن قرار دارند و  $k_z=0$ .



شکل (۱۰) مقایسه پترن تابشی بدست آمده از روشهای ممان و TLM.



شکل (۱۱) مقایسه میدان تابشی در صفحه E محاسبه شده با روش TLM و نتایج اندازه گیری شده وقتی  $k_z=0$  و صفحه زمین محدود بطول  $8\lambda$ .



- [1] K.Foororaghi," An over view of the Spectrum of two dimensional solutions" method for analysis of nearly cylindrical antenna", Iranian Conference on EE,Tehran University, pp.129-135, May 1996
- [2] H. Gruenberg, " Second order beams of slotted waveguide arrays" , cnd. J.Phys., vol. 31, January 1953, pp. 55-69
- [3] K.Foororaghi " Analysis of self admittance of a longitudinal shunt slot radiating into a parallel plate region", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 1, No. 8, pp. 305-308, October 1988
- [5] K.Foororaghi,-P.S.Kildal," Reduction of second order beams in slotted waveguide array using baffles", IEE International Conference on Antenna and Propagation, York 1991 (ICAP91)
- [5] K.Foororaghi, P.S.Kildal," Transverse radiation pattern of a slotted waveguide array radiating between finite baffles in terms of a spetrum of two dimensional solutions", IEE Proceedings-H,vol. 140, No. 1, February 1993
- [6] K. Foororaghi, P.S. Kildal and S.R Rengarajan," Admittance of an isolated waveguide-fed slot radiating between blaffes using a spectrum of two-dimensional solutions", IEEE Trans. Antenna Propagation, vol 41, pp. 422-428, April 1993
- [7] Wettergen, K.Foororaghi and P.S. Kildal , " Analysis of waveguide slot antenna with corrugated outer cylindrical structures using a spectrum of two-dimensiona solution", In proceeding of Journees internationals de Nice surles, pp. 255-258, November 1992
- [8] P.S. Kildal," A formula for efficient computation of radiation pattern from a current source in proximity to cylindrical scatterse", IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. AP-32, no. 10, pp.754-757,October 184
- [9] S. Akhtarzad and P.B. Johns," TLM Analysis of the dispersion characteristics of microstrip lines on magnetic substrates using 3-dimensional resonators ", Electron. Lett., vol. 10,NO.25/26,535-537, dec. 12, 1974
- [10] Akhtarzad and P.B. Johns," Generalized elements for TLM method of numerical analysis", Proc. Inst. Elec.Eng., vol.122, No.3, March 1967
- [11] Akhtarzad and P.B: Johns," Numerical solution of lossy waveguide: TLM computer program", Electronic Letters,vol.10, No. 15,pp.309-311,1974
- [12] P.B.Johns," The solution of Inhomogeneous waveguide Problms using TLM", IEEE Trans. MTT,vol.22, No. 3, March 1974
- [13] Z.Chen and W.J.R. Hofer," Absorbing and Connecting Boundary Conditions for TLM Method", IEEE Trans. MTT,vol.41, NO.11, November 1993
- [14] W.J.R.Hofer," Time domain electromagnetic simulation for microwave CAD applications", IEEE Trans. MTT,vol.40, No.7, pp. 1517-1527,July 1992
- [15] A.Dhouib," A signal averaging technique for wide bandwidth absorbing boundary condition in the TLM method", IEEE MTT-S Digest, pp. 451-454, 1996
- [16] J.Muller and W.J. Haefer," The computational of coarseness error in 2D TM modeling of microwave structur", IEEE MTT-S Digest, pp. 373-376,1992
- [17] Duhbi and M. Stubbs," A signal averaging technique for wide bandwidth absorbing condition in the TLM method", IEEE MTT-S Digest, pp. 451-454,1996