

استفاده از حل معادله انتگرال از نوع الکتریکی در حوزه زمان برای آنالیز سیمولاتور پالس الکترو مغناطیسی با ابعاد بزرگ

جاسم جمالی^۱، رامین آقا جعفری^۲، روزبه معینی^۳، سید حسین (حسام الدین) صادقی^۴

۱- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده برق

۲- مربی، سازمان انرژی اتمی ایران

۳- استاد دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده برق

۴- استاد دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده برق

دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده برق، خیابان حافظ، تهران

تلفن: ۶۴۶۶۰۰۹ - فاکس: ۶۴۰۶۴۶۹

moini@cic.aut.ac.ir

چکیده - در این مقاله توزیع مکانی- زمانی جریانهای و میدانهای الکترومغناطیسی یک سیمولاتور پالس الکترومغناطیسی^۱ محاسبه می گردد. سیمولاتور مورد مطالعه از نوع ابعاد بزرگ بوده و از آن برای بررسی اثر پالسهای الکترومغناطیسی گذرا بر روی ساختارهای بزرگ مانند اتومبیل، هواپیما، موشک و... استفاده می شود. این سیمولاتور از سه خط انتقال صفحه ای تشکیل شده است. برای شبیه سازی سیمولاتور نخست هر کدام از صفحات یکمک شبکه ای از سیمهای نازک مدل می گردند. سپس معادلات انتگرالی از نوع الکتریکی در حوزه زمان با کمک روش ممان حل شده و توزیع زمانی- مکانی جریانهای روی ساختار و میدانهای الکترومغناطیسی درون و اطراف سیمولاتور در هر نقطه و زمان دلخواه محاسبه می گردند. از نتایج بدست آمده می توان ابعاد ناحیه ای درون سیمولاتور که پالس الکترومغناطیسی در آنجا بصورت صفحه ای منتشر می شود، را تعیین نمود. جهت اطمینان، نتایج محاسبه شده با نتایج حاصله از اندازه گیری مقایسه و صحت مدل و روش ارائه شده نیز تایید شده است.

کلید واژگان: پالس الکترومغناطیسی، سیمولاتور، معادلات انتگرالی، روش ممان، حوزه زمان

۱- مقدمه

ایجاد شده توسط یک منبع تولید پالس الکترومغناطیسی مانند صاعقه یا انفجار هسته ای می باشد. دامنه میدان ناشی از پالسهای الکترومغناطیسی می تواند تا چند ده کیلو ولت بر متر

هدف از بکارگیری یک سیمولاتور پالس الکترومغناطیسی ایجاد یک میدان الکترومغناطیسی شبیه به موج صفحه ای

1. Electromagnetic Pulse Simulator

و زمان صعود آن می تواند تا چند ده نانو ثانیه برسد [۱] این نوع پالسها دارای عرض باند وسیعی می باشند و با توجه به دامنه آن می توانند آسیبهای جدی و جبران ناپذیری به تجهیزات و ادوات الکتریکی و الکترونیکی وارد نمایند. اهمیت استفاده از سیمولاتور از آنجا ناشی می شود که پالسهای الکترومغناطیسی نظیر صاعقه یک پدیده تصادفی بوده و بدین دلیل امکان اندازه گیری مستقیم و بررسی اثر میدانهای ناشی از آن بر روی ادوات و تجهیزات الکترونیکی وجود ندارد.

بطور کلی سیمولاتورهای پالس الکترومغناطیسی به دو دسته سیمولاتورهای موج محدود از نوع خط انتقال^۱ و سیمولاتورهای تشعشی^۲ تقسیم می شوند. سیمولاتورهای تشعشی در واقع آنتنهای دایلی هستند که از طریق یک پالس با دامنه چند مگا ولت و زمان صعود کم در حد چند صد نانو ثانیه تحریک می شوند. این سیمولاتورها امواج صفحه ای فضای آزاد را شبیه سازی می کنند و میدانهای اطراف آنها معمولا از نوع TEM^۳ می باشند. دامنه این میدانها در اطراف این نوع سیمولاتورها با نسبت عکس فاصله تغییر می کنند و تجهیزاتی که باید روی آنها آزمایش انجام پذیرد، در خارج از سیمولاتور قرار می گیرند [۲]. سیمولاتورهای تشعشی نیز خود به دو دسته سیمولاتورهای دارای پلاریزاسیون عمودی و سیمولاتورهای دارای پلاریزاسیون افقی تقسیم می گردند [۲و۱].

سیمولاتورهای موج محدود، در واقع از اتصال چند خط انتقال صفحه ای به هم تشکیل شده اند و چنانچه توسط یک ژنراتور پالسی شکل تحریک شوند، میدانهای الکترومغناطیسی درون آنها نظیر میدانهای پالسی شکل فضای آزاد می گردد. لازم بذکر است تجهیزاتی که می بایستی روی آنها آزمایش

آسیب پذیری صورت گیرد، در ناحیه ای معلوم بین دو صفحه خط انتقال قرار می گیرند. مزیت مهم این نوع سیمولاتورها، پهنای باند زیاد آنها می باشد. معمولا این سیمولاتورها از بهم پیوستن یک خط انتقال صفحه ای مخروطی^۴ و یک خط انتقال صفحه ای موازی^۵، تشکیل می شوند. به چنین سیمولاتوری، سیمولاتور با صفحات موازی^۶ اطلاق می شود [۳]. استفاده از صفحات موازی بمنظور ایجاد یک میدان یکنواخت درون سیمولاتور می باشد. ناحیه ای از سیمولاتور که در آن میدان یکنواخت و از نوع TEM می باشد را اصطلاحا ناحیه کار می نامند [۱].

سیمولاتور بررسی شده در این مقاله یک سیمولاتور موج محدود از نوع خط انتقال می باشد. دو خط انتقال صفحه ای مخروطی در ابتدا و انتهای سیمولاتور جهت تطبیق ژنراتور و بار به خط انتقال صفحه ای موازی^۷، یک ژنراتور مارکس^۷ و یک بار نهایی جهت کاهش انعکاسات امواج درون سیمولاتور اجزا این سیمولاتور را تشکیل می دهند (شکل-۱). هدف از طراحی و ساخت سیمولاتور تعیین ناحیه فیزیکی در داخل سیمولاتور می باشد که میدان الکترومغناطیسی در آن ناحیه از نوع صفحه ای باشد. این ناحیه معمولا در وسط خط انتقال موازی قرار دارد. ابعاد خط انتقال موازی به نحوی طراحی می شود که در محدوده فرکانسی پالس تحریک مود TEM، مود غالب باشد. با توجه به این نکته و تعیین امپدانس مشخصه خط انتقال موازی، ابعاد و پارامترهای خطوط انتقال مخروطی به نحوی محاسبه می گردند که نزدیکترین حالت تطبیق حاصل گردد [۴].

به این ترتیب درصد موج انعکاسی روی ساختار حداقل می باشد. درون خطوط انتقال مخروطی، امواج بصورت کروی

4. Conical Plate Transmission Line

5. Parallel Plate Transmission Line

6. Parallel Plate Simulator

7. Marx Generator

1. Bounded Wave Transmission Line Simulator

2. Radiating Wave Simulator

3. Transverse Electromagnetic

منتشر می گردند در حالی که امواج درون خط انتقال موازی بصورت امواج صفحه ای می باشند. بنظر می رسد که تطبیق این دو نوع موج که از نظر ماهیت متفاوت می باشند به راحتی انجام پذیر نباشد. برای نیل به بهترین حالت تطبیق باید نسبت طول خط انتقال مخروطی به فاصله بین دو صفحه خط انتقال موازی به اندازه کافی (حداقل دو برابر) بزرگ باشد [۱]. لزوم بررسی و آنالیز سیمولاتور از آنجا ناشی می شود که برای ساخت آن باید تخمینی از ابعاد و میدانهای ایجاد شده توسط آن وجود داشته باشد تا هزینه ساخت آن به حداقل برسد. تاکنون روشهای متفاوتی جهت بررسی این نوع ساختارها ارائه گردیده است. در حالت کلی، میدانهای الکترومغناطیسی که توسط معادلات ماکسول بیان می شوند، تابعی از مختصات مکان و زمان می باشند، که این وابستگی بصورت مشتقات جزئی نسبت به زمان و مکان، در فرم کلی معادلات فوق ظاهر می شوند. در مواردی که میدانهای الکترومغناطیسی در حوزه زمان بصورت سینوسی (هارمونیک) عمل می کنند،

با تعریف کمیت فازور برای آنها، عبارتهای مشتق نسبت به زمان ساده شده و معادلات ماکسول در حالت هارمونیک یا حوزه فرکانس بدست می آید. بسته به نوع و فرم کلی مسئله مورد نظر یکی از دو روش حوزه زمان و یا فرکانس برای حل مسئله انتخاب می شود Yang، و همکاران با استفاده از نگاشت همدیس و معادلات ماکسول در حوزه فرکانس و با توجه به شرایط مرزی این سیمولاتور را بررسی کرده اند [۴].

در این روش با فرض اینکه تنها مد انتشاری درون سیمولاتور، مد TEM می باشد، با نوشتن معادلات ماکسول در حوزه فرکانس، به معادله لاپلاس رسیده، سپس با استفاده از یک تبدیل ریاضی مناسب ساختار هندسی مسئله به ساختاری تبدیل می شود، که بتوان معادله تبدیل یافته را با توجه به شرایط مرزی، در مورد ساختار جدید حل کرد. سپس با توجه به رابطه تبدیل انجام گرفته جوابهای بدست آمده به ساختار اولیه برگردانده می شوند. در این روش فرض می شود تنها

مد TEM درون سیمولاتور منتشر می شود و از مودههای دیگر انتشاری صرف نظر می شود. روش دیگر بکار گرفته شده استفاده از مدل خط انتقالی سیمولاتور در حوزه فرکانس می باشد.

در این روش با کمک تکنیک تطبیق مود، پارامترهای سیمولاتور با توجه به مودههای انتشاری TEM، TE^۱ و TM^۲ محاسبه می گردد [۵]. در این روش محاسبه توزیع جریان بصورت تقریبی می باشد، لذا میدانهای الکترومغناطیسی منتجه از آن دقیق نمی باشند.

روش تفاضل محدود در حوزه زمان^۳ روش دقیقتری می باشد. در این روش کل سیمولاتور و محیط اطراف آن به سلولهای کوچک تبدیل می شود. سپس معادلات ماکسول در حوزه زمان و بصورت مجزا در سه جهت با کمک شرایط مرزی حل شده و میدانهای الکترومغناطیسی درون و اطراف سیمولاتور تعیین می گردد. جهت حصول به نتایج دقیق باید ابعاد سلولهای انتخابی خیلی کمتر از کوچکترین طول موج تحریک باشد. لذا برای سیمولاتورهای با ابعاد بزرگ تعداد سلولهای مورد نیاز جهت محاسبات زیاد می گردد و نیاز به کامپیوترهای با ظرفیت حافظه زیاد و سرعت پردازش بالا دارد [۲].

یکی از روشهای دقیق و کارآمد برای آنالیز این قبیل ساختارها استفاده از معادلات انتگرالی از نوع میدان الکتریکی برای سیم نازک می باشد. در این روش صفحات خطوط انتقال با شبکه ای از سیم نازک مدل می گردند. با فرض هادی آرمانی بودن سیمها و استفاده از روش ممان توزیع جریان بر روی سیمها محاسبه می گردد. با استفاده از این توزیع جریان امپدانس مشخصه و میدانهای الکترومغناطیسی درون و اطراف سیمولاتور قابل محاسبه می باشد. با بکارگیری این روش [۶]

1. Transverse Electric
2. Transverse Magnetic
3. Finite Difference Time Domain

سطحی به یک معادله انتگرالی از نوع خطی در طول محیط شبکه سیمی مورد نظر تقلیل می یابد. با اعمال یک تحریک پالسی در حوزه زمان توزیع جریان بر روی هر نقطه از ساختار در بازه زمانی تعیین شده محاسبه می گردد. از این توزیع جریان برای محاسبه امپدانس ورودی و میدانهای الکترومغناطیسی درون و اطراف سیمولاتور استفاده می شود.

۲- تئوری

رفتار ساختارهای فلزی مدل شده توسط سیمهای هادی کامل در برابر تابش یک موج الکترومغناطیسی با حل معادله پراکندگی موج گذرا توسط ساختار قابل بررسی می باشد. ابتدا سیمولاتور با تعدادی سیم نازک که با یک موج تابشی روشن می گردد مدل می گردد. این موج تابشی جریان (s, t) را بر روی ساختار القا می کند. برای بررسی و فرمول بندی، نخست فرض می شود که شبکه از یک سیم تنها تشکیل شده است، (شکل ۲-۱) سپس معادلات منتهجه برای کل ساختار سیمی با روشهای عددی حل می گردد. جریان رشته ای $\vec{I}(r, t)$ مسیر $C(\vec{r})$ را که متغیر طولی آن s می باشد، طی می کند. میدان الکتریکی، ناشی از جریان فوق با استفاده از پتانسیلهای تاخیر یافته بصورت زیر بیان می شود [۱۱].

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t) - \frac{\partial \vec{A}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1)$$

که $\vec{A}$ و φ به ترتیب بیانگر پتانسیلهای تاخیری برداری و اسکالر می باشند. با توجه به رشته ای بودن جریان (و به تبع آن بار در واحد طول)، $\vec{A}$ و φ را می توان برحسب جریان و بار بصورت زیر بیان نمود:

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C(\vec{r})} \frac{\vec{I}(\vec{r}', t - R/c) \cdot d\vec{s}'}{R} \quad (2)$$

$$\varphi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C(\vec{r})} \frac{q(\vec{r}', t - R/c)}{R} ds'$$

در حوزه فرکانس میدانها در حوزه فرکانس محاسبه و با اعمال تبدیل فوریه معکوس نتایج در حوزه زمان بدست می آید. با توجه به ماهیت گذرای پالس تحریک و عرض باند وسیع آن با استفاده از این روش در حوزه فرکانس برای نیل به نتایج دقیق باید فاصله نمونه های فرکانس کوچک باشد که سبب افزایش حجم و زمان محاسبات می گردد. در نتیجه، در این مقاله استفاده از روش حل معادلات انتگرال از نوع میدان الکتریکی در حوزه زمان پیشنهاد می گردد. علاقه به یافتن پاسخ گذرا در مسائل مربوط به مبحث الکترومغناطیس همواره از اهمیت بسزایی برخوردار بوده است.

استفاده از معادلات ماکسول در حوزه زمان به درک بهتر پدیده های گذرای الکترومغناطیس کمک می کند. در این میان تبدیل معادلات ماکسول در حوزه زمان به معادلات انتگرالی، باعث می شود که بتوان مسائل پیچیده الکترومغناطیس را در حوزه زمان با استفاده از روشهای عددی حل کرد. همچنین استفاده از مدل رشته سیمی برای جسم فلزی مورد نظر، فرم معادله انتگرالی را ساده تر کرده و راه را برای محاسبات عددی هموارتر می سازد. روش مورد بحث مبتنی بر روشی است که برای آنالیز سطوح فلزی با معادله انتگرالی میدان الکتریکی [۷] و با معادله انتگرالی از نوع میدان مغناطیسی [۸] و [۹] انجام گرفته است. با توجه به منابع فوق ابتدا، معادله انتگرالی برای میدان الکتریکی در حوزه زمان برای یک شبکه سیمی استخراج می شود و بکمک روش ممان حل می گردد. محیط انتشار بصورت خطی، همگن و همه سو یکسان، در فرض شده و شبکه سیمی از جنس هادی آرمانی می باشد. هر سطح فلزی را می توان توسط یک شبکه سیمی، با سطح مقطع دلخواه مدل نمود، ولی به جهت سهولت کار سطح مقطع تمام سیمها از نوع دایروی انتخاب شده است.

همچنین با فرض برقرار بودن تقریب سیم نازک [۱۰] که در آن قطر سطح مقطع کوچکتر از پایین ترین طول موج در طیف تحریک در نظر گرفته می شود، معادله انتگرالی از نوع

مماسی میدان الکتریکی کل روی سطح سیم استفاده نمود و از آنجاییکه مولفه مماسی میدان الکتریکی روی سطح هادی صفر است می توان نوشت:

$$\hat{s} \cdot [\vec{e}^d + \vec{e}^a] = 0 \quad (5)$$

که $\vec{e}^a$ میدان تابشی می باشد که باعث القای جریان $\vec{i}$ روی هادیها می شود. با اعمال شرط مرزی معادله انتگرالی نهایی بصورت زیر حاصل می گردد:

$$\hat{s} \cdot \vec{e}^a(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C(\vec{r})} \left[\frac{\hat{s} \cdot \vec{s}'}{R} \frac{\partial \vec{i}(s', t')}{\partial t'} + c \frac{\hat{s} \cdot \vec{R}}{R^2} \frac{\partial \vec{i}(s', t')}{\partial s'} - c^2 \frac{\hat{s} \cdot \vec{R}}{R^3} q(s', t') \right] ds' \quad (6)$$

که q با توجه به اصل بقای بار الکتریکی از رابطه زیر بدست می آید [۷]:

$$q(s', t') = - \int_{-\infty}^{t'} \frac{\partial \vec{i}(s', \tau)}{\partial s'} d\tau \quad (7)$$

مسیر انتگرال گیری در رابطه (۶)، توسط راستای $s(\vec{r}')$ مشخص می شود در حالیکه محل محاسبه میدان بوسیله $s(\vec{r})$ تعیین می گردد (شکل-۲). بنابراین مقدار R همواره از شعاع سیم a ، بزرگتر بوده و معادله انتگرالی (۶) همواره قابل محاسبه می باشد.

این اختلاف فاصله بین نقطه مشاهده و منبع (شعاع سیم) از مشخصات تقریب سیم نازک می باشد.

برای در نظر گرفتن اثر زمین در حالت کلی از تئوری انعکاس امواج از مرز بین دو محیط استفاده می شود [۱۱ و ۱۲]. در حالتی که زمین ایده آل فرض شود، می توان از تئوری ساده تصویر برای تبیین اثر زمین استفاده نمود، بدین صورت که اگر سطح فلز توسط شبکه ای از سیمها تقریب زده شود، هر سیم به منزله یک دیپل عمل نموده و با استفاده از تئوری تصویر [۱۲] و در نظر گرفتن موقعیت و جهت دیپل می توان

که $\vec{i}$ جریان رشته ای و q بار در واحد طول، $R = |\vec{R}| = |\vec{r} - \vec{r}'|$ و $\vec{s}' = s(\vec{r}')$ ، $\vec{s} = s(\vec{r})$ می باشد. مختصات بدون پریم محل و زمان نقطه مشاهده را مشخص کرده و مختصات پریم دار محل و زمان منبع را نشان می دهد در ضمن t لحظه مشاهده، $t' = t - R/c$ و c برابر سرعت نور در فضای آزاد می باشد. لازم بذکر است که عبارتهای مشتق و دیورژانس در معادلات بالا روی مختصات نقطه مشاهده عمل می کنند. بردارهای واحد مماس بر $C(\vec{r})$ در $\vec{r}'$ و $\vec{r}$ بترتیب $\vec{s}' = s(\vec{r}')$ و $\vec{s} = s(\vec{r})$ می باشند. برای بدست آوردن معادله انتگرالی میدان الکتریکی با استفاده از رابطه (۱) لازم است که عبارات $\frac{\partial \vec{a}(\vec{r}, t)}{\partial t}$ و $\nabla \varphi$ محاسبه گردند [۷]:

$$\frac{\partial \vec{a}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C(\vec{r})} \frac{\vec{s}'}{R} \cdot \frac{\partial \vec{i}(\vec{r}', t')}{\partial t} ds' \quad (3)$$

$$\nabla \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C(\vec{r})} \left[-q(\vec{r}', t') \frac{\vec{R}}{R^3} + \frac{\vec{R}}{R^2 c} \frac{\partial \vec{i}(\vec{r}', t')}{\partial s'} \right] ds'$$

با توجه به اینکه $\vec{i}(\vec{r}', t) = \vec{i}(\hat{s}', t')$ و $q(\vec{r}', t) = q(\hat{s}', t')$ با ترکیب روابط (۱)، (۲) و (۳) معادله انتگرالی برای میدان الکتریکی بصورت زیر برحسب جریان رشته ای $\vec{i}(s', t')$ بدست می آید:

$$\vec{e}^d(\vec{r}, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C(\vec{r})} \left[\frac{\vec{s}'}{R} \frac{\partial \vec{i}(s', t')}{\partial t'} + c \frac{\vec{R}}{R^2} \cdot \frac{\partial \vec{i}(s', t')}{\partial s'} - c^2 \frac{\vec{R}}{R^3} q(s', t') \right] ds' \quad (4)$$

که $\vec{e}^d$ میدان الکتریکی پراکنده شده بوسیله جریان عبوری در سیم ($\vec{i}$) می باشد.

شایان ذکر است که سیم از نوع هادی آرمانی می باشد. در نتیجه می توان از شرط مرزی مربوط به پیوستگی مولفه

اثر تصویر آن را در نظر گرفت (شکل ۲-). در نتیجه معادله انتگرالی (۶) برای یک سیم در مجاورت زمین به صورت زیر تصحیح می گردد:

$$\hat{s} \cdot \bar{e}^a(s, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C_0} \left\{ \frac{\hat{s} \cdot \hat{s}'}{R} \frac{\partial i(s', t_0)}{\partial t_0} + c \frac{\hat{s} \cdot \hat{R}}{R^2} \frac{\partial i(s', t_0)}{\partial s'} \right. \\ \left. + c^2 \frac{\hat{s} \cdot \hat{R}}{R^3} \int_0^{t_0} \frac{\partial i(s', \tau)}{\partial s'} d\tau - \frac{\hat{s} \cdot \hat{s}^*}{R^*} \frac{\partial i(s', t_0)}{\partial t_0^*} \right. \\ \left. - c \frac{\hat{s} \cdot \hat{R}^*}{R^{*2}} \frac{\partial i(s', t_0^*)}{\partial s'} - c^2 \frac{\hat{s} \cdot \hat{R}^*}{R^{*3}} \int_0^{t_0^*} \frac{\partial i(s', \tau)}{\partial s'} d\tau \right\} ds'$$

$$\hat{s}' = s(\bar{r}'), \hat{s} = s(\bar{r}) \quad (۸)$$

$$R = \left[(s - s')^2 + a^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R^* = \left[(s - s'^*)^2 + a^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$t_0 = t - \frac{R}{u}$$

$$t_0^* = t - \frac{R^*}{u}$$

سه جمله اول در رابطه ۱۲ مربوط به یک سیم در فضای آزاد است و سه جمله بعدی اثر حضور زمین ایده آل را نمایش می دهد.

حل عددی رابطه (۱۲)، بوسیله روش ممان^۱ در حوزه زمان منجر به تعیین توزیع مکانی - زمانی جریانها روی شبکه سیمی می شود [۱۴]. شایان ذکر است که در روش ممان برای حل معادله انتگرالی، اثر متقابل بین سیمها بطور ذاتی در نظر گرفته می شود.

۳- نتایج

با استفاده از فرمول ارائه شده در بخش ۲، یک سیمولاتور با ابعاد بزرگ طراحی شد. شایان ذکر است امپدانس مشخصه خط انتقال مخروطی، با توجه به نسبتهای l/b و b/a (شکل ۱-۱) تعیین می گردد [۴]. در حقیقت با افزایش l/b

امپدانس مشخصه کاهش و با افزایش b/a امپدانس مشخصه خط افزایش می یابد. از طرف دیگر، امپدانس مشخصه خط انتقال موازی با زمین را می توان از روابط خطوط مایکرواستریپ محاسبه نمود [۱۵]. برای اینکه تنها موج TEM درون خط انتقال موازی انتشار پیدا کند، ابعاد آن بگونه ای تعیین می شود که فرکانس قطع اولین مود آن، بالاتر از بزرگترین مولفه فرکانسی کار منبع پالس باشد. با توجه به ابعاد تجهیزات مورد آزمایش و امپدانس مشخصه خط انتقال مخروطی و موازی، دو نسبت l/b و b/a برای بهترین حالت تطبیق انتخاب می گردند [۱۶].

با در نظر گرفتن کاربرد این نوع سیمولاتور و با استفاده از روابط خط انتقال، ابعاد سیمولاتور بصورت زیر طراحی و انتخاب شده است.

$$a = 20 \text{ m}, b = 12 \text{ m},$$

$$l = 33 \text{ m}, c = 30 \text{ m}$$

برای تحریک سیمولاتور از یک ژنراتور ولتاژ استفاده شده است. ارتباط بین $\bar{e}^a(s, t)$ و ولتاژ اعمالی $v(s, t)$ بصورت زیر می باشد [۱۳]:

$$\bar{e}^a(s, t) = \begin{cases} -\nabla v(s, t) & \text{if } s = s' = 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (۹)$$

رابطه (۱۰) چگونگی تغییرات دامنه ولتاژ این ژنراتور با زمان را نشان می دهد. پارامترهای A_0 ، α ، β به گونه ای انتخاب شده اند، تا تغییرات زمانی ولتاژ تحریک همانند یک ژنراتور مارکس که در شکل ۳ آمده است گردد [۱۷].

$$V(t) = A_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

$$A_0 = 1.05 \text{ V}$$

$$\alpha = 3.45 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \quad (۱۰)$$

$$\beta = 2.19 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

جهت کاهش انعکاسات ناخواسته در طول سیمولاتور بدلیل ناپیوستگی های ناشی از تغییر زاویه خطوط انتقال، در

انتهای سیمولاتور، باری برابر ۸۹ اهم جهت تطبیق قرار داده شده است. با انتخاب مناسب مقدار این بار امواج ایستا در طول سیمولاتور به حداقل خواهند رسید. با توجه به عرض باند فرکانسی پالس تحریک که کمتر از فرکانس قطع خط انتقال موازی می باشد.

انتظار می رود که درون سیمولاتور تنها مود TEM منتشر گردد و مودهای دیگر انتشار نیابند. محاسبات انجام شده نشانگر آنست که دامنه مولفه های جهت x و y میدان الکتریکی در مقایسه با مولفه جهت z آن کوچک بوده و می توان از آن صرف نظر نمود. ضمناً دامنه مولفه های جهت x و z میدان مغناطیسی در مقایسه با مولفه جهت y آن قابل صرف نظر کردن می باشند. این اختلاف در ناحیه مرکزی سیمولاتور در مقایسه با ابتدا و انتهای آن بیشتر می باشد. شکل های ۴ و ۵ مولفه های غالب میدانهای الکتریکی و مغناطیسی ($\vec{E}_z, \vec{H}_y$) در طول سیمولاتور و در راستای ox را نشان می دهند.

همانطور که در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود، با افزایش x دامنه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی کم می شود. حتی، در ناحیه مرکزی ($m 40 > x > m 50$) میدانهای الکترومغناطیسی یکنواخت نیز می گردند. همچنین بدلیل ناپیوستگی بین خط انتقال مخروطی و موازی در ناحیه $m 50 > x > m 40$ اعوجاج هایی در شکل موج میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بوجود می آید. شکل ۶ نحوه بوجود آمدن انعکاسات ناشی از ناپیوستگی های سیمولاتور را نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۶ دیده می شود، موج متشعه درون سیمولاتور، از طریق دو مسیر OB و $OA-AB$ به نقطه مشاهده (B) می رسد. زمان برقراری این اعوجاجها نیز دقیقاً برابر با زمان لازم برای طی کردن مسیر $OA-AB$ توسط موج با سرعت نور در فضای آزاد می باشد. لازم به ذکر است که علاوه بر دو مسیر $OA-AB$ و OA ، یک موج دیگر به علت ناپیوستگی در نقطه A' ، پس از طی مسافت

$OA - AA' - A'B$ به نقطه مشاهده می رسد. شایان ذکر است که مقدار بار تطبیق در انتهای سیمولاتور با استفاده از تئوری خط انتقال تعیین شده است. در حالیکه علاوه بر مود خط انتقال (مود TEM)، مودهای دیگر نیز در این ساختار تحریک می شوند. در نتیجه تطبیق بار در انتهای سیمولاتور کامل نبوده و یک موج انعکاسی بوسیله بار روی خط برقرار می گردد (مسیر $OO' - O'B$). در نهایت موج انعکاسی ناشی از بار نیز با طی کردن مسافت OO' و سپس $O'B$ به نقطه B می رسد. در نتیجه در مجموع می توان انتظار برقراری سه موج انعکاسی در زمانهای متناظر با مسافتهای ذکر شده را داشت. در شکل ۷، تغییرات زمانی مولفه z میدان الکتریکی در نقطه مرکز سیمولاتور و در ارتفاع $z=2.5m$ رسم و زمان برقراری موجهای انعکاسی فوق الذکر نمایش داده شده است

به عنوان مثال با توجه به سرعت نور در فضای آزاد و طول سیمولاتور که حدود ۱۰۰ متر می باشد، موج انعکاسی ناشی از عدم تطبیق بارنهایی در زمان ۵۲۰ نانوثانیه رخ داده است. شایان ذکر است که این زمان برابر مدت زمانی است که موج مسیر $OO' - O'B$ را که حدوداً برابر ۱۵۰ متر می باشد با سرعت نور در فضای آزاد طی می کند.

میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در وسط سیمولاتور در راستای خط تقارن MM' در شکل های ۸ و ۹ رسم شده اند. همانگونه که مشهود است تغییرات دامنه میدانها تا ارتفاع ۵ متری از سطح زمین ناچیز می باشد و با افزایش ارتفاع این یکنواختی از بین می رود. در این شکلهای نیز اعوجاج های ناشی از وجود ناپیوستگی های موجود در سیمولاتور مشهود است. شکل های ۱۰ و ۱۱ توزیع برداری میدان الکتریکی در دو زمان ۱۸۰ نانوثانیه و ۴۶۰ نانوثانیه در صفحه $y=0$ را نمایش می دهند. جهت میدان الکتریکی در راستای محور z و عمود بر جهت انتشار می باشد. این موضوع در ناحیه وسط سیمولاتور که شامل خط انتقال موازی می باشد صادق است ولی در ابتدا و انتهای سیمولاتور همانگونه که مشهود است

کاهش حافظه محاسباتی مورد نیاز برای شبیه سازی سیمولاتور تنها از ۱۲ سیم استفاده شده است. این امر باعث می شود که جوابهای شبیه سازی با اندازه گیری اختلاف اندکی داشته باشد.

شکل ۱۶ توزیع نرمالیزه شده میدان الکتریکی درون سیمولاتور در راستای ox و در ارتفاع $z = 2.5m$ را نشان می دهد. در این شکل خط پر رنگ و خط نقطه چین به ترتیب نتایج محاسبه با روش ذکر شده و نتایج حاصل از اندازه گیری را نشان می دهند. تطبیق نتایج در این شکل نیز بخوبی مشهود است.

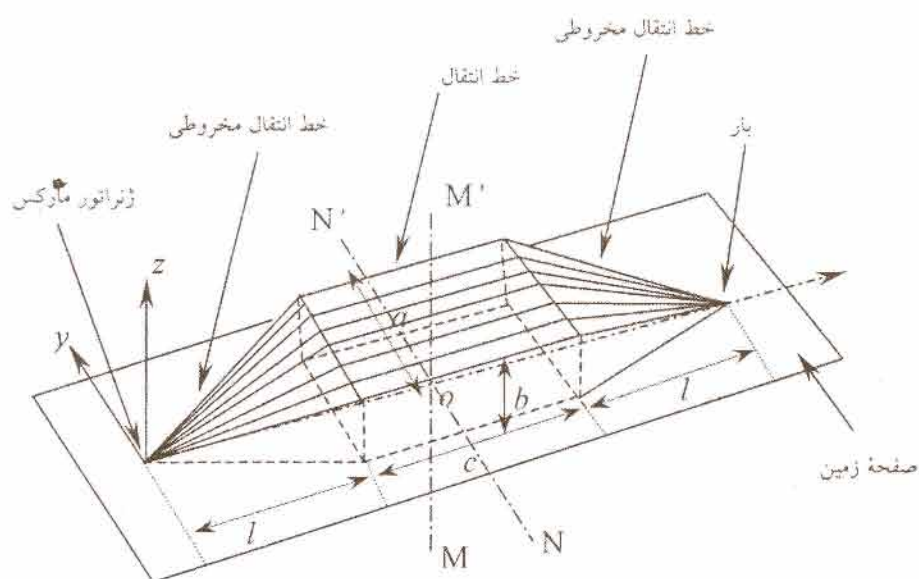
۴- نتیجه گیری

یک مدل ریاضی جهت بررسی توزیع میدانهای الکترومغناطیسی ناشی از یک سیمولاتور پالس با ابعاد بزرگ ارائه گردید. در این مدل، ساختار فلزی سیمولاتور با تعداد مناسبی از سیم نازک جایگزین و معادله انتگرالی از نوع میدان الکتریکی در حوزه زمان با استفاده از روش ممان حل گردید. مقایسه شبیه سازیها با نتایج اندازه گیری حاکی از صحت مدل ارائه شده می باشد. ضمناً نشان داده شد برای ساخت سیمولاتورهای بزرگ می توان قبل از ساخت، با روش ارائه شده توزیع میدانهای الکتریکی و مغناطیسی داخل سیمولاتور را محاسبه نمود. با کمک روش تئوری می توان ابعاد سیمولاتور را بگونه ای بهینه نمود تا ناحیه مناسب که در آنجا موج بصورت صفحه ای منتشر می گردد تعیین شود.

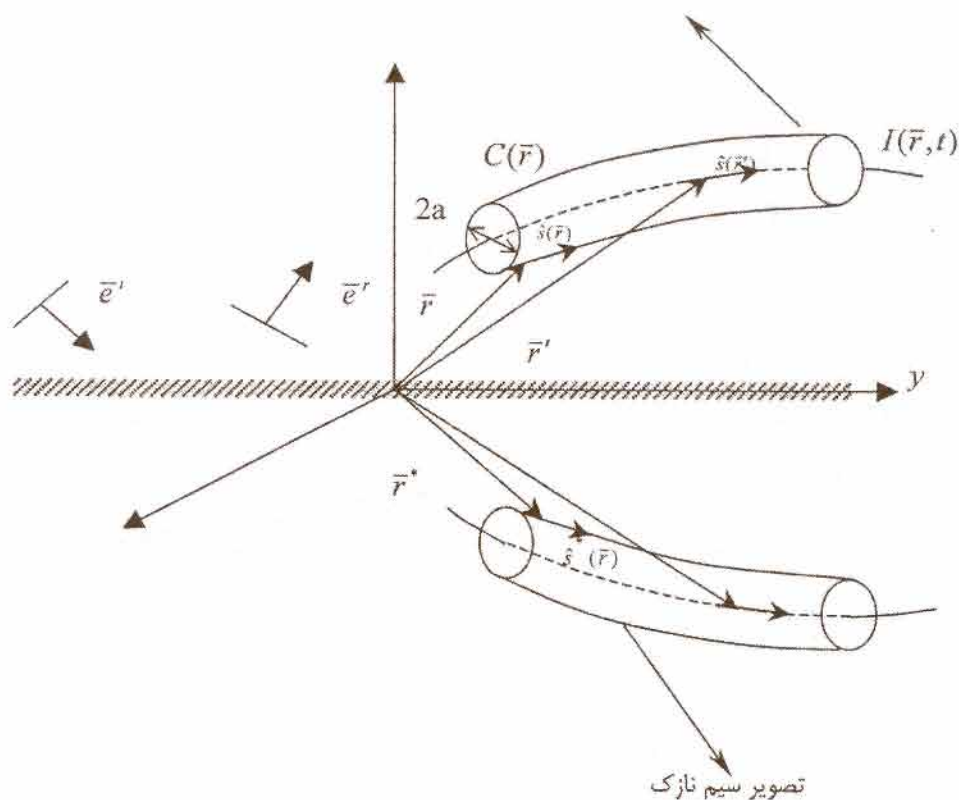
میدان الکتریکی دارای مولفه ای در جهت x می باشد که ناشی از عدم تطبیق و ایجاد مودهای بالاتر ناخواسته است. در شکل (۱۰) ناحیه III نشان داده نشده است، این بدین دلیل است که در زمان ۱۸۰ نانوثانیه موج انتشاری به آن ناحیه نرسیده است و دامنه میدان الکترومغناطیسی در آن لحظه در ناحیه III صفر است.

میدانهای الکترومغناطیسی درون سیمولاتور باید از نوع TEM باشند، بنابراین باید مانند موج انتشار یافته در فضای آزاد امپدانس موج میدانهای درون سیمولاتور ۳۷۷ اهم باشد. برای تأیید این موضوع امپدانس موج درون سیمولاتور در سه زمان مختلف در شکل ۱۲ ترسیم شده است. در لحظاتی که میدان ماگزیمم می شود، در هر سه حالت امپدانس موج در حدود ۳۷۷ اهم می باشد. به منظور بررسی دقت مدل بکار گرفته شده و اثر تعداد سیمها بر نتایج توزیع جریان درون سیمولاتور و در طول $x = 18m$ در شکل ۱۳ رسم شده است. در نقاط نزدیک لبه تجمع بار زیادتر و در نتیجه مقدار جریان بیشتر می گردد. همچنین دیده می شود با افزایش تعداد سیمها، توزیع جریان یکنواخت تر می شود که خود سبب یکنواختی میدانهای الکترومغناطیسی می گردد. در ضمن می توان نتیجه گرفت که اگر تعداد سیمهای سیمولاتور از یک حدی بیشتر شود، مسئله همگرا می شود و دیگر اضافه کردن تعداد سیمها تاثیری در جوابهای مسئله ندارد.

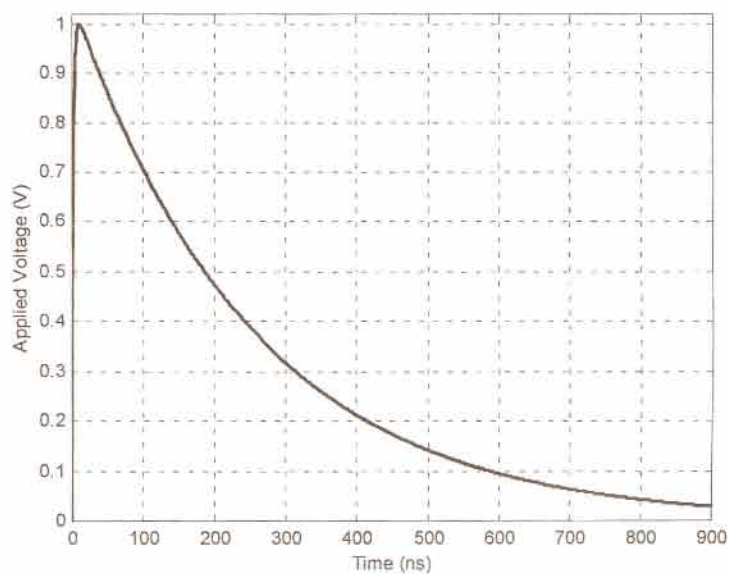
جهت تأیید روش و دقت مدل ارائه شده نتایج حاصله با نتایج بدست آمده از اندازه گیری [۱۸] در شکلهای ۱۴ و ۱۵ مقایسه شده است. شکل ۱۴ تغییرات زمانی ولتاژ اعمالی برای تحریک سیمولاتور را نشان می دهد. شکل ۱۵ میدان الکتریکی اندازه گیری شده و محاسبه شده با روش پیشنهادی تئوری را در نقطه $x=35m, y=0m, z=2m$ نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج اندازه گیری و شبیه سازی مشاهده می شود. در عمل سیمولاتور مذکور از ۵۲ سیم ساخته شده است، بمنظور



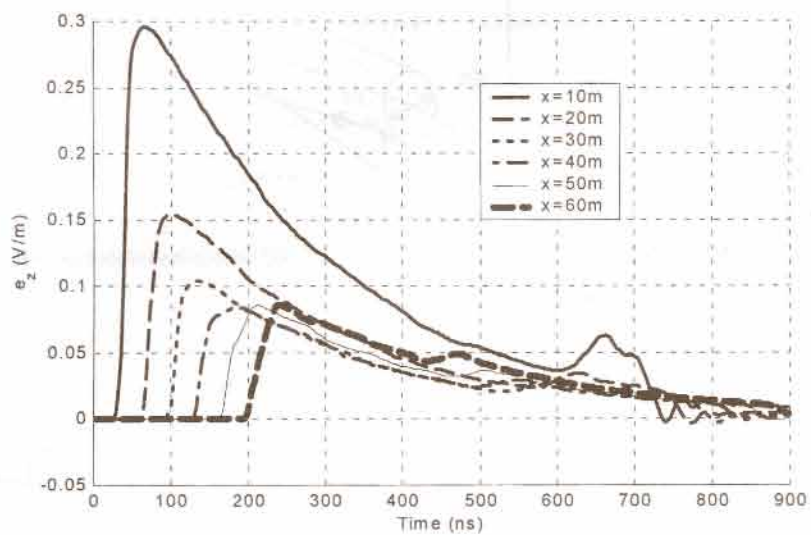
شکل ۱ سیمولاتور موج الکترومغناطیسی.



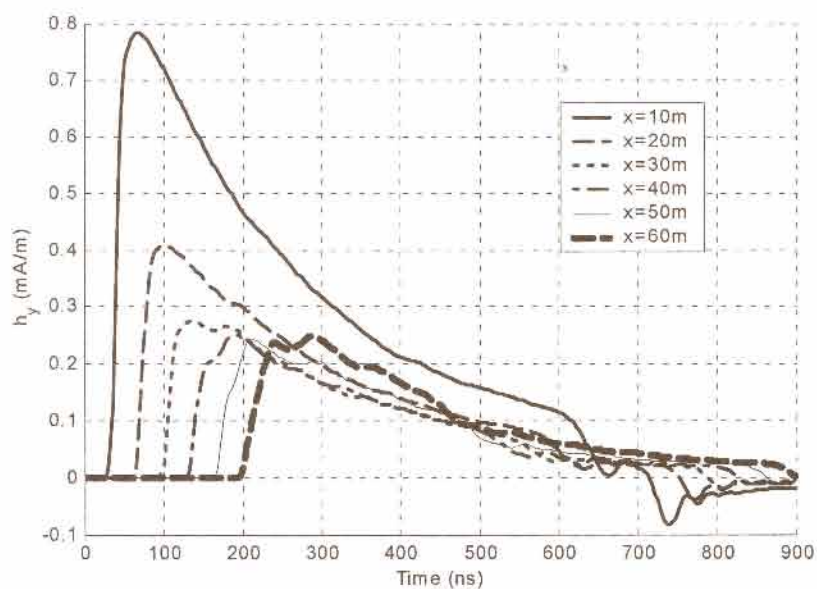
شکل ۲ مدل سیم نازک و تصویر برای بدست آوردن معادله انتگرالی.



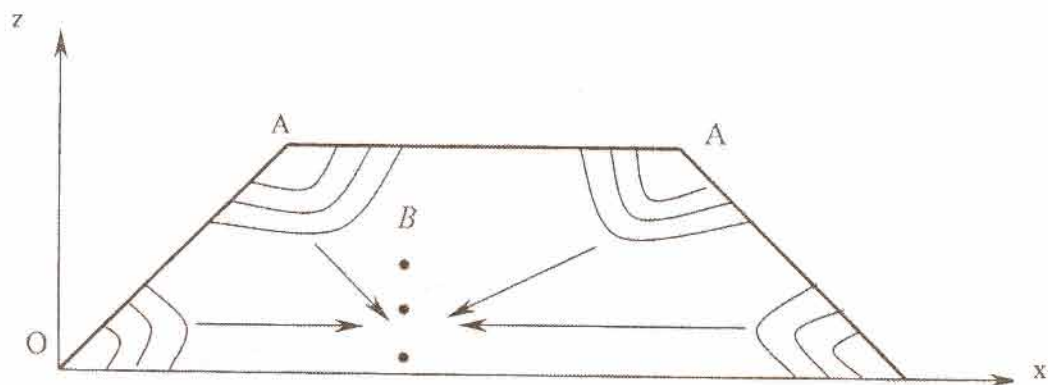
شکل ۳ تحریک زمانی سیمولاتور.



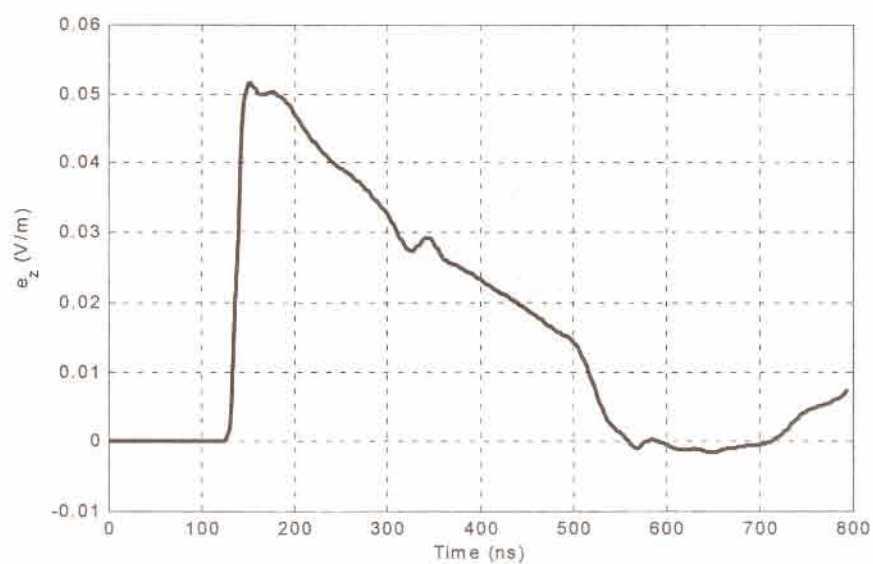
شکل ۴ توزیع زمانی میدان الکتریکی در طول سیمولاتور در راستای ox .



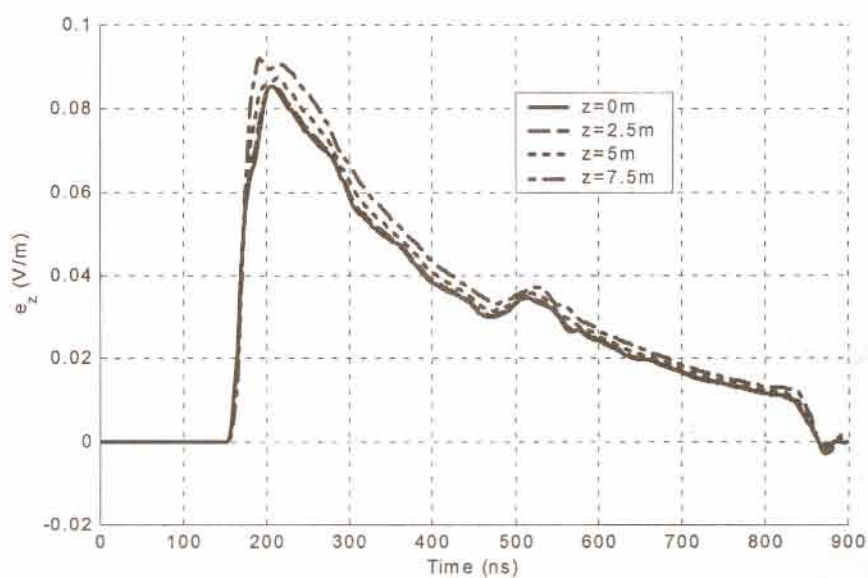
شکل ۵ توزیع زمانی میدان مغناطیسی در طول سیمولاتور در راستای OX .



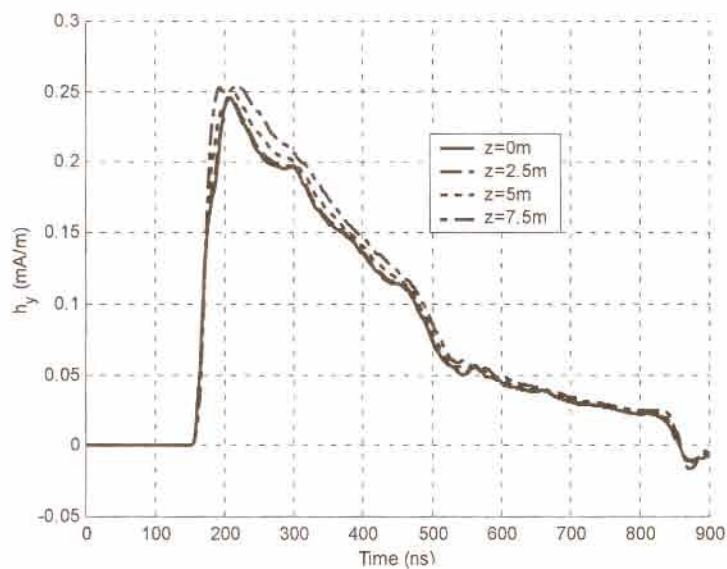
شکل ۶ چگونگی بوجود آمدن انعکاسات ناشی از ناپیوستگی موجود در سیمولاتور.



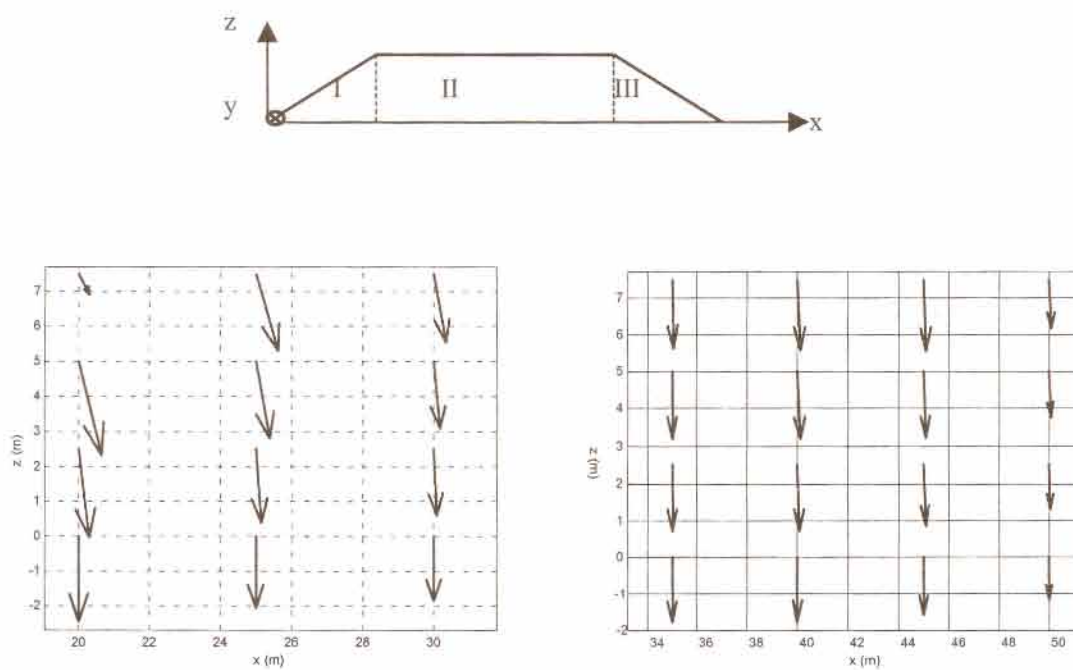
شکل ۷ توزیع زمانی میدان الکتریکی در مرکز سیمولاتور در نقطه O مرکز سیمولاتور و ارتفاع $z=2.5m$.



شکل ۸ توزیع زمانی میدان الکتریکی در مرکز سیمولاتور در راستای خط تقارن MM' .

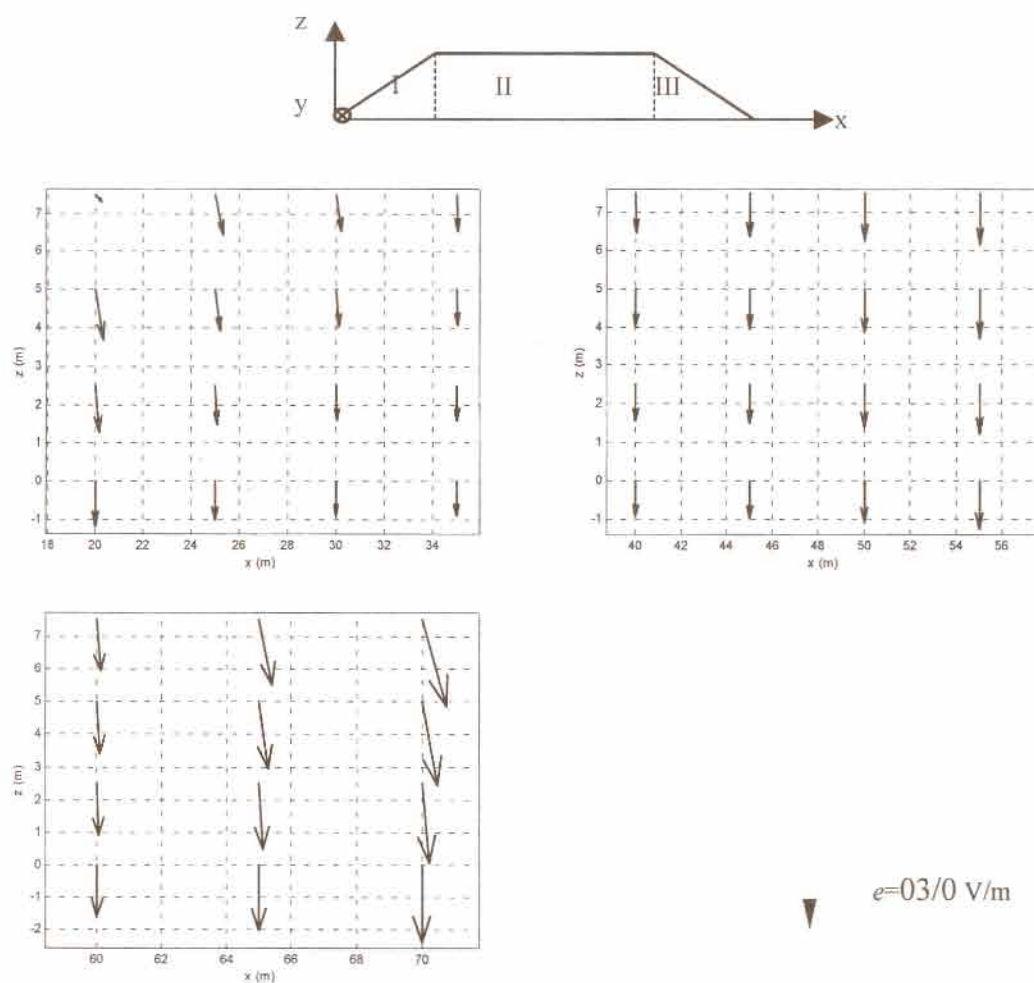


شکل ۹ توزیع زمانی میدان مغناطیسی در مرکز سیمولاتور در راستای خط تقارن MM' .

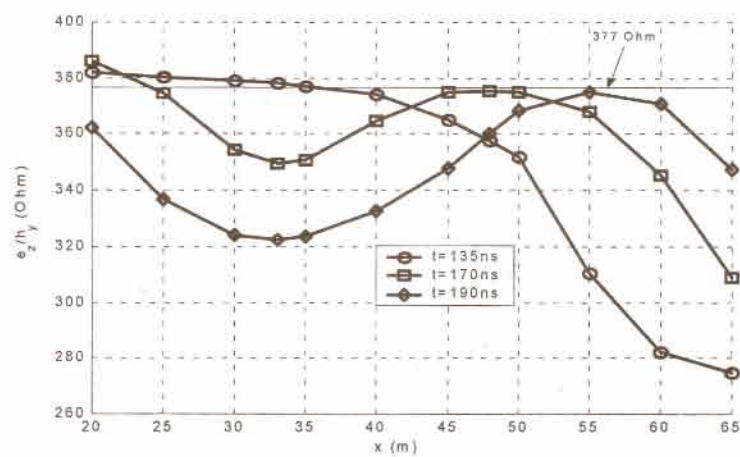


$$E = 0.048 \text{ V/m}$$

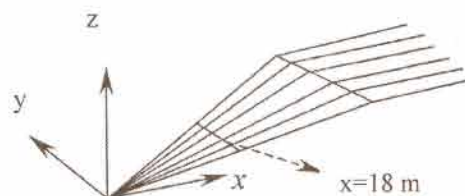
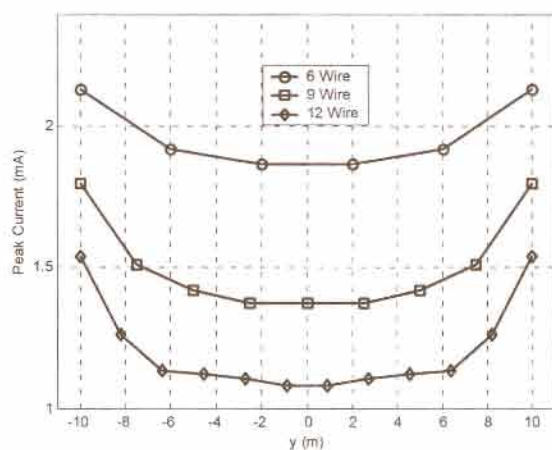
شکل ۱۰ بردار میدان الکتریکی در زمان ۱۸۰ نانوثانیه.



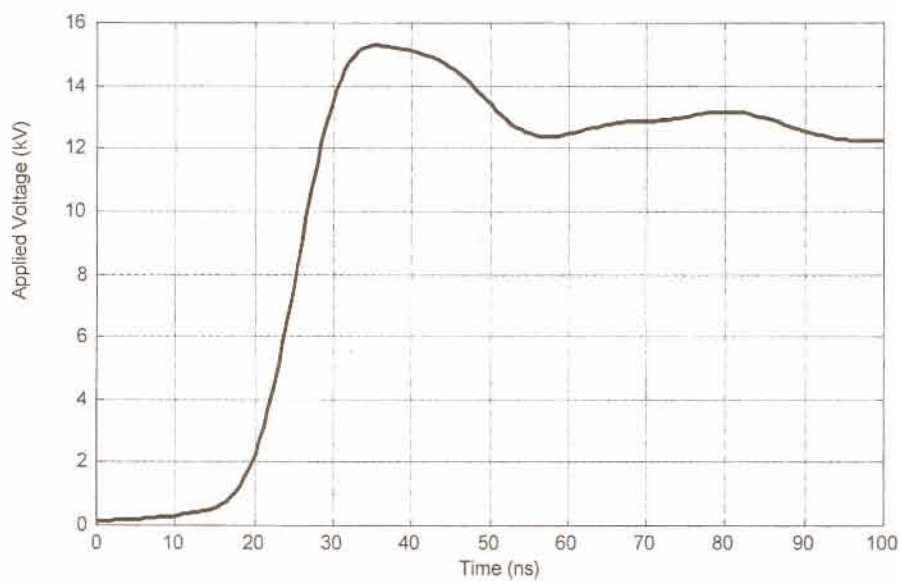
شکل ۱۱ بردار میدان الکتریکی در زمان ۶۰ نانوثانیه.



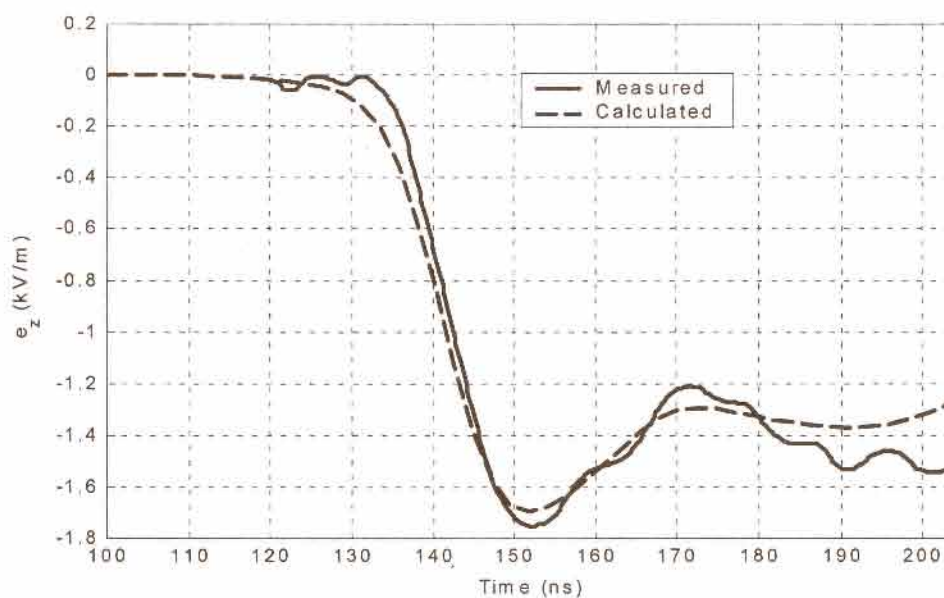
شکل ۱۲ امپدانس موج در طول سیمولاتور برای سه زمان مختلف.



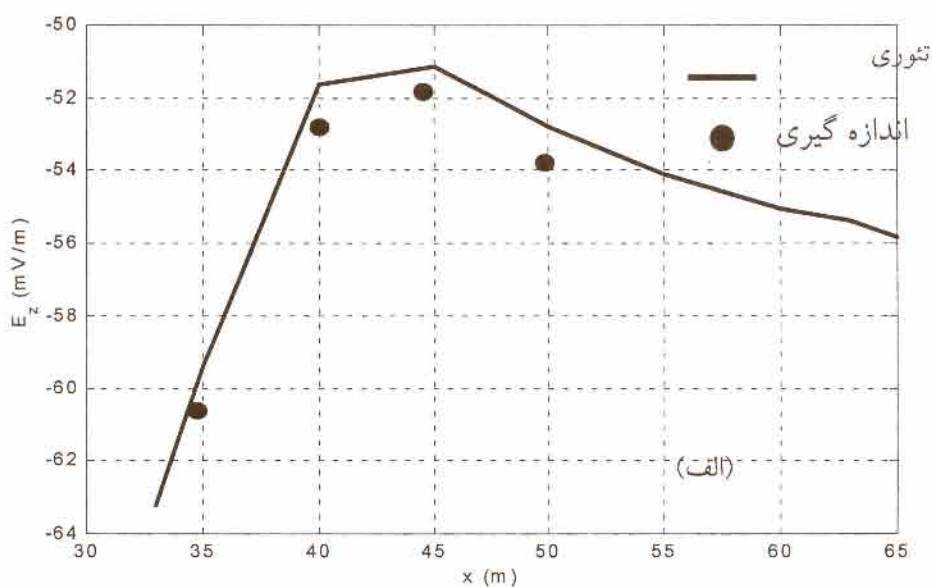
شکل ۱۳ (الف) شکل سیمولاتور، (ب) پیک توزیع جریان در $x = 18 \text{ m}$ در عرض سیمولاتور.

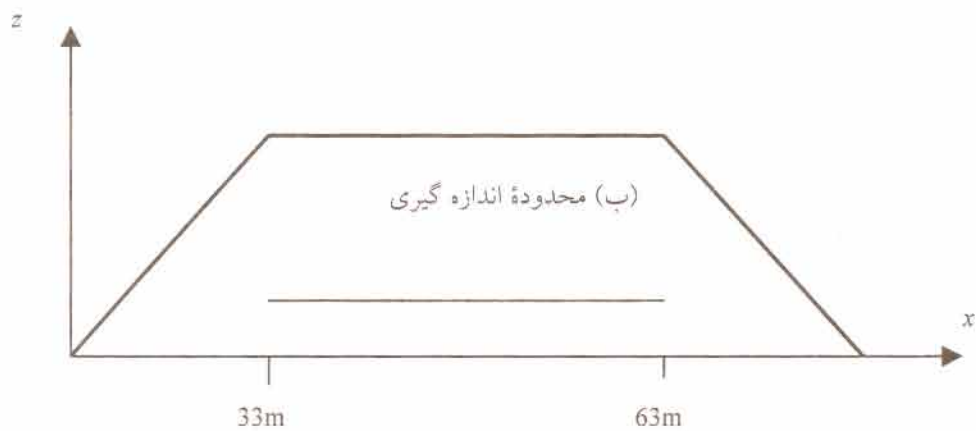


شکل ۱۴ تغییرات زمانی ولتاژ تحریک سیمولاتور



شکل ۱۵ تغییرات زمانی مولفه میدان الکتریکی در نقطه $x=35m, y=0m, z=2m$





شکل ۱۶ تغییرات ماکزیمم شدت میدان الکتریکی در داخل سیمولاتور در راستای ox و ارتفاع $z=2.5m$

۵- مراجع

- [1] C. E. Baum, "EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: An interim categorization," *IEEE Trans. Electromagnetic compatibility*, Vol. EMC-20, pp. 35-53, Feb. 1978.
- [2] J. Miletta, R. J. Chase, B. B. Luu, J.W. Williams, V. J. Viverito, "Modeling of Army Research Laboratory EMP Simulator" *IEEE Transaction on nuclear science*, VOL.40, NO.6, DECEMBER 1993.
- [3] J.J A. Klaasen, "An Efficient Method for the Performance Analysis of Bounded Wave Nuclear EMP Simulators", *IEEE Transaction on EMC*, VOL. 35, NO. 3, August 1993.
- [4] F. C. Yang, K. S. H. Lee, "Impedance of a two conical plate transmission line," *Sensor and Simulation Notes*, No. 221, Nov. 1976.
- [5] R. W. P. King, D. J. Blejer, T. T. Wu, "Standing Waves and Notches in an EMP Simulator and their reduction," *IEEE Transaction on EMC*, VOL. EMC-23, No. 2, PP. 255-265, May 1982.
- [6] G. J. Burke et al., "Numerical Electric Code (NEC) – Method of Moments", *Naval Ocean Systems Center*, Technical Doc. 116, 1977.
- [7] E. K. Miller, "An Integrodifferential Equation Technique for Time-Domain Analysis of Thin Wire Structure", Part I, *J. Computational Physics*, No. 12, PP. 24-48, 1973.
- [8] C. L. Bennett, "A Technique for Computing Approximate Electromagnetic Response of Conducting Bodies", *Purdue University*, Lafayette, Ind, Rept. TR-EE68-11, 1968.
- [9] W. L. Weeks, C. L. Bennett, "Transient Scattering from Conducting Cylinder", *IEEE Trans. Antennas Propagat*, vol. 18, pp. 638, 1970.
- [10] R. Mittra, *Numerical Techniques for Electromagnetic Boundary Value Problem*, New York: Pergamon Press. 1973.
- [11] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw-Hill, 1941.
- [12] C. A. Ballanis, *Advanced Engineering Electromagnetics Theory*, New York: Wiley, 1989.
- [13] R. Moini, B. Kordi, G. Z. Raffi, V. A. Rakov, "A new lightning return stroke model based on antenna theory", *Journal of Geophysical Research*, VOL. 105, NO. d24, PAGES 29,693-29,702, December 27, 2000.
- [14] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Method*, MacMillan, New York: MacMillan, 1968.
- [15] H. A. Wheeler, "Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet" *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, VOL. MTT-13, PP. 172-185, March 1965.
- [16] N. Ari, D.V. Giri, "Review of Characteristic Impedance of Two Conductor Transmission lines", *Sensors and Simulation notes*, 301, 22 May 1987.
- [17] C. Goldstein, A. Tehori, "A Small Parallel Plates System For EMP Simulation", *IEEE Intl. Symposium on Emc*, Atlanta August 1987, papers 3B-1.
- [18] J. Bardet, "Analyse et Conception de Simulateurs D'Impulsions Electromagnetiques a Lignes de Transmission", *These de Doctrat*, Universite de Limoges, 1988.