

## بررسی و شبیه‌سازی تأثیر خطوط مدار چاپی در القاء موج بر روی مدارات فعال ترانزیستوری

احمد رضا امین<sup>۱\*</sup>، علیرضا صالحی<sup>۲</sup>، محمد حسین قزل ایغ<sup>۳</sup>، محمد حسین راهدان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۳- استادیار، گروه الکترونیک، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۴- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات نصر

E-mail: aramin8542@yahoo.com

(دریافت: ۸۸/۱۰/۱۲، پذیرش: ۸۸/۱۲/۶)

### چکیده

ویژگی‌های بردها و ریزنوارها (خطوط میکرواستریپ) تأثیر تعیین‌کننده‌ای در پدیده تداخل و القای امواج الکترومغناطیسی بر روی بردهای الکترونیکی دارند. در این مقاله اثر تغییر مشخصات فیزیکی خطوط هادی و بردهای مدار چاپی با تابش یک پالس الکترومغناطیسی دوزنقه‌ای به صورت سه بعدی با روش مشتقات محدود در حوزه زمان FDTD شبیه‌سازی شده است. اندازه طول و عرض یک ریزنوار و ضخامت فیبر مدار چاپی از جمله مواردی است که اثرات تغییر در آنها با شبیه‌سازی ارائه می‌گردد. همچنین با انتخاب مدل کامل-پون برای ترانزیستور دو قطبی روابط متناظر الکترومغناطیسی در نرم‌افزار شبیه‌ساز وارد شده و با استفاده از آن تأثیر امواج پر قدرت الکترومغناطیسی بر روی مدار تقویت‌کننده ترانزیستوری تحلیل گردیده است.

**کلیدواژه‌ها:** ریزنوار؛ القای موج؛ تداخل الکترومغناطیسی؛ ترانزیستور دو قطبی

## Investigation and Simulation of the Effect of Electronic Circuit Board Tracks on the Interference of EM Waves Onto Active Transistor Circuits

A. R. Amin<sup>\*</sup>, A. Salehi, M. H. Ghezalaigh, M. H. Rahdan

Khaje Nasir Toosi University, Electrical Engineering Department

Email: aramin 8542@yahoo.com

### Abstract

Microstrip lines and tracks of Printed Circuit Boards (PCBs) have definitive effects on the electromagnetic wave induction and interference on boards. In this paper the effect of changes in the physical characteristics of conductive lines and PCBs was simulated three dimensionally using Finite Difference Time Domain (FDTD) method. The length and width of a microstrip line and thickness of PCB are among parameters that variation effects of which are presented using simulation. High power Electromagnetic radiation effect on a transistor amplifier is also investigated by introducing corresponding electromagnetic equations into the simulation software using BJT GP model.

**Keywords:** Microstrip Line; Wave Induction; Electromagnetic Interference; BJT

۱. مقدمه

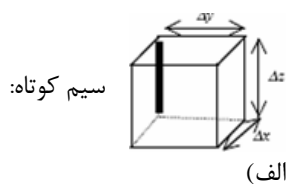
یکی از مواردی که کارشناسان و مدیران مسئول در حوزه مربوط به روش های پدافند نوین به آن توجه کرده اند، حفاظت تجهیزات و سیستم های صنعتی و دفاعی در مقابل تهدید امواج پر قدرت الکترومغناطیسی (HPEM) بوده است. گرایش سازندگان و فناوری ادوات نیمه هادی برای کاهش توان مصرفی و ولتاژ تغذیه در مدارات، بالاتر رفتن فرکانس کاری و کوچک تر شدن ابعاد قطعات و بردها، سیستم های الکترونیکی را آسیب پذیرتر کرده است [۱-۳]. برای داشتن ارزیابی صحیح از میزان واقعی تهدیدات الکترومغناطیسی می بایست به شکلی مناسب از روش های علمی مربوطه استفاده کرد. از آن جایی که تئوری های موجود قادر به پیش بینی دقیق جزئیات بر هم کنش موج و مدار در محیط انتشار نیستند و از طرف دیگر انجام آزمایشات دقیق همواره با محدودیتهای عملی همراه بوده است، بنابراین استفاده از انواع روش های شبیه سازی توسعه یافته است [۴ و ۵].

با توجه به این که ریزنوارها نقش تعیین کننده ای در میزان میدان کوپل شده بر روی قطعات و بردهای مدار چاپی دارند، در نتیجه بررسی رفتار این خطوط در برابر تابش موج خارجی یک گام پایه و اساسی در این نوع شبیه سازی ها تلقی شده است. از این رو به دلیل ساده تر بودن کار، معمولاً تأثیر موج بر روی بردهای مدار چاپی که صرفاً شامل چند ریزنوار و المان های غیر فعالی نظیر مقاومت و خازن هستند شبیه سازی شده است. در حالی که به دلیل بروز پیچیدگی های خاص، هنوز شبیه سازی برای بردهایی که شامل عناصر فعالی مثل ترانزیستور یا IC باشند، در ابتدای راه بوده و توسعه نیافته است [۶].

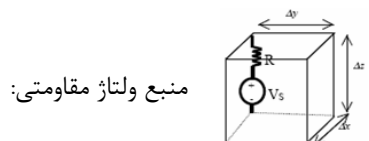
۲. توصیف نرم افزار شبیه ساز

برای بررسی دقیق تأثیر مشخصات فیزیکی ریزنوارها در بر هم کنش موج الکترومغناطیسی با یک برد الکترونیکی می بایست از روش های تحلیل میدانی استفاده کرد. FDTD با حل معادلات ماکسول در حوزه زمان و امکان مش بندی غیر یکنواخت متناسب با ابعاد برد هدف، و هم چنین توانایی در تحلیل ساختارهای غیر خطی و متغیر با فرکانس، روش مناسبی برای شبیه سازی این تاثیرات می باشد. در این مقاله

برای بررسی نحوه بر هم کنش موج و برد با کدنویسی به زبان فترن نرم افزار شبیه سازی سه بعدی FDTD طراحی و به کار گرفته و مطابق با روش FDTD مؤلفه میدان E منطبق بر یک المان فشرده خطی از رابطه  $\nabla \cdot \vec{H} = J_z + \epsilon \frac{\partial E}{\partial T}$  محاسبه گردیده است. سری معادلات (۱)، مؤلفه میدان الکتریکی برای  $E_{z(i,j,k)}^{n+1}$  المان های فشرده خطی شامل سیم کوتاه، منبع ولتاژ مقاومتی، خازن و القاگر و سلول مربوطه در شبیه سازی FDTD را ارائه می کند [۷].

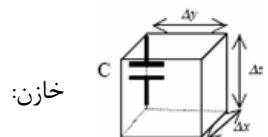


$$E_{z(i,j,k)}^{n+1} = 0$$



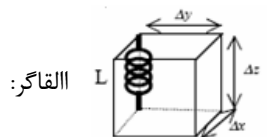
$$E_{x(i,j,k)}^{n+1} = \left( \frac{1 - \frac{\Delta x \Delta z}{2R\epsilon\Delta x\Delta y}}{1 + \frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon\Delta x\Delta y}} \right) E_{z(i,j,k)}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon}}{1 + \frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon\Delta x\Delta y}} \right) \nabla \times H_{z(i,j,k)}^{n+\frac{1}{2}} - \left( \frac{\frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon\Delta x\Delta y}}{1 + \frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon\Delta x\Delta y}} \right) \left( \frac{V_s}{\Delta z} \right)^{n+\frac{1}{2}}$$

ب)



$$E_{z(i,j,k)}^{n+1} = E_{z(i,j,k)}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon}}{1 + \frac{C\Delta z}{\epsilon\Delta x\Delta y}} \right) \nabla \times H_{z(i,j,k)}^{n+\frac{1}{2}}$$

ج)



$$E_{z(i,j,k)}^{n+1} = E_{z(i,j,k)}^n + \left( \frac{\Delta t}{\epsilon} \right) \nabla \times H_{z(i,j,k)}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta z (\Delta t)^2}{\epsilon L \Delta x \Delta y} \sum_{m=1}^n E_{z(i,j,k)}^m$$

د)

سری معادلات (۱): مؤلفه های میدان الکتریکی برای

الف- سیم کوتاه، ب- منبع ولتاژ مقاومتی، ج- خازن،

د- القاگر

$$I_{ES} = I_{LE} + (1 + \frac{1}{\beta_F}) I_{CC} - I_{EC}$$

$$I_{CS} = I_{LC} + (1 + \frac{1}{\beta_R}) I_{EC} - I_{CC}$$

(ب)

$$E_{x(i_c, j_c, k_c)}^{n+1} = E_{x(i_c, j_c, k_c)}^n + \frac{C_1 E_2 - C_2 E_1}{B_2 E_1 - B_1 E_2}$$

$$E_{x(i_e, j_e, k_e)}^{n+1} = E_{x(i_e, j_e, k_e)}^n + \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{B_2 E_1 - B_1 E_2}$$

$$\nabla \times \vec{H}_{E(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{H_{z(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z(i_c, j_c, k_c-1)}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_{y(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} - H_{y(i_c, j_c, k_c-1)}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z}$$

$$\nabla \times \vec{H}_{C(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{H_{z(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z(i_c, j_c, k_c-1)}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_{y(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} - H_{y(i_c, j_c, k_c-1)}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z}$$

$$B_1 = \frac{\Delta t \Delta x}{\epsilon \Delta y \Delta z} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial I_{CS}}{\partial V_{BC}} \Big|_{V_{BC}^n} + \frac{C_C^n}{\Delta t} \right) + 1$$

$$C_1 = \frac{\Delta t N_C}{\epsilon \Delta y \Delta z} I_{CS}^n - \frac{\Delta t}{\epsilon} \left( \nabla \times \vec{H}_{C(i_c, j_c, k_c)}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

$$E_1 = \frac{\Delta t \Delta x N_C N_E}{2 \epsilon \Delta y \Delta z} \frac{\partial I_{CS}}{\partial V_{BE}} \Big|_{V_{BE}^n} \quad B_2 = \frac{\Delta t \Delta x N_C N_E}{2 \epsilon \Delta y \Delta z} \frac{\partial I_{ES}}{\partial V_{BC}} \Big|_{V_{BC}^n}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t N_E}{\epsilon \Delta y \Delta z} I_{ES}^n - \frac{\Delta t}{\epsilon} \left( \nabla \times \vec{H}_{E(i_e, j_e, k_e)}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

(ج)

$$E_2 = \frac{\Delta t \Delta x}{\epsilon \Delta y \Delta z} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial I_{ES}}{\partial V_{BE}} \Big|_{V_{BE}^n} + \frac{C_E^n}{\Delta t} \right) + 1$$

سری معادلات (۲): الف- جانمایی ترانزیستور دو قطبی FDTD.  
ب- معادلات در مدل گامل- پون ترانزیستور، ج- معادلات متناظر برای انجام شبیه سازی FDTD

### ۳. شبیه‌سازی اثر موج تابشی بر روی ریزنوار

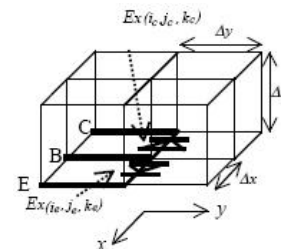
قبل از این که تاثیر مشخصات فیزیکی ریزنوارها در میزان و نحوه القای موج بر روی آنها و هم‌چنین بر هم‌کنش موج با برد ترانزیستوری شبیه‌سازی شود، مناسب است برای حصول اطمینان از دقت شبیه‌سازی، نتایج یک آزمون معتبر ملاک قرار گیرد.

#### ۳-۱. مقایسه شبیه‌سازی با آزمون عملی

به منظور مقایسه شبیه‌سازی با یک آزمون عملی، از نتایج آزمایشات مرجع [۱۴] استفاده شد. شکل (۱-الف) و (۱-ب)

در شبیه‌ساز طراحی شده برای اعمال منبع موج تخت تکنیک TF/SF<sup>۱</sup>، که با وجود داشتن پیچیدگی بیشتر، کارا و قدرتمند است استفاده گردید [۸]. هم‌چنین برای جذب بهتر میدان‌های رسیده به مرزها شرط مرزی لایه‌های کاملاً منطبق (GPML)<sup>۲</sup> به کار گرفته شد. شرایط مرزی در این روش، انطباق خوبی با میدان‌های برخوردی با زوایای مختلف، طیف فرکانسی و پلاریزاسیون انتخاب شده دارد [۹-۱۱]. با ویژگی‌های ارائه شده امکان شبیه‌سازی دقیق تأثیر موج بر عملکرد یک برد الکترونیکی که صرفاً شامل عناصر غیر فعال و خطوط ارتباطی باشد، فراهم گردیده است.

برای تحلیل عملکرد برد الکترونیکی که شامل قطعات فعال ترانزیستوری باشد، از سرعت بسیار بالای انتشار موج در مقایسه با سرعت ترانزیستور می‌توان نتیجه گرفت که نمونه الکترونیکی ترانزیستور باید با توجه به فرکانس موج تابشی انتخاب گردد. مدل گامل- پون ترانزیستور در محدوده فرکانسی امواج HPM<sup>۳</sup> و UWB<sup>۴</sup> دقت قابل قبولی داشته و از طرف دیگر در پله‌های زمانی، حل FDTD نیاز به تکرار حل عددی ندارد و برای شبیه‌سازی تعداد زیادی ترانزیستور مناسب است. قابل ذکر است که نرم‌افزارهای شبیه‌ساز دیگر مثل ADS و PSPICE نیز از این مدل ترانزیستور استفاده کرده‌اند [۱۲]. برای شبیه‌سازی ترانزیستور دو قطبی و ولتاژ- جریان در اتصال بیس-امیتر و اتصال بیس-کلکتور با دو بسط تیلور تقریب زده شده و با صرف‌نظر کردن از جملاتی که با درجه سه و بالاتر هستند روابط لازم برای محاسبه میدان‌های الکتریکی در این دو اتصال به‌دست می‌آید. با مبنا قرار دادن روابط ترانزیستور دو قطبی در مدل گامل- پون، جانمایی و روابط متناظر الکترومغناطیسی مطابق با سری معادلات (۲) برای نرم‌افزار شبیه‌ساز FDTD به دست آمده است [۱۳].



(الف)

- 1- Total Field/ Scattered Field
- 2- Generalized Perfectly Matched Layers
- 3- High Power Microwave
- 4- Ultra Wide Band

### ۳-۲. اثر طول و عرض ریزنوار

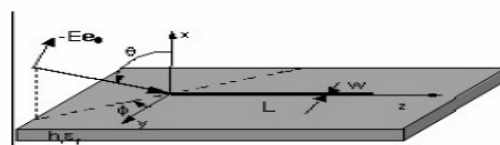
برای بررسی اثر طول ریزنوار در القاء موج تابشی بر روی آن، پالس شکل (۲-الف) با شدت میدان  $10 \text{ kV/m}$  به برد شکل (۱-الف) تابیده شد. طول ریزنوار در سه حالت به ترتیب  $1/\delta \text{ cm}$ ،  $3 \text{ cm}$  و  $6 \text{ cm}$  در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود متناسب با افزایش طول خط، بر میزان حداکثر ولتاژ القا شده بر روی خط اضافه شده است. لیکن ملاحظه می‌شود که شیب موج تابشی، تعیین‌کننده شیب ولتاژ القا شده بر روی ریزنوارها بوده و طول این خطوط تأثیری در شیب صعودی و نزولی موج القا شده ندارد. هم‌چنین این نتیجه قابل توجه است که افزایش دامنه موج ورودی از یک حد مشخص، تأثیری در افزایش ولتاژ القا شده بر روی خط ندارد. یعنی حداکثر ولتاژ القا شده تابع طول خط و شیب موج تابشی می‌باشد.

حال برای بررسی اثر عرض ریزنوار مشابه با حالت قبل و با انتخاب ریزنوار به طول  $3 \text{ cm}$  برای عرض  $1/\delta \text{ cm}$  و  $3 \text{ cm}$  شبیه‌سازی FDTD ارائه می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۲-ج) مشاهده می‌شود با افزایش عرض ریزنوار، بر میزان القاء ولتاژ افزوده می‌گردد. قابل ذکر است جهت و پلاریزاسیون موج تابشی تأثیر مستقیمی بر میزان ولتاژ القا شده بر روی خط دارد که در یک بحث مستقل می‌توان تأثیر ویژگی‌های موج تابشی را بررسی کرد.

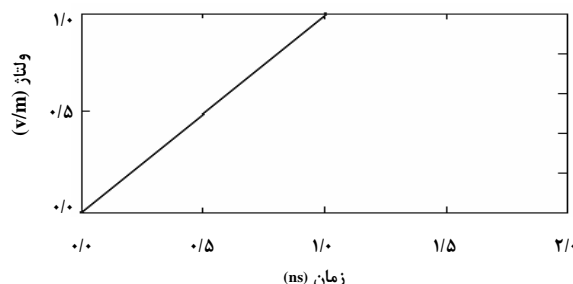
### ۳-۳. اثر ضخامت و ثابت دی الکتریک برد مدار چاپی

در این مرحله به صورت مستقل اثر ضخامت و ثابت دی الکتریک برد مدار چاپی، شبیه‌سازی شده و نتایج در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) آورده شده است. مشاهده می‌شود اندازه ضخامت برد مدار چاپی به صورت مستقیم در افزایش ولتاژ القا شده تأثیر دارد، در حالی که تغییر ثابت دی الکتریک برد مدار چاپی تأثیر چندانی در القاء ولتاژ بر روی ریزنوار ندارد. با جمع بندی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که کاهش طول و عرض ریزنوارها و هم‌چنین استفاده از بردهای مدار چاپی با ضخامت کمتر می‌تواند برای کاهش آسیب‌های احتمالی ناشی از تابش امواج پر قدرت الکترومغناطیسی مد نظر قرار گیرد.

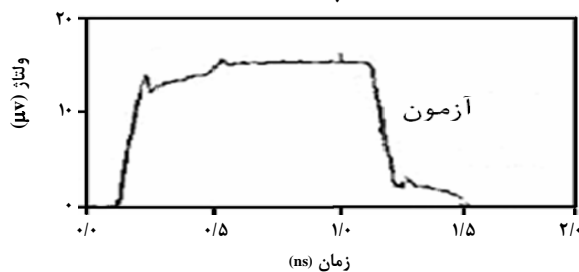
نحوه برخورد موج تخت به برد و شکل موج پالس تابشی را نشان می‌دهد. ابتدا و انتهای خط با مقاومت‌های  $50 \Omega$  بارگذاری شده است. تعداد پله‌های زمانی شبیه‌سازی،  $8500 \times \Delta t = 0.4 \text{ ps}$  بوده و از  $10$  لایه PML برای محدود کردن ساختار و جذب میدان‌های رسیده به دیوارهای محیط استفاده شده است. در تکنیک TF/SF،  $5$  لایه پراکندگی<sup>۱</sup> به کار گرفته شد. ولتاژ القا شده در انتهای خط مدار چاپی در شکل (۱-ج) تطبیق خوب خروجی، شبیه‌سازی با نتایج آزمون عملی و اعتبار آن را نشان می‌دهد.



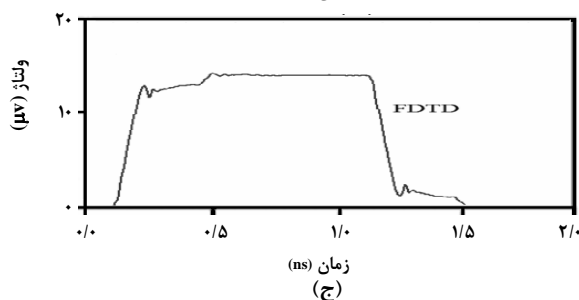
(الف)



(ب)

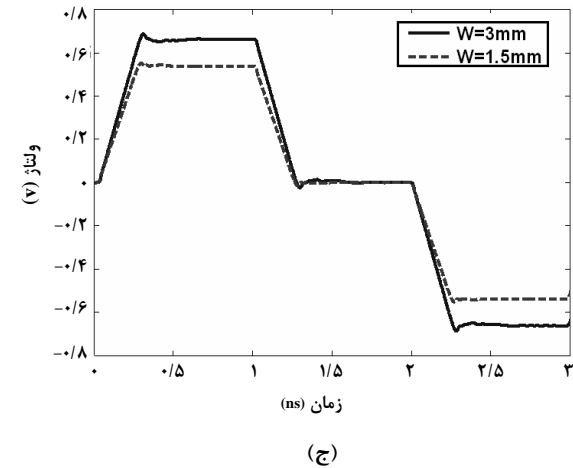
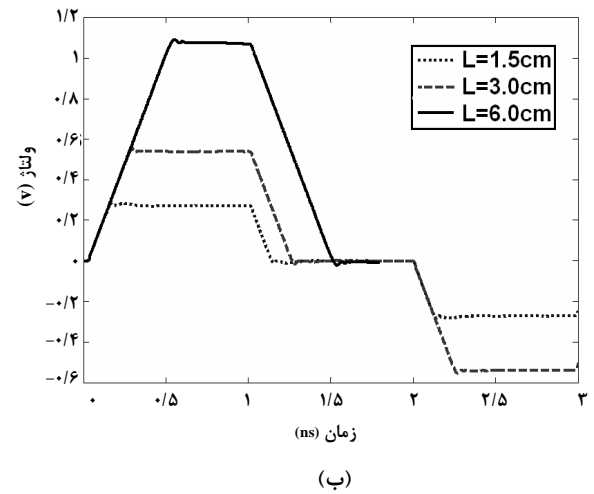
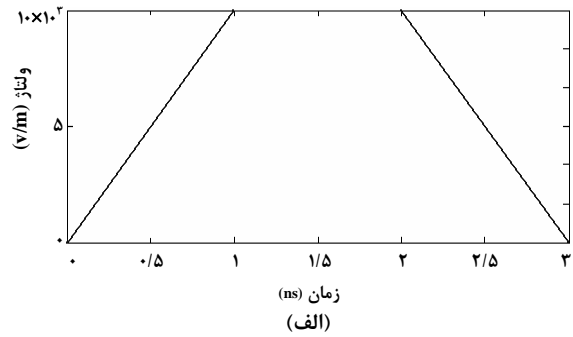
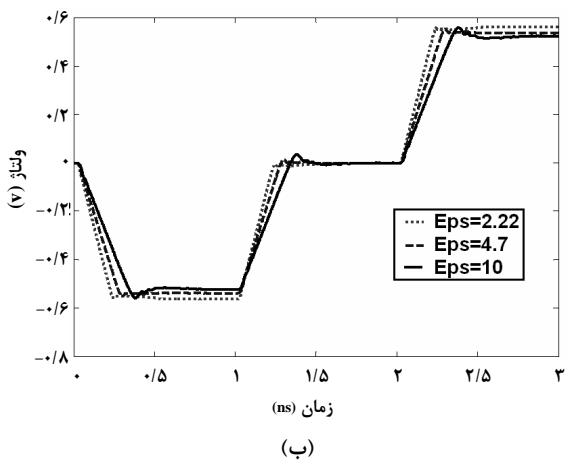
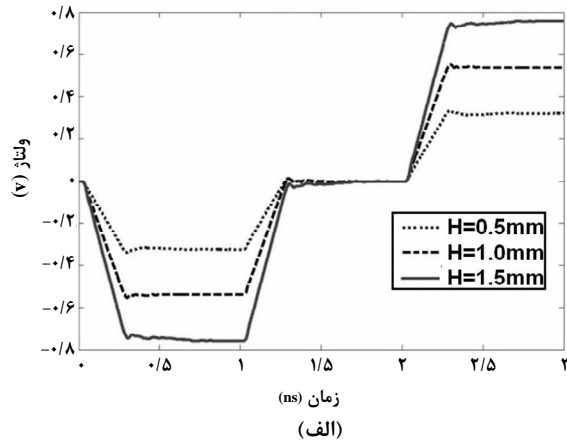


(ب)



(ج)

شکل ۱. الف) نحوه برخورد موج تخت به برد و نمای ریزنوار  
ب) شکل موج پالس تابشی. ج) نتایج آزمون و شبیه‌سازی  
برای انتهای ریزنوار



شکل ۳. (الف) اثر تغییر ضخامت برد مدار چاپی در القای ولتاژ بر روی آن  
(ب) اثر تغییر ثابت دی الکتریک برد مدار چاپی

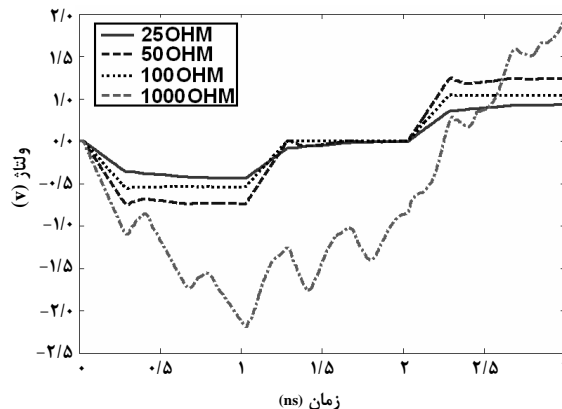
### ۳-۴. اثر بارگذاری

بر خلاف دیگر مشخصات بردها نظیر طول و عرض خطوط هادی و ضخامت برد نمی‌توان بارگذاری خطوط هادی را مستقل از تابع عملکرد برد تغییر داد، زیرا قطعاتی که برای دستیابی به تابع عملکرد برد استفاده شده‌اند، میزان بارگذاری ریزنوارها را تعیین می‌کنند. بنابراین نباید انتظار داشت از نتایج بررسی اثر بارگذاری قطعه، مستقیماً در طراحی برد و به منظور کاهش آسیب‌پذیری آن استفاده کرد. شکل (۴) اثر بارگذاری ریزنوار را با چهار مقاومت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ اهم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با بزرگ‌تر شدن اندازه مقاومت بار، شکل موج ولتاژ القا شده نسبت به شکل موج تابشی تغییرات عمده‌ای خواهد داشت.

شکل ۲. (الف) شکل موج پالس تابیده شده به برد (ب) شکل موج القا شده در انتهای ریزنوار با سه طول مختلف (ج) نتایج برای دو عرض متفاوت از ریزنوار

گردید. برد مدار چاپی، خطی ضخامت آن  $d=1\text{mm}$  و  $\epsilon_r = 4/3$  بوده است. عرض ریزنوار  $W=1/\Delta\text{mm}$  و ابعاد سلول واحد برای شبیه سازی  $\Delta x = \Delta y = 1\text{mm}$  و  $\Delta z = 0.5\text{mm}$  در نظر گرفته شد. در هر حالت برای شبیه سازی باید کار در دو مرحله انجام پذیرد. در مرحله اول با حذف خازن و اتصال کوتاه کردن القاگر و با اجرای ۱۰۰۰۰ پله زمانی ( $\Delta t=1/25\text{ps}$ )، مقادیر بایاس DC به عنوان شرایط اولیه برای محاسبه حالت گذرا مشخص می گردد. آنگاه با قرار دادن خازن و القاگر و با اجرای مجدد شبیه سازی در تعداد پله های لازم ( $\Delta t=1/25\text{ps}$ ) عملکرد مدار پس از اعمال پالس تحلیل می شود.

برای بررسی نحوه تأثیر آرایش برد مدار چاپی در القای موج الکترومغناطیسی بر روی ترانزیستور، نتایج شبیه سازی برای دو حالت مختلف از ریزنوارها و مدار ارائه می گردد. در آرایش اول فقط از یک ریزنوار به طول  $L=3\text{mm}$  مشابه با برد شکل (۱-الف) برای اتصال مقاومت  $120\text{k}\Omega$  به بیس استفاده کرده در حالی که ترانزیستور خاموش بوده و بقیه ارتباطات به صورت سیم بدون ضخامت (اتصال کوتاه مداری) در نظر گرفته شد. این شبیه سازی می تواند اثر تغییر بارگذاری یک ریزنوار با ترانزیستور دو قطبی را در مقایسه با بارگذاری با مقاومت اهمی شکل (۱-الف) به نمایش بگذارد. در آرایش دوم، برد واقعی مدار تقویت کننده شکل (۵) با ترانزیستور روشن برای شبیه سازی استفاده شد. نتایج این دو حالت در شکل های (۶) و (۷) دیده می شود.

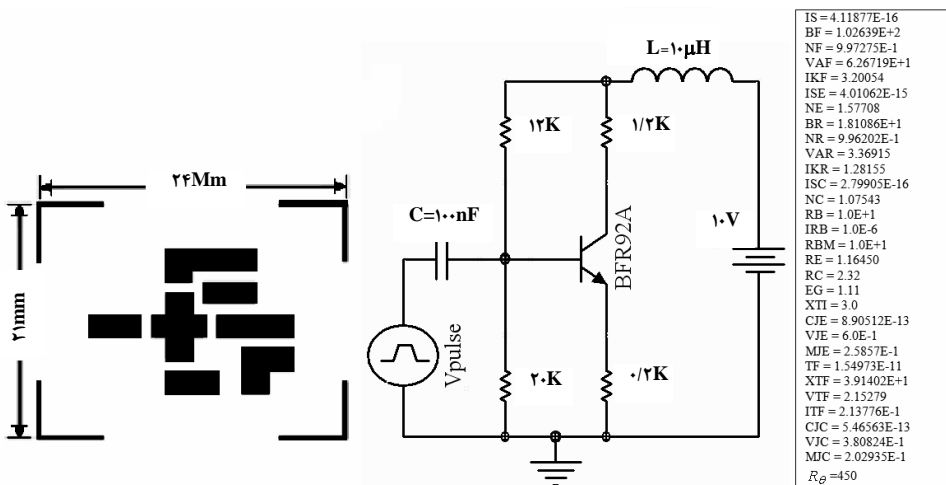


شکل ۴. اثر تغییر بارگذاری در ولتاژ القا شده بر روی ریزنوار

#### ۴. شبیه سازی و بررسی اثر امواج

##### الکترومغناطیسی بر مدارات ترانزیستوری

با استفاده از نتایج شبیه سازی های ارائه شده و مشخص شدن تأثیر هر یک از ویژگی های بردهای الکترونیکی و ریزنوارها اکنون از نرم افزار شبیه ساز FDTD استفاده کرده و اثر اعمال موج الکترومغناطیسی بر روی یک برد الکترونیکی ارائه می گردد. به این منظور پالس الکترومغناطیسی مطابق با شکل (۲-الف) با شدت میدان  $10\text{kv/m}$  در جهت Z و با زاویه  $\phi=45^\circ$  و  $\theta=90^\circ$  و پلاریزاسیون خطی، به تقویت کننده شکل (۵) تابیده شد. برای واقعی تر بودن مدار نسبت به مدارات عملی فرکانس بالا، برد با حداقل ابعاد طراحی شده و از قطعات SMD و ترانزیستور فرکانس بالای BFR92A با  $f_t = 5\text{GHz}$  استفاده



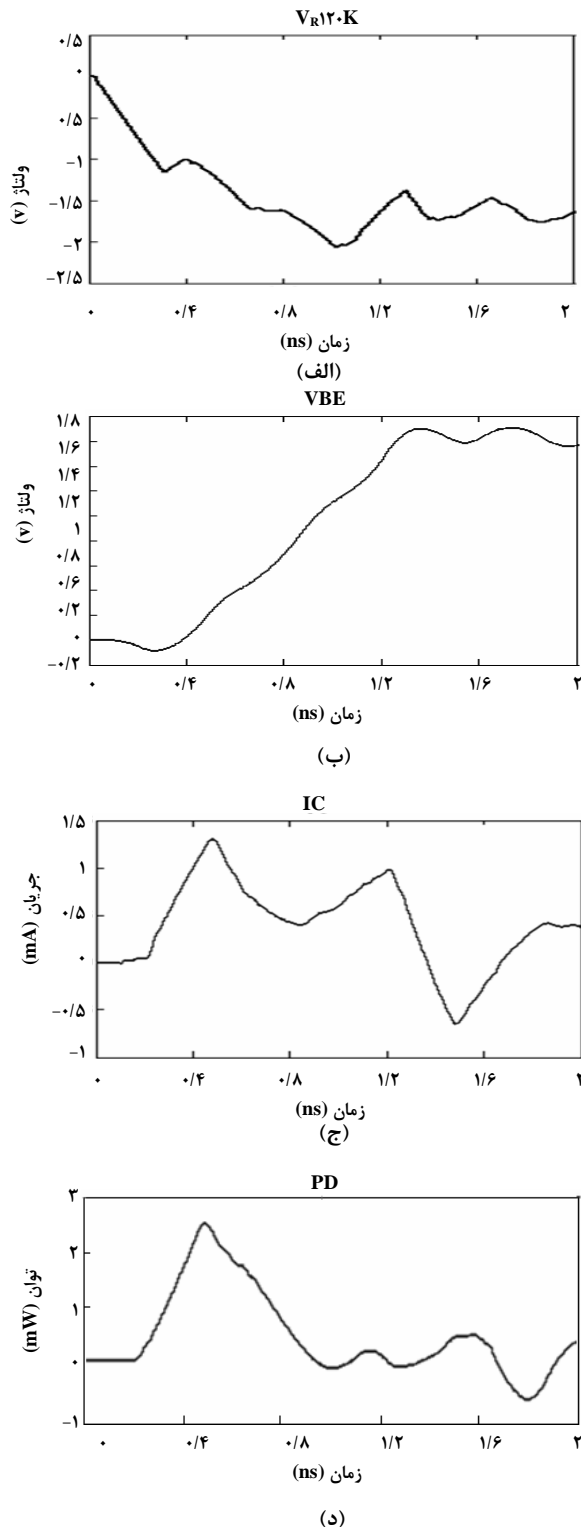
شکل ۵. مدار تقویت کننده ترانزیستوری و نقشه مدار چاپی آن

## ۵. تحلیل

مشاهده می‌شود که ولتاژ القا شده بر روی مقاومت بیس، یعنی  $V_{R120K}$  در شکل (۶-الف)، مشابه با ولتاژ القا شده بر روی مقاومت  $1000\Omega$  در شکل (۴) می‌باشد. با توجه به این که اگر مقاومت بار از مقاومت تطبیق یافته خیلی بزرگ‌تر شود، تغییر اندازه آن در میزان القای ولتاژ، اثر کمی دارد، این تشابه نشان می‌دهد که بر هم کنش موج و برد مدار چاپی از تابع تبدیل قطعه (در اینجا ترانزیستور) مهم‌تر و مؤثرتر است. از منحنی‌های (۶-ب) و (۶-ج) به دست می‌آید اگر چه ترانزیستور خاموش بوده لیکن در اثر موج تابشی جریان کلکتور برقرار گشته و بر روی بیس-امیتر نیز ولتاژ قابل توجهی افت نموده است. منحنی (۶-د) نشان‌دهنده توان القا شده بر روی ترانزیستور در حد چند میلی‌وات است. از مطالب ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که تغییر توان مصرفی برای حالت روشن بودن ترانزیستور نیز در همین حد خواهد بود. قابل ذکر است که در نقاط کار و شرایط خاص ممکن است این مقدار توان موجب آسیب به ترانزیستور شود. نتایج شبیه‌سازی در حالت روشن بودن ترانزیستور که در منحنی‌های شکل (۷) آمده است نیز این موضوع را نشان می‌دهد که موج الکترومغناطیسی می‌تواند وضعیت مدار را عوض کند. مطابق این نمودارها، در اثر القای موج، جریان کلکتور مطابق با شکل (۷-الف) کاهش یافته و نهایتاً به صفر میل کرده در حالی که ولتاژ بیس-امیتر بر اساس شکل (۷-ب) نزدیک ۲- ولت شده است. تغییر حالت ترانزیستور از خاموش به روشن و بالعکس بیانگر تغییر در بیت‌های صفر و یک ذخیره شده و در نتیجه، از دست رفتن اطلاعات می‌باشد. به این ترتیب یکی از آسیب‌های جدی امواج پر قدرت الکترومغناطیسی نشان داده و تأیید شده است.

## ۶. جمع‌بندی

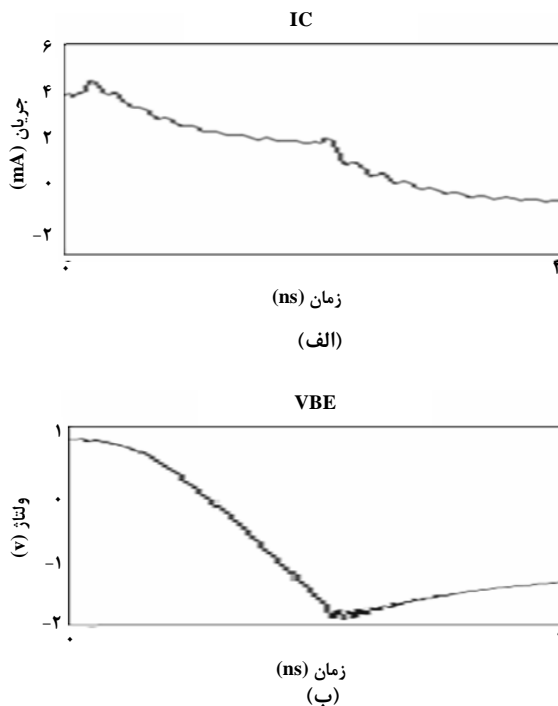
در این مقاله با طراحی نرم‌افزار شبیه‌ساز سه بعدی FDTD و توسعه آن به صورتی که امکان شبیه‌سازی اثر امواج تابشی بر روی مدارات ترانزیستوری فراهم گردد، ابتدا تأثیر مشخصات فیزیکی ریزنوارها و بردهای مدار چاپی در القای موج بر روی آن‌ها ارائه گردید. آن‌گاه با شبیه‌سازی نحوه القای موج بر روی مدار ترانزیستوری با تغییر وضعیت خطوط هادی برد، اثر امواج الکترومغناطیسی پر قدرت در تغییر حالت ترانزیستور در مدار روشن گردید. مشخص شد که امواج الکترومغناطیسی به چه



شکل ۶. اثر موج تابشی در القا بر روی اجزای مدار ترانزیستوری شامل یک ریزنوار و در حالت ترانزیستور خاموش (الف) ولتاژ مقاومت بیس  $V_{R120K}$  (ب) ولتاژ بیس-امیتر (ج) جریان کلکتور (د) توان القا شده

### ۷. مراجع

- [1] Granastein, V. L. "Annual Performance Report on Effect of High Power Microwaves and Chaos in 21st Century Analog and Digital Electronics" ; Biose State University, Reporting Period: 1, 2003 to August 2004.
- [2] Voldman S. H. "The State of the Art of Electrostatic Discharge Protection: Physics, Technology, Circuits, Design, Simulation, and Scaling"; IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34(9), September.
- [3] Sennemann, F.; Bohl, J. "Susceptibility and Vulnerability of Semiconductor Components and Circuits Against HPM"; Diehl Foundation & Co., Fischbachstr. 16, D-90552 Rothenbach.
- [4] Wang, Y.; Gope, D.; Gandhyala, V.; Schi, C. J. R. "Generalized Kirchiff's Current and Voltage Law Formulation for Coupled Circuit-Electromagnetic Simulation with Surface Integral Equations"; IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 52(7): 1673-1682, July 2004.
- [5] Golestani-Rad L.; Hamidifar S.; Rashed-Mohassel J. "Rigorous Investigation of Induced Fields on Different Parts of a Typical PCB Exposed to External Radiation"; The 23rd Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetic (ACES 2007) March 19-23, 2007, Verona ITALY, pp. 1469-1474.
- [6] Bayram Y. "Hybrid Methods for Mixed Signal Circuits Subject to ON&OFF Board Electromagnetic Interference"; PhD. Thesis, The Ohio State University, 2006.
- [7] Kung F.; Chuah H. T. "A Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Software for Simulation of Printed Circuit Board (PCB) Assembly"; Progress in Electromagnetic Research, 2005, 50, 299-335.
- [8] Umashankar, K. R.; Taflov A. "A Novel Method to Analyze Electromagnetic Scattering of Complex"; IEEE Trans. Electromagn.Comp. 1982, 24, 397-405.
- [9] Taflov A.; Haghness S. C. "Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time-Domain Method"; Norwood, 2005.
- [10] Berenger A. P. "A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves"; Journal of Computational Physics 1994, 114, 185-200.
- [11] Fang J.; Wu Z. "Generalized Perfectly Matched Layer for the Absorption of Propagating and Evanescent Waves in Lossless and Lossy Media"; IEEE Trans. on Microwave Theory And Technique, 1996, 44(12), December.
- [12] PSPICE, Reference Guide, 1985-2000 CADANCE Design System.
- [13] Kung F.; Chuah H. T. "Modeling of Bipolar Junction Transistor in FDTD Simulation of Printed Circuit Board"; Progress in Electromagnetic research, 2002, 36, 179-192.
- [14] Sonnemann F. "Experimental and Analysis on PCB Coupling in Non Uniform field"; Advances in Radio Science, 2004, 83-86.



شکل ۷. اثر موج تابشی در القا بر روی مدار ترانزیستوری با استفاده از برد واقعی مدار شکل (د) و در حالت ترانزیستور روشن (الف) جریان کلکتور (ب) ولتاژ بیس - امیتر

شکلی بر روی مدارات ترانزیستوری توان الکتریکی القا کرده و می‌توانند ترانزیستور را از حالت خاموش به روشن و بالعکس تغییر وضعیت دهند. با توجه به پرهزینه بودن و مشکلات زیادی که برای انجام عملی این نوع آزمایش‌ها وجود دارد، به نظر می‌رسد باید به استفاده از روش‌های معتبر شبیه‌سازی برای ارزیابی دقیق‌تر تهدیدات الکترومغناطیسی در روش‌های نوین پدافندی بیشتر توجه کرد.