# آزمایش و شبیهسازی سهبعدی تأثیر مشخصات موج تابشی بر مدارهای الکترونیکی به روشFDTD

احمدرضا امين'، عليرضا صالحي'، محمدحسين قزل اياغ"\*، يعقوب قانع قره باغ ً

۱- دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
 ۲- استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
 ۳- استادیار دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه امام حسین (ع)
 ۶- مربی مرکز تحقیقات فجر، دانشگاه امام حسین (ع)

\*تهران، صندوق پستی ۱۳۵۵–۱۹۳۱

#### ghezel@gmail.com

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۸، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۹)

چكیده – امواج الكترومغناطیسی در برخورد با بردهای الكترونیكی، جریان و ولتاژ در مدارها القا میكنند. اندازه میدان كوپل شده، به خصوصیات جبهه موج و برد الكترونیكی بستگی دارد. در این مقاله با حل معادلات ماكسول به روش FDTD<sup>4</sup> و شبیهسازی سهبعدی از شرایط مرزی لایههای كاملا منطبق<sup>۲</sup> و روش TF/SF<sup>7</sup>، برای شبیهسازی انتشار موج در برد و محیط و بررسی تأثیر مشخصات موج تابشی در القا بر روی خطوط میكرواستریپ برد مدار چاپی استفاده شده است. سپس با تبدیل روابط الكتریكی به روابط متناظر الكترومغناطیسی در مدل گامل – پون<sup>2</sup> ترانزیستور دو قطبی، تحلیل عملكرد ترانزیستور با روابط میدانی انجام شده است. مقایسه نتایج آزمایشها و شبیهسازیها نشان میدهد كه برای تحلیل اثر امواج الكترومغناطیسی بر مدارهای الكترونیكی میتوان از مدلهای الكترونیكی قطعات فعال در شبیهسازی به روش FDTG استفاده كرد.

كليدواژ گان: FDTD، برهم كنش موج و مدار ، ترانزيستور دو قطبي، مدل گامل-پون.

۱ – مقدمه
برای تحلیل اثر انتشار امواج در برهم کنش با بردهای
الکترونیکی باید از شبیهسازهایی استفاده شود که امکان حل

1. Finite-Difference Time-Domain

2. Generalized Perfectly Matched Layers

3. Total Field/ Scattered Field

معادلات میدانی را داشته و علاوه بر آن بتوانند مدلهای مداری یا فیزیکی قطعات الکترونیکی را به کار گیرند[۱]. روشهای شبیهسازی در این حوزه از یک نگاه به دو دسته کلی میدانی و روشهای ترکیبی میدانی و مداری تقسیم میشوند. به دلیل پیچیدگیهای روشهای میدانی تلاش شده تا از تبدیل معادلات و روابط الکترومغناطیسی به روابط و

<sup>4.</sup> Gummel-Poon

احمدرضا امين و همكاران

ساختارهای متناظر مداری و سپس حل شبکه با نرمافزارهای شبیه ساز مداری و همچنین ترکیب روش ممان و MNA با حل خطی ساختارهای مداری و الکترومغناطیسی استفاده شود [۲] و [۳]. به منظور تحلیل اثر تابش امواج بر کابل ها و در برهمکنش با ساختارهای اطراف آن، ترکیب روش عددی برای تحلیل ساختارهای محیط و روش تئوری خطوط انتقال چند هادی ارائه شده است [٤] و [٥]. در روش های میدانی استفاده از پارامترهای S و تحلیل در حوزه فرکانس علاوه بر دقت خوب و قابل قبول، پیچیدگی زیادی را تحمیل نمیکند [٦] و [۷]، اما استخراج پارامترهای S و وابستگی آنها ب فرکانس محدودیتی است که با آن روبه رو می شویم.

برای دستیابی به حداکثر دقت در تحلیل نحوه انتشار و برهمکنش موج و محیط، از حل عددی معادلات ماکسول در حوزه زمان با روشهای FDTD و TDIE<sup>4</sup> استفاده شده است. بهکارگیری این روشها مستلزم به کارگیری پردازندههایی قدرتمند و حافظه زیاد بوده و زمان حل معادلات آن در کامپیوتر نیز طولانی است. لازم است ذکر شود که اعمال این روشها برای ساختارهای بزرگ و تعداد سلول زیاد، محدودیت داشته و وارد کردن معادلات

مداری، احتمال ناپایداری را افزایش میدهد [۸] و [۹] . در این مقاله با توجه به گستردگی طیف امواج الکترومغناطیسی و برای داشتن درکی بهتر از نحوه برهم کنش موج، برد و قطعه الکترونیکی، از شبیهسازی سهبعدی در حوزه زمان با برنامهنویسی به زبان فرترن و به روش FDTD استفاده شده است. به کارگیری شرایط مرزی لایههای کاملا منطبق و روش TF/SF امکان شبیهسازی انتشار موج در برد و محیط را فراهم ساخته و با استفاده از آن اثر تغییر مشخصات موج تابشی

در القا بر روی خط میکرواستریپ مطالعه و تحلیل شده است. سپس بهمنظور شبیهسازی اثر موج بر مدار ترانزیستوری، روابط الکتریکی برای المانهای فشرده خطی و همچنین در مدل گامل-پون ترانزیستور دو قطبی به روابط متناظر الکترومغناطیسی تبدیل شده است. برای محک زدن روشی که در شبیهسازی به کار گرفته شده، نتایج آزمایشهای عملی روی یک مدار تقویتکننده ترانزیستوری مبنای کار قرار داده شد. تحلیل و مقایسه نتایج آزمایش و شبیهسازیها نشان میدهد که با توسعه کار حاضر و وارد کردن مدل انواع ترانزیستور مانند MOS با روش ارائه شده یا وارد کردن مدلهای رفتاری انواع قطعات الکترونیکی می توان انتظار داشت که شبیهسازی Tota

۲- بررسی اثر تغییر مشخصات مـوج تابـشی

كارايي بيشتري داشته باشد.

# در القا بر روی خط میکرواستریپ

امواج الکترومغناطیسی در هنگام انتشار در محیط و در برهمکنش با بردهای مدار چاپی، سبب القای ولتاژ و جریان در اجزای مدار میشوند. خطوط میکرواستریپ و کانالهای ارتباطی بردها نقش بسیار مهمی در تعیین مقدار میدان کوپل شده دارند. ازاینرو بررسی رفتار خط میکرواستریپ در برابر میدان تشعشعی خارجی، گامی اساسی و بنیادی در شبیهسازیهای EMI<sup>4</sup> و بررسی اثر امواج الکترومغناطیسی بوده و میتواند محک خوبی برای ارزیابی صحت شبیهسازی های میدانی و پایهای برای شبیهسازی های بعدی باشد. مطابق قانون همپاسخی، عبور جریان از خطوط هادی (میکرواستریپ) نیز باعث ایجاد میدان الکترومغناطیسی در اطراف آن میشود [۱۰]. شکل شده در اطراف آن را نشان میدهد.

<sup>1.</sup> Method of Moments

<sup>2.</sup> Modified Nodal Analysis

<sup>3.</sup> Multi-Conductor Transmission Line Theory

<sup>4.</sup> Time Domain Integral Equation

<sup>5.</sup> Electromagnetic Interference

٦٢



**شکل ۱** الف) ساختار سادهٔ خط میکرواستریپ بر روی بـرد مـدار چاپی ب) میدانهای القایی ایجاد شده در اطراف آن

برای بررسی تأثیر مشخصات موج تابشی در القـا بـر روی خط میکرواستریپ می توان دامنه، شیب، زمان صعود و نـزول، زاویه برخورد و پلاریزاسیون میدان تشعـشعی را تغییـر داده و در هر مورد ولتاژ القا شده را محاسبه کرد. با تئوری های موجود بەراحتى نمىتوان اثر تغيير ھمزمان اين ويژگىھا را در برد الکترونیکی تحلیل و مشاهده کرد. در حالی که شبیهسازی معتبر و مناسب می تواند جزئیاتی را که در نقاط مختلف خط و برد اتفاق میافتد به نمایش بگذارد. در این مقاله برای تحلیل اثر امواج الکترومغناطیسی بر روی خطوط برد مدار چاپی، معادلات ماکسول به روش مشتقات محدود در حوزه زمان (FDTD) حل شده و برای شبیهسازی اعمال موج تخت بر روی برد، از روش مناسب و قوی TF/SF استفاده شد[۱۱]. همچنین برای جذب بهتر میدانهای رسیده به مرزها، شرط مرزی GPML بهکار برده شد. شرایط مرزی در این روش انطباق خوبی با میدانهای برخوردی با زوایای مختلف، طيف فركانسي و پلاريزاسيون انتخاب شده دارد [١٢] و [١٣].

۲-۱- بررسی اثر تغییر دامنه موج تابشی با شیب ثابت در اولین شبیه سازی، اثر تغییر دامنه موج تابشی بررسی می شود. شکل (۲) الف نحوهٔ بر خورد موج تخت را به برد نشان می دهد. برد مدار چاپی شامل فقط یک خط

دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲/ تابستان ۱۳۸۹

میکرواستریپ به طول ۳cm و عرض ۱/omm بوده است. ضخامت برد برابر ۱mm و ضریب دیالکتریک آن برابر است. در ابتدا و انتهای خط مقاومت بار  $\varepsilon_r = \xi/V$ استاندارد  $\Omega$  ه.  $\Omega$  قرار گرفته است. مـوج تخـت بـا زاویـهٔ و  $\phi=\mathfrak{to}^\circ$  نسبت به برد انتشار یافتـه اسـت. دامنـه  $\theta=\mathfrak{e}$ میدان الکتریکی به صورت پالس مربعی در حوزهٔ زمان مطابق شكل (٢)-ب تغيير ميكند. شـيب پـالس، ثابـت و برابر okv/ns و دامنهٔ آن در سه حالت مختلف به ترتیب برابر ٥kv/m، ٥kv/m و ۲۰kv/m بوده است. ابعاد ساختار برابر ۲۵×۱٦۰×٤٦ میلیمتر و ابعاد سلول در هـر راستا برابر m<sup>-1</sup>•۱۰\*۲/۵ در نظر گرفته شد. تعداد کل گامهای زمانی برابر ۸۵۰۰ و زمان هر گام برابر ۶<sup>-۱۳</sup>۶ ٤ است. در روش TF/SF از چهار لایه پراکنـدگی ٔ اسـتفاده شده و از ۱۰ لایهٔ PML برای محدود سازی ساختار و جذب میدانهای رسیده به دیوارهای محیط استفاده شد. مشخصات PML به شرح زیر است:

 $σ_m$  = 1 / μτεν,  $S_m$  = 0 / μτιν, n = τ / ·

شکلهای (۲)-ج و (۲)-د اندازه و شکل موج ولتاژ القا شده در ابتدا و انتهای خط میکرواستریپ را با شبیهسازی FDTD نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود فقط در زمانهایی که موج تابشی دارای شیب بوده یعنی دامنه متغیر با زمان دارد، القای ولتاژ بر روی خط میکرواستریپ انجام می شود. از سوی دیگر حداکثر ولتاژی که هر شیب خاص موج تابشی می تواند بر روی خط میکرواستریپ القا کند، محدود بوده و به ازای شیب مشخص موج تابشی، افزایش دامنه از حدی معین، تأثیری بر افزایش اندازهٔ القای ولتاژ بر روی خط میکرواستریپ ندارد. از شبیهسازی انجام شده

<sup>1.</sup> Scattering

احمدرضا امین و همکاران

آزمایش و شبیهسازی سهبعدی تأثیر مشخصات ...

می توان به صورت همزمان برای مشاهده نحوه انتـشار مـوج در دیگر نقاط برد نیز استفاده کرد.



۲-۲- بررسی اثر زمان صعود و نزول موج تابشی در این مرحله تأثیر تغییر زمان صعود و نزول پالس ورودی برای مشاهده اثر شیب پالس تابشی بررسی می شود. برای این منظور زمان رشد پالس اعمالی بهترتیب برابر ۲۰۰۶، ۵۰۰۹۶، ورودی برای شبیهسازی برابر ۲۰۱۳ است. دامنهٔ میدان مشخصات مانند قبل است. شکل (۳) پالسهای تابیده شده و مشخصات مانند قبل است. شکل (۳) پالسهای تابیده شده و میکرواستریپ نشان میدهد. مشاهده میشود که هرچه زمان صعود و نزول کمتر یا شیب تندتر باشد، القای بیشتری انجام میشود که این با توجه به تغییرات بیشتر میدان ورودی در این حالتها قابل توجیه است. یادآوری میشود که تمامی این موارد برای خط میکرواستریپ شکل (۲) الف شبیهسازی شده است.



**شکل ۳** الف) شکل پالس های تابیده شده به برد در حوزه زمان ب) نتایج شبیهسازی برای ابتدای خط میکرواستریپ

#### دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲/ تابستان ۱۳۸۹



شکل ٤ شبیهسازی القای موج بر روی خط میکرواستریپ شکل(۲)- الف) اثر تغییر زاویه برخورد موج ب) اثر تغییر پلاریزاسیون در حالت ٥٠٩-٩ و ٩٠٠-٩. ج) اثر تغییر پلاریزاسیون در حالت ٩٠٥-٩ و ٩٠٠-٩. د) اثر تغییر پلاریزاسیون در حالت ٩٠٠-٩ و ٩٠٠-٩. ۲-۳- بررسی تأثیر زاویه برخـورد و پلاریزاسـیون موج تابشی

اکنون تأثیر زاویهٔ برخورد و پلاریزاسیون میدان تابشی را بر القا روى خط ميكرواستريب مطالعه ميكنيم. شكل (٤)-الف نتايج شبيهسازي را براي زاويهٔ برخورد φ در سه حالت ۰۰ ، ٤٥٥ و ۹۰۰ نشان ميدهد. شکل (٤)- ب و (٤)-ج تأثیر پلاریزاسیون،های عمودی، مایل و افقی را در میزان القا بر روی خط میکرواستریپ نشان می دهند. در اين شكلها يلاريزاسيون عمودي با ٧=٩٠° ، يلاريزاسيون مايل با ψ=٤٥° و يلاريز اسيون افقي با ψ=٤° مشخص شده است. از مقایسهٔ منحنی ها می توان نتیجه گرفت که بیشترین القای موج در حالتی است که φ=۹۰<sup>0</sup> باشد و بـا θ=۹۰<sup>°</sup> موج با پلاریزاسیون عمودی به برد تابیده شود. تحلیل منحنی های بهدست آمده نشان دهنده صحت شبیهسازی ها است. در نتیجه اگر بتوان نحوه القای موج را بر برد ترانزیستوری بهدرستی شبیهسازی کرد، از نتایج ارائه شده مي توان به عنوان اثر تغيير مشخصات موج تابشي بهره برداری کرد.

# ۳- مدلسازی المانهای فـشرده خطـی و فعال ترانزیستوری

برای شبیه ازی عملکرد بردهای الکترونیکی شامل المان های فشرده خطی یا فعال ترانزیستوری تحت تابش امواج الکترومغناطیسی، نخست باید روابط معادلات مؤلفه میدان الکتریکی (E<sup>n+1</sup><sub>Z(c,jc,kc</sub> برای این المان ها در شبیه سازی FDTD وارد شود. بنابراین از معادلات مؤلفهٔ میدان الکتریکی E برای المان های فشردهٔ خطی شامل سیم کوتاه، القاگر، خازن و منبع ولتاژ مقاومتی به شرح زیر در شبیه سازی FDTD استفاده شد[12].

است، بەمنظور انتخاب مدل مناسبی برای شبیهسازی عملكرد ترانزيستور دوقطبي بهعنوان نوعي المان فشردة غیرخطی، از مقایسه سرعت انتشار موج و سرعت ترانزيستور استفاده ميكنيم. سرعت انتشار موج در بردهای الکترونیکی نزدیک به سرعت نور و حدود rmm/ps/ است. اگر ابعاد قطعـه الکترونیکـی (ابعـاد تراشه) را در حد میکرومتر در نظر بگیریم، کمتر از هزارم ييكو ثانيه طول ميكشد كه موج الكترومغناطيسي طول قطعه الكترونيكي را طي كند. اين در حالي است که ترانزیستورهای بسیار سریع، بیشتر از چند ده پیکوثانیه تأخیر دارند. بنابراین موج طول قطعـه را طـی کرده و از آن عبور خواهد کرد بدون این که قطعه – به دلیل محدودیت های فیزیکی خود - فرصت عكس العمل ييدا كرده باشد. بنابراين مشخصه فيزيكي قطعه، تأثير قابل توجهي بر ميزان القا نداشته و عواملي مانند مشخصات موج و همچنین بارگذاری و امپـدانس مشخصه خط، تعيين كننده اندازه ولتاژ و جريان القا شده بر روی پایههای قطعات است [۲] و [۱۵]. بنابراین در شبیه سازی FDTD باید براساس مشخصات موج الکترومغناطیسی تابشی مانند فرکانس و زمان صعود و نزول یالس، مدل مناسب را برای قطعه الکترونیکی انتخاب کنیم. از سوی دیگر با توجه به اندازه توان القا شده بر روی پایـههـای قطعـهای ماننـد ترانزيستور كه تحت تابش امواج الكترومغناطيسي قـرار گرفته، در نظر گرفتن پدیدهٔ شبهاشباع، بیس توزیع شده و ترانزیستور PNP زیرلایه ضروری بهنظر نمـیرسـد. این مسائل ضرورت استفاده از مدل هایی مانند HICUM و MEXTRAM را نــــشان داده و ســـب انتخاب مدل گامل - یون برای ترانزیستور دو قطبی در این تحقیق شد. این مدل دقت قابل قبولی داشته و به





$$E_{z(i_{c},j_{c},k_{c})}^{n+i} = E_{z(i,j,k)}^{n} + \frac{\Delta t}{\varepsilon})\nabla \times H_{z(i,j,k)}^{n+\frac{1}{\gamma}} - \frac{\Delta z (\Delta t)^{\gamma}}{\varepsilon L \Delta x \Delta y} \sum_{m=i}^{n} E_{z(i,j,k)}^{m}$$

)



منبع ولتاژ مقاومتي



اکنون با ذکر این نکته که یکی از امتیازهای روش FDTD نسبت به سایر روشهای حوزه زمان، توانایی آن در تحلیل ساختارهای غیر خطی و متغیر با فرکانس

### دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲/ تابستان ۱۳۸۹

$$\nabla \times \vec{H}_{E(i_{e},j_{e},k_{e})}^{n+\cancel{\gamma}} = \frac{H_{z(i_{e},j_{e},k_{e})}^{n+\cancel{\gamma}} - H_{z(i_{e},j_{e},k_{e})}^{n+\cancel{\gamma}}}{\Delta y}$$
(V)  
$$-\frac{H_{y(i_{e},j_{e},k_{e})}^{n+\cancel{\gamma}} - H_{y(i_{e},j_{e},k_{e},)}^{n+\cancel{\gamma}}}{\Delta z}$$
(V)  
$$\nabla \times \vec{H}_{C(i_{c},j_{c},k_{c})}^{n+\cancel{\gamma}} = \frac{H_{z(i_{c},j_{c},k_{c})}^{n+\cancel{\gamma}} - H_{z(i_{c},j_{c},k_{c},k_{c})}^{n+\cancel{\gamma}}}{\Delta y}$$
(A)  
$$-\frac{H_{y(i_{c},j_{c},k_{c})}^{n+\cancel{\gamma}} - H_{y(i_{c},j_{c},k_{c},$$

$$B_{\gamma} = \frac{\Delta t \,\Delta x}{\epsilon \Delta y \,\Delta z} \left( \frac{\gamma}{\gamma} \frac{\partial I c s}{\partial V_{BC}} \bigg|_{V_{BC}^{n}} + \frac{C_{C}^{n}}{\Delta t} \right) + \gamma$$
(9)

$$C_{\gamma} = \frac{\Delta t N_{C}}{\varepsilon \Delta y \, \Delta z} I_{CS}^{n} - \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left( \nabla \times \vec{H}_{C(i_{c}, j_{c}, k_{c})}^{n + \gamma_{\tau}} \right) \tag{(1)}$$

$$E_{\gamma} = \frac{\Delta t \,\Delta x N_{C} N_{E}}{\gamma \epsilon \Delta y \,\Delta z} \left. \frac{\partial I_{CS}}{\partial V_{BE}} \right|_{V_{BE}^{*}} \tag{(11)}$$

$$B_{\gamma} = \frac{\Delta t \,\Delta x N_C N_E}{\gamma \varepsilon \Delta y \,\Delta z} \frac{\partial I_{ES}}{\partial V_{BC}} \Big|_{V_{BC}^n} \tag{11}$$

$$C_{2} = \frac{\Delta t N_{E}}{\epsilon \Delta y \Delta z} I_{ES}^{n} - \frac{\Delta t}{\epsilon} \left( \nabla \times \vec{H}_{E(i_{e}, j_{e}, k_{e})}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$
(11°)

$$E_{\gamma} = \frac{\Delta t \,\Delta x}{\varepsilon \Delta y \,\Delta z} \left( \frac{1}{\gamma} \frac{\partial I_{ES}}{\partial V_{BE}} \bigg|_{V_{BE}^{n}} + \frac{C_{E}^{n}}{\Delta t} \right) + 1 \qquad (1 \, \varepsilon)$$

$$I_{ES} = I_{LE} + (1 + \frac{1}{\beta_F})I_{CC} - I_{EC}$$
(10)

$$I_{CS} = I_{LC} + (1 + \frac{1}{\beta_R})I_{EC} - I_{CC} \tag{17}$$

#### مجلهٔ علمی – پژوهشی مهندسی برق مدرس

تکرار حل عددی در هر گام زمانی نیاز ندارد. علاوه بر آن به کار بردن آن در FDTD ساده تر بوده و برای مدل سازی تعداد زیادی ترانزیستور مناسب است. در ADS و PSPICE و ADS نیز از این مدل استفاده می شود [۱۲] و [۱۷]. شکل (۵) جانمایی ترانزیستور دو قطبی را در شبیه سازی FDTD نشان می دهد.



شکل ٥ جانمایي ترانزیستور دوقطبي در شبیهسازي FDTD

برای شبیهسازی ترانزیستور دوقطبی روابط ولتاز-جریان در اتصال بیس- امیتر و اتصال بیس- کلکتور با دو بسط تیلور تقریب زده می شود. اگر از جملات با درجه بالاتر از دو صرفنظر شود، روابط متناظر الکترومغناطیسی برای ترانزیستور دوقطبی در شبیهسازی FDTD به شرح زیر بهدست می آید [۱۸].

$$E_{x(i_c,j_c,k_c)}^{n+1} = E_{x(i_c,j_c,k_c)}^{n} + \frac{C_{\chi}E_{\chi} - C_{\chi}E_{\chi}}{B_{\chi}E_{\chi} - B_{\chi}E_{\chi}} \qquad (\diamond)$$

$$E_{x(i_{e},j_{e},k_{e})}^{n+1} = E_{x(i_{e},j_{e},k_{e})}^{n} + \frac{B_{\chi}C_{\chi} - B_{\chi}C_{\chi}}{B_{\chi}E_{\chi} - B_{\chi}E_{\chi}}$$
(7)

احمدرضا امين و همكاران

#### آزمایش و شبیهسازی سهبعدی تأثیر مشخصات ...

برای قطعات دیگر نیز می توان با استفاده از مدل های معتبر و رایج و با رعایت موارد مطرح شده برای شبیهسازی، مدل مناسبی را انتخاب کرد. به این ترتیب در متن برنامه شبیهسازی FDTD مدل الکترونیکی هر قطعه وارد خواهد شد.

٤− آزمایش و شبیهسازی برای بررسی تأثیر امـواج الکترومغناطیسی بر روی مدارهای ترانزیستوری ٤-۱- شبیهسازی و آزمون هدایتی بـرای بررسـی اثر اغتشاش الکترومغناطیسی

قبل از بررسی اثر تابش موج خارجی بر مدار ترانزیستوری و بهمنظور داشتن امکانی برای ارزیابی صحت شبیهسازیها، نخست آزمایش و شبیهسازی اثر اعمال پالس اغتشاش (بهصورت مستقیم نه تابشی) به ورودی مدار تقویتکننده ترانزیستوری شکل (٦) ارائه میشود. برای واقعی تر بودن مدار نسبت به مدارهای عملی فرکانس بالا، برد با حداقل ابعاد طراحی شده و از قطعات SMD و ترانزیستور فرکانس بالای BFR92A استفاده شد. برد مدار چاپی خطی، دارای ضخامت BFR92A و r = 2/3 است. ابعاد سلول واحد نرای شبیهسازی برابر Mm =  $\Delta x = \Delta x = 0$  و Mm و مدار در نظر گرفته شد.



شبیهسازی در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول با حذف خازن و اتصال کوتاه کردن القاگر و با اجرای ۱۰۰۰۰ گام زمانی (Δt=1/۲٥ps) انتقال به وضعیت پایدار در حالت DC تحلیل شد. سپس با قرار دادن خازن و القاگر و با اجرای مجدد شبیه سازی در تعداد گام زمانی لازم (Δt=1/۲٥ps) عملکرد مدار پس از اعمال پالس تحلیل شده است. شکل (۷) نشاندهنده پاسخ حاصل از شبیهسازی FDTD و نتایج حاصل از آزمایش و شبیهسازی ADS بوده و تطابق خوب آنها در شکل مشاهده می شود.



**شکل ۷** منحنی های Vb و Ve وقتی اغتشاش از مسیر ورودی بـه مدار ترانزیستوری اعمال شده است.

٤-۲- شبیه سازی و بررسی تابش امواج الکترومغناطیسی بر مدار ترانزیستوری اکنون می توانیم اثر موج الکترومغناطیسی را بر برد و تقویت کنندهٔ ترانزیستوری بررسی و شبیه سازی کنیم. به

#### مجلهٔ علمی – پژوهشی مهندسی برق مدرس

این منظور پالس الکترومغناطیسی شکل(۲)-ب با دامنه میدان الکتریکی برابر ۱۰KV/m در جهت z با زاویه  $0 = 9 e^{0} = 9 e$  پلاریزاسیون خطی به برد الکترونیکی تابیده شد. ترانزیستور BFR92A از نوع فرکانس بالا با BFR92 مید. ترانزیستور BFR92A از نوع تأثیر آرایش برد مدار چاپی بر القای موج الکترومغناطیسی ترانزیستور، نتایج شبیهسازی برای سه شکل مختلف خطوط میکرواستریپ و مدار ارئه می شود.

در آرایش اول، برد شامل فقط یک خط میکرواستریپ به طول L=۳mm و بدون ترانزیستور مشابه برد شکل (۲)-الف بوده و با تغییر مقاومت دو سر آن در چهار حالت شبیهسازی انجام شده است. نتایج در شکل (۸) آورده شده است.



شکل ۸ ولتاژ القا شده بر روی مقاومت R0 بر اثر پالس تابـشی در چهار حالت بارگذاری. برد مدار چاپی بدون ترانزیـستور و فقط شامل یک خط میکرواستریپ بوده است.

در آرایش دوم، از همین خط میکرواستریپ فقط برای اتصال ورودی به بیس ترانزیستور استفاده شده و در حالی که ترانزیستور خاموش بوده بقیه ارتباطها بـه

د	مـدارى)	كوتاه	(اتصال	ضخامت	بدون	سيم	رت	صو
					.د.	ىتە ش	گر ف	نظر

دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲/ تابستان ۱۳۸۹

در آرایش سوم، از برد واقعی مدار تقویـت کننـده شـکل
(٦) با ترانزیستور روشن برای شبیهسازی استفاده شـد. نتـایج
این دو حالت در شکلهای (۹) و (۱۰) دیده میشود.

٥- تحليل

همان طور که در شکل (۸) دیده می شود، تغییر بارگذاری دو سر خط بر میزان القا ولتـاژ کـاملاً مـؤثر است. نکته قابل توجه این است که اگر به بـرد مـذکور در همین شرایط، ترانزیستوری اضافه شود که در حالت خاموش است، ولتاژ القا شده بر روی مقاومت بیس، یعنی  $V_{R120K}$  در شکل (۹)، مـشابه مقاومـت ۱K $\Omega$  در شکل (۸) است. با توجه به این که اگر مقاومت بار از مقاومت تطبيق يافته بسيار بزرگتر شود، تغييـر انـدازهٔ آن بر میزان القای ولتاژ اثر کمی دارد، این تشابه نـشان میدهد که برهم کنش موج و برد مدار چاپی از تـابع تبدیل قطعه (در اینجا ترانزیـستور) مهـم تـر و مـؤثرتر است. با این که ترانزیستور خاموش بوده، بر روی بیس امیتر ولتاژ قابل توجهی افت کرده و جریان کلکتور نیـز برقرار شده است. منحنی های شکل (۱۰) این موضوع را نشان می دهد که مـوج الکترومغناطیـسی مـیتوانـد وضعیت مدار را تغییر دهد. مطابق این نمودارها، ترانزیستور روشن بر اثر موج خاموش شده و علاوه بـر منفی شدن ولتاژ بیس امیتر، جریان کلکتـور نیـز منفـی شده است. از دست رفتن اطلاعات یکی دیگر از آسیبهای جدی امواج الکترومغناطیسی است که در اين حالت رخ داده.



مدار چاپی واقعی شکل(٤) و ترانزیـستور روشــن الـف) ولتاژ بیس امیتر ب) جریان کلکتور

# ٦- جمع بندي

برای بررسی دقیق اثر امواج الکترومغناطیسی بر بردها و قطعات الکترونیکی میتوان از شبیهسازی در حوزهٔ زمان به روش TDTD به صورت سهبعدی استفاده کرد. در این مقاله نخست اثر تغییر مشخصات موج تابشی بر القا بر روی خط میکرواستریپ به روش TF/SF و با استفاده از روش TF/SF و شرایط مرزی LPMD شبیهسازی شد. سپس با ارائه تحلیلی دربارهٔ نحوهٔ انتخاب روشی مناسب برای شبیهسازی عملکرد ترانزیستور دوقطبی در روابط متناظر الکترومغناطیسی در شبیهسازی TDT وارد شد. مشاهده شد که امواج الکترومغناطیسی با القای ولتاژ و جریان در مدار میتوانند وضعیت ترانزیستور را تغییر



**شکل ۹** اندازهٔ القای حاصل از موج تابشی بـر روی اجـزای مـدار ترانزیستوری شامل یک خط میکرواستریپ و در حالـت ترانزیستور خاموش الف) ولتاژ مقاومت بـیس *V*<sub>R120K</sub> ب) ولتاژ بیس امیتر ج) جریان کلکتور

#### دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲/ تابستان ۱۳۸۹

- [3] G. Wollenbery and A. Gorisch. "Analysis of 3-D Interconnect Structures with PEEC Using spice," IEEE Trans. Electromagnetic. Compact., Vol(41), November 1999.
- [4] F. Sabath and H. Garbe, "Radiation Analysis of PCB Layout Using a Hybrid MOM-MTL Method," IEEE Tran. Electromag. Compat., Vol(45), May 2003.
- [5] Y. Bayram and J. L. Volakis, "A Generalized MOM-SPICE Iterative Technique for Field Coupling to Multi-Conductor Transmission lines in Presence of Complex Structures," IEEE Trans. Electromag. Compat., 47(2): 234-246, May 2005.
- [6] B. Anderson, J. E. Bracken, J. B. Manges,
  P. Guanghua and Z. Cendes. "Full- wave Analysis in SPICE via Model-order Reduction," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 52(9):2314-2320, September 2004.
- [7] B. J. Cooke, J. L. Prince and A.C. Cangellaris. "S-Parameter Analysis Multiconductor Integrated Circuits Interconnect Systems," IEEE Trans. Computer Aided Design, 11(3):353-360, May 1992.
- [8] I. Erdin, M. S. Nakhla and R. Achar,"Circuit Analysis of Electromagnetic and

مجلهٔ علمی – پژوهشی مهندسی برق مدرس

داده و در نتیجه سبب تغییر اطلاعات یا آسیب دیدن مدار شوند. کارایی شبیهسازی FDTD با مدلسازی ترانزیستورهای MOS و ICها با روش ارائه شده و همچنین استفاده از مدلهای رفتاری قطعات الکترونیکی در آن می تواند سبب توسعه به کارگیری ایس نوع شبیهسازیها گردد.

## ۷- قدردانی

از همکاری صمیمانه و مؤثر مدیران و کارشناسان محترم پژوهشگاه مخابرات و الکترونیک نصر، بهویژه برادران گرامی مهندس محمد حسین راهدان و مهندس حسن خادم کلان و همچنین مهندس مجتبی فریدونی سپاسگزاری و قدردانی میشود.

## ۸- منابع

- [1] R. G. Leventhal, L. Green and D. J. Carpenter, Semiconductor Modeling for Simulating Signal, Power, and Electromagnetic Integrity, Springer, New York, 2006.
- [2] Y. Wang, D. Gope, V. Gandhyala and C. J. R. Schi, "Generalized Kirchoff'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.

#### احمدرضا امين و همكاران

- [14] F. Kung, and H. T. Chuah, "A Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Software for Simulation of Printed Circuit Board (PCB) Assembly," Progress in Electromagnetic Research, PIER 50, 299-335, 2005.
- [15] Y. Bayram, Hybrid Methods for Mixed Signal Circuits Subject to ON&OFF Board Electromagnetic Interference, PhD. Thesis, The Ohio State University, 2006.
- [16] P. Antogentti, G. Massobrio, Semiconductor Device Modeling with SPICE, 2nd edition, McGraw-Hill, 1993.
- [17] PSPICE, Reference Guide, 1985-2000CADANCE Design System.
- [18] F. Kung, and H. T. Chuah, "Modeling of Bipolar Junction Transistor in FDTD Simulation of Printed Circuit Board," Progress in Electromagnetic Research, PIER 36, 179-192, 2002.

آزمایش و شبیهسازی سهبعدی تأثیر مشخصات ...

Field Coupling Effects for Networks with Embedded Full-wave Models," IEEE Trans. Electromag. Compact. , 42(4): 449-460, November 2000.

- [9] K. Aygun, B. C. Fischer, J. Meng, B. Shanker and E. Michielssen, "A Fast Hybrid Field-Circuit Simulator for Transient Microwave Analysis of Circuits." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 52(2):573-583, February 2004.
- [10] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill Book Company, 1961.
- [11] K. R. Umashankar and A. Taflov, "A Novel Method to Analyze Electromagnetic Scattering of Complex," IEEE Trans. Electromag. Comp, Vol, 24, 1982, PP397-405.
- [12] J. Fang, and Z. Wu, "Generalized Perfectly Matched Layer for the Absorption of Propagating and Evanescent Waves in Lossless and Lossy Media," IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique, Vol, 44, No.12, December 1996.
- [13] A. Taflov, and S.C. Haghness, Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time-Domain Method, Norwood, 2005.