

Examination and Simulation of the Electromagnetic Pulse Impacts on a Variety of Sensors

M. R. Najafi, H. fayazi, A. bali Lashak*

* Assistant Professor, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 24/05/2021; Accepted: 07/08/2021)

Abstract

Sensors are among the most vulnerable electronic devices when encountering high-power electromagnetic waves such as (HPEM), (UWB), and (EMP). To assess the damage caused by electromagnetic attacks, a typical sensor model is proposed and simulated by the finite element software (COMSOL MULTYPHYSIC) and the vulnerability is studied. The results show the destruction of electronic components in the sensor during attacks. When the frequency of the pulse carrier is similar to the operating frequency of the target, more destruction is observed. Parameters such as the angle of radiation or the proximity of the elements used in the sensor can also increase or decrease the degradability of the target. In this paper, the factors affecting the vulnerability of components during the emission of high-power electromagnetic waves are investigated and finally, the extent of damage is shown.

Keywords: Component Vulnerability, Electromagnetic Waves, Electrical Malfunction.

* Corresponding author E-mail: A_bali@mut.ac.ir

تحلیل و شبیه‌سازی تأثیرات پالس‌های الکترومغناطیسی بر روی انواع حسگرها

محمد رضا نجفی^۱، حسین فیاضی^۲، عارف بالی لاشک^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، ۲و۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵)

چکیده

حسگرها یکی از آسیب‌پذیرترین ادوات الکترونیکی در مقابل امواج پرقدرت الکترومغناطیسی هستند. برای به‌دست آوردن میزان تخریب حاصل شده در نتیجه حملات الکترومغناطیسی به وسیله نرم‌افزار المان محدود، یک نمونه حسگر شبیه‌سازی و میزان آسیب‌پذیری آن بررسی شده است. نتایج نشان دهنده تخریب قطعات الکترونیکی موجود در حسگر در زمان حملات صورت گرفته است. این تخریب به ویژه در زمانی که فرکانس حامل پالس مشابه فرکانس کاری هدف باشد بسیار بیشتر خواهد بود. پارامترهای همچون زاویه تابشی و یا نزدیکی المان‌های به‌کار گرفته شده در حسگر نیز می‌تواند بر افزایش و یا کاهش تخریب پذیری هدف تأثیرگذار باشد. در این مقاله به بررسی عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری قطعات در زمان گسیل شدن امواج الکترومغناطیسی پرقدرت پرداخته خواهد شد و در نهایت میزان تخریب نشان داده خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری قطعات، امواج الکترومغناطیسی، شکست الکتریکی

۱- مقدمه

و تحلیل تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر روی انواع حسگرها، شده است. برای این منظور تحلیل و بررسی تأثیرات امواج الکترومغناطیسی بر روی هدف از طریق (القاء داخلی- خارجی) و تأثیر هر کدام از این روش‌ها صورت گرفته است. همچنین میدان الکتریکی ایجاد شده بر روی هدف در فواصل مختلف محاسبه خواهد شد.

برای تحلیل اولیه میزان اثرگذاری امواج بر روی سامانه، چهار سطح زیر تعیین می‌شود.

تنزل در عملکرد؛

- تأخیر در عملکرد؛
- اختلال در عملکرد؛
- تخریب کلی.

شرایط متعدد از قبیل حساسیت قطعه الکترونیکی، دامنه موج و همچنین مقدار زمان تحمیلی موج به سامانه، باعث ایجاد هر کدام از چهار سطح ذکر شده به سامانه خواهد شد. مصرف بیش از حد انرژی، افزایش تأخیر در عملکرد و افزایش هارمونیک و اعوجاج در پردازش در سطح دو اتفاق خواهد افتاد. در سطح سوم، عملکرد عادی سامانه مختل خواهد شد و به احتمال زیاد راه‌اندازی مجدد و یا خاموشی موقت لازم باشد، به این سطح نرخ شکست (BFR^2) گفته می‌شود. در سطح چهارم، میزان دامنه به قدری زیاد است که باعث تخریب کلی سامانه خواهد شد و احیای سامانه با تعویض قطعه امکان‌پذیر خواهد بود. دمای قطعه مورد

امروزه تحلیل کردن مقدار تأثیرات امواج الکترومغناطیسی مانند امواج پرقدرت^۱ UWB-HPM و همچنین امواج ناشی از انفجارهای هسته‌ای بر روی سامانه‌های الکترونیکی امری پیچیده و مشکل است. اگر یک برد الکترونیکی تحت تأثیر امواج الکترومغناطیسی متخاصم و پرقدرت قرار گیرد، به‌طور قطع کارکرد آن تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. حسگرها (مغناطیسی، مرئی، مادون قرمز و...) دارای کاربردهای وسیعی در صنعت، شناسایی و همچنین افزایش رفاه در کاربردهای مسکونی می‌باشند [۱] با استفاده از این حسگرها، میزان هزینه‌ها کاهش و بازده افزایش یافته است. هر یک از این حسگرها شامل هزاران قطعات الکترونیکی بسیار کوچک می‌باشند که اشکال در کارکرد هر کدام از این قطعات باعث از کار افتادن کل سامانه خواهد شد. یکی از مهم‌ترین عوامل که باعث افزایش آسیب‌پذیری در اینگونه ادوات الکترونیکی می‌شود، امواج پرقدرت الکترومغناطیسی است. این امواج باعث ایجاد میدان‌های الکتریکی ناخواسته درون کابل‌های رابط و یا مدارات چاپی حسگر خواهند شد. پالس الکترومغناطیسی توان بالا (HPM) دارای پهنای باند بسیار باریک، زمان خیزش بسیار کوتاه و سطح توان بسیار بالا هستند. از این رو این امواج توانایی تخریب قطعات الکترونیکی استفاده شده در انواع حسگرها را خواهند داشت. در این مقاله سعی بر شبیه‌سازی

* نویسنده پاسخگو: Bali_@yahoo.com

¹ High Power Electro-Magnetics-Ultra Wide

² Breakdown Failure Rate

جدول (۱): شرایط مرزی

ویژگی	هدف	مقدار
Lumped Port	تحریک خط Microstrip	وابسته به انتخاب نوع ترانزیستور
Lumped Element	ایجاد مقاومت در انتهای خط	۵۰ اهم
Transition Boundary Condition	تلفات سطوح مسی	وابسته به میدان الکتریکی جذب شده
Perfect Electric Conductor 2	ورقه‌های مسی، بدون تلفات	.
Scattering Boundary Condition	تلفات مرزی حوزه فضا	وابسته به میدان الکتریکی انتشار یافته در فضا

شرایط مرزی گفته شده در جدول (۱) علاوه بر پیش‌فرض‌های موجود در نرم‌افزار بوده و به صورت دستی وارد شده است. همچنین ضریب نفوذ مغناطیسی آلیاژهای مختلف که در این شبیه‌سازی استفاده شده در جدول (۲) قرار داده شده است.

در جدول (۲) نیز مقدار نفوذپذیری المان‌های مورد استفاده در نرم‌افزار کامسول به همراه رسانایی حرارتی $k [W/(m \cdot K)]$ و ظرفیت حرارتی خاص $\rho [kg/m^3]$ آورده شده است. دانستن این موارد در شبیه‌سازی بسیار مهم است و بیان‌کننده خواص آن‌ها در مقابل حرارت ناشی از عبور جریان‌های مختلف است.

جدول (۲): ضریب نفوذ مواد مختلف مورد استفاده در نرم‌افزار کامسول

ماده	نفوذپذیری	$k [W/(m \cdot K)]$	$C_p [J/(kg \cdot K)]$
هوا	$1/2566375 \times 10^{-6}$	۰/۰۲۶	-
آلمینیوم	$1/256665 \times 10^{-6}$	۲۳۷	۸۸۷
مس	$1/256629 \times 10^{-6}$	۳۸۴،۱	۳۸۵
آهن	۰/۲۵	۳۵۹	۴۶۲
طلا	۰/۹۹	۳۷۱	۱۳۰
قلع	$1/26 \times 10^{-4}$	۲۳۱	۱۰۰

یکی دیگر از مهم‌ترین نکات که باید در این شبیه‌سازی رعایت شود تعریف فرمول‌های مختلف برای شارش گرما، تلفات الکترومغناطیسی در فضا است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_{PROD} = dQ_{current} \quad (1)$$

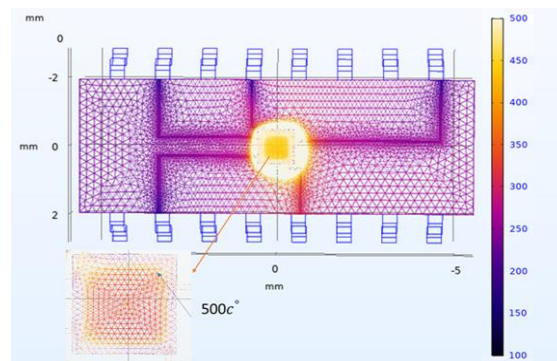
که در آن، $Q_{current}$ معرف چگالی توان است. همچنین معادله دیگر که از آن در شبیه‌سازی استفاده شده است:

نظر افزایش بسیار زیادی خواهد داشت و قابل اغماض نخواهد بود. میزان آسیب وارده بر اساس مواد مورد استفاده و میزان تحمل دمایی سامانه متغیر است. به این سطح نرخ تخریب (DFR^1) گفته می‌شود [۲]. ناگفته نماند که نمی‌توان به صورت کلی تخریب یا شکست را برای یک سامانه توصیف کرد چرا که یک سامانه دارای اجزای بسیار زیادی است و هر یک از این اجزاء دارای رفتارهای مختلف نسبت به امواج الکترومغناطیسی تحمیلی خواهند بود.

۲- اصول مدل‌سازی

در این مقاله برای تحلیل امواج الکترومغناطیسی و به دست آوردن خصوصیات قطعات در زمان قرار گرفتن در میدان الکتریکی، از نرم‌افزار کامسول^۲ استفاده شده است. این نرم‌افزار شامل دو ماژول بسیار قدرتمند برای تحلیل حالت الکترومغناطیسی (RF Module) و الکتریکی (AC/DC Module) است. همچنین ضریب نفوذ مغناطیسی آلیاژهای مختلف که در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته در جدول (۱) ارائه شده است.

برد مدار شکل (۱) از مواد FR4 ساخته شده است و الگوی مدار چاپی با یک لایه مسی مشخص می‌شود. برای به دست آوردن تلفات ناشی از رسانایی محدود در لایه مس هندسی نازک، از یک شرط مرزی انتقال استفاده می‌شود. ضخامت لایه رسانا روی ۳۰ میکرومتر تنظیم شده است. مقدار تابش بر حسب توزیع میدان نزدیک و همچنین تابش میدان دور محاسبه می‌شود. یک آنتن در فاصله ۱۰ متری از هدف وجود دارد که امواج الکترومغناطیسی تولید شده را به سمت هدف منتشر می‌کند. حوزه فضا تمام مواردی را که قبلاً ذکر شد دربر می‌گیرد و یک شرط مرزی پراکنده‌گی در مرزهای بیرونی حوزه فضا تعیین می‌شود. در اینجا فهرستی از تمام ویژگی‌های فیزیک (شرایط مرزی)، وجود دارد.



شکل (۱): میزان تجمع حرارتی ناشی از ازدیاد

جریان در ترانزیستور

¹ Destruction Failure Rate

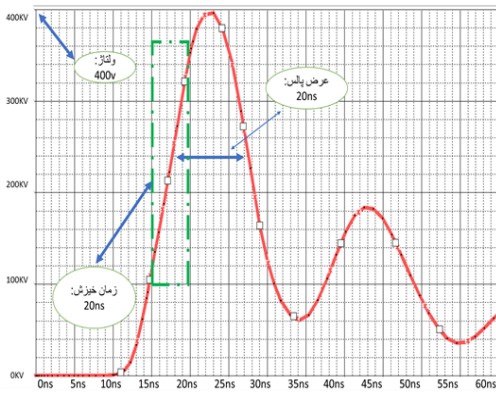
² Comsol Multiphysics

$$E_{(t)} = \begin{cases} E_0 \frac{t}{t_r} \sin(2\pi f t) \rightarrow 0 < t < t_r \\ E_0 \sin(2\pi f t) \rightarrow t_r < t < t_r + \tau \\ E_0 \left(\frac{\tau + t_r + t_f}{t_f} - \frac{t}{t_r} \right) \sin(2\pi f t) \rightarrow t_r + \tau < t < t_r + t_f + \tau \end{cases} \quad (3)$$

که در آن، E_0 میدان الکتریکی حداکثری، τ پهنای پالس، t_r ، t_f زمان نزول و زمان خیزش پالس و f_0 فرکانس حامل پالس است [۲].

شکل (۳) نشان دهنده شکل موج ورودی به آنتن برای تولید پالس الکترومغناطیسی است. مشخصات ولتاژ تولید شده توسط ژنراتور پالسی و تحویل آن به آنتن برای تولید پالس الکترومغناطیسی برای سه زاویه مختلف به یک شکل است و به قرار زیر است (مبنا در فاصله ۱۰ متری است).

- ولتاژ تحویلی به آنتن: ۴۰۰ کیلوولت؛
- زمان خیزش: ۵ نانوثانیه؛
- فرکانس: ۳۵۰ مگاهرتز؛
- عرض پالس: ۲۰ نانوثانیه.



شکل (۳): شکل موج تحویلی به آنتن برای تولید تک پالس الکترومغناطیسی توان بالا

همانگونه که از شکل استنباط می‌شود عرض پالس تحویلی ۲۰ نانوثانیه، زمان خیزش ۵ نانوثانیه و حداکثر ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت است. در ابتدا اینگونه فرض می‌شود که محل قرارگیری حسگر توسط مهاجم تشخیص داده شده است. چگالی توان ایجاد شده در فاصله d_2 به صورت معادله (۴) به دست خواهد آمد [۳]:

$$s = P_i G(\theta_i, \phi_i) \frac{1}{4\pi d_2^2} \quad (4)$$

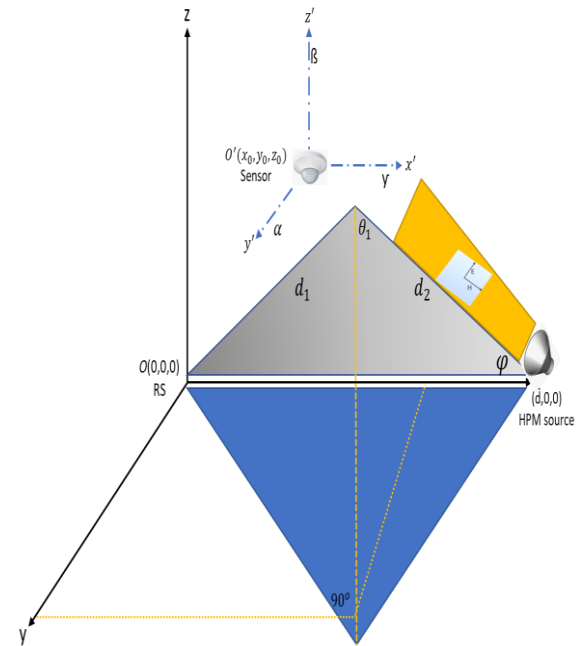
که در آن، P_i توان انتقال داده شده و $G(\theta_i, \phi_i)$ ضریب بهره آنتن است. با دانستن توان ورودی به آنتن که برابر با ۲ گیگاوات است، توان ایجاد شده بر روی حسگر در فواصل مختلف به وسیله معادله (۲) به دست خواهد آمد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \nabla^2 u = 0 \quad (2)$$

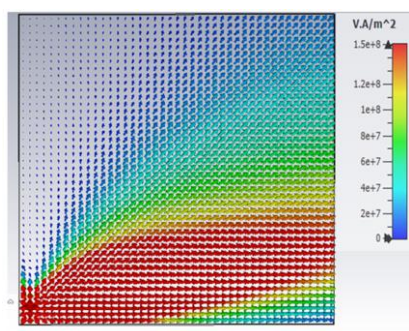
که در اینجا، a ضریب مثبتی است که به آن ضریب نفوذ گرمایی گفته می‌شود و میزان ضریب نفوذ هدایتی گرما را نشان می‌دهد. همچنین دیگر روابط استفاده شده در این شبیه‌سازی در ادامه مقاله شرح داده شده است.

۲- مدل تداخلات الکترومغناطیسی ناشی از تابش امواج بر روی حسگر

شکل (۲) نشان دهنده یک سامانه مختصات دکارتی است، در این شکل حسگر در مختصات $O'(x_0, y_0, z_0)$ قرار دارد. منبع امواج الکترومغناطیسی پر قدرت نیز در مختصات $(\vec{d}, 0, 0)$ قرار گرفته است. منبع در فاصله d_2 از حسگر قرار گرفته و زاویه آنتن نیز ϕ است. امواج پر قدرت الکترومغناطیسی دارای بازه فرکانسی بین ۲۵۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز و توان حداکثری چندین گیگاواتی هستند. همچنین موج می‌تواند به صورت پالسی و یا تکرار شونده باشد. عرض پالس می‌تواند در بازه نانو و یا پیکو تولید شود. نرخ تکرار این پالس نیز می‌تواند بین ۱۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز باشد. عملکرد تک-پالس تولیدی به صورت معادله (۱) است.

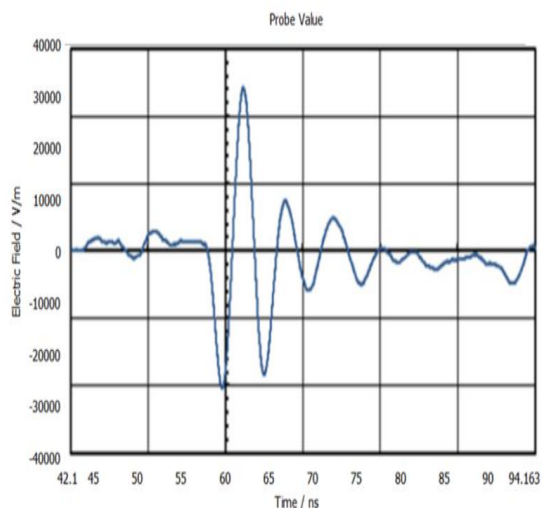


شکل (۲): طرح اولیه از شناسایی هدف توسط آنتن و تابش امواج پر قدرت الکترومغناطیسی



شکل (۵): توان شارش شده در فاصله ۱۰ متری از منبع

میدان الکتریکی ایجاد شده در حدود ۳۵ کیلوولت بر متر خواهد بود که این میدان برای تخریب طیف گسترده‌ای از قطعات الکترونیکی کافی خواهد بود. با توجه به این موضوع که میدان الکتریکی ۳۵ کیلوولت بر متر برای تخریب مورد نیاز است، میزان توان مورد نیاز که باید به ورودی آنتن داده شود محاسبه و در روابط جایگذاری شده است. به بیانی دیگر ابتدا میدان مورد نیاز برای تخریب به دست آمده است و پس از آن توان مورد نیاز برای ایجاد این میدان در فاصله مورد نظر با استفاده از روابط (۴-۷) به دست خواهد آمد. شکل (۶) نشان دهنده پالس الکترومغناطیسی با میدان ۳۵ Kv/m در فاصله ۱۰ متری از آنتن است.



شکل (۶): میدان الکتریکی ایجاد شده در حوزه زمانی و در فاصله ۱۰ متری از منبع

۲-۱- عملکرد قطعات الکترونیکی مختلف در زمان تحمیل امواج الکترومغناطیسی با دامنه مختلف بر روی آن‌ها

امواج الکترومغناطیسی می‌تواند بر روی تمام قطعات الکترومغناطیسی اثرگذاری کند [۴ و ۵]. شکل (۷) یک نمونه از سامانه دیجیتالی در زمان حمله الکترومغناطیسی بر روی آن را

$$s = \frac{1.5 \times 10^9 \times 20}{4\pi d_2^2} = \frac{3 \times 10^{10}}{4\pi d_2^2} \quad (5)$$

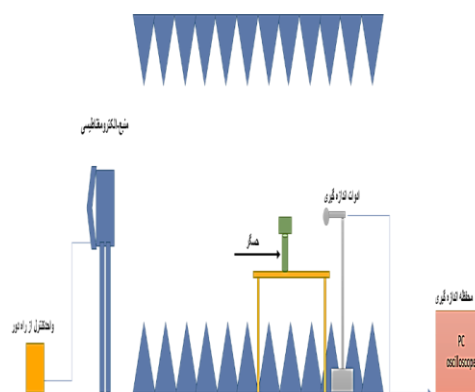
همچنین میدان الکتریکی نیز به وسیله معادله (۴) به دست خواهد آمد:

$$E_m = \frac{\sqrt{60 P_i G_i(\theta_i, \phi_i)}}{d_2} \quad (6)$$

که با جایگذاری اعداد به دست آمده از معادله (۴) در معادله (۶) میدان الکتریکی مورد نظر در فواصل مختلف به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$E = \sqrt{\frac{60 P_i G_i}{d}} = \sqrt{\frac{60 \times 2 \times 10^{10} \times 200}{d}} = \frac{154.9}{d} (kv/m) \quad (7)$$

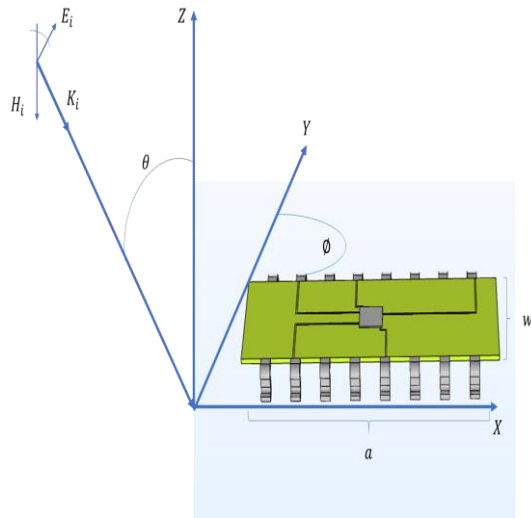
با توجه به معادله (۴)، میدان الکتریکی ایجاد شده با مسافت و چگالی توان با مجذور مسافت فاصله عکس دارد. در شکل (۴) ادوات مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های متعدد و بررسی آثار امواج الکترومغناطیسی پر قدرت بر روی حسگر نشان داده شده است.



شکل (۴): پیکربندی نمونه آزمایشگاهی مولد امواج الکترومغناطیسی توان بالا

توان شارش شده از آنتن به سمت حسگر با استفاده از نرم-افزار (cst) در شکل (۵) نشان داده شده است. این توان برابر با ۱۵ گیگاوات بر متر می‌باشد. با استفاده از معادله (۵) و با دانستن فاصله از آنتن تا منبع می‌توان مقادیر شبیه‌سازی شده را با به صورت تئوری محاسبه کرد.

همچنین میدان الکتریکی ایجاد شده در حوزه-زمانی و در فاصله ذکر شده به وسیله ادوات اندازه‌گیری محاسبه شده است. با رجوع به معادله (۶ و ۷) و همچنین دانستن فاصله مورد نظر می‌توان همخوانی دقیق مقدار میدان را به صورت تئوری و شبیه‌سازی به دست آورد.



شکل (۸): زوایای برخورد امواج الکترومغناطیسی

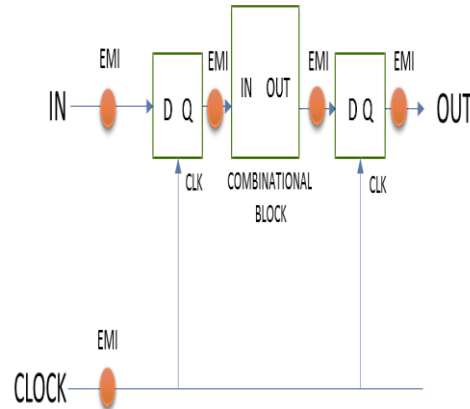
همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است برد بر روی یک صفحه دارای سه کمیت x, y, z قرار گرفته است. همچنین مقادیر θ و ϕ به ترتیب بیانگر اختلاف محل قرارگیری برد با محور y و اختلاف زاویه میدان الکترومغناطیسی با محور z است.

میدان الکترومغناطیسی در سه جهت به هدف تابیده می‌شود که این جهت دارای زوایای مختلف نیز می‌باشد. طبق معادلات گفته شده در مرجع [۷] حداکثر ولتاژ القا شده بر روی سامانه که ناشی از امواج الکترومغناطیسی می‌باشد، به وسیله معادله (۹) به دست می‌آید.

$$EMI_i = k_i s E_{(s)} = jk_0 a w E (\sin \phi \sin \gamma \cos \theta + \cos \phi \cos \gamma \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r} \sin \theta \cos \gamma) \quad (9)$$

که در آن، $E_{(s)}$ طیف موجی برخورد صفحه K_i, K_0 عددی ثابت که وابسته به رساناهای مسی درون pcb و همچنین زاویه برخورد موج با صفحه می‌باشد. a, w طول و عرض صفحه و θ, γ, ϕ زوایای میدان‌های مغناطیسی در لحظه برخورد با صفحه می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده به وسیله نرم‌افزار المان محدود، یک مادبرد همانگونه که در شکل (۹) مشخص است به‌عنوان هدف (DUT) در نظر گرفته شده است. امواج الکترومغناطیسی را با سه زاویه مختلف به سمت هدف گسیل خواهد شد. هدف از این آزمایش بدترین نوع زاویه (از دید هدف) که باعث بیشترین تخریب بر روی هدف می‌شود، نشان داده خواهد شد. در شکل (۱۰) زوایای مختلف بر روی هدف نشان داده شده است. در این شکل $\theta = 90, 45, 0$ می‌باشد.

نشان می‌دهد. این امواج توانایی ایجاد اختلال و اختشاش بر روی خروجی سامانه را خواهد داشت.



شکل (۷): امواج الکترومغناطیسی بر روی سامانه دیجیتال

فیلیپ فلاپ دارای سه پارامتر زمانی از قبیل T_{hold}, T_{setup} و T_{CLK-Q} می‌باشد. ورودی اطلاعات در زمان T_{hold}, T_{setup} در حالت پایدار است. برای انتقال از فیلیپ فلاپ به خروجی Q مقدار زمان T_{CLK-Q} مورد نیاز است. اگر یک میدان الکترومغناطیسی پر قدرت در زمان T_{hold}, T_{setup} به فیلیپ فلاپ تحمیل شود، خطاهای مختلفی در داخل قطعه اتفاق خواهد افتاد. در این زمان احتمال مشاهده خطا در یک دوره تناوب به قرار زیر است [۶]:

$$\mu = \left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{Setup} + T_{hold}}{T} \left| \frac{t_{exposure} < T}{t_{exposure} > T} \right. \\ 1 \end{array} \right\} \quad (A)$$

۲-۲- زوایای تابشی بر روی قطعه هدف

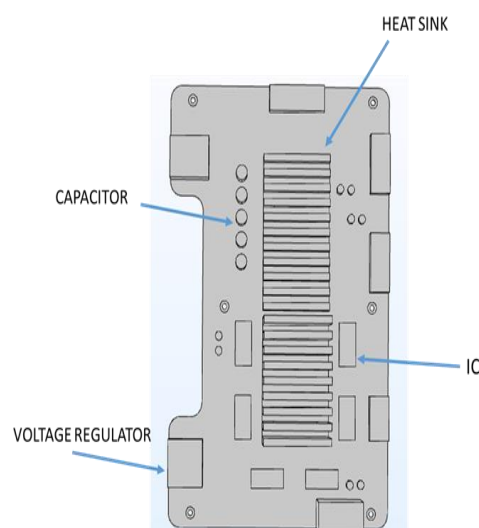
یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترهای در زمینه آسیب‌پذیری قطعات الکترونیکی، نحوه تابش امواج بر روی هدف می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، بسته به طرز قرارگیری قطعه هدف و نحوه انتشار امواج الکترومغناطیسی پر قدرت در فضا، ولتاژ/جریان مختلفی بر روی قطعه ایجاد می‌شود. اکثر قطعات الکترونیکی از PCB تشکیل شده‌اند که IC و میکروپروسسورها و همچنین قطعات پسیو^۱ روی آن به وسیله رسانا که معمولاً از جنس مس می‌باشد، به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل نشان دهنده یک نمونه از قطعه هدف (DUT^۲) هست که دارای طول، عرض و ضخامت مشخص و همچنین می‌باشد. نحوه تابش امواج الکترومغناطیسی نیز بر روی شکل (۲) کاملاً مشخص شده است.

^۱ Passive

^۲ Device under Test

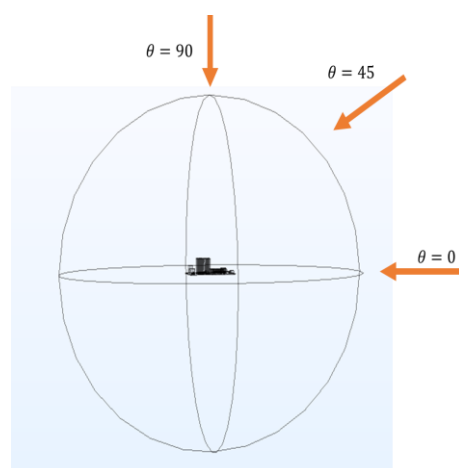
کیلومتر را تحت پوشش قرار می‌دهد. در این مقاله هدف به‌دست آوردن میدان الکتریکی برای تخریب قطعه نیست. بلکه هدف به‌دست آوردن زاویه تابشی با بیشترین میزان تخریب است. برای مشخص کردن میزان تزویج صورت گرفته بر روی هدف از معادله (۱۰) استفاده شده است:

که در آن، Z_L ، Z_{in} امپدانس ورودی و امپدانس بار را نمایش می‌دهد، همچنین $D(\varphi, \theta)$ چگالی توان تشعشع یافته شده و λ نمایانگر طول موج می‌باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل برای تزویج، سطح مقطع مؤثر دریافتی است که از روی آن میزان میدان جذب شده به‌دست می‌آید و در مرجع [۶] به‌طور کامل بررسی شده است. شبیه‌سازی انجام گرفته به وسیله نرم‌افزار المان محدود (کامسول) در شکل (۱۱) یک نمونه AC-CMOS را نشان می‌دهد. در این شکل میدان الکتریکی ایجاد شده (35Kv/m) باعث به وجود آمدن جریان‌های بالا (بر اثر قفل شدگی) در اتصالات مختلف قطعه شده است که این جریان‌ها درون دیس^۳ باعث ایجاد حرارت بسیار بالا در حدود ۵۰۰ فارنهایت و در نتیجه آن تخریب کلی قطعه خواهد شد. شکل (۱۲) نشان دهنده اثبات رابطه (۴) می‌باشد. چگالی میدان الکتریکی نشان داده شده در شکل بیانگر این موضوع است که در زوایای مختلف میزان قدرت امواج الکترومغناطیسی متفاوت خواهد بود و در زاویه ۹۰ درجه بیشترین میزان اثرگذاری امواج مغناطیسی بر روی قطعه آزمایش کاملاً مشهود است. چگالی میدان الکتریکی ایجاد شده بر روی قطعه باعث ایجاد شکست الکتریکی و در نهایت تخریب دائمی قطعه خواهد شد که برای راه‌اندازی دوباره آن نیاز به تعویض قطعه خروجی است. در مراجع [۱۰ و ۱۱] نیز نشان داده شد که در حداکثر تخریب در زمانی است که امواج الکترومغناطیسی با زاویه $\theta = 90$ بر روی هدف گسیل شوند، که این امر هم به‌صورت شبیه‌سازی شده و هم به‌صورت معادلات ریاضی نمایش و اثبات شده است. قطعات حساس دیگری که در برد قرار گرفته‌اند نیز در زمان حملات الکترومغناطیسی دچار اختلال و تخریب خواهند شد که در محیط کامسول نمایش داده شده است. این قطعات نیز جاذب امواج بوده و تحت تأثیر این قطعات دچار نوسانات شدید شده که ممکن است به‌طور کلی از کار افتاده و نیاز به تعویض این قطعات باشد. البته قطعات دیگر که در زمان حمله کمتر دچار اغتشاش و تخریب شده و یا حامل جریان الکتریکی نمی‌باشند. در این شبیه‌سازی به‌صورت عایق در نظر گرفته شده‌اند تا تحلیل و همچنین فرآیند مش‌بندی تا حد امکان ساده‌تر شود.



شکل (۹): یک نمونه از مادربرد با قطعات فعال و غیر فعال

شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله نشان دهنده حداکثر میدان القاء شده بر روی هدف در زاویه $\theta = 90$ است. اعتبارسنجی لازم در مراجع [۸ و ۹] قابل بررسی و مطالعه است. زمان خیزش ۵ نانوثانیه است. این شکل موج به‌صورت تک پالس به‌سوی هدف گسیل خواهد شد اگر چه می‌توان از امواج پیوسته نیز برای تخریب هدف استفاده کرد.



شکل (۱۰): زوایای مختلف تابش امواج الکترومغناطیسی

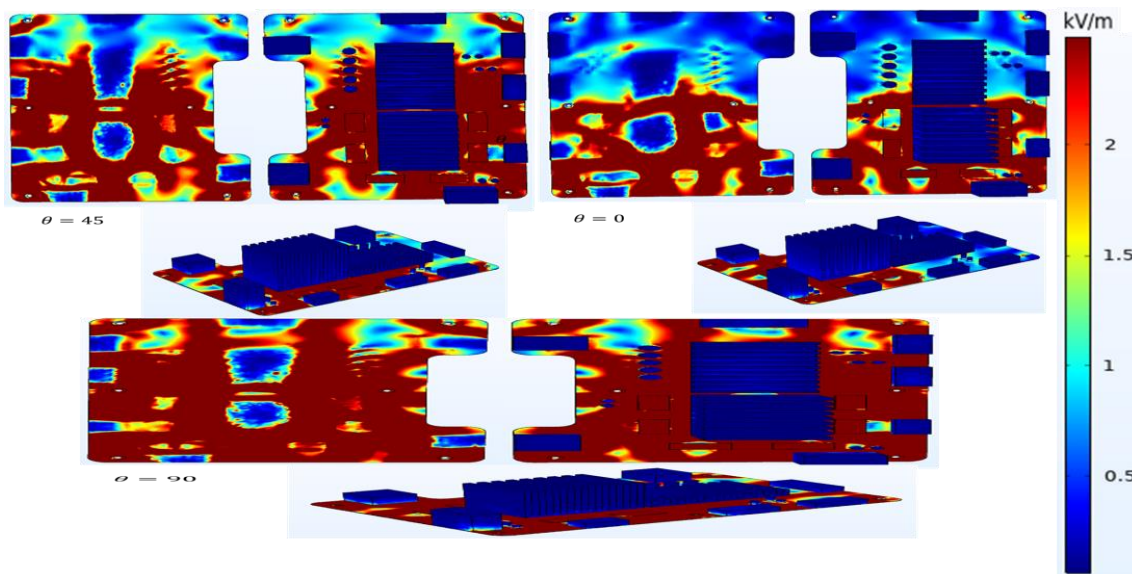
۳-۲- حوزه میدانی دور و حوزه میدانی نزدیک

ساختار امواج مغناطیسی شامل دو جزء الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد که تأثیر این دو مؤلفه با یکدیگر ایجاد میدان مغناطیسی در حوزه میدان دور^۱ و حوزه میدان نزدیک^۲ می‌کند. حوزه میدانی نزدیک معمولاً مسافت بسیار کمی را تحت پوشش قرار می‌دهد و حوزه میدانی دور اغلب از چند ده متر تا چند صد

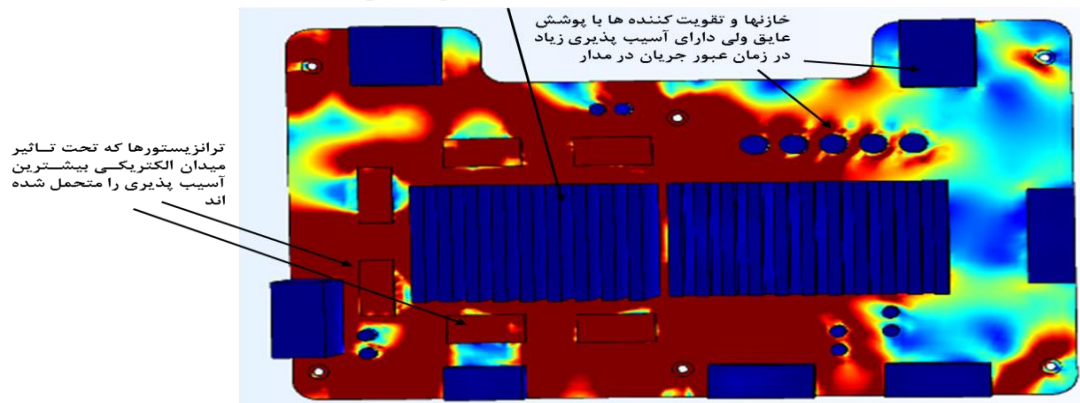
³ Dice

¹ Far-field

² Near Field



شکل (۱۱): میزان جذب امواج الکترومغناطیسی در زوایای مختلف بر روی مادربرد در محیط شبیه‌سازی کامسول



شکل (۱۲): ترازیستورها که تحت تأثیر میدان الکتریکی بیشترین آسیب پذیری را متحمل شده اند

نشان می‌دهد در زمانی که امواج الکترومغناطیسی به سطح قطعه الکترونیکی برخورد کند، کدام عنصر از اجزاء هدف دارای بیشترین جذب امواج و در نتیجه تخریب بیشتر خواهند بود. همان‌طور که در شکل مشخص شده است میزان جذب امواج الکترومغناطیسی در FR4 دارای کمترین مقدار و در طلا دارای بیشتر مقدار خواهد بود [۱۲].

۲-۴ تخمین دامنه میدان الکتریکی برای تخریب قطعه با به‌دست آوردن ولتاژ ورودی

در این بخش پارامترهای الکتریکی چندین نوع از ترازیستورهای TTL^3 و VCC^4 را طبق مرجع [۱۳] بررسی خواهیم کرد. با تحلیل دقیق میزان جریان/ولتاژ ورودی و خروجی به مدار و همچنین میزان تأخیر در وصل و یا قطع و حتی فاصله پین‌ها از یکدیگر می‌توان به مقدار میدان‌های الکتریکی برای ایجاد تخریب

۲-۴-۱ ارتباط جنس قطعات استفاده‌شده با آسیب‌پذیری

یکی از مهم‌ترین دلایل در افزایش آسیب‌پذیری قطعات و ادوات الکترونیکی، جنس قطعات مورد استفاده در فرآیند ساخت است. همان‌طور که در قسمت قبل نیز نشان داده شد، برخی از قطعات دارای خاصیت جذب بیشتر امواج الکترومغناطیسی هستند که این مسئله باعث افزایش سطح آسیب‌پذیری می‌شود. استفاده از مس برای اتصال و ایجاد میسر جریانی و همچنین استفاده از طلا، قلع و آلومینیوم برای روکش کاری و استفاده از پلاستیک و $FR4$ برای صفحه PCB^2 و قطعات محافظ برای انواع حسگرها و مدارات مجتمع و همچنین پتاسیوم‌ترو تنظیم‌کننده ولتاژ، باعث پراکندگی جذب امواج بر روی هدف خواهد شد. در شکل (۱۳) چگالی جریان القاء شده در پنج نوع عنصر مورد استفاده در ساخت ادوات الکترونیکی نمایش داده شده است. این شبیه‌سازی

³ Transistor-Transistor Logic

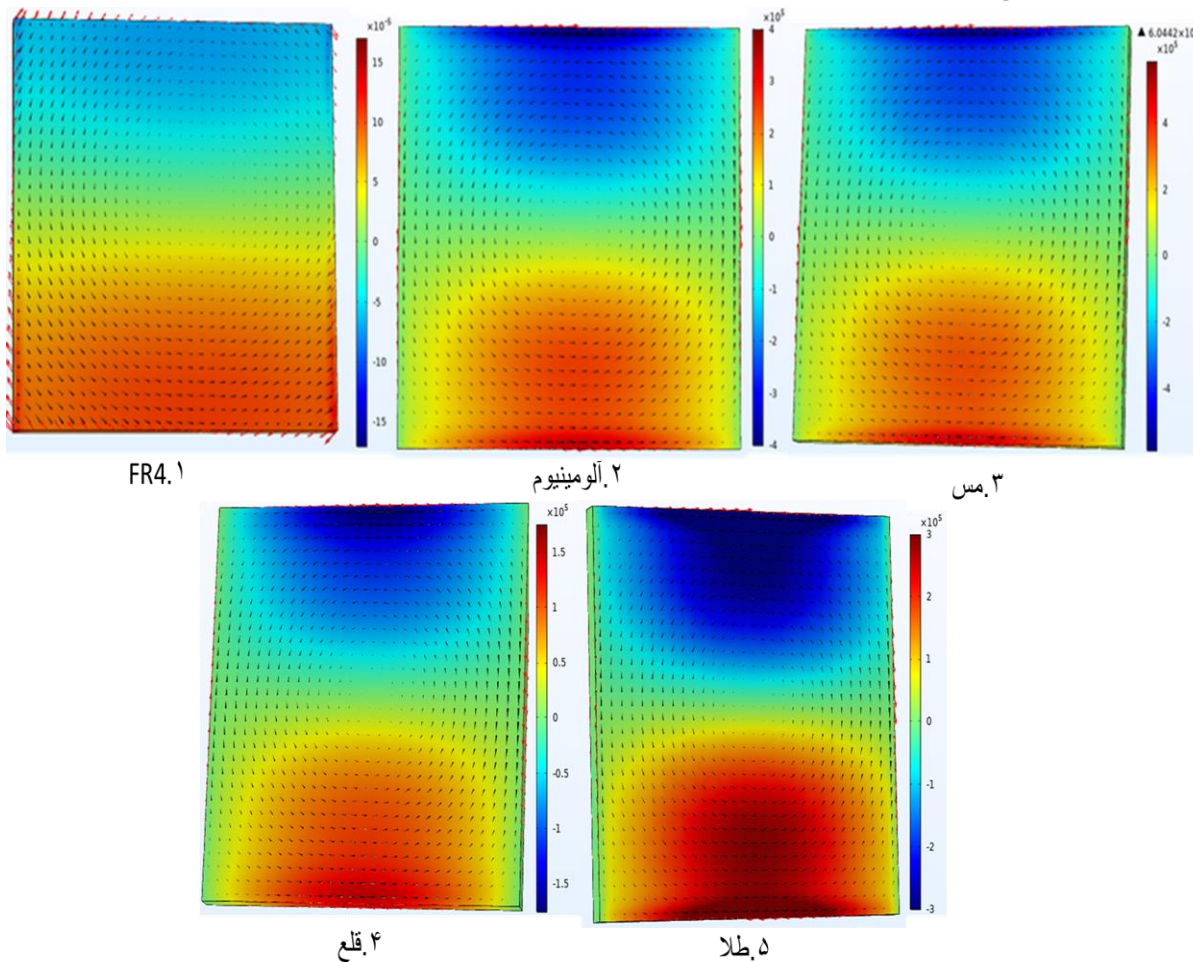
⁴ Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

¹ Flame Retardant

² Printed Circuit Board

متفاوت است. این تفاوت در ولتاژ ورودی باعث ایجاد تغییر در ولتاژ شکست و تخریب قطعات با یکدیگر شده است.

در چندین نوع ترانزیستور از خانواده *TTL* و *Cmos* پی برد. همانگونه که در جدول (۳) نشان داده شده است، میزان ولتاژ ورودی قطعات الکترونیکی یا فناوری ساخت مختلف با یکدیگر



شکل (۱۲): جذب امواج تابشی به وسیله عناصر مختلف

جدول (۳): پارامترهای الکتریکی قطعات الکترونیکی مختلف از خانواده CMOS و TTL

	AS-TTL	LS-TTL	AC (CMOS)	HC (CMOS)	
ولتاژ تغذیه (VCC)	۵/۵	۷	۶	۵	V
جریان عبوری از VCC یا GND	۵۰±	۲۰۰±	۲۰۰±	۵۰±	mA
جریان ورودی ICC	۲۰	۲۰	۴۰	۲۰	μA
جریان حداکثری I _{IH}	۷۰	۲۰	۸۰	۱۰۰	nA
تأخیر در وصل t _p	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	ns
ظرفیت تحمل دمایی	-۵۵ تا +۱۲۵	-۵۵ تا +۱۲۵	-۶۵ تا +۱۵۰	-۶۰ تا +۱۵۰	°C

جدول (۳): تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر روی قطعات الکترونیکی مختلف از خانواده CMOS و TTL بر اساس شبیه‌سازی انجام شده در COMSOL

نوع قطعه	میدان الکتریکی (Kv/m)			آستانه تخریب (Kv/m)	آستانه شکست (Kv/m)	عرض پالس	تأثیرات		
	الکترومغناطیسی توان- بالا						تخریب	نیاز به راه‌اندازی مجدد	بدون تأثیر
AS-TTL	۳۵Kv/m	۲۵Kv/m	۲۰Kv/m	۲۶/۳Kv/m	۲۱/۶Kv/m	۲۰ ns	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	نیاز به راه‌اندازی مجدد	بدون تأثیر
LS-TTL	۳۵Kv/m	۲۵Kv/m	۲۰Kv/m	۳۵Kv/m	۲۱Kv/m	۲۰ ns	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	نیاز به راه‌اندازی مجدد	بدون تأثیر
ALS-TTL	۳۵Kv/m	۲۵Kv/m	۲۰Kv/m	۳۵Kv/m	۱۹/۳Kv/m	۲۰ ns	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	نیاز به راه‌اندازی مجدد	نیاز به راه‌اندازی مجدد
AC(CMOS)	۳۵Kv/m	۲۵Kv/m	۲۰Kv/m	۳۵Kv/m	۱۷/۳Kv/m	۲۰ ns	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	نیاز به راه‌اندازی مجدد	نیاز به راه‌اندازی مجدد
HC(CMOS)	۳۵Kv/m	۲۵Kv/m	۲۰Kv/m	۱۸Kv/m	۱۵/۳Kv/m	۲۰ ns	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	تخریب قطعه- نیاز به تعویض
HC(CMOS)	۳۵Kv/m	۲۵Kv/m	۲۰Kv/m	۳۲Kv/m	۱۶/۳Kv/m	۲۰ ns	تخریب قطعه- نیاز به تعویض	نیاز به راه‌اندازی مجدد	نیاز به راه‌اندازی مجدد

برای تولید قطعات الکترونیکی سهم اساسی در میزان جذب امواج متخاصم خواهد داشت. در جدول (۴) چندین نوع از آی سی ترانزیستورها مورد استفاده در حسگرها بررسی و تحلیل شده است. میدان‌های الکتریکی مورد بررسی در این جدول با پهنای پالس یکسان (۲۰Kv/m، ۲۵Kv/m و ۳۵Kv/m) می‌باشد و مقایسه آستانه شکست و تخریب چندین محصول از فناوری‌های TTL و CMOS نشان داده شده است. همانگونه که در جدول نیز مشخص است، آستانه تخریب برخی از ترانزیستورها ۳۵Kv/m و برخی دیگر تا ۱۸Kv/m متغیر می‌باشد. از مهم‌ترین عوامل در ایجاد مقاومت پذیری در مقابل میدان‌های الکتریکی همانگونه که در بخش‌های قبلی گفته شد، فواصل جایگذاری قطعات و همچنین جریان‌های ورودی و خروجی و جنس ساخت قطعات می‌باشد. با کنار هم قرار دادن جدول‌های (۳ و ۴) می‌توان به این نتیجه رسید که هر چقدر مقدار ولتاژ/جریان ورودی به قطعه بیشتر باشد مقدار میدان الکتریکی برای تخریب بیشتر خواهد بود. به‌عنوان مثال LS-TTL دارای جریان ورودی ۲۰ میکروآمپری و ولتاژ تغذیه ۷ ولت می‌باشد، این مقدار بیشینه ولتاژ/جریان در میان ترانزیستورهای معرفی شده در جدول است. با توجه به جدول (۲) مقدار میدان الکتریکی برای شکست و تخریب LS-TTL نیز دارای بیشترین مقدار در میان

همان‌طور که در جدول (۳) بیان شده است ولتاژهای مختلف، جریان‌های عبوری و ورودی و جریان‌های قابل تحمل چندین نوع فناوری ترانزیستوری آورده شده است. همچنین میزان تحمل دمایی این نوع قطعات نشان داده شده است. این جدول دارای اهمیت خاصی برای تحلیل و بررسی آسیب پذیری قطعات و همچنین به‌دست آوردن نکات مهم برای پیدا کردن پاسخ به این سؤال که چرا در برخی از قطعات آستانه تحمل در مقابل امواج پایین است به‌دست آورد. هر چقدر میزان تحمل گرمایی قطعات و میزان ولتاژ و جریان عبوری از مدار بیشتر باشد آستانه تحمل قطعات بیشتر خواهد بود. به‌منظور تخمین میزان گرم شونده‌گی مواد مختلف که در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی قرار گرفته‌اند از معادله (۱۱) استفاده خواهد شد.

$$P = \sigma [E_t]^2 = \omega \epsilon_r \epsilon_0 \tan \delta [E_t]^2 \quad (11)$$

که در آن، E_t میدان الکتریکی P توان جذب شده به‌صورت گرما ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک فضای آزاد ϵ_r قسمت حقیقی از ثابت دی‌الکتریک ω فرکانس میدان تشعشعی می‌باشد. همانگونه که در شکل (۱۲) مشخص است، میزان جذب امواج الکترومغناطیسی در مواد مختلف دارای تفاوت‌های اساسی است [۱۴] که از این رو می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مواد مصرفی

- Ghanegharabagh, Y. "Three dimensional Simulation and Testing of Radiative Electromagnetic Wave Characteristics on Electronic Circuits Using FDTD Method" The Modares Journal of Electrical Engineering, 10(2), 61-72, 2010.
- [6] M. O'hara, "EMC at Component and PCB Level."; Elsevier, 1998.
- [7] J. L. Lagos and Franco Fiori, "Worst-case induced disturbances in digital and analog interchip interconnects by an external electromagnetic plane wave—Part I: Modeling and algorithm." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, No. 1, pp. 178-184, 2010.
- [8] Zhou, Liang, Zheng Wei San, Yu-Jie Hua, Liang Lin, Shuo Zhang, Zheng Guo Zhao, Hai Jing Zhou, and Wen-Yan Yin, "Investigation on Failure Mechanisms of GaN HEMT Caused by High-Power Microwave (HPM) pulses," In *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, No. 3, pp. 902–909, June 2017.
- [9] M. Leone, "Radiated Susceptibility on the Printed-Circuit-Board Level: Simulation and Measurement," In *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, pp. 471-478, August 2005.
- [10] K. Mandeep, K. Shikha, and M. Danvir, "Electromagnetic Interference," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 3, pp. 1–5, April 2011.
- [11] L. Zhou, Sh. Zhang, W.-Y. Yin, and J.-F. Mao "Immunity Analysis and Experimental Investigation of a Low-Noise Amplifier Using a Transient Voltage Suppressor Diode Under Direct Current Injection of HPM Pulses," In *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, pp. 1715-1718, December 2014.
- [12] W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wik, "Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, pp. 314–321, August 2004.
- [13] CMOS TTL Logic Family List Datasheets," CMOS, TTL VOLTAGE-LEVEL, ELECTRICAL CHARACTERISTICS "https://www.datasheetarchive.com/TTL%20catalog-datasheet.html", 2008.
- [14] A. J. Shokri, M. H. Tavakoli, A. A. Sabouri Dodaran, and M. S. Akhondi Khezrabad, "Numerical Study of Influence of Coil Step on the Induction Heating Process in Three-Dimensional," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 4, pp. 37-44, 2016 (In Persian).

ترانزیستورهای معرفی شده است. ۳۵Kv/m برای رسیدن به آستانه تخریب و ۲۱Kv/m برای رسیدن به آستانه شکست مقادیر مورد نظر در این ترانزیستور خواهند بود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله عوامل متعدد که باعث تشدید و یا کاهش میزان آسیب پذیری در ترانزیستورها هستند بررسی و شبیه سازی شده است. زاویه تابش امواج، جنس قطعات و فناوری به کار رفته در آن و دامنه امواج الکترومغناطیسی از مهم ترین این پارامترها می باشد. شبیه سازی های انجام شده به وسیله نرم افزار المان محدود (کامسول) نشان داد که زاویه تابشی عمود بر صفحه دارای بیشترین قدرت می باشد، یکی دیگر از نکات مهم در زمان شبیه سازی همسان بودن فرکانس کاری قطعه مورد نظر با فرکانس پالس تابیده شده به هدف (رزونانس) می باشد که اگر این حالت پیش آید قدرت تخریب به مراتب بیشتر خواهد شد. همچنین تأثیر گذاری آب کاری با عناصر مختلف نیز در جذب امواج تابشی بی تأثیر نخواهد بود. در انتها نیز قطعات الکترونیکی مختلف مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج نشان داده است در صورتی که هر چه مقدار پارامترهای الکتریکی یک قطعه دارای اندازه بیشتری باشد، آستانه تحمل آن در مقابل امواج الکترومغناطیسی بیشتر خواهد بود. این خروجی های شبیه سازی با مقالات معتبر راستی آزمایی شده است.

۵- مراجع

- [1] M. Ayaz, M. Ammad-uddin, I. Baig, and E. -H. M. Aggoune, "Wireless Sensor's Civil Applications, Prototypes, and Future Integration Possibilities: A Review," In *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, pp. 4-30, 2018.
- [2] D. Zhang, X. Zhou, E. Cheng, H. Wan, and Y. Chen, "Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV's Datalink," In *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, pp. 829-839, June 2020.
- [3] M. Rohe, S. Korte, and M. Koch. "Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience," In *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 46, pp. 396-403, August 2004.
- [4] M. Mehri and S. Heidari, "The Analysis of EMI Effects on the Performance of Electronic Systems Implemented on a PCB," vol. 31, pp. 100-105, 2012.
- [5] Amin, A., Salehi, A., Ghezelayagh, M. H., &