# شبیهسازی بار فضایی در پدیدهی مالتی پکتینگِ تکسطحی با استفاده از نرمافزار CST PIC STUDIO

مستأجران، مريم'; كاظمى، فيروزه'

<sup>۱</sup>دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک

دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۳

#### چکیدہ

پدیده ی مالتی پکتینگ که به علت تکثیر الکترونهای ثانویه اتفاق میافتد، در ساختارهای رادیوفرکانسی بسیار شایع است. نیروی کولنیِ بین الکترونهای ثانویه باعث اثر بار فضایی شده و در نتیجه اشباع مالتی پکتینگ اتفاق میافتد. مطالعه یِ واقع بینانه یِ مالتی پکتینگ، نیازمند در نظر گرفتن اثر بار فضایی است. شبیه سازی این اثر در نرم-افزار CST PIC STUDIO به سادگی امکان پذیر نیست و چالش هایی برای کاربر ایجاد می کند. در این مقاله، چگونگیِ در نظر گرفتن بار فضایی در شبیه سازی مالتی پکتینگ تک سطحی برای مدلی ساده شرح داده شده است. اثر بار فضایی بر نتایج حاصل از شبیه سازی، بررسی شده و آستانه یِ دامنه ی میدان رادیو فرکانسی برای وقوع مالتی پکتینگ به دست آمده است.

كلمات كلیدی: مالتی پكتینگ، شبیه سازی، نرمافزار CST، بار فضایی

#### مقدمه

تخلیه مالتیپکتینگ، اثرِ نامطلوبی است که در ساختارهای رادیوفرکانسیِ<sup>۱</sup> (RF) تحتِ خلاء، اتفاق میافتد. این پدیده زمانی رخ میدهد که الکترونی که در میدان RF گرفتار شده است، با داشتنِ انرژی کافی و تحت شرایط مناسب، به سطح برخورد کند [۱]. در ساختارِ پنجرههای رادیوفرکانسی<sup>۲</sup> که توان میکروموجی را از خلاء به هوا انتقال میدهند، پدیده مالتیپکتینگ اتفاق میافتد. جنس این پنجرهها از سرامیک (دیالکتریک) است که ضریب نشر الکترون ثانویهی بالایی دارند. اگر زمان برخوردِ الکترونهای ثانویه به سطح دیالکتریک، مضرب مفردی از نصف دورهیِ تناوب RF باشد (شرط تشدید) و ضریب الکترون ثانویه (<sup>۲</sup>SEY) یعنی نسبت الکترونهایِ ثانویه به الکترونهای برخوردیِ اولیه، بزرگتر

- <sup>1</sup> Radio Frequency
- <sup>2</sup> RF window
- <sup>3</sup> Secondary Emission Yield

Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-05-11

از یک باشد (۱≤ SEY) و الکترونهایِ ثانویه در سیستم باقی بمانند(شرط پایداری)، در مدت زمان کوتاهی بهمنی از الکترونهای ثانویه (الکترونهایی با رشد نمایی) ایجاد میشود که به آن پدیده یمالتی پکتینگ می گویند[۲]. در سطح دی الکتریک، پس از انتشار الکترون ثانویه، حفره ایجاد می شود که باعث باردار شدن دی الکتریک (بار مثبت) می شود. به دلیل باردار شدن سطح دی الکتریک، میدان الکتروستاتیکی عمود بر صفحه به وجود می آید که به عنوان نیروی باز گرداننده عمل می کند و الکترونها را مجدداً به سطح برمی گرداند. لذا در بررسی مالتی پکتینگ در پنجرههای RF، علاوه بر میدان ج<sub>R</sub>F، میدان DD (E<sub>DC</sub>) ناشی از بار سطحی هم در نظر گرفته می شود. این نوع مالتی پکتینگ در دی الکتریکها را مالتی پکتینگ تک سطحی<sup>4</sup> می نامند. شکل (۱) این نوع مالتی پکتینگ را نشان می دهد.



از جمله کمیتهای مهم در بررسی مالتی پکتینگ تک سطحی است، زیرا زمان برخورد الکترون به سطح (t<sub>flight</sub>) را

تعیین می کند. قابل ذکر است که سطح فلز به دلیل وجود الکترونهای آزاد، با وجود از دست دادن الکترون، خنثی می می کند. قابل ذکر است که سطح فلز به دلیل وجود الکترونهای آزاد، با وجود از دست دادن الکترون، خنثی می ماند، در نتیجه نیروی بازگرداننده، وجود نخواهد داشت، الکترون پس از انتشار از یک سطح می تواند به سطح مقابل برخورد کند و مالتی پکتینگ فالباً از نوع مالتی پکتینگ دوسطحی<sup>6</sup> خواهد بود.

در بسیاری از مطالعات نظری و شبیهسازیهایِ انجام شده در پدیده مالتی پکتینگ، بار فضایی<sup><sup>3</sup></sup> نادیده گرفته شده است. شکلهایِ (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب، تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان را، با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن بار فضایی نشان میدهند. در شکل (۲- ب) ابتدا تعداد الکترونهای ثانویهیِ تولید شده در سیستم، رشد میکند و سپس ثابت میشود که به اصطلاح، اشباع<sup>۷</sup> مالتی پکتینگ اتفاق افتاده است.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Single-sided multipacting

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Two-sided multipacting

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Space Charge

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Saturation



شکل ۲: رشد ذرات بر حسب زمان الف- بدون اثرات بار فضایی ب- با اثرات بار فضایی[۱]

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در یک زمان معین، بار فضایی باعث کاهش شدتِ مالتیپکتینگ(تعداد الکترونها) شده است. تعداد الکترونها در طی فرآیند مالتیپکتینگ، به انرژی برخوردی<sup>۸</sup> (W<sub>coll</sub>) و جریان برخوردیِ آنها به سطح <sup>۹</sup> (I<sub>col</sub>) بستگی دارد. بدون در نظر گرفتن بار فضایی، پیشبینیِ این کمیتها با نتایج تجربی، مطابقت خوبی ندارد. به طور مثال الw<sub>coll</sub> اندازه گیری شده با مقدار پیشبینی شده در تئوریِ بدون بارفضایی، بسیار کمتر خوبی ندارد. به طور مثال الس<sub>coll</sub> اندازه گیری شده با مقدار پیشبینی شده در تئوریِ بدون بارفضایی، بسیار کمتر است [۳]. بنابراین مطالعهیِ دقیق مالتیپکتینگ، مستلزمِ در نظر گرفتن اثرات بار فضایی در شبیهسازی در شبیهسازی است. در ایا، است [۳]. بنابراین مطالعهیِ دقیق مالتیپکتینگ، مستلزمِ در نظر گرفتن اثرات بار فضایی در شبیهسازی است. در ایا، شبیه ای موجود برای شبیه ازی است. در ایا، شبیه سازی بار فضایی در مالتیپکتینگ دوسطحی، بدون بیان چالشهای موجود برای شبیه سازی در نرمافزار، انجام شده و نشان داده شده است که اثرات بار فضایی در نظر گرفتن اثرات بار فضایی در نظر آن است. در ایا، نظر موز این مال در مالتیپکتینگ دوسطحی، بدون بیان چالشهای موجود برای شبیه سازی در نرمافزار، انجام شده و نشان داده شده است که اثرات بار فضایی، ناحیه وقوع مالتیپکتینک که بدون این اثرات، بدست آمده بود را تغییر نمی دهد. در این مقاله هدف ما این است که علاوه بر نشان دادن چگونگی شبیه سازی بار فضایی در CST، اثر بار فضایی را بی پارامترهای مورد مطالعه در مالتیپکتینگ از جمله ایو ای او این این این ای در CST، اثر بار

مالتی پکتینگ به شدت به SEY سطوح بستگی دارد [۴]. رفتار SEY بر حسب انرژی برخوردی در شکل (۳) نشان داده شده است. که با پارامترهای W<sub>1</sub>، W<sub>2</sub>، W<sub>2</sub>، W<sub>2</sub> و SEY مشخص می شود. با توجه به شکل (۳)، SEY در محدوده یا نرژی اW تا W<sub>2</sub> تا W<sub>2</sub> بزرگتر از یک است. در انرژی های برخوردی خارج از این محدوده، چون الکترون انرژی کافی ندارد، نمی تواند الکترون ثانویه از ماده جدا کند در نتیجه مالتی پکتینگ اتفاق نمی افتد. W<sub>1</sub>، انرژی برخوردی آستانه است که در مدل واگان، در نرم افزار CST تعیین می شود. حداکثر ضریب نشر الکترون ثانویه را با SEY و SEY و انرژی برخوردی متناسب با آن را x<sub>max</sub> می نامند. در [۵،۴،۱] تأثیر SEY<sub>max</sub> و M<sub>max</sub> بر فرآیند مالتی پکتینگ انجام خواهد شد.

- <sup>8</sup> Collision emission
- <sup>9</sup> Collision Energy



در این مقاله، در بخش اول، آستانهیِ دامنهی میدان E<sub>RF0</sub> (آستانهی E<sub>RF0</sub>) را برای وقوع مالتیپکتینگ در مدلی ساده، به صورت نظری بدست میآوریم. در بخش دوم، بدون در نظر گرفتن بار فضایی مالتیپکتینگِ تک سطحی را برای مدلی ساده، شبیه سازی میکنیم. در بخش سوم چالش هایی را که در شبیه سازیِ بار فضایی، در نرمافزار CST PIC مدلی ساده، شبیه سازی میکنیم. در بخش سوم چالش هایی را که در شبیه سازیِ بار فضایی، در نرمافزار W<sub>coll</sub> ، STUDIO وجود دارد، بیان کرده و سپس شبیه سازی را انجام میدهیم. ویژگی های مالتی پکتینگ از جمله: اس I<sub>coll</sub> و بار سطحیِ ایجاد شده در سطح دی الکتریک را در اشباع بررسی میکنیم. در بخش چهارم اثر تغییرات W<sub>1</sub> وWرا با در نظر گرفتن بار فضایی بر پارامترهای مالتی پکتینگ، نشان میدهیم.

### محاسبه آستانهی ${ m E_{RF0}}$ به روش نظری -۱

با در نظر گرفتن دو میدان  $E_{RF}$  و  $E_{DC}$  (شکل ۱) و با استفاده از قانون دوم نیوتن، می توان معادلات حرکت الکترون در مالتی پکتینگ ِ تک سطحی را بدست آورد[۶]. با استفاده از این معادلات، روابط ۱ و ۲ برای سرعت بدست می آید  $\dot{x} = -\frac{e}{m}E_{DC}t + v_{0x}$  ,  $v_{0x} = v_0 \sin \phi$  (۱)

$$\dot{\mathbf{y}} = -\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{m}} \mathbf{E}_{\mathrm{RF0}} \left[ \cos(\omega t + \theta) - \cos \theta \right] + \mathbf{v}_{0y} \quad , \mathbf{v}_{0y} = \mathbf{v}_0 \cos \phi \tag{7}$$

x در اینجا e و m، به ترتیب بار و جرم الکترون،  $v_{0x}$  و  $v_{0x}$  به ترتیب مؤلفههای سرعت اولیهی الکترونها در راستای x و  $v_{0x}$  و  $v_{0x}$  به ترتیب مؤلفههای سرعت اولیهی الکترونها در راستای e و  $v_0$  سرعت زاویه ی،  $\varphi = 9$  در نظر گرفته شده است) و  $\varphi$ ،  $\omega$  سرعت زاویه ی،  $\varphi = 9$  در نظر گرفته شده است) و  $\varphi$ ،  $\omega$  سرعت زاویه است. زمان پرواز الکترون نسبت به محور افقی(در اینجا  $e^{-9} = 0$  در نظر گرفته شده است) و  $\theta = 0$  فاز اولیه است. زمان پرواز الکترون(از انتشار تا برخورد) با استفاده از رابطهی  $E_{\rm DC}$  بدست  $t_{\rm fligh} = \frac{2m}{e} \frac{v_0 \sin \phi}{E_{\rm DC}}$  و ماز اولیه است. زمان پرواز الکترون(از انتشار تا برخورد) با استفاده از رابطهی پرواز، مضرب فردی از نصف دوره می آید. شرط تشدید در مالتی پکتینگ تک سطحی، زمانی اتفاق می افتد که زمانِ پرواز، مضرب فردی از نصف دوره تناوب باشد، (رابطهی ۳).

$$t_{flight} = \frac{T(\Upsilon n - 1)}{\Upsilon} , n = 1, \Upsilon, \Upsilon, ...$$
(Y)

پژوهشهای نوین فیزیک

در این رابطه n مرتبهی مالتی پکتینگ و T دوره تناوب فرکانس مورد نظر، بر حسب هرتز (در این مقاله MHz ۳۲۵)، است. با استفاده از شرط تشدید، E<sub>DC</sub> تشدیدی در مرتبهی اول مالتی پکتینگ (n=۱) به صورت رابطهی (۴)، بدست می آید.

$$E_{\rm DC} = \frac{\epsilon_{\rm TV}}{e_{\rm T}}$$
(\*)

تشديدى در مدل تک سطحى در اين مقاله، برابر با ۲ KV/m ا بدست مىآيد. براى محاسبەى نظري آستانەي  $B_{\rm RF0}$  ، ابتدا  $W_{\rm coll}$  در هر برخورد را از رابطەى (۵) بدست مىآوريم $W_{\rm coll} = \frac{1}{7}m(\dot{x}^{\,\rm r} + \dot{y}^{\,\rm r})$ 

سرعت الکترون در لحظهی برخورد به سطح، دارای مؤلفهی موازی برابر با  $\frac{7e}{m} E_{RF} \cos \theta$  -  $\frac{7e}{m} E_{RF} \cos \theta$  و مؤلفهی عمودی  $W_1$  سرعت الکترون در لحظهی برخورد به سطح، دارای مؤلفهی موازی برابر با  $W_1$  (سطح باید برابر با  $W_1$  برابر با  $x = -\dot{x}$  است. میدانیم که حداقل انرژی برخورد برای جدا کردن الکترون ثانویه از سطح باید برابر با  $W_1$  برابر با  $\dot{x}_1$  (سطح باید برابر با با  $w_1$  برابر با  $\dot{x}_1$  (سطح باید برابر با با  $w_1$  برابر با  $\dot{x}_2$  (سطح باید برابر با  $w_1$  برابر با  $\dot{x}_1$  (سطح باید برابر با  $\dot{x}_1$  برابر با  $\dot{x}_2$  (سطح باید برابر با ) (سطح باید برابر با ای (سطح باید برابر با ) (سطح باید برابر با ) (سطح باید بالد برابر با ) (سطح باید برابر با ) (سطح باید بر ) (سطح باید برابر با ) (سطح باید برابر ) (سطح بالد برابر ) (سطح بالد برابر ) (سطح بالد بر ) (سطح بالد بالد بالد بر ) (سطح بالد برابر ) (سطح بای

$$E_{\rm RF.} = \frac{m}{\tau e} \sqrt{\frac{\tau W_{\rm v}}{m}} - \dot{x}^{\rm v}$$
(9)

همانطور که در رابطه (۶) مشخص است،  $E_{RF0}$  به انرژی  $W_1$  وابسته است. بنابراین با پارامترهایِ SEY انتخاب شده در شکل (۳) (۳) (۳)  $E_{RF.} = 17.0 \text{ KV} / \text{m}$ 

# ۲- شبیهسازیِ مالتی پکتینگ بدون اثرات بار فضایی

۲-۱-مراحل شبیهسازی

مراحل شبیهسازی مالتیپکتینگ در نرمافزار CST به صورت زیر است:

- ایجاد مدل در محیط PIC: مدل مورد نظر صفحه ای از جنس دی الکتریک (تفلون) با ضخامت ناچیز است.
- ایجاد ویژگی الکترون ثانویه: ویژگی انتشار ثانویه برای سطح با انتخاب یک مدل انتشار ثانویه، تعیین می-شود. در این شبیه سازی مدل واگان <sup>۱</sup> را انتخاب می کنیم. پارامترهای SEY (که در نرم افزار قابل تغییر هستند) را مطابق جدول (۱) در نظر می گیریم.

SEY <sub>max</sub>	E <sub>max</sub> (eV)	W <sub>t</sub> (eV)	$W_1 (eV)$	$W_2(eV)$			
۱/۵	10.	صفر	۳۳/۵	881			

جدول۱: یارامترهای SEY انتخاب شده در مدل واگان

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Vaughan model

ایجاد چشمه الکترونی: چشمهای نقطهای در مرکز صفحه ایجاد کردیم و تنظیمات انتشار گوسی در این چشمه را طوری قرار دادیم که در آغاز شبیه سازی، ذرات را در طول یک دوره RF منتشر کند (طول پالس به اندازهی یک دوره باشد). الکترون های اولیه بدون پراکندگی زاویه ای به صورت عمود بر سطح ساطع می شوند. در نرمافزار CST، می توان بیشترین انرژی محتمل برای انتشار الکترون ثانویه را تعیین کرد که در اینجا طبق (۳] [۳] ۷.۵ eV در نظر می گیریم. متناسب با مدل انتشار ثانویه، توزیع انرژی الکترونهای ثانویه در نرمافزار CST تعیین می شود که برای مدل واگان مطابق شکل (۴) است.



شکل۴: تابع چگالی احتمال برای توزیع انرژی الکترونهای ثانویه در مدل واگان.

• شبیه سازی سازی  $E_{RF}$  و  $E_{RF}$  و  $E_{DC}$  و  $E_{RF}$  به ترتیب میدان های موازی و عمود بر سطح هستند.  $E_{RF}$  و جزئیات شبیه سازی این انرژی لازم برای شتاب دادن به ذرات را فراهم می کند. طریقه ی متناوب کردن  $E_{RF}$  و جزئیات شبیه سازی این دو میدان را در [۷] آورده ایم. پس از شبیه سازی این دو میدان، آن ها را به محیط PIC وارد می کنیم.

### ۲-۲- نتایج حاصل از شبیه سازی مالتی پکتینگ بدون اثرات بار فضایی

پس از اتمام شبیهسازی، نمودار تعداد ذرات بر حسب زمان را به ازای  $E_{
m RF} = 
m r \cdot KV \,/\,m$  در شکل (۵) آوردهایم. همانطور که مشاهده می شود، تعداد ذرات به صورت نمایی افزایش یافته است که نشاندهندهی وقوع مالتی پکتینگ است.



شکل۵: تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان بدون در نظر گرفتن بار فضایی.

برای E<sub>DC</sub>های مختلف، پارامتر SEY میانگین (<SEY>) را در مقادیر مختلف E<sub>RF</sub> به دست می آوریم. <SEY> که به صورت نسبت میانگین I<sub>coll</sub> به I<sub>emis</sub> <sup>۱۱</sup> تعریف می شود، اگر بزرگتر یا برابر با یک باشد، شاخص دیگری برای نشان دادنِ وقوع مالتی پکتینگ است [۸]. شکل (۶) محدودهیِ E<sub>RF</sub> و E<sub>RF</sub> برای وقوع مالتی پکتینگ را نشان می دهد.



 $.E_{RF0}$  شكل $e: <SEY > E_{DC}$  بر حسب  $E_{DC}$  برای مقادیر مختلف

شکل (۶) نشان میدهد که در محدودهی مشخص شده(KV/m) (E<sub>DC</sub> = (11-10.0) (KV/m) جرز گتر از یک است و مالتی پکتینگ اتفاق افتاده است. این در حالی است که در قسمت قبل با در نظر گرفتنِ شرط تشدید و انرژی الکترونهای ثانویه برابر با E<sub>DC</sub>، ۷.۵ eV تشدیدی برابر با ۲KV/m بدست آمد. علت این اختلاف این است که در شبیه سازی، علاوه بر انرژی اولیه V.۵ eV، وجود انرژی های نزدیک به ۷.۵ eV (شکل۴) نیز برای ذرات، محتمل خواهد بود که باعث می شود در E<sub>DC</sub>.

همچنین با توجه به شکل (۶)، آستانهیِ E<sub>RF0</sub> برابر با ۲۹ kV/m است که از مقدار نظری محاسبه شده در بخش اول (۱۷/۵ KV/m) بزرگتر است. علت اختلاف این دو مقدار این است که در محاسبهی نظری فقط شرط تشدید در نظر

" جریان انتشاری از سطح پس از هر برخورد

گرفته شده است. بنابراین در شبیهسازی و در محدودهی  ${
m E_{RF}} <$  ۲۹ KV/m، تعداد ذرات تشدیدی به اندازه کافی زیاد نبوده است که شتاب گرفته و با کسب انرژی بالای  ${
m W_1}$ ، موجب ایجاد مالتی پکتینگ شوند.

### ۳-شبیهسازی مالتی پکتینگ با اثرات بار فضایی

 $E_{DC}$  به منظور در نظر گرفتنِ بار فضایی، گزینهی " حذف بار فضایی<sup>۱۲</sup>" را در تنظیمات حل کننده PIC، غیرفعال و  $E_{DC}$  وارد شده را حذف می کنیم ( $E_{RF}$  همچنان فعال است)، زیرا با در نظر گرفتن بار فضایی،  $E_{DC}$  در نرمافزار ایجاد می شود و به همین دلیل نمی توان دقیقاً آن را تعیین کنیم و کنترلی روی مقادیر آن داشته باشیم. شبیه سازی را با در نظر گرفتن بار فضایی و ای کرفتن بار فضایی، گرفتن بار فضاین، گرفتن بار فران را با در نظر گرفتن بار فضاین، و کنترلی روی مقادیر آن داشته باشیم. شبیه سازی را با در نظر و ای می نظر و این دقیقاً آن را تعیین کنیم و کنترلی روی مقادیر آن داشته باشیم. شبیه سازی را با در نظر گرفتن بار فضایی و با پارامترهای SEY در جدول (۱) و همان شرایط قبل (m)، می دهد.



شکل۷: تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان با در نظر گرفتن بار فضایی.

رشد کاهشی تعداد ذرات نشاندهنده ی عدم وقوع مالتی پکتینگ است در صورتیکه که با همین شرایط، در شبیه سازی بدون اثر بار فضایی، مالتی پکتینگ اتفاق افتاده است (شکل ۵) از طرفی می دانیم که بار فضایی محدوده ی وقوع مالتی پکتینگ را تغییر نمی دهد. علت عدم وقوع مالتی پکتینگ در اینجا، تفاوت شدت E<sub>DC</sub> ایجاد شده در این دو حالت است. در شبیه سازی بدون اثر بار فضایی، مالتی پکتینگ را تغییر نمی دهد. علت عدم وقوع مالتی پکتینگ در اینجا، تفاوت شدت E<sub>DC</sub> ایجاد شده در این دو حالت مالتی پکتینگ را تغییر نمی دهد. علت عدم وقوع مالتی پکتینگ در اینجا، تفاوت شدت E<sub>DC</sub> ایجاد شده در این دو حالت است. در شبیه سازی بدون اثر بار فضایی، D<sub>D</sub> با شدت مورد نیاز، توسط کاربر وارد می شود در حالی که با در نظر گرفتن بار فضایی شدت E<sub>DC</sub> متناسب با تعداد الکترونهای ثانویه انتشاری از سطح است، لذا E<sub>DC</sub> از صفر ایجاد شده و ایجاد شده و ایم تعریخ از فضایی شدت G<sub>D</sub> متناسب با تعداد الکترونهای ثانویه انتشاری از سطح است، لذا SEC از صفر ایجاد شده و ایم تعداد و والت فضایی شدت G<sub>D</sub> می می ایم ایم ایم ایم وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با معداد آن برای وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با افزایش مقدار SEC می ایم ایم ایم وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با افزایش مقدار SEC می می ایم ایم ایم ایم وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با افزایش مقدار SEC می می ایم وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با افزایش مقدار SEC می آن برای می وان GEC می آن برای وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با افزایش مقدار SEC می آن بارا ولیه در چشمه و افزایش طول پالس انتشاری می توان GEC می آن برای وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست می می می می می آن برای وقوع مالتی پکتینگ را ایجاد کرد.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Neglect space chaege effect

### ۳-۱- ایجاد شرایط اولیهی مناسب برای در نظر گرفتن بار فضایی

 ابتدا مقدار SEY<sub>max</sub> و E<sub>max</sub> را افزایش میدهیم (جدول ۲). برای جلوگیری از محاسبات طولانی و کاهش زمان شبیه سازی، حداکثر مجاز ۳ = SEY<sub>max</sub> در نظر گرفته شده است.

#### جدول۲: پارامترهای SEY انتخاب شده در مدل واگان

SEY <sub>max</sub>	$E_{max} (eV)$	W <sub>t</sub> (eV)	$W_1 (eV)$	$W_2(eV)$
٣	۲۰۰	صفر	11	۶۶ <b>.</b> .

- به علت عدم وقوع مالتی پکتینگ با افزایش SEY، ابتدا چشمهی نقطهای را با چشمهای شعاعی جایگزین
   می کنیم تا بار اولیهی صفحه، یکنواخت تر شود و سپس با روش سعی و خطا مقدار بار اولیه را تا حد مجاز
   افزایش می دهیم.
- پس از تعیین مقدار مناسب بار اولیه، در صورت عدم وقوع مالتی پکتینگ می توانیم با افزایش طول پالس انتشاری، تعداد ذرات را افزایش دهیم.

پس از انجام این مراحل، برای بررسی دینامیک باردار شدن سطح یا تغییرات شدت E<sub>DC</sub>، در طی فرآیند مالتیپکتینگ، مانیتور ولتاژی در زیر صفحه ایجاد میکنیم.<sup>۱۳</sup> نتایج مانیتور شده در ادامه آورده شده است شکل(۱۰).

### ۲-۲- نتایج حاصل از شبیهسازی مالتی پکتینگ با اثر بار فضایی

با در نظر گرفتن شرایط بخش(۳–۱) نمودارِ تعداد ذرات در طی زمان برای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> در شکل (۸) بدست میآید و مشاهده می شود که بار فضایی موجب اشباع مالتی پکتینگ (ثابت شدن تعداد ذرات) شده است. مطالعه یِ پارامترهای مالتی پکتینگ از جمله: آستانه یِ E<sub>RF0</sub>، اثر بار فضایی، بار ایجاد شده در سطح، W<sub>coll</sub> و I<sub>coll</sub> اهمیت دارند. در این بخش، این پارامترها را بررسی می کنیم.

<sup>&</sup>lt;sup>۱۳</sup> به این دلیل مانیتور را در زیر صفحه قرار دادهایم تا وجود مانیتور، باعث تغییر رفتار میدانها در بالای صفحه نشود.



- آستانه  $E_{RF0}$  ، بتدا افزایش یافته و سپس ،  $E_{RF.} \ge 77 \, \text{KV} / m$  ، ابتدا افزایش یافته و سپس  $E_{RF.} \ge 77 \, \text{KV} / m$  ، ابتدا افزایش یافته و سپس ثابت شدهاند و در کمتر از این مقادیر رشد نمایی ذرات دیده نمی شود، بنابراین آستانهی 77 KV / m . است. همچنین مشاهده می شود که با افزایش  $E_{RF0}$ ، نرخ رشد تعداد ذرات زیاد می شود اما تعداد آن ها در اشباع در مقادیر مختلف  $E_{RF0}$  تقریباً یکسان است.
- اثر بار فضایی: بدون بار فضایی و در راستای عمود بر صفحه(جهت y)، مانیتور میدان، E<sub>DC</sub> ثابتی را نشان میدهد اما با در نظر گرفتن بار فضایی، مانیتور شکل (۹) را نشان میدهد. همانطور که مشاهده می شود، شدت میدان با دور شدن از مرکز سطح (در راستای عمود) کاهش می یابد. این کاهش میدان به علت اثر بار فضایی است.



بار ایجاد شده در سطح: شکل (۱۰) تغییرات ولتاژ ایجاد شدهی حاصل از بار سطحی بر حسب زمان را برای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> نشان میدهد. این ولتاژ توسط مانیتور ولتاژ و در امتداد خط ۲ میلیمتری عمود بر زیر صفحه، محاسبه شده است. شدت ولتاژ در بالا و زیر صفحه متفاوت است، اما میتوان با مشاهدهی تغییرات ولتاژ (یا به طور متناسب E<sub>DC</sub>) در زیر صفحه، دینامیک بار دار شدن صفحه و اشباع بار را بررسی کرد.



شکل ۱۰: ولتاژ ایجاد شده (یا به طور متناسب E<sub>DC</sub>)در صفحه به ازای مقادیر مختلف E<sub>RF</sub> .

اشباع ولتاژ به ازای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub>، مشاهده میشود. با افزایش شدت E<sub>RF0</sub>، مقدار E<sub>DC</sub> به ازای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> تقریباً ثابت است. هنگامی که E<sub>RF0</sub> کمتر از مقدار آستانه است مالتی پکتینگ اتفاق نمیافتد و در نتیجه E<sub>DC</sub>, فقط، حاصل از بار اولیهیِ سطح خواهد بود که نسبت به زمان تغییر نمی کند. در E<sub>RF0</sub> بزرگتر از آستانه، پس از گذشت زمان به علت ثابت شدن بار صفحه (یا همان تعداد الکترونهای ثانویه) ولتاژ، ثابت میشود. ولتاژ نهایی به ازای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> تقریباً یکسان خواهد بود. تغییرات مقادیر میانگین ولتاژ در زمان اشباع نسبت به تغییرات E<sub>RF0</sub> برای SEY های مختلف در ادامه آورده شده است(شکل ۵۱). ا**نرژی برخوردی (است):** مقادیر انرژی برخوردی نیز مانند سایر پارامترهای مالتیپکتینگ پس از گذشت زمان کاهش یافته و در حالت اشباع، ثابت میشود (شکل ۱۱).



برای مشاهدهی اثر بار فضایی بر W<sub>coll</sub> و شدت مالتی پکتینگ، نمودار تغییراتِ تعداد ذرات بر حسب W<sub>coll</sub> را با اثرات بار فضایی و بدون در نظر گرفتن این اثرات، به ترتیب در شکلهای (۱۲-الف) و (۱۲-ب) نشان میدهیم.



شکل۱۲: تعداد ذرات بر حسب انرژی برخوردیِ آنها الف-بدون در نظر گرفتن بار فضایی ب- با در نظر گرفتن بار فضایی.

همانطور که در شکل (۱۲- الف)مشاهده می شود، بدون اثر بار فضایی، با افزایش تعداد ذرات، مقدار W<sub>coll</sub> ثابت است ولی با در نظر گرفتن بار فضایی، W<sub>coll</sub> ابتدا کاهش و سپس به یک مقدار ثابت میل می کند که این مقدار ثابت، تقربیا برابر با W<sub>1</sub> است. علاوه بر این تعداد ذرات و شدت W<sub>coll</sub> در شبیهسازی بدون بار فضایی بیشتر از شبیهسازی با بار فضایی است.

## ۴- تأثیر پارامترهای SEY با در نظر گرفتن بار فضایی

هدف این بخش، بررسی تأثیر انرژیهای  $W_1$  و  $W_2$  بر ویژگیهای مالتی پکتینگ در اشباع است. در مدل واگان مقادیر  $W_1$  و  $W_1$  و  $W_1$  و  $W_1$  و  $W_1$  و  $W_1$  تعیین می شوند. در اینجا برای بررسی اثر تغییرات  $W_1$  و  $W_1$  و  $W_1$  را تغییر می دهیم (جدول ۳).

SEY	SEY <sub>max</sub>	E <sub>max</sub> (eV)	W <sub>t</sub> (eV)	W1 (eV)	W <sub>2</sub> (eV)
(1)	٣	۲۰۰	•	11	<i>\$</i> <b>9</b>
(٢)	٣	7	۶	18	۶۵۰۰
(٣)	٣	۲	٧	77	3711

جدول ۳: پارامترهای SEY انتخاب شده در مدل واگان

با انتخاب هر یک از SEYهای جدول (۳)، شبیه سازی را به ازای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> انجام داده و آستانهی E<sub>RF0</sub> را مانند شکل (۸) برای هر SEY، تعیین می کنیم(در شکل ۱۳ آستانه ها مشخص شده اند). در هر اجرا، مقادیر میانگین W<sub>coll</sub> و I<sub>coll</sub> را در زمان اشباع، محاسبه می کنیم و بر حسب تغییرات E<sub>RF0</sub> نشان می دهیم(شکل (۱۳). در شکل (۱۳-الف)، مشاهده می شود که در هر سه SEY، به ازای مقادیر آستانهی E<sub>RF0</sub>، الکترونهای ثانویه، بیش ترین W<sub>Coll</sub> را کسب می کنند. نکته قابل توجه این است که برای هر SEY با افزایش E<sub>RF0</sub>، از یک مقدار به بعد، W<sub>Coll</sub> تغییر نمی کند و نزدیک به W<sub>1</sub> ثابت می ماند.



شکل ۱۳: الف-تغییرات انرژی برخوردیِ (W<sub>coll</sub>) میانگین ب- تغییرات جریان برخوردی میانگین(I<sub>coll</sub>)، در طول فر آیند اشباع مالتی پکتینگ.

شکل(۱۳–ب)، نشان میدهد که، سرعت افزایش جریانهای برخوردی با  $W_1$  ارتباط دارد، هر چه  $W_1$  بزرگتر باشد، نرخ رشد جریان برخوردی نسبت به مقادیر مختلف  $E_{
m RF0}$ ، کمتر است. با توجه به این دو شکل، تغییرات جریان و انرژیهای برخوردی با  $W_2$ ، رابطهی مشابهی ندارند.

این واقعیت که  $W_{coll}$  در اشباع تقریباً به مقادیر مختلف  $E_{
m RF0}$  بستگی ندارد را می وان با تغییر فاز اولیه ذرات تشدیدی توضیح داد. شکل (۱۴) تغییر فاز ذرات اولیه نسبت به مقادیر مختلف  $E_{
m RF0}$  را برای سه مقدار مختلف  $W_{coll}$  در اشباع، نشان می دهد.



شکل ۱۴: تغییر فازهای اولیه نسبت به تغییر مقادیر مختلف E<sub>RF0.</sub>

همانطور که در شکل مشاهده میشود، در زمان اشباع مالتیپکتینگ، فاز اولیه ذرات با تغییر مقادیر E<sub>RF0</sub> به مقداری ثابت میرسد و میتوان نتیجه گرفت که مکانسیم توسعهی مالتیپکتینگ و اشباع آن به این صورت است که فاز ذرات در زمان اشباع به ازای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> تقریباً ثابت میشود و درنتیجه انرژی برخوردی آنها به ازای این مقادیرِ میدان، تغییر نمیکند.

در شکل (۱۵) تغییرات ولتاژ برای مقادیر مختلف E<sub>RF0</sub> برای SEY های جدول(۳) نشان داده شده است.



شکل1۵: تغییر ولتاژ ایجاد شده بر اثر باردار شدن صفحه بر حسب شده E<sub>RF.</sub>

همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده میشود، ولتاژ در آستانهی E<sub>RF0</sub> به مقدار بسیار زیادی افزایش مییابد. این بدان معنی است که الکترونهایی که انرژی آنها بیشتر از W<sub>1</sub> است به سرعت تشدید شدهاند و مالتیپکتینگ توسعه یافته است و در زمان اشباع، مقادیر ولتاژ با افزایش E<sub>RF0</sub> تقریبا ثابت میماند.

ېژوهشهای نوین فیزیک

### ۵- نتیجه گیری

در شبیه سازی بدون اثر بار فضایی، E<sub>DC</sub> با شدت مورد نیاز، توسط کاربر وارد می شود در حالی که با در نظر گرفتن بار فضایی، E<sub>DC</sub> متناسب با تعداد الکترون های ثانویه انتشاری از سطح است، لذا E<sub>DC</sub> از صفر ایجاد شده و به تدریج افزایش می یابد در نتیجه در ابتدای شبیه سازی مقدار آن برای وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست. ناکافی بودن شدت E<sub>DC</sub> در ابتدای شبیه سازی با افزایش تعداد ذرات در شروع مالتی پکتینگ، جبران می شود. افزایش تعداد ذرات نیز با افزایش مقدار SEY، افزایش بار اولیه در چشمه و افزایش طول پالس انتشاری از چشمه، انجام می شود. در زمان اشباع، مقادیر انرژی برخوردی ذرات (W<sub>coll</sub>) و ولتاژ اندازه گیری شده ی سطح (که متناسب با E<sub>DC</sub> و بار سطح است) با افزایش مقدار E<sub>RF</sub>، تقریباً ثابت می مانند.

علت ثابت ماندن مقدار  $W_{coll}$  را میتوان با مشاهدهی تغییر فاز اولیهیِ ذرات بر حسب تغییر  $E_{RF0}$  توضیح داد و چنین نتیجه گرفت که مکانسیم توسعهی مالتی پکتینگ و اشباع آن به این صورت است که فاز ذرات در زمان اشباع به ازای مقادیر مختلف  $E_{RF0}$  تقریباً ثابت میشود و درنتیجه انرژی برخوردی آنها به ازای این مقادیرِ میدان، تغییر نمی کند. بدون اثر بار فضایی و در یک مقدار ثابت  $E_{RF0}$ ، با توسعهی مالتی پکتینگ و افزایش نمایی تعداد ذرات، مقدار  $W_{coll}$  ثابت است و در یک مقدار ثابت  $E_{RF0}$ ، با توسعهی مالتی پکتینگ و افزایش نمایی تعداد ذرات، مقدار  $W_{coll}$  ثابت است ولی با در نظر گرفتن بار فضایی،  $W_{coll}$  ابتدا کاهش و سپس به یک مقدار ثابت میل می کند که این مقدار ثابت تقربیاً برابر با  $W_{l}$  است. علاوه بر این در نظر گرفتن بار فضایی باعث کاهش شدت مالتی پکتینگ (کاهش تعداد ذرات) و کاهش مقدار  $W_{coll}$ 

بررسی انرژیهای  $W_1$  و  $W_2$  در اشباع مالتیپکتینگ نیز نشان میدهد که  $W_1$  نقش مهمی در تغییرات پارامترهای مالتیپکتینگ از جمله  $W_{coll}$  و  $I_{coll}$  دارد به طوریکه با افزایش  $E_{RF0}$  در اشباع.  $W_{coll}$  تغییر نمی کند و مقدار آن تقریباً به  $W_1$  میل می کند. همچنین نرخ رشد جریانهای برخوردی نیز با  $W_1$  ارتباط دارد، هر چه مقدار  $W_1$  در SEY مای مختلف بیشتر باشد، شیب افزایش جریانهای برخوردی نسبت به افزایش مقادیر  $E_{RF0}$ ، کمتر است.

### 8- مراجع

- [1] Buyanova, M., et al. "Influence of secondary emission yield on the saturation properties of multipactor discharges between two parallel metal plates." Physics of Plasmas ۱۷.۴(۲·۱·):
   .۴۳۵.۴.
- [2] Semenov, V, et al. "Multipactor suppression in amplitude modulated radio frequency fields." Physics of Plasmas λ.11 (٢٠٠1): Δ.٣۴-Δ.٣٩.

- [3] Romanov, G. "Simulation of Multipacting with Space Charge Effect." American Journal of Physics and Applications °.FERMILAB-PUB-1Y-۳۹۹-TD (۲۰۱۷).
- [4] Mostajeran, M, Nikdoust, A.M, "The secondary electron yield in multipactor phenomenon and Python programming." Journal of Research on Many-body Systems 1./(((.)): 1((.)))
- [5] Mostajeran, M, Eden T. T, Ursula v. R. "Uncertainty in the isosceles multipactor threshold of triangularly grooved surfaces based on polynomial chaos." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 997(Y,Y): 150...).
- ۲۰۲۱[۶] مستأجران، م. کاظمی، ف، "شبیهسازی مالتی پکتور تک سطحی در دی الکتریکها با استفاده از کد تک الکترونی"، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه رازی کرمانشاه،(۱۳۹۹)
- [۷] مستأجران، م. کاظمی، ف، نیکدوست ،ع، "شبیهسازی مالتیپکتینگ دی الکتریکها "، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه تبریز، (۱۳۹۸)
- [۸] مستأجران، م. کاظمی، ف، "بررسی عوامل مؤثر بر مالتیپکتینگ در دیالکتریکها" ، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۴۰۰)

# Simulation of Space charge effect in single-sided multipacting phenomenon using CST PIC STUDIO software

<sup>1</sup>Mostajeran, Maryam; <sup>1</sup>Kazemi, Firozeh

<sup>1</sup>Yazd University, faculty of physics

#### Abstract

Multipacting which occurs due to high amplification in secondary electrons, is a typical phenomenon in the radiofrequency structures. The Coulomb force between the secondary electrons induces space charge and consequently saturates the multipacting phenomenon. A realistic study of this phenomenon requires considering the effect of space charge. Simulation of the space charge effect by CST PIC STUDIO software is not simply possible and pose some challenges for users. In this paper, it is described how to consider space charge in a single-side multipacting simulation for a simple model. The effect of space charge on the simulation results has been investigated and the threshold of the the radio frequency field amplitude for multipacting occurrence has been obtained.

Key words: Multipacting, Simulation, CST software, Space charge