محاسبه ضریب الکترون ثانویه برای سطوح شیاردار با استفاده از نرم‌افزار CST STUDIO SUITE

INC29-1108

مریم مستأجران، فیروزه کاظمی*

دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، صندوق پستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱ ، یزد، ایران.

چکیده:

یکی از روش‌های کاهش تولید الکترون ثانویه در ساختارهای شتاب‌دهی و رادیوفرکانسی، شیاردار کردن سطوح است. بهینه‌سازی و بررسی هندسه‌یِ شیارها با استفاده از شبیه‌سازی، نقش کارآمدی در تحقیقات تجربی دارد. درصورتی‌که که بتوان با روش‌هایِ شبیه‌سازیِ مناسب، ساختار شیاردار شده‌یِ با ضریب الکترون ثانویه موردنظر طراحی یا بهینه کرد، هزینه‌هایِ بسیاری در تحقیقات تجربی کاهش می‌یابد. نرم‌افزار CST ازجمله نرم‌افزارهایی است که برای شبیه‌سازیِ الکترون ثانویه و پدیده‌های ناشی از آن مانند انواع تخلیه‌های الکتریکی به کار می‌رود. در این نرم‌افزار، محاسبه‌یِ ضریب الکترون ثانویه برای سطوح شیاردار باید با روشی مناسب توسط کاربر صورت گیرد. در این مقاله، سطحی از جنس مس را در نرم‌افزار CST شیاردار کرده و رهیافت مناسبی برای محاسبه‌ی ضریب الکترون ثانویه ارائه می‌دهیم، نتایج محاسبه‌یِ این ضریب را با نتایج تئوری موجود ازجمله مدل واگان مقایسه می‌کنیم. سپس تغییرات نسبت ارتفاع به عرض شیارها را بر ضریب الکترون ثانویه موردبررسی قرار می‌دهیم.

کلیدواژه‌ها: الکترون ثانویه، سطح شیاردار، نرم‌افزار CST.

Calculation of secondary Electron Yield for grooved Surfaces using CST STUDIO SUITE software

M. Mostajeran [1], F. Kazemi [1]

Physics Department, Faculty of science, Yazd University, P.O.BOX: 8915818411, Yazd, Iran.

Abstract:

One of the ways to reduce secondary electron production in acceleration and radio frequency structures is grooving metal surfaces. Optimizing the effective parameters of grooves using simulation has an efficient role in experimental research. Simulation methods can be used to design grooved structures with the desired secondary electron yield, which will reduce many experimental costs. CST software is one of the software which is used to simulate the secondary electron and the related phenomena, such as different kinds of electrical discharges. In this software, the calculation of the secondary electron yield for the grooved surfaces should be done by the user with an appropriate method. In this article, we make rectangular grooves on a copper surface in CST software and provide a suitable approach for calculating the secondary electron yield. The result of the calculation is compared with the existing theoretical results, the Vaughan model, in order to verify the accuracy of the calculation, we then examine the changes in the groove dimensions on the secondary electron yield.

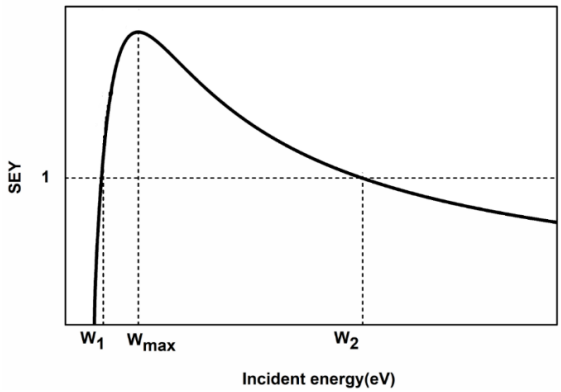
Keywords: Secondary electron, grooved surface, CST software.

۱. مقدمه

انتشار الکترون ثانویه (SEE[1]) عامل اصلی پدیده‌هایِ مضری مانند ابر الکترونی[2] در شتاب‌دهنده‌هایِ ذرات[۱]، مالتی پکتینگ[3] در ساختارهای رادیوفرکانسی[۲] و تخلیه‌ی الکترواستاتیکی در سطح بیرونی ماهواره‌ها است[۳] و موجب کاهش عملکرد این دستگاه‌ها می‌شود.ضریب الکترون ثانویه(SEY [4]) اغلب برای توصیف SEE ماده استفاده می‌شود و با رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$SEY = \frac{N_i}{N_c} \qquad (۱)$$

N_i الکترون‌های ثانویه ساطع‌شده از سطح و N_C الکترون‌های اولیه برخوردی است. منحنی عمومی SEY برحسب انرژی برخوردی الکترون‌ها برای همه‌ی مواد رفتاری کلی دارد (شکل ۱).



شکل۱. رفتار عمومی SEY برحسب انرژی برخوردی.

در این منحنی، W_1و W_2، مقادیر انرژی هستند که به ازای آن‌ها SEY برابر با یک است ، W_{max}، میزان انرژی به ازای SEY_{max} است. همان‌طور که اشاره شد کاهش یا از بین بردن SEY سطوح، برای جلوگیری از اختلال در عملکرد ساختارهای رادیوفرکانسی ضرورت دارد، لذا تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است. روش‌های از بین بردن یا کاهش SEY را می‌توان به دو دسته عمده طبقه‌بندی کرد: ۱)پوشش سطح[5]، ۲) اصلاح توپوگرافی سطح[6]. اگرچه یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش SEY در سطوح فلزی، پوشش این سطوح با موادی با SEY کم است (روش اول)، اما به دلیل عدم وجود مواد پایدار با SEY پایین، این روش همیشه پاسخگو نیست. روش دوم برای کاهش SEY شیاردار نمودن سطوح است[۴]. کاهش SEY در سطوح فلزی با ایجاد شیارهایی در مقیاس میلی‌متر تا میکرومتر در چندین پژوهش تجربی مشاهده شده است. [۵-۶]. اخیراً از تکنولوژی لیزری استفاده کرده و با ایجاد شیار، روی سطح مسی، SEY سطح را تنظیم کرده و مقدار آن را به کمتر از واحد کاهش داده‌اند[۷] تا از بروز پدیده‌ی مالتی‌پکتینگ در شتابدهنده‌ها جلوگیری کنند. در این تحقیقات تجربی، تعیین نسبت مناسب ابعاد شیارها به‌طوری‌که SEY کاهش یابد، با تغییر پارامترهای لیزر کنترل شده است که هزینه‌بر هستند، بنابراین با شبیه‌سازی سه‌بعدی آن‌ها می‌توان موجب کاهش هزینه‌ها شد و ساختار شیاردار شده‌یِ مناسبی با SEY موردنظر طراحی یا بهینه کرد. یکی از پارامترهای مهم در بررسی سطوح شیاردار، نسبت ارتفاع به عرض شیار است که به آن نسبت تصویر[7] می‌گویند (AR). به‌طور تجربی مشاهده شده است که با افزایش این پارامتر،SEY کاهش می‌یابد. هدف ما این است که با استفاده از شبیه‌سازی، مقادیر SEY را برای یک سطح شیاردار محاسبه کنیم و تغییرات SEY با تغییر AR در شیارها را برای سطح موردنظر به دست

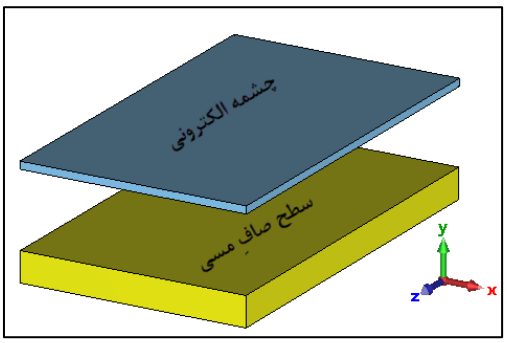
---

[1] Secondary Electron Emission
[2] Electron Cloud
[3] Multipacting
[4] Secondary Electron Yield
[5] Surface Coating
[6] Surface Topography Modification.
[7] Aspect Ratio

آورده و با نتایج تجربیِ موجود مقایسه کنیم. مطالعه‌یِ هندسه‌یِ شیار، مستلزم محاسبه‌ی دقیق SEY در نرم‌افزار است. مقدار SEY برای سطوح مسطح، با دو مدل واگان[8] و فرمن[9] در این نرم‌افزار محاسبه می‌شود. برای یک سطح شیاردار باید با روش‌های مناسب و استفاده از امکانات ردیابیِ ذرات در نرم‌افزار، SEY را محاسبه کرد. در این مقاله در بخش ۲، به بررسی چالش محاسبه SEY در یک سطح شیاردار می‌پردازیم و رهیافت مناسبی برای محاسبه‌ی این ضریب با استفاده از شبیه‌سازی ارائه می‌دهیم. در بخش ۳، نتایج مربوط به‌درستی روش پیشنهادی را ارائه می‌دهیم و با تغییر AR در شیارها، تغییرات SEY را بررسی می‌کنیم.

۲. روش شبیه‌سازی

برای محاسبه‌ی تعداد الکترون‌های ثانویه در یک سطح شیاردار، نخست رهیافت مورداستفاده را برای محاسبه‌یSEY از یک سطح بدون شیار بکار بردیم تا با مقایسه SEY به‌دست‌آمده از این روش با SEY مدل واگان، درستی رهیافت موردنظر را بررسی کنیم. در نرم‌افزار CST دو ماژول ذره در سلول(PIC)[10] و ماژول ردیابی ذره(Trk)[11] برای شبیه‌سازی انتشار الکترون ثانویه وجود دارد. ما در این بخش از ماژول PIC استفاده کردیم. مطابق شکل (۲) صفحه‌ای مسی با ابعاد ۱۵×۲۰ میلی‌متر ایجاد کردیم. چشمه‌ای سطحی هم‌اندازه با صفحه مسی در فاصله چند میلی‌متری آن قراردادیم که تعداد نقاط انتشار این چشمه در حدود ۲۰۰ نقطه بود. انرژی اولیه‌یِ الکترون‌ها ۲۲ الکترون‌ولت در نظر گرفته شد. خاصیت الکترون ثانویه صفحه مسی را با مدل واگان تعریف کردیم. طبق مدل واگان، ماکسیمم SEY برای مس ۱٫۸ است که به ازای انرژی ماکسیمم ۱۵۰ الکترون به‌دست‌آمده است.



شکل۲. صفحه مسی مسطح به همراه چشمه سطحی.

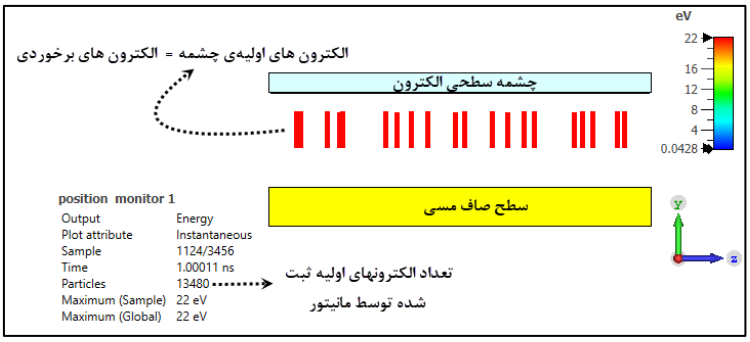
برای شمارش تعداد ذرات برخوردی و ثانویه از مانیتورهای موجود در محیط PIC استفاده کردیم. در اینجا دو روش برای محاسبه SEY به کار بردیم.

روش اول محاسبه SEY با شمارش تعداد ذرات توسط مانیتور ذرات

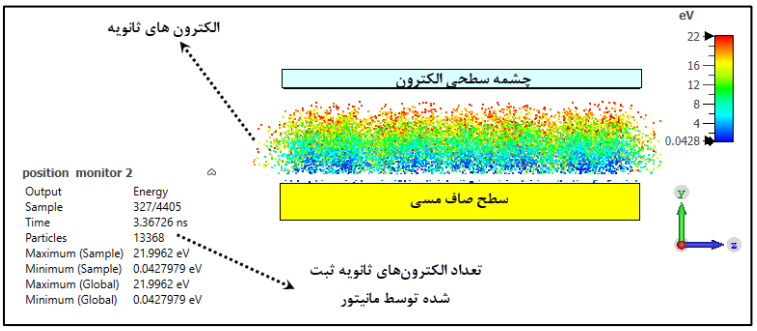
در این روش مانیتورهای ثبت‌کننده ذرات باید با سعی و خطا در محل‌های مناسبی در مدل قرار داده می‌شد. سپس با مشاهده‌ی حرکت ذرات در طول زمان و انتخاب زمان مناسب، تعداد ذرات برخوردی و ثانویه که توسط مانیتور ذرات ثبت‌شده‌اند را مشاهده کرد (شکل ۳ الف و ب).

---

[8] Vaughan
[9] Furman
[10] Particle in Cell
[11] Particle Tracking



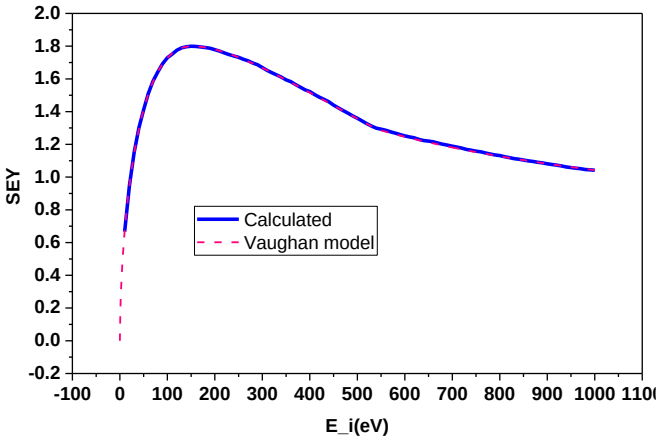
الف



ب

شکل ۳. ثبت الکترون‌های برخوردی و ثانویه در محیط PIC.

شکل ۳.الف ذرات اولیه از چشمه‌یِ ذرات را نشان می‌دهد که به‌عنوان ذرات برخوردی به سطح مسی برخورد می‌کنند. مانیتوری که در مسیر این ذرات اولیه قرار داده‌شده بود، در انرژی اولیه ۲۲ الکترون‌ولت تعداد آن‌ها را ۱۳۴۸۰ ثبت کرده است. در شکل ۳.ب ذرات ثانویه انتشاری از سطح، مشاهده می‌شود، که تعداد آن‌ها برابر با ۱۳۳۶۸ ذره توسط مانیتور ثبت شده است، بنابراین با استفاده از رابطه‌ی ۱ مقدار SEY در انرژی ۲۲ الکترون‌ولت برابر با $\mathrm{SEY} = \frac{۱۳۳۶۸}{۱۳۴۸۰} = ۰/۹۹۱۶$ به دست آمد که با نتیجه‌یِ مدل واگان کاملاً مطابقت دارد . اکنون باید برای طیفی از انرژی‌های برخوردی مقدار SEY را به دست آورده تا بتوان نتیجه‌گیری کرد. به‌منظور به دست آوردن نمودار SEY و مقایسه آن با نمودار SEY در مدل واگان (SEY_{max}=1.8, W_{max}=150eV)، انرژی برخوردی ذرات را به‌صورت پارامتر در CST تعریف کرده و شبیه‌سازی را به ازای مقادیر صفر تا ۱۰۰۰ الکترون‌ولت با گام ۱۰ الکترون‌ولت انجام داده و در هر گام مقدار SEY را محاسبه کردیم. . شکل (۴) نمودار SEY محاسبه‌شده را به همراه نمودار SEY مدل واگان نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار SEY برحسب انرژی برخوردی.

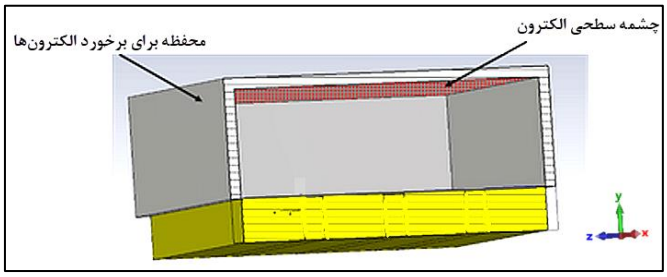
همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار SEY حاصل با نمودار SEY در مدل واگان در تطابق کامل است. محاسبه‌ی SEY با این روش مستلزم کنترل دستی زمان مشاهده ذرات توسط کاربر برای ثبت دقیق ذرات است. بنابراین روش مناسب‌تری برای این کار ارائه کردیم.

روش دوم محاسبه SEY با محاسبه جریان‌های برخوردی و انتشاری

روش ساده‌تر و آسان‌تر این بود که از مانیتورهای جریان استفاده کنیم. در نرم‌افزار CST امکان محاسبه‌یِ جریان برخوردی به یک جسم صلب، وجود دارد. بنابراین در اطراف صفحه فلزی یک محفظه ایجاد کردیم (شکل ۵) به این منظور که جریان الکترون‌های ثانویه پس از ساطع شدن از صفحه‌یِ فلزی به محفظه برخورد کرده و توسط مانیتور جریانی که از قبل برای محفظه تعریف شده است، ثبت شوند. سپس با استفاده از رابطه ۲ مقدار SEY را به ازای هر انرژی برخوردی محاسبه کردیم.

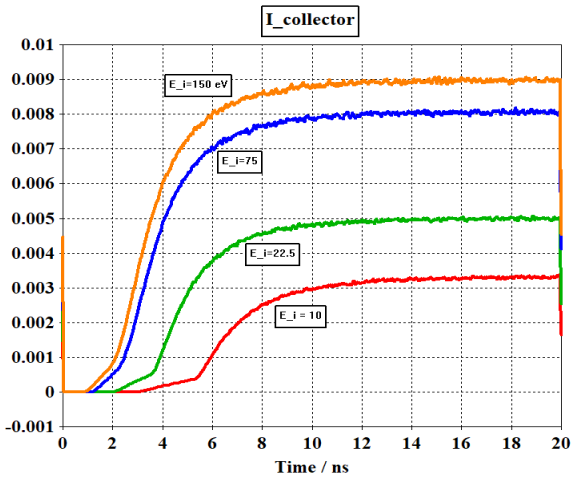
$$SEY = \frac{I_{emission}}{I_{collision}} \qquad (۲)$$

در این رابطه $I_{collision}$ جریان اولیه انتشاری از چشمه است که به‌عنوان جریان برخوردی به سطح مسی برخورد می‌کند. در اینجا مقدار این جریان ۰/۵ آمپر است. $I_{emission}$ جریان الکترون‌های ثانویه است که پس از تماس با محفظه توسط مانیتور تعریف شده برای آن ثبت می‌شود. اطمینان حاصل شده که جریان الکترون‌ها پس از بازگشت از سطح به مانیتور ذرات برخورد می‌کنند.



شکل۵. صفحه مسی مسطح به همراه محفظه.

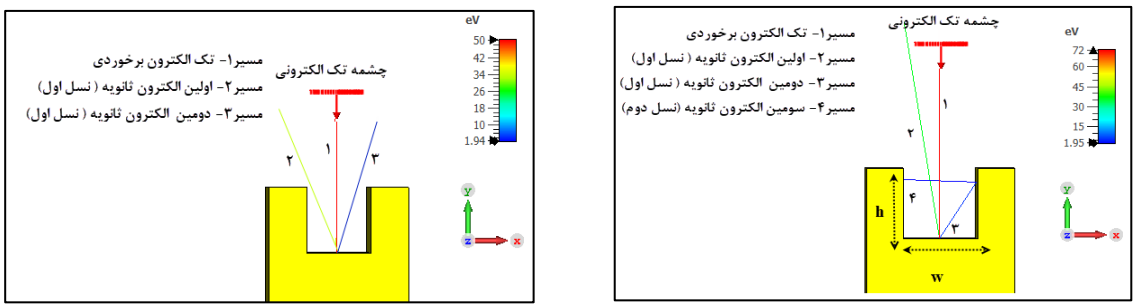
این روش نسبت به روش قبل کارآمدتر است زیرا نیازی به کنترل زمان مناسب برای ثبت ذرات برخوردی و انتشاری توسط مانیتور ذرات ندارد و مقادیر جریان‌ها در قسمت نتایج نرم‌افزار قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش، با جریان برخوردیِ ثابتِ ۰/۵ آمپر و در انرژی‌های برخوردی متفاوت، جریان الکترون‌های ثانویه را محاسبه کردیم(شکل ۶). با استفاده از معادله (۲) مقدار SEY محاسبه می‌شود که مقادیر آن مطابق با مدل واگان است.



شکل۶. نمودار SEY برحسب انرژی برخوردی.

مثلاً با توجه به شکل (۶) در انرژی ۱۵۰ الکترون‌ولت جریان الکترون‌های ثانویه ثبت‌شده طبق شکل ۰٫۰۰۹ آمپر است. جریان اولیه از چشمه نیز ۰٫۵ آمپر است بنابراین $SEY = \frac{۰/۰۰۹}{۰/۵} = ۱/۸$ است که در تطابق با نتایج مدل واگان است.

ابتدا تک شیاری مستطیلی در ماژول ردیابی ذرات ایجاد کردیم (شکل ۷) تا مسیر حرکت الکترون‌های برخوردی و ثانویه را مشاهده کنیم. ابتدا ارتفاع شیار (h) و عرض شیار (w) برابر با ۰٫۲۵ میلی‌متر در نظر گرفتیم بنابراین $AR = \frac{h}{w} = 1$. از موارد مهم در شبیه سازیِ سطح شیاردار و محاسبه‌ی SEY، انتخاب نوع چشمه الکترونی و فاصله مناسب آن با سطح است. چشمه‌ای تک الکترونی برای انتشار الکترون اولیه به صورت عمود بر شیار ایجاد کردیم. این چشمه یک الکترون با انرژی اولیه ۷۰ الکترون‌ولت و با زاویه صفر نسبت به خط عمود ساطع می‌کند. برای شیار، خاصیت انتشار الکترون ثانویه با مدل واگان تعریف کردیم. سپس با استفاده از حل‌کننده‌ی ردیابی ذرات، شبیه سازیِ مسیر الکترون را انجام دادیم.



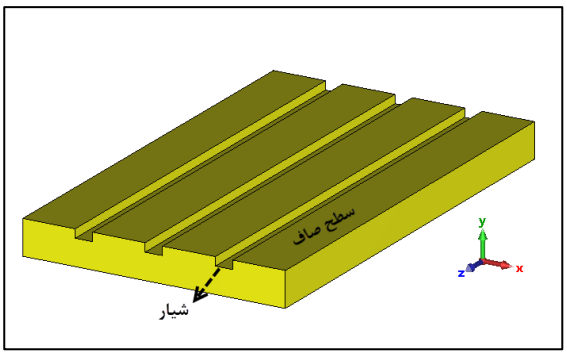
الف ب

شکل۷. مسیر الکترون برخوردی و ثانویه در تک شیار مستطیلی الف-شبیه‌سازی اول ب- شبیه‌سازی دوم.

مسیر حرکت الکترون برخوردی و الکترون‌های ثانویه مطابق شکل (۷) به دست آمد. در شکل ۷. الف پس از برخورد الکترون اولیه‌ی برخوردی (مسیر شماره۱) به سطح پایینِ شیار، ۲ الکترون ثانویه‌ی شماره ۲ و ۳ تولیدشده‌اند که چون در برخورد اول از سطح به وجود آمده‌اند آن‌ها را الکترون‌های نسل اول می‌نامند. ذره ۲ از سطح شیار خارج شده و ذره ۳ با برخورد به دیواره شیار، الکترون ثانویه‌ی شماره ۴ را ایجاد کرده است که به آن الکترون ثانویه‌ی نسل دوم می‌گویند. ذره ۴ به علت انرژی پایین توسط سطح شیار جذب می‌شود و درنتیجه تعداد الکترون‌های ثانویه کاهش می‌یابد. اما بر طبق رابطه‌ی ۱ نمی‌توان گفت که SEY برابر با $\frac{۱}{۱}$ است، زیرا در این حل‌کننده ما از یک چشمه تک الکترونی استفاده کردیم که به معنای انتشار تنها یک ذره است. از طرفی در ماژول‌هایِ مربوط به ذره از مدل‌های انتشارِ احتمالی استفاده می‌شود، بنابراین برای یک ذره، نتیجه مربوط به برخورد و انتشار الکترون ثانویه، تصادفی است به این معنی که ما اکنون ۱ الکترون ثانویه تولیدشده از سطح داریم، اما ممکن است در انتشار بعدی چشمه ۲ ذره یا غیره تولید شود. در شکل ۷.ب با اجرای مجدد برنامه و با انرژی اولیه ۵۰ الکترون‌ولت، الکترون برخوردی چشمه پس از برخورد با سطح پایینِ شیار دو الکترون ثانویه‌ی شماره ۲ و ۳ تولید کرده که هر دو ذره از سطح شیار خارج‌شده‌اند و طبق رابطه ۱ SEY برابر با $\frac{۲}{۱}$ محاسبه می‌شود. بنابراین ازنظر آماری توجیه درستی در استفاده از نتایج یک چشمه تک الکترونی وجود ندارد. و به نظر می‌رسد که باید از یک چشمه با قابلیت انتشار بیش از یک ذره استفاده کنیم. بنابراین در ادامه‌ی کار ما برای سطح شیاردار نیز مشابه با سطح بدون شیار در بخش(۲) از چشمه الکترونی سطحی با مقدار الکترون اولیه قابل‌توجه استفاده کردیم و نتایج را به دست آوردیم.

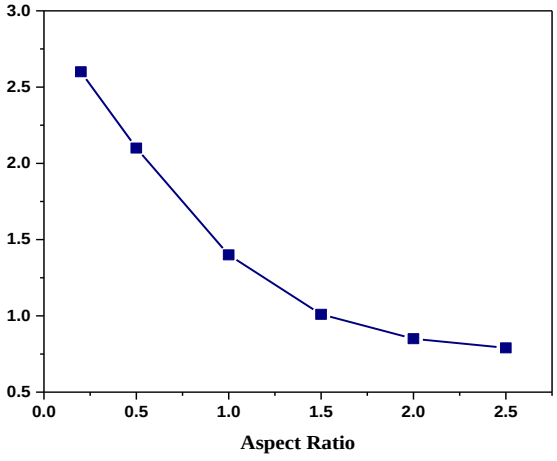
۳.نتایج

بعدازاینکه صحت نتایج به دست آمد با شیاردار کردن سطح به بررسی تغییرات AR پرداختیم. ما در اینجا از شیارهای ساده مستطیلی با مشخصات تک شیارِ شکل (۱) استفاده کردیم (شکل ۸).
در داخل شیارها باید مش متراکم باشد تا همه ذرات درون شیار، در دامنه‌یِ محاسبات قرار گیرند و نتایج با دقت بالاتری محاسبه شود(۳ الی ۵ سلول مش در هر شیار).



شکل۸. سطح شیاردار.

با تغییر AR شیارها، مقادیر SEY را در شکل ۹.الف محاسبه کردیم.



شکل۹. تغییرات SEY به ازای تغییرات نسبت ارتفاع به عرض.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش AR شیارها، SEY کاهش می‌یابد که تحقیقاتِ تجربی نیز این روند کاهشی را در کاربردهای موردنظر خود نشان داده‌اند .به‌طور مثال در [۷] نیز از یک نمونه مس با ابعاد ۱۵ در۲۰ استفاده‌شده ، که با لیزر شـــیارهایی در ســـطح نمونه ایجاد کرده و به بررســـی تغییر AR و اثر آن بر مقادیر SEY به‌صـــورت تجربی پرداخته‌شده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان گفت که در سطح شیاردار شده‌ی موردنظر ما در این مقاله و با تعداد شیارهایی انتخابی اگر نسب ارتفاع به عرض این شیارها به‌طور مثال ۱/۵ و بیشتر از آن انتخاب شود، مقدار SEY به کمتر از واحد کاهش می‌یابد که موجب عدم ایجاد پدیده‌های مخربی مانند مالتی‌پکتینگ خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری

انتشار الکترون ثانویه در ساختارهای شتابدهی و رادیوفرکانسی موجب ایجاد پدیده‌هایِ مضر تخلیه الکتریکی می‌شود و عملکرد این ساختارها را دچار اختلال می‌کند، لذا کاهش یا از بین بردن این فرآیند اهمیت زیادی دارد. ازجمله روش‌هایِ اصلی در کاهش این پدیده، شیاردار کردن سطح است. عمده مطالعات این روش به‌صورت تجربی انجام شده است که مستلزم هزینه‌های زیادی است. روش‌های شبیه‌سازی می‌تواند موجب کاهش این هزینه‌ها شود. در

این مقاله ما به بررسی این سؤال پرداختیم که آیا می‌توان با استفاده از نرم‌افزار CST، ضریب الکترون ثانویه سطوح شیاردار را محاسبه و با نتایج تجربی موجود مقایسه کرد؟ برای پاسخ به این سؤال با استفاده از امکانات نرم‌افزار CST و روش سعی و خطا مدل‌سازی مناسبی انجام داده و رهیافت قابل قبولی برای محاسبه ضریب الکترون ثانویه در یک سطح مسی شیاردار ارائه کردیم، نتایج محاسبه‌یِ SEY را با مدل واگان مقایسه کردیم و نشان دادیم که تطابق کاملی بین نتایج وجود دارد. سپس نسبت ارتفاع به عرض شیار که از پارامترهای مهم در تعیین هندسه شیار است را تغییر داده و اثر آن را بر ضریب الکترون ثانویه بررسی کردیم. نتایج نشان داد که با افزایش این نسبت، ضریب الکترون ثانویه کاهش می‌یابد که مطابق با نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دیگر ساختارها است. با توجه به این نتایج نشان دادیم که در ساختار موردنظر و با تعداد شیارهای ایجادشده در این مدل، اگر نسبت ارتفاع به عرض شیار را بیشتر از ۱٫۵ در نظر بگیریم، مقدار SEY به کمتر از واحد کاهش می‌یابد.

۶. مراجع

1. Furman, M. A., & Pivi, M. T. F. (2002). Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission. *Physical review special topics-accelerators and beams*, *5*(12), 124404.
2. Hueso, J., Vicente, C., Gimeno, B., Boria, V. E., Marini, S., & Taroncher, M. (2010). Multipactor effect analysis and design rules for wedge-shaped hollow waveguides. *IEEE transactions on electron devices*, *57*(12), 3508-3517.
3. Balcon, N., Payan, D., Belhaj, M., Tondu, T., & Inguimbert, V. (2011). Secondary electron emission on space materials: Evaluation of the total secondary electron yield from surface potential measurements. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *40*(2), 282-290.
4. Mostajeran, M., Tulu, E. T., & van Rienen, U. (2021). 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*, *993*, 165001.
5. Nistor, V. C., Galán, L., Soriano, L., Galán-Estella, F., García-Camarero, E., García-Camarero, E., ... & Raboso, D. (2008, September). New coatings of silver and gold with strong surface roughness for significantly reducing multipactor effect in RF components. In *6th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation*.
6. Pivi, M., King, F. K., Kirby, R. E., Raubenheimer, T. O., Stupakov, G., & Le Pimpec, F. (2008). Sharp reduction of the secondary electron emission yield from grooved surfaces. *Journal of Applied Physics*, *104*(10), 104904.
7. Bajek, D., Wackerow, S., Zanin, D. A., Baudin, L., Bogdanowicz, K., Valdivieso, E., ... & Abdolvand, A. (2020). Role of surface microgeometries on electron escape probability and secondary electron yield of metal surfaces. *Scientific reports*, *10*(1), 1-8.