

## ارزیابی عملکرد آشکارساز گازی میکرومگا در حضور پدیده پخش با استفاده از شبیه سازی به روش المان محدود

علی رضای مقدم<sup>۲\*</sup>، شهیار سرآمد<sup>۱</sup>، حجت اله ماهانی<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک
۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

### چکیده

در این مقاله عملکرد آشکارساز گازی تناسبی میکرومگا با قابلیت تفکیک زمانی و مکانی بالا به کمک شبیه سازی به روش المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این کار با در نظر گرفتن تاثیر پدیده پخش در حضور میدان الکتریکی قوی نحوه حرکت الکترون ها تا لحظه جمع آوری کامل آنها مدل شده است. ضریب تکثیر بار الکتریکی محاسبه گردیده و با رابطه نظری مقایسه شده است. جریان الکتریکی القایی بر اساس تئوری رامو محاسبه شده و با انتگرال گیری از آن بار القایی کل بدست آمده و با بار الکتریکی تکثیر شده مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی و همچنین محاسبات نظری تطابق قابل قبولی را به نمایش می گذارند و استفاده از ابزار شبیه سازی به کمک نرم افزار COMSOL به منظور بررسی دقیق عملکرد این نوع آشکارسازها را تایید می کنند.

**کلمات کلیدی:** آشکارساز میکرومگا، پدیده پخش، شبیه سازی المان محدود.

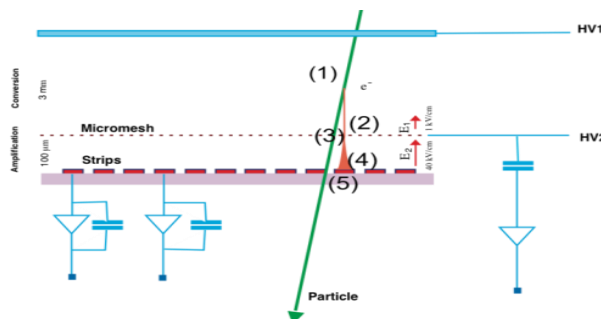
### مقدمه

توسعه آشکارسازهای گازی در تحقیقات فیزیک نظری و صنایع هسته‌ای و محاسبات و اندازه گیری‌های دزیمتری و به خصوص میکرو دزیمتری، در کانون توجه پژوهشگران این حوزه از علوم قرار دارد. نحوه عملکرد آشکارسازهای گازی جدید قطعاً شبیه آشکارسازی متداول یعنی بر اساس اندرکنش ذرات باردار با اتم های گازی موجود در حجم آشکار می باشد. نکته اساسی در طراحی آشکارسازهای جدید، ایجاد گرادیان‌های بالای میدان الکتریکی در فاصله‌ای کوتاه، به منظور تولید آبشار ذرات باردار ثانویه است. بدین منظور، هندسه آشکارسازها و نحوه کارگذاری و طراحی الکترودها تعیین کننده خواهند بود. بر این اساس، سه نوع آشکارساز گازی بدین منظور طراحی و معرفی گردیده که عبارتند از: GEM، Micro-MEGA و MSGC.

آشکارساز میکرومگا، جزء آشکارسازهای تناسبی گازی می باشد که در سال ۱۹۹۲ توسط Charpak برای اولین بار معرفی و طراحی شد. در سال ۱۹۹۶، Giomatari، این آشکارساز را به عنوان ابزاری موثر برای آشکارسازی حساس به مکان ذرات با شار بالا معرفی کرد [۱]. در سال های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲، از این آشکارساز به منظور مکان یابی برخورد تابش و به عنوان پایه طراحی، برای انواع دیگر آشکارسازها استفاده شد. [۳، ۲، ۴]. همچنین در سال ۲۰۰۷، این آشکارساز با نرم افزار Garfield به طور کامل شبیه سازی شد [۴]. علی طاهری و همکاران، در سال ۲۰۱۲، از نرم افزار COMSOL برای بررسی آشکارساز های تابش استفاده کرده اند [۶].

میکرومگاها آشکارسازهای سبکی هستند که شامل یک منطقه تکثیر کوچک می‌شوند و سیگنال‌های سریع در مرتبه ۱۰۰ نانو ثانیه تولید می‌کنند. از مزایای این نوع آشکار ساز، این می‌باشد که ناحیه تولید بار و تکثیر آن، یکسان نمی‌باشند و از این رو تمامی الکترون‌ها دارای ضریب تکثیر یکسان خواهند بود. این آشکارسازها، آشکارسازهای دقیق با رزولوشن مکانی کمتر از ۰/۰۱ میکرومتر می‌باشند. آشکارساز میکرومگا بر مبنای تقویت بارهای الکتریکی تولید شده ناشی از یونیزاسیون اتم‌های گاز توسط تابش اولیه، عمل می‌کند. در این نوع آشکارساز، حجم حساس آشکارساز بوسیله یک میکرومش فلزی به دو قسمت تقسیم می‌شود. با عبور تابش از میان گاز، الکترون و یون تشکیل می‌شود. در غیاب میدان الکتریکی زوج الکترون یون تشکیل شده باز ترکیب می‌شود. با بکار بردن میدان الکتریکی از مرتبه  $4 \times 10^6 \text{ V.cm}^{-1}$ ، الکترون‌ها به سمت مش و یون‌ها به سمت کاتد حرکت می‌کنند. هنگامیکه الکترون‌ها به نزدیکی مش می‌رسند، در منطقه تکثیر، در معرض یک گرادیان میدان الکتریکی شدید (از مرتبه  $8 \text{ kV/cm}$ ) قرار می‌گیرند، تحت تاثیر این میدان شتاب گرفته و انرژی لازم برای ایجاد الکترون-یون ثانویه را بدست می‌آورند و در نتیجه پدیده بهمن الکترونی رخ می‌دهد.

در اثر تکثیر بارهای اولیه، یک سیگنال قابل توجه تولید می‌شود. سیگنال الکتریکی روی الکترودها پس از تقویت توسط تقویت‌کننده خوانده می‌شود. به منظور تعیین موقعیت ذره در آشکارساز، الکترودها معمولاً بشکل نوار یا پیکسل ساخته می‌شوند. دامنه و شکل سیگنال خروجی حاوی اطلاعات مکانی، زمانی و انرژی ذره می‌باشد. در زیر شکل نوعی از نحوه عملکرد یک آشکارساز میگرومگا نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی کلی از آشکارساز میکرومگا. الکترودهای جمع‌کننده در پایین آشکارساز قرار دارند که به پیش تقویت‌کننده متصل شده‌اند. الکترودهای شبکه‌ای که مسئول ایجاد گرادیان بالای میدان الکتریکی هستند میان آند و کاتد قرار دارند.

تاکنون، در ارزیابی‌های صورت گرفته توسط دیگران در مورد نحوه عملکرد این نوع آشکارسازها، تاثیر پدیده پدیده پخش به صورت کمی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این نوشتار در ابتدا اشاره‌ای کلی به اصول تئوری رامو، به منظور محاسبه جریان القایی در آشکارسازها، شده است و سپس رفتار الکترون‌ها حین حرکت از محیط آشکارساز در حضور پدیده پخش در زمان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و جریان القایی ناشی از آن به کمک شبیه‌سازی به روش المان محدود محاسبه گردیده است.

روش کار



به منظور محاسبه سیگنال القایی ناشی از جمع آوری الکترون‌ها در آند از قضیه رامو استفاده می‌شود. بدین منظور به کمک شبیه سازی المان محدود میدان الکتریکی را در دو حالت محاسبه میکنیم: میدان الکتریکی اصلی ( $E$ ) و میدان الکتریکی وزنی ( $W$ ). میدان الکتریکی اصلی، میدانی است که در آشکارساز بعد از اعمال پتانسیل به الکترودها حاصل می‌شود. میدان الکتریکی وزنی، با اتصال الکترودی که محاسبه سیگنال القایی بر روی آن مطلوب می باشد، به پتانسیل یک ولت و اتصال سایر الکترودها به پتانسیل صفر ولت به دست می‌آید. طبق قضیه رامو سیگنال القایی بر روی الکتروود مورد نظر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I(t) = \iiint \vec{F}(t) \vec{W} dv \quad (1)$$

در رابطه بالا

$$\vec{F}(t) = C_n(t) \vec{v}_n + D_n \vec{\nabla} C_n(t) \quad (2)$$

که  $C_n(t)$  غلظت الکترون‌ها بر حسب زمان،  $\vec{v}_n$  بردار سرعت الکترون‌ها و  $D_n$  ضریب پخش الکترون‌ها در گاز است.

برای محاسبه غلظت الکترون‌ها بر حسب زمان از معادله پیوستگی استفاده می‌کنیم. معادله پیوستگی را به صورت زیر در نظر میگیریم،

$$\frac{\partial C_n(t)}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (D_n \vec{\nabla} C_n(t) + C_n(t) \vec{v}_n) = q(G_n - R_n) \quad (3)$$

که  $R_n$  آهنگ بازترکیب الکترون-یون و  $G_n$  آهنگ تولید الکترونهای ثانویه است که با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$G_n = C_n \alpha |V_n| \quad (4)$$

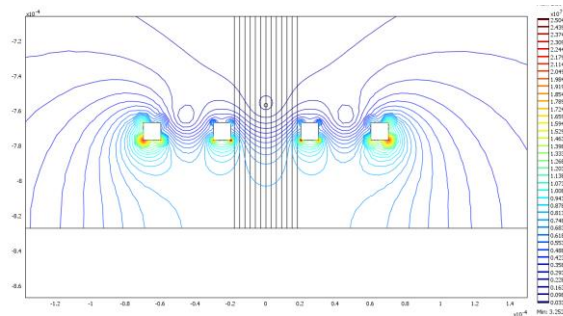
در رابطه (۴)،  $\alpha$  ضریب تکثیر الکترون‌ها است که تابعی از شدت میدان الکتریکی می‌باشد. مقادیر ضریب تکثیر در میدانهای مختلف به صورت تجربی اندازه گیری شده و در این مقاله با برازش دادن نمودار مناسبی به داده های تجربی معادله پیوستگی را حل می‌کنیم. در رابطه (۳) سرعت الکترون‌ها،  $\vec{v}_n$ ، به کمک رابطه  $\vec{v}_n = \mu_e \vec{E}$  به دست می‌آید که در آن  $\mu_e$  قابلیت تحرک الکترون‌ها است.

جدول ۱- مشخصات آشکارساز شبیه سازی شده

مقدار پارامتر	مشخصات آشکارساز
CO <sub>2</sub>	نوع گاز درون آشکارساز
۱۶۰۰ میکرومتر	طول ناحیه سوق
۵۵ میکرومتر	طول ناحیه تکثیر
۲۰ میکرومتر	شعاع هر حفره در مش
۳ حفره	تعداد حفره های شبیه سازی شده
۱۵۰۰ ولت	ولتاژ صفحه سوق
۴۰۰ ولت	ولتاژ مش

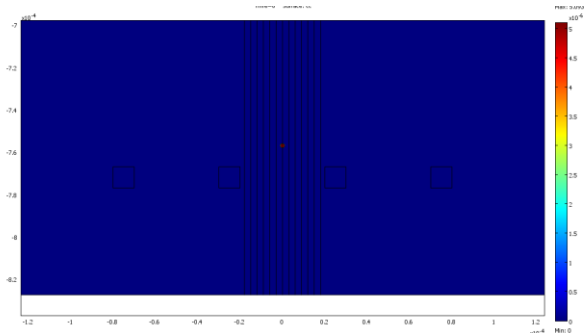
### نتایج و بحث

شکل ۲، خطوط میدان الکتریکی به ازای مقادیر ذکر شده در جدول ۱، در سطح مقطع آشکارساز را مشخص نموده است.

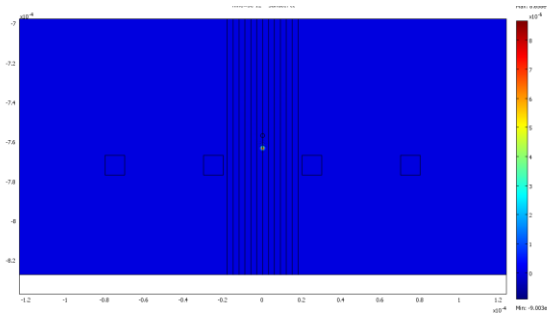


شکل ۲- خطوط میدان الکتریکی در سطح مقطع آشکارساز با مشخصات جدول ۱.

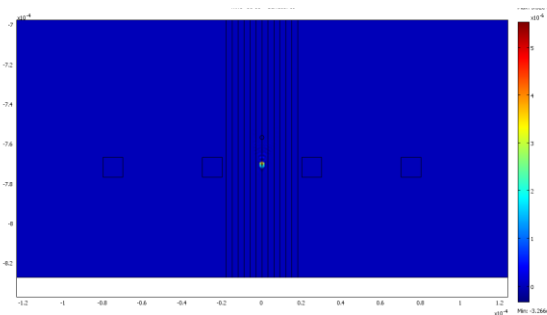
نحوه حرکت بار الکتریکی در این آشکارساز، در شکل های ۳ تا ۷ نمایش داده شده است. حرکت بارهای الکتریکی در راستای میدان الکتریکی و همچنین در راستای عرضی آشکارساز در اثر پدیده پخش، قابل مشاهده است.



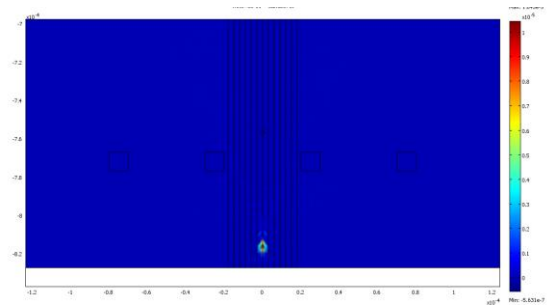
شکل ۳- بار الکتریکی در لحظه اولیه و در فاصله ۱۰ میکرومتری از مش (بار الکتریکی با رنگ قرمز مشخص شده است)



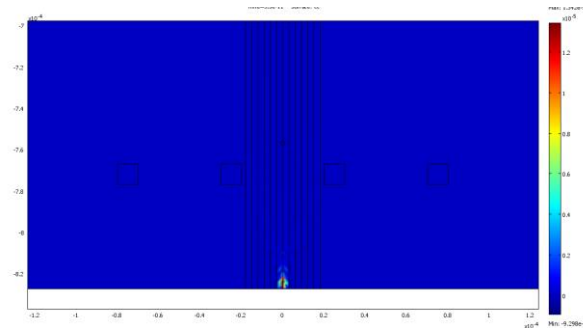
شکل ۴- بارالکتريکی در زمان ۵ پیکو ثانيه



شکل ۵- بار الکتريکی در زمان ۱۰ پیکو ثانيه

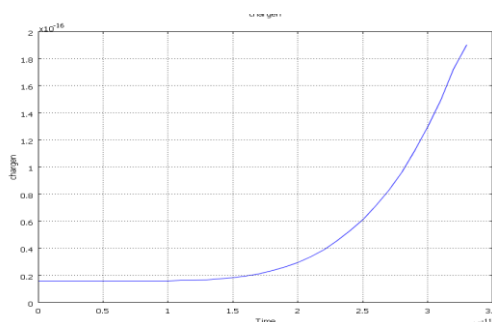


شکل ۶- بار الکتريکی در زمان ۳۰ پیکو ثانيه (پديده پخش كاملا در شکل مشخص است)



شکل ۷- بار الکتريکی در زمان ۴۰ پیکو ثانيه و نزديک الکتروود جمع آوری کننده

شکل ۸، نمودار بار الکتریکی القا شده در الکتروود را بر حسب زمان به تصویر کشیده است. با توجه به اینکه فرض گردیده تعداد ۱۰۰ الکترون بر اثر تابش در فاصله ۱۰ میکرومتری از حفره مرکزی و در ناحیه سوق ایجاد شده باشند، چون در این ناحیه بارهای الکتریکی تحت پدیده تکثیر قرار نمی گیرند، بار القایی بر حسب زمان مقدار ثابتی خواهد بود. با نزدیک شدن الکترون ها به ناحیه تکثیر، بارهای الکتریکی تکثیر شده و با زمان افزایش می یابند تا نهایتاً به نوار برسند و جمع آوری گردند.

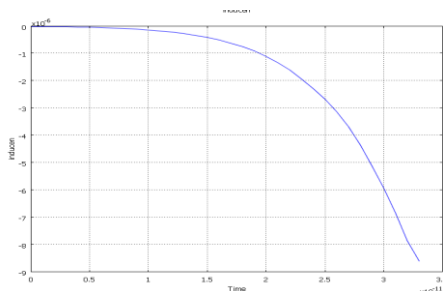


شکل ۸- بارالکتریکی القا شده در الکتروود زمین شده بر حسب زمان برای آشکار ساز با مشخصات جدول ۱.

مقدار بهره (ضریب تکثیر) آشکارساز با دو روش بدست آمده و مقایسه شده است. در روش اول با فرض وجود پدیده پخش و در روش دوم بصورت تحلیلی (بدون پدیده پخش). با استفاده از COMSOL، چگالی بار الکتریکی در لحظه اول (لحظه تولید) برابر با  $1,582683e-17 \text{ C.cm}^{-2}$  بدست آمد و همچنین چگالی بار در لحظه جمع آوری توسط الکتروود،  $1,898448e-16 \text{ C.cm}^{-2}$  بدست آمد. پرواضح است که بهره حالت واقعی آشکارساز از تقسیم این دو مقدار محاسبه خواهد شد و برابر است با، ۱۱,۹۹۵۱.

در روش دوم، با استفاده محاسبات نظری، مقدار بهره ها از طریق انتگرال گیری روی خطوط عمود بر الکتروود و همراستا (نشان داده شده در شکل ۲) با حرکت بارالکتریکی محاسبه شدند و سپس بهره میانگین تعیین شد. مقدار بهره از این روش برابر با ۱۷,۹۷۸۳ بدست آمد. تفاوت دو بهره بدست آمده در واقع به پدیده پخش مرتبط می باشد. با توجه به اینکه در محاسبه بهره، نسبت بار الکتریکی در زمان جمع آوری بار صفر به بار الکتریکی در زمان صفر، در حالت واقعی پدیده پخش مورد لحاظ قرار گرفته است، بسیاری از الکترون ها به دلیل وجود این پدیده از مکان خود در راستای عرضی آشکارساز فاصله گرفته و میدان های الکتریکی متفاوتی را احساس می نمایند و از اینرو مقدار ضریب تکثیر برای این الکترون ها متفاوت می باشد و بنابراین بهره کل در حالت واقعی نسبت به حالت تحلیلی متفاوت است.

از دیگر پارامترهای مهم هر آشکارساز تابش، منحنی جریان الکتریکی بر حسب زمان آن می باشد. شکل ۹، این منحنی را برای آشکارساز میکرومگای شبیه سازی شده و با مشخصات جدول ۱، نمایش داده است.



شکل ۹- جریان الکتریکی در الکتروود زمین شده بر حسب زمان برای آشکار ساز با مشخصات جدول ۱

همانطور که در شکل مشخص است، جریان الکتریکی آشکارساز با زمان افزایش می یابد (بر اثر وجود پدیده تکثیر) و همچنین در زمان های بالاتر، این رفتار، یک رفتار خطی خواهد بود. پرواضح است که منحنی های بارالکتریکی و جریان الکتریکی، صرف نظر از علامت، هم رفتار می باشند که گواهی بر صحت شبیه سازی ها می باشد.

### نتیجه گیری

از نتایج شبیه سازی با روش المان محدود به خوبی دریافت می شود که در درجه نخست، نرم افزار COMSOL MultiPhysics، با امکان تعریف دقیق معادلات دیفرانسیل جزئی، ابزار مناسبی برای طراحی و مدل سازی آشکارسازها با در نظر گرفتن پدیده هایی همچون پدیده پنخش و یا بررسی تاثیر گرادیان های حرارتی بر عملکرد آشکارساز است. تحلیل سیگنال زمانی خروجی آشکارساز و منحنی مشخصه های آن بر اساس قابلیت محاسبات انتگرالی موجود در نرم افزار از قابلیت های مفیدی است که امکان پیاده سازی روابط نظری همچون قضیه رامو را میسر می کند. تطابق میان خروجی نرم افزار و محاسبات نظری بر اساس نمودارهای برازش داده شده بر داده های تجربی حکایت از امکان به کارگیری این نرم افزار و به طور کلی روش المان محدود در شبیه سازی رفتار آشکارسازها می باشد.

### منابع

- [۱] Y. Giomataris et al (۱۹۹۶) "MICROMEAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. ۳۷۶, Pp. ۲۹-۳۵.
- [۲] D. Bernard et al (۲۰۰۲) "An insulating grid spacer for large-area MICROMEAS chambers" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. ۴۸۱, Pp. ۱۴۴-۱۴۸.
- [۳] J. P. Cussonneau et al (۲۰۰۲) "2D localization using resistive strips associated to the Micromegas structure, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. ۴۹۲, Pp. ۲۶-۳۴.
- [۴] L. Aphcetchche et al (۲۰۰۱) "Two large-area anode-pad MICROMEAS chambers as the basic elements of a pre-shower detector" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. ۴۵۹, Pp. ۵۰۲-۱۲.
- [۵] Z. X. Dong et al (۲۰۰۷) "Simulation of Micromegas Detector by Garfield Program" *High Energy Physics and Nuclear Physics*, Vol. ۳۱, Pp. ۱۰۴۵-۴۹.
- [۶] A. Taheri et al (۲۰۱۲) "Simulation of the gallium nitride-based pulse mode X-ray detector for short-time applications" *Radiation Effects and Defects in Solids*, Vol. ۱۶۷, Pp. ۷۹-۸۷.