



## بررسی تجربی اثر گرانروی محیط میزبان بر تشکیل و پایداری حباب‌ها در آشکارساز قطره‌ی فوق گرم (ساخته شده از) پلی آکریل آمید، در میدان نوترونی

پیمان رضاییان<sup>۱</sup>، غلامرضا رئیس‌علی\*<sup>۱</sup>، اعظم اخوان<sup>۱</sup>، حسین قدس<sup>۱</sup>، علی اکبر کاظمی<sup>۲</sup>  
۱. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران  
۲. امور حفاظت در برابر اشعه‌ی کشور، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

**چکیده:** اثر گرانروی محیط میزبان آشکارساز قطره‌ی فوق گرم بر تشکیل و پایداری حباب‌های فریون-۱۲ ایجاد شده در اثر پرتو نوترونی مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر غلظت آکریل آمید و متیلن بیس آکریل آمید در محلول مونومر، ژل‌های مختلف پلی آکریل آمید با گرانروی ۱ تا ۱۳ پاسکال - ثانیه تهیه و از آن‌ها در ساخت آشکارساز فوق گرم استفاده شد. نتایج پرتو نوترونی آشکارساز ساخته شده، با چشمه‌ی نوترونی <sup>241</sup>Am-Be و نوترون‌های ۲،۸۹ مگا الکترون‌ولت به دست آمده از مولد (دوترون-دوترون) نوترون نشان داد که حباب‌های تشکیل شده در آشکارساز ساخته شده با استفاده از پلی آکریل آمید غیر شبکه‌ای با گستره‌ی گرانروی ۵ تا ۶ پاسکال - ثانیه علاوه بر این که با چشم غیر مسلح قابل شمارش هستند، از ماندگاری کافی در محیط میزبان نیز برخوردارند و در خاتمه‌ی پرتو نوترونی امکان شمارش حباب‌ها وجود دارد. هم‌چنین تعداد حباب‌های تشکیل شده با شارش نوترون‌های فرودی متناسب است.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارساز قطره‌ی فوق گرم، محیط میزبان، گرانروی، پلی آکریل آمید غیر شبکه‌ای، میدان نوترونی

## Experimental investigation of the host medium viscosity effect on formation and stability of bubbles in superheated droplet detector, fabricated using polyacrylamide, in neutron field

P. Rezaeian<sup>1</sup>, G.R. Raisali\*<sup>1</sup>, A. Akhavan<sup>1</sup>, H. Ghods<sup>1</sup>, A.A. Kazemi<sup>1,2</sup>

1. Research School of Radiation Applications, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran  
2. Radiation Protection Division, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

**Abstract:** The effect of the host medium viscosity of the superheated drop detector on formation and stability of Freon-12 bubbles produced by neutron irradiation has been investigated. By variation of the acrylamide and methylenbisacrylamide concentrations on monomer solution, different polyacrylamide gels with various viscosities of 1 up to 13 Pa-s were prepared. The gels were utilized to prepare the superheated droplet detector. The irradiation results of the prepared superheated droplet detector using an <sup>241</sup>Am-Be neutron source and the 2.89 MeV neutrons obtained from the d-d neutron generator showed that the formed bubbles in the fabricated detector, based on non-crosslinked polyacrylamide gel, with the viscosity of 5-6 Pa-s were stable and could be counted after irradiation with the naked eye. The number of bubbles were found to be proportional to the neutron fluence.

**Keywords:** Superheated droplet detector, Host medium, Viscosity, Non-crosslinked polyacrylamide, Neutron field



## ۱. مقدمه

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در آشکارسازی نوترون، طراحی و ساخت آشکارسازهای نوترونی از مبحث‌های مورد علاقه‌ی فیزیک‌دانان هسته‌ای است. از جمله‌ی آشکارسازهای نوترونی مورد استفاده می‌توان به آشکارساز قطره‌ی فوق گرم<sup>(۱)</sup> اشاره کرد. این آشکارساز متشکل از قطره‌های یک مایع فوق گرم به قطر ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون است که در یک محیط میزبان قرار گرفته‌اند [۱]. این محیط میزبان معمولاً از جنس گلیسیرین [۲] یا پلی‌مر [۳] است. در آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم، ترکیب‌های فریونی<sup>(۲)</sup>، مایع فوق گرم را تشکیل می‌دهند. در اثر برهم‌کنش نوترون با قطره‌های فوق گرم و تبخیر آن‌ها در محیط میزبان، حباب تشکیل می‌شود. تعداد این حباب‌ها متناسب با شار نوترون فرودی است. این آشکارساز ابزاری آرمانی در آشکارسازی و طیف‌نمایی نوترون است، و امروزه از این آشکارساز برای دزیمتری در نوترون‌درمانی [۴] و هم‌چنین برای آشکارسازی نزدیکی شتاب‌دهنده‌ها [۵] استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای این آشکارسازها می‌توان به طیف‌نمایی نوترون [۶]، آشکارسازی پرتوهای کیهانی [۷]، اندازه‌گیری فعالیت پرتوزایی آلفاگسیل‌ها [۸] و دزیمتری شخصی [۹] اشاره کرد.

آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم اولین بار در سال ۱۹۷۹ با استفاده از محیط میزبان گلیسیرینی ساخته شدند [۲]. در این آشکارسازها، حباب‌های ایجاد شده در اثر برهم‌کنش نوترون در جای خود ثابت نبوده و پس از تشکیل به مرور به سمت قسمت‌های بالایی محیط میزبان حرکت کرده و از محیط میزبان خارج می‌شوند. در این آشکارسازها خوانش پاسخ آشکارساز (تعداد حباب‌های تشکیل شده)، با استفاده از روش‌های صوتی [۱۰] از طریق شمارش تعداد تپ‌های صوتی حاصل از تولید حباب و یا با استفاده از روش حجم‌سنجی [۱۱] انجام می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در خصوص محیط‌های میزبان گلیسیرینی این است که با توجه به خروج مایع فوق گرم به شکل حباب از محیط میزبان، امکان استفاده‌ی مجدد از این آشکارسازها پس از گذشت مدت زمانی خاص (حدود ۱۲ ساعت) از پرتودهی وجود ندارد [۱۲].

در سال ۱۹۸۶ آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم با محیط میزبان پلی‌مری مورد استفاده قرار گرفتند [۳]. در این آشکارسازها از پلی‌آکریل‌آمید با ساختار شبکه‌ای (با پیوند

عرضی) به عنوان محیط میزبان استفاده شد [۳]. گرانروی<sup>(۳)</sup> بالای محیط میزبان در این آشکارسازها سبب ایجاد رگه‌هایی از گاز در اثر برهم‌کنش نوترون با قطره‌های فوق گرم می‌شود. این رگه‌ها برای مدت زمان طولانی در محیط آشکارساز باقی می‌مانند و تا مدت‌ها پس از پرتودهی امکان خوانش آشکارساز وجود دارد. اما به دلیل گرانروی بالای این محیط میزبان امکان تبدیل رگه‌ها به قطره‌های فوق گرم و استفاده‌ی مجدد از آشکارساز از طریق اعمال فشار وجود ندارد، هم‌چنین شمارش تعداد این رگه‌ها با چشم غیرمسلح مشکل است.

در این مقاله با تغییر گرانروی محیط میزبان آشکارساز (ساخته شده از پلی‌آکریل‌آمید)، اثرهای تغییر این پارامتر بر تشکیل و پایداری حباب‌ها بررسی شده است. تغییرهای گرانروی با استفاده از تغییر غلظت متیلن بیس آکریل‌آمید و آکریل‌آمید در محلول مونومر انجام شد. حذف متیلن بیس آکریل‌آمید (عامل ایجاد ساختار شبکه‌ای) و افزایش غلظت آکریل‌آمید تا ۳۵٪ در محلول مونومر، گرانروی پلی‌آکریل‌آمید (محیط میزبان آشکارساز) را به گونه‌ای تغییر داد که در اثر پرتودهی آشکارساز در میدان نوترونی، حباب‌هایی پایدار در محیط میزبان تشکیل شدند. امکان خوانش این حباب‌ها با چشم غیرمسلح و هم‌چنین پایداری آن‌ها از مزیت‌های آشکارساز ساخته شده با محیط میزبان پلی‌مری غیرشبکه‌ای است. بنابراین از پلی‌آکریل‌آمید با ساختار غیرشبکه‌ای برای ساخت آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم استفاده شده و عملکرد آشکارسازهای ساخته شده با استفاده از میدان نوترونی چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  و نوترون‌های  $^{239}\text{Pu}$  مگاالکترون ولتی حاصل از واکنش  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  در مولد نوترون مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مبانی نظری

در یک آشکارساز قطره‌ی فوق گرم در اثر برهم‌کنش نوترون با قطره‌های فوق گرم، این قطره‌ها تبخیر و حباب تشکیل می‌شود. انرژی لازم برای تشکیل حباب در یک مایع چنین نوشته می‌شود [۲]

$$W = \frac{16\pi\gamma^2(T)}{3(P_v - P_0)^2} \quad (1)$$



توجه به این نکته ضروری است که بخش قابل توجهی از انرژی به جا گذاشته شده در مایع فوق گرم به صورت اتلاف حرارتی از بین رفته و تنها کسر کوچکی از آن، که بازده ترمودینامیکی ( $\eta_T$ ) نامیده می‌شود، سبب تشکیل حباب می‌شود [۱۵]. بر این اساس و با استفاده از معادله‌های ۱، ۲ و ۴ شرط تشکیل حباب در یک آشکارساز قطره‌ی فوق گرم را می‌توان چنین نوشت

$$\frac{dE}{dx} \geq \frac{4\pi\gamma(T)}{3\eta_T(P_v - P_0)} \quad (5)$$

رابطه‌ی ۵ نشان می‌دهد که برای یک مایع فوق گرم در شرایط ترمودینامیکی مشخص، اگر توان ایستاندگی هسته‌های پس‌زده شده از یک آستانه مشخص فراتر رود، در آشکارساز حباب تشکیل می‌شود. در این مقاله از فریون-۱۲ با فرمول شیمیایی  $CCl_2F_2$  به عنوان مایع فوق گرم استفاده شده است. هم‌چنین آشکارساز ساخته شده با استفاده از چشمه‌های  $^{241}\text{Am-Be}$  و نوترون مولد (دوترون-دوترون) پرتودهی شده است. با توجه به نوع هسته‌های پس‌زده شده فریون-۱۲ (کربن، فلئور و کلر) و انرژی نوترون فرودی می‌توان گفت که توان ایستاندگی هسته‌های پس‌زده شده همواره کم‌تر از قله‌ی براگ بوده و منحنی توان ایستاندگی با افزایش انرژی، روندی افزایشی دارد. بنابراین بر پایه‌ی معادله‌ی ۵ می‌توان گفت برای یک هسته‌ی پس‌زده شده، یک آستانه‌ی انرژی برای تشکیل حباب وجود دارد که اگر انرژی هسته‌ی پس‌زده شده از این آستانه کم‌تر باشد، حبابی تشکیل نخواهد شد. بنابراین تنها کسری از هسته‌های پس‌زده شده ایجاد شده در برهم‌کنش کشتان میان نوترون و هسته‌های فوق گرم، که انرژی آن‌ها بیش از این آستانه است، سبب تشکیل حباب می‌شوند. این کسر از هسته‌های پس‌زده شده احتمال تشکیل حباب نامیده می‌شوند. بر این اساس، آهنگ تشکیل حباب در یک آشکارساز قطره‌ی فوق گرم در دما و فشار اعمالی مشخص می‌تواند چنین نوشته شود [۲]

$$R(E_n, T, P_0) = \phi(E_n) V \sum_i^n N_i \sum_j^m \sigma_{ij} F_{ij}(E_n, T, P_0) \quad (6)$$

که در آن،  $\gamma(T)$  تنش سطحی مایع در دمای  $T$ ،  $P_v$  و  $P_0$ ، به ترتیب، فشار بخار مایع و فشار اعمالی بر سطح مایع است. اگر این انرژی  $W$  به یک مایع فوق گرم داده شود، حبابی با شعاع بحرانی در مایع تشکیل می‌شود [۲]. شعاع بحرانی حباب چنین مشخص می‌شود

$$r_c = \frac{2\gamma(T)}{P_v - P_0} \quad (2)$$

از نظر ترمودینامیکی، حباب با شعاع بحرانی ناپایدار است و فرایند رشد آن تا تبخیر کامل مایع در دسترس ادامه می‌یابد. در یک آشکارساز قطره‌ی فوق گرم در اثر برهم‌کنش نوترون با هسته‌های مایع فوق گرم، ذرات باردار تشکیل می‌شوند. برهم‌کنش غالب نوترون با هسته‌های مایع فوق گرم برهم‌کنش کشسان است [۲]. انرژی منتقل شده از نوترون با انرژی  $E_n$  به هسته‌ای با عدد اتمی  $A$  در یک برهم‌کنش کشسان این است

$$E_A = \frac{4AE_n}{(A+1)^2} \cos^2 \theta \quad (3)$$

که در آن،  $\theta$  زاویه‌ی پراکندگی هسته‌ی پس‌زده شده نسبت به نوترون فرودی است. بنابراین برهم‌کنش کشسان نوترون سبب ایجاد هسته‌های پس‌زده شده با یک توزیع انرژی می‌شود. برای یک هسته‌ی هدف مشخص، این توزیع انرژی، بستگی به سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی کشسان نوترون از آن هسته دارد [۱۳]. هسته‌های پس‌زده شده در اثر برهم‌کنش کشسان نوترون، در قطره‌ی فوق گرم حرکت و انرژی خود را به مایع فوق گرم منتقل می‌کنند. مقدار این انرژی، بستگی به توان ایستاندگی هسته‌های پس‌زده شده دارد. با توجه به نظریه‌ی قله‌ی گرمایی [۱۴]، مقدار انرژی منتقل شده در فاصله‌ای معادل با دو برابر شعاع بحرانی، در تشکیل حباب نقش دارد. بر این اساس انرژی مؤثر در تشکیل حباب برحسب  $\frac{dE}{dx}$  (توان ایستاندگی هسته‌ی پس‌زده شده) چنین نوشته می‌شود

$$E_D = 2r_c \frac{dE}{dx} \quad (4)$$



که در آن،  $\rho_1$  چگالی مایع فوق گرم (برابر با چگالی محیط میزبان یعنی ۱۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)،  $a$  و  $b$  اعداد ثابت هستند که مقادیرهای آن‌ها، به ترتیب، ۲ [۱۷] و ۶/۲۸ [۱۸] گزارش شده است. بر این اساس چگالی گاز در حباب تشکیل شده در حدود ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب تخمین زده شد. هم‌چنین با استفاده از مشاهده‌های تجربی، قطر حباب‌های تشکیل شده در آشکارساز ساخته شده در حدود ۱ میلی‌متر بود. بنابراین برای حباب‌های تشکیل شده به قطر ۱ میلی‌متر و با فرض این‌که حباب‌ها هیچ برخوردی با یک‌دیگر نداشته باشند، با استفاده از معادله‌ی ۷ می‌توان سرعت حباب را در محیط میزبان با استفاده از گرانروی آن تخمین زد. در شکل ۱ تغییرهای سرعت، بر حسب گرانروی برای حباب‌های تشکیل شده در آشکارساز با استفاده از معادله‌ی ۷ رسم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود، با تغییر گرانروی از مقدارهای کم‌تر از ۱ (حدود ۰/۵) تا حدود ۱۵ پاسکال-ثانیه سرعت حباب در محیط میزبان از حدود ۱۸۰ میکرون بر ثانیه به ۶ میکرون بر ثانیه می‌رسد. این کاهش سرعت می‌تواند سبب افزایش زمان در دسترس برای خوانش پاسخ آشکارساز شود.

افزایش گرانروی محیط میزبان سبب افزایش مقدار نیروی لختی<sup>(۴)</sup> [۱۹] وارد بر حباب در حین تشکیل آن می‌شود. نیروی لختی که متناسب با گرانروی است، از نیروهایی است که از جانب محیط میزبان، به حباب وارد می‌شود. رشد حباب به صورت کروی زمانی انجام می‌شود که میان نیروهای وارد بر حباب، شامل نیروی لختی، نیروی رانشی<sup>(۵)</sup>، نیروی فشار<sup>(۶)</sup>، نیروی کششی<sup>(۷)</sup> و ... تعادل برقرار باشد [۱۹]. از میان این نیروها تنها نیروی لختی وابستگی به گرانروی دارد؛ لذا افزایش گرانروی می‌تواند این تعادل را برهم بزند. در این حالت اگرچه انرژی لازم برای تبخیر قطره‌های فوق گرم توسط ذرات باردار تأمین می‌شود، اما گرانروی بالای محیط میزبان می‌تواند باعث تغییر شکل حباب‌ها و تبدیل آن‌ها به رگه‌هایی از گاز شود، اما با وجود ماندگاری بالا، خوانش این رگه‌ها با چشم غیر مسلح دشوار است. بنابراین گرانروی محیط میزبان باید به نحوی باشد که حباب‌های تشکیل شده علاوه بر ماندگاری، قابلیت خوانش راحت با چشم غیر مسلح را نیز داشته باشند.

که در آن،  $\phi(E_n)$  شار نوترون فرودی و  $V$  حجم کل قطره‌های فوق گرم است. هم‌چنین تعداد کل نوکلیدهای موجود در قطره‌ی فوق گرم با  $n$  و چگالی اتمی هر نوکلید نیز با  $N_i$  نشان داده شده است. تعداد واکنش‌های ممکن برای نوترون  $m$  و سطح مقطع واکنش  $\sigma_{ij}$  برای نوکلید  $i$ ام،  $\sigma_{ij}$  است. هم‌چنین احتمال تشکیل حباب برای هسته‌ی پس‌زده شده نوکلید  $i$ ام ایجاد شده در اثر واکنش  $j$ ام با  $F_{ij}(E, T, P_0)$  نشان داده شده است. در برهم‌کنش نوترون با قطره‌های فوق گرم، برهم‌کنش غالب، برهم‌کنش کشسان است [۲]. بنابراین در استفاده از رابطه‌ی ۶ تنها واکنش‌های کشسان در نظر گرفته می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که، استفاده از رابطه‌ی ۶ هنگامی امکان‌پذیر است، که حباب‌های ایجاد شده در محیط میزبان ثابت باشند. حرکت حباب‌ها در محیط میزبان سبب خروج آن‌ها از محیط میزبان و در نتیجه کاهش تعدادشان می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت از چالش‌های پیشرو در تخمین و شمارش تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکارساز، حرکت حباب‌ها به سمت بالا و خروج آن‌ها از محیط میزبان است. سرعت حرکت یک حباب منفرد به قطر حدود ۰/۵ تا ۱/۳ میلی‌متر در سیال چینی برآورد می‌شود [۱۶]

$$u = \frac{1}{36} \frac{gd^2(\rho_L - \rho_g)}{\mu} \quad (۷)$$

که در آن،  $d$ ،  $\rho_L$ ،  $\rho_g$ ،  $\mu$ ، به ترتیب، قطر حباب، شتاب گرانش، چگالی محیط میزبان، چگالی گاز درون حباب و گرانروی محیط میزبان هستند. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش گرانروی، سرعت حرکت حباب در محیط میزبان کاهش می‌یابد. البته همان‌گونه که رابطه‌ی ۷ نشان می‌دهد، سرعت حرکت حباب، علاوه بر گرانروی محیط میزبان، به اختلاف چگالی محیط میزبان و گاز درون حباب نیز بستگی دارد. در آشکارساز مورد نظر، چگالی محیط میزبان ۱۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. چگالی گاز درون حباب‌های تشکیل شده نیز چینی محاسبه شد [۱۷]

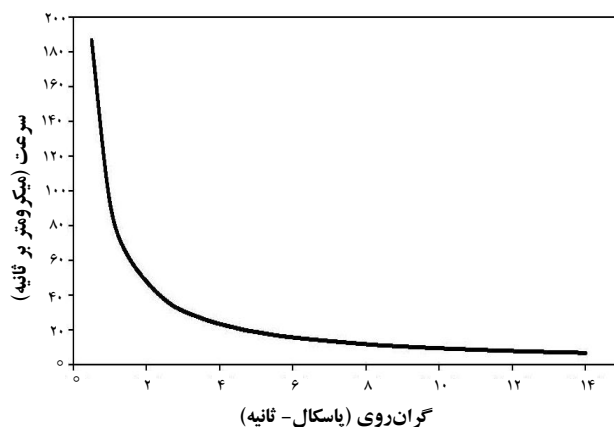
$$\rho_g = \left(\frac{\alpha}{b}\right)^2 \rho_1 \quad (۸)$$

بطری استفاده شد [۲۰]. در این روش لوله‌ی آزمایش حاوی پلی‌آکریل‌آمید برعکس شده و با توجه به مقدار پلی‌مر جابه‌جا شده در لوله‌ی آزمایش و تغییر شکل آن، گران‌روی پلی‌مر با استفاده از حروف الفبا از A تا I طبقه‌بندی شد (جدول ۱). از این آزمون ساده اطلاعاتی نیمه کمی از گران‌روی پلی‌مر به دست آمد. با کمک این آزمون محدوده‌ای از تغییرهای غلظت آکریل‌آمید و متیلن بیس آکریل‌آمید که بر روی گران‌روی اثر قابل مشاهده‌ای داشت به دست آمد.

### ۴.۳ ساخت آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم

به منظور ساخت آشکارساز قطره‌ی فوق گرم، ابتدا ۲ میلی‌لیتر از محلول مونومر و محلول اشباع سزیم کلرید (حجم مجموع ۲ میلی‌لیتر) به یک لوله آزمایش ۱۰۰ میلی‌متری منتقل و پس از اضافه کردن ۰/۰۲ میلی‌لیتر از محلول آمونیم پرسولفات، عملیات هواگیری بر روی محتویات لوله‌ی آزمایش انجام شد. پس از اتمام هواگیری، لوله‌ی آزمایش به حمام اتانول یخ خشک (با دمای ۶۹- درجه‌ی سانتی‌گراد) منتقل شد. پس از انجماد کامل محتویات، ۰/۰۵ میلی‌لیتر از مایع فریون-۱۲ به لوله‌ی آزمایش اضافه شد. سپس لوله‌ی آزمایش مسدود شده و به حمام آب در دمای اتاق منتقل شد. پس از این که محتویات لوله‌ی آزمایش ذوب شد، به منظور ایجاد توزیع یکنواخت از قطره‌های فوق گرم، لوله‌ی آزمایش با استفاده از دستگاه تکاننده چرخانده شد. پس از ایجاد توزیعی یکنواخت از قطره‌های فوق گرم، لوله‌ی آزمایش مجدداً به حمام اتانول یخ خشک منتقل و به منظور غیرفعال کردن آشکارساز، ۰/۷ میلی‌لیتر مایع فوق گرم به سطح آشکارساز اضافه شد. در نهایت برای کامل شدن پلی‌مریزاسیون، لوله‌ی آزمایش به حمام آب با دمای ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد انتقال داده شد. پس از گذشت ۱ ساعت و تکمیل پلی‌مریزاسیون آشکارساز آماده‌ی استفاده بود.

در مرحله‌ی ساخت باید به این نکته توجه داشت که مدت زمان و سرعت چرخش لوله‌ی آزمایش در اندازه‌ی حباب‌های تشکیل شده از پرتودهی آشکارساز نقش دارد. در این کار به روش آزمون و خطا مدت زمان و سرعت چرخش آشکارساز به ترتیب، ۲۰ دقیقه و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه به دست آمدند. چرخش لوله‌های آزمایش با این شرایط سبب شد، در اثر پرتودهی و تبخیر قطره‌های پراکنده شده، حباب‌هایی به قطر ۱ میلی‌متر در محیط میزبان ایجاد شود.



شکل ۱. رابطه بین سرعت حباب فریون-۱۲ به قطر ۱ میلی‌متر و چگالی ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب در محیط میزبان با چگالی ۱۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و گران‌روی محیط میزبان.

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۱.۳ مواد شیمیایی مورد استفاده

محیط میزبان باید شفاف، فاقد واکنش شیمیایی با قطره‌های فوق گرم و هم‌چنین صاف و هموار باشد. از این رو از پلی‌مر به عنوان محیط میزبان استفاده شد. به منظور تهیه‌ی محیط میزبان پلی‌مری از آکریل‌آمید، متیلن بیس آکریل‌آمید، آمونیم پرسولفات، تترا متیلن اتیلن دی‌آمین و سزیم کلرید استفاده شد. کلیه‌ی این ترکیب‌های شیمیایی ساخت شرکت مرک بودند. هم‌چنین از فریون-۱۲ تولید شده توسط شرکت ایسکون به عنوان مایع فوق گرم استفاده شد.

#### ۲.۳ تهیه‌ی پلی‌آکریل‌آمید

برای تهیه‌ی پلی‌آکریل‌آمید، با استفاده از آکریل‌آمید و متیلن بیس آکریل‌آمید محلول مونومر ساخته شد. به منظور تنظیم چگالی محیط میزبان با مایع فریون-۱۲، محلول مونومر با نسبت مساوی با محلول اشباع سزیم کلرید ترکیب شد. ۲ میلی‌لیتر از محلول حاصل به همراه ۰/۰۲ میلی‌لیتر از محلول آمونیم پرسولفات ۱۰٪ (به عنوان آغازگر زنجیره) و ۰/۰۲ میلی‌لیتر تترا متیلن اتیلن دی‌آمین (به عنوان کاتالیزور) به یک لوله‌ی آزمایش منتقل شد. برای تهیه‌ی پلی‌آکریل‌آمید با گران‌روی مختلف، غلظت‌های آکریل‌آمید و متیلن بیس آکریل‌آمید در محلول مونومر تغییر داده شد.

#### ۳.۳ روش آزمون بطری<sup>(۸)</sup> برای تعیین محدوده‌ی گران‌روی

به منظور تعیین اثرهای تغییر غلظت آکریل‌آمید و متیلن بیس آکریل‌آمید بر روی گران‌روی پلی‌آکریل‌آمید از روش آزمون

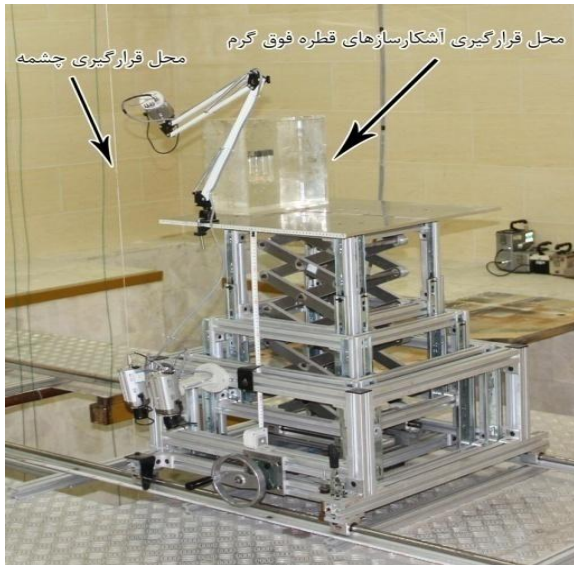


### جدول ۱. کدگذاری گرانروی ژل در آزمون بطری

محدوده‌ی گرانروی (Pa-s)	توصیف پلی‌مر	گرانروی پلی‌مر
۱ >	پلی‌مر شکل نگرفته و گرانروی ژل برابر با گرانروی محلول مونومر بود.	A
۱-۱٫۵	ژل بسیار روان، گرانروی پلی‌مر کمی بیش‌تر از محلول مونومر بود.	B
۱٫۵-۲٫۵	ژل روان بود و با برعکس شدن لوله‌ی آزمایش قسمت عمده‌ی ژل به سمت در لوله‌ی آزمایش حرکت کرد.	C
۲٫۵-۵	ژل نسبتاً روان بود و در حدود ۵ تا ۱۰٪ ژل حتی پس از برعکس شدن لوله‌ی آزمایش به سختی حرکت کرد.	D
۵-۶	ژل سخت روان بود و با برعکس شدن لوله‌ی آزمایش بیش از ۱۵٪ ژل ثابت ماند.	E
۶-۸	ژل بسیار تغییر شکل‌پذیر بود و با برعکس شدن لوله‌ی آزمایش، پلی‌مر ثابت ماند اما در شکل آن تغییری ایجاد نشد.	F
۸-۱۰	ژل نسبتاً تغییر‌پذیر بود و با برعکس شدن، پلی‌مر اندکی تغییر شکل داد.	G
۱۰-۱۱	ژل دارای قابلیت تغییر‌پذیری کم بود و با برعکس شدن لوله‌ی آزمایش، تنها سطح ژل اندکی دچار تغییر شد.	H
۱۱-۱۳	ژل صلب بود و با برعکس شدن لوله‌ی آزمایش تغییر شکل در ژل ایجاد نشد.	I

### ۵.۳ پرتودهی آشکارسازهای تهیه شده

(الف)



(ب)



شکل ۲. الف) محل قرارگیری آشکارسازها و چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  در حین پرتودهی؛ ب) محل قرارگیری چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  در زمین.

به منظور مطالعه‌ی اثر گرانروی محیط میزبان بر تشکیل و پایداری حباب‌ها در آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم ساخته شده و بررسی عملکرد آن‌ها، آشکارسازهای ساخته شده تحت تابش نوترون قرار گرفتند. پرتودهی در آزمایشگاه کالیبراسیون امور حفاظت در برابر اشعه‌ی سازمان انرژی اتمی ایران به وسیله‌ی چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  با فعالیت ۵ کوری انجام شد. تصویر محل قرارگیری آشکارسازها و چشمه‌ی نوترون حین پرتودهی و محل قرارگیری چشمه در زمین، به ترتیب، در شکل‌های ۲ الف و ۲ ب نشان داده شده است. پرتودهی آشکارسازها در فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری از چشمه با آهنگ دز ۹۲۰ میکروسیورت بر ساعت انجام شد. مدت زمان پرتودهی آشکارسازها از ۳ تا ۱۲ دقیقه متغیر بود.

برای بررسی تغییرهای تعداد حباب‌ها با تغییرهای شار نوترون فرودی، آشکارساز، با چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  در آزمایشگاه کالیبراسیون نوترون امور حفاظت در برابر اشعه‌ی سازمان انرژی اتمی ایران و باریکه‌ی نوترونی با انرژی ۲٫۸۹ مگاالکترون ولت حاصل از مبدل نوترون مدل NA-۱۵۰-۰۲ (ساخت MULTIVOLT LIMITED) در آزمایشگاه فیزیک نوترون پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای پرتودهی شد. در این مبدل از هدف تیتانیم آلائیده شده با دوتریم برای تولید نوترون استفاده می‌شود. این هدف با استفاده از باریکه‌ی دوترونی به انرژی ۱۲۰ کیلوالکترون ولت پرتودهی و در حین پرتودهی جریان باریکه‌ی دوترونی بر روی هدف بر روی ۱۰۰ میکرو آمپر تنظیم شد. آشکارسازها در زاویه‌ی صفر درجه نسبت به باریکه‌ی دوترون فرودی قرار گرفتند. تصویر مولد نوترون مورد استفاده در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب نشان داده شده است.

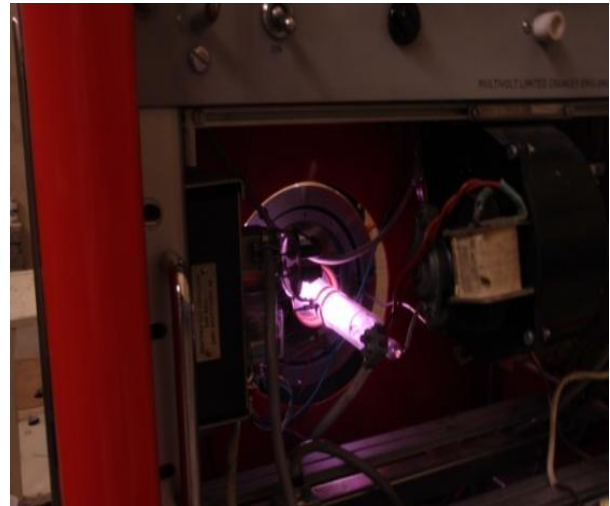
(الف)

پلی آکریل آمید از یک ژل کاملاً صلب به ژلی کاملاً روان تبدیل شده است. حضور متیلن بیس آکریل آمید در محلول مونومر سبب ایجاد پیوندهای عرضی میان زنجیره‌های خطی آکریل آمید و در نتیجه ایجاد ساختار شبکه‌ای در پلی آکریل آمید می‌شود. این ساختار شبکه‌ای سبب افزایش گرانروی پلی‌مر می‌شود.

در نمونه‌های ۴ و ۵ (جدول ۲) متیلن بیس آکریل آمید کاملاً حذف شده است. همان‌گونه که شکل‌های ۴ د و ۴ ه نشان می‌دهند در این حالت با کاهش غلظت آکریل آمید، پلی آکریل آمید از ژلی نیمه روان به ژلی بسیار روان تبدیل شده است. علت کاهش گرانروی، کاهش تعداد زنجیره‌های خطی آکریل آمید در اثر کاهش غلظت آکریل آمید است. بدین ترتیب، در این قسمت با تغییر غلظت آکریل آمید و متیلن بیس آکریل آمید، محیط‌های میزبان مختلف با گستره‌ی گرانروی ۱ تا ۱۳ پاسکال-ثانیه به دست آمد.

**جدول ۲.** تغییرهای گرانروی و سرعت حرکت حباب به قطر ۱ میلی‌متر در پلی آکریل آمید، با تغییر غلظت متیلن بیس آکریل آمید در محلول نونومر

شماره‌ی نمونه	غلظت متیلن بیس آکریل آمید (W/V%)	غلظت آکریل آمید (W/V%)	گرانروی گستره‌ی (Pa-s)	گستره‌ی سرعت (μm/S)
۱	۱،۵	۲۰	۱۱-۱۳	۷،۲-۸،۱
۲	۱،۰	۲۰	۶-۸	۱۱،۷-۱۵،۵
۳	۰،۲	۲۰	۱،۵-۲،۵	۳۷،۳-۶۲،۲
۴	۰	۳۵	۵-۶	۱۵،۵-۱۸،۶
۵	۰	۲۰	۱-۱،۵	۶۲،۲-۹۳،۲



(ب)



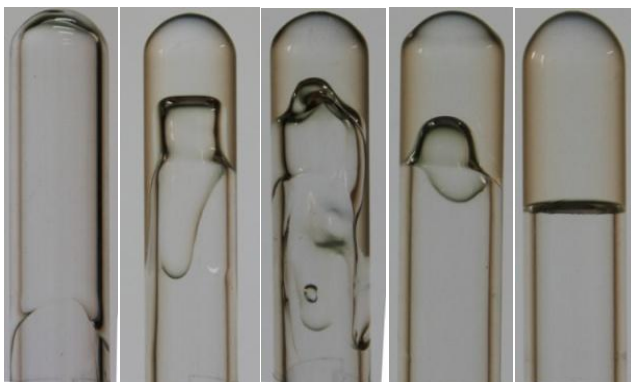
**شکل ۳.** مولد (دوترون- دوترون) نوترون؛ (الف) چشمه‌ی تولید دوترون (ب) نمای کلی مولد.

## ۴. نتایج

### ۴.۱. گرانروی محیط میزبان

محیط‌های میزبان با غلظت‌های مختلف آکریل آمید و متیلن بیس آکریل آمید ساخته و گرانروی آن‌ها با استفاده از آزمون بطری تخمین زده شد. در جدول ۲، تغییرهای گرانروی برحسب تغییرهای غلظت آکریل آمید و متیلن بیس آکریل آمید داده شده است.

شکل ۴، نمونه‌های تهیه شده با مشخصه‌های مندرج در جدول ۲ را نشان می‌دهد. در این شکل به خوبی تغییر گرانروی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۲ و در شکل‌های ۴ الف تا ۴ ج مشاهده می‌شود، برای آکریل آمید ۲۰٪ در محلول مونومر، با تغییر غلظت متیلن بیس آکریل آمید از ۰،۲٪ تا ۱،۵٪،



(الف) (ب) (ج) (د) (و)

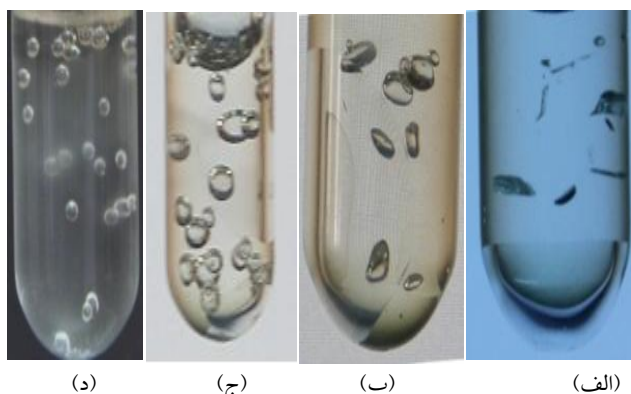
**شکل ۴.** اثر غلظت آکریل آمید و متیلن بیس آکریل آمید بر روی گرانروی پلی آکریل آمید. (الف) نمونه‌ی ۱ با گرانروی ۱۱ تا ۱۳ پاسکال-ثانیه، (ب) نمونه‌ی ۲ با گرانروی ۶ تا ۸ پاسکال-ثانیه، (ج) نمونه‌ی ۴ با گرانروی ۱،۵ تا ۲،۵ پاسکال-ثانیه، (د) نمونه‌ی ۳ با گرانروی ۵ تا ۶ پاسکال-ثانیه، (و) نمونه‌ی ۵ با گرانروی ۱ تا ۱،۵ پاسکال-ثانیه.



**۲.۴ اثر گرانروی بر تشکیل و پایداری حباب**

در انتخاب محیط میزبان باید به این نکته نیز توجه شود که گرانروی محیط میزبان علاوه بر سرعت حرکت حباب، بر شکل حباب‌های تشکیل شده نیز اثرگذار است. بنابراین محیط میزبان باید به نحوی انتخاب شود تا علاوه بر ماندگاری حباب‌ها برای مدت زمان قابل قبول، شکل حباب‌ها نیز به صورتی باشد که امکان خوانش دقیق آن‌ها با چشم غیرمسلح وجود داشته باشد.

برای بررسی اثر تغییر گرانروی بر تشکیل و پایداری حباب، از پلی‌آکریل‌آمیدهای تهیه شده (جدول ۲) برای تهیه محیط میزبان استفاده شد. آشکارسازهای ساخته شده با استفاده از این نمونه‌ها تحت پرتودهی نوترون چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  قرار گرفتند؛ نتایج این پرتودهی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، تغییر شکل ظاهری حباب‌های تشکیل شده با تغییر گرانروی محیط میزبان مشاهده می‌شود. با توجه به گرانروی بالای محیط میزبان در شکل ۵ الف، مشاهده می‌شود که در اثر تبخیر قطره‌های فوق گرم در این محیط رگه‌هایی از گاز تشکیل شده است. به بیان دیگر در این محیط میزبان افزایش نیروی لختی مانع از تشکیل حباب کروی شکل شده است. در شکل ۵ ب با وجود کاهش گرانروی نسبت به شکل ۵ الف در اثر تبخیر قطره‌های فوق گرم، حباب‌های کروی شکل تشکیل نشده است. در این حالت نیز نیروی لختی مانع از تشکیل حباب‌های کروی شده است با کاهش گرانروی و کم شدن نیروی لختی در شکل‌های ج و د مشاهده می‌شود که حباب کروی تشکیل می‌شود.



**شکل ۵.** پاسخ آشکارسازهای قطره‌ای فوق گرم با محیط‌های میزبان با گرانروی متفاوت پرتودهی شده با چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$ . محیط میزبان با گرانروی (الف) ۱۱ تا ۱۳؛ (ب) ۶ تا ۸؛ (ج) ۱٫۵ تا ۲٫۵ و (د) ۵ تا ۶ پاسکال - ثانیه.

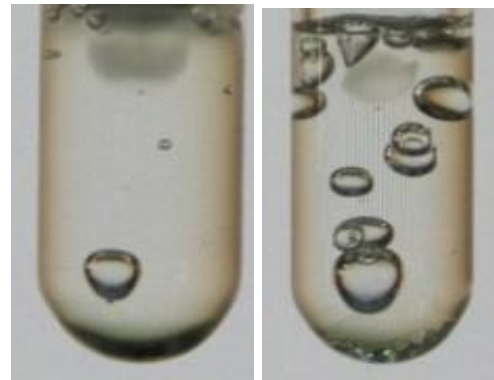
با توجه به نابرابری گرانروی در آشکارسازهای نشان داده شده در شکل ۵، پایداری حباب‌های تشکیل شده در آن‌ها یکسان نیست. در شکل ۶ از نمونه‌ی ۳ با گرانروی ۱٫۵ تا ۲٫۵ پاسکال - ثانیه برای تهیه محیط میزبان استفاده شده است. میزان حجم مایع حساس در این آشکارساز ۱۰ میکرولیتر بود. تغییر تعداد حباب‌ها با گذشت زمان برای این نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با گذشت زمان، تعداد حباب‌ها در محیط میزبان کاهش یافته است (پس از گذشت ۳ ساعت از پایان پرتودهی، بیش تر حباب‌ها از محیط میزبان خارج شده‌اند). این کاهش، به دلیل حرکت حباب‌های تشکیل شده در محیط میزبان است. حرکت حباب‌های تشکیل شده سبب برخورد این حباب‌ها با یک‌دیگر و افزایش حجم آن‌ها می‌شود. با توجه به مقدارهای چگالی محیط میزبان و گاز موجود در حباب‌ها (به ترتیب ۱۴۰۰ و ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب) با استفاده از معادله‌ی ۷ سرعت حباب‌های به قطر ۱ میلی‌متر در محیط‌های میزبان ساخته شده محاسبه شد. محدوده‌ی سرعت تخمین زده شده برای هر محیط میزبان در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۶ ارتفاع محیط میزبان حدود ۳ سانتی‌متر بوده است، با توجه به این که حباب‌ها پس از گذشت حدود سه ساعت از محیط میزبان خارج شده‌اند (مسافت ۳ سانتی‌متری را در حدود ۱۰۸۰۰ ثانیه طی کرده‌اند) سرعت حرکت حباب‌ها در این آشکارساز حدود ۳ میکرون بر ثانیه بوده است. البته با استفاده از معادله‌ی ۷، سرعت یک حباب منفرد در محیطی با گرانروی ۱٫۵ تا ۲٫۵ پاسکال - ثانیه بین ۳۷ تا ۶۲ میکرون بر ثانیه برآورد می‌شود. دلیل اختلاف میان مقدار تخمین زده شده با استفاده از معادله‌ی ۷ و مقدار مشاهده شده، این است که، این رابطه برای حالت‌های با یک حباب منفرد در سیال استفاده می‌شود. از طرفی عدم اندازه‌گیری دقیق گرانروی نیز می‌تواند در این اختلاف نقش داشته باشد. در آشکارساز ساخته شده با استفاده از پلی‌آکریل‌آمید غیر شبکه‌ای با گرانروی بین ۵ تا ۶ پاسکال - ثانیه ماندگاری حباب‌ها در محیط میزبان تا ۲۴ ساعت نیز افزایش یافته است. البته ماندگاری رگه‌های ایجاد شده در آشکارسازهای ساخته شده با استفاده از پلی‌مرهایی با گرانروی بین ۱۱ تا ۱۳ و ۶ تا ۸ پاسکال - ثانیه چندین هفته بوده است (شکل‌های ۵ الف و ۵ ب) که البته با توجه به شکل رگه‌ها، استفاده از معادله‌ی ۷ برای تخمین سرعت آن‌ها منطقی نیست. در



ولت در نظر بگیریم سطح مقطع برهم کنش کشسان نوترون با هسته‌های کربن، فلئور و کلر با استفاده از کتاب‌خانه‌ی ENDEF، به ترتیب، ۲/۹، ۱/۴ و ۲/۲ بارن به دست می‌آید [۲۱]. با توجه به این که حجم مایع فوق گرم اضافه شده ۰/۰۵ میلی‌لیتر بود و با فرض این که احتمال تشکیل حباب برای هسته‌های پراکنده شده در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برابر با یک باشد، مقدار آهنگ تشکیل حباب با استفاده از رابطه‌ی ۶ برابر با ۲/۳ حباب بر ثانیه به دست می‌آید. برای تعیین پاسخ آشکارسازهای ساخته شده، پرتو دهی در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد از دز ۵۰ تا ۲۰۰ میکروسیورت انجام شد. در هر دز جذبی چهار آشکارساز پرتو دهی و مقدار متوسط تعداد حباب‌های تشکیل شده محاسبه شد. هم‌چنین با در نظر گرفتن توزیع پواسون تعداد حباب‌ها که ناشی از ماهیت کاتوره‌ای برهم کنش‌ها است، نایقینی مقدار متوسط تعداد حباب‌ها در سطح اطمینان ۶۸٪ با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد [۲۲]

$$u = \sqrt{\frac{\bar{M}}{n}} \quad (9)$$

که در آن،  $\bar{M}$  تعداد متوسط حباب‌ها و  $n$  تعداد آشکارسازهای پرتو دهی شده (چهار عدد) در هر دز جذبی است. نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شکل ۷ می‌توان گفت که آهنگ تشکیل حباب در آشکارسازهای ساخته شده ۰/۰۸ حباب بر ثانیه (۰/۳ حباب بر میکروسیورت) بوده است. این اختلاف میان مقدار محاسبه شده و مقدار تجربی ناشی از در نظر گرفتن مقدار یک برای احتمال تشکیل حباب در محاسبه‌ها است. با استفاده از توزیع انرژی هسته‌های کربن، فلئور و کلر که در برهم کنش کشسان با نوترون‌های ۴ مگا الکترون ولتی پراکنده شده‌اند [۱۳]، می‌توان گفت، انرژی ۲۶٪ از هسته‌های کربن پراکنده شده، بیش از آستانه‌ی لازم برای تشکیل حباب است. از طرفی این مقدار برای هسته‌های فلئور و کلر نزدیک به صفر است. با در نظر گرفتن این مقادیر برای احتمال تشکیل حباب با استفاده از معادله‌ی ۶ آهنگ تشکیل حباب در حدود ۰/۱۵ حباب بر ثانیه به دست می‌آید که با مقادیر تجربی هم‌خوانی دارد. هم‌چنین در خصوص شکل ۷ ذکر این نکته ضروری است که، خوانش آشکارسازها حدود ۵ ساعت پس از پایان پرتو دهی به راحتی با چشم غیر مسلح انجام شده است.



شکل ۶. تغییر تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکارساز ساخته شده با پلی‌آکریل‌آمید با گرانروی بین ۱/۵ تا ۲/۵ پاسکال-ثانیه؛ (الف) پس از پایان پرتو دهی، (ب) ۳ ساعت پس از پایان پرتو دهی.

شکل ۶. تغییر تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکارساز ساخته شده با پلی‌آکریل‌آمید با گرانروی بین ۱/۵ تا ۲/۵ پاسکال-ثانیه؛ (الف) پس از پایان پرتو دهی، (ب) ۳ ساعت پس از پایان پرتو دهی.

آشکارساز ساخته شده با استفاده از پلی‌آکریل‌آمید غیر شبکه‌ای با گرانروی بین ۵ تا ۶ پاسکال-ثانیه همان‌گونه که جدول ۲ نیز نشان می‌دهد سرعت حرکت حباب تا حدود ۱۵/۵ میکرون بر ثانیه کاهش می‌یابد. یعنی در مقایسه با آشکارساز ساخته شده با پلی‌مر با گرانروی ۱/۵ تا ۲/۵ پاسکال-ثانیه انتظار می‌رود ماندگاری حباب‌ها به ۱۲ ساعت نیز برسد (در عمل حباب‌های تشکیل شده در این آشکارساز ماندگاری ۲۴ ساعت از خود نشان دادند). شکل حباب‌های تشکیل شده در این محیط میزبان به صورتی بود که خوانش آن‌ها با چشم غیر مسلح به راحتی امکان‌پذیر است. هم‌چنین از پلی‌مر با محدوده‌ی گرانروی ۱ تا ۱/۵ پاسکال-ثانیه نیز برای ساخت آشکارساز استفاده شد که با توجه به خروج سریع حباب‌ها از محیط میزبان و عدم امکان خوانش پس از پرتو دهی، بررسی این نمونه از مطالعه‌ها حذف شد.

#### ۳.۴ پرتو دهی با چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$

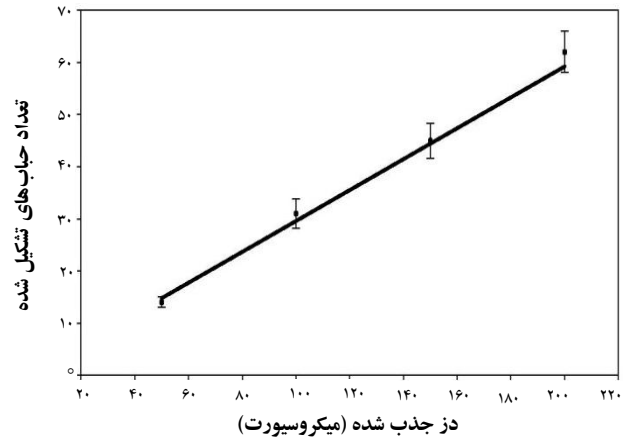
به منظور بررسی عملکرد آشکارسازهای ساخته شده با پلی‌آکریل‌آمید غیر شبکه‌ای با گرانروی ۵ تا ۶ پاسکال-ثانیه به عنوان محیط میزبان، این آشکارسازها با استفاده از چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پرتو دهی و نتایج تجربی با مقدارهای محاسبه شده با استفاده از رابطه‌ی ۶ مقایسه شد. آهنگ گسیل نوترون از چشمه‌ی نوترون  $^{241}\text{Am-Be}$  مورد استفاده  $2 \times 10^7$  نوترون بر ثانیه بود. بر این اساس شار نوترون در محل قرارگیری آشکارسازها در حدود  $637 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  بود. اگر انرژی متوسط نوترون چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  را ۴ مگا الکترون



### جدول ۳. زمان پرتودهی، تعداد حباب‌های تشکیل شده و آهنگ تشکیل

حباب در آشکارسازهای پرتودهی شده با نوترون مولد نوترون

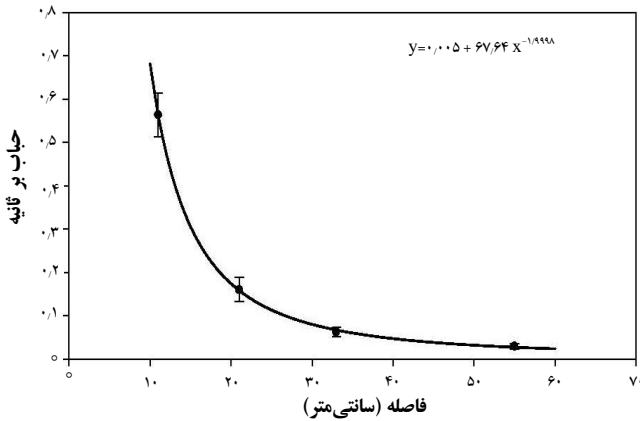
فاصله از چشمه (cm)	زمان پرتودهی (s)	تعداد حباب	آهنگ تشکیل حباب (بر ثانیه)	ضریب بهنجارش	تصحیح شده‌ی تشکیل حباب (بر ثانیه)	آهنگ
۱۱	۱۰۰	۶۲	۰.۶۲	۰.۹۱	۰.۵۶	
۲۱	۲۰۰	۸۰	۰.۴۰	۰.۴۰	۰.۱۶	
۳۳	۵۰۰	۲۹	۰.۰۵۸	۱.۰۸	۰.۰۶۲	
۵۵	۸۰۰	۲۳	۰.۰۲۹	۱.۰۴	۰.۰۳۰	



شکل ۷. رابطه بین پاسخ آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم ساخته شده و دز جذب شده در میدان نوترونی چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$ . میزان خطا در تعیین تعداد حباب‌ها در سطح اطمینان ۶۸٪ بود.

### ۴.۴ پرتودهی با نوترون مولد نوترون

در مولد نوترون با توجه به انرژی باریکه‌ی دوترون فرودی (۱۲۰ کیلو الکترون ولت) انرژی نوترون‌های گسیل شده در زاویه‌ی صفر درجه نسبت به باریکه‌ی فرودی ۲,۸۹ مگا الکترون ولت است. آشکارسازهای ساخته شده، در فاصله‌های مختلف از مولد نوترون قرار گرفته و پرتودهی شدند. با افزایش فاصله از مولد نوترون، به منظور افزایش آمار شمارش، زمان پرتودهی افزایش یافت. هم‌چنین از آشکارساز  $\text{BF}_3$  به عنوان تابش‌سنج برای بهنجار کردن جریان باریکه‌ی دوترون حین پرتودهی استفاده شد (شکل ۳). ضریب بهنجارش مربوط به تغییرهای جریان در جدول ۳ ارائه شده است. در حین پرتودهی دمای آزمایشگاه ۲۶ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. آهنگ تشکیل حباب در آشکارسازها برحسب فاصله از مولد نوترون در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل نایقینی آهنگ تشکیل حباب در سطح اطمینان ۶۸٪ محاسبه شده است. خطای آهنگ تشکیل حباب ناشی از نایقینی در شمارش تعداد حباب‌ها است. با توجه به توزیع پواسون تعداد حباب‌ها، نایقینی تعیین تعداد آن‌ها در ۶۸٪ سطح اطمینان به صورت جذر تعداد حباب تشکیل شده در هر آشکارساز در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود در این حالت با افزایش فاصله، آهنگ پاسخ این آشکارسازها به صورت عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد پاسخ آشکارساز با شارش نوترون فرودی متناسب است.



شکل ۸. پاسخ آشکارساز قطره‌ی فوق گرم، برحسب فاصله از مولد نوترون. میزان خطا در تعیین آهنگ تشکیل حباب‌ها در سطح اطمینان ۶۸٪ بود.

### ۵. نتیجه‌گیری

به منظور انتخاب بهترین محیط میزبان برای آشکارساز قطره‌ی فوق گرم، اثر گرانروی محیط میزبان بر تشکیل و پایداری حباب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تغییر گرانروی محیط میزبان با تغییر غلظت آکریل‌آمید و متیلن بیس آکریل‌آمید در محلول مونومر به انجام رسید. بدین ترتیب، ابتدا با استفاده از آزمون بطری محدوده‌ای از غلظت آکریل‌آمید و متیلن بیس آکریل‌آمید که بر روی گرانروی اثرگذار بود، به دست آمد، سپس آشکارسازهای قطره‌ی فوق گرم با محیط‌های میزبان با گرانروی‌های متفاوت ساخته شدند. پرتودهی این آشکارسازها با چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  نشان داد که بهترین پاسخ از نظر تشکیل و ماندگاری حباب‌ها با حذف متیلن بیس آکریل‌آمید (عامل ایجاد ساختار شبکه‌ای) و افزایش غلظت آکریل‌آمید تا ۳۵٪ به دست آمد. آشکارسازهای ساخته شده با این ویژگی محیط میزبان، در میدان‌های نوترونی چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  و مولد نوترون تحت پرتودهی قرار گرفتند. افزایش خطی تعداد



## مرجع‌ها

- [1] F. d'Errico, Radiation dosimetry and spectrometry with superheated emulsions, Nucl. Instr. and Meth B, 184 (2001) 229.
- [2] R.E. Apfel, The superheated drop detector, Nucl. Instr. and Meth A, 162 (1979) 603.
- [3] H. Ing, Direct reading detector/ dosimeter for neutron and other high LET radiation, 4 (1986) 613-758.
- [4] K. Alikanotis, Radiotherapy dose assessment using BNCT in conventional LINACs high-energy treatment: simulation and experiment, proceeding of the 7<sup>th</sup> young researchers' boron neutron capture therapy meeting, Granada, Spain (2013).
- [5] J. Rivera, R. Falcão, The measurement of photoneutron dose in the vicinity of clinical linear accelerators, Radiation Protection Dosimetry, 130 (2008) 403-409.
- [6] M. Das, B. Chatterjee, B. Roy, S. Roy, Superheated drop as a neutron spectrometer, Nucl. Instr. and Meth A, 452 (2000) 273.
- [7] B.J. Lewis, Review of bubble detector response characteristics and results from Space, Radiation Protection Dosimetry, 150 (2012) 1.
- [8] D. Ponraju, C.P. Jayashree, H. Krishnan, S. Viswanathan, R. Indira, Development of superheated emulsion technique for alpha activity measurements, Nucl. Instr. and Meth A, 580 (2007) 388.
- [9] G. Zhang, B. Ni, L. Li, P. Lv, W. Tian, Z. Wang, C. Zhang, H. Luo, S. Jiang, P. Wang, Study on bubble detectors used as personal neutron dosimeters, Applied radiation and isotopes, 69 (2011) 1453.
- [10] M. Felizardo, R. Martins, A. Ramos, T. Morlat, T. Girard, F. Giuliani, D. Limagne, G. Waysand, J. Marques, Improved acoustic instrument of the simple detector, Nucl. Instr. and Meth A, 585 (2008) 61.
- [11] P.K. Mondal, B.K. Chatterjee, An active device for volumetric measurement of drop nucleation in superheated emulsion detector, Meas. Sci. Technol., 19 (2008) 105820.

حباب‌های تشکیل شده با افزایش مقدار دز جذبی در آشکارسازهای پرتودهی شده با چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  و رفتار عکس مجذور فاصله برای آهنگ تشکیل حباب در آشکارسازهای پرتودهی شده با نوترون‌های حاصل از مولد نوترون به خوبی نشان‌دهنده تناسب تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکارسازهای تهیه شده با شارش نوترون‌های فرودی بود.

انتخاب مناسب نوع محیط میزبان سبب می‌شود که در اثر برهم کنش نوترون با مایع فوق گرم، حباب‌های کروی در محیط میزبان تشکیل شود. ماندگاری حباب‌ها در محیط میزبان نه تنها امکان خوانش در خاتمه‌ی پرتودهی برای این آشکارسازها را فراهم می‌کند، بلکه امکان استفاده‌ی مجدد از این آشکارسازها را نیز امکان‌پذیر می‌سازد. در کنار این قابلیت‌ها، شکل ظاهری حباب‌های تشکیل شده به گونه‌ای است که امکان خوانش آسان تعداد حباب‌ها با چشم غیرمسلح نیز فراهم می‌شود. با توجه به ویژگی‌های مذکور، می‌توان از آشکارساز ساخته شده در این پژوهش به عنوان ابزاری سودمند برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون استفاده نمود.

## پی‌نوشت‌ها

1. Superheated droplet detector
2. Freon
3. Viscosity
4. Inertial force
5. Buoyancy force
6. Pressure force
7. Drag force
8. Bottle test



- [12] D. Ponraju, H. Krishnan, S. Viswanathan, R. Indira, Preliminary results on bubble detectors as personal neutron dosimeter, *Radiation Protection Dosimetry*, 144 (2011) 177-181.
- [13] G. Raisali, P. Rezaeian, Calculation of scattered nucleus spectrum in neutron elastic scattering, *Annual Physics Conference of Iran, Yazd, Aug* (2011).
- [14] F. Seitz, On the theory of the bubble chamber, *Physics of Fluids*, 1 (1958) 2.
- [15] R. Apfel, S. Roy, Y.-C. Lo, Prediction of the minimum neutron energy to nucleate vapor bubbles in superheated liquids, *Physical review, A, General Physics*, 31 (1985) 3194.
- [16] J.S. Hadmard, Mouvement permanent lent d'une sphere liquid et visqueuse dans une liquid visqueuse, *CR Acad Scim*, 152 (1911) 1735.
- [17] Mala Das, T. Sawamura, Estimation of nucleation parameter for neutron-induced nucleation in superheated emulsion, *Nucl. Instr. and Meth A*, 531 (2004) 577.
- [18] C.R. Bell, Radiation induced boiling in superheated water and organic liquids, *Nuclear Science and Engineering*, 53 (1974) 458.
- [19] P. Snabre, F. Magnifotcham, I. Formation, rise of a bubble stream in a viscous liquid, *Eur. Phys. J. B*, 4 (1998) 369.
- [20] R. Sydnaks, Conformance improvement in a subterranean hydrocarbon-bearing formation using polymer gel, *US Patent*, 4 (1987) 683-949m.
- [21] W.R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, Chapter, 4 (1994) 98.
- [22] M.B. Chadwick, M. Herman, P. Oblozinský, M.E. Dunn, Y. Danon, A.C. Kahler, D.L. Smith, B. Pritychenko, G. Arbanas, R. Arcilla, R. Brewer, D.A. Brown, R. Capote, A.D. Carlson, Y.S. Cho, H. Derrien, K. Guber, G.M. Hale, S. Hoblit, S. Holloway, T.D. Johnson, T. Kawano, B.C. Kiedrowski, H. Kim, S. Kunieda, N.M. Larson, L. Leal, J.P. Lestone, R.C. Little, E.A. McCutchan, R.E. MacFarlane, M. MacInnes, C.M. Mattoon, R.D. McKnight, S.F. Mughabghab, G.P.A. Nobre, G. Palmiotti, A. Palumbo, M.T. Pigni, V.G. Pronyaev, R.O. Sayer, A.A. Sonzogni, N.C. Summers, P. Talou, I.J. Thompson, A. Trkov, R.L. Vogt, S.C. van der Marck, A. Wallner, M.C. White, D. Wiarda, P.G. Young, *ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nuclear Data Sheets*, (2011) 112.