

بازسازی محل هسته بهمن‌های گسترده‌ی هوایی با استفاده از سیگنال رادیویی پرتوهای کیهانی

فاطمه لطیفیان و گوهر رستگرازاده*

. دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان

*پست الکترونیکی: grastegar@semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴)

چکیده

در کار حاضر نشان داده‌ایم که با استفاده از یک آرایه بسیار چگال مجازی و مقایسه شدت سیگنال رادیویی تجربی دریافتی از آنتن‌های آرایه رادیویی پرتو کیهانی با شدت سیگنال رادیویی دریافتی از آنتن متناظر آنها در آرایه چگال می‌توان محل هسته بهمن‌های هوایی را تعیین کرد. مشخصاً این روش در مورد مختصات آرایه رادیویی SURA به کار برده شده است. علاوه بر این برای کاهش زمان شبیه سازی، تعداد آنتن‌های آرایه چگال بهینه‌سازی شده است. همچنین، تأثیر انرژی اولیه و زاویه سرسویی آرایه چگال بر دقت روش بررسی شده است. نشان داده‌ایم در بازه محدود، یک آرایه چگال با انرژی و زاویه سرسویی مشخص را می‌توان برای تعیین هسته بهمن‌های هوایی با انرژی‌ها و زوایای سرسویی متفاوت به کار برد.

واژه‌های کلیدی: پرتو کیهانی، هسته بهمن‌های گسترده هوایی، آشکارسازی رادیویی، SURA

. مقدمه

پرتوهای کیهانی با انرژی‌های بالاتر از 10^{15} eV می‌بایست از روش غیرمستقیم و آشکارسازی ذرات ثانویه و بررسی تابع توزیع عرضی (LDF) ناشی از آنها بهره گرفت [۲ و ۳]. هدف اصلی، اندازه‌گیری و تعیین مشخصه‌های اصلی پرتوهای کیهانی از جمله جهت فرود، ترکیب جرمی [۴ و ۵]، هسته بهمن‌های گسترده هوایی و انرژی اولیه آنها با استفاده از آشکارسازی ذرات ثانویه بهمن‌های گسترده هوایی است. یکی از روش‌های مؤثر آشکارسازی پرتوهای کیهانی پرانرژی استفاده از تابش رادیویی ساطع شده از بهمن‌های گسترده هوایی است. در دهه اخیر به واسطه آزمایش‌های دقیقی که توسط رصدخانه‌های

پرتوهای کیهانی ذرات نسبیتی هستند که از فضا وارد زمین می‌شوند. اگرچه در دهه‌های گذشته پیشرفت‌های چشمگیری در درک این پدیده حاصل شده است، اما با وجود تلاش‌ها و تحقیقات فراوان انجام شده در زمینه‌های تجربی و نظری، منشأ و منبع پرتوهای کیهانی همچنان ناشناخته است. در اثر برخورد پرتوهای کیهانی اولیه با مولکول‌های اتمسفر زمین، آبشاری از ذرات ثانویه به وجود می‌آید که به آن بهمن‌های گسترده هوایی (EAS) گفته می‌شود [۱]. شار پرتوهای کیهانی بسیار سریع با افزایش انرژی اولیه، کاهش می‌یابد. بنابراین برای بررسی

علاوه بر آن، از تجزیه و تحلیل شیب زاویه فاز سیگنال رادیویی نیز می‌توان هسته بهمن را مشخص کرد [۱۲]. روش دیگر پیدا کردن هسته بهمن، بر پایه مقایسه شدت سیگنال رادیویی تجربی و سیگنال رادیویی است که از شبیه سازی به دست می‌آید. این روش توسط آرایه رادیویی CODALEMA ارائه شده است [۱۳]. در کار حاضر، با استفاده از ایده‌ای که در این مقاله پیشنهاد شده است محل هسته بهمن‌های هوایی تعیین و برای افزایش دقت بازسازی و کاهش میزان خطا، این روش بهینه سازی می‌شود. مطالب این مقاله بدین صورت در بخش‌های مختلف طبقه بندی شده است: در بخش ۲، به معرفی روش تعیین هسته بهمن‌های هوایی می‌پردازیم. در بخش ۳، شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط کُد CoREAS بیان می‌شود. در بخش ۴، محل هسته بهمن‌ها با استفاده از این روش تعیین می‌شود. در بخش ۵، تأثیر انرژی اولیه در تعیین هسته بهمن بررسی می‌شود. در بخش ۶، به منظور بهینه‌سازی روش، از یک آرایه چگال کوچک‌تر با تعداد آنتن کمتر استفاده می‌شود. در بخش ۷، تأثیر جهت فرود به منظور بهینه‌سازی بیشتر روش بررسی می‌شود و در آخر، نتایج اصلی در بخش ۸ ذکر می‌شوند.

۲. روش تعیین هسته بهمن‌های هوایی پرتو کیهانی

برای پیدا کردن موقعیت هسته بهمن‌های هوایی (X_c, Y_c) شدت میدان الکتریکی تجربی با شدتی که از شبیه‌سازی به دست می‌آید مقایسه می‌شود. بدین منظور، ابتدا به تعریف آنتن مجازی می‌پردازیم [۱۴]. در شکل ۱، به خوبی نشان داده شده است که اگر بهمن هوایی شماره ۱ با جهت فرود مشخص به مرکز آرایه یعنی ($x=0, y=0$) برخورد کند، آنگاه آنتن شماره ۱ سیگنال رادیویی E_1 را از این بهمن هوایی دریافت خواهد کرد. سپس، اگر بهمن هوایی دیگری با همان جهت فرود بهمن قبلی در محل (X_c, Y_c) به آرایه برخورد کند، آنتن شماره ۱ سیگنال متفاوتی را نسبت به حالت قبل دریافت می‌کند که شدت آن را E_1' می‌نامیم. از طرف دیگر، آنتن ۲ که در موقعیت $x_2 = x_1 - x_c$ و $y_2 = y_1 - y_c$ قرار دارد از بهمن اولی

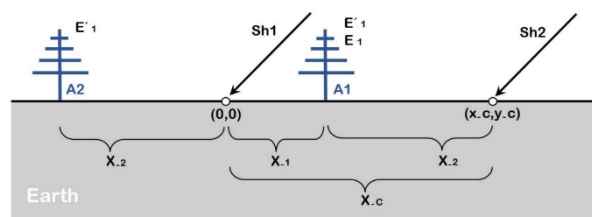
مختلف مانند LOFAR و AERA انجام شده و به کمک شبیه‌سازی‌های رادیویی، پیشرفت خوبی را در زمینه آشکارسازی رادیویی شاهد بوده‌ایم [۶]. پیرو پیشرفت‌های حاصل شده در زمینه رادیویی، آرایه رادیویی دانشگاه سمنان (SURA) با هدف بررسی ویژگی‌های اصلی پرتوهای کیهانی بر پشت بام دانشکده فیزیک دانشگاه سمنان شروع به کار کرد [۷]. این آرایه چهار آنتن LPDA^۱ دارد که در چهار گوشه پشت بام واقع شده‌اند. هر آنتن توسط سیم سه لایه ۳۰ متری به یک گیرنده مرکزی متصل است. برای تقویت و حذف سیگنال‌های رادیویی ناخواسته خارج از محدوده بسامدی ۴۰ تا ۸۰ مگاهرتز، هر آنتن مجهز به یک تقویت کننده سیگنال و یک صافی باندگذر است. هم اکنون، با توجه به مشخصات فنی آزمایش، آرایه رادیویی دانشگاه سمنان مشغول داده‌گیری و ثبت پرتوهای کیهانی با انرژی بالاتر از 10^{17} eV است [۸]. تا کنون SURA توانسته جهت فرود را که یکی از پارامترهای مهم بهمن‌های گسترده هوایی است با استفاده از اطلاعات زمانی با دقت حدود یک درجه به دست آورد [۷]. یکی دیگر از پارامترهای اصلی پرتوهای کیهانی محل برخورد محور بهمن با زمین است که هسته بهمن نامیده می‌شود. تعیین محل هسته بهمن بسیار حائز اهمیت است، زیرا می‌تواند ما را در پیدا کردن دیگر پارامترهای پرتوهای کیهانی مانند انرژی اولیه و به دست آوردن تابع توزیع عرضی (LDF) یاری رساند. روش‌های مختلفی برای پیدا کردن هسته بهمن وجود دارد که توسط آزمایش‌های مختلف انجام شده است. یکی از روش‌های هسته‌یابی که توسط آزمایش GRAPES-3 در هند انجام شده است، روش میانگین وزنی (WAM) است که از چگالی به دست آمده از یک گروه ۱۹ تایی از آشکارسازهای ذرات که بیشترین چگالی را دریافت کرده‌اند بهره می‌گیرد [۹]. روش دیگری بر پایه اطلاعات آماری ذرات ثانویه به منظور تعیین هسته بهمن در مرجع [۱۰] استفاده شده است. همچنین، با استفاده از حسگرهای CMOS کوچک و تعداد ذرات بارداری که هر حسگر دریافت می‌کند و از روی فاصله حسگرها از هم محل هسته تعیین می‌شود [۱۱].

۱. Log Periodic Dipole Antenna

سیگنال شبیه‌سازی شده به میانگین سیگنال تجربی است. در عمل E_k^{exp} شدت سیگنال تجربی دریافت شده توسط آنتن k ام است. اما در کار حاضر، به جای این کمیت از مقادیر شبیه‌سازی شده برای آرایه SURA استفاده شده است. در این روش، هنگام تعیین هسته بهمن انرژی پرتو اولیه مشخص نیست و ممکن است شدت سیگنال شبیه‌سازی با شدت سیگنال تجربی بسیار متفاوت باشد (به علت تفاوت در انرژی و ذره اولیه) و با یکدیگر قابل مقایسه نباشند. بنابراین، با وارد کردن ضریب C_{ij} شدت این دو سیگنال را به یکدیگر نزدیک می‌کنیم. واضح است اگر شبیه‌سازی آرایه چگال برای انرژی کمتری نسبت به انرژی پرتو کیهانی اولیه که به صورت تجربی به دست آمده، انجام شده باشد یعنی $E_{ijk}^{sim} < E_k^{exp}$ ، آنگاه $1 < C_{ij}$ و در غیر این صورت $1 > C_{ij}$ می‌شود. وقتی که مقدار χ^2 در هر مرحله محاسبه شد آن حدس احتمالی (x_i, y_j) برای هسته بهمن که کوچک‌ترین مقدار را به χ^2 دهد موقعیت قابل قبول هسته بهمن هوایی خواهد بود.

۳. شبیه‌سازی بهمن‌های هوایی

با استفاده از کُد CoREAS 77400، ابتدا یک آرایه بسیار چگال با تعداد آنتن ۱۲۳۲۱ که در فواصل یک متری از یکدیگر در بازه $55 < x < 55$ - متر و $55 < y < 55$ - متر توزیع شده‌اند و یک آرایه مربعی تشکیل می‌دهند، شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی، ذره اولیه پروتون، انرژی اولیه 10^{17} eV و جهت فرود در زاویه سروسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ و محل هسته بهمن $(X_c=0, Y_c=0)$ انتخاب شد. همچنین، سطح مشاهده در ارتفاع 1130 متر و مؤلفه‌های میدان مغناطیسی μT $B_x = 28/09$ و $B_y = 28/09$ مطابق با موقعیت آرایه SURA در نظر گرفته شد. برای آزمون دقت روش، ۱۱۸۵ بهمن هوایی پروتون در زوایای سروسویی مختلف و انرژی‌های اولیه 10^{17} eV ، $3 \times 10^{17} \text{ eV}$ ، $4 \times 10^{17} \text{ eV}$ ، $5 \times 10^{17} \text{ eV}$ ، $7 \times 10^{17} \text{ eV}$ برای آنتن‌های SURA شبیه‌سازی شد. در هر شبیه‌سازی، هسته بهمن با فواصل ۵ متری در بازه $30 < x_j < 30$ - متر و $30 < y_j < 30$ - متر تغییر می‌یابد، به طوری که ۱۶۹ مکان مختلف

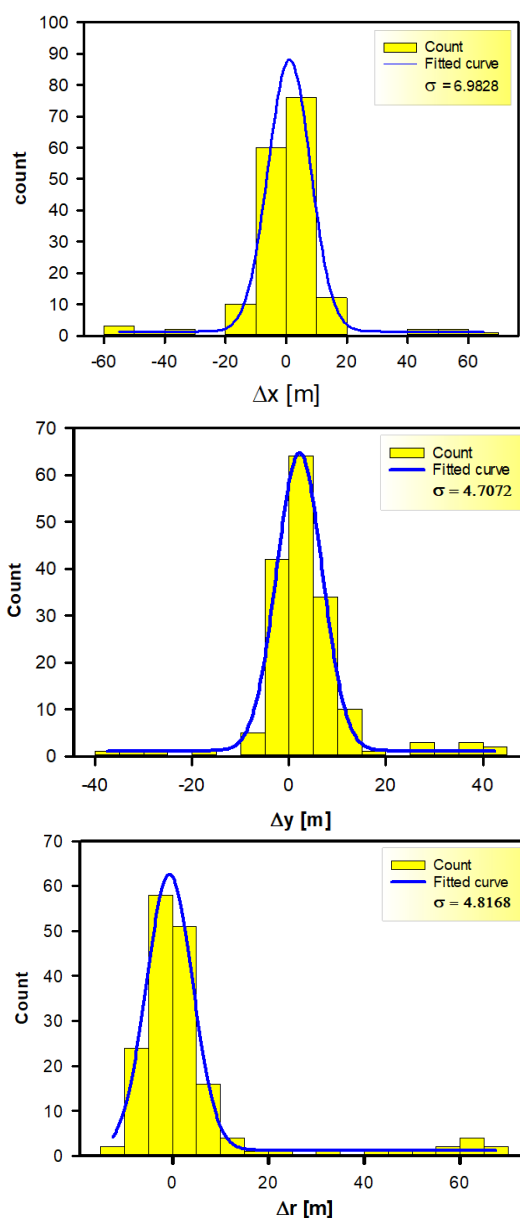


شکل ۱. آنتن مجازی.

با هسته $(X_c=0, Y_c=0)$ شدت سیگنال E_1' را دریافت می‌کند که این حالت برابر است با شدت سیگنالی که آنتن ۱ از بهمنی با هسته $(X_c=0, Y_c=0)$ دریافت می‌کند. بنابراین، ما آنتن ۲ را آنتن مجازی آنتن ۱ می‌نامیم. به بیان دیگر، سیگنال‌های دریافتی از بهمنی با هسته (x_c, y_c) همان سیگنال دریافتی از بهمنی با هسته $(X_c=0, Y_c=0)$ توسط آنتن مجازی آن آنتن است. با استفاده از این تعریف موقعیت هسته بهمن‌های هوایی تعیین می‌شود. برای انجام این کار کافی است برای یک آرایه بسیار چگال با تعداد آنتن زیاد در جهت فرود و انرژی دلخواه و هسته بهمن $(X_c=0, Y_c=0)$ شبیه‌سازی انجام شود. سپس، با مقایسه سیگنال‌های دریافتی از این آنتن‌های مجازی با سیگنال‌هایی که از مشاهدات تجربی به دست آمده هسته بهمن تعیین می‌شود. برای انجام این کار، به محاسبه χ^2 می‌پردازیم و حدس‌های احتمالی (x_i, y_j) خود را برای موقعیت هسته با فواصل یک متری در بازه $30 < y_j < 30$ - متر و $30 < x_j < 30$ - متر در معادله وارد می‌کنیم و χ^2 را در هر مرحله محاسبه می‌کنیم.

$$\chi_{ij}^2 = \chi^2(x_i, y_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{E_{ijk}^{sim} - E_k^{exp}}{C_{ij} E_k^{exp}} \right)^2, \quad (1)$$

(x_i, y_j) یک موقعیت هسته بهمن است که در مختصات آرایه SURA امتحان شده است. K شمارنده آنتن است که برای آرایه SURA، $n=4$ است. E_k^{exp} بیشینه شدت میدان الکتریکی تجربی آنتن شماره k است و E_{ijk}^{sim} بیشینه شدت میدان الکتریکی است که در شبیه‌سازی از آنتن مجازی آنتن k به دست آمده است. ضریب C_{ij} که عامل مقیاس نامیده می‌شود، نسبت میانگین



شکل ۲. نمودار توزیع خطای اندازه‌گیری هسته بهمن‌های هوایی پرتو کیهانی با استفاده از آرایه چگال با ۱۲۳۲۱ آنتن.

در جهت r است که $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ فاصله شعاعی از مرکز آرایه است. (طبق قرارداد کُد شبیه‌سازی CoREAS محور x جهت شمال و محور y جهت غرب را نشان می‌دهد). این نمودار را می‌توان با تابع گوسی $f(x) = a e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ برازش داد. در این تابع σ انحراف معیار و نشان دهنده میزان پهن‌شدگی منحنی و گستردگی خطای اندازه‌گیری محل هسته است.

برای هسته در هر انرژی در نظر گرفته شد. علاوه بر این، برای بهینه‌سازی آرایه چگال (بخش ۵)، آرایه چگال کوچک‌تری با تعداد ۳۳۶۴ آنتن، بهمنی با ذره اولیه پروتون، انرژی اولیه 2×10^{17} eV جهت فرود با زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 18^\circ$ جهت بهینه‌سازی روش شبیه‌سازی می‌شود.

۴. تعیین محل هسته بهمن‌ها

با بهره‌گیری از روشی که در بخش ۲ شرح داده شد و با استفاده از آرایه چگال با تعداد ۱۲۳۲۱ آنتن، هسته بهمن‌های پرتو کیهانی با کمینه کردن χ^2 تعیین می‌شود. شدت میدان الکتریکی که این آنتن‌ها در آرایه چگال دریافت می‌کنند به عنوان E_{ijk}^{sim} و سیگنال‌هایی که توسط آرایه شبیه‌سازی شده SURA دریافت می‌شوند به عنوان E_k^{exp} در معادله (۱) وارد می‌شود و بدین ترتیب هسته بهمن‌های هوایی پرتو کیهانی تعیین می‌شود. لازم به ذکر است، در شبیه‌سازی، موقعیت هسته به طور دقیق مشخص است و به عنوان ورودی در شبیه‌سازی وارد می‌شود. ولی در اینجا فرض می‌شود که مکان هسته نامعلوم است و با استفاده از این روش موقعیت هسته تعیین می‌شود و با هسته واقعی که در شبیه‌سازی وارد شده مقایسه می‌شود و میزان خطا و دقت اندازه‌گیری هسته بهمن با استفاده از این روش به دست می‌آید. در این بخش، با استفاده از آرایه چگال با انرژی 2×10^{17} eV که در زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ محل هسته بهمن $(X_c=0, Y_c=0)$ شبیه‌سازی شده است به تعیین محل هسته بهمن‌ها در انرژی متفاوت با 2×10^{17} eV اما در همان زاویه سرسویی و زاویه سمتی آرایه چگال پرداخته ایم. شکل ۲، میزان خطای تعیین هسته ۱۶۹ بهمن هوایی در انرژی 3×10^{17} eV و زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود متوسط خطا در تعیین محل هسته (محل قله منحنی گوسی) نزدیک به صفر است و پهنای این منحنی گستردگی خطا را نشان می‌دهد.

در شکل ۲، Δx میزان خطای اندازه‌گیری هسته بهمن در جهت شمال، Δy میزان خطا در جهت غرب و Δr میزان خطا

جدول ۱. میانگین و پراکندگی خطا در انرژی‌های مختلف.

انرژی [eV]	$\overline{\Delta x} \pm \sigma (\Delta x)$ [m]	$\overline{\Delta y} \pm \sigma (\Delta y)$ [m]	$\overline{\Delta r} \pm \sigma (\Delta r)$ [m]
1×10^{17}	$-2/28 \pm 2/36$	$-2/57 \pm 2/36$	$3/17 \pm 3/05$
2×10^{17}	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
3×10^{17}	$-0/16 \pm 3/73$	$5/91 \pm 3/81$	$1/09 \pm 3/11$
4×10^{17}	$-0/52 \pm 5/36$	$-0/62 \pm 4/01$	$4/63 \pm 4/03$
5×10^{17}	$0/33 \pm 6/98$	$2/44 \pm 4/70$	$3/64 \pm 4/81$

۵. تأثیر انرژی اولیه پرتوهای کیهانی

واضح است که اگر بهمنی با همان انرژی اولیه و زاویه فرود آرایه چگال ($2 \times 10^{17} \text{ eV}$) و زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$) به آرایه SURA برخورد کند میزان خطا در تعیین هسته بهمن ناچیز است. اما اگر هریک از این مقادیر متفاوت باشد خطا بیشتر می‌شود. در این بخش، با ثابت نگه داشتن زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ ، انرژی اولیه بهمن‌هایی را که مایل به تعیین محل هسته آنها با استفاده از این روش هستیم، تغییر می‌دهیم. یعنی از یک آرایه چگال با انرژی $2 \times 10^{17} \text{ eV}$ و زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ برای تعیین محل هسته‌هایی با انرژی‌های متفاوت اما زاویه سرسویی و سمتی مشابه آرایه چگال استفاده می‌کنیم تا مشخص شود که تا چه میزان انرژی اولیه بهمن‌ها می‌تولند از انرژی اولیه آرایه چگال یعنی $2 \times 10^{17} \text{ eV}$ متفاوت باشد و با آن حال دقت خوبی در تعیین محل هسته بهمن هوایی داشته باشد. به این منظور بهمن‌های فرودی در انرژی‌های متفاوت از آرایه چگال ($2 \times 10^{17} \text{ eV}$) شبیه‌سازی و محل هسته بهمن و خطای روش تعیین شد. نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. دقت شود که در اینجا $\overline{\Delta x}$ و $\overline{\Delta y}$ و $\overline{\Delta r}$ به ترتیب متوسط خطاهای تعیین محل x و y و r هسته 169 بهمن شبیه‌سازی شده است و $\sigma(\Delta x)$ و $\sigma(\Delta y)$ و $\sigma(\Delta r)$ میزان پراکندگی خطاهای آنهاست.

همانطور که در این جدول دیده می‌شود خطا هنگامی که تمام مشخصات بهمن آشکارسازی شده با مشخصات آرایه چگال

یکی است، صفر است و با دور شدن از انرژی آرایه چگال خطا افزایش می‌یابد.

۶. بهینه‌سازی روش با کوچک کردن آرایه چگال

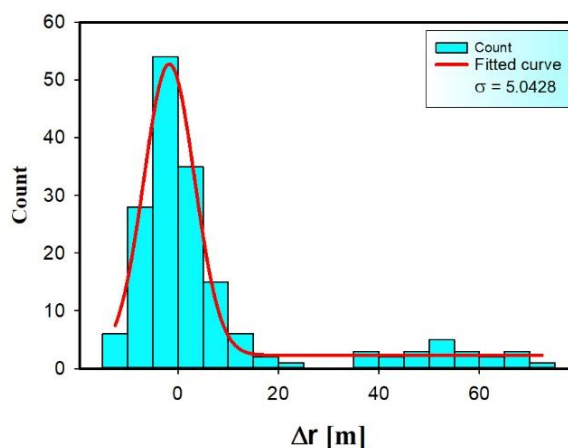
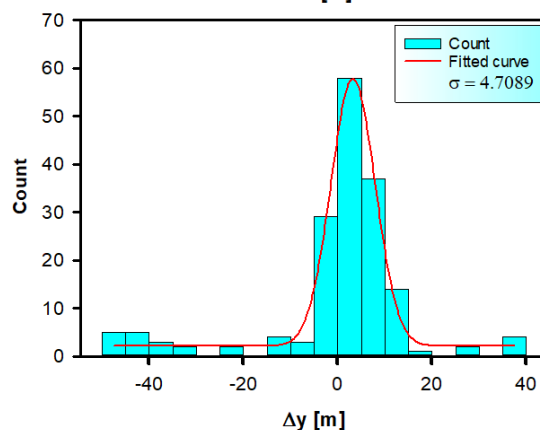
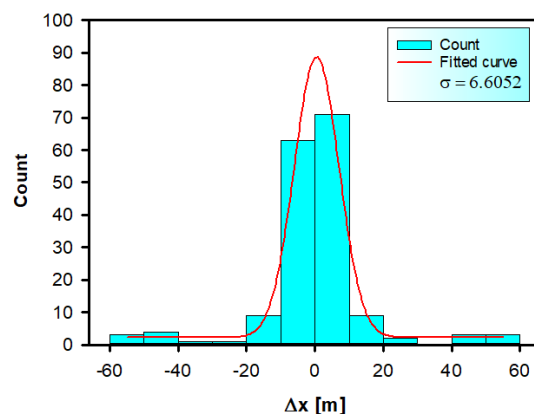
یکی از مشکلات روش پیشنهادی برای تعیین هسته بهمن‌های هوایی پرتو کیهانی طولانی بودن زمان شبیه‌سازی آرایه چگال است. برای مثال، برای شبیه‌سازی یک بهمن هوایی پرتون در انرژی $2 \times 10^{17} \text{ eV}$ و زاویه سرسویی 35° و زاویه سمتی 40° برای آرایه چگال با 12321 آنتن، حدود دو ماه زمان لازم است. واضح است هر چه تعداد آنتن‌ها بیشتر باشد زمان لازم برای انجام شبیه‌سازی بیشتر خواهد شد. در این مرحله، دقت روش را برای یک آرایه چگال کوچک‌تر با تعداد آنتن 3364 و همان مشخصات آرایه چگال قبلی بررسی کردیم. بدین ترتیب، زمان لازم برای انجام شبیه‌سازی آرایه چگال کاهش می‌یابد. با استفاده از این آرایه محل هسته بهمن‌های هوایی با جهت فرود مشابه آرایه چگال و محدوده انرژی اولیه از 10^{17} eV تا $7 \times 10^{17} \text{ eV}$ را به دست آوردیم. شکل ۳ خطای تعیین هسته بهمن‌های هوایی با انرژی اولیه $5 \times 10^{17} \text{ eV}$ را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود. با کوچک‌تر کردن آرایه چگال و با وجود این که حدود 9000 آنتن کمتر از آرایه چگال قبلی استفاده شده و زمان شبیه‌سازی بسیار کمتر شده است، همچنان می‌توان هسته بهمن‌های هوایی را با دقتی در حدود دقت به دست آمده با آرایه چگال بزرگ تعیین کرد. میزان خطاها در انرژی‌های دیگر به صورت عددی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. میانگین و پراکندگی خطا برای آرایه کوچک.

انرژی [eV]	$\overline{\Delta x} \pm \sigma$ (Δx) [m]	$\overline{\Delta y} \pm \sigma$ (Δy) [m]	$\overline{\Delta r} \pm \sigma$ (Δr) [m]
1×10^{17}	$-0 / 82 \pm 4 / 37$	$-1 / 74 \pm 3 / 88$	$0 / 62 \pm 4 / 56$
2×10^{17}	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
5×10^{17}	$-0 / 52 \pm 6 / 60$	$0 / 66 \pm 4 / 70$	$6 / 21 \pm 5 / 04$
7×10^{17}	$-0 / 92 \pm 64$	$-1 / 48 \pm 4 / 82$	$1 / 93 \pm 4 / 78$

۷. بررسی تأثیر زاویه سرسویی

یکی از محدودیت‌های این روش این است که برای تعیین هسته با زاویه سرسویی معین باید یک آرایه چگال با همان جهت فرود شبیه‌سازی کرد. در این بخش، با شبیه‌سازی بهمن‌های هوایی در زوایای متفاوت از زاویه سرسویی بهمن شبیه‌سازی شده برای آرایه چگال، سعی کرده‌ایم به این سؤال پاسخ دهیم که با دور شدن زاویه سرسویی بهمن‌های شبیه‌سازی شده از زاویه سرسویی آرایه چگال، خطای تعیین هسته با چه نرخ تغییر می‌کند. در اینجا بهمن‌های هوایی با زوایای سرسویی متفاوت از 30° تا 35° در سه انرژی مختلف 10^{17} eV، 5×10^{17} eV و 7×10^{17} eV مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان خطا تعیین شد. شکل ۴، میزان پهن‌شدگی تابع گوسی برازش شده روی توزیع خطای x هسته بهمن‌های هوایی در زوایای سرسویی مختلف از 30° تا 35° با استفاده از آرایه چگال کوچک با زاویه سرسویی 30° و زاویه سمتی 18° را نشان می‌دهد. هر نقطه در شکل ۴، نمایانگر پهن‌شدگی (σ) تابع گوسی برازش شده روی هیستوگرام خطای x تعیین هسته 169 بهمن هوایی است. همانطور که مشاهده می‌شود با دور شدن زاویه سرسویی از زاویه سرسویی آرایه چگال یعنی 30° ، میزان خطای هسته‌یابی افزایش می‌یابد. اگر با استفاده از یک آرایه چگال با همان زاویه سرسویی پرتوکیهانی آشکارشده به تعیین محل هسته آن پردازیم خطای تعیین هسته بسیار کم است. در واقع در این بخش تحقیق می‌کنیم که اگر به جای آن از یک آرایه چگال استفاده کنیم که زاویه سرسویی آن متفاوت از بهمن آشکارسازی شده باشد، خطا به چه میزان افزایش می‌یابد.

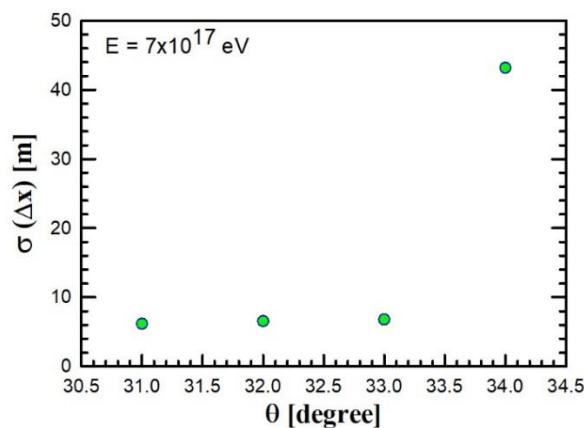
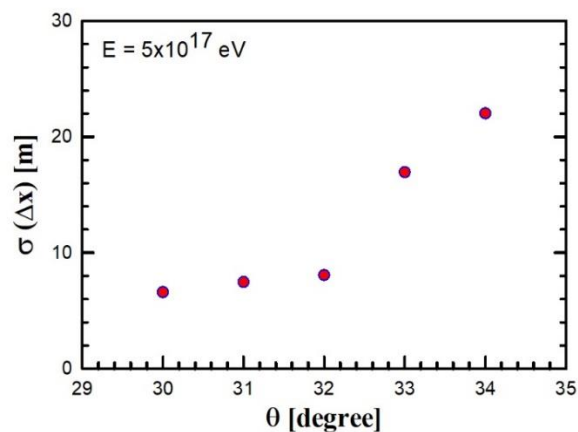
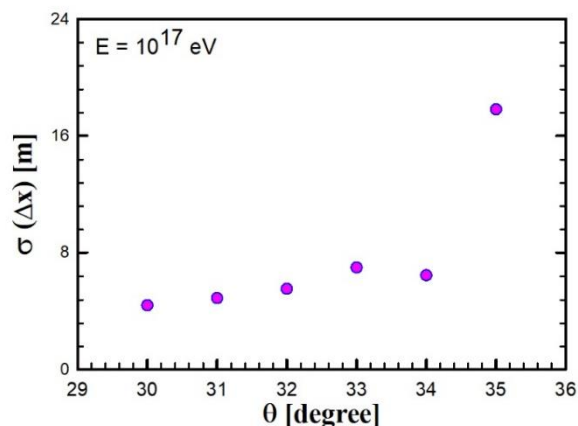


شکل ۳. نمودار توزیع خطای اندازه‌گیری هسته بهمن‌های هوایی پرتوکیهانی با استفاده از آرایه چگال با 3364 آنتن.

هوایی تا ۴ درجه دورتر قابل استفاده است و نیازی نیست که برای این زوایا آرایه چگال جداگانه شبیه‌سازی شود. در انرژی‌های بالاتر یعنی 5×10^{17} eV و 7×10^{17} eV، تا ۲ درجه دورتر، این آرایه چگال، دقت قابل قبولی برای تعیین هسته بهمن‌های هوایی دارد و با افزایش بیشتر زاویه سرسویی در انرژی‌های بالاتر خطای اندازه‌گیری موقعیت هسته بیشتر می‌شود.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید به منظور تعیین هسته بهمن‌های هوایی پرتو کیهانی که محل برخورد محور بهمن با زمین است، ارائه شد. این روش مبتنی بر پایه مقایسه شدت سیگنال تجربی با سیگنال‌های شبیه‌سازی شده در یک آرایه چگال است (در مقاله حاضر به جای داده تجربی از بهمن‌های شبیه‌سازی شده استفاده شده است). برای بهینه‌سازی این روش از لحاظ زمان شبیه‌سازی، آرایه چگال کوچک‌تری که زمان شبیه‌سازی کمتری نیاز دارد استفاده شد. نشان داده شد که با استفاده از این آرایه چگال کوچک‌تر تعیین هسته بهمن امکان پذیر بوده و دقت آن در حدود دقت اندازه‌گیری با آرایه چگال بزرگ است. همچنین، انرژی اولیه و زوایای فرود متفاوتی به منظور بهینه‌سازی بیشتر این روش بررسی شد. در نتیجه این بررسی‌ها مشخص شد که می‌توان از یک آرایه چگال برای تعیین هسته بهمن‌های هوایی با انرژی نزدیک به انرژی آرایه چگال، با دقت بسیار بالا استفاده کرد و هر چه انرژی اولیه بهمن‌های هوایی از انرژی اولیه آرایه چگال فاصله می‌گیرد خطا افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، مشخص شد که در انرژی‌های نزدیک به انرژی بهمن آرایه چگال، اگر زاویه سرسویی تا ۴ درجه بیشتر از زاویه سرسویی بهمن آرایه چگال باشد این روش با دقت خوبی قابل استفاده است.



شکل ۴. نمودار پهن‌شدگی (σ) خطای x بر حسب زاویه سرسویی.

با توجه به شکل ۴، به این نتیجه رسیدیم که برای بهمن‌هایی با انرژی نزدیک به انرژی بهمن آرایه چگال یعنی بهمن‌هایی با انرژی 10^{17} eV، با افزایش زاویه سرسویی تا ۴ درجه دورتر از زاویه سرسویی بهمن آرایه چگال می‌توان از این روش با دقت قابل قبول استفاده کرد. به بیان دیگر، این آرایه چگال با زاویه سرسویی $\theta = 30^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 18^\circ$ برای بهمن‌های

مراجع

1. P Auger, et al., *Rev. Mod. Phys.* **11** (1939) 288.
2. G Rastegarzadeh and L Rafezi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **763** (2014) 197.
3. A D. Supanitsky, *arXiv:2212.11695v1 [astro-ph.HE]* **10**, 3 (2022) 75.
4. G Rastegarzadeh and M Nemati, *Mod. Phys. D* **24**, 01 (2015) 1550010.
5. G Rastegarzadeh and M Nemati, *Adv. Space Res.* **61**, 4 (2018) 1181.
6. TAROGE and ARIANNA collaborations, "TAROGE-M: "Radio Antenna Array on Antarctic High Mountain for Detecting Near-Horizontal Ultra-High Energy Air Showers", *arXiv:2207.10616v3 [astro-ph.HE]* **11** (2022) 022.
7. G Rastegarzadeh and M Sabouhi, *Exp. Astro.* **49**, 1 (2020) 21.
8. G Rastegarzadeh, M Sabouhi, and H Meghdadi, *J. Astrophys. Astron.* **43** (2022) 56.
9. A Basak and R K Dey, *Proceeding of the DAE Symp. on Nucl. Phys.* 65 (2021) 502.
10. H Hedayati, A Moradi, and M Emami, *ApJ.* **810**, 1 (2015) 68.
11. W Takano and K Hibino, *ICRC*, PCRI351 (2023) 113.
12. M Sabouhi and G Rastegarzadeh, *ICRC*, (2017).
13. F Gatéa, et al., *ICRC*, The Hague, Netherlands. (2015).
14. S F Aghajanpour, M Sabouhi, and G Rastegarzadeh, *14th National conference on Astronomy and Astrophysics*, (2021) (Persian).