

بازسازی عمق پیشینه بهمن هوایی با استفاده از سیگنال رادیویی بهمن های گسترده هوایی

مریم مصطفوی الحسینی و گوهر رستگرازاده*

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان

پست الکترونیکی: grastegar@semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱)

چکیده:

در کار حاضر با استفاده از روش حداقل مربعات مبتنی بر مقایسه شدت سیگنال رادیویی مؤلفه شرقی غربی بردار میدان الکتریکی آشکارسازی شده از ذرات ثانویه بهمن های گسترده هوایی با شدت سیگنال های شبیه سازی شده موجود در بانک داده، به تخمین عمق پیشینه بهمن هوایی آشکارسازی شده در آرایه های رادیویی پرداخته ایم. شبیه سازی ها به طور مشخص برای مشخصات آرایه رادیویی دانشگاه سمنان (SURA) انجام شده است. با بهره گیری از روش شرح داده شده، وابستگی خطای این روش به مشخصه های اولیه پرتو کیهانی را مورد ارزیابی قرار دادیم. روش ارائه شده قادر است عمق پیشینه بهمن های هوایی با ذره اولیه پروتون را که به صورت عمود در بازه انرژی $100-500 \text{ PeV}$ منتشر شده اند با دقتی بهتر از $20/42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ تخمین بزند. خطای اندازه گیری شده با مشخص بودن انرژی ذره اولیه کاهش می یابد. همچنین تأثیر دقت تعیین زاویه سروسویی، موقعیت هسته بهمن و جرم ذره اولیه را بر میزان خطای روش پیشنهادی برای تعیین محل عمق پیشینه بررسی کرده ایم.

واژه های کلیدی: پرتو کیهانی، بهمن های گسترده هوایی، عمق پیشینه بهمن گسترده هوایی، آشکارسازی رادیویی، SURA

۱. مقدمه

هوایی و انتشار آنها استفاده می شود. در برخی از مدل های شبیه سازی، روش مونت کارلو به طور کامل به کار رفته و طی استفاده از آن، هر ذره در طول مسیر انتشار خود ردیابی و انتشار امواج رادیویی آن محاسبه می شود. از جمله این موارد می توان به کد CoREAS [۵] در برنامه CORSIKA [۶] اشاره کرد. توسعه بسیاری از مدل ها با نتایج اولیه به دست آمده از آزمایش هایی مانند LOPES [۷] یا CODALEMA [۸] همراه بود که به درک ویژگی های انتشار رادیویی و کمیت های مربوطه کمک کرد. در تمامی کدهای شبیه سازی فعلی علاوه بر مدل سازی توسعه بهمن هوایی، ضریب شکست اتمسفر که به طور قابل توجهی بر انتشار رادیویی یک بهمن گسترده هوایی اثر می گذارد، مورد توجه قرار گرفته است [۹].

از آنجا که منشأ پرتوهای کیهانی در بالاترین انرژی ها هنوز ناشناخته باقی مانده، آزمایش هایی با قابلیت جمع آوری

انتشار رادیویی بهمن های گسترده هوایی در دهه ۱۹۶۰ توسط جلی و همکارانش کشف شد [۱]. در همان زمان تعدادی از نظریه پردازان و محققان سعی کردند تا این انتشارها را مطالعه و تفسیر کنند [۲]. بررسی های جدید نشان دادند که امواج رادیویی پرتو کیهانی در محدوده بسامدی مگاهرتز ترکیبی از انتشار به وجود آمده ناشی از انحراف الکترون ها و پوزیترون ها در میدان مغناطیسی زمین (جریانات عرضی) و جداسازی بار در امتداد محور بهمن گسترده هوایی (فزونی بار-اثر اسکریان) [۳-۴] هستند. درک نظری کنونی ما از انتشار بهمن هوایی بر اساس نتایج به دست آمده از به کارگیری شبیه سازی و مدل های مختلف است. رویکردهای متفاوتی برای توصیف بهمن های

رویدادهای پرتو کیهانی در انرژی بسیار زیاد مورد نیاز است تا بتوان با آشکارسازی پرتوهای کیهانی به غایت پر انرژی و تعیین ویژگیهای اصلی هر بهمن، جرم ذره اولیه را تعیین و در نتیجه به ماهیت منابع این پرتوهای به غایت پر انرژی دست یافت. آزمایشهای LOPES و CODALEMA نشان دادند که با بهره‌گیری از روش آشکارسازی رادیویی می‌توان به بررسی تمام مشخصات اصلی بهمن‌های هوایی مثل جهت، انرژی و جرم پرداخت. نتایج امیدوار کننده حاصل از این پژوهش‌ها، منجر به راه‌اندازی نسل دوم آزمایش‌ها (LOFAR [۱۰]، AERA [۱۱] و Tunka-Rex [۱۲]) با هدف بهره‌برداری از پتانسیل واقعی این روش شدند.

علاوه بر موارد ذکر شده، با بهره‌گیری از این روش می‌توان عمق بیشینه بهمن (X_{max}) را تعیین کرد. این کمیت ارتفاعی از سطح جو است که تعداد ذرات ثانویه در آن به بیشینه مقدار خود می‌رسد. عمق بیشینه بهمن هوایی به مشخصه‌های ذره اولیه حساس بوده و با تعیین آن می‌توان به اطلاعات مهمی از پرتو کیهانی دست پیدا کرد [۱۳ و ۱۴].

روش تشخیص رادیویی علاوه بر دارا بودن چرخه کاری ۱۰۰ درصد، از لحاظ دقت در تخمین کمیت عمق بیشینه بهمن هوایی با بهترین روش فعلی یعنی آشکارسازهای فلورسانس [۱۵ و ۱۶] قابل مقایسه است.

به دنبال موفقیت‌های به دست آمده در نتیجه استفاده از روش آشکارسازی رادیویی، آرایه رادیویی دانشگاه سمنان (SURA) به عنوان اولین آرایه رادیویی در خاورمیانه راه‌اندازی شد. این آرایه، یکی از رصدخانه‌های فعال در آشکارسازی رادیویی پرتوهای کیهانی محسوب می‌شود. با توجه به مشخصات فنی آزمایش، این آرایه مشغول داده‌گیری و ثبت نامزدهای احتمالی پرتو کیهانی با انرژی بالاتر از 2×10^{17} eV است [۱۷].

فاز اولیه این آزمایش با بهره‌گیری از ۴ آنتن دو قطبی تناوبی^۱ در پنجره بسامدی ۸۰-۴۰ مگاهرتز فعالیت می‌کند. علی‌رغم چالش‌های موجود، یکی از مهم‌ترین اهداف این مرحله از

آزمایش، بررسی و توسعه الگوریتم‌های لازم به منظور راه‌اندازی یک آرایه خود محرک^۲ با هدف آشکارسازی رادیویی پرتوهای کیهانی است. به همین منظور، ضمن استفاده از سخت افزار و الکترونیک مناسب، برنامه‌ای رایانه‌ای برای دریافت و تحلیل تپ‌های رادیویی ثبت شده توسط آزمایش، توسعه داده شده است.

همانطور که می‌دانیم سیگنال واقعی ورودی به آنتن‌ها، پس از عبور از آنتن و تجهیزات الکترونیکی شامل کابل، تقویت‌کننده کم نوفه و صافی میان گذر^۳ دچار تغییر فاز و دامنه می‌شوند. در نتیجه لازم است تأثیرات آنتن و اجزای به کار رفته در آرایه لحاظ شود [۱۸] تا قابلیت مقایسه داده‌های نهایی با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی فراهم شود و در نتیجه بتوان به ویژگی‌های منحصر به فرد هر بهمن هوایی از جمله جهت ورود، انرژی و جرم ذره اولیه پی برد. در کار حاضر، با استفاده از روشی پیشنهادی به بررسی یکی از مشخصه‌های مهم پرتو کیهانی یعنی کمیت عمق بیشینه بهمن هوایی پرداخته‌ایم.

طبقه‌بندی مطالب این مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط کد CoREAS بیان می‌شود. در بخش ۳، به معرفی روش بازسازی پرداخته‌ایم. در بخش ۴، روش پیشنهادی را برای تعیین کمیت عمق بیشینه بهمن‌های شبیه‌سازی شده به کار برده‌ایم. در بخش ۵، وابستگی خطای روش به مشخصه‌های اولیه پرتو کیهانی را مورد ارزیابی قرار داده‌ایم و در نهایت نتایج اصلی این روش را در بخش ۶ به طور مختصر بیان کردیم.

۲. شبیه‌سازی

در این مقاله، ۱۴۷۰ پرتو کیهانی با ذرات اولیه پروتون، هلیوم، کربن، اکسیژن و آهن در ۵ گام انرژی در محدوده ۱۰۰ PeV تا ۵۰۰ PeV، زوایای سروسوی ۰، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ درجه و زاویه سمتی $\phi = 0^\circ$ با برنامه CORSIKA 7.74 و CoREAS 1.4

۱. Log-Periodic Dipole Antenna (LPDA)

۲. Self-trigger

۳. Band-pass Filter

تعیین مقدار عمق بیشینه بهمن هوایی داده‌های تجربی که توسط آرایه رادیویی دانشگاه سمنان به ثبت رسیده، استفاده می‌شود.

۴. تعیین عمق بیشینه در بهمن های گسترده هوایی

در ابتدا روش پیشنهادی خود را روی مجموعه‌ای از داده‌های شبیه‌سازی شده (داده مستقل و بانک اطلاعاتی) اعمال کردیم که این داده‌ها، به جز نوسانات آماری در سایر ویژگی‌ها از جمله جرم، انرژی، زاویه ورود و موقعیت هسته بهمن مشابه هستند. برای این بررسی، از مجموعه‌ای شامل 180° شبیه‌سازی پرتون با زاویه تابش سوسویی $\theta = 0^\circ$ و انرژی 10^{17} eV برای موقعیت هسته بهمن $(X_c = 0, Y_c = 0)$ استفاده کردیم که از این مجموع 40° داده به عنوان داده مستقل و بقیه به عنوان بانک اطلاعاتی در نظر گرفته شد. سپس با بهره‌گیری از روش شرح داده شده برای داده‌های مستقل، مقدار عمق بیشینه هر بهمن هوایی تخمین زده شد. بعد از اعمال روش بر داده‌های مستقل، اگر مقدار عمق بیشینه واقعی را با $X_{\max}$ و عمق بیشینه به دست آمده از روش بازسازی (معادله (۱)) را $X_{\max}^{\text{bank}}$ بنامیم، مقدار خطا در بازسازی مقدار عمق بیشینه $\Delta X_{\max}$ خواهد بود که:

$$\Delta X_{\max} = X_{\max}^{\text{bank}} - X_{\max} \quad (2)$$

شکل ۱ نمودار ستونی فراوانی مقدار خطای به دست آمده از روش پیشنهادی ما را نشان می‌دهد. منحنی رسم شده در این شکل، برازش توزیع خطا با تابع گوسی است. مقادیر منفی مربوط به زمانی است که مقدار عمق بیشینه به دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی از مقدار واقعی آن کمتر باشد.

در نتیجه تحلیل داده‌های مربوط به شکل ۱، میانگین خطا $35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ و انحراف معیار آن $19/57 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ به دست آمد. لازم به ذکر است که عمق بیشینه داده‌های مستقل به کار رفته در این تحلیل در محدوده $82 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} < X_{\max} < 615 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ است. مقایسه میانگین خطای تخمین موقعیت عمق بیشینه و انحراف معیار آن با محدوده ذکر شده، نشان می‌دهد که خطای نسبی روش پیشنهادی مقدار قابل قبولی است.

شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفتند که در آن، میدان مغناطیسی، ارتفاع سطح مشاهده و مختصات آنتن‌ها با توجه به مشخصات آرایه رادیویی SURA لحاظ شده است [۱۵]. همچنین از مدل‌های برهم‌کنشی انرژی بالا QGSJETII-04 [۱۹] و انرژی پایین Gheisha2002d ضمن استفاده از قابلیت نازک‌سازی^۱ بهره برده‌ایم. از این مجموع، 470° شبیه‌سازی را به عنوان داده مستقل و بقیه را به منظور بررسی دقت روش به عنوان بانک اطلاعاتی در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است که مقدار واقعی عمق بیشینه مربوط به هر بهمن هوایی شبیه‌سازی شده در داده‌های خروجی برنامه ثبت می‌شود که از این قابلیت به عنوان معیاری برای سنجش خطای روش استفاده کرده‌ایم.

۳. روش بازسازی مقدار عمق بیشینه بهمن

این روش بر مبنای مقایسه شدت سیگنال رادیویی آشکارسازی شده توسط آرایه رادیویی با شدت سیگنال شبیه‌سازی شده توسط کُد CoREAS توسعه داده شده است. در این رویکرد عمق بیشینه بهمن از روش حداقل مربعات و با استفاده از کمینه کردن اختلاف سیگنال تجربی و شبیه‌سازی به دست می‌آید. فرمول استفاده شده در این روش عبارت است از:

$$\chi_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^4 \left(\frac{E_{ij} - E_j}{E_j} \right)^2 \quad (1)$$

که در آن E_j نشان‌دهنده شدت مؤلفه شرقی-غربی سیگنال تجربی مربوط به آنتن j ام و E_{ij} شدت مؤلفه شرقی-غربی سیگنال آنتن j ام مربوط به رویداد شبیه‌سازی شده i ام است. در واقع داده‌های تجربی هر ۴ آنتن SURA با داده‌های ۴ آنتن رویداد i ام بانک مقایسه می‌شود و مقدار χ_i^2 تعیین می‌شود. این مقدار برای سایر داده‌های موجود در بانک نیز محاسبه می‌شود و در نهایت با کمینه کردن χ^2 ، نزدیک‌ترین داده بانک به سیگنال تجربی تعیین و $X_{\max}$ مربوط به آن به عنوان عمق بیشینه آن رویداد گزارش می‌شود. در کار حاضر، فعلاً از داده‌های شبیه‌سازی به جای داده‌های تجربی استفاده کرده‌ایم که با عنوان داده مستقل در متن معرفی شده‌اند. در آینده از این روش برای

را در دو حالت انجام دادیم: (۱) انرژی اولیه ذره برای ما مشخص باشد، (۲) انرژی اولیه ذره مجهول باشد.

در حالت اول داده‌های مستقل را با بانک هم انرژی با داده‌های مورد مطالعه مقایسه می‌کنیم. نتایج به دست آمده از این حالت در ۵ سطر اول جدول ۱ خلاصه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش انرژی اولیه، میانگین $X_{\max}$ افزایش می‌یابد که کاملاً مورد انتظار است. در ستون سوم انحراف معیار قدر مطلق خطای مربوط به هر انرژی و در ستون چهارم مقادیر خطای نسبی نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود علی‌رغم افزایش مقادیر انحراف معیار با افزایش انرژی، خطای نسبی تقریباً ثابت می‌ماند.

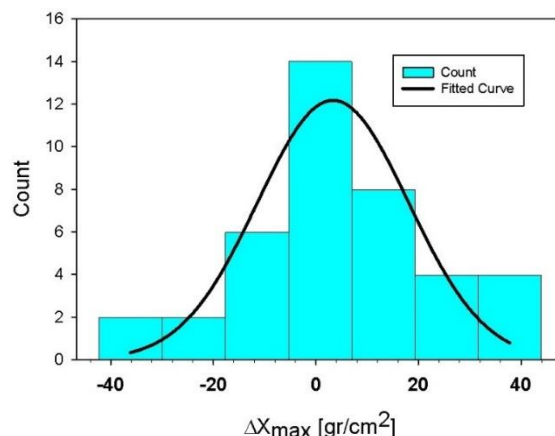
در حالت بعد، تمام داده‌های مستقل در ۵ انرژی مختلف را با هم در یک مجموعه ۱۰۰ تایی در نظر می‌گیریم. عمق بیشینه بهمن‌های موجود در این مجموعه را با استفاده از یک بانک اطلاعاتی جدید شامل ۴۰۰ بهمن شبیه‌سازی شده با ذره اولیه پروتون که به صورت عمود در همان ۵ انرژی مختلف منتشر شده‌اند به دست می‌آوریم. نتایج این بررسی در سطر ششم جدول ۱ با عنوان "بانک ترکیبی" نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت به دلیل فقدان اطلاعات کامل در مورد انرژی ذره اولیه، خطای نسبی افزایش یافته است.

درواقع، حین استفاده از روش پیشنهادی در حالت دوم، از مجموع صد داده مستقل، کمترین مقدار χ^2 در ۹۶ داده از میان ذرات هم‌انرژی با داده مستقل به دست آمده است. در ۴ ذره باقی‌مانده کمترین مقدار χ^2 از میان ذراتی با اختلاف یک گام انرژی (۱۰۰ PeV) نسبت به ذره اولیه تخمین زده شده است.

۵.۲. زاویه ورود

می‌دانیم که زاویه سرسویی با تعداد ذرات ثانویه رسیده به سطح رابطه عکس دارد و با افزایش آن، ذرات ثانویه به دلیل طی کردن مسافت بیشتر در جو، انرژی خود را زودتر از دست داده و جذب جو می‌شوند.

آزمایش SURA قادر است زاویه ورود (θ, φ) ذره اولیه را با خطای یک درجه تخمین بزند [۱۷]. از همین‌رو اثر ناشی از وجود یک درجه خطا در تعیین زاویه سرسویی بر تخمین مقدار



شکل ۱. توزیع خطا در تعیین محل عمق بیشینه بهمن‌های هوایی عمود با ذره اولیه پروتون و انرژی 10^{17} eV. منحنی رسم شده مربوط به برازش توزیع خطا با تابع گوسی است.

۵. وابستگی خطای روش به مشخصه‌های اولیه

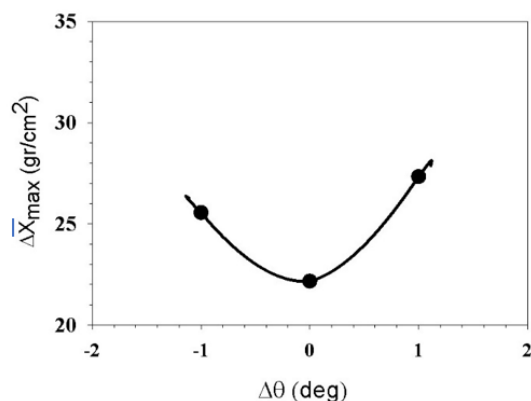
پروتو کیهانی

می‌دانیم که تحولات بهمن هوایی، تحت تأثیر سه کمیت اصلی یعنی انرژی، جرم و راستای ورود ذره اولیه است و این عوامل در تعیین موقعیت عمق بیشینه هر بهمن هوایی تأثیرگذارند. در حال حاضر در آرایه رادیویی SURA امکان تعیین زاویه ورود [۱۷] و موقعیت هسته هر بهمن هوایی [۲۰] وجود دارد و در نتیجه مطالعات انجام شده، خطای محاسبه این دو کمیت به دست آمده است. در ادامه به بررسی تأثیر جرم، انرژی، دقت تعیین زاویه ورود و موقعیت هسته بهمن بر دقت روش پیشنهادی پرداخته‌ایم.

۵.۱. انرژی ذره اولیه

می‌دانیم این کمیت با میزان عمق نفوذ ذره در جو ارتباط دارد به نحوی که هرچه انرژی ذره بیشتر باشد، ذرات ثانویه در عمق بیشتری از جو نفوذ خواهند کرد و در نتیجه مقدار عمق بیشینه افزایش می‌یابد.

برای بررسی تأثیر این کمیت، ۵۰۰ شبیه‌سازی با ذره اولیه پروتون و زاویه تابش سرسویی $\theta = 0^\circ$ در ۵ گام انرژی در محدوده ۱۰۰ PeV تا ۵۰۰ PeV انجام شد که از این مجموع ۱۰۰ شبیه‌سازی به عنوان داده مستقل و مابقی به عنوان بانک اطلاعاتی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این که در حال حاضر تعیین کمیت انرژی ذره اولیه با استفاده از روشی خاص در آزمایش SURA در حال بررسی است [۲۱]، ارزیابی خود



شکل ۲. خطای تعیین عمق بیشینه برحسب اختلاف زاویه داده مستقل (زاویه سرسویی 15°) با زاویه سرسویی بانک های داده.

۵.۳. بررسی تأثیر موقعیت هسته بهمن

موقعیت عمق بیشینه هر بهمن هوایی مستقل از محل هسته آن است. در عین حال با دور شدن محل هسته بهمن از مرکز آرایه، تعداد آنتن های دریافت کننده سیگنال کاهش می یابد؛ در نتیجه احتمال افزایش خطا وجود دارد. برای بررسی وابستگی نتایج روش حاضر به محل هسته بهمن، یک پرتو کیهانی پروتون با زاویه سرسویی $\theta = 0^\circ$ و انرژی $2 \times 10^{17} \text{ eV}$ را در ۱۱۲ موقعیت مختلف هسته در محدوده شعاعی $23 \text{ m} < r \leq 3 \text{ m}$ شبیه سازی کردیم. از آنجا که در شبیه سازی ها، محل $X_{\max}$ مستقل از محل هسته بهمن است، برای همه این رویدادها محل عمق بیشینه $\frac{680}{11} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ بود. با این حال به دلیل تغییر محل هسته بهمن نسبت به موقعیت آنتن ها، شدت سیگنال دریافت شده نهایی توسط آنتن ها در شبیه سازی های مختلف با هم متفاوت بودند.

با استفاده از روش بازسازی و استفاده از داده های هم انرژی موجود در بانک، عمق بیشینه بهمن هوایی برای ۱۱۲ داده مستقل تعیین شد. با بهره گیری از روش ارائه شده، میانگین عمق بیشینه $\frac{673}{84} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ و انحراف معیار آن $\frac{14}{28} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ به دست آمد. در نتیجه میانگین خطای مربوط به تعیین محل عمق بیشینه بهمن در این حالت برابر است با:

$$\Delta X_{\max} = \frac{680}{11} - \frac{673}{84} = \frac{6}{27} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

از طرفی در داده های بانک اطلاعاتی که برای همان انرژی و زاویه سرسویی اما در یک محل ثابت برای هسته بهمن

جدول ۱. مقایسه داده های شبیه سازی با بانک متناظر هم انرژی و بانک ترکیبی.

$ \Delta \bar{X}_{\max} / \bar{X}_{\max}$	$ \Delta \bar{X}_{\max} (\text{g} / \text{cm}^2)$	$\bar{X}_{\max} (\text{g} / \text{cm}^2)$	E (eV)
۰/۰۱۷	۱۱/۸۴	۶۹۹/۹۰	1×10^{17}
۰/۰۱۷	۱۲/۳۴	۷۱۱/۴۹	2×10^{17}
۰/۰۱۸۸	۱۳/۴۸	۷۱۵/۵۳	3×10^{17}
۰/۰۱۹۷	۱۴/۴۰	۷۲۷/۶۷	4×10^{17}
۰/۰۲۰۸	۱۵/۳۴	۷۳۵/۲۰	5×10^{17}
۰/۰۲۸۴	۲۰/۴۲	۷۱۸/۰۹۹	بانک ترکیبی

عمق بیشینه بهمن هوایی را مورد مطالعه قرار دادیم. به این منظور از ۴۳۵ شبیه سازی پرتو کیهانی با ذره اولیه پروتون در زوایای سرسویی ۱۴، ۱۵ و ۱۶ درجه و انرژی های 100 PeV تا 10^{17} PeV استفاده کردیم. درواقع فرض می کنیم که زاویه سرسویی رویداد مورد مطالعه با دقت یک درجه تخمین زده شده، اما انرژی ذره اولیه نامشخص است. از مجموع شبیه سازی های ذکر شده، ۳۷۰ عدد را به عنوان بانک اطلاعاتی و مابقی را که همه در زاویه سرسویی ۱۵ درجه شبیه سازی شده بودند، به عنوان داده مستقل در نظر گرفته ایم.

به منظور تخمین میزان خطای ناشی از دقت تعیین زاویه سرسویی بر مقدار به دست آمده برای عمق بیشینه بهمن، میزان خطای روش پیشنهادی را ضمن استفاده جداگانه از بانک داده زوایای ۱۴، ۱۵ و ۱۶ درجه به دست آوردیم.

شکل ۲، منحنی میانگین خطای تعیین عمق بیشینه ($\Delta X_{\max}$) برحسب اختلاف زاویه سرسویی داده مستقل با زاویه بانک داده ($\Delta \theta$) را نشان می دهد.

همان طور که در این شکل دیده می شود کمترین مقدار میانگین خطا مربوط به زمانی است که زاویه سرسویی بانک و داده مستقل یکسان هستند ($\Delta \theta = 0^\circ$). مقدار میانگین خطای به دست آمده در این حالت برابر با $\frac{22}{16} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ و بیشینه میانگین خطا در $\Delta \theta = +1^\circ$ و برابر با $\frac{27}{34} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ به دست آمده است. در نتیجه وجود خطای یک درجه ای در تعیین زاویه سرسویی منجر به ایجاد میانگین خطای $\frac{5}{18} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ ($27/34 - 22/16$) در تعیین $X_{\max}$ می شود.

جدول ۲. مقادیر متوسط عمق بیشینه داده مستقل و قدر مطلق

خطای تعیین عمق بیشینه با استفاده از بانک اطلاعاتی پروتون برای ذرات مختلف با انتشار عمودی و انرژی 10^{17} eV.

ذره	$\bar{X}_{\max} (g/cm^2)$	$ \Delta \bar{X}_{\max} (g/cm^2)$
P	۶۹۹/۹۰	۱۱/۸۴
He	۶۵۱/۱۲	۱۶/۲۴
C	۶۳۶/۷۲	۱۸/۶۲
O	۶۱۲/۱۲	۴۵/۳۵
Fe	۶۰۵/۹۰	۲۰۰/۲۴

شبه‌سازی شده بودند، میانگین محل $(x=10\text{ m}, y=10\text{ m})$ عمق بیشینه $\frac{g}{cm^2}$ ۷۱۰/۷۵، خطای انحراف معیار $\frac{g}{cm^2}$ ۷۴/۴۸ و در نتیجه $\frac{g}{cm^2}$ $30/64 = 710/75 - 680/11 = \Delta X_{\max}$ به دست آمد.

در نهایت خطای مربوط به تغییر محل هسته بهمن $(\frac{g}{cm^2})$ ۶/۲۷ از خطای مربوط به نوسانات شبه‌سازی $(\frac{g}{cm^2})$ ۳۰/۶۴ کمتر است. همچنین انحراف معیارناشی از تغییر محل هسته بهمن $(\frac{g}{cm^2})$ ۱۴/۲۸ از انحراف معیار مربوط به نوسانات شبه‌سازی $(\frac{g}{cm^2})$ ۷۴/۴۸ کمتر است. بنابراین تغییر در محل هسته بهمن، تأثیر قابل توجهی در تعیین $X_{\max}$ ایجاد نمی‌کند.

۵. ۴. تأثیر جرم اولیه

ذرات ثانویه در یک بهمن هوایی حاصل از هسته سنگین در مقایسه با هسته سبک، در فواصل دورتری از محور بهمن هوایی منتشر شده و توسعه عرضی بیشتری دارند. به علاوه، با توجه به این که در هسته‌های سنگین‌تر، انرژی بین نوکلون‌های بیشتری تقسیم می‌شود، بهمن‌های ناشی از این ذرات در ارتفاع بالاتری به عمق بیشینه خود می‌رسند. علاوه‌براین می‌دانیم که حدود ۹۰٪ پرتوهای اولیه پروتون (هسته هیدروژن)، ۹٪ ذرات آلفا (هسته هلیوم) و ۱ درصد باقی‌مانده را هسته عناصر سنگین‌تر تشکیل می‌دهند [۲۲-۲۳].

با توجه به این که در حال حاضر جرم اولیه پرتو کیهانی آشکارسازی شده توسط آزمایش SURA نامشخص است، این بررسی را در دو حالت انجام دادیم: در حالت اول با توجه به درصد بالای پروتون در ذرات اولیه پرتو کیهانی، از بانک اطلاعاتی حاوی ۱۰۰ پروتون

شبه‌سازی شده برای تعیین عمق بیشینه بهمن‌هایی با ذرات مختلف استفاده کرده و خطای مربوط به آن را به دست می‌آوریم.

به عنوان داده مستقل در این بررسی، برای هریک از ذرات اولیه پروتون، هلیوم، کربن، اکسیژن و آهن، تعداد ۴۰ رویداد با انرژی 10^{17} eV و جهت ورود عمودی شبه‌سازی کردیم و با بهره‌گیری از روش پیشنهادی بر مجموع ۲۰۰ داده مستقل، عمق بیشینه را تخمین زده و مقادیر به دست آمده را با مقدار واقعی مقایسه کردیم. در جدول ۲، میانگین عمق بیشینه واقعی مربوط به هر جرم و خطای تخمین عمق بیشینه نشان داده شده است. همانگونه که انتظار داریم و در جدول ۲ نیز دیده می‌شود با افزایش جرم اولیه، میانگین عمق بیشینه کاهش می‌یابد. با این وجود به دلیل افزایش تفاوت جرم اولیه با جرم پرتوهای کیهانی استفاده شده در بانک اطلاعاتی که همگی پروتون هستند، متوسط خطای روش افزایش یافته و این مقدار برای ذره اولیه آهن به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

با توجه به آن که هسته‌های سنگین درصد بسیار کمی از پرتوهای کیهانی را تشکیل می‌دهند، وجود خطای گزارش شده در محاسبه مقدار عمق بیشینه بهمن هوایی این ذرات، از اهمیت زیادی برخوردار نیست.

به منظور کاهش میزان خطا در بازسازی مقدار عمق بیشینه بهمن هوایی با استفاده از روش پیشنهادی برای عناصر سنگین، بررسی را در حالت دوم یعنی بهره‌گیری از یک بانک ترکیبی انجام دادیم. به این منظور به بانک اولیه، شبه‌سازی‌هایی با ذرات اولیه هلیوم، کربن، اکسیژن و آهن اضافه کردیم.

در این حالت برای هریک از ذرات فوق تعداد ۱۵ شبه‌سازی جدید به بانک پروتون اضافه و مجموع شبه‌سازی‌های بانک داده به ۱۶۰ رسید. سپس ارزیابی مجددی انجام گرفت که نتایج این بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است.

بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که علی‌رغم محدود بودن تعداد شبه‌سازی‌های اضافه شده به بانک داده، دقت روش پیشنهادی در تخمین عمق بیشینه بهمن گسترده‌هوائی در مقایسه با حالت بانک تک ذره (پروتون)، به شکل قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته و مقدار به دست آمده برای انحراف معیار قدر مطلق خطا در این حالت با مقادیر محاسبه شده در جدول ۱ با دقت خوبی برابری می‌کند.

جدول ۳. خطای تعیین عمق بیشینه با استفاده از بانک اطلاعاتی ترکیبی برای ذرات مختلف با انتشار عمودی و انرژی 10^{17} eV.

ذره	$ \overline{\Delta X_{\max}} (g/cm^2)$	$ \overline{\Delta X_{\max}} / \overline{X_{\max}}$
He	۱۵/۳۰	۰/۰۲۳
C	۱۲/۳۰	۰/۰۱۹
O	۱۲/۳۷	۰/۰۲
Fe	۹/۷۸	۰/۰۱۶

۶. نتیجه گیری

در کار حاضر روشی برای بازسازی موقعیت عمق بیشینه بهمن هوایی مبتنی بر مقایسه سیگنال رادیویی آشکارسازی شده با مقادیر متناظر شبیه سازی (بانک داده)، ارائه شد. در این رویکرد، ضمن بهره گیری از روش حداقل مربعات و با استفاده از کمینه کردن اختلاف سیگنال تجربی و شبیه سازی، مقدار عمق بیشینه بهمن هوایی تعیین می شود. در این پژوهش، 1470 شبیه سازی برای مشخصه های آرایه رادیویی دانشگاه سمنان انجام و داده های حاصل از آن مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از روش پیشنهادی، مقادیر عمق بیشینه برای بهمن های هوایی با ذره اولیه پروتون در محدوده انرژی PeV $500-100$ به دست آمد. بیشترین خطا هنگام استفاده از بانک داده ترکیبی و با فرض

مراجع

عدم اطلاع از انرژی ذره اولیه، $\frac{g}{cm^2}$ $20/42$ به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار خطای گزارش شده در صورت مشخص بودن انرژی ذره اولیه، کاهش می یابد. در مرحله بعد تأثیر محل هسته بهمن و دقت تعیین زاویه سرسویی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهد که خطای یک درجه ای در تعیین زاویه سرسویی به افزایش خطایی حدود $\frac{g}{cm^2}$ 5 در تعیین محل عمق بیشینه منجر می شود. بررسی ها نشان داد که عدم آگاهی از محل هسته بهمن، خطای روش را کمتر از خطای نوسانات آماری افزایش می دهد. در نهایت تأثیر عدم آگاهی از جرم اولیه پروتو کیهانی در تعیین محل عمق بیشینه بررسی شد. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از بانک اطلاعاتی پروتون، با افزایش جرم ذره اولیه متوسط خطای روش پیشنهادی به صورت چشمگیری افزایش می یابد. این خطا در صورت استفاده از بانک ترکیبی حاوی ذرات مختلف تا حد قابل قبولی کاهش می یابد به نحوی که خطای نسبی به دست آمده با خطای نسبی حاصل از مقایسه داده مستقل پروتون با بانک پروتون برابری می کند. در آینده از این روش برای تعیین محل عمق بیشینه داده های تجربی ثبت شده توسط آرایه رادیوی دانشگاه سمنان (SURA) استفاده خواهد شد.

1. J Jelley, et al., *Nature* **205** (1965) 327.
2. H R Allan, *Prog. Element. Part. Cosmic Ray Phys.* **10** (1971) 169.
3. G A Askaryan, *J. Phys. Soc. Japan* **14** (1962) 441.
4. G A Askaryan, *J. Phys. Soc. Japan* **21** (1965) 658.
5. T Huege, M Ludwig and C W James, *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics. (2013)
6. D Heck, et al., "CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers", FZKA Report 6019, Forschungszentrum Karlsruhe (1998).
7. H Falcke, et al., *Nature* **435** (2005) 313.
8. D Ardouin, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **555** (2005) 148.
9. K D de Vries, et al., *Astropart. Phys.* **34** (2010) 267273.
10. P Schellart, et al., *Astron. Astrophys.* **560**, (2013) A98.
11. J Schulz, *Proceedings of the 34th ICRC, The Hague, The Netherlands*, PoS (2015).
12. P A Bezyazeev, et al., *Methods Phys. Res. Sect. A: Detect. Assoc. Equip.* **802** (2015) 89.
13. G Rastegarzadeh and M Nemati, *Iran. J. Phys. Res.* **10**, 1 (2010) 47.
14. G Rastegarzadeh and S Khoshabadi, *Int. J. Modern Phys. D* **24**, 10 (2015) 1550080.
15. W D Apel, et al., "Phys. Rev D" **85** (2012) 071101.
16. A Aminaei, et al., *Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil* (2013) 3358.
17. G Rastegarzadeh and M Sabouhi, *Exp. Astro.* **49** (2020) 21.
18. M Sabouhi, G Rastegarzadeh, and H Meghdadi, *J. Astrophys. Astron.* **43**, 2 (2022) 56.

19. S. Ostapchenko, *Nuclear Phys. B Proc. Suppl.* **151**, 1 (2006) 143.
20. S F Aghajanpour, M Sabouhi and G Rastegarzadeh, *Proceedings of the 14th National conference on Astronomy and Astrophysics* (2021).
21. F Latifian and G Rastegarzadeh, *Proceedings of the 17th National Conference on Astronomy and Astrophysics* (2024).
22. E Lofgren, et al., *Phys. Rev.* **74**,2 (1948) 213.
23. B Peters, et al., *Phys. Rev.* **74**,12 (1948) 1828.