

مشاهده پرتوهای کیهانی با آرایه البرز ۱

محمود بهمن آبادی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

پست الکترونیکی: bahmanabadi@sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰)

چکیده

آرایه البرز ۱ شامل ۲۰ آشکارساز سوسوزن هر یک با مساحت سطح 0.25 m^2 روی سطحی با مساحت $40 \times 40 \text{ m}^2$ برای مطالعه بهمن‌های هوایی گسترده در حوالی زانوی طیف پرتوهای کیهانی در دانشگاه صنعتی شریف راه‌اندازی خواهد شد. برای پیدا کردن عملکرد این آرایه، تعداد زیادی بهمن هوایی با کد CORSIKA شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، نتایج نظری به دست آمده از چیدمان‌های مختلف برای آرایه و شرط‌های راه‌اندازی مختلف توصیف می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی بهمن‌های هوایی نرخ رخداد‌های آشکار شده در روز و تابع‌های احتمال راه‌اندازی، یعنی احتمال این که یک بهمن هوایی آرایه مورد نظر را راه‌اندازی کند را بر حسب فاصله هسته بهمن تا مرکز آرایه ارائه می‌دهیم. انرژی ذره اولیه مولد بهمن هوایی بالای 1 TeV و برای زاویه‌های سروسویی تا 60° است. همچنین تفکیک زاویه‌ای البرز ۱ به دست آورده می‌شود. برای بررسی تجربی این آرایه، زیرآرایه البرز ۱ شامل پنج آشکارساز سوسوزن با چیدمان پنج ضلعی منتظم، مشابه خوشه مرکزی آرایه البرز ۱، از بهمن ماه سال ۹۲ به مدت ۱۴ ماه در طبقه چهارم دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف داده‌گیری کرد. در این مقاله تابع توزیع زاویه سروسویی بهمن‌های هوایی گسترده که توسط این زیرآرایه ثبت شده‌اند نیز ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهمن‌های هوایی گسترده، آرایه آشکارسازهای سوسوزن، احتمال راه‌اندازی، تفکیک زاویه‌ای

۱. مقدمه

از مطالعات پرتوهای کیهانی، فیزیک ذرات بنیادی متولد شد. بلاکت (Blackett) و اچیلینی (Occhialini) در سال ۱۹۳۳، از مطالعات مسیر تابش کیهانی در اتاقک ابر، پوزیترون را کشف کردند و در سال ۱۹۳۶ اندرسون (Anderson) و ندرمیر (Neddermeyer) ذراتی با جرم میانی بین الکترون و پروتون یعنی میون را گزارش دادند. با نوع جدیدی از ابزارهای آزمایشگاهی، امولسیون هسته‌ای، در سال ۱۹۴۷ رصد پایون توسط راجستر (Rochester) و باتلر (Butler) و دیگران انجام

جو زمین همواره با ذرات فرازمینی بمباران می‌شود که به پرتوهای کیهانی مشهورند. این ذرات از هسته اتم‌های مختلف، که عموماً ذرات پروتون، آلفا، و هسته‌های سنگین‌اند، تشکیل می‌شوند. این ذرات دارای طیف انرژی‌ای از محدوده حدود eV تا بیش از $10^9 eV$ هستند که شار آنها به ترتیب از ۱ ذره بر متر مربع بر میکروثانیه، تا کمتر از ۱ ذره بر کیلومتر مربع بر قرن تغییر می‌کند.

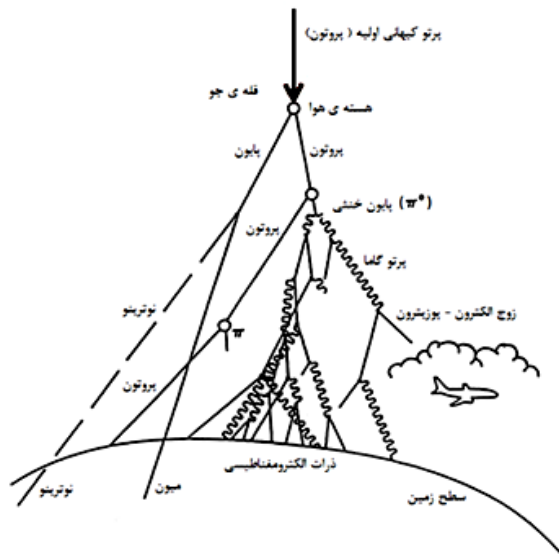
اندازه کافی انرژی دارد به طوری که با نفوذ به جو زمین و برهم کنش با آن بهمنی از ذرات ثانویه تولید می شود و این ذرات ثانویه روی سطح زمین آشکارسازی می شوند (شکل ۱). در این انرژی ها، پرتو کیهانی با رصد بهمن های گسترده هوایی (EAS)، با استفاده از آشکارسازهای ذرات در سطح زمین که در سطح مناسبی گسترده می شوند، بررسی می شوند و توزیع عرضی و جبهه بهمن با نمونه گیری از این ذرات ثانویه اندازه گیری می شوند.

آشکارسازی مستقیم اجازه می دهد هویت ذره را به دست آوریم و با کالیبره کردن آشکارساز در آزمایشگاه، انرژی آن را به دست آوریم. حد اندازه گیری، به سبب آشکارسازها بستگی دارد و در نتیجه محدوده انرژی تعیین می شود. در اندازه گیری های غیرمستقیم، امکان اندازه گیری پرتو کیهانی تا 10^{20} eV وجود دارد اما همه اندازه گیری ها بر پایه مدل های برهم کنش پرتو کیهانی اولیه با جو است.

در حال حاضر ۴ روش برای مطالعه بهمن های هوایی وجود دارد: آرایه آشکارسازهای ذرات، تلسکوپ های چرنکوف، تلسکوپ های فلورسانس، و آرایه آنتن های رادیویی با طول موج بلند. مطالعه با هر یک از روش ها همچنان در دنیا ادامه دارد و نوآوری و ابداع روش های جدید هر سال منجر به بهبود کیفیت و دقت محاسبات می شود.

گروه پرتوهای کیهانی دانشگاه صنعتی شریف تا کنون آزمایش های فراوانی با آرایه های ۴ تایی از آشکارسازهای سوسوزن [۱] و همچنین با آرایه ۴ تایی از آشکارسازهای چرنکوف آبی [۲] انجام داده است. اکنون آرایه البرز ۱ به منظور اندازه گیری شار، راستای فرودی، و انرژی ذره اولیه در محدوده حدود 1 PeV طراحی شده است. این آرایه در سطحی به مساحت 1600 m^2 در بام غذاخوری دانشگاه صنعتی شریف و در ارتفاع 1200 m از سطح دریا نصب خواهد شد و شامل ۲۰ آشکارساز سوسوزن است. این آشکارسازها طی آزمایش ها و شبیه سازی های دقیق بهینه سازی شده اند [۳].

مطابق این آزمایش ها و شبیه سازی ها ابعاد سوسوزن های به کار رفته در آشکارساز 50×50 سانتی متر مربع است. ارتفاع



شکل ۱. گسترش یک بهمن هوایی در جو زمین.

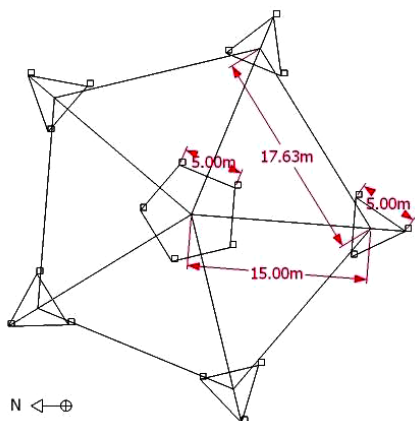
شد تا این که در سال ۱۹۵۳ ذره Σ کشف شد.

از این شواهد تاریخی می توان دید که پرتوهای کیهانی منشأ فیزیک نو و ذرات ناشناخته اند. آنها پیام آور چشمه های اخترازیکی پر قدرت هستند. از مطالعه پرتو کیهانی خواص محیط انتشار آنها، از چشمه تا زمین، را می توان بررسی کرد.

به علاوه آنها تنها دسترسی ما برای پدیده های با انرژی خیلی زیادند، که قابل دسترس با شتاب دهنده LHC نیست، از این رو از آنها برای تأیید قوانین فیزیکی استاندارد، مثل ناوردایی لورنتز در انرژی های خیلی زیاد می توان استفاده کرد.

با وجود گذشت بیش از صد سال از کشف پرتوهای کیهانی، هنوز بسیاری از موضوعات مربوطه، از جمله چشمه ها، سازوکار شتاب گیری، انتشار و ترکیب جرمی آنها سوال های باز هستند. این موضوعات باز تا امروز معماهایی هستند که جواب شان در نجوم و کیهان شناسی، فیزیک هسته ای و فیزیک ذرات بنیادی است.

پرتوهای کیهانی تا انرژی 10^{14} eV می تواند با آشکارسازی مستقیم ذرات اولیه با آزمایش های سوار بر بالن و ماهواره مطالعه شود. با بالا رفتن انرژی، شار پرتو کیهانی به قدری کم می شود که امکان آشکارسازی مستقیم وجود ندارد، چرا که امکان نصب آشکارسازهای با سطح وسیع روی بالن و ماهواره وجود ندارد. در انرژی های بیش تر از 10^{12} eV، پرتو کیهانی به



شکل ۳. نمایی از چیدمان خوشه‌ای آرایه البرز ۱.



شکل ۲. یکی از آشکارسازهای به کار رفته در آرایه.

راه‌اندازی (یعنی تعداد آشکارسازهایی که باید حداقل یک ذره از آنها عبور کند تا به عنوان یک رخداد بهممن هوایی در نظر گرفته شود) و محدوده حساسیت انرژی آرایه، کمیت‌هایی نظیر تابع احتمال آشکارسازی، نرخ رخدادهای ثبت شده و توان تفکیک زاویه‌ای آرایه برای شرط‌های مختلف اعمال شده در شبیه‌سازی مطالعه شده‌اند. دو مجموعه بهممن هوایی شبیه‌سازی شده با CORSIKA، که در توزیع انرژی و زاویه با هم متفاوت هستند برای این مطالعات به کار رفته است. به منظور آرایه تخمین دقیقی از تابع احتمال آشکارسازی، مجموعه‌ای از 360° بهممن هوایی با زاویه سوسویی بین صفر درجه تا 6° و محدوده انرژی بین 10^{12}eV و 10^{16}eV شبیه‌سازی شده است. در هر دو چیدمان هسته بهممن هوایی به طور یکنواخت در تمام سطح آرایه توزیع شده است. به این ترتیب از یک طرف آمار بهممن‌های شبیه‌سازی شده افزایش می‌یابد و از طرف دیگر ناحیه‌های مختلف آرایه جاروب می‌شود. علاوه بر این، یک شبکه مربعی گسترده شامل حداکثر ۲۸۰۹ پیکسل برای مطالعه بهممن‌های فرودی در داخل و خارج سطح آرایه بررسی شده است.

مجموعه دیگری از بهممن‌ها شامل 120° بهممن هوایی در محدوده انرژی 10^{14}eV تا 10^{16}eV زاویه سوسویی بین صفر درجه تا 6° در گام‌های 5° برای تخمین توان تفکیک زاویه‌ای آرایه شبیه‌سازی شده است. این محدوده انرژی با توجه به نتایج مجموعه اول شبیه‌سازی‌ها، که نرخ قابل توجهی از رخدادهای ثبت شده را در این ناحیه از انرژی در مقایسه با سایر نواحی انرژی نشان می‌دهد، انتخاب شده است.

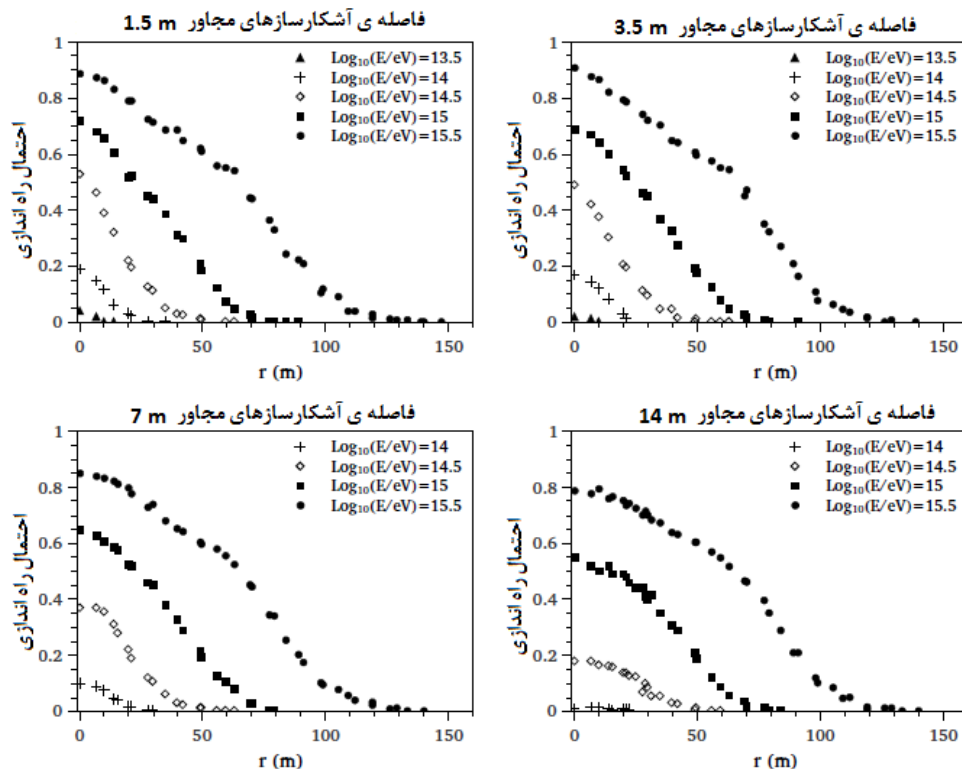
محفظه نوری نیز 20 سانتی‌متر انتخاب شد. در حال حاضر هر 20 آشکارساز ساخته شده و آماده بهره برداری است. نمونه‌ای از این آشکارساز در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

همچنین الکترونیک مورد نیاز خریداری شده است و مراحل تست و آماده سازی آنها فاز نهایی خود را سپری می‌کنند. در این مقاله می‌خواهیم شبیه‌سازی‌های انجام شده برای نوع چیدمان آرایه 20 تایی، و آزمایش‌های اولیه برای این چیدمان را ارائه دهیم.

۲. شبیه‌سازی‌ها

آرایه البرز ۱ در سطحی به مساحت 1600 m^2 در پشت بام غذاخوری دانشگاه صنعتی شریف ($34^\circ 43' \text{N}$ و $51^\circ 22' \text{E}$) و در ارتفاع 1200 m از سطح دریا 890 gcm^{-2} برپا می‌شود. دو چیدمان مختلف، یکی به صورت خوشه‌ای، و دیگری به صورت مستطیلی بررسی شد. چیدمان خوشه‌ای آرایه البرز ۱ (شکل ۳) شامل یک خوشه پنج ضلعی داخلی به ضلع 5 m و یک خوشه پنج ضلعی خارجی به ضلع حدود 18 m است که 5 m مثلث متساوی الاضلاع هر یک به ضلع 5 m روی رئوس آن قرار گرفته‌اند. در محل رئوس خوشه داخلی و همچنین رئوس مثلث‌ها آشکارسازهای سوسوزن قرار می‌گیرند. آشکارسازهای سوسوزن نیز پس از بهینه‌سازی، در ابعاد $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ساخته شده‌اند. چیدمان مستطیلی نیز به صورت یک شبکه 5×4 در نظر گرفته شد.

در فرآیند انتخاب مشخصه‌های آرایه از جمله چیدمان، شرط



شکل ۴. احتمال راه‌اندازی آرایه بر حسب تابعی از فاصله هسته بهمن هوایی تا مرکز آرایه (r) برای شرط راه‌اندازی 10° تایی در انرژی‌های اولیه مختلف برای فاصله‌های 1.5 m ، 3.5 m ، 7 m و 14 m بین آشکارسازهای مجاور.

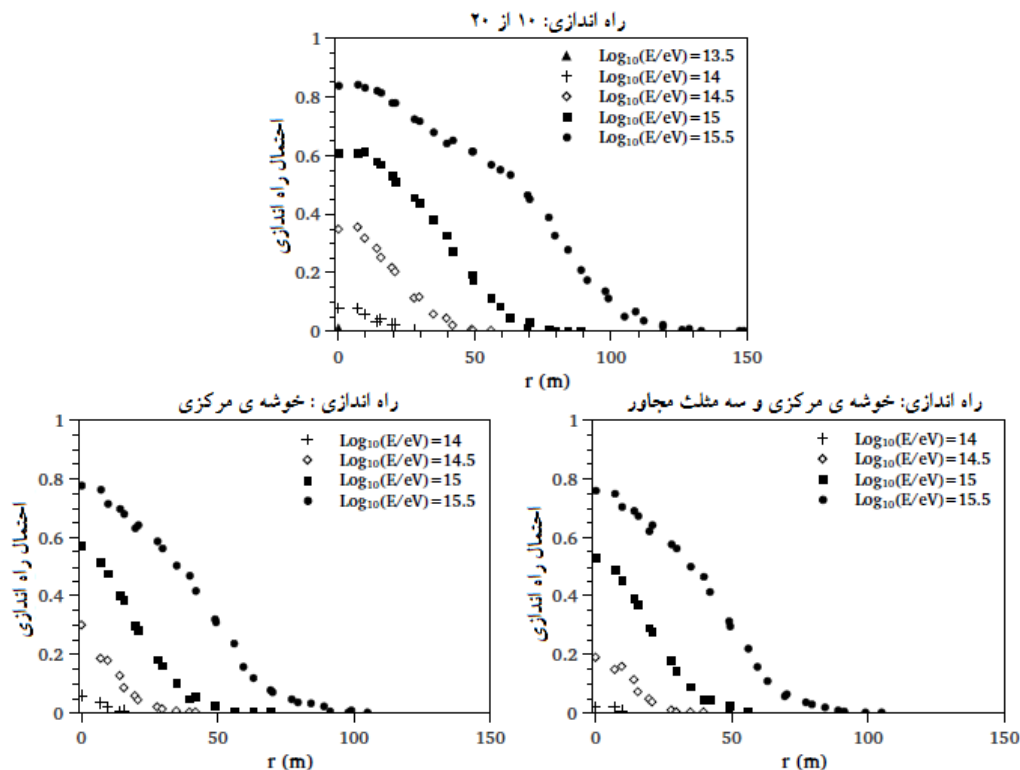
مجاور مطالعه شدند [۴] لازم به ذکر است که در سطح بام غذاخوری حداکثر فاصله 7 m بین آشکارسازها امکان‌پذیر است. چهار شرط راه‌اندازی به صورت این که حداقل 4° آشکارساز، حداقل 6° آشکارساز، حداقل 10° آشکارساز، و در نهایت هر 20° آشکارساز آرایه، ذره‌ای ثبت کنند در نظر گرفته شد. از بین این شرط‌ها، شرط راه‌اندازی حداقل 10° تایی دارای توان تفکیک زاویه‌ای قابل توجهی نسبت به دو شرط اول یعنی شرط راه‌اندازی حداقل 4° تایی و حداقل 6° تایی بود و از طرف دیگر احتمال ثبت رخداد‌های آن نسبت به راه‌اندازی با تمام 20° آشکارسازها بیش‌تر بود. بنابراین در آرایه مستطیلی شرط راه‌اندازی حداقل 10° تایی برای مقایسه با چیدمان خوشه‌ای استفاده شده است.

تابع احتمال راه‌اندازی از شبیه‌سازی‌های در فواصل مختلف بین آشکارسازها و در محدوده‌های انرژی مختلف برای چیدمان مستطیلی در شکل ۴ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود،

۳. تابع احتمال آشکارسازی

احتمال آشکارسازی به چند کمیت فیزیکی مستقل بستگی دارد: (۱) مشخصه‌های ذره اولیه یعنی انرژی و جرم آن، (۲) شرط راه‌اندازی به کار رفته، (۳) چیدمان آرایه، (۴) هندسه بهمن فرودی از جمله فاصله هسته بهمن از مرکز آرایه و زاویه سرسویی بهمن هوایی، θ [۴]. برای نمایش دادن این وابستگی‌ها، تابع احتمال آشکارسازی به صورت $P(r, E) = \frac{N_{\text{trigger}}(r, E)}{N_{\text{incident}}(r, E)}$ تعریف می‌کنیم که $N_{\text{trigger}}(r, E)$ تعداد بهمن‌های با انرژی E است که شرط راه‌اندازی را در حالتی که هسته بهمن‌ها در فاصله r از مرکز آرایه هستند برآورده می‌کند و $N_{\text{incident}}(r, E)$ تعداد کل بهمن‌های فرودی با انرژی E در حالتی که هسته بهمن‌ها در فاصله r از مرکز آرایه است.

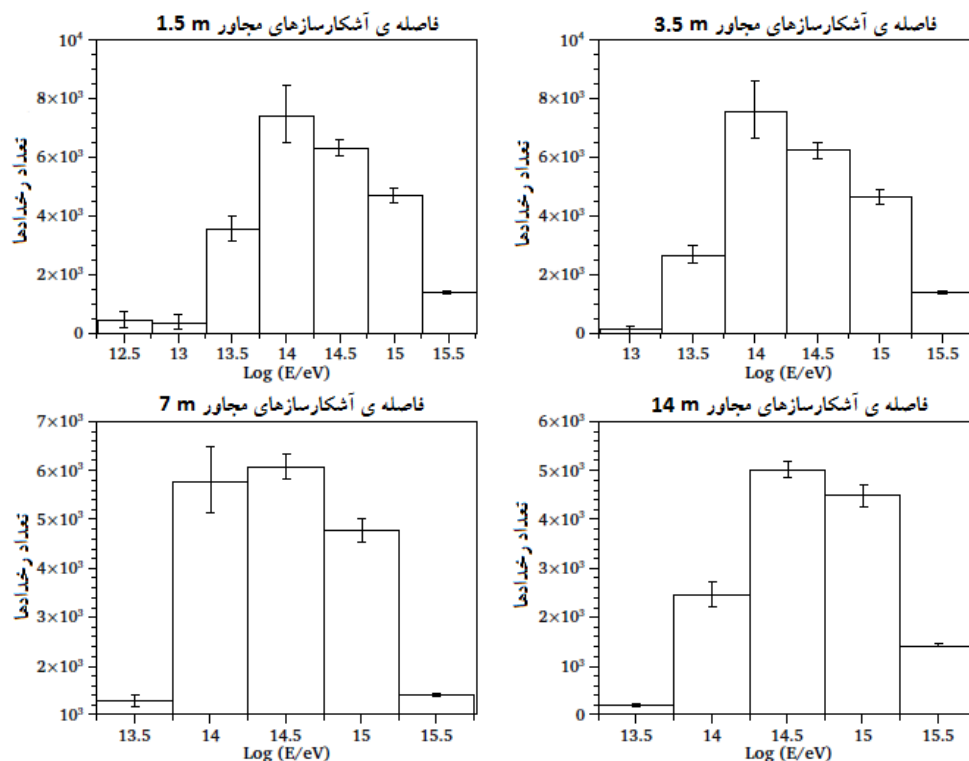
به منظور بهینه کردن ابعاد آرایه مستطیلی، چهار فاصله مختلف 1.5 m ، 3.5 m ، 7 m و 14 m بین آشکارسازهای



شکل ۵. احتمال راه‌اندازی آرایه بر حسب تابعی از فاصله هسته بهمن هوایی تا مرکز آرایه (r) در انرژی‌های اولیه مختلف برای شرط راه‌اندازی 10° از 20° (بالا)، 5° از 5° آشکارساز خوشه مرکزی (پایین، سمت چپ)، و 5° از 5° آشکارساز خوشه مرکزی همراه با ۳ مثلث مجاور (پایین، سمت راست).

در کنار یک چیدمان مستطیلی، یک چیدمان خوشه‌ای نیز مطالعه شد. از میان شرایط راه‌اندازی متعدد شرایطی که کل خوشه مرکزی همراه با دو مثلث مجاور، و یا سه مثلث مجاور، و یا چهار مثلث مجاور راه‌اندازی شوند (یعنی راه‌اندازی 5° آشکارساز خوشه مرکزی و دو مثلث مجاور، یا 5° آشکارساز خوشه مرکزی و سه مثلث مجاور، و در نهایت 5° آشکارساز خوشه مرکزی و چهار مثلث مجاور) کارایی بالاتری نشان می‌دهند. احتمال راه‌اندازی آنها نیز تقریباً با هم یکسان هستند. بنابراین در انتخاب راه‌اندازی، سه شرط راه‌اندازی در نظر گرفته شد: به طور تصادفی حداقل از 10° آشکارساز ذره عبور کند، یا از تمام 5° آشکارساز خوشه مرکزی عبور کند، و در نهایت از 5° آشکارساز خوشه مرکزی و سه مثلث مجاور عبور کند. همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، برای دو شرط راه‌اندازی آخر که خوشه مرکزی در آن شرکت دارد، بیشینه فاصله هسته بهمن (r_{max}) در انرژی‌های مختلف کاهش می‌یابد،

بیشینه فاصله هسته بهمن (r_{max}) برای آشکارسازی در هر انرژی تقریباً مستقل از فاصله بین آشکارسازهاست اما برای یک فاصله مشخص بین آشکارسازها، r_{max} با انرژی افزایش می‌یابد. همچنین برای آشکارسازی انرژی‌های کم لازم است فاصله بین آشکارسازها کم شود. به طوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در آرایه‌ای که فاصله بین آشکارسازهای آن 14 m است، احتمال آشکارسازی ذرات با انرژی 10^{14} eV خیلی کم است ولی در آرایه‌ای که فاصله آشکارسازهای آن 1.5 m می‌شود احتمال آشکارسازی تا 20% درصد در مرکز آرایه ($r=0$) نیز می‌رسد و یا آشکارسازی ذرات با انرژی $3 \times 10^{13}\text{ eV}$ با آرایه 14 m تقریباً وجود ندارد ولی با آرایه 1.5 m به وجود می‌آید. به عبارت دیگر اندازه‌های کوچک‌تر برای یک آرایه، بهمن‌های با انرژی کم را می‌تواند ثبت کند. بنابراین برای متمرکز شدن روی ناحیه زانوی طیف الکترومغناطیسی ($\sim 3 \times 10^{15}\text{ eV}$)، اندازه آرایه به اندازه کافی باید بزرگ باشد.



شکل ۶. تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی‌های مختلف با شرط راه‌اندازی 10° تایی، برای چیدمان مستطیلی و برای فواصل مختلف بین آشکارسازها.

$$N(E, E + \Delta E) = \int_s \int_E^{E + \Delta E} P(E, E + \Delta E) \Phi(E) ds dE \int d\Omega \int dt,$$
 که در آن S سطح یک شبکه مربعی است که اگر هستهٔ یک بهمن در آن فرود آید می‌تواند شرط راه‌اندازی را برآورده نماید. $\Phi(E)$ طیف تمام ذرات در ناحیهٔ زانو است که آرایهٔ بهمن هوایی ثبت^۱ برای ذرات اولیه گزارش کرده است [۵].

$$\Phi(E) = 1.5 \times 10^{-20} \left(\frac{E}{5.62 \times 10^{14}} \right)^{-2.6 \pm 0.04} \left[\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{eV}^{-1} \right], E < 5.62 \times 10^{14} \text{eV},$$

$$\Phi(E) = 1.2 \times 10^{-23} \left(\frac{E}{7.08 \times 10^{15}} \right)^{-3.0 \pm 0.05} \left[\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{eV}^{-1} \right], E < 7.08 \times 10^{15} \text{eV},$$

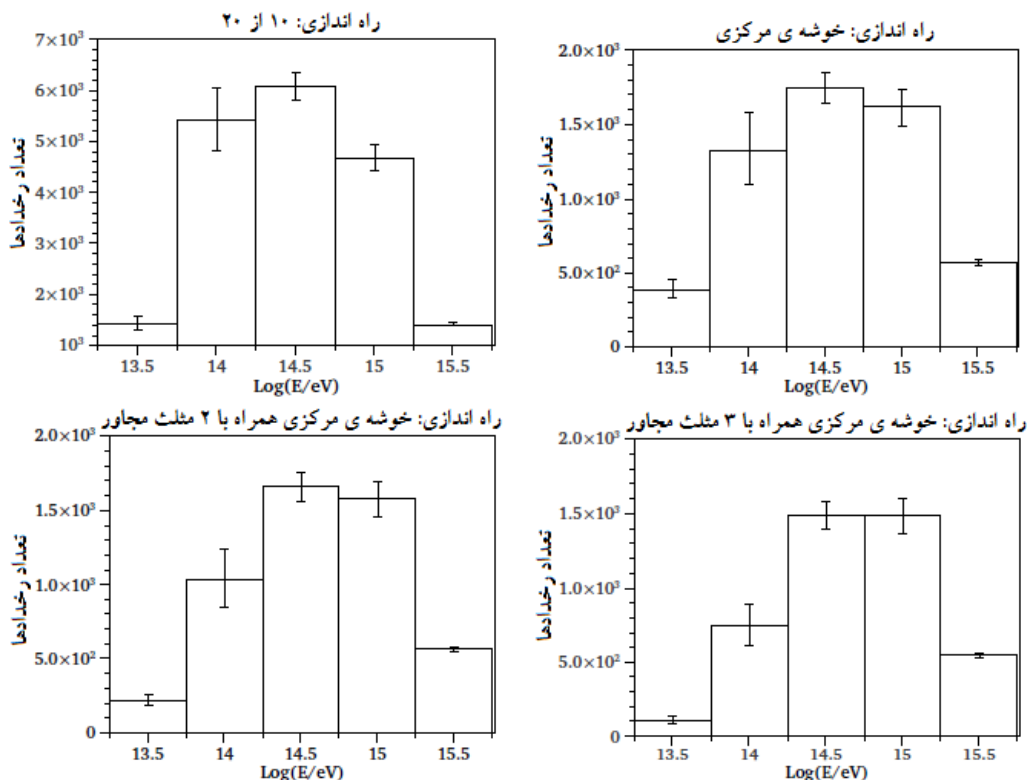
$$\Phi(E) = 6.7 \times 10^{-22} \left[\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{eV}^{-1} \right], E = 7.08 \times 10^{15} \text{eV},$$

در شکل ۶ تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی‌های مختلف که شرط راه‌اندازی 10° تایی را برای چیدمان مستطیلی

یعنی r_{\max} تا 100m برای انرژی اولیه $3 \times 10^{15} \text{eV}$ می‌رسد. همچنین تابع احتمال راه‌اندازی با شرط حداقل 10° تایی که به طور تصادفی راه‌اندازی شوند، تقریباً با چیدمان مستطیلی در حالتی که فاصلهٔ بین آشکارسازها 7m است مشابه است. همان طور که از شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود، در انرژی $3 \times 10^{15} \text{eV}$ برای چیدمان مستطیلی با فواصل 7m و 14m بین آشکارسازها و چیدمان خوشه‌ای در حالتی که هستهٔ بهمن نزدیک به مرکز آرایه است تابع احتمال راه‌اندازی تقریباً 80% درصد است.

علاوه بر تابع احتمال راه‌اندازی، می‌توانیم تعداد رخدادهای ثبت شده در روز در محدودهٔ انرژی‌های مختلف، $N(E, E + \Delta E)$ ، که شرط راه‌اندازی برای چیدمان‌های مختلف را برآورده می‌کنند را محاسبه کنیم. این کار با ضرب تابع احتمال راه‌اندازی، $P(r, E)$ ، و شار دیفرانسیلی پرتوهای کیهانی اولیه، $\Phi(E)$ ، (که بر حسب تعداد پرتوهای کیهانی اولیه بر سطح، بر زمان، بر زاویهٔ فضایی، بر انرژی است) به دست می‌آید.

۱. Tibet



شکل ۷. تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی‌های مختلف با شرط‌های راه‌اندازی مختلف برای چیدمان خوشه‌ای.

$4 \times 10^{14} \text{eV}$ در زوایای سراسوی صفر درجه تا 60° و با گام‌های 5° هستند، تفکیک زاویه‌ای البرز ۱ را بررسی می‌کنیم. این محدوده انرژی مطابق با بیشینه تعداد رخدادهای ثبت شده در انرژی $E = 3 \times 10^{14} \text{eV}$ است.

با استفاده از روش حداقل کردن χ^2 ، تفکیک زاویه‌ای آرایه را برای شرط‌های راه‌اندازی و چیدمان‌های مختلف محاسبه شد. تفکیک زاویه‌ای مستقیماً به دقت اندازه‌گیری زمان ثبت هر ذره در هر آشکارساز مربوط می‌شود. بنابراین برای نتایج واقعی‌تر در شبیه‌سازی، عدم قطعیت اندازه‌گیری زمان در نظر گرفته شد. همچنین مکان هسته بهمن به طور تصادفی روی کل سطح آرایه در نظر گرفته شد.

عدم قطعیت اندازه‌گیری زمان با ابزارهای به کار رفته برای البرز ۱ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{\text{instrument}} = \sqrt{\sigma_{\text{det.}}^2 + \sigma_{\text{elec.}}^2} \sim 1/82 \text{ ns}$$

که $\sigma_{\text{elec.}} = 0/10 \text{ ns}$ عدم قطعیت ابزار الکترونیک و $\sigma_{\text{det.}} = 1/82 \text{ ns}$ مربوط به عدم قطعیت آشکارساز است [۳].

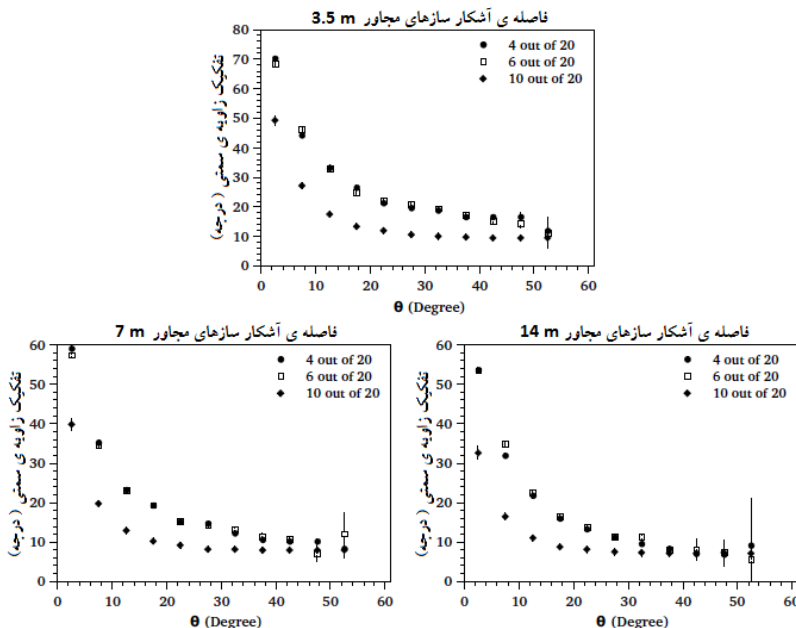
و برای فواصل مختلف بین آشکارسازها برآورده می‌کند، نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، در حالتی که فاصله بین آشکارسازها $1/5 \text{ m}$ و $3/5 \text{ m}$ است، بیشینه ثبت رخدادها در انرژی 10^{14}eV است و در حالت 7 m و 14 m این بیشینه انرژی به $3 \times 10^{14} \text{eV}$ می‌رسد.

در چیدمان خوشه‌ای نیز تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است.

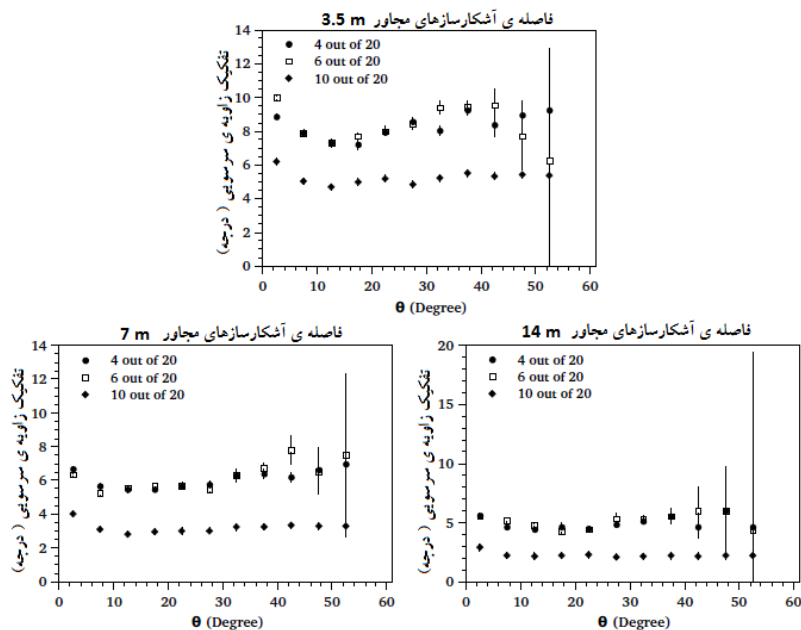
همان طور که دیده می‌شود، با شرط‌های راه‌اندازی مختلف برای این آرایه، بیشینه رخدادها در انرژی $3 \times 10^{14} \text{eV}$ اتفاق می‌افتد که مشابه چیدمان مستطیلی با فاصله 7 m و 14 m بین آشکارسازها است.

۴. تفکیک زاویه‌ای

با در نظر گرفتن مجموعه دیگری از بهمن‌های شبیه‌سازی شده شامل 12000 بهمن پروتون و آلفا (با ترکیب 88% پروتون و 12% آلفا) که به طور پیوسته در محدوده انرژی $2 \times 10^{14} \text{eV}$ تا



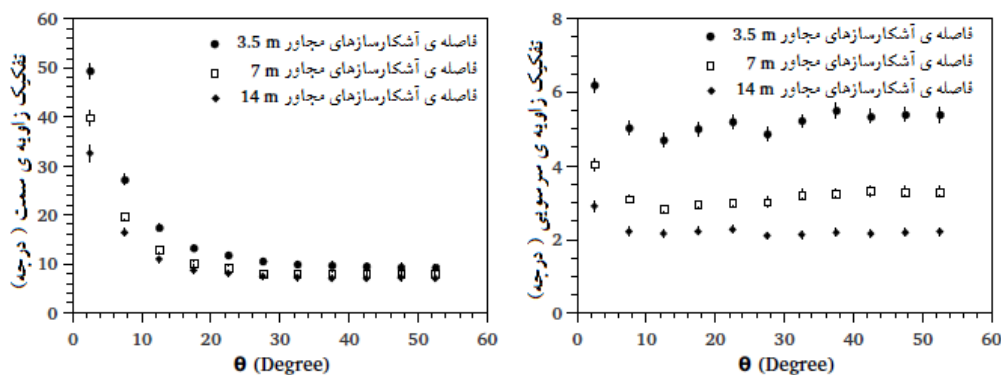
شکل ۸. تفکیک زاویه‌ی سمتی بر حسب تابعی از زاویه‌ی سرسویی برای فاصله‌های مختلف بین آشکارسازهای مجاور در چیدمان مستطیلی.



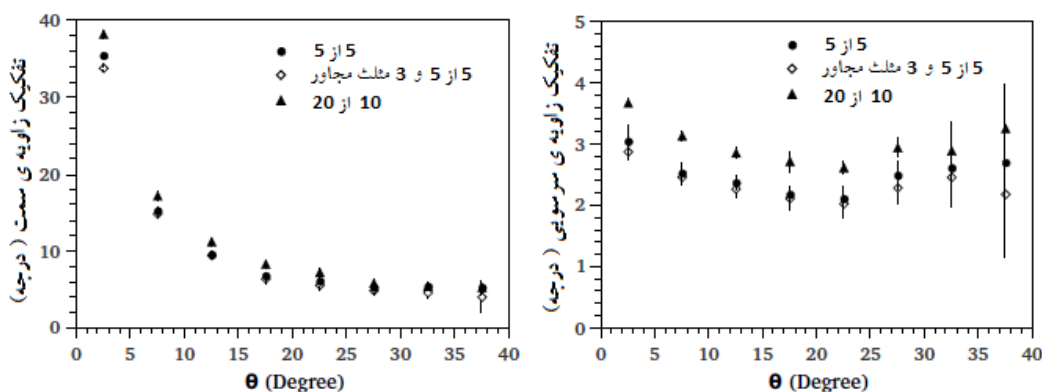
شکل ۹. تفکیک زاویه‌ی سرسویی بر حسب تابعی از زاویه‌ی سرسویی برای فاصله‌های مختلف بین آشکارسازهای مجاور در چیدمان مستطیلی.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تفکیک زاویه‌ای با افزایش اندازه‌ی آرایه بهتر می‌شود. اختلاف بین حالت‌های ۷ m و ۱۴ m بین آشکارسازها کم است، به خصوص برای زوایای سرسویی بزرگ‌تر از 10° کم‌تر هم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، تفکیک زاویه‌ای

شکل‌های ۸ و ۹ به وضوح نشان می‌دهند که در چیدمان مستطیلی، برای فواصل مختلف بین آشکارسازها، شرط راه‌اندازی 10° تایی نسبت به دو شرط راه‌اندازی دیگر (یعنی شرط راه‌اندازی ۴ تایی و ۶ تایی) تفکیک زاویه‌ای بهتری دارد و از این نظر مناسب‌تر است.



شکل ۱۰. تفکیک زاویه سمت (چپ) و تفکیک زاویه سرسویی (راست) بر حسب تابعی از زاویه سرسویی اولیه برای شرط راهاندازی 10° تایی در چیدمان مستطیلی.



شکل ۱۱. تفکیک زاویه سمت (چپ) و تفکیک زاویه سرسویی (راست) بر حسب تابعی از زاویه سرسویی اولیه برای چیدمان خوشه‌ای.

طول روز و مقایسه آنها با شبیه‌سازی شروع به داده‌گیری کرد. این آرایه در آزمایشگاه پرتوهای کیهانی واقع در طبقه چهارم دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف و در زیر دو سقف بتونی هر کدام به ضخامت ۴۲ cm قرار دارد. آشکارسازها از نوع سوسوزن‌های پلاستیکی با ابعاد 50×50 cm^۲ است که هر کدام در یک محفظه هرمی شکل از جنس آهن گالوانیزه قرار دارند که سطح داخلی محفظه با رنگ سفید مات (با خاصیت پخش‌کننده) پوشیده شده است. ارتفاع هرم ۲۰ cm است و در رأس آن یک لامپ تکثیرکننده نوری قرار دارد (شکل ۲).

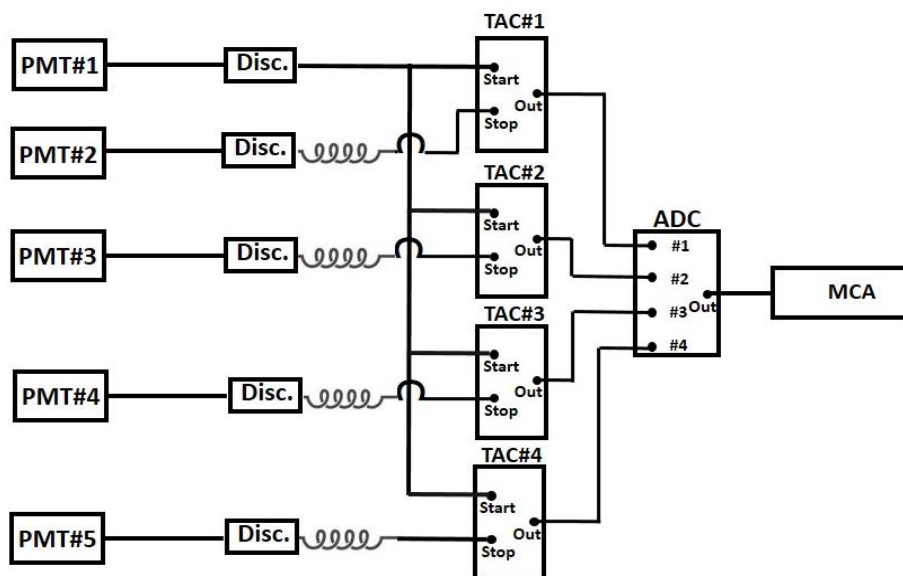
مدار الکترونیکی آزمایش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سیگنال PMT ی هر یک از آشکارسازها وارد مجزا کننده ۸ کاناله (Discriminator, CAEN N۴۱۳A) شده که آستانه پایین آن برای هر آشکارساز به صورت تجربی تنظیم شده است. سیگنال خروجی کانالی که به آشکارساز ۱ متصل است به ۴

در چیدمان خوشه‌ای در مقایسه با چیدمان مستطیلی با راهاندازی 10° تایی و فاصله ۷ m بین آشکارسازها مناسب‌تر است. در چیدمان خوشه‌ای از میان سه حالت شرط راهاندازی، دو حالت که شامل راهاندازی خوشه مرکزی هستند دارای تفکیک زاویه‌ای تقریباً یکسانی هستند. خطاهای نشان داده شده در نمودارها علاوه بر خطاهای سیستماتیک مربوط به ابزارهای اندازه‌گیری شامل خطاهای آماری نیز می‌شوند.

با توجه به ویژه گی‌های چیدمان خوشه‌ای این چیدمان برای آرایه البرز ۱ در نظر گرفته شد.

۵. داده‌های تجربی زیر آرایه ۵ تایی البرز ۱

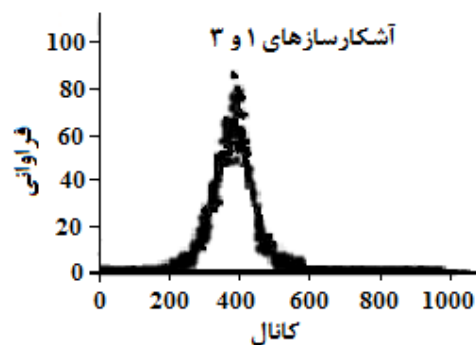
در گام اول برای راهاندازی آرایه البرز ۱، زیر آرایه ۵ تایی یا به عبارت دیگر خوشه مرکزی آرایه از بهمن ماه ۱۳۹۲ با هدف تعیین و بررسی کمیت‌هایی نظیر تعداد رخدادها قابل ثبت در



شکل ۱۲. طرح نمادین از مدار استفاده شده در آزمایش.

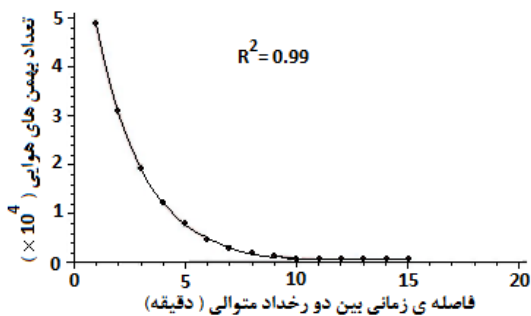
۲۰۰ ns ثابت می‌شود که ثابت این داده‌ها مشروط به ثابت رخداد همزمانی بین آشکارساز (۲ و ۱) است. داده‌گیری به صورت دوره‌های شش روزه انجام شده و پیش از شروع هر دوره آزمایش‌ها بسامد خروجی PMT هر آشکارساز به صورت جداگانه بررسی و به عنوان معیاری برای ثبات عمل کرد آشکارساز در طی دوران داده‌گیری ثابت می‌شود. به منظور کنترل شرایط محیط آزمایشگاه از ثبات دما، فشار و رطوبت استفاده کردیم که تغییر محسوسی را در این سه کمیت در طول ثابت داده‌ها نشان نمی‌دهد. نمونه‌ای از طیف همزمانی بین آشکارسازهای ۱ و ۳ که مربوط به یک دوره شش روزه است در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

شکل ۱۴ تعداد متوسط رخدادها بر ساعت در هر ماه را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نرخ متوسط رخداد بر ساعت در طول زمان داده‌گیری افت و خیز زیادی ندارد و این دلیلی بر ثبات یکنواخت داده‌ها در این بازه است. لازم به ذکر است که در ماه‌های آگوست، سپتامبر، و اکتبر داده‌گیری متوقف بوده است. زمان کل داده‌گیری ۴۷۸۸ ساعت بوده که بعد از حذف نوفه در این مدت و با در نظر گرفتن شرط راه‌اندازی هر ۵ آشکارساز، تعداد ۱۳۱۹۶۴ رخداد بهمن هوایی ثبت شده است. به بیان دیگر

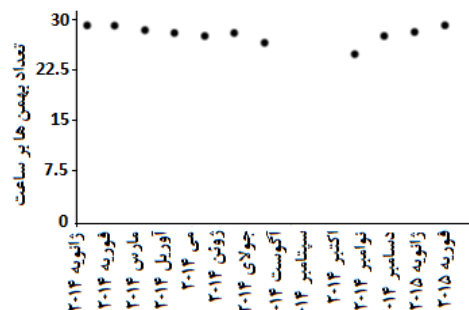


شکل ۱۳. رخداد های همزمانی ثبت شده بین آشکارسازهای ۱ و ۳ در یک دوره آزمایش.

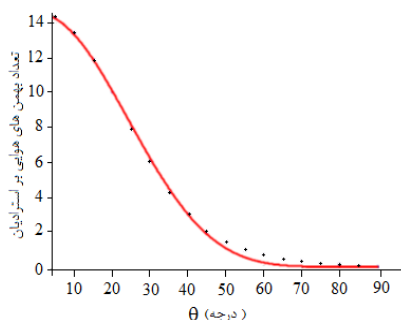
ورودی شروع (Start) در چهار تبدیل کننده زمان به دامنه (TAC, ORTEC ۵۶۶) وارد می‌شوند. خروجی ۴ کانال دیگر مجزاکننده که سیگنال ۴ آشکارساز دیگر به آنها وارد می‌شوند به ترتیب به ورودی (Stop) مربوط به ۴ تبدیل کننده زمان به دامنه فرستاده می‌شود. پنجره زمانی TACها در وضعیت ۲۰۰ ns تنظیم شده است. خروجی TACها توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) به تحلیلگر چند کاناله (MCA) فرستاده می‌شوند. به طور خلاصه می‌توان گفت که به وسیله این چیدمان الکترونیک، همزمانی ۴ آشکارساز با آشکارساز ۱ در بازه



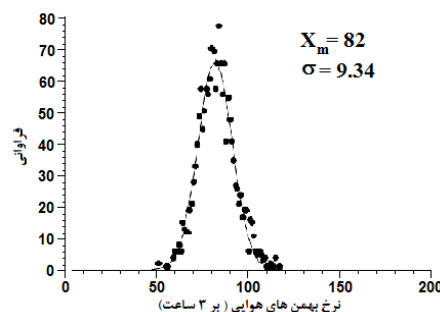
شکل ۱۵. توزیع فاصله زمانی بین دو رخداد متوالی.



شکل ۱۴. تعداد متوسط رخدادها بر ساعت در بازه های یک ماهه.



شکل ۱۷. توزیع زاویه سرسویی بهمن های هوایی.



شکل ۱۶. توزیع نرخ رخدادها در بازه زمانی ۳ ساعته.

می کند. با برازش این تابع با داده های زیر آرایه البرز ۱ مقدار $n = 5/93$ با رگرسیون $R^2 = 0/998$ به دست آمد (شکل ۱۷).

۶. نتیجه گیری

ویژه گی های آرایه البرز ۱ با برنامه CORSIKA مطالعه شده است. تابع احتمال راه اندازی، تفکیک زاویه ای و تعداد رخدادها ثبت شده در روز بر حسب انرژی ذره اولیه برای دو چیدمان و شرایط راه اندازی مختلف به دست آورده شده است.

پاسخ آرایه، شرایط راه اندازی و گسترش بهمن هوایی در تابع احتمال راه اندازی خلاصه می شود. نتایج نشان می دهد که هر چند در انرژی های کم، احتمال راه اندازی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد اما به واسطه شار زیاد پرتوهای کیهانی تعداد زیادی از رخدادها ثبت می شوند. به علاوه در انرژی های زیاد (حوالی زانوی طیف پرتوهای کیهانی)، این آرایه کارا تر است.

در چیدمان مستطیلی، ۴ شرط راه اندازی مختلف و ۴

متوسط آهنگ ثبت رخدادها، یک رخداد در هر ۲/۱۷ دقیقه است. از سوی دیگر توزیع فاصله زمانی بین دو رخداد متوالی به صورت تصادفی بوده و با یک تابع نمایی، $f(x) = f(0)e^{-\frac{x}{\tau}}$ داده می شود. همان طور که در شکل ۱۵ پیداست با برازش تابع فوق با توزیع فاصله زمانی بین دو رخداد متوالی مقدار $\tau = 2/17 \text{ min}$ به دست آمد که در توافق با متوسط آهنگ ثبت رخدادها است. شکل ۱۶ توزیع گاوسی نرخ رخدادها را در بازه زمانی ۳ ساعته نشان می دهد که در آن متوسط تعداد رخدادها در بازه زمانی ۳ ساعته، ۸۲ رخداد و پهن شدگی $\sigma = 9/34$ است.

پس از اندازه گیری اختلاف زمانی بین آشکارساز شماره ۱ با آشکارسازهای شماره ۲، ۳، ۴، و ۵ با استفاده از روش کمترین مربعات [۶]، زاویه سرسویی رخدادهای بهمن هوایی محاسبه شده است. توزیع زاویه سرسویی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. از آنجا که با افزایش زاویه سرسویی ضخامت جو برای بهمن ها افزایش پیدا می کند، تعداد رخدادها با افزایش زاویه سرسویی به طور قابل توجهی با تابع $\cos^n \theta$ کاهش پیدا

بیشینه می‌شود. تفکیک زاویه‌ای این چیدمان در مقایسه با چیدمان مستطیلی با فاصله ۷ متر بین آشکارسازهای مجاور، و شرط راه‌اندازی ۱۰ تایی به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر است. مطالعات تجربی انجام شده بر روی خوشه مرکزی البرز ۱ نشان می‌دهد متوسط نرخ رخداد‌های ثبت شده در هر ساعت در طول داده‌گیری تغییر قابل توجهی ندارد. با برازش تابع نمایی با داده‌های این آرایه، ثابت نمایی تابع که بیانگر فاصله زمانی بین هر دو رخداد متوالی است ۲٫۱۷ دقیقه به دست آمد. برای توزیع زاویه سوسویی بهمن‌های هوایی گسترده، تابع توزیع $\cos^n \theta$ با داده‌ها برازش داده شد و $n = ۵٫۹۳$ به دست آمد.

اندازه مختلف برای آرایه در نظر گرفته شد. این مطالعه نشان می‌دهد که وقتی اندازه آرایه و تعداد آشکارسازهای راه‌اندازی زیاد می‌شوند، تفکیک زاویه‌ای مناسب تر می‌شود. با محدود بودن مساحت سطح آرایه مورد نظر، این چیدمان با فاصله ۷ متر بین آشکارسازها و شرط راه‌اندازی با ۱۰ آشکارساز وضعیت مناسبی ایجاد می‌کند تا آن را با چیدمان خوشه‌ای مقایسه کنیم.

در چیدمان خوشه‌ای، شرط‌های راه‌اندازی شامل کل خوشه ۵ تایی مرکزی همراه با بعضی از مثلث‌های مجاور تقریباً کارایی یکسانی در محدوده‌های انرژی مختلف دارند. تعداد رخداد‌های ثبت شده در انرژی‌های مختلف برای شرایط راه‌اندازی مختلف در چیدمان خوشه‌ای در انرژی $۳ \times 10^{14} \text{eV}$

مراجع

- آرایه در طیف پرتوهای قابل ثبت در آرایه البرز ۱، آرایه ۲۰ تایی به چه ناحیه‌ای از طیف پرتوهای کیهانی حساس است؟»، هفتمین همایش ملی نجوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۹۲).
5. M Amenomori *et al.*, *The Astrophysical Journal* **461** (1996) 408.
 6. M Bahmanabadi *et al.*, *Experimental Astronomy* **13** (2002) 39.

1. M Bahmanabadi, M Khakian Ghomi, J Samimi, and D Purmohammad; *Experimental Astronomy* **15** (2003) 13.
۲. ف شیدایی، «مطالعه بر روی پرتوهای پرنرژی در سطح تهران» پایان نامه دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۷).
3. Y Pezshkian *et al.*, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* **773** (2015) 117.
۴. س عبدالهی، ی پزشکیان، م بهمن آبادی، «ترتیب ابعاد