

مشاهده ی پرتوهای کیهانی با آرایه ی البرز ۱

محمود بهمن آبادی

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده ی فیزیک

چکیده

آرایه ی البرز ۱ شامل ۲۰ آشکارساز سوسوزن هر یک با مساحت سطح $۰/۲۵ \text{ m}^2$ روی سطحی با مساحت $۴۰ \times ۴۰ \text{ m}^2$ برای مطالعه ی بهمن های هوایی گسترده در حوالی زانوی طیف پرتوهای کیهانی در دانشگاه صنعتی شریف راه اندازی خواهد شد. برای پیدا کردن عملکرد این آرایه، تعداد زیادی بهمن هوایی با کُد CORSIKA شبیه سازی شده است. در این مقاله، نتایج نظری به دست آمده از چیدمان های مختلف برای آرایه و شرط های راه اندازی مختلف توصیف می شود. با استفاده از شبیه سازی بهمن های هوایی نرخ رخداد های آشکار شده در روز و تابع های احتمال راه اندازی، یعنی احتمال این که یک بهمن هوایی آرایه ی مورد نظر را راه اندازی کند را برحسب فاصله ی هسته ی بهمن تا مرکز آرایه ارائه می دهیم. انرژی ذره ی اولیه ی مؤد بهمن هوایی بالای 1 TeV و برای زاویه های سوسویی تا ۶۰° است. همچنین تفکیک زاویه ای البرز ۱ به دست آورده می شود. برای بررسی تجربی این آرایه، زیر آرایه 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 داده گیری کرد. در این مقاله تابع توزیع زاویه ی سوسویی بهمن های هوایی گسترده که توسط این زیر آرایه ثبت شده اند نیز ارائه می شود.

کلید واژه ها: بهمن های هوایی گسترده، آرایه ی آشکارسازهای سوسوزن، احتمال راه اندازی، تفکیک زاویه ای

۱- مقدمه

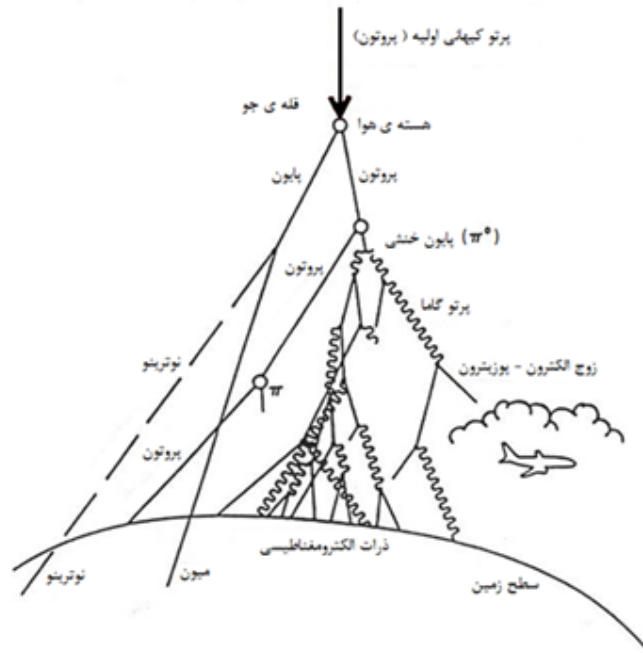
جو زمین همواره با ذرات فرازمینی بمباران می شود که به پرتوهای کیهانی مشهور اند. این ذرات از هسته ی اتم های مختلف، که عموماً ذرات پروتون، آلفا، و هسته های سنگین اند، تشکیل می شوند. این ذرات دارای طیف انرژی بی از محدوده ی حدود 10^9 eV تا بیش از 10^{20} eV هستند که شار آنها به ترتیب از 1 ذره بر متر مربع بر میکروثانیه، تا کم تر از 1 ذره بر کیلومتر مربع بر قرن تغییر می کند.

از مطالعات پرتوهای کیهانی، فیزیک ذرات بنیادی متولد شد. بلاکت (Blackett) و اچپالینی (Occhialini) در سال ۱۹۳۳، از مطالعات مسیر تابش کیهانی در اتاقک ابر، پوزیترون را کشف کردند و در سال ۱۹۳۶ آندرسون (Anderson) و ندرمیر (Neddermeyer) ذراتی با جرم میانی بین الکترون و پروتون یعنی میون را گزارش دادند. با نوع جدیدی از ابزارهای آزمایشگاهی، امولسیون هسته ای، در سال ۱۹۴۷ رصد پایون توسط راجستر (Rochester) و باتلر (Butler) و دیگران انجام شد تا این که در سال ۱۹۵۳ ذره ی Σ کشف شد.

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

به علاوه آن‌ها تنها دسترسی ما برای پدیده‌های با انرژی خیلی زیادند، که قابل دسترس با شتاب دهنده‌ی LHC نیست، از این رو از آن‌ها برای تایید قوانین فیزیکی استاندارد، مثل ناوردایی لورنتز در انرژی‌های خیلی زیاد می‌توان استفاده کرد. با وجود گذشت بیش از صد سال از کشف پرتوهای کیهانی، هنوز بسیاری از موضوعات مربوطه، از جمله چشمه‌ها، مکانیزم شتاب‌گیری، انتشار و ترکیب جرمی آن‌ها سوال‌های باز هستند. این موضوعات باز تا امروز معماهایی هستند که جواب‌شان در نجوم و کیهان‌شناسی، فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات بنیادی است.

پرتوهای کیهانی تا انرژی 10^{14} eV می‌تواند با آشکارسازی مستقیم ذرات اولیه با آزمایش‌های سوار بر بالن و ماهواره مطالعه شود. با بالا رفتن انرژی، شار پرتو کیهانی به قدری کم می‌شود که امکان آشکارسازی مستقیم وجود ندارد، چرا که امکان نصب آشکارسازهای با سطح وسیع روی بالن و ماهواره وجود ندارد. در انرژی‌های بیش‌تر از 10^{14} eV، پرتو کیهانی به اندازه‌ی کافی انرژی دارد به طوری که با نفوذ به جو زمین و برهم‌کنش با آن بهمنی از ذرات ثانویه تولید می‌شود و این ذرات ثانویه روی سطح زمین آشکارسازی می‌شوند (شکل ۱). در این انرژی‌ها، پرتو کیهانی با رصد بهمن‌های گسترده‌ی هوایی (EAS)، با استفاده از آشکارسازهای ذرات در سطح زمین که در سطح مناسبی گسترده می‌شوند، بررسی می‌شوند و توزیع عرضی و جبهه‌ی بهمن با نمونه‌گیری از این ذرات ثانویه اندازه‌گیری می‌شوند.



شکل ۱: گسترش یک بهمن هوایی در جو زمین

آشکارسازی مستقیم اجازه می‌دهد هویت ذره را به دست آوریم و با کالیبره کردن آشکارساز در آزمایشگاه، انرژی آن را به دست آوریم. حد اندازه‌گیری، به سائز آشکارسازها بستگی دارد و در نتیجه محدوده‌ی انرژی تعیین می‌شود. در اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم، امکان اندازه‌گیری پرتو کیهانی تا 10^{20} eV وجود دارد اما همه‌ی اندازه‌گیری‌ها بر پایه‌ی مدل‌های برهم‌کنش پرتو کیهانی اولیه با جو است.

در حال حاضر ۴ روش برای مطالعه ی بهمن های هوایی وجود دارد: آرایه ی آشکارسازهای ذرات، تلسکوپ های چرنکوف، تلسکوپ های فلورسانس، و آرایه ی آنتن های رادیویی با طول موج بلند. مطالعه با هر یک روش ها هم چنان 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 هم چنین با آرایه ی ۴ تایی از آشکارسازهای چرنکوف آبی [۲] انجام داده است. اکنون آرایه البرز ۱ به منظور اندازه گیری شار، راستای فرودی، و انرژی ذره ی اولیه در محدوده ی حدود ۱ 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 سانتیمتر مربع است. ارتفاع محفظه ی نوری نیز ۲۰ سانتیمتر انتخاب شد. در حال حاضر هر ۲۰ آشکارساز ساخته شده و آماده ی بهره برداری است. نمونه ای از این آشکارساز در شکل ۲ مشاهده می شود.

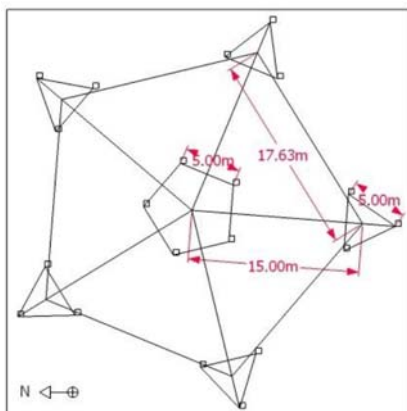


شکل ۲: یکی از آشکارسازهای به کار رفته در آرایه

همچنین الکترونیک مورد نیاز خریداری شده است و مراحل تست و آماده سازی آن ها فاز نهایی خود را سپری می کنند. در این مقاله می خواهیم شبیه سازی های انجام شده برای نوع چیدمان آرایه ی ۲۰ تایی، و آزمایش های اولیه برای این چیدمان را ارائه دهیم.

۲- شبیه سازی ها

آرایه البرز ۱ در سطحی به مساحت 1600 m^2 در پشت بام سلف غذاخوری دانشگاه صنعتی شریف ($E 51^{\circ}22'$ و $N 30^{\circ}43'$) و در ارتفاع 1200 m از سطح دریا 890 gcm^{-2} برپا می شود. دو چیدمان مختلف، یکی به صورت خوشه ای، و دیگری به صورت مستطیلی بررسی شد. چیدمان خوشه ای آرایه البرز ۱ (شکل ۳) شامل یک خوشه ی پنج ضلعی داخلی به ضلع 5 m و یک خوشه ی پنج ضلعی خارجی به ضلع حدود 18 m است که ۵ مثلث متساوی الاضلاع هر یک به ضلع 5 m روی رؤس آن قرار گرفته اند. در محل رؤس خوشه ی داخلی و همچنین رؤس مثلث ها آشکارسازهای سوسوزن قرار می گیرند. آشکارسازهای سوسوزن نیز پس از بهینه سازی، در ابعاد $0.5 \times 0.5\text{ m}^2$ ساخته شده اند. چیدمان مستطیلی نیز به صورت یک شبکه 4×5 در نظر گرفته شد.



شکل ۳: نمایی شماتیک از چیدمان خوشه ای آرایه ی البرز ۱

در فرآیند انتخاب مشخصه های آرایه از جمله چیدمان، شرط راه اندازی (یعنی تعداد آشکارسازهایی که باید حداقل یک ذره از آن ها عبور کند تا به عنوان یک رخداد بهمن هوایی در نظر گرفته شود) و محدوده ی حساسیت انرژی آرایه، پارامترهایی نظیر تابع احتمال آشکارسازی، نرخ رخدادهای ثبت شده و توان تفکیک زاویه ای آرایه برای شرط های مختلف اعمال شده در شبیه سازی مطالعه شده اند. دو مجموعه بهمن هوایی شبیه سازی شده با CORSIKA، که در توزیع انرژی و زاویه با هم متفاوت هستند برای این مطالعات به کار رفته است.

به منظور ارائه ی تخمین دقیقی از تابع احتمال آشکارسازی، مجموعه ای از ۳۶۰۰ بهمن هوایی با زاویه ی سرسویی بین صفر درجه تا ۶۰° و محدوده ی انرژی بین ۱۰^{۱۲}eV و ۱۰^{۱۶}eV شبیه سازی شده است. در هر دو چیدمان هسته ی هر بهمن هوایی به طور یکنواخت در تمام سطح آرایه توزیع شده است. به این ترتیب از یک طرف آمار بهمن های شبیه سازی شده افزایش می یابد و از طرف دیگر ناحیه های مختلف آرایه جاروب می شود. علاوه بر این، یک شبکه ی مربعی گسترده شامل حداکثر ۲۸۰۹ پیکسل برای مطالعه ی بهمن های فرودی در داخل و خارج سطح آرایه بررسی شده است. مجموعه ی دیگری از بهمن ها شامل ۱۲۰۰ بهمن هوایی در محدوده ی انرژی ۱۰^{۱۴}eV × ۲ تا ۱۰^{۱۴}eV × ۴ زاویه ی سرسویی بین صفر درجه تا ۶۰° در گام های ۵° برای تخمین توان تفکیک زاویه ای آرایه شبیه سازی شده است. این محدوده ی انرژی با توجه به نتایج مجموعه ی اول شبیه سازی ها، که نرخ قابل توجهی از رخدادهای ثبت شده را در این ناحیه از انرژی در مقایسه با سایر نواحی انرژی نشان می دهد، انتخاب شده است.

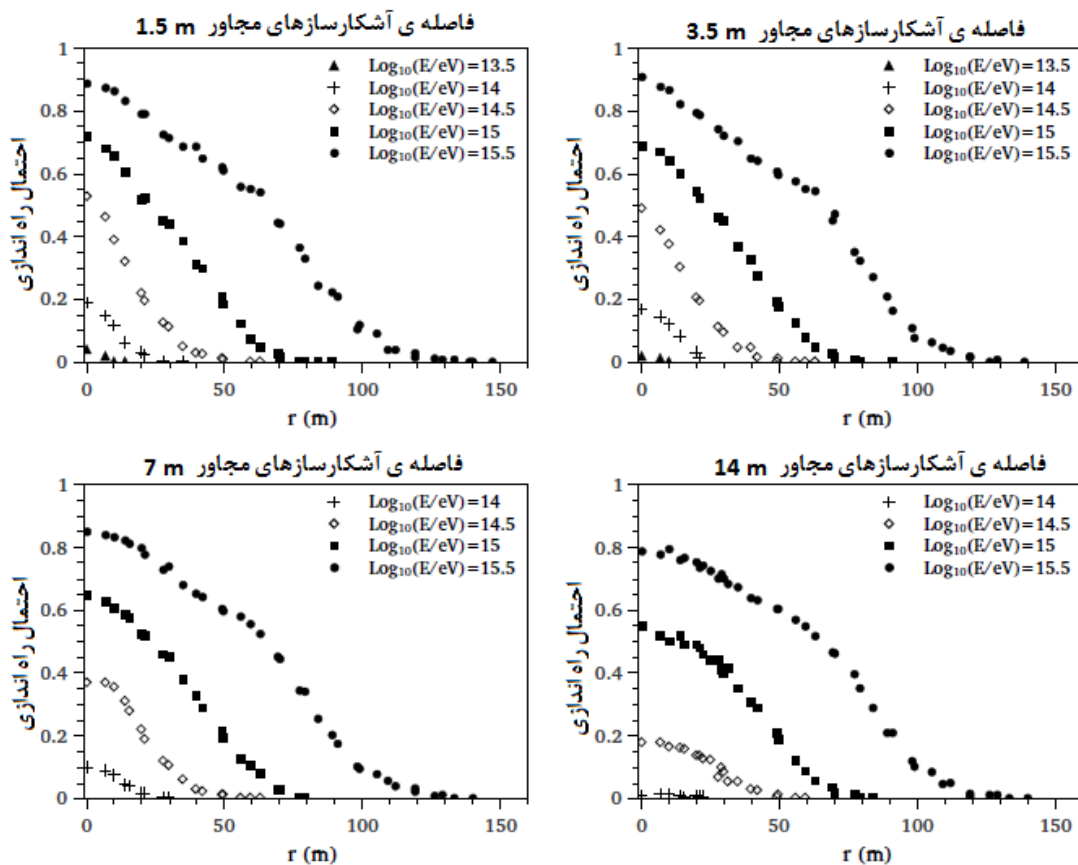
۳- تابع احتمال آشکارسازی

احتمال آشکارسازی به چند کمیت فیزیکی مستقل بستگی دارد: (۱) مشخصه های ذره ی اولیه یعنی انرژی و جرم آن، (۲) شرط راه اندازی به کار رفته، (۳) چیدمان آرایه، (۴) هندسه ی بهمن فرودی از جمله فاصله ی هسته ی بهمن از مرکز آرایه و زاویه ی سرسویی بهمن هوایی، θ [۴]. برای نمایش دادن این وابستگی ها، تابع احتمال آشکارسازی به صورت

اندازی را در حالتی که هسته ی بهمن ها در فاصله ی r از مرکز آرایه هستند برآورده می کند و $N_{incident}(r, E)$ تعداد کل بهمن های فرودی با انرژی E در حالتی که هسته ی بهمن ها در فاصله ی r از مرکز آرایه است.

به منظور بهینه کردن ابعاد آرایه ی مستطیلی، چهار فاصله ی مختلف $۱/۵m$ ، $۳/۵m$ ، $۷m$ و $۱۴m$ بین آشکارسازهای مجاور مطالعه شدند [۴] لازم به ذکر است که در سطح بام غذاخوری حداکثر فاصله ی $۷m$ بین آشکارسازها امکان پذیر است. چهار شرط راه اندازی به صورت این که حداقل ۴ آشکارساز، حداقل ۶ آشکارساز، حداقل ۱۰ آشکارساز، و در نهایت هر ۲۰ آشکارساز آرایه در نظر گرفته شد. از بین این شرط ها، شرط راه اندازی حداقل ۱۰ تایی دارای توان تفکیک زاویه ای قابل توجهی نسبت به دو شرط اول یعنی شرط راه اندازی حداقل ۴ تایی و حداقل ۶ تایی بود و از طرف دیگر احتمال ثبت رخداد های آن نسبت به راه اندازی با تمام ۲۰ آشکارسازها بیش تر بود. بنابراین در آرایه ی مستطیلی شرط راه اندازی حداقل ۱۰ تایی برای مقایسه با چیدمان خوشه ای استفاده شده است.

تابع احتمال راه اندازی از شبیه سازی های در فواصل مختلف بین آشکارسازها و در محدوده های انرژی مختلف برای چیدمان مستطیلی در شکل ۴ آمده است. همان طور که دیده می شود، بیشینه ی فاصله ی هسته ی بهمین (r_{max})



شکل ۴: احتمال راه اندازی آرایه بر حسب تابعی از فاصله ی هسته ی بهمین هوایی تا مرکز آرایه (۲) برای شرط راه اندازی ۱۰ تایی در انرژی های اولیه ی مختلف برای فاصله های $۱/۵m$ ، $۳/۵m$ ، $۷m$ و $۱۴m$ بین آشکارسازهای مجاور

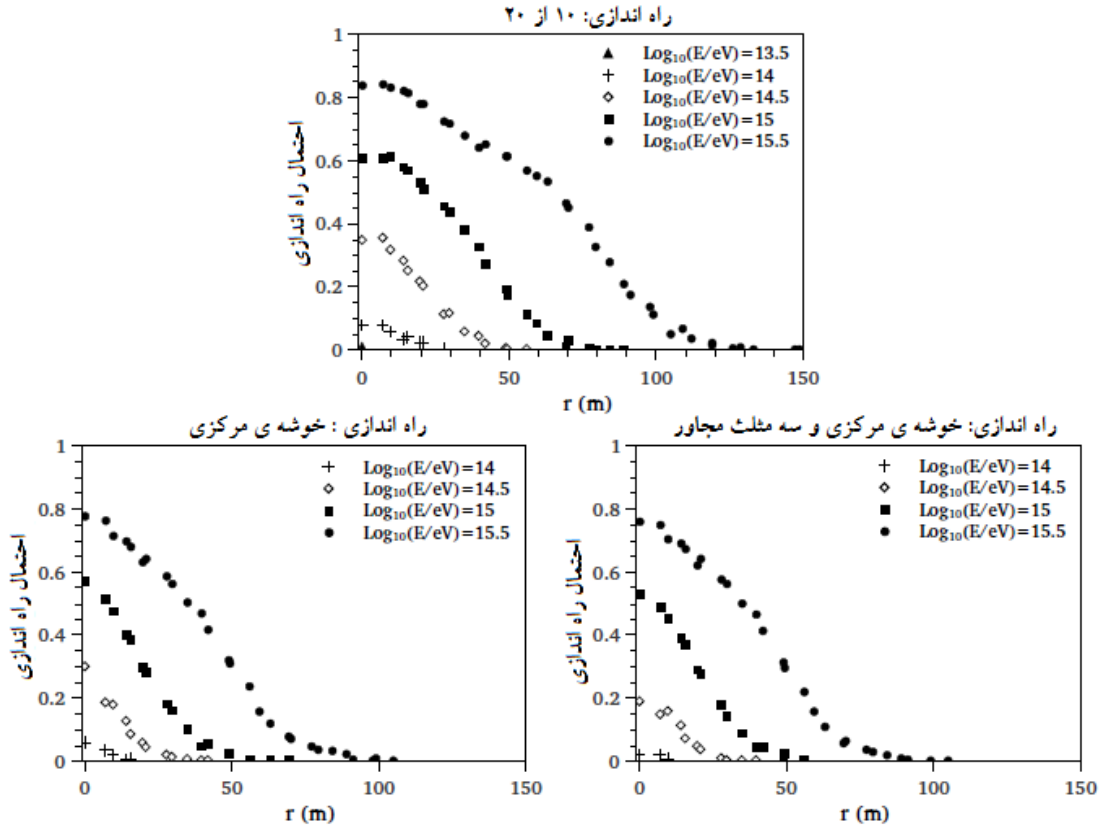
برای آشکارسازی در هر انرژی تقریباً مستقل از فاصله ی بین آشکارسازهاست اما برای یک فاصله ی مشخص بین آشکارسازها، r_{max} با انرژی افزایش می یابد.

همچنین برای آشکارسازی انرژی های کم لازم است فاصله ی بین آشکارسازها کم شود. به طوری که در شکل ۴ مشاهده می شود در آرایه ای که فاصله ی بین آشکارسازهای آن 14m است، احتمال آشکارسازی ذرات با انرژی 10^{14}eV خیلی کم است ولی در آرایه ای که فاصله ی آشکارسازهای آن $1/5\text{m}$ می شود احتمال آشکارسازی تا 20% در مرکز آرایه ($r=0$) نیز می رسد. و یا آشکارسازی ذرات با انرژی $10^{13}\text{eV} \times 3$ با آرایه ی 14m تقریباً وجود ندارد ولی با آرایه ی $1/5\text{m}$ به وجود می آید. به عبارت دیگر اندازه های کوچک تر برای یک آرایه، بهمن های با انرژی کم را می تواند ثبت کند. بنابراین برای متمرکز شدن روی ناحیه ی زانوی طیف الکترومغناطیسی ($10^{15}\text{eV} \times 3 \sim$)، اندازه ی آرایه به اندازه ی کافی باید بزرگ باشد.

در کنار یک چیدمان مستطیلی، یک چیدمان خوشه ای نیز مطالعه شد. از میان شرایط راه اندازی متعدد شرایطی که کل خوشه ی مرکزی همراه با دو مثلث مجاور، و یا سه مثلث مجاور، و یا چهار مثلث مجاور راه اندازی شوند (یعنی راه اندازی ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی و دو مثلث مجاور، یا ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی و سه مثلث مجاور، و در نهایت ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی و چهار مثلث مجاور) کارایی بالاتری نشان می دهند. احتمال راه اندازی آن ها نیز تقریباً با هم یکسان هستند. بنابراین در انتخاب راه اندازی، سه شرط راه اندازی در نظر گرفته شد: به طور تصادفی حداقل از ۱۰ آشکارساز ذره عبور کند، یا از تمام ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی عبور کند، و در نهایت از ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی سه مثلث مجاور عبور کند. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، برای دو شرط راه اندازی آخر که خوشه ی مرکزی در آن شرکت دارد، بیشینه ی فاصله ی هسته ی بهمن (r_{max}) در انرژی های مختلف کاهش می یابد، یعنی r_{max} تا 100m برای انرژی اولیه ی $10^{15}\text{eV} \times 3$ می رسد. همچنین تابع احتمال راه اندازی با شرط حداقل ۱۰ تایی که به طور تصادفی راه اندازی شوند، تقریباً با راه اندازی خوشه ی مرکزی و نیز با چیدمان مستطیلی در حالتی که فاصله ی بین آشکارسازها 7m است مشابه است.

همان طور که از شکل های ۴ و ۵ دیده می شود، در انرژی $10^{15}\text{eV} \times 3$ برای چیدمان مستطیلی با فواصل 7m و

14m بین آشکارسازها و چیدمان خوشه ای در حالتی که هسته ی بهمن نزدیک به مرکز آرایه است تابع احتمال راه اندازی تقریباً 80% درصد است.



شکل ۵: احتمال راه اندازی آرایه بر حسب تابعی از فاصله ی هسته ی بهمن هوایی تا مرکز آرایه (r) در انرژی های اولیه ی مختلف برای شرط راه اندازی ۱۰ از ۲۰ (بالا)، ۵ از ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی (پایین، سمت چپ)، و ۵ از ۵ آشکارساز خوشه ی مرکزی همراه با ۳ مثلث مجاور (پایین، سمت راست)

علاوه بر تابع احتمال راه اندازی، می توانیم تعداد رخدادها ی ثبت شده در روز در محدوده ی انرژی های مختلف،

$N(E, E + \Delta E)$ که شرط راه اندازی برای چیدمان های مختلف را برآورده می کنند را محاسبه کنیم. این کار با ضرب تابع احتمال راه اندازی، $P(r, E)$ ، و شار دیفرانسیلی پرتوهای کیهانی اولیه، $\Phi(E)$ ، (که بر حسب تعداد پرتوهای کیهانی اولیه بر سطح، بر زمان، بر زاویه ی فضایی، بر انرژی است) به دست می آید.

$$N(E, E + \Delta E) = \int_S \int_E^{E+\Delta E} P(E, E + \Delta E) \Phi(E) ds dE \int d\Omega \int dt$$

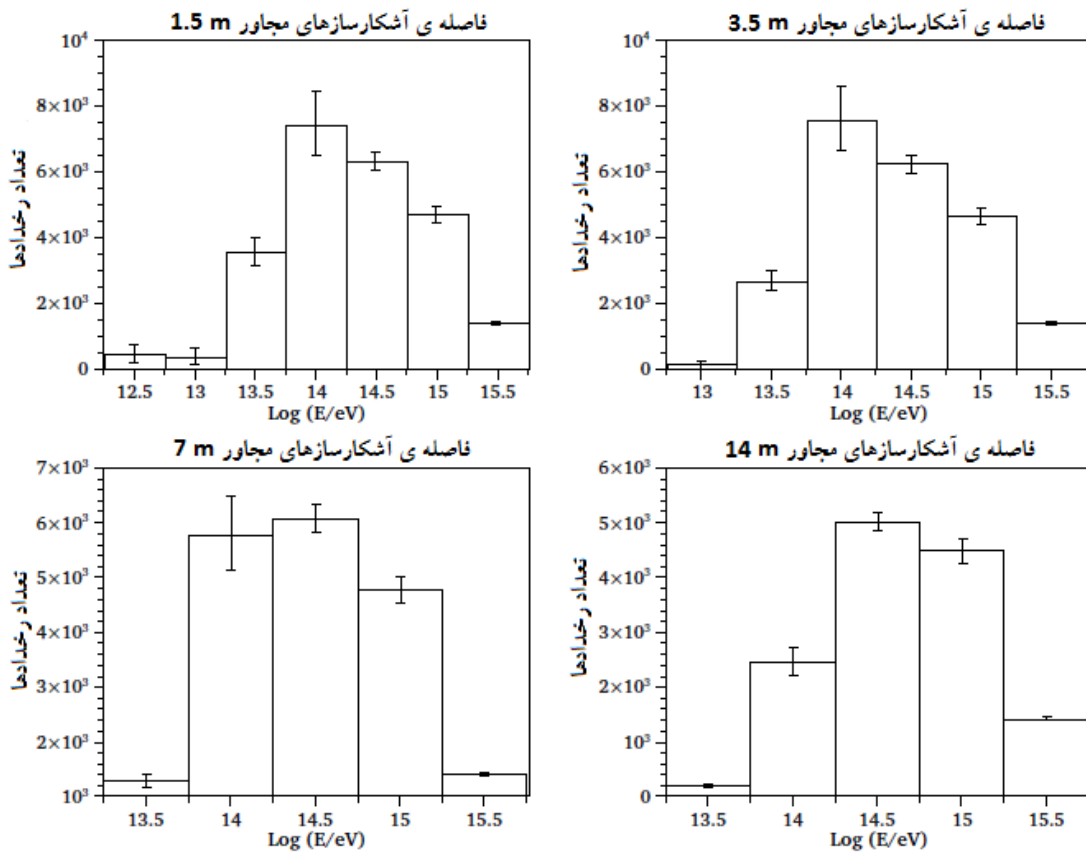
که در آن S سطح یک شبکه ی مربعی است که اگر هسته ی یک بهمن در آن فرود آید می تواند شرط راه اندازی را برآورده نماید. $\Phi(E)$ طیف تمام ذرات در ناحیه ی زانو است که آرایه ی بهمن هوایی تبت (Tibet) برای ذرات اولیه گزارش کرده است [۵].

$$\Phi(E) = 1.5 \times 10^{-20} \left(\frac{E}{5.62 \times 10^{14}} \right)^{-2.60 \pm 0.04} [m^{-2}s^{-1}sr^{-1}eV^{-1}]; E < 5.62 \times 10^{14} eV$$

$$\Phi(E) = 1.2 \times 10^{-23} \left(\frac{E}{7.08 \times 10^{15}} \right)^{-3.00 \pm 0.05} [m^{-2}s^{-1}sr^{-1}eV^{-1}]; E < 7.08 \times 10^{15} eV$$

$$\Phi(E) = 6.7 \times 10^{-22} [m^{-2}s^{-1}sr^{-1}eV^{-1}]; E = 1.78 \times 10^{15} eV$$

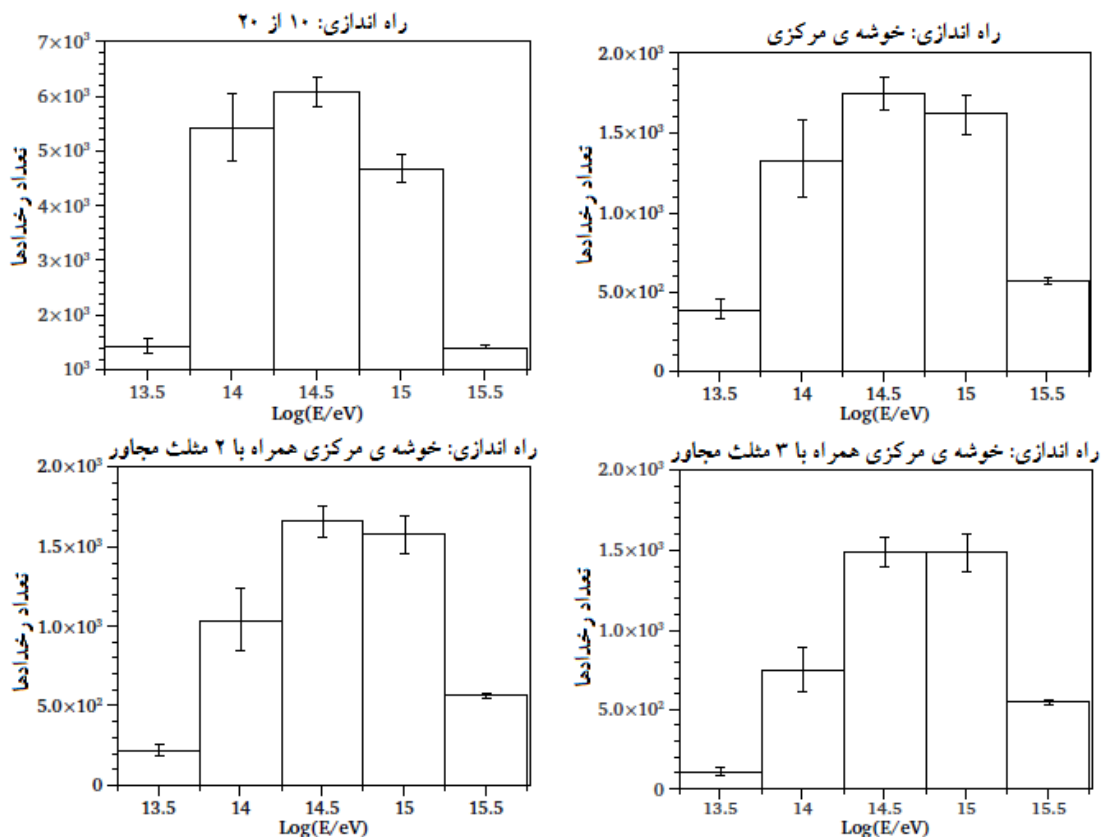
در شکل ۶ تعداد رخدادها ی ثابت شده در روز برای انرژی های مختلف که شرط راه اندازی ۱۰ تایی را برای چیدمان مستطیلی و برای فواصل مختلف بین آشکارسازها برآورده می کند، نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، در حالتی که فاصله ی بین آشکارسازها ۱/۵m و ۳/۵m است، بیشینه ی ثبت رخدادها در انرژی ۱۰^{۱۴}eV است و در حالت ۷m و ۱۴m این بیشینه ی انرژی به ۳ × ۱۰^{۱۴}eV می رسد.



شکل ۶: تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی های مختلف با شرط راه اندازی ۱۰ تایی، برای چیدمان مستطیلی و برای فواصل مختلف بین آشکارسازها

در چیدمان خوشه ای نیز تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان طور که دیده می شود، با شرط های راه اندازی مختلف برای این آرایه، بیشینه ی رخدادها در انرژی $3 \times 10^{14} \text{eV}$ اتفاق می افتد که مشابه چیدمان مستطیلی با فاصله ی ۷m و ۱۴m بین آشکارسازها است.



شکل ۷: تعداد رخدادهای ثبت شده در روز برای انرژی های مختلف با شرط های راه اندازی مختلف برای چیدمان خوشه ای

۴- تفکیک زاویه ای

با در نظر گرفتن مجموعه ی دیگری از بهمن های شبیه سازی شده شامل ۱۲۰۰۰ بهمن پروتون و آلفا (با ترکیب ۸۸٪ پروتون و ۱۲٪ آلفا) که به طور پیوسته در محدوده ی انرژی $2 \times 10^{14} \text{eV}$ تا $4 \times 10^{14} \text{eV}$ در زوایای سرسویی صفر درجه تا 60° و با گام های 5° هستند، تفکیک زاویه ای البرز ۱ را بررسی می کنیم. این محدوده ی انرژی مطابق با بیشینه ی تعداد رخدادهای ثبت شده در انرژی $E = 3 \times 10^{14} \text{eV}$ است.

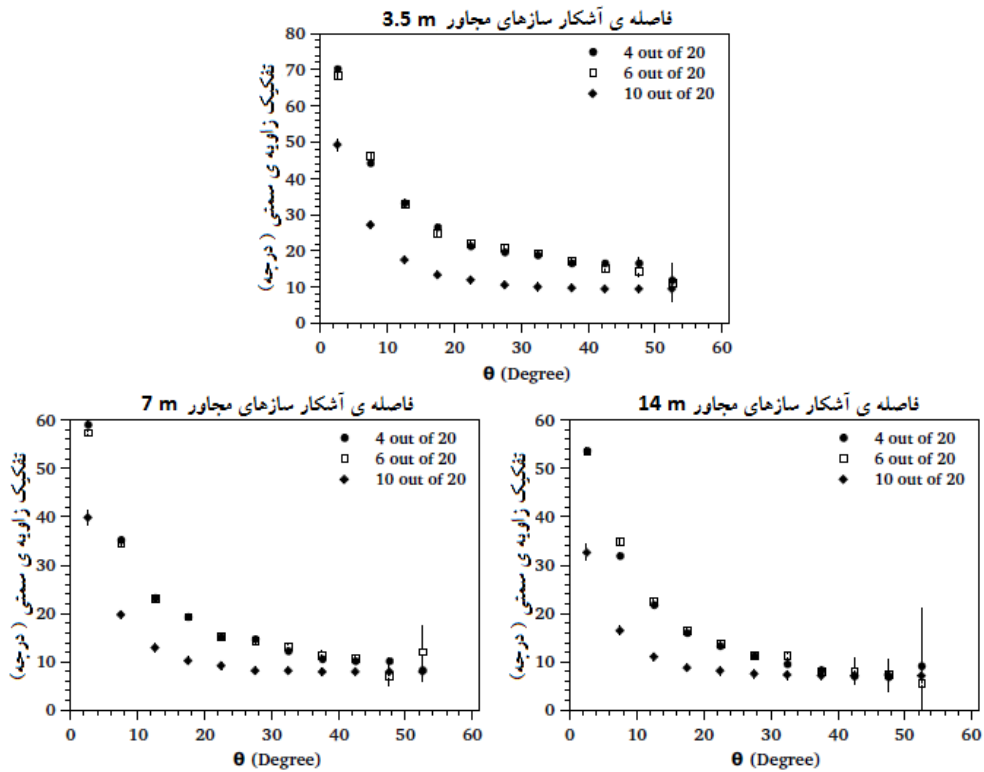
با استفاده از روش حداقل کردن χ^2 ، تفکیک زاویه ای آرایه را برای شرط های راه اندازی و چیدمان های مختلف محاسبه شد. تفکیک زاویه ای مستقیماً به دقت اندازه گیری زمان ثبت هر ذره در هر آشکارساز مربوط می شود. بنابراین برای نتایج واقعی تر در شبیه سازی، عدم قطعیت اندازه گیری زمان در نظر گرفته شد. همچنین مکان هسته ی بهمن به طور تصادفی روی کل سطح آرایه در نظر گرفته شد.

عدم قطعیت اندازه گیری زمان با ابزارهای به کار رفته برای البرز ۱ به صورت زیر محاسبه می شود.

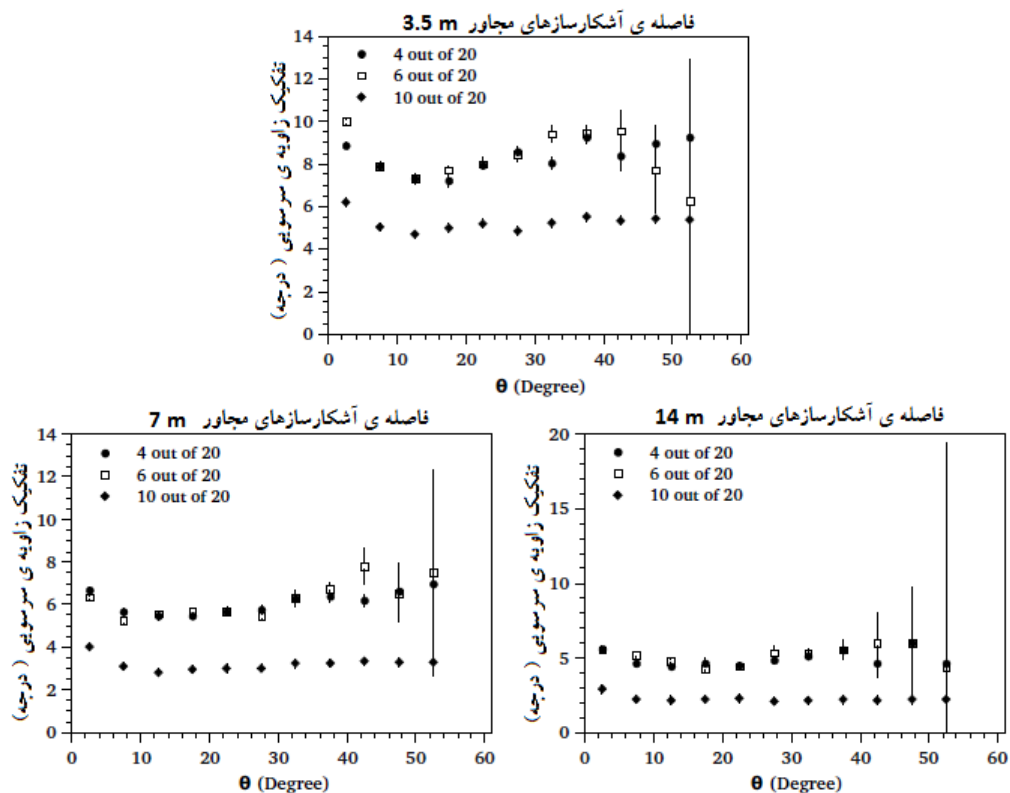
$$\sigma_{instrument} = \sqrt{\sigma_{det.}^2 + \sigma_{elec.}^2} \sim 1.82ns$$

که $\sigma_{elec.} = 0.10ns$ عدم قطعیت ابزار الکترونیک و $\sigma_{det.} = 1.82ns$ مربوط به عدم قطعیت آشکارساز است [۳].

شکل های ۸ و ۹ به وضوح نشان می دهند که در چیدمان مستطیلی، برای فواصل مختلف بین آشکارسازها، شرط راه اندازی ۱۰ تایی نسبت به دو شرط راه اندازی دیگر (یعنی شرط راه اندازی ۴ تایی و ۶ تایی) تفکیک زاویه ای بهتری دارد و از این نظر مناسب تر است.



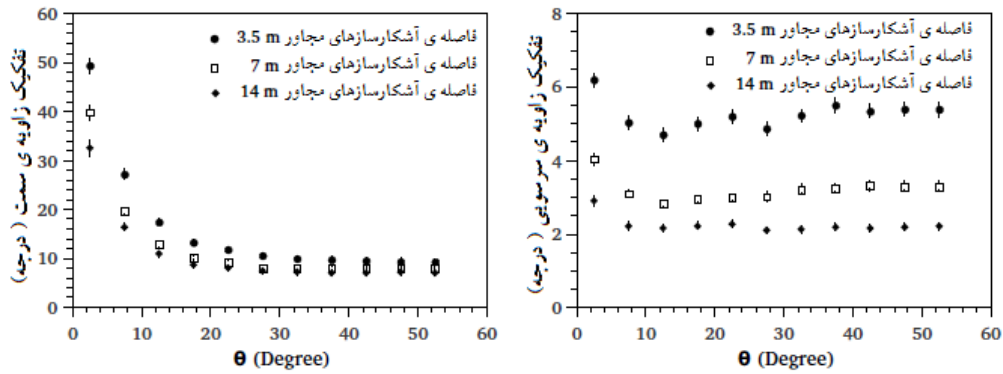
شکل ۸: تفکیک زاویه ای سمتی برحسب تابعی از زاویه ای سرسویی برای فاصله های مختلف بین آشکارسازهای مجاور در چیدمان مستطیلی



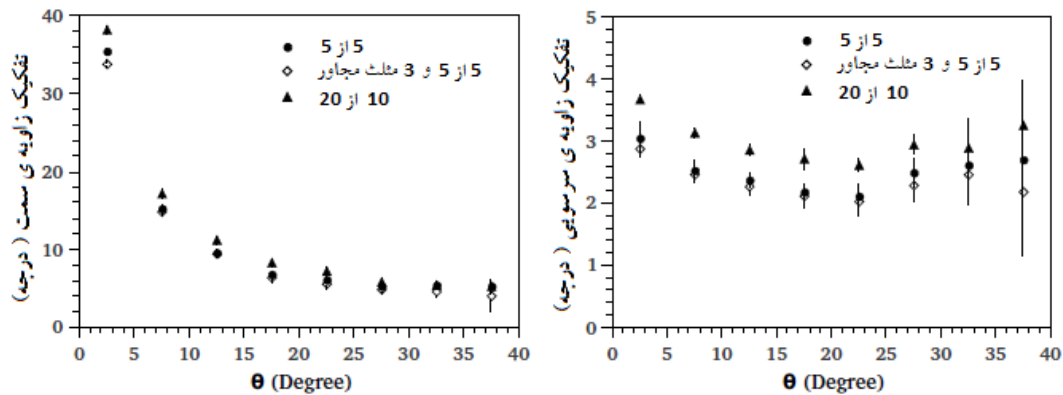
شکل ۹: تفکیک زاویه ی سرسویی برحسب تابعی از زاویه ی سرسویی برای فاصله های مختلف بین آشکارسازهای مجاور در چیدمان مستطیلی

شکل ۱۰ نشان می دهد که تفکیک زاویه ای با افزایش اندازه ی آرایه بهتر می شود. اختلاف بین حالت های ۷m و ۱۴m بین آشکارسازها کم است، به خصوص برای زوایای سرسویی بزرگ تر از ۱۰° کم تر هم می شود.

همان طور که در شکل ۱۱ دیده می شود، تفکیک زاویه ای در چیدمان خوشه ای در مقایسه با چیدمان مستطیلی با راه اندازی ۱۰ تایی و فاصله ی ۷m بین آشکارسازها مناسب تر است. در چیدمان خوشه ای از میان سه حالت شرط راه اندازی، دو حالت که شامل راه اندازی خوشه ی مرکزی هستند دارای تفکیک زاویه ای تقریباً یکسانی هستند. خطاهای نشان داده شده در نمودارها علاوه بر خطاهای سیستماتیک مربوط به ابزارهای اندازه گیری شامل خطاهای آماری نیز می شوند.



شکل ۱۰: تفکیک زاویه سمت (چپ) و تفکیک زاویه ی سرسویی (راست) برحسب تابعی از زاویه ی سرسویی اولیه برای شرط راه اندازی ۱۰ تایی در چیدمان مستطیلی



شکل ۱۱: تفکیک زاویه سمت (چپ) و تفکیک زاویه ی سرسویی (راست) برحسب تابعی از زاویه ی سرسویی اولیه برای چیدمان خوشه ای

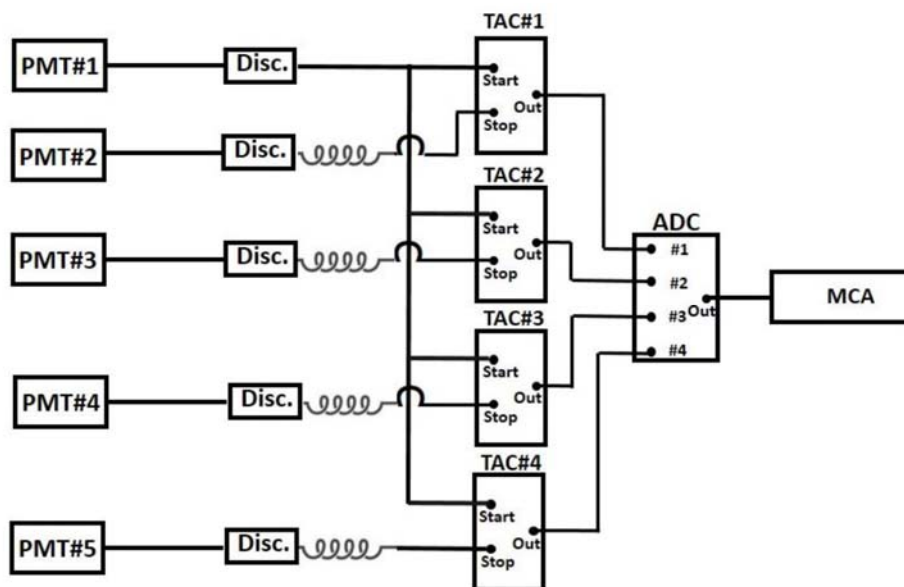
با توجه به ویژه گی های چیدمان خوشه ای این چیدمان برای آرایه ی البرز ۱ در نظر گرفته شد.

۵- داده های تجربی زیر آرایه ی ۵ تایی البرز ۱

در گام اول برای راه اندازی آرایه البرز ۱، زیر آرایه ی ۵ تایی یا به عبارت دیگر خوشه ی مرکزی آرایه از بهمن ماه ۱۳۹۲ با هدف تعیین و بررسی پارامترهایی نظیر تعداد رخداد های قابل ثبت در طول روز و مقایسه آنها با شبیه سازی شروع به داده گیری کرد.

این آرایه در آزمایشگاه پرتوهای کیهانی واقع در طبقه ی چهارم دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف و در زیر دو سقف بتونی هر کدام به ضخامت ۴۲ cm قرار دارد. آشکارسازها از نوع سوسوزن های پلاستیکی با ابعاد $50 \times 50 \text{ cm}^2$ که هر یک در محفظه هرمی شکل از جنس آهن گالوانیزه قرار دارند که سطح داخلی محفظه با رنگ سفید مات (با خاصیت پخشی)

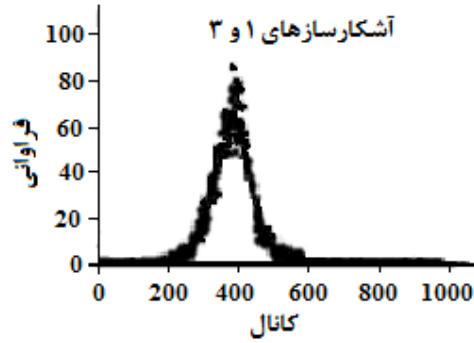
پوشیده شده است. ارتفاع هرم ۲۰cm است و در رأس آن یک لامپ تکثیرکننده ی نوری قرار دارد (شکل ۲). مدار الکترونیکی آزمایش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سیگنال PMT ی هر یک از آشکارسازها وارد مجزا کننده ی ۸ کاناله (Discriminator, CAEN N413A) شده که آستانه ی پایین آن برای هر آشکارساز به صورت تجربی تنظیم شده است. سیگنال خروجی کانالی که به آشکارساز ۱ متصل است به ۴ ورودی شروع (Start) در چهار تبدیل کننده ی زمان به دامنه (TAC, ORTEC 566) وارد می شوند. خروجی ۴ کانال دیگر مجزاکننده که سیگنال ۴ آشکارساز دیگر به آنها وارد می شوند به ترتیب به پایان (Stop) مربوط به ۴ تبدیل کننده ی زمان به دامنه فرستاده می شود. پنجره زمانی TAC ها ۲۰۰ns تنظیم شده است. خروجی TAC ها توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) به تحلیل گر چند کاناله (MCA) فرستاده می شوند. به طور خلاصه میتوان گفت که به وسیله این چیدمان الکترونیک، همزمانی ۴ آشکارساز با آشکارساز ۱ در بازه ۲۰۰ ns ثبت می شود که ثبت این داده ها مشروط به ثبت رخداد همزمانی بین آشکارساز (۲ و ۱) است. داده گیری به صورت دوره های شش روزه انجام شده و پیش از شروع هر دوره از آزمایش ها فرکانس خروجی PMT هر آشکارساز به صورت



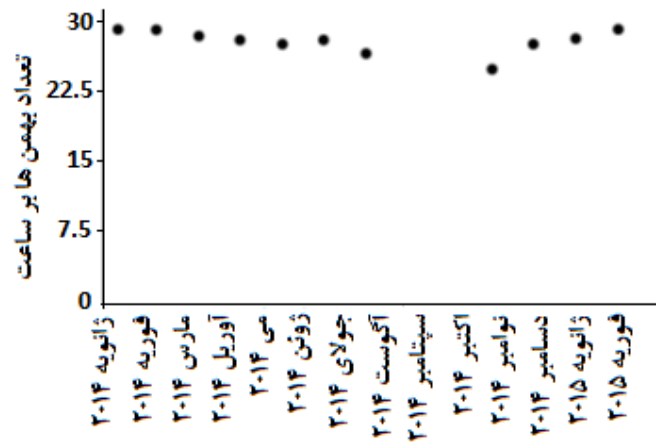
شکل ۱۲: نمایی شماتیک از مدار استفاده شده در آزمایش

جداگانه بررسی و به عنوان معیاری برای ثبات عمل کرد آشکارساز در طی دوران داده گیری ثبت می شود. به منظور کنترل شرایط محیط آزمایشگاه از ثبات دما، فشار و رطوبت استفاده کردیم که تغییر محسوسی را در این سه پارامتر در طول ثبت داده ها نشان نمی دهد. نمونه ای از طیف همزمانی بین آشکارسازهای ۱ و ۳ که مربوط به یک دوره ی شش روزه است در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

شکل ۱۴ تعداد متوسط رخدادها بر ساعت در ماه را نشان می دهد. دیده می شود که نرخ متوسط رخداد بر ساعت در طول زمان داده گیری افت و خیز زیادی ندارد و این دلیلی بر ثبت یکنواخت داده ها در این بازه است. لازم به ذکر است که در ماه های آگوست، سپتامبر، و اکتبر داده گیری متوقف بوده است.

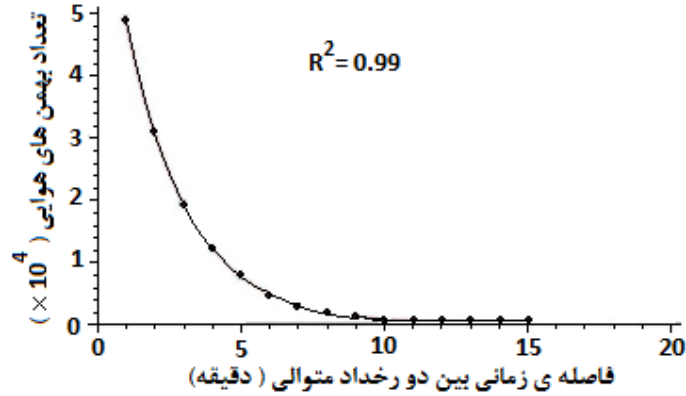


شکل ۱۳: رخداد های همزمانی ثبت شده بین آشکارسازهای ۱ و ۳ در یک دوره ی آزمایش

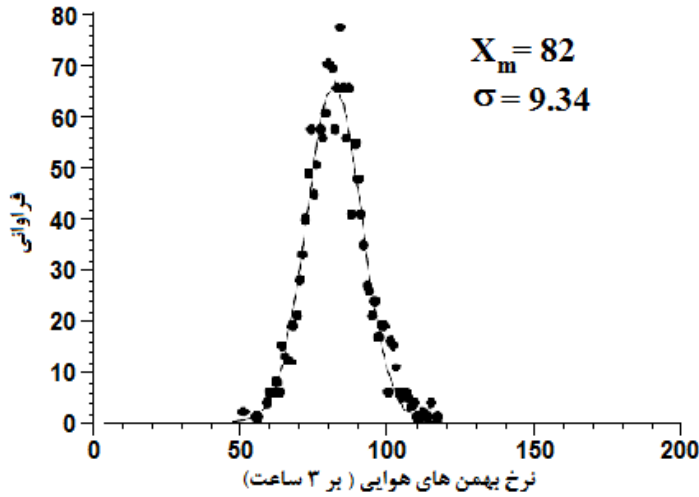


شکل ۱۴: تعداد متوسط رخدادها بر ساعت در بازه های یک ماهه

زمان کل داده گیری ۴۷۸۸ ساعت بوده که بعد از حذف نوفه در این مدت و با در نظر گرفتن شرط راه اندازی هر ۵ آشکارساز، تعداد ۱۳۱۹۶۴ رخداد بهمن هوایی ثبت شده است. به بیان دیگر متوسط آهنگ ثبت رخدادها، یک رخداد در هر ۲/۱۷ دقیقه است. از سوی دیگر توزیع فاصله ی زمانی بین دو رخداد متوالی به صورت تصادفی بوده و با یک تابع نمایی، 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 گوسی نرخ رخدادها را در بازه ی زمانی ۳ ساعته نشان می دهد که در آن متوسط تعداد رخدادها در بازه ی زمانی ۳ ساعته، ۸۲ رخداد و پهن شدگی $\sigma = 9/34 \frac{\text{بهمن هوایی}}{\text{ساعت}}$ است.

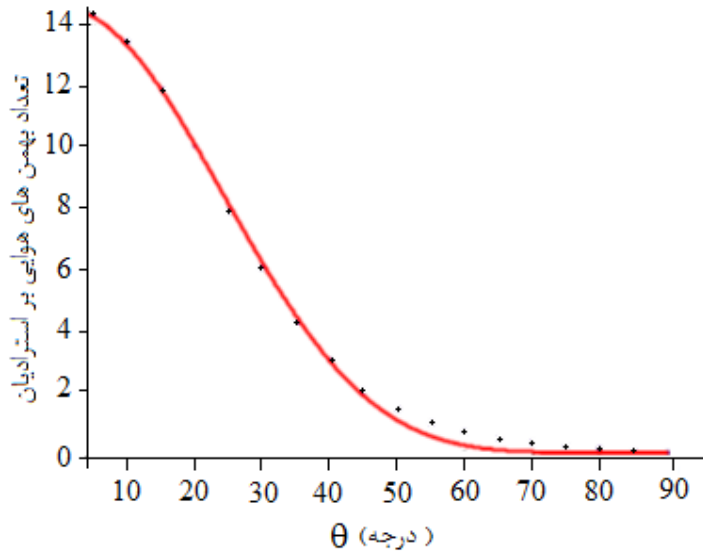


شکل ۱۵: توزیع فاصله ی زمانی بین دو رخداد متوالی



شکل ۱۶: توزیع نرخ رخدادها در بازه زمانی ۳ ساعته

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 ی سرسویی رخدادهای بهمن هوایی محاسبه شده است. توزیع زاویه ی سرسویی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. از آنجا که با افزایش زاویه ی سرسویی ضخامت جو برای بهمن ها افزایش پیدا می کند، تعداد رخدادها با افزایش زاویه ی سرسویی به طور قابل توجهی با تابع $\cos^n \theta$ کاهش پیدا می کند. با برازش این تابع با داده های زیر آرایه البرز ۱ مقدار $n = ۵/۹۳$ با رگرسیون $R^2 = ۰/۹۹۸$ به دست آمد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: توزیع زاویه ی سرسویی بهمن های هوایی

۶- نتیجه گیری

ویژه گی های آرایه ی البرز ۱ با برنامه ی CORSIKA مطالعه شده است. تابع احتمال راه اندازی، تفکیک زاویه ای و تعداد رخداد های ثبت شده در روز بر حسب انرژی ذره ی 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 ی شار زیاد پرتو های کیهانی تعداد زیادی از رخداد ها ثبت می شوند. به علاوه در انرژی های زیاد (حوالی زانوی طیف پرتو های کیهانی)، این آرایه کارا تر است.

در چیدمان مستطیلی، ۴ شرط راه اندازی مختلف و ۴ اندازه ی مختلف برای آرایه در نظر گرفته شد. این مطالعه نشان می دهد که وقتی اندازه ی آرایه و تعداد آشکارساز های راه اندازی زیاد می شوند، تفکیک زاویه ای مناسب تر می شود. با محدود بودن مساحت سطح آرایه ی مورد نظر، این چیدمان با فاصله ی ۷ متر بین آشکارسازها و شرط راه اندازی با ۱۰ آشکارساز وضعیت مناسبی ایجاد می کند تا آن را با چیدمان خوشه ای مقایسه کنیم.

در چیدمان خوشه ای، شرط های راه اندازی شامل کل خوشه ی ۵ تایی مرکزی همراه با بعضی از مثلث های مجاور تقریباً کارایی یکسانی در محدوده های انرژی مختلف دارند. تعداد رخداد های ثبت شده در انرژی های مختلف برای شرایط راه اندازی مختلف در چیدمان خوشه ای در انرژی $10^{14} \text{eV} \times 3$ بیشینه می شود. تفکیک زاویه ای این

چیدمان در مقایسه با چیدمان مستطیلی با فاصله ۷ متر بین آشکارسازهای مجاور، و شرط راه اندازی ۱۰ تایی به طور قابل ملاحظه ای بهتر است.

مطالعات تجربی انجام شده بر روی خوشه ی مرکزی البرز ۱ نشان می دهد متوسط نرخ رخدادهای ثبت شده در هر ساعت در طول داده گیری تغییری قابل توجهی ندارد. با برازش تابع نمایی با داده های این آرایه، ثابت نمایی تابع که بیانگر فاصله ی زمانی بین هر دو رخداد متوالی است ۲/۱۷ دقیقه به دست آمد. برای توزیع زاویه ی سرسویی بهمن های هوایی گسترده، تابع توزیع $\cos^n \theta$ با داده ها برازش داده شد و $n = 5/93$ به دست آمد.

مرجع ها:

[۱] M. Bahmanabadi, M. Khakian Ghomi, J. Samimi and D. Purmohammad; "An Investigation on Anisotropy of Cosmic Rays with a Small Air Shower Array"; *Experimental Astronomy* 15, (2003) 13-27

[۲] شیدایی، فرزانه (پایان نامه ی دکتری)، "مطالعه بر روی پرتوهای پرنانرژی در سطح تهران"، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

[۳] Y. Pezshkian et al. "Scintillation detectors of Alborz-I experiment", *NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH A*, 773(2015)117-123

[۴] عبدالهی، سهیلا؛ پزشکیان، یوسف؛ بهمن آبادی، محمود؛ "اثر تغییر ابعاد آرایه در طیف پرتوهای قابل ثبت در آرایه ی البرز 1، آرایه ی 20 تایی به چه ناحیه ای از طیف پرتوهای کیهانی حساس است؟" هفتمین همایش ملی نجوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، 1392

[۵] M. Amenomori et al., The cosmic ray energy spectrum between 1014:5 and 1016:3 eV covering the Knee Region, *ApJ* 461 (1996) 408-414

[۶] M. Bahmanabadi et al.; "A study of the effect of geomagnetic field on Extensive Air Showers with small arrays"; *Experimental Astronomy* 13:39-57(2002)

Observation of cosmic rays by Alborz -1 array

Abstract:

The first phase of the Alborz Observatory Array (Alborz-1) consists of 20 plastic scintillation detectors each one with surface area of 0.25 m^2 spread over an area of $40 \times 40 \text{ m}^2$ realized to the study of Extensive Air Showers around the knee at the Sharif University of Technology campus. The first stage of the project including construction and operation of a prototype system has now been completed and the electronics that will be used in the array instrument has been tested under field conditions. In order to achieve a realistic estimate of the array performance, a large number of simulated CORSIKA showers have been used. In the present work, theoretical results obtained in the study of different array layouts and trigger conditions are described. Using Monte Carlo simulations of showers the rate of detected events per day and the trigger probability functions, i.e., the probability for an extensive air shower to trigger a ground based array as a function of the shower core distance to the center of array are presented for energies above 1 TeV and zenith angles up to 60° . Moreover, the angular resolution of the Alborz-1 array is obtained.

For experimental study of the array, Alborz-1 sub-array consists of 5 detectors on a pentagon configuration similar to the central cluster of the Alborz-1 array have been collecting data since 2014 February for 14 month in 4th floor of physics department at Sharif University of Technology. Alborz-I, made of 20 scintillation detectors is set up in a cluster layout to study the cosmic ray spectrum in the energy range of 1012 to 1016 eV. . This paper reveals the zenith angle distribution function of detected air showers by this sub-array.

Keywords: extensive air shower, ground based detector array, trigger probability, angular resolution