

شبیه سازی پرتوهای کیهانی و تعیین رابطه ارتفاع بیشینه توسعه بهمنهای گسترده هوایی (H_{max}) با جرم و انرژی

گوهر رستگار زاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سمنان
پست الکترونیکی: grastgarzadeh@semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۸۴/۹/۱۹ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۲/۹)

چکیده

با استفاده از کد CORSIKA و مدل اندرکنش هادرونی انرژیهای بالا QGSJET، شبیه سازی مونت کارلو برای تعداد ۵۰۰۰ بهمن گسترده هوایی و تابشهای اولیه گاما، پروتون، هلیوم، نیتروژن، سیلیسیم و آهن در انرژیهای مختلف انجام و رابطه H_{max} با جرم و انرژی تابش اولیه به دست آمده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پرتوهای کیهانی، بهمنهای گسترده هوایی، CORSIKA

۱. مقدمه

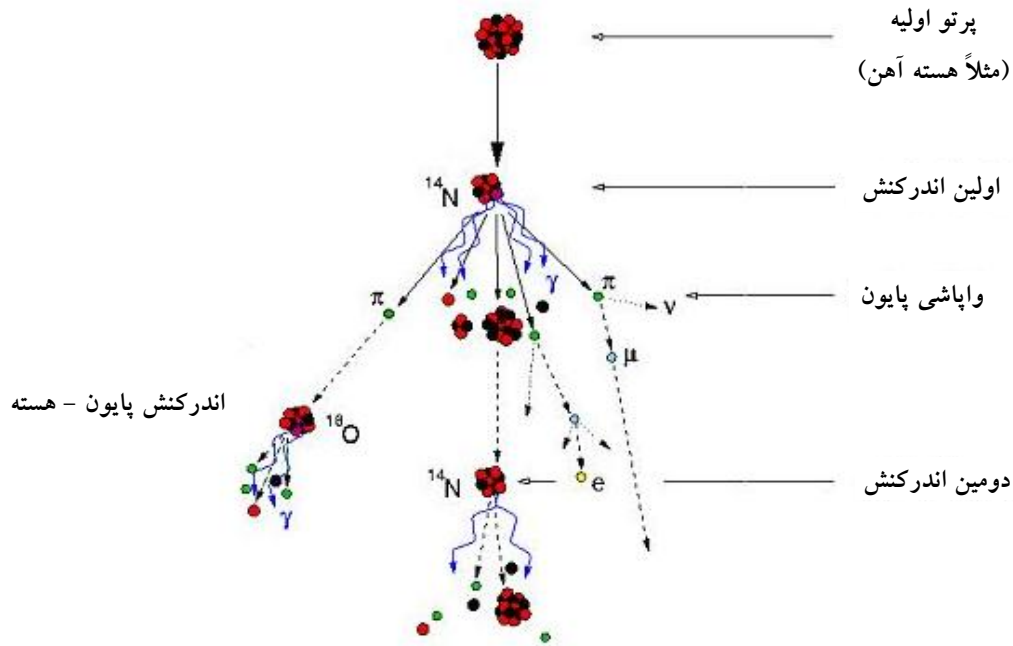
هستند. در سال ۱۹۲۰ یک دانشمند فرانسوی به نام پیر اوژه^۱ پدیده بهمنهای گسترده هوایی (EAS) را کشف کرد. او فهمید که ذرات پر انرژی (CR) قادر به ساختن بهمنهایی از ذرات ثانویه هستند که تا محدوده صدها متر گسترش دارند. از آن به بعد آشکارسازی این ذرات ثانویه و نور چرنکوف و نور فلورسانس مربوط به آنها به عنوان روشهای آشکارسازی پرتوهای کیهانی پرانرژی در آزمایشهای گوناگون به کار گرفته می شود. در انرژیهای $E > 100 \text{ TeV}$ ، آشکارسازی (CR) عمدتاً از طریق آشکارسازی و مطالعه پارامترهای مختلف ثانویه‌های یک بهمن گسترده هوایی صورت می گیرد. همچنین جهت، انرژی و جرم اولیه به طریق غیرمستقیم و با بازسازی بهمن از پایین به بالا و استفاده از گداهای شبیه سازی به دست می آید. از جمله این روشها می توان به استفاده از تعداد میونهای ثانویه [۱]، توزیع

پرتوهای کیهانی تابشهای پر انرژی هستند که به طور پیوسته زمین را بمباران می کنند. اگر چه بیشتر این پرتوها پروتونها هستند، اما آزمایشهای مستقیم ترکیب جرمی این تابش را حاوی ۵۰٪ پروتون، ۲۵٪ هلیوم، ۱۳٪ گروه هسته‌های C-N-O کمتر از یک درصد الکترون و کمتر از ۱٪ درصد پرتوهای گاما نشان می دهد.

محدوده انرژی تابشهای کیهانی (CR) بسیار گسترده است و از 10^9 eV تا 10^{20} eV گسترده است. البته شار این تابشها به سرعت با انرژی افت می کند و در انرژی ۱ GeV شار این تابش 10^4 ذره بر متر مربع در ثانیه و در انرژی 10^3 GeV فقط یک ذره بر متر مربع بر ثانیه است.

تکنیک آشکارسازی پرتوهای کیهانی از زمان کشف آنها تا کنون در حال تکامل بوده است. در ابتدا این ذرات توسط اتاقکهای یونیزاسیون، شمارنده‌های گایگر و اتاقکهای ابری آشکار می شدند. این تکنیکها البته محدود به ذرات کم انرژی

۱. Pierr Auger



شکل ۱. نمای شماتیک یک بهمن هوایی

باشد بر اثر تولید زوج و تابش ترمزی رگباری از فوتونها و الکترونها خواهیم داشت.

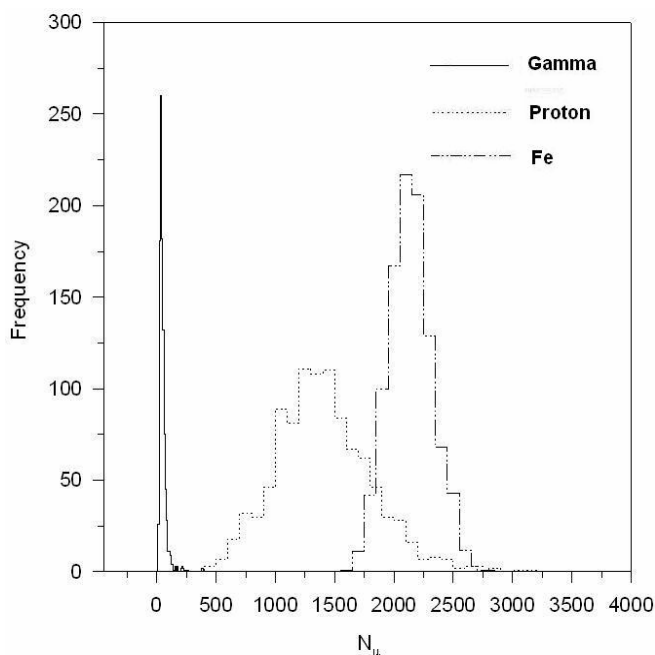
در حال حاضر رصدخانه‌های پرتو کیهانی بسیاری در سراسر دنیا به آشکار سازی پرتوهای کیهانی می‌پردازند. این رصدخانه‌ها در ارتفاعهای مختلف از سطح دریا قرار دارند که معروفترین آنها گروه KASCADE در آلمان [۵] و رصدخانه پیر اوژه در آرژانتین هستند [۶].

در ایران نیز گروه رصدخانه تابش پرنرژی کیهانی البرز در دانشگاه صنعتی شریف [۷] با طراحی و ساخت یک آرایه کوچک متشکل از تعداد محدودی آشکار ساز سیتیلاتور و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف آن [۸] در حال آشکار سازی پرتوهای کیهانی هستند.

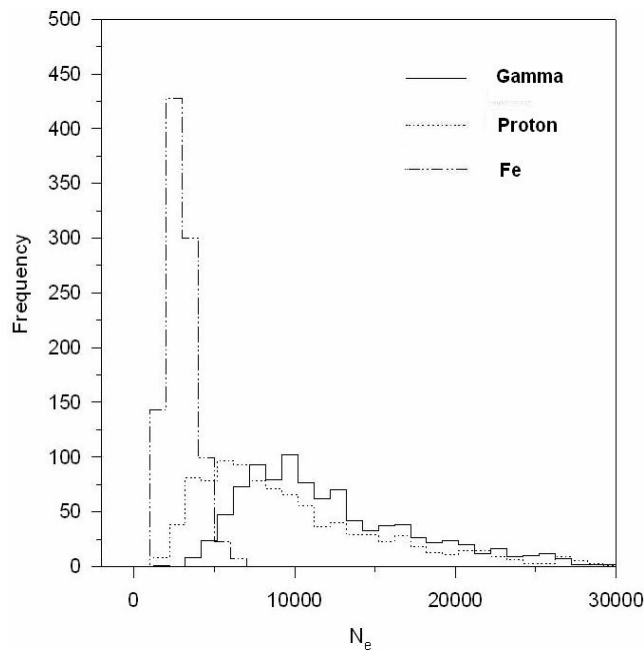
با استفاده از این آرایه کوچک، تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی بهمنهای گسترده هوایی [۹] و ناهمسانگردی پرتوهای کیهانی [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین چشمه‌های پرنرژی گاما که قبلاً توسط تلسکوپ EGRET در رصدخانه فضایی کامپتون (CGRO) آشکار سازی شده بود توسط این گروه نیز مشاهده شده است [۱۱]. به علاوه این گروه با ساخت یک تلسکوپ پرتو کیهانی میونهای مثبت و منفی جو را

عرضی هادرونیهای ثانویه [۲]، پارامترهای مختلف نور چرنکوف [۳] و تحلیل مولتی فراکتالی الکترونیهای ثانویه [۴] اشاره کرد. اگر چه در مقایسه با روش مستقیم (بالن و ماهواره) این روشها از دقت و تکنیک کمتری برخوردار هستند اما به دلیل سطح جمع‌آوری زیاد آرایه‌های زمینی تنها راه بررسی (CR) در انرژیهای زیاد می‌باشند. پارامترهایی که در این روش آشکار سازی می‌شوند، ذرات ثانویه، نور چرنکوف یا نور فلورسانس آنها هستند.

نمای شماتیک یک بهمن هوایی در شکل ۱ دیده می‌شود. در انرژیهای زیاد و فوق‌العاده زیاد پرتوهای کیهانی پس از عبور از جو، رگباری از فوتون، الکترون، پوزیترون، میون و ... تولید می‌کنند، در این روش ذرات توسط آرایه‌هایی از سیتیلاتورها یا آشکار سازهای مسیریاب در سطح زمین آشکار می‌شوند. در مورد ذرات باردار در برهم‌کنش اول، نوکلئونهای ثانوی و مزونها تشکیل می‌شوند، پایونهای خنثی به دو فوتون تلاشی می‌کنند و بر اثر تولید زوج و تابش ترمزی رگباری از فوتونها و الکترونها تولید می‌کنند. پایونهای باردار نیز به میونها و نوترینوها واپاشی می‌کنند. میونها و نوترینوها برهم‌کنش کمی با جو دارند و به سطح زمین می‌رسند. اگر تابش اولیه پرتو گاما



شکل ۳. افت و خیز تعداد میونها (۱۰۰۰ بهمن برای هر اولیه).



شکل ۲. افت و خیز تعداد الکترونها (۱۰۰۰ بهمن برای هر اولیه).

سطح مشاهده می‌رسند ثبت می‌شوند و در نتیجه امکان یک تحلیل همه جانبه از بهمنهای شبیه سازی شده حاصل می‌شود. در کار حاضر با استفاده از این کُد و مدل اندرکنش QGSJET برای اندرکنشهای هادرونی در انرژیهای بالا [۱۳] تعداد بیش از ۵۰۰۰ بهمن گسترده هوایی شبیه سازی و تحلیل شده‌اند.

۳. طبیعت آماری ثانویه‌ها و افت و خیز در تعداد آنها

شکل ۲ نتایج شبیه سازی را برای گاما، پروتون و آهن نشان می‌دهد. برای هر تابش شبیه سازی در تعداد ۱۰۰۰ بهمن در انرژی ۱۰۰ TeV انجام شده است. همان طور که دیده می‌شود افت و خیزهای آماری تعداد الکترونها در سطح مشاهده (N_e) به اندازه ای گسترده است که عملاً آهن و پروتون و گاما، به لحاظ تعداد الکترونها کاملاً از هم تفکیک ناپذیرند. همان طور که دیده می‌شود آهن دارای الکترونها ثانویه کمتری نسبت به پروتون، و گاما دارای تعداد الکترونها بیشتری نسبت به آهن و پروتون است اما توزیع الکترونها آهن تیزتر از پروتون و گاما است.

شکل ۳ نتیجه شبیه سازی را در همان تعداد و انرژی

آشکارسازی و نسبت میونها مثبت به میونها منفی را که حاوی اطلاعات مهمی در مورد نوترینوهای جو زمین است، تعیین کرده‌اند [۱۲].

۲. کُد شبیه سازی CORSIKA

تحلیل داده‌های آزمایشهای بهمنهای گسترده هوایی (EAS) نیاز به مدل سازی تئوری دقیق بهمنهایی دارد که از برخورد یک اولیه پر انرژی با جو ایجاد می‌شوند و این کار را فقط می‌توان با یک شبیه سازی مونت کارلو که تمامی مشخصات اندرکنشهای قوی و الکترو مغناطیسی در آن منظور می‌شود انجام داد. CORSIKA (Cosmic Ray Simulation For Cascade) یک برنامه مفصل شبیه سازی است که توسعه بهمنهای گسترده هوایی را بررسی می‌کند. در حال حاضر CORSIKA توسط گروههای زیادی استفاده می‌شود و محدوده کاربرد آن از 10^{12} eV تا 10^{20} eV وسعت دارد. در این برنامه عبور همه ذرات در داخل جو و اندرکنشهای آنها با هدف هوا در نظر گرفته می‌شود. همه ذرات ثانویه دقیقاً در امتداد مسیرشان ردیابی می‌شوند و پارامترهای مربوط به آنها در زمانی که به یک

همان طور که دیده می‌شود در هر انرژی یک H_{max} یعنی ارتفاع خاصی وجود دارد که در آن ارتفاع، N_e به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و ارتفاع این ماکزیمم با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. همچنین منحنی نشان می‌دهد که با افزایش انرژی، N_e زیاد می‌شود. منحنی توپر در روی شکل برازش نقاط را با منحنی $Ln(N_e) = a + bH + cH^{1/5}$ نشان می‌دهد که در آن N_e تعداد الکترونها در ارتفاع H و a ، b ، c پارامترهای برازش می‌باشند (محدوده این پارامترها به صورت $12 \leq a \leq 6$ ، $0.001 \leq b \leq 0.002$ و $-1/8 \times 10^{-5} \leq c \leq -1/0.1 \times 10^{-5}$ تغییر می‌کند). نکته جالب در این منحنیها برازش بسیار خوب نقاط تمام منحنیها با رابطه $Ln(N_e) = a + bH + cH^{1/5}$ است (البته ضرایب a ، b ، c برای هر منحنی متفاوت است).

۵. وابستگی H_{max} به نوع و انرژی تابش اولیه

از روی منحنیهای برازش، H_{max} یعنی ارتفاعی که بهمن در آن به ماکزیمم تعداد N_e خود می‌رسد محاسبه شده است. شکل ۵، نتایج شبیه سازی را برای H_{max} برحسب انرژی اولیه برای گاما، پروتون، هلیوم، نیتروژن، سیلیسیم و آهن نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود با افزایش انرژی H_{max} کمتر می‌شود یعنی بهمن در ارتفاع نزدیکتری به سطح دریا یا ارتفاع بیشتری از بالای جو به N_e ماکزیمم خود می‌رسد و این به خاطر آن است که ثانویه‌ها دارای انرژی بیشتری هستند و دیرتر به انرژی آستانه خود می‌رسند. اما نکته دیگری که این منحنی نشان می‌دهد آن است که اولیه‌های سنگینتر مثل آهن، به دلیل اینکه انرژی در واحد هستک (نوکلئون) کمتری دارند، در ارتفاع بالاتری از سطح دریا یعنی ارتفاع کمتری از بالای جو و به عبارتی زودتر به ماکزیمم N_e می‌رسند.

پس H_{max} به دو عامل جرم و انرژی بستگی دارد. آیا از این

۱۰۰ TeV برای تعداد میونهای رسیده به سطح آشکار سازی (در مورد شبیه سازی ما ۱۲۰۰ متر از سطح دریا یعنی ارتفاع شهر تهران) نشان می‌دهد. افت و خیز آماری هنوز شدید است اما در مقایسه با (N_e) ، منحنی نشان می‌دهد که تعداد میونها مشخصه بهتری برای تفکیک جرمی پرتوهای کیهانی است. البته هنوز افت و خیزها به اندازه‌ای است که تنها یک شبیه‌سازی با تعداد بسیار زیاد می‌تواند از روی تعداد میونها با احتمال معین (نه صد درصد) نوع یک تابش اولیه را تعیین کند.

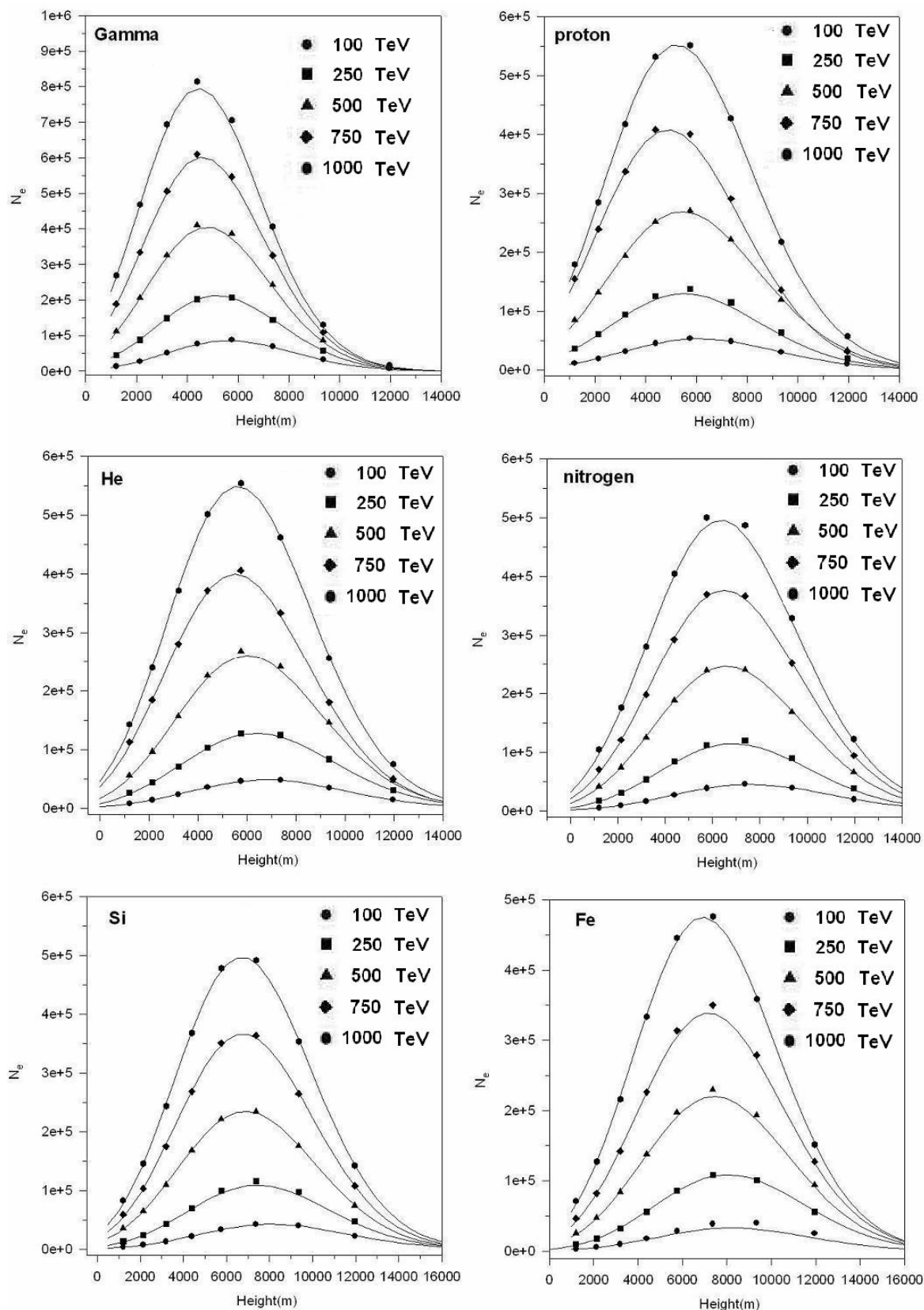
باید تأکید کرد که طبیعت آماری شبیه سازی فقط ناشی از طبیعت مونت کارلویی شبیه سازی نیست بلکه در عمل به دلیل اینکه ارتفاع اولین نقطه برهم‌کنش با جو زمین حتی در مورد اولیه‌های با نوع و انرژی یکسان متفاوت است و نیز احتمالات متفاوتی در واپاشیهای ثانویه‌ها به ثانویه‌های کم انرژیتر وجود دارد، این افت و خیز ذاتی و اجتناب‌ناپذیر است و در نتیجه همان طور که اشاره شد در باز سازی یک بهمن آشکارسازی شده توسط آرایه‌های زمینی از روی نتایج شبیه‌سازی تنها با احتمال معین می‌توان به تابش اولیه، جرم و انرژی معینی نسبت داد.

۴. رابطه N_e با فاصله بهمن از سطح آشکارسازی

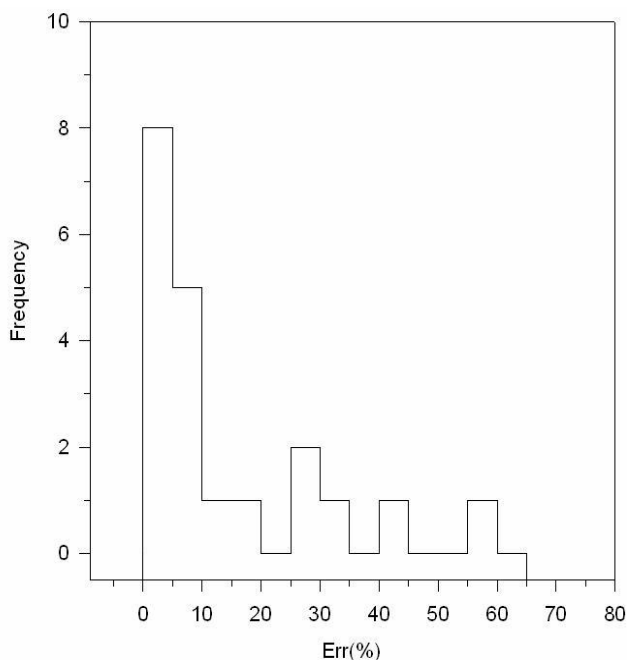
همان طور که انتظار داریم تعداد ذرات ثانویه در ارتفاعهای مختلف متفاوت است. ذرات ثانویه ابتدا کمتر و پر انرژیتر هستند، در ارتفاع خاصی به ماکزیمم تعداد خود می‌رسند و بعد از آن چون بعضی از آنها انرژی زیادی از دست می‌دهند و انرژی آنها از آستانه آشکارسازیهای زمینی کمتر می‌شود یا حتی بعضی از آنها کاملاً از بین می‌روند آشکارسازی نمی‌شوند، در نتیجه تعداد ثانویه‌ها با افزایش ارتفاع کم و کمتر می‌شوند. ما در شبیه سازی خود به تعداد الکترونها در ارتفاعهای مختلف توجه کرده‌ایم. شکل ۴ منحنی متوسط تعداد الکترونها بر حسب ارتفاع از سطح دریا را برای تابشهای گاما، پروتون، هلیوم، نیتروژن، سیلیسیم و آهن در انرژیهای مختلف نشان می‌دهد. (هر منحنی مربوط به ۵۰ بهمن گسترده هوایی است و نقاط روی منحنیها متوسط این ۵۰ بهمن در ارتفاعهای مختلف هستند).

۱. در بعضی از متون به جای H یعنی ارتفاع از سطح دریا بر حسب km از X یعنی ارتفاع از بالای جو بر حسب $\text{g/cm}^2 (\rho \times H)$ استفاده می‌شود. رابطه این دو به صورت زیر است [۱۴]:

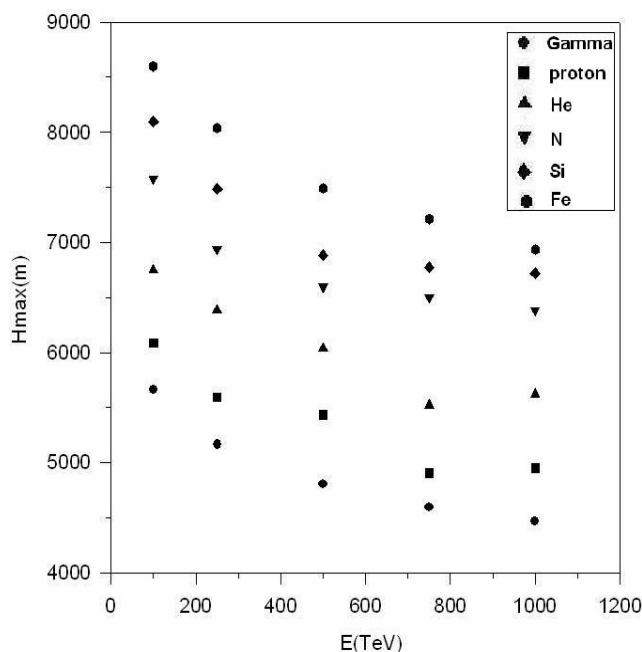
$$\begin{aligned} H(\text{km}) &= 47/0.5 + \text{Ln}(X) + 0.229 \text{Ln}^2(0.1/X), & X < 25 \text{g/cm}^2 \\ H(\text{km}) &= 45/5 - 6/34 \text{Ln}(X) & 25 < X < 230 \\ H(\text{km}) &= 44/34 - 11/861 (X)^{0.9} & X < 230 \text{g/cm}^2 \end{aligned}$$



شکل ۴. منحنی متوسط تعداد الکترونها بر حسب ارتفاع از سطح دریا برای تابشهای اولیه گاما، پروتون، هلیوم، نیتروژن، سیلیسیوم و آهن در انرژیهای مختلف به همراه منحنیهای برازش یافته مربوط به هر کدام.



شکل ۶. هیستوگرام در صد خطای تخمین جرم دسته اول با استفاده از پارامترهای همین دسته.



شکل ۵. منحنی H_{max} برحسب انرژی برای تابشهای اولیه مختلف.

وابستگی می توان برای تعیین جرم و انرژی استفاده کرد؟

طریق A به عنوان تخمینی از جرم محاسبه شد. شکل ۶ هیستوگرام در صد خطای تخمین جرم دسته اول با استفاده از پارامترهای همین دسته است.

دسته دوم داده‌ها شامل اولیه‌های هلیوم و نیتروژن هستند که در دسته اول موجود نیستند. همچنین داده‌های جدیدی از گاما، پروتون، سیلیسیوم و آهن را در بر دارند. ما پارامترهای حاصل از دسته اول را در مورد این گروه داده‌ها به کار بردیم. شکل ۷ هیستوگرام در صد خطای دسته دوم داده‌ها با استفاده از پارامترهای دسته اول را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود توافق بسیار خوبی بین جرم تخمین زده شده و جرم واقعی وجود دارد.

و بالاخره کل داده‌ها را یک بار با پارامترهای حاصل از برازش دسته اول (شکل ۸) و بار دیگر با استفاده از پارامترهای حاصل از برازش خودشان (شکل ۹) مورد آزمون قرار دادیم که همان طور که دیده می‌شود هنوز توافق بسیار خوبی بین جرم تخمینی و جرم واقعی وجود دارد (قله درصد خطای جرم تخمینی برای داده‌های مختلف بین صفر تا ۵٪ است).

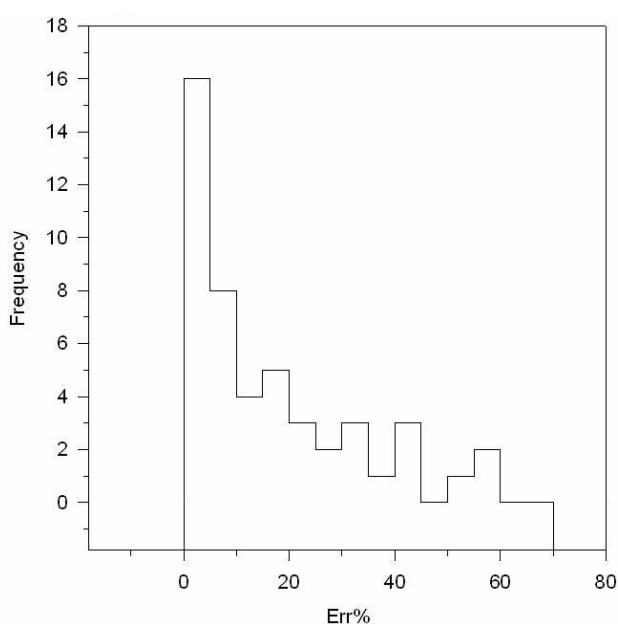
۶. برازش داده‌ها و رابطه H_{max} با جرم و انرژی تابش اولیه

برای به دست آوردن رابطه‌ای بین E ، H_{max} و A (عدد جرمی) داده‌های موجود از شبیه سازی خود را به طور اختیاری به دو دسته تقسیم کردیم. در دسته اول گاما، پروتون، سیلیسیوم و آهن در انرژیهای مختلف (۳۰۰ بهمن در هر اولیه برای انرژی 100 TeV و ۵۰ بهمن در هر اولیه برای ۴ محدوده دیگر انرژی) قرار می‌گیرد. برای این دسته یک برازش ۳ بعدی انجام شد و برازش بسیار خوبی ($r^2 = \text{goodness of fit} = 0.98$) با منحنی $\ln(A) = a + b(\ln(E))^2 + c/H_{max}$ حاصل شد. پارامترهای a ، b ، c حاصل از این برازش در جدول ۱ مشاهده می‌شوند.

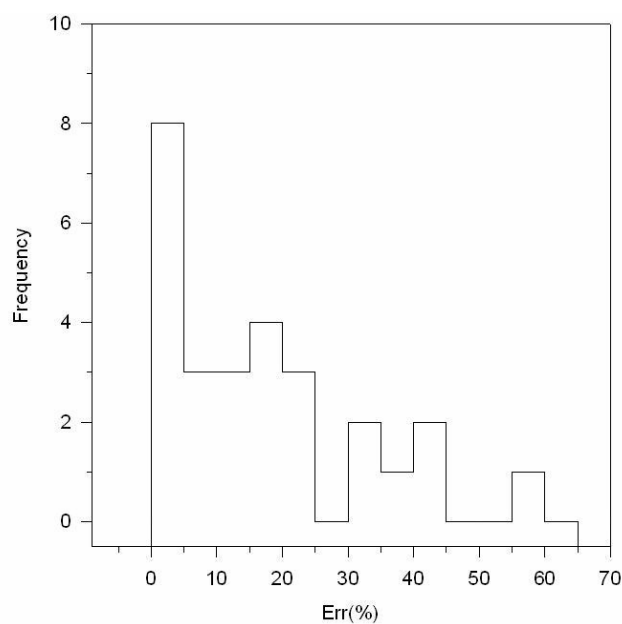
در مرحله بعد پارامترهای حاصل از دسته اول برای تخمین جرم (در انرژی معلوم) همین دسته به کار رفت، به این صورت که پارامترهای E و H_{max} مربوط به هر داده در تابع $\ln(A) = a + b(\ln(E))^2 + c/H_{max}$ قرار داده شد و از آن

جدول ۱. پارامترهای برازش منحنی $\text{Ln}(A) = a + b(\text{Ln}(E))^2 + C/H_{\text{max}}$

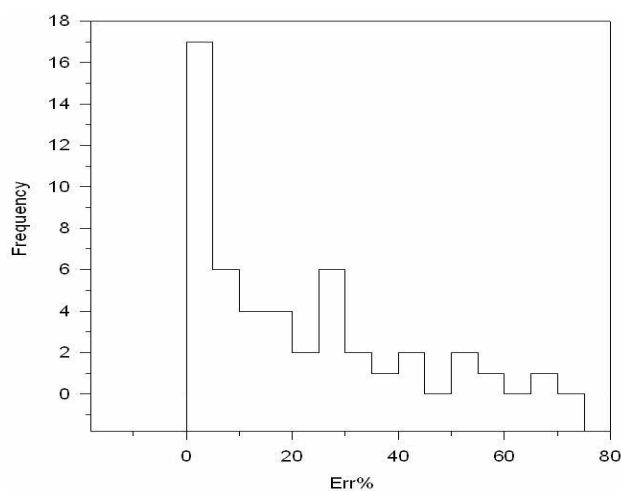
پارامترهای برازش					داده‌ها
(r ^۲)	c	b	a	تعداد	
۰/۹۸۶	-۷۵۳۶۷/۰۰۶۶	۰/۰۷۸۱۷	۱۱/۰۷۵۴	۲۰	دسته اول (گاما، پروتون، سیلیسیوم و آهن)
۰/۹۷۸	-۷۴۷۴۹/۲۲۹۱	۰/۰۷۵۱۱	۱۱/۱۰۱۳	۵۰	دسته دوم کل داده‌ها (هلیوم، نیتروژن، گاما و پروتون سیلیسیوم، آهن)



شکل ۸. هیستوگرام درصد خطای تخمین جرم کل داده‌ها با استفاده از پارامترهای دسته اول.



شکل ۷. هیستوگرام درصد خطای تخمین جرم دسته دوم با استفاده از پارامترهای دسته اول.



شکل ۹. هیستوگرام درصد خطای تخمین جرم کل داده‌ها با استفاده از پارامترهای کل داده‌ها.

۷. نتیجه‌گیری و محدودیتهای روش حاضر

اگر چه در عمل H_{\max} یا X_{\max} (ارتفاع بیشینه از بالای جو بر حسب gr/cm^2) توسط آشکارسازهایی که نور چرنکوف و نور فلورسانس مربوط به ذرات ثانویه را آشکارسازی می‌کنند قابل اندازه‌گیری است [۱۵ و ۱۶] و در کار حاضر با دقت بسیار خوبی رابطه‌ای بین H_{\max} ، E و A به دست آمده است، اما هنوز این رابطه دو مجهول E و A را در بر دارد که محاسبه هر کدام با استفاده از H_{\max} منوط به دانستن دیگری است. در ادامه کار حاضر در نظر است با یافتن رابطه دیگری بین انرژی و جرم و یک کمیت قابل مشاهده دیگر (مثلاً تعداد میونها) بتوان مسئله

تعیین جرم و انرژی را بطور دقیق حل کرد.

نکته دیگری که باید به آن توجه کرد این است که هر نقطه در هیستوگرامهای نمایش داده شده متوسط تعداد زیادی بهمن است و اگر این روش در مورد تک بهمنها به کار رود مسلماً خطای بیشتری وارد خواهد شد. (البته این محدودیت در مورد تمام روشهایی که از شبیه سازی استفاده می‌کنند یعنی تمام روشهای غیر مستقیم اجتناب ناپذیر است) [۱۷]. در نتیجه در به کار بردن برازش پیشنهادی ما، افت و خیز آماری بهمنها را همواره باید در نظر گرفت.

مراجع

1. M Aglietta et al., *Nuclear Phys.* **13** (Proce. Suppl 2000), 8, 318.
2. A Castellina, *astro-ph/0011221* (2000).
3. A Haungs, et al., *Astropart. Phys.* **12** (1999) 145
4. G Rastegarzadeh and J Samimi, *J. Phys. G: Nucl. Part Phys.* **27**, (2001) 1.
5. http://www-ik.fzk.de/KASCADE/KASCADE_publications_g.html.
6. Pierre Auger Collaboration, J Blumer et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **29** (2003) 86.
7. <http://sina.sharif.edu/~observatory/>.
8. M Bahmanabadi, et al., *Experimental Astronomy*, **8** (1998) 211-229.
9. M Bahmanabadi, et al., *Experimental Astronomy*, **13** (2002) 39-57.
10. M Bahmanabadi, et al., *Experimental Astronomy*, **15** (2003) 13-27.
11. M Khakian Ghomi, et al., *A&A*, **434** (2005) 459-467.
12. M Bahmanabadi, et al., *Astropart. Phys.* **24** (2005) 183-190.
13. D Heck et al CORSIKA (cosmic ray simulation for KASCADE) FZKA 6019 (Forschungszentrum Karlsruhe 1998).
14. T K Gaisser *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press (1990).
15. R M Baltrusaitis et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **240** (1985) 410.
16. J Alvarez-Muñiz et al., *Phys. Rev. D* **69** (2004) 103003.
17. Jeferson A Ortiz,* Gustavo Medina-Tanco, and V de Souza, *Astropart. Phys.* **23** (2005) 463-476.