

CORSIKA

CORSIKA :

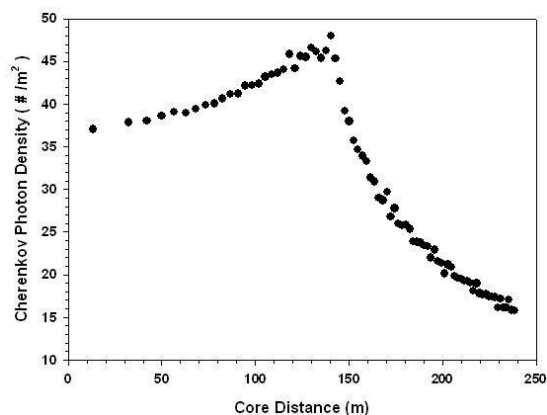
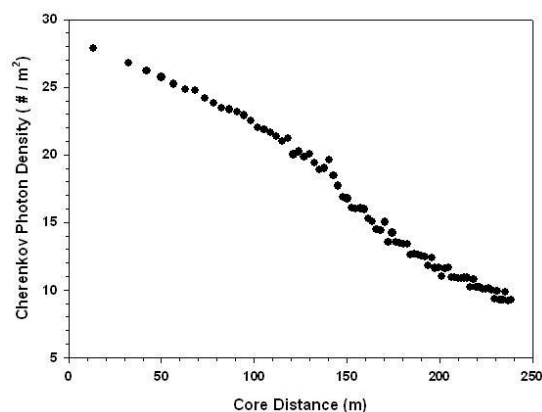
به خصوص در انرژی‌های پایین (حدود TeV و GeV) که تعداد ذرات ثانویه رسیده به زمین بسیار کم است، بسیار مفید می‌باشد. زیرا نور چرنکوف حاصل از این ذرات ثانویه به زمین رسیده و توسط تلسکوپ‌های چرنکوف به راحتی آشکارسازی می‌شوند [۱].

یکی از پارامترهایی که می‌توان توسط این تلسکوپ‌ها اندازه‌گیری کرد، توزیع عرضی نور چرنکوف رسیده به سطح مشاهده می‌باشد. بررسی توزیع‌های عرضی نور چرنکوف حاصل از بهمن‌های هادرونی و الکترومغناطیسی وجود یک قله با برآمدگی (hump) در توزیع عرضی نور چرنکوف حاصل از بهمن‌های اولیه گاما را نشان می‌دهد که در توزیع عرضی نور چرنکوف ناشی از اولیه‌های هادرونی وجود ندارد.

در مقاله حاضر با شبیه‌سازی ۱۶۰۰۰ پرتو گاما به بررسی علت وجود این قله و مشخصه‌های آن و به خصوص ارتباط آن با انرژی گامای اولیه و نیز ارتفاع رصدخانه پرداخته‌ایم.

تابش کیهانی شامل پرتوگاما و هادرون‌ها می‌باشد. شار این پرتوها با افزایش انرژی اولیه، کم می‌شود. در نتیجه آشکارسازی پرتوهای کیهانی پرنانرژی به طور مستقیم و با استفاده از بالن و ماهواره قابل انجام نیست و باید با استفاده از آشکارسازهایی در سطح زمین و ثبت ذرات ثانویه یا فوتون‌های چرنکوف بهمن‌های گسترده هوایی ناشی از اندرکنش پرتوهای کیهانی با جو آشکارسازی شوند. در این میان بهمن‌های ناشی از پرتوهای کیهانی هادرونی به عنوان زمینه‌ای در آشکارسازی پرتوهای گاما محسوب می‌شوند. در نتیجه انجام نجوم گاما و یافتن چشمه‌های گاما مستلزم حذف زمینه هادرونی از سیگنال گاما می‌باشد.

یکی از تکنیک‌های آشکارسازی پرتوهای کیهانی تکنیک چرنکوف می‌باشد. در این تکنیک با استفاده از نور چرنکوف حاصل از ذرات ثانویه پرنانرژی مشخصات پرتو کیهانی اولیه از جمله نوع، انرژی و جهت به دست می‌آید. این تکنیک



شکل ۱. توزیع عرضی فوتون چرنکوف بهمن گامای اولیه (سمت راست) و پروتون اولیه (سمت چپ) با انرژی 500 GeV در ارتفاع 1075 متری از سطح دریا.

مؤلفه را به دست می‌دهد. به طور خاص مطالعه توزیع طولی الکترون‌ها و فوتون‌های چرنکوف حاصل از آنها پارامتر مهمی در تحلیل بهمن‌های هوایی می‌باشد. علاوه بر این، مطالعه این توزیع در عمق بیشینه (X_{\max}) به دلیل نوسانات کمتر در این عمق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد [۴].

در توزیع عرضی، تعداد فوتون‌ها یا ذرات بر حسب فاصله از محور در یک عمق خاص (سطح مشاهده) بررسی می‌شود. با استفاده از این توزیع می‌توان انرژی و نوع پرتو اولیه را تخمین زد [۵ و ۶ و ۷]. علاوه بر این نتایج شبیه‌سازی و نیز داده‌های تجربی نشان می‌دهند که بین توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف ناشی از بهمن‌های هادرونی و الکترومغناطیسی تفاوت‌های عمده‌ای وجود دارد که به تفکیک این دو از هم منجر می‌شود.

شکل ۱، توزیع عرضی فوتون چرنکوف ناشی از بهمن گاما و پروتون اولیه، با انرژی اولیه 500 GeV در ارتفاع 1075 متری از سطح دریا (ارتفاع رصدخانه PACHMARHI در هندوستان) را نشان می‌دهد. هر نقطه روی منحنی‌ها متوسط تعداد 500 بهمن شبیه‌سازی شده می‌باشد.

ملاحظه می‌شود که در توزیع عرضی فوتون چرنکوف ناشی از بهمن گامای اولیه، قله‌ای پدید آمده است که در مورد توزیع عرضی فوتون چرنکوف ناشی از بهمن پروتون اولیه این قله مشاهده نمی‌شود. به اصطلاح به این قله، برآمدگی گفته

برای به دست آوردن توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف ناشی از اولیه‌های گاما شبیه‌سازی با استفاده از کد CORSIKA [۲] نسخه ۶/۷ با مدل اندرکنش هادرونی انرژی بالای QGSJET01 و مدل اندرکنش هادرونی انرژی‌های پایین GHEISHA در ارتفاع مختلف رصدخانه‌های معروف دنیا یعنی CANGAROO (160 متر از سطح دریا)، PACHMARHI (1075 متر از سطح دریا)، ALBORZ (1200 متر از سطح دریا)، CAT (1650 متر از سطح دریا) و CHACALTAYA (5220 متر از سطح دریا) در انرژی دریا $50-1400 \text{ GeV}$ انجام شده است. برای هر رصدخانه میدان مغناطیسی مربوط به محل رصدخانه با استفاده از برنامه Geomag [۳] استخراج و در برنامه وارد شده است. برای انتخاب آرایه فرضی چرنکوف یک آرایه بسیار بزرگ به ابعاد $300 \times 300 \text{ m}^2$ در نظر گرفته شد تا تمام فوتون‌های چرنکوف رسیده به سطح زمین شمارش شود. برای هر ارتفاع و انرژی به خصوص، تعداد 300 پرتو اولیه گاما شبیه‌سازی شد. به این ترتیب تعداد بیش از 16000 پرتو گاما شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی‌ها محدوده طول موج $300-550 \text{ nm}$ (طیف مرئی) را برای تولید فوتون‌های چرنکوف در نظر گرفته‌ایم.

بررسی تعداد و چگونگی گسترش مولفه‌های مختلف یک بهمن گسترده هوایی به عنوان تابعی از عمق جو، توزیع طولی آن

$$\theta_s \sim e^x \quad (2)$$

از طرف دیگر n ضریب شکست نیز به x وابسته است، طبق رابطه زیر [۸] داریم:

$$n = 1 + \eta, \quad (3)$$

$$\rightarrow \eta = 0.0002926(x/1030) \times (273/2 / (204 + 0.091x)),$$

و با استفاده از رابطه (۳) و $\theta_c = \cos^{-1}(1/\beta n)$ و به کاربردن تقریب $\theta \sim \tan \theta$ داریم:

$$\theta_c \sim \sqrt{(2\eta)}, \quad (4)$$

که اگر رابطه (۳) را در معادله (۴) قرار دهیم می‌توانیم ارتباط زاویه چرنکوف را با عمق جو بیابیم:

$$\theta_c \sim \sqrt{x}. \quad (5)$$

از روابط (۲) و (۵) می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش عمق جو و نفوذ در جو زاویه پراکندگی سریع‌تر از زاویه چرنکوف افزایش می‌یابد. البته در یک انرژی خاص (انرژی آستانه چرنکوف) و در یک عمق خاص، زاویه پراکندگی کمتر از زاویه چرنکوف می‌شود. به شرط کوچک بودن زاویه پراکندگی، فوتون‌های چرنکوفی که در ارتفاع h از سطح مشاهده تولید شوند، پس از طی جو در فاصله $h\theta_c$ به سطح مشاهده می‌رسند. در هندسه شکل ۲ این مسئله به خوبی نشان داده شده است.

حال به این مسئله می‌پردازیم تحت چه شرایطی زاویه پراکندگی کوچک‌تر از زاویه چرنکوف می‌شود.

با استفاده از روابط (۱) و (۵) شرط آستانه $\theta_s = \theta_c$ منجر به رابطه زیر می‌شود:

$$E_t \sqrt{x} = C, \quad (6)$$

که E_t انرژی موجود در الکترون در عمق x پس از تولید از طریق فرآیند تولید زوج می‌باشد و ثابت C برابر $(13/9 \text{ GeV} (\text{g/cm}^2))^{1/2}$ می‌باشد. رابطه فوق معرف آن

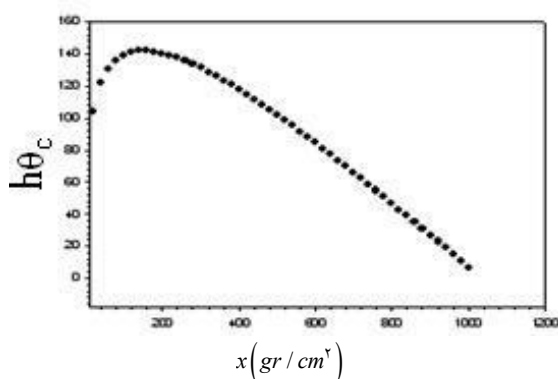
الکترون‌هایی است که انرژی E_t دارند و دارای شرط $\theta_s = \theta_c$ می‌باشند. این انرژی، انرژی آستانه‌ای می‌باشد که برای مقادیر بیشتر از این مقدار، $\theta_s < \theta_c$ می‌شود. یعنی اگر انرژی الکترون‌ها بیشتر از E_t باشد، زاویه پراکندگی θ_s کاهش می‌یابد؛ چون θ_s به انرژی و عمق وابسته است ولی θ_c تقریباً فقط به عمق وابسته

می‌شود که مشخصه بهمن گاما می‌باشد و این مشخصه یکی از راه‌های تفکیک بهمن گاما از بهمن‌های هادرونی می‌باشد. اگرچه بهمن پروتون دارای چنین قله‌ای نیست، اما در زیر بهمن‌های الکترومغناطیس آن، این قله وجود دارد. در واقع وقتی جمع زیربهمن‌های الکترومغناطیسی و هادرونی آن را در نظر می‌گیریم، این قله دیگر وجود ندارد. البته زیربهمن‌های الکترومغناطیسی باید برای تولید برآمدگی دارای انرژی کافی برای تولید فوتون چرنکوف باشند [۸]. اگرچه تفاوت‌های دیگری نیز بین توزیع عرضی فوتون چرنکوف بهمن گاما و پروتون اولیه وجود دارد ولی یکی از مهم‌ترین آنها، وجود برآمدگی در بهمن گامای اولیه است. به علت تعداد زیاد الکترون و پوزیترون در بهمن گاما، چگالی فوتون‌های چرنکوف بیشتر از بهمن پروتون اولیه است و همچنین نوسانات کمتری در توزیع گامای اولیه مخصوصاً در نقطه برآمدگی وجود دارد [۹]. در بخش بعدی به چگونگی پدیدار شدن برآمدگی در توزیع عرضی فوتون چرنکوف در بهمن گامای اولیه و علت فیزیکی آن خواهیم پرداخت.

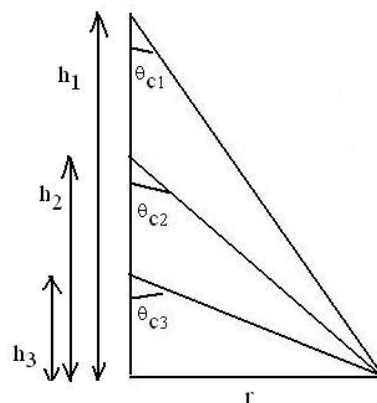
الکترون‌های پراثری پس از آنکه در بهمن الکترومغناطیس تولید شدند و انرژی آستانه برای تولید فوتون چرنکوف را داشتند، می‌توانند فوتون چرنکوف تابش کنند. آنها، هنگام عبور از جو در حین پایین آمدن از آن، طی فرآیندهای مختلفی چون تابش ترمزی (برمشتراونگ) یا فرآیند یونیزاسیون و یا پراکندگی کولمب و... انرژی خود را پیوسته از دست می‌دهند. در نتیجه زاویه پراکندگی آنها با کاهش E افزایش می‌یابد (الکترون، فوتون چرنکوف تابش می‌کند) نیز افزایش می‌یابد. زاویه پراکندگی از طریق رابطه زیر به عمق t بستگی دارد [۱۰]:

$$\theta_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_s}{E_t} \left[\frac{1}{(e^{2t} - 1)^2} / e^t \right], \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $t = x/\lambda$ که x عمق الکترون بر حسب g/cm^2 و λ طول تابش در هوا ($37/2 \text{ g/cm}^2$) و $E_s = 0.021 \text{ GeV}$ می‌باشد. بنابراین به طور تقریبی داریم:



شکل ۳. منحنی $h\theta_c$ بر حسب عمق x .



شکل ۲. شکل شماتیک از محل تشکیل hump.

الکترون‌های پرنرژی با تعداد زیاد نقش بیشتری در تولید فوتون‌های چرنکوف داشته باشند، برآمدگی تشکیل می‌شود.

نشان می‌دهیم که این مکان ($r = h\theta_c$) در محدوده عمق جو

$40-400 \text{ g/cm}^2$ مستقل از عمق جو می‌باشد:

برای رابطه بین $h(m)$ و عمق $x \text{ (gr/cm}^2\text{)}$ در اتمسفر داریم:

$$h = (6740 + 2/5x) \ln\left(\frac{1030}{x}\right) \quad [10].$$

روابط (۳) و (۴) می‌توان تغییرات $h\theta_c$ را بر حسب عمق جو به دست آورد:

$$h\theta_c = h\sqrt{2\eta} = (6740 + 2/5x) \ln\left(\frac{1030}{x}\right) \quad (8)$$

$$\times \left[0.0002926 \left(\frac{x}{1030} \right) \left(\frac{2732}{204 + 0.091x} \right) \right].$$

طبق رابطه (۸) نمودار $h\theta_c$ را بر حسب x به دست آورده‌ایم (شکل ۳).

همان طور که در شکل ۳ دیده می‌شود در محدوده عمق جو $40-400 \text{ g/cm}^2$ (یا ارتفاع $7-20 \text{ km}$)، $h\theta_c$ فقط بین $110-140 \text{ m}$ تغییر می‌کند. در نتیجه تمام فوتون‌هایی که در محدوده عمق $40-400 \text{ g/cm}^2$ تولید می‌شوند و دارای شرط $\theta_s \leq \theta_c$ هستند در یک نقطه $r = h\theta_c$ به زمین می‌رسند و اگرچه برای اولیه‌هایی با انرژی 100 GeV سهم الکترون‌های $1/1 \text{ GeV}$ در عمق 150 g/cm^2 در ایجاد برآمدگی بیشتر است، اما تمام الکترون‌های در محدوده $40-400 \text{ g/cm}^2$ (به شرط ارضای

است. بنابراین شرط زاویه‌ای $\theta_s \leq \theta_c$ برقرار می‌شود. اگر در این انرژی آستانه تعداد الکترون‌ها زیاد باشد، برآمدگی به وجود می‌آید. عمق x که در آن الکترون‌هایی با انرژی E_t دارای بیشترین

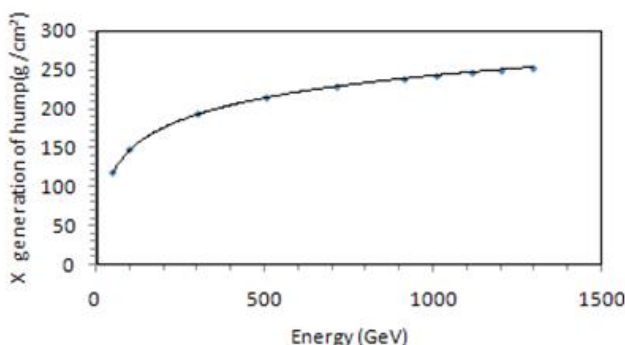
تعداد هستند، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$x = \lambda [\ln(E_\gamma / E_t) - 0.5], \quad (7)$$

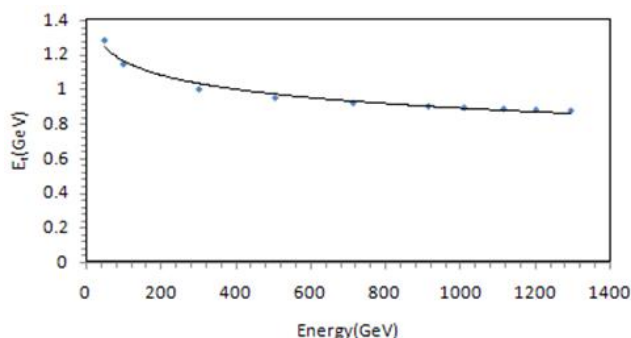
که λ طول تابش در هوا ($37/2 \text{ g/cm}^2$) می‌باشد و E_γ انرژی گامای اولیه می‌باشد.

با جایگذاری رابطه (۶) در معادله (۷) می‌توان بیشینه عمقی را یافت که در آن الکترون‌ها با انرژی E_t و شرط زاویه‌ای $\theta_s = \theta_c$ فوتون چرنکوف تولید می‌کنند که اگر تعداد الکترون‌های پرنرژی بیشتر باشد و سهم بیشتر در تولید فوتون چرنکوف داشته باشند، شرط زاویه‌ای $\theta_s \leq \theta_c$ را ارضا کرده، در این انرژی و عمق خاص، برآمدگی را می‌سازند. برای مثال، برای انرژی اولیه پرتوگاما $E_\gamma = 100 \text{ GeV}$ ، مقدار E_t برابر $1/1 \text{ GeV}$ است و عمق x مقدار 150 g/cm^2 را دارد [۱۰].

بدین معنی که الکترون‌های بهمن گامای 100 GeV که انرژی بیشتر از $1/1 \text{ GeV}$ دارند، در عمق 150 g/cm^2 ، با شرط $\theta_s \leq \theta_c$ ، بیشینه فوتون‌هایی را تولید می‌کنند که برآمدگی را می‌سازند که همه آنها (فوتون‌ها) در فاصله ثابت $h\theta_c$ به زمین می‌رسند. یعنی در نامعادله $E_t \sqrt{x} \geq C$ هر دو حالت تساوی و نامساوی برقرار است. بنابراین وجود هر دو شرط، الکترون‌هایی با انرژی بیش از E_t و و شرط زاویه‌ای $\theta_s \leq \theta_c$ برای تشکیل برآمدگی ضروری است. پس اگر علاوه بر کوچک بودن زاویه پراکندگی،



شکل ۵. نمودار عمق مسئول hump (x) برحسب انرژی گاما در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی شده (۵۰-۱۴۰۰ GeV).



شکل ۴. نمودار انرژی آستانه E_t برحسب انرژی گامای اولیه در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی شده (۵۰-۱۴۰۰ GeV).

رصدخانه‌های معروف دنیا و در انرژی‌های مختلف گامای اولیه نشان می‌دهند (ارتفاع هر رصدخانه در زیرنویس شکل مشخص می‌باشد).

همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مکان برآمدگی در هر رصدخانه مستقل از انرژی گامای اولیه است. اما با افزایش ارتفاع رصدخانه مکان برآمدگی به محور بهمن نزدیک‌تر می‌شود. این مطلب در شکل ۷ که نمودار مکان برآمدگی بر حسب ارتفاع سطح مشاهده را نشان می‌دهد به خوبی دیده می‌شود. نقاط در این شکل نتایج شبیه‌سازی هستند و با تابع $y = ax + \gamma$ برازش شده‌اند و پارامترهای برازش $a = -0.012$ و $\gamma = 140/27$ می‌باشد.

با توجه به شکل ۲ این کاملاً یک اثر هندسی است، زیرا در آن شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع رصدخانه و نزدیک شدن عمق مسئول برآمدگی به سطح مشاهده، کم می‌شود.

اما در مورد تأثیر انرژی بر شدت برآمدگی در یک ارتفاع مشخص می‌توان دید که در رصدخانه‌های CANGAROO [۱۱] و [۱۲] TUNKA (شکل ۶(a) و ۶(b)) با افزایش انرژی شدت برآمدگی بیشتر می‌شود. اما در شکل ۶(c) مربوط به رصدخانه PACHMARHI [۱۳] با افزایش انرژی اولیه شدت برآمدگی تا انرژی ۱۰۰۰ GeV افزایش یافته ولی از آنجا به بعد شدت تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش ارتفاع رصدخانه در شکل ۶(d) مربوط به رصدخانه ALBORZ در ارتفاع ۱۲۰۰ متری از سطح دریا [۱۴ و ۱۵] مشاهده می‌شود، در این

رابطه $(\theta_s \leq \theta_c)$ می‌توانند برآمدگی را تقویت کنند. در شکل ۴ نمودار انرژی آستانه E_t برحسب انرژی گامای اولیه، در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش انرژی گامای اولیه این انرژی آستانه کمتر می‌شود. دلیل این امر آن است که با افزایش انرژی اولیه، انرژی الکترون‌های ثانویه، نیز زیاد می‌شود. در نتیجه θ_s کم می‌شود و شرط آستانه با E_t ‌های کمتری ارضا می‌شود.

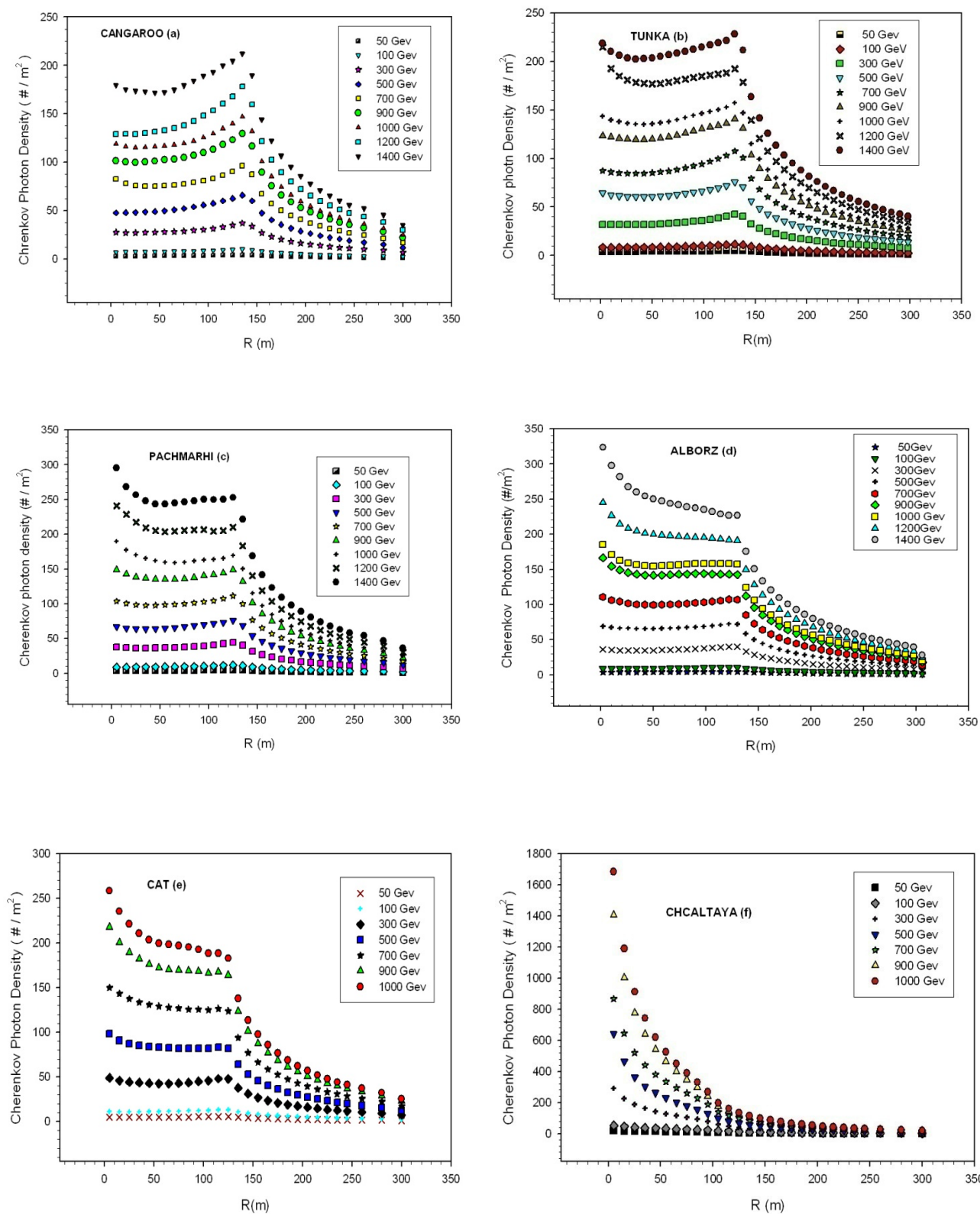
برای نقاط شکل ۴ تابع برازش شده، $y = a + b / \ln x$ می‌باشد و مقادیر پارامترهای آن را به صورت: $a = 0.386$, $b = 3/497$ به دست آورده‌ایم.

در شکل ۵ نمودار عمق مسئول برآمدگی (x) برحسب انرژی گامای اولیه در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی شده (۵۰-۱۴۰۰ GeV) رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی اولیه عمق مسئول برآمدگی زیاد می‌شود که با توجه به شرط $\sqrt{x} = C$ و E_t کم شدن E_t با افزایش انرژی، این افزایش واضح است.

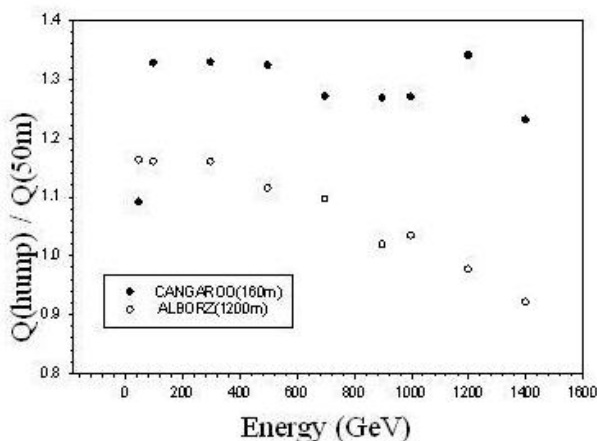
تابع برازش شده $y = a + b \ln x$ می‌باشد و مقادیر پارامترهای مربوطه را نیز به دست آورده‌ایم: $a = -43/516$ و

$$b = 41/436$$

شکل‌های ۶(a) تا ۶(f) نتایج شبیه‌سازی را برای توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف در ۶ ارتفاع مربوط به



شکل ۶. توزیع عرضی فوتون چرنکوف بهمن گامای اولیه برای انرژی اولیه ۵۰-۱۴۰۰ GeV در ارتفاع رصدخانه‌های مختلف (a) ۱۶۰m و (b) ۶۷۵m و (c) ۱۰۷۵m و (d) ۱۲۰۰m و (e) ۱۶۵۰m و (f) ۵۲۳۰m.

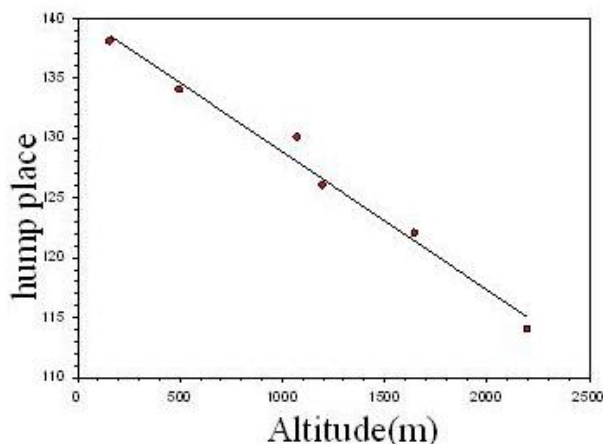


شکل ۸. نمودار شدت برآمدگی برحسب انرژی در دو رصدخانه مختلف.

برآمدگی با انرژی برای دو ارتفاع مختلف، به دست آمده است، به خوبی مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل دیده می‌شود، در رصدخانه ALBORZ برخلاف CANGAROO با افزایش انرژی، شدت برآمدگی کم می‌شود. شکل ۶(e) همان توزیع را برای رصدخانه [۱۶] CAT در ارتفاع ۱۶۵۰ متری را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود برآمدگی فقط در انرژی‌های کمتر از ۵۰۰ GeV وجود دارد و بعد از آن از شدت آن کاسته می‌شود.

و بالاخره در شکل ۶(f) توزیع عرضی نور چرنکوف بهمن گامای اولیه با انرژی اولیه ۱۴۰۰-۵۰ GeV در ارتفاع ۵۲۳۰ متری از سطح دریا یا در عمق جو 536 g/cm^2 (ارتفاع رصدخانه CHACALTAYA [۱۷])، شبیه‌سازی شده است. در این ارتفاع که بسیار زیاد می‌باشد، دیگر اثری از برآمدگی نیست. در این حالت، آن قدر ارتفاع زیاد است که به بیشینه بهمن بسیار نزدیک می‌باشد و در نتیجه، چگالی ذرات مولد چرنکوف و سپس فوتون‌های چرنکوف، بیشتر می‌شود. بنابراین برآمدگی در این گستره وسیع ذرات، ناپدید می‌شود.

وجود برآمدگی در توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف مربوط به پرتو اولیه گاما مشخصه مهمی است که قابلیت تفکیک پرتوهای اولیه گاما از هادرون‌ها را ممکن می‌سازد.



شکل ۷. نمودار مکان برآمدگی بر حسب ارتفاع سطح مشاهده نقاط نتایج شبیه‌سازی هستند و خط تابع برازش شده می‌باشد.

ارتفاع روند افزایش شدت برآمدگی با انرژی اولیه تا انرژی ۷۰۰ GeV همچنان برقرار می‌باشد ولی پس از آن در انرژی‌های بیشتر برآمدگی از شکل قله تبدیل به شکست می‌شود و شدت آن بسیار کاسته می‌شود. این بدان علت می‌باشد که در این ارتفاع (که کمی از ارتفاع‌های قبلی بیشتر است و به بیشینه بهمن نزدیک‌تر می‌باشد)، فوتون‌های چرنکوف تا انرژی خاصی مانند قبل می‌باشند ولی در انرژی‌های بیشتر، چون از بیشینه بهمن تا سطح مشاهده، فاصله کمتری طی می‌کنند؛ انرژی خود را کمتر از دست می‌دهند. بنابراین کل فوتون‌های چرنکوف در همه فواصل (نه فقط در برآمدگی) دارای انرژی زیاد بوده (و نیز زاویه پراکندگی کمتر و زاویه چرنکوف بزرگتری دارند، یعنی هر دو شرط تولید برآمدگی را دارا می‌باشند) و این تعداد زیاد، نقش فوتون‌های پرانرژی مولد برآمدگی را می‌کاهد و برآمدگی تحت تأثیر فوتون‌های دیگر، از بین می‌رود.

اگر شدت برآمدگی، P را به صورت نسبت چگالی فوتون‌های چرنکوف در محل برآمدگی به چگالی فوتون‌ها در فاصله ۵۰ متری از محور بهمن تعریف کنیم، $P = \frac{Q_{\text{hump}}}{Q_{50}}$ ، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در ارتفاع‌های کم با افزایش انرژی، شدت برآمدگی زیاد می‌شود اما در ارتفاع‌های زیاد به دلایلی که قبلاً اشاره شد، با افزایش انرژی، شدت برآمدگی کم می‌شود. این مطلب در شکل ۸ که در آن تغییرات شدت

رصدخانه‌های مرتفع در انرژی‌های زیاد برآمدگی اصلاً مشاهده نمی‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این تکنیک در رصدخانه‌های مرتفع فقط در انرژی‌های کم ممکن است.

محل برآمدگی کاملاً مستقل از انرژی پرتو اولیه گاما می‌باشد ولی با افزایش ارتفاع رصدخانه به محور بهمن نزدیک می‌شود. شدت برآمدگی نیز در رصدخانه‌های کم ارتفاع با افزایش انرژی زیاد می‌شود ولی در رصدخانه‌های مرتفع با افزایش انرژی شدت برآمدگی کم می‌شود تا حدی که در

7. G Rastegaarzadeh, J Samimi, *JPhG*. **27** (2001) 2065R.
8. J R Patterson, A Hillas., *J. Phys. G: Nucl Phys* **9** (1983) 1433.
9. C E Portocarrero, F Arqueros, *J. Phys. G: Nucl Part. Phys* **24** (1998) 235.
10. M V Rao. S Sinha, *J. Phys. G: Nucl Phys* **14** (1988) 811-827.
11. M Ohishi et al., *Aph*, **30**, 2 (2008) 47-53.
12. D V Chernov et al., *ICRC*. **2** (2001) 585C.
13. P Majumdar et al., *Aph*, **18**, 4 (2003) 333.
14. M Bahmanabadi et al., *PASA*. **23**(3) (2006) 129.
15. M Bahmanabadi, J Samimi, *J. Phys. Rev. D* **76** (2007) 082002.
16. G Mohanty, *ICRC*, **3** (1999) 452 M.
17. S Cht. Mavrodiev et al., *NIM* **530** (2004) 359.

1. A Mishev, J Stamenov, *ICRC*, **6** (2005) 109M.
2. D Heck et al., *Report FZKA* (1998) 6019, Forschungszentrum Karlsruhe;
http://www-ik.fzk.de/corsika/physicsdescription/corsika_phys.html.
3. <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/magfield.shtml>

۴. گوهر رستگار زاده، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۶، شماره ۲، تابستان (۱۳۸۵).

5. D Chernov, E Korosteleva, *Int. J. Mod. Phys. A* **20** (2006) 6799-6801.
6. A A Ivanov, S P Knurenko, arXiv: 0902. 1016v1 [astro-ph.HE] (2009).