

## بررسی پارامتر عمر طولی و عرضی بهمن‌های گسترده هوایی

بتول نخعی امرودی، سعید دوست محمدی، حمید ارجمند کرمانی، سید جلیل‌الدین فاطمی\*

دانشکده فیزیک دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

### چکیده

بهمن‌های گسترده هوایی که در اثر برهم‌کنش پرتوهای کیهانی پر انرژی با جو تولید می‌شوند، در دو جهت طولی و عرضی گسترش یافته که بررسی چگالی الکترون‌ها در این دو جهت به پارامتر عمر در آن جهات بستگی دارد. دای و همکاران در سال ۱۹۹۰ اختلاف بین پارامتر عمر طولی و عرضی را بیان کردند. این در حالیست که برخی پژوهشگران اعتقاد دارند که پارامتر عمر عرضی در مدل نیشیمورا، کاماتا، گریسن (NKG)، که برای توصیف پراکندگی عرضی الکترون‌ها و در همه فاصله‌ها استفاده می‌شود، کافی نیست. در این مقاله تلاش گردیده با استفاده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی، وابستگی پارامتر عمر طولی و عرضی بهمن گسترده هوایی به فاصله از مرکز بهمن، با تکیه بر مفاهیم آمده در کار دای و همکاران، مورد مطالعه قرار گیرد. نتیجه اینکه بر خلاف نظریه NKG، در نظریه لینسلی، در گسترش عرضی بهمن گسترده هوایی، دیگر پارامتر عمر به‌عنوان یک مقدار متوسط در نظر گرفته نشده، بلکه با افزایش فاصله از محور بهمن افزایش می‌یابد.

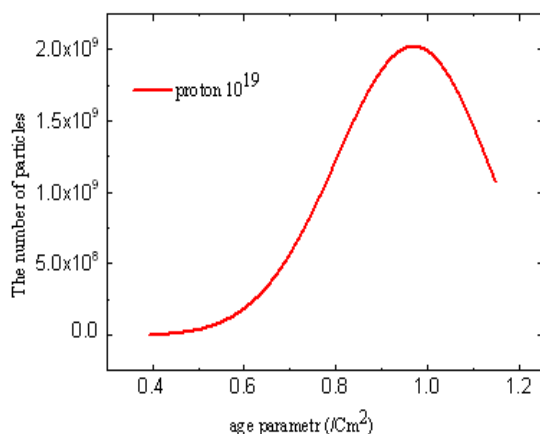
**کلیدواژگان:** پرتوهای کیهانی، آبشار الکترومغناطیسی، بهمن گسترده هوایی، پارامتر عمر طولی و عرضی بهمن.

### مقدمه

جو است. در گسترش طولی یک بهمن جایی که بیشترین تعداد ذرات ثانویه تولید می‌شوند به‌عنوان بیشینه در نظر گرفته شده و پارامتر عمر (طولی) برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. پیش از این ناحیه پارامتر عمر کمتر از یک (بهمن جوان) و پس از آن پارامتر عمر بزرگتر از یک (بهمن پیر) معرفی می‌گردد که با محاسبه آن، ترکیبات جرمی، انرژی ذره اولیه و پیر یا جوان بودن بهمن مشخص خواهد شد. این پارامتر مقیاسی برای گسترش بهمنی است که اتفاق افتاده است. هرچه پرتو کیهانی وارد شده دارای انرژی بالاتری باشد نفوذ بیشتری در جو داشته و پارامتر عمر طولی کمتری در سطح آرایه خواهد داشت. باید توجه داشت که برای هسته‌های سنگین‌تر احتمال برخوردها و اندرکنش‌ها با هسته‌های جو بالا رفته که این امر

بهمن گسترده هوایی شامل ترکیب پیچیده‌ای از آبشارهای الکترومغناطیسی و چندین محصول هادرونی توسعه یافته بوده که به نوع و انرژی ذره اولیه مربوط می‌شود. در مورد یک فوتون و یا یک الکترون اولیه، واکنش‌ها فقط از نوع الکترومغناطیسی هستند به طوری که بهمن الکترومغناطیسی طبیعی ایجاد خواهد شد. در مورد یک بهمن هادرونی، نتیجه شامل مجموعه‌ای از آبشارهای کوچک هادرونی و الکترومغناطیسی و میونی خواهد بود. در مطالعه آبشار الکترومغناطیسی بهمن گسترده هوایی، پارامتر عمر یکی از پارامترهای مهم به‌شمار می‌رود. پارامتری که نشان‌دهنده میزان و چگونگی گسترش یک بهمن در

\* ایمیل نویسنده مسئول jalil\_fatemi@yahoo.com



شکل ۱. نمودار تعداد الکترون‌های بهمن بر حسب پارامتر عمر.

همان‌گونه که می‌دانیم، در یک سطح مشاهده ثابت، چگالی بیشینه نزدیک محور بهمن است. بهترین فاصله  $r$  برای هر سطح مشاهده خاص،  $t_i$ ، جایی است که چگالی الکترون‌ها در آن فاصله بیشینه باشد. جایی که چگالی الکترون‌ها بیشینه توسعه باشد  $s(r) = 1$  و قبل از این فاصله  $s(r) < 1$  و بعد از این فاصله  $s(r) > 1$  خواهد بود بنابراین هرچه به مرکز آشبار نزدیکتر می‌شویم پارامتر عمر عرضی افزایش می‌یابد.

در داده‌های تجربی یا کوتسک [۲] با انرژی اولیه  $eV$   $1.1 \times 10^{19}$  و انرژی بحرانی  $87.6 \text{ MeV}$  و عمق جوی  $40$  گرم بر سانتیمتر مربع، با افزایش  $r$  در ناحیه بین  $10 < r < 0.1$  مقادیر  $S$  بین  $1.38 < S < 1.25$  تغییر می‌کند و با افزایش  $r$ ،  $S$  کاهش می‌یابد.

جدول ۱. مقادیر به دست آمده، پارامتر عمر طولی برای ذره اولیه با انرژی  $eV$   $1.1 \times 10^{19}$  از رابطه ۱.

$r$	۰٫۱	۰٫۵	۱	۵	۱۰
$S$	۱٫۳۸۷	۱٫۳۳۷	۱٫۳۱۷	۱٫۲۷۲	۱٫۲۵۳

توسعه سطحی بهمن گسترده هوایی کمیت بسیار مهمی برای پرتوهای کیهانی مشاهده شده روی زمین می‌باشد. برای بیشتر سطح‌های مشاهده شده آشبار، یک ذره پرتوی کیهانی با انرژی زیاد، با یک مولکول از ذرات جو برخورد می‌کند که باعث می‌شود ذرات

سبب می‌شود تا بهمن‌های تولید شده نفوذ کمتری در جو داشته و پارامتر عمر طولی بزرگتری در سطح آرایه داشته باشند.

یکی از پارامترهایی که معمولاً برای توصیف شکل توزیع چگالی سطحی آشبار استفاده می‌شود پارامتر عمر عرضی آشبار (LSAP) است که بستگی به شکل سطحی پراکندگی الکترون و عمق بیشینه آشبار دارد. عمق بیشینه آشبار و توسعه بهمن بر طبق محاسبات آماری با افت و خیزهای زیادی همراه است.

### بررسی پارامتر عمر طولی و عرضی

در بررسی توسعه طولی آشبار الکترومغناطیسی، پارامتر عمر طولی بهمن بر طبق تئوری آشبار الکترومغناطیسی با رابطه ۱ بیان می‌شود: [۱]

$$s = \frac{3t}{t + 2 \ln \frac{E_0}{E_c} + 2 \ln r} \quad 1$$

که در این رابطه  $t$ ، عمق جو در واحدی از طول تابشی  $E_0 \frac{X}{\lambda_r}$  انرژی اولیه ذره  $E_c$  انرژی بحرانی و  $r = \frac{R}{R_0}$  نسبت فاصله از مرکز بهمن به شعاع مولیر) و  $S$  پارامتر عمر طولی بهمن می‌باشند. در یک فاصله معین  $r$  از محور بهمن، با انتخاب عمق‌های مختلف  $S$ ‌های متفاوتی به دست خواهد آمد به طوری که در  $t = 0$ ،  $s = 0$  خواهد بود. و در  $t_{max}$ ، عمق بیشینه بهمن (عمقی از بهمن که تعداد ذرات بیشینه است)  $s = 1$  خواهد شد و بعد از آن عمق،  $s > 1$  خواهد بود. شکل ۱ را ببینید.

بهمن می‌باشد. برای داده تجربی یاکوتسک [۲] با انرژی  $\rho(r)$  و  $E_0 = 1.1 \times 10^{19}$  eV و  $R_{mol} = 61.7$  m با داشتن در فواصل مختلف  $r$  و جایگزینی در رابطه ۳ مقادیر  $N_e$  (تعداد الکترون‌ها) و  $s$  که پارامتر عمر عرضی میانگین در سطح آرایه‌ها است به ترتیب مقادیر  $1.18 \times 10^9$  و  $1.37$  به دست می‌آید.

مشاهده می‌شود که در تابع NKG فقط یک مقدار میانگین برای پارامتر عمر عرضی به دست آمده است که به نظر می‌رسد به طور کامل نمی‌تواند پارامتر عمر را توضیح دهد.

بر این اساس که پارامتر عمر عرضی مدل NKG برای توصیف پارامتر عمر عرضی کافی نیست، لینسلی تابع دو متغیره‌ای پیشنهاد کرد که پارامترهای آن  $\alpha$  و  $\eta$  می‌باشند که این تابع جانشین تابع NKG می‌شود [۵].

$$\rho(r) = \frac{N_e}{r_M^2} \frac{\Gamma(\eta-\alpha)}{2\pi\Gamma(2-\alpha)\Gamma(\eta-2)} \left(\frac{r}{r_M}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{r}{r_M}\right)^{-(\eta-\alpha)} \quad 4$$

به طوری که مقدار پارامتر عمر عرضی که تابع فاصله  $r$  از محور بهمن است را به صورت رابطه ۵ بیان می‌کند [۶].

$$s(r) = \frac{2-\alpha+(6.5-\eta)r}{(1+2r)} \quad 5$$

در این رابطه  $r$  نسبت فاصله از محور بهمن به شعاع مولیر است. با شبیه‌سازی ۵۰۰ آبخار با ذره اولیه آهن و انرژی اولیه  $10^{19}$  eV که توسط نرم‌افزار کورسیکا (مدل QGSJETII در انرژی‌های پایین) در کار حاضر صورت گرفته است و همچنین با برازش نمودار بر داده‌های  $\rho(r)$  و مقادیر  $\eta = 1.48 \pm 0.61$  و  $\alpha = 0.55 \pm 0.22$  جایگزین کردن در رابطه ۵ در فواصل مختلف  $r$  مقادیر متفاوتی برای  $s$  به دست می‌آید که در جدول ۲ بیان شده است.

ثانویه در مدت زمان کوتاهی روی یک سطح، عمود بر مسیر ذره اولیه توزیع شوند. دیسکی از ذرات ثانویه در فاصله چند صد متر از محور بهمن (چگالی بیشینه ذرات در مرکز این دیسک است) توزیع می‌شود که با بررسی چگالی ذرات روی این دیسک می‌توانیم اطلاعاتی درباره ذره اولیه کسب کنیم.

توسعه افقی (عرضی) بهمن به علت چندین پراکندگی کولنی است. یک ذره باردار در هوا به وسیله پراکندگی زاویه‌ای خیلی کوچک منحرف می‌شود. بیشتر این انحرافات در اثر پراکندگی کولنی الکترون‌ها یا فوتون‌ها در برخورد با هسته است.

تابش ترمزی و تولید جفت مؤثراً یک سطح افقی از پخش ذرات ثانویه را در اطراف محور بهمن ایجاد می‌کند. توزیع پراکندگی کولنی کاملاً به وسیله تئوری مولیر توجیه می‌شود.

توزیع افقی بهمن‌های الکترومغناطیسی در ذرات مختلف به درستی با شعاع مولیر (به طور متوسط ۹۰٪ از انرژی یک بهمن داخل یک استوانه اطراف محور بهمن با شعاع مولیر تراکم دارد) مقایسه می‌شود [۳] که این شعاع ( $R_{mol}$ ) به طول تابشی  $\lambda_r$  و انرژی بحرانی در ماده وابسته است. رابطه ۲ را ببینید.

$$R_{mol} = 0.0212 \text{ GeV} (\lambda_r / E_c) \quad 2$$

در بررسی توسعه عرضی آبخار الکترومغناطیسی مدل از رابطه چگالی الکترون‌ها بر حسب فاصله NKG محور بهمن را به صورت رابطه ۳ بیان می‌کند [۱] و [۴].

$$\rho(r) = \frac{N_e}{r_M^2} \frac{\Gamma(4.5-s)}{2\pi\Gamma(s)\Gamma(4.5-2s)} \left(\frac{r}{r_M}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_M}\right)^{S-4.5} \quad 3$$

که در این رابطه  $S$  پارامتر عمر عرضی بهمن و  $N_e$  تعداد الکترون‌ها در سطح آرایه و  $r_M$  شعاع مولیر و  $\rho(r)$  چگالی الکترون‌ها در سطح آرایه و  $r$  فاصله از محور

برای پارامتر عمر در نظر گرفته نمی‌شود بلکه این پارامتر با افزایش فاصله از محور بهمن افزایش می‌یابد.

### سپاس‌گزاری

در اینجا لازم است که از پروفیسور راجر کلی استاد دانشگاه آدلاید استرالیا که داده‌های ارزشمند این مقاله را که در فرصت مطالعاتی پروفیسور فاطمی در اختیار ایشان گذاشتند، صمیمانه سپاس‌گزاری شود.

### مرجع‌ها

[1] K. Kamata, J. Nishimura, The Lateral and the Angular Structure Functions of Electron Showers, *Progress of theoretical physics*, 6 (1958) 93-155.

[2] N.N. Efimov, T.A. Egorov, D.D. Hrasilnikov, M.I. Pravdin, *world data center of Yakutsk array catalog* (1988).

[3] H. Bethe, Moliere's theory of multiple scattering, *Physical review* 89 (1953) 1256.

[4] K. Greisen, Cosmic ray showers, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 10 (1960) 63-108.

[5] J. Linsley, Structure of large air showers at depth 834 g/cm<sup>2</sup>, *Proceedings of the 15th International Cosmic Ray Conference*, Plovdiv, Bulgaria, 89 (1977) 56-62.

[6] A. Tapia, D. Melo, F. Sánchez, A. Sedoski Croce, A. Etchegoyen, J. M. Figueira, R.F. Gamarra, B. García, N. González, M. Josebachuili, D. Ravnani, I. Sidelnik, B. Wundheiler, The lateral shower age parameter as an estimator of chemical composition, *Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil* (2013) 1-4.

[7] H.Y. Dai, Y.D. He, A.X. Huo, A contradiction in the concept of shower age, *Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia*, 9 (1990) 5-8.

جدول ۲. مقادیر به دست آمده، پارامتر عمر عرضی برای ذره اولیه آهن با انرژی اولیه  $E_0 = 10^{19}$  eV و  $\theta = 0^\circ$  از روش لینسلی.

r	S
۰٫۱	۱٫۴۵۲
۰٫۲	۱٫۴۵۵
۰٫۵	۱٫۴۶۳
۱	۱٫۴۷
۲	۱٫۵۰
۵	۱٫۵۶
۱۰	۱٫۶۶

همانگونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود با افزایش فاصله r از محور بهمن S افزایش می‌یابد که با نتایج دای و همکاران [۷]، که هر چه از مرکز آبشار دور شویم پارامتر عمر عرضی افزایش می‌یابد، سازگاری مناسبی نشان می‌دهد.

بنابراین بر طبق نظریه لینسلی بر خلاف NKG دیگر یک مقدار میانگین برای پارامتر عمر عرضی در نظر گرفته نمی‌شود بلکه این پارامتر با افزایش فاصله از محور بهمن افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

همانگونه که در کار حاضر در مقایسه با کار دای و همکاران [۷] دیده می‌شود، نتایج کاهش و یا افزایش پارامتر عمر بهمن در دو جهت عرضی و طولی همخوانی مناسبی نشان می‌دهند. به طوری که در مطالعه گسترش طولی بهمن‌های گسترده هوایی، با پیشرفت بهمن در جو، پارامتر عمر طولی آن از مقدار صفر شروع شده و به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه در عمق بیشینه به مقدار یک رسیده که البته مقدار این پارامتر در هر عمقی به فاصله از محور بهمن بستگی دارد و هر چه فاصله از محور بهمن افزایش یابد پارامتر عمر کاهش می‌یابد.

در مطالعه توسعه عرضی بهمن گسترده هوایی در نظریه لینسلی برخلاف نظریه NKG، دیگر یک مقدار متوسط

## **Investigation of longitudinal and lateral age parameter of extensive air showers**

**Batoul Nakhaee, Saeed Doostmohammadi, Hamid Arjomand, Jalil Fatemi\***

Department of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

### **Abstract**

Colliding high energy cosmic rays to the earth atmosphere produces secondary particles which generate extensive air shower (EAS) that develops in lateral and longitudinal directions. It was found that electron density in two directions is related to the age parameter. Dai et. al. [1] clarified the difference between the lateral and longitudinal age parameters in 1990. However, some scientists believe that the lateral age parameter from NKG model is not sufficient to describe the electro lateral dispersion. In the current study, given the experimental and simulation data and also given the results of Dai et. al. work, the dependence of the lateral and longitudinal age parameter to core distance is investigated. Finally, contrary to NKG theory, at Linsley theory, the age parameter is not a constant parameter, so it increases with an increase in core distance.

**Keywords:** Cosmic rays, Electromagnetic cascade, Extensive air shower, Lateral and longitudinal age parameter.

---

\* Corresponding Author: [jalil\\_fatemi@yahoo.com](mailto:jalil_fatemi@yahoo.com)