

## بررسی تابع توزیع عرضی بهمن های هوایی با استفاده از سیگنال های رادیویی

سبوحی، محمد<sup>۱</sup>؛ رستگارزاده، گوهر<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان

### چکیده

در این مطالعه، شبیه سازی هایی با استفاده از دو برنامه *CORSIKA* و *CoREAS* به منظور بررسی تابع توزیع عرضی و رابطه میان انتشار رادیویی پرتو های کیهانی با انرژی ذره اولیه صورت پذیرفته و مجموعه ای متشکل از ۸۴ بهمن هوایی با انرژی های گوناگون که به صورت عمود و با ذرات اولیه مختلف منتشر می شوند را مورد مطالعه قرار داده ایم. نتایج حاصل از شبیه سازی های رادیویی با استفاده از یک کد کامپیوتری طراحی شده، مورد تحلیل قرار گرفته و بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده در بازه 32-64 MHz برای مؤلفه های مختلف میدان الکتریکی بدست آمده است. یک نقطه تاثیرگذار تابع توزیع عرضی حاصل از تمامی بهمن های هوایی صرف نظر از نوع و انرژی اولیه آن ها با محاسبه مقدار پارامتر *RMS* تعیین و ضمن ارزیابی رابطه میان عمق بیشینه بهمن هوایی با این ناحیه، راهکار تعیین انرژی ذره اولیه بهمن با تحلیل مقادیر حاصل از تابع فوق مورد بررسی قرار گرفته است.

## An investigation on Lateral Distribution Function of cosmic ray air showers based on radio signal analyses

Sabouhi, Mohammad<sup>1</sup>; Rastegarzadeh, Gohar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Semnan University, Semnan

### Abstract

*In order to do a fine investigation on Lateral Distribution Function (LDF) properties, a series of simulations based on CORSIKA and CoREAS with a total numbers of 84 vertical showers in three different energy ranges was performed. All radio data have been analyzed with a specifically designed computer code to calculate peak radio amplitude values for different electric field components in 32-64 MHz frequency band. A relation between initial energy of a shower and value of an important point in the LDF has been investigated. We also calculate the RMS parameter for all showers regardless of initial energy and type of primary particle to determine position of the aforementioned point in the LDF accurately. The correlation between  $X_{max}$  and LDF has also been investigated.*

PACS No. 90.95

### مقدمه

ماهیت سیگنال های رادیویی و شناخت خوب ما در حوزه تحلیل و بررسی این نوع از انتشار ها، آن را به گزینه ای ایده آل برای بررسی پرتو های کیهانی به غایت پرانرژی مبدل می سازد [۶]. از موارد مهم در این زمینه نحوه محاسبه انرژی ذره اولیه پرتو های کیهانی از طریق اندازه گیری های رادیویی است. در این مطالعه علاوه بر تحلیل و بررسی تابع توزیع عرضی برای گستره ی وسیعی از بهمن های عمودی، ضمن بهره گیری از مدل انتشار رادیویی

اندازه گیری های غیر مستقیم همواره یکی از بهترین روش ها برای مطالعه پرتو های کیهانی به غایت پرانرژی به شمار می رود [۱]. در سال های اخیر استفاده از روش آشکار سازی سیگنال های رادیویی امید های فراوانی را برای دستیابی به روشی نوین با دقت و چرخه کاری بالا پدید آورده است که می تواند نواقص و محدودیت های رویکرد های فعلی را نیز برطرف نماید [۲ و ۳ و ۴ و ۵].

کامپیوتری اختصاصی به صورت دیجیتالی فیلتر شده و مقادیر مربوط به بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده<sup>۱</sup> برای هر سه راستای مذکور در باند فرکانسی 32-64 MHz محاسبه گردیده است. دلیل توجه به این بازه فرکانسی نزدیکی آن به محدوده ی مورد استفاده در آزمایش های عملی حال حاضر می باشد. مقادیر مربوط به مؤلفه میدان کل که می توان از طریق رابطه (۱) و با استفاده از داده های مربوط به مؤلفه های مختلف میدان آن را محاسبه نمود، اساس بحث پیش رو را تشکیل می دهد.

$$1) E_{total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

### ویژگی های تابع توزیع عرضی

یک ویژگی منحصر به فرد در تمامی توابع توزیع بدست آمده وجود دارد. با وجود آنکه نمودار حاصل از بهمن هایی با ذرات اولیه مختلف دارای شیب مخصوص به خود هستند اما تمامی نمودارها صرف نظر از نوع ذره اولیه در یک نقطه واحد که معمولاً در فاصله ای نزدیک به مرکز بهمن قرار دارد، با یکدیگر برخورد می کنند. این منطقه که بررسی ها نشان از تاثیر پذیری اندک آن از تحولات ناشی از نوسانات آماری دارد، از این پس و به اصطلاح ناحیه *flat*<sup>۲</sup> خوانده می شود. موقعیت دقیق این نقطه به پارامتر هایی همچون زاویه فرود بهمن، پنجره فرکانسی و پارامتر بهنجارش مورد استفاده بستگی دارد [۱۶].

### اعمال بهنجارش مناسب

با اندازه گیری های تجربی حاصل از بررسی سیگنال های رادیویی می توان جهت انتشار و موقعیت مرکز بهمن هوایی را تعیین نمود [۱۷]. با این وجود اما تعیین انرژی ذره اولیه نیاز به بررسی های بیشتری دارد. یکی از راه های تعیین انرژی ذره اولیه تحلیل تابع توزیع عرضی بهمن های هوایی است. برای آنکه بتوان نتایج حاصل از تمامی شبیه سازی های صورت گرفته را به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار داد لازم است تا نمودار های مربوط به توابع توزیع

ژئو سنکروترون [۱۰ و ۹ و ۸ و ۷] که در کد CoREAS لحاظ شده است، رابطه میان اندازه گیری های رادیویی با انرژی ذره اولیه بهمن هوایی را مورد بررسی قرار می دهیم. نشان می دهیم که با بررسی پارامتر های حاصل از شبیه سازی های رادیویی می توان انرژی ذخیره شده در جو در نتیجه ی یک بهمن الکترومغناطیسی را محاسبه نمود. تعیین انرژی ذره اولیه نیازمند اندازه گیری های دقیق در یک نقطه مشخص از تابع توزیع عرضی است که در صورت استفاده از یک پارامتر مناسب برای بهنجارش، مستقل از نوع و انرژی ذره اولیه می باشد. این نقطه تنها تحت تاثیر هندسه بهمن و پنجره فرکانسی مورد مطالعه است.

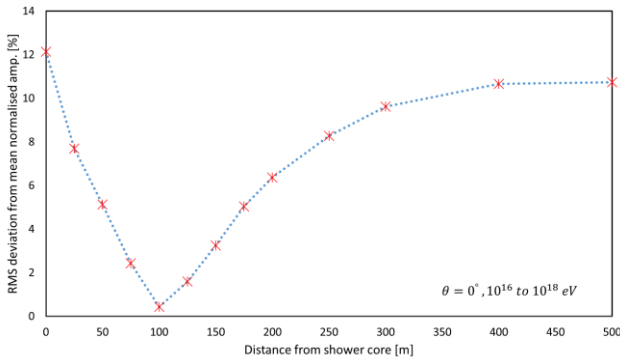
### روش انجام فرآیند

برای انجام مطالعه ای دقیق بر روی تابع توزیع عرضی، مجموعه ای شامل ۸۴ بهمن هوایی شبیه سازی شده و مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته اند. بهمن های شبیه سازی شده به صورت عمود و با انرژی های  $10^{16} eV$ ،  $10^{17} eV$  و  $10^{18} eV$  منتشر می شوند. برای اطمینان از صحت و دقت نتایج، هر دسته از شبیه سازی ها چندین بار تکرار شده اند. ذرات اولیه بهمن های فوق پروتون، آهن و گاما می باشند. برای هریک از بهمن های هوایی، شبیه سازی های کاملی با برنامه CORSIKA 7.4 [۱۱] و با استفاده از مدل اندرکنشی هادرونی QGSJETII-03 [۱۳ و ۱۲] انجام شده است. پارامتر های مربوط به میدان مغناطیسی مطابق با مقادیر موجود در محل رصد خانه Pierre Auger [۱۴] تنظیم و مقدار Thinning برابر با  $10^{-6}$  لحاظ شده است. در گام دوم، انتشار های رادیویی تمامی بهمن ها به وسیله کد CoREAS 1.0 [۱۵] و با استفاده از آرایه ای متشکل از ۱۳ آنتن که در راستای شمال و در ارتفاع ۱۴۰۰ متری از سطح دریا استقرار یافته اند، شبیه سازی شده است.

نتایج حاصل از این شبیه سازی ها که مقادیر مربوط به مؤلفه های میدان الکتریکی در سه راستای شمال، غرب و عمود را در واحد زمان شامل می شوند، در گام سوم و به وسیله یک کد

<sup>۱</sup> Filtered Peak Radio Amplitude (FPRA)

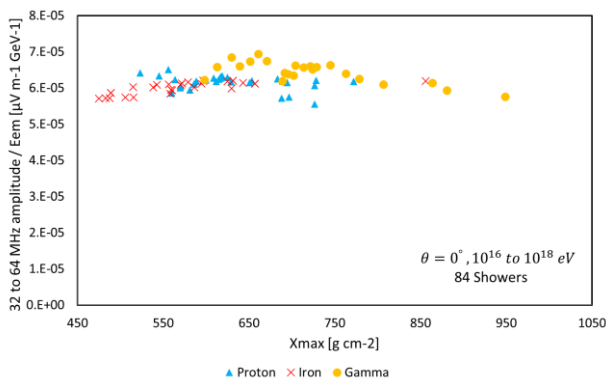
<sup>۲</sup> Flat region



شکل ۱: کم‌ترین میزان انحراف معیار از میانگین داده‌های مربوط به بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده ضمن اعمال بهنجارش  $E_{em}$  برای بهمن‌های عمود در بازه انرژی  $10^{16}$  eV تا  $10^{18}$  eV در فاصله ۱۰۰ متری از مرکز بهمن به دست آمد.

### رابطه $X_{max}$ بهمن با FPRA در ناحیه flat

یکی از نکات مهم، عدم وابستگی موقعیت نقطه flat به تحولات ناشی از نوسانات آماری است که می‌توان با بررسی رابطه میان  $X_{max}$  بهمن و مقدار بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده در ناحیه flat آن را مورد بررسی قرار داد. هرچند عدم وابستگی موقعیت دقیق منطقه flat به تحولات ناشی از نوسانات آماری به خوبی در شکل ۲ مشخص شده است با این وجود اما گام‌های محسوسی در گذر از بهمن‌هایی با یک نوع مشخص از ذره اولیه به دسته‌ای دیگر مشاهده می‌شود که ناشی از روند تولید و شکل‌گیری سیگنال‌های رادیویی است. در این فرآیند و بسته به نوع ذره اولیه، سیگنال‌های رادیویی توسط بخش مشخصی از بهمن الکترومغناطیسی تولید می‌شوند که با تغییر نوع ذره اولیه این نسبت نیز دچار تغییر می‌گردد [۲۲، ۲۱].



شکل ۲: محل دقیق منطقه flat در صورت اعمال بهنجارش مناسب مستقل از تحولات ناشی از نوسانات آماری است.

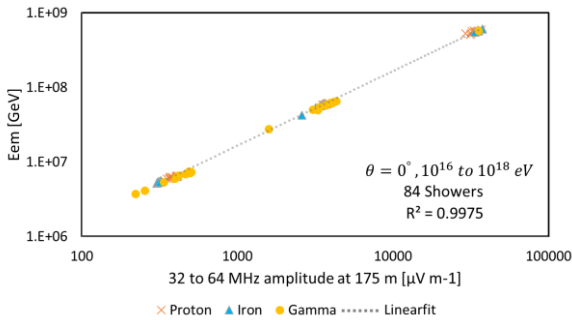
عرضی حاصل از بهمن‌هایی با انرژی‌های اولیه مختلف که دارای مقادیر متفاوتی از بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده هستند، نسبت به یک پارامتر مناسب بهنجارش شوند. در این صورت تابع توزیع عرضی حاصل از تمامی بهمن‌های هوایی صرف نظر از انرژی اولیه آن‌ها رفتاری مشترک از خود نشان می‌دهند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که می‌توان بهنجارش را با پارامترهایی همچون مجموع تعداد الکترون‌ها و پوزیترون‌ها در عمق بیشینه بهمن ( $N_{max}$ ) [۱۸] و یا انرژی کالرومتری ذخیره شده در جو ( $E_{cal}$ ) که رابطه‌ای بسیار مناسب با نور فلورسانس دارد [۲۰، ۱۹] انجام داد. با این وجود اما از نقطه نظر تئوری، پارامتری که می‌بایست بهترین رابطه را با سیگنال‌های رادیویی داشته باشد، انرژی ذخیره شده در جو به واسطه بهمن الکترومغناطیسی است که به اصطلاح ( $E_{em}$ ) خوانده می‌شود. برخلاف انرژی کالرومتری،  $E_{em}$  نه تنها انرژی ذخیره شده توسط میون‌ها و یا هادرون (که نقشی در ایجاد سیگنال‌های رادیویی ندارند) را به حساب نمی‌آورد بلکه انرژی ذخیره شده توسط ذرات، در سطح زمین را نیز در بر نمی‌گیرد.

### تعیین منطقه Flat

عوامل مختلفی در تعیین موقعیت این ناحیه تاثیرگذار هستند. یکی از راه‌های محاسبه دقیق محل این ناحیه، محاسبه پارامتر RMS است چرا که میزان انحراف معیار از میانگین بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده در این نقطه به حداقل خود می‌رسد. با محاسبه پارامتر RMS بر روی نتایج حاصل از تمامی بهمن‌های شبیه‌سازی شده ضمن اعمال بهنجارش مناسب، محل دقیق این نقطه برای بهمن‌های عمود با محدوده‌ی انرژی  $10^{16}$  eV تا  $10^{18}$  eV در فاصله ۱۰۰ متری از مرکز بهمن تعیین شد. شکل ۱ به خوبی محل دقیق منطقه flat را نشان می‌دهد. مقدار پارامتر RMS در این نقطه کم‌تر ۰.۵٪ می‌باشد که می‌تواند نقطه‌ی اطمینانی از تعیین فاصله ۱۰۰ متری به عنوان محل دقیق تلاقی تمامی نمودارها به شمار رود.

## تعیین انرژی

مقدار بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده در این نقطه با انرژی ذخیره شده در جو به واسطه بهمن های الکترومغناطیسی، می توان انرژی ذره اولیه را با خطایی در حدود 3-5% محاسبه نمود. نتایج بدست آمده در این مطالعه صرفا مربوط به بهمن هایی است که به صورت عمود منتشر شده، در محدوده انرژی  $10^{16} eV$  تا  $10^{18} eV$  بوده و در بازه فرکانسی 32-64 MHz مورد مطالعه قرار گرفته اند.



شکل ۴: اندازه گیری های رادیویی در منطقه *flat* می تواند منجر به تعیین مقدار پارامتر  $E_{em}$  برای هر بهمن هوایی منحصر به فرد گردد. مقدار پارامتر برازش برای بهمن های عمود  $a=16374$  به دست آمد.

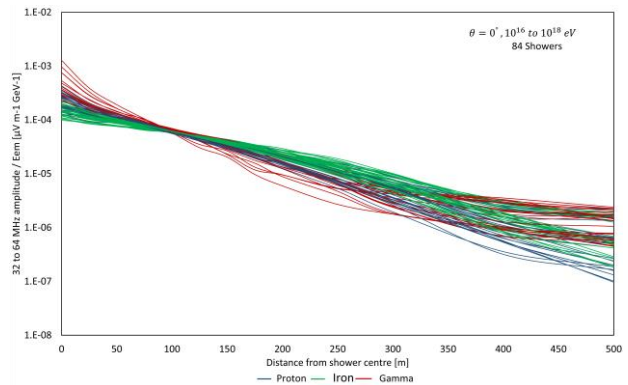
## مرجع ها

- [1] F. G. Schröder, *Instruments and Methods for the Radio Detection of High Energy Cosmic Rays*, Springer Theses, DOI: 10.1007/978-3-642-33660-7\_2, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
- [2] H. Falcke, W.D. Apel, A.F. Badea, et al., *Nature* **435** (2005) 313–316.
- [3] T. Huege, W.D. Apel, T. Asch, et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **165** (2007) 341–348.
- [4] D. Ardouin, A. Bellétoile, D. Charrier, et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **555** (2005) 148–163.
- [5] A. van den Berg et al., in: *Proceedings of the 30th ICRC*, Merida, Mexico, **2007**, astro-ph/0708.1709.
- [6] M.Sabouhi, Radio detection of cosmic ray air showers, *Master Thesis*, **2015**, Seman University (proceeding)
- [7] T. Huege, H. Falcke, *Astron. Astrophys.* **412** (2003) 19–34.
- [8] T. Huege, H. Falcke, *Astron. Astrophys.* **430** (2005) 779–798.
- [9] T. Huege, H. Falcke, *Astropart. Phys.* **24** (2005) 116.
- [10] T. Huege, R. Ulrich, R. Engel, *Astropart. Phys.* **27** (2007) 392–405.
- [11] D. Heck and T. Pierog, Institut für Kernphysik, Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide
- [12] S. Ostapchenko, *Phys. Rev.* **D74** (2006) 014026.
- [13] S. Ostapchenko, *Phys. Lett.* **B636** (2006) 40–45.
- [14] J. Abraham, M. Aglietta, I.C. Aguirre, et al., *Nucl. Instrum. Meth.* **A523** (2004) 50–95.
- [15] T. Huege, M. Ludwig, C.W. James, *AIP Conf. Proc.* **1535**, 128-132 (2013), doi:10.1063/1.4807534
- [16] T. Huege, R. Ulrich, R. Engel, *Astropart. Phys.* **30** (2008) 96–104
- [17] D. Ardouin, A. Bellétoile, D. Charrier, et al., *Astropart. Phys.* **26** (2006) 341–350.
- [18] T. Huege, R. Ulrich, R. Engel, in: *Proceedings of the 30th ICRC*, Merida, Mexico, **2007**, astro-ph/0707.3761.
- [19] H.M.J. Barbosa, F. Catalani, J.A. Chinellato, et al., *Astropart. Phys.* **22** (2004) 159–166.
- [20] M. Risse, D. Heck, *Astropart. Phys.* **20** (2004) 661–667.
- [21] C. Song, Z. Cao, B.R. Dawson, et al., *Astropart. Phys.* **14** (2000) 7–13.
- [22] H.M.J. Barbosa, F. Catalani, J.A. Chinellato, et al., *Astropart. Phys.* **22** (2004) 159–166.
- [23] D. Ardouin, [23] J. Alvarez-Muñiz, R. Engel, T.K. Gaisser, et al., *Phys. Rev. D* **69** (10) (2004) 103003.

رابطه بسیار خوب  $E_{em}$  با بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده در منطقه *flat* در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، این رابطه خطی بوده و با تعیین پارامتر  $a$  که وابسته به هندسه بهمن هوایی و پنجره فرکانسی مورد مطالعه می باشد می توان انرژی ذخیره شده در جو به واسطه بهمن الکترومغناطیسی و در نتیجه انرژی ذره اولیه را محاسبه نمود.

$$2) E_{em} = aA_{flat} \mu V^{-1} mGev,$$

مقدار به دست آمده برای پارامتر  $E_{em}$  می تواند با خطایی در حدود 3-5% درصد منجر به تعیین انرژی ذره اولیه گردد [۲۳].



شکل ۳: تابع توزیع عرضی مربوط به بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده در بازه فرکانسی 32-64 MHz که با پارامتر انرژی ذخیره شده در جو به واسطه بهمن الکترومغناطیسی بهنجار شده است. نمودار فوق مربوط به ۸۴ بهمن عمود می باشد که بازه انرژی  $10^{16} eV$  تا  $10^{18} eV$  را پوشش می دهند. تابع توزیع عرضی حاصل از تمامی بهمن ها صرف نظر از انرژی و نوع ذره اولیه در یک نقطه در فاصله ۱۰۰ متری از مرکز بهمن با یکدیگر برخورد می کنند.

## نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی های صورت گرفته با نرم افزار CORSIKA و کد CoREAS نشان دادیم که داده های حاصل از سیگنال های رادیویی حاوی اطلاعات ارزشمندی در خصوص انرژی ذره اولیه بهمن هوایی هستند که با مطالعه و تحلیل تابع توزیع عرضی بهمن های هوایی می توان به این اطلاعات دست یافت. برای بهمن هایی با زاویه فرود مشخص و در یک پنجره فرکانسی معین، همواره نقطه ای در تابع توزیع عرضی بهمن های هوایی وجود داد که تمامی نمودار ها صرف نظر از انرژی و نوع ذره اولیه در صورت اعمال یک بهنجارش مناسب بر روی داده ها، در آن نقطه با یکدیگر تلاقی پیدا می کنند. با تعیین پارامتر برازش