

## وابستگی مشخصات سیگنال های رادیویی به جهت ورود پرتو های کیهانی

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

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

### چکیده

در این مقاله، ما روشی نوین را ارائه می‌نماییم که به وسیله آن می‌توان جهت ورود یک پرتو کیهانی را با بررسی مشخصه های رادیویی تخمین زد. به منظور محاسبه الگوهای رادیویی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته اند، مجموعه ای از شبیه سازی های رایانه ای با بهره گیری از کدهای نرم افزاری CoREAS و CORSIKA انجام گرفته است. ذرات اولیه مورد بررسی در این مطالعه شامل پروتون و آهن با انرژی اولیه  $10^{17}$  eV هستند که با زوایای گوناگون وارد جو زمین می‌شوند. به منظور محاسبه پیشینه دامنه رادیویی در بازه فرکانسی مورد نظر، از یک کد اختصاصی که برای انجام مطالعات رادیویی در دانشگاه سمنان توسعه داده شده است، استفاده کرده و مؤلفه های گوناگون رادیویی را مورد تحلیل قرار داده ایم. در نتیجه این بررسی ها مشخص گردید که شیب مؤلفه شمالی-جنوبی ( $E_x$ ) سیگنال های رادیویی در نواحی نزدیک به محور بهمن به زاویه سمتی پرتو کیهانی بستگی دارد. به علاوه، نوع جدیدی از الگوهای رادیویی که در نتیجه هم پوشانی الگوهای مربوط به مؤلفه های شمالی-جنوبی ( $E_x$ ) و عمودی ( $E_z$ ) سیگنال های رادیویی بدست می‌آید نیز معرفی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رابطه ای میان زاویه سرسویی پرتو کیهانی با شکل و جهت گیری این الگوی جدید وجود دارد.

## Dependence of radio signal properties on the arrival direction of Cosmic rays

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

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

### Abstract

In this study, we introduce a new method to estimate the cosmic ray arrival direction based on radio signal properties. In order to obtain the ground footprints of radio signals which has been used in this new approach, a series of simulations were performed with CoREAS and CORSIKA code. The primary particles are proton and Iron with  $10^{17}$  eV initial energy and different zenith and azimuth angles. We investigate both vertical and inclined air shower and calculate the peak radio amplitudes of North-South, East-West and Vertical polarization components with a unique computer code, designed specifically for this study. It is found that the slope of the  $E_x$  component is dependent to shower zenith angle in distances near shower core. Moreover, we introduce a new type of pattern by super-positioning the  $E_x$  and  $E_z$  components. The results show that there is a relation between the azimuth angle of a cosmic ray and the ground footprint of this new type of pattern.

PACS No. 90.95

### مقدمه

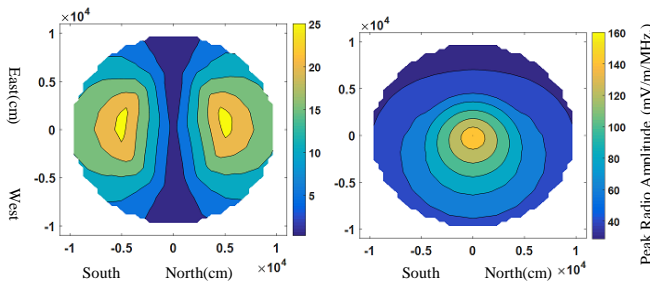
فراکشیانی [۱] و [۲]، این امکان وجود دارد که بتوان با بررسی جهت ورود آن ها به برخی از منابع احتمالی تولید و انتشار این نوع از پرتو های کیهانی به غایت پراثری دست یافت.

یکی از مهم ترین موضوعات مورد مطالعه در ارتباط با پرتو های کیهانی، جهت ورود آن ها به داخل جو زمین است. به دلیل انحراف کم تر ذرات بسیار پراثری در میدان های مغناطیسی کهکشانی و

وجود دارد. با تعیین این مقادیر نیز می‌توان الگوهای ناشی از سیگنال‌های رادیویی را ترسیم نمود.

### پرتوهای کیهانی عمود

در گام نخست، به بررسی الگوهای به دست آمده برای پرتوهای کیهانی عمود می‌پردازیم. مطابق انتظار یک عدم تقارن جزئی در مؤلفه  $E_y$  مشاهده می‌شود که ناشی از وجود و تاثیر مکانیزم‌های مختلف انتشار سیگنال‌های رادیویی است. در نقطه مقابل، مؤلفه  $E_x$  تا حدود زیادی نسبت به هر دو محور متقارن است. شکل ۱ الگوهای به دست آمده برای دو مؤلفه  $E_x$  و  $E_y$  یک پرتو کیهانی عمود با انرژی  $10^{17}$  eV را نشان می‌دهد.



شکل ۱: از چپ به راست: الگوهای رادیویی به دست آمده برای مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_y$  یک پرتو کیهانی با ذره اولیه پروتون و انرژی  $10^{17}$  eV که به صورت عمود وارد جو شده است. تقارن الگوی مؤلفه  $E_x$  و عدم تقارن مؤلفه  $E_y$  به وضوح مشهود است.

هر چند به جهت حفظ اختصار، در این مقاله الگوهای مربوط به پرتوهای کیهانی عمود با انرژی‌های مختلف و ذرات اولیه گوناگون به تصویر کشیده نشده‌اند، با این وجود اما مطابق شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، شکل کلی الگوهای مربوط به مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_y$  برای پرتوهای عمود با انرژی‌های مختلف و ذرات اولیه گوناگون، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.

در بیشتر آزمایش‌های رادیویی موجود، تنها دو مؤلفه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی مورد مطالعه قرار می‌گیرند که البته این امر به دلیل وجود اثر شرقی - غربی [۳] و تاثیرات ناشی از میدان مغناطیسی زمین به عنوان مهم‌ترین مکانیزم تولید و انتشار سیگنال‌های رادیویی ناشی از بهمن‌های هوایی است [۴]. با این وجود اما مؤلفه عمودی، به خصوص برای پرتوهای کیهانی بسیار پرانرژی که به صورت مایل وارد جو زمین می‌شوند، حاوی اطلاعات مهمی در خصوص مشخصات اولیه پرتو کیهانی است. در اینجا ما از یک الگو جدید رادیویی که در نتیجه هم‌پوشانی مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_z$  به دست آمده است نیز، برای تخمین جهت ورود پرتوهای کیهانی بهره می‌بریم.

### روش انجام فرآیند

برای انجام این مطالعه، شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از دو کد CORSIKA [۵] و CoREAS [۶] صورت گرفته است. ذرات اولیه در این شبیه‌سازی‌ها شامل پروتون و آهن با انرژی اولیه  $10^{17}$  eV می‌باشند. مدل‌های اندرکنشی QGSJETII-03 [۷] و Gheisha

به ترتیب برای انرژی‌های بالا و پایین مورد استفاده کرده‌ایم. برای انجام این مطالعه از یک آرایه رادیویی فرضی با ۷۴ آنتن که در فواصل مختلف از مرکز بهمن قرار گرفته‌اند استفاده شده است. از آنجایی که در محدوده انرژی مورد مطالعه در این مقاله سیگنال‌های رادیویی در فواصل دور از مرکز بهمن به شدت ضعیف می‌شوند، تمرکز ما بر روی نقاط نزدیک به مرکز بهمن می‌باشد. در شرایط عملی، سیگنال‌هایی که از حد مشخصی ضعیف‌تر باشند، به دلیل تداخل با نویز محیطی عملاً قابل استفاده نیستند [۸] و [۹].

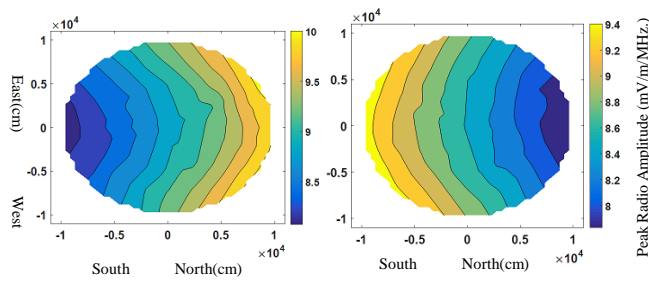
به منظور تبدیل سیگنال‌های خام رادیویی از حوزه زمان به فرکانس، از برنامه‌ای اختصاصی به نام CAPS<sup>۱</sup> (برنامه تحلیل داده‌های CoREAS برای دانشگاه سمنان) بهره گرفته‌ایم. این کد با استفاده از داده‌های خروجی CoREAS، پیشینه دامنه رادیویی را ضمن اعمال فیلتر دیجیتالی در بازه فرکانسی دلخواه محاسبه می‌نماید. در نتیجه امکان محاسبه تمامی مؤلفه‌های رادیویی شامل  $E_x, E_y, E_z$

<sup>1</sup> CoREAS Analyze Program for Semnan University

## پرتو های کیهانی مایل

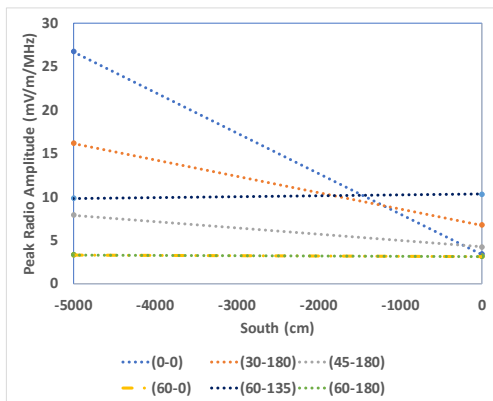
در حالتی که پرتو های کیهانی با زاویه مایل وارد جو شوند، زاویه سمتی بر روی الگو های رادیویی تاثیر گذار خواهد بود. هر دو الگوی مربوط به مؤلفه های  $E_z$  و  $E_x$  در این حالت دچار تغییر می شوند. در این قسمت، ما به بررسی یک پرتو کیهانی مایل که با زاویه  $60^\circ$  وارد جو شده و به سمت شمال منتشر می گردد، خواهیم پرداخت.

شکل ۲ نشان می دهد که الگو های مربوط به مؤلفه های  $E_z$  و  $E_x$  هم راستا با جهت انتشار بهمن جهت گیری نموده اند و بیشترین مقادیر توسط آنتن های مستقر در شمال محور مختصات به ثبت رسیده اند. اینک دو الگو مربوط به مؤلفه های  $E_z$  و  $E_x$  را با هم ترکیب کرده و الگویی جدید را معرفی می کنیم. شکل کلی و جهت گیری این الگوی جدید کاملا وابسته به جهت ورود پرتو کیهانی است، به نحوی که برای هر پرتو کیهانی با زوایای سمتی و سرسویی دلخواه که به صورت مایل وارد جو می شود، یک الگوی منحصر به فرد وجود خواهد داشت.



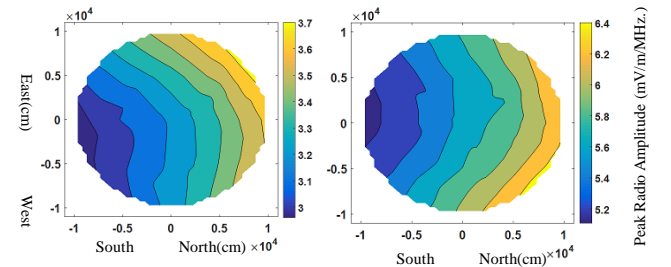
شکل ۳: از چپ به راست: الگو های رادیویی به دست آمده حاصل از هم پوشانی مؤلفه های  $E_z$  و  $E_x$  برای دو پرتو کیهانی با ذره اولیه پروتون و انرژی  $10^{17} eV$  که با زاویه  $60^\circ$  وارد جو شده و به ترتیب به سمت شمال و جنوب منتشر شده اند.

با توجه به نتایج به دست آمده می توان به این نتیجه رسید که شیب تابع توزیع عرضی میتواند به جهت ورود پرتو کیهانی و مشخصا زاویه سرسویی آن وابسته باشد. به همین دلیل لازم است تا اندازه گیری مقادیر مربوط به این مؤلفه در دو سمت محور بهمن یعنی شمال و جنوب انجام گیرد.



شکل ۴: شیب مربوط به مؤلفه  $E_x$  سیگنال های رادیویی به زاویه سمتی بهمن هوایی وابسته است. هرچه این زاویه بزرگتر شود، شیب این مؤلفه در نقاط نزدیک به محور بهمن کاهش می یابد. مقادیر داخل پرانتز به ترتیب از چپ به راست نشان دهنده ی زوایای سمتی و سرسویی پرتو کیهانی هستند.

همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، برای یک پرتو کیهانی مایل که با زاویه  $60^\circ$  وارد جو شده و به سمت شمال یا جنوب انتشار یافته است، رابطه ای خطی میان بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده مؤلفه جدید و فاصله از مرکز بهمن وجود دارد.



شکل ۲: از چپ به راست: الگو های رادیویی به دست آمده برای مؤلفه های  $E_x$  و  $E_z$  برای یک پرتو کیهانی با ذره اولیه پروتون و انرژی  $10^{17} eV$  که به صورت مایل و با زاویه  $60^\circ$  وارد جو شده و به سمت شمال در حال انتشار است.

شکل ۳ جهت گیری این الگو جدید را برای دو پرتو کیهانی کاملا مایل که به ترتیب به سمت شمال و جنوب انتشار یافته اند را نشان می دهد. این نوع از الگو ها منحصرمرا مربوط به پرتو هایی با این زاویه سرسویی مشخص می باشند. در این مرحله، به بررسی ارتباط میان زاویه سمتی یک پرتو کیهانی با شیب تابع توزیع عرضی مربوط به مؤلفه  $E_x$  در نقاط نزدیک به محور بهمن می پردازیم.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای پرتوهای کیهانی که به صورت عمود وارد جو می‌شوند، الگوهای منحصر به فردی برای مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_y$  بدست می‌آیند که در حالت کلی مستقل از نوع ذره و انرژی اولیه آن می‌باشد.

در حالتی که پرتوهای کیهانی به صورت مایل وارد جو شده و به سمت شمال و یا جنوب منتشر می‌شوند، بیشترین مقادیر مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_z$  توسط آنتن‌هایی ثبت می‌شود که در جهت انتشار بهمن قرار دارند. هرچند به دلیل آنکه جهت گیری کلی این الگوها تابعی از زاویه سرسویی پرتو کیهانی نیز می‌باشد، الگویی جدید را معرفی نمودیم که در نتیجه هم پوشانی الگوهای مربوط به مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_z$  بدست آمده و به کمک آن می‌توان جهت ورود پرتو کیهانی را تخمین زد.

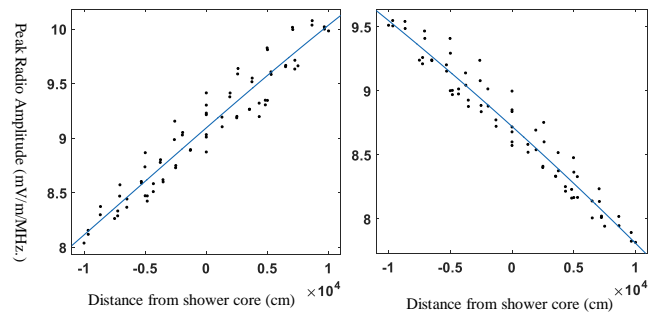
به منظور نشان دادن امکان تخمین زاویه سمتی بر اساس یک رویکرد ریاضی، تغییرات مؤلفه  $E_x$  سیگنال‌های رادیویی را بر حسب فاصله از مرکز بهمن به دست آورده و نشان دادیم که شیب این پارامتر وابسته به زاویه سمتی پرتو کیهانی است.

برای تخمین زاویه سرسویی نیز، با بهره گرفتن از یک تابع نمایی درجه دوم به تحلیل شکل خط برازش بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده که از الگو حاصل از هم پوشانی مؤلفه‌های  $E_x$  و  $E_z$  بدست آمده بود بر حسب فاصله از مرکز بهمن پرداخته و نشان دادیم که برای بهمن‌هایی که در جهت شمال یا جنوب منتشر می‌شوند این رابطه با تقریب بسیار خوب، خطی است. اما همان طور که زاویه سرسویی از شمال به سمت شرق یا غرب تغییر جهت می‌دهد، رابطه میان این دو پارامتر به شکل یک منحنی در می‌آید.

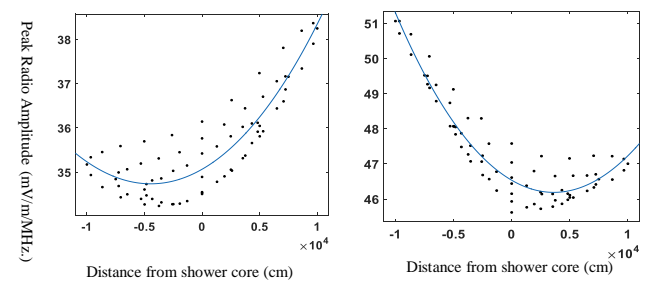
## مرجع‌ها

- [1] P.Sokolsky; 1989, Addison-Wesley.
- [2] C.Finley; Master Thesis, 2006, Columbia University.
- [3] B. Bartoli et al. (ARGO-YBJ Collaboration); *Phys. Rev. D* **89**, (2014) 052005.
- [4] T. Huege, M. Ludwig, O. Scholten, and K.D. de Vries; *Nucl.Instr.andMeth. A*, 662(Supplement 1):S179–S186, 2012. ARENA 2010.
- [5] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, et al; FZKA Report 6019, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [6] T. Huege, M. Ludwig, C.W. James; *AIP Conf. Proc.* 1535, 128 (2013).
- [7] S. Ostapchenko; *Phys. Rev. D*, 2006, **74**, 014026.
- [8] Coppens, J., and Pierre Auger Collaboration; *Nucl.Instr.andMeth.A*, **604.1**, (2009) S41.
- [9] Sabouhi M, Rastegarzadeh G., In: Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, 2015, The Hague, The Netherlands, POS 473.

با تغییر جهت انتشار پرتو کیهانی به سمت شرق و یا غرب، رابطه خطی ذکر شده به یک منحنی تبدیل می‌شود (شکل ۶).



شکل ۵: از چپ به راست: رابطه میان مقادیر مربوط به بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده مؤلفه جدید با فاصله از مرکز بهمن در جهت شمال-جنوب برای یک بهمن مایل که با زاویه ۶۰ درجه وارد جو شده و به ترتیب به سمت شمال و جنوب منتشر شده است. مقدار پارامتر برازش برابر با ۰٫۹۲ می‌باشد.



شکل ۶: از چپ به راست: رابطه میان مقادیر مربوط به بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده مؤلفه جدید با فاصله از مرکز بهمن در جهت شمال-جنوب برای یک بهمن مایل که با زاویه ۶۰ درجه وارد جو شده و به ترتیب به سمت شرق و غرب منتشر شده است. مقدار پارامتر برازش برابر با ۰٫۸۰ می‌باشد.

## جمع بندی

در این مطالعه ما به ارائه روشی نوین برای تخمین جهت ورود پرتوهای کیهانی بر اساس تحلیل مشخصه‌های رادیویی پرداختیم. بدین منظور، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها بر اساس کد‌های CORSIKA و CoREAS در این زمینه صورت گرفت و از برنامه که به صورت اختصاصی توسط گروه پرتوهای کیهانی دانشگاه سمنان توسعه داده شده است برای تحلیل سیگنال‌های رادیویی استفاده شد. با بهره‌گیری از این برنامه بیشینه دامنه رادیویی فیلتر شده برای تمامی مؤلفه‌های سیگنال‌های رادیویی محاسبه گردید.