

Studying the influence of diffractive interactions on observables of extensive air showers

Negin Sadeghinejad¹, Sozha Sohaily^{1,*}, Mohammad Vaziri²

¹ Department of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

² Physics Group, Faculty of Science, Islamic Azad University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 10.09.2023 Final revised: 21.09.2024 Accepted: 25.11.2024

Doi: [10.22055/jrmbms.2024.19750](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2024.19750)

Abstract

Modeling extensive air showers and obtaining high-energy cosmic rays' origin information depends on the description of hadronic interactions (in the energy range of LHC collisions and more). Diffraction events in hadronic interactions are expected to be well-effective in observables of extensive air showers and affect shower characteristics profile since it provides a different way of transferring energy to the atmosphere. In particular, in this research, the maximum depth and the maximum number of secondary particles of extensive air showers with diffractive events have been measured. The results obtained from this article, predicts slower shower distribution, an increase in the maximum depth and a decrease in the maximum number of particles in the presence of diffractive interactions.

Keywords: Cosmic rays, Extensive air showers, Longitudinal development of showers, Hadronic interactions, Diffraction

* Corresponding Author: sohaily@uk.ac.ir



مطالعه تأثیر برهم‌کنش‌های پراشیده بر مشاهده‌پذیرهای آبشارهای گسترده هوایی

نگین صادقی نژاد^۱، سوژا سهیلی^{۱*}، محمد وزیری^۲

^۱ بخش فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹ ویرایش نهائی: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

Doi: [10.22055/jrmbms.2024.19750](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2024.19750)

چکیده

مدل‌سازی بهمن‌های گسترده هوایی و دستیابی به اطلاعات منشأ پرتوهای کیهانی با انرژی بالا به توصیف برهم‌کنش‌های هادرونی (در محدوده انرژی برخوردی LHC و بیشتر) وابسته است. انتظار می‌رود وقوع رخداد‌های پراش در برهم‌کنش‌های هادرونی، تأثیر چشم‌گیری در مشاهده‌پذیرهای بهمن‌های گسترده هوایی داشته باشد و از آنجا که یک راه متفاوت انتقال انرژی به جو را تأمین می‌کند، خصوصیات نمایه بهمن را تغییر دهد. به‌طور خاص در این پژوهش، عمق بیشینه و تعداد بیشینه ذرات ثانویه بهمن‌های گسترده هوایی با در نظر گرفتن رخداد‌های پراشیده اندازه‌گیری شده است. نتایج به‌دست آمده از این نوشتار، گسترش کندتر بهمن، افزایش عمق بیشینه و کاهش تعداد ذرات بیشینه در حضور برهم‌کنش‌های پراشیده را پیش‌بینی می‌کند.

کلیدواژگان: پرتوهای کیهانی، بهمن گسترده هوایی، نمو طولی بهمن، برهم‌کنش‌های هادرونی، پراش

مقدمه

ذره پرتو کیهانی به جو زمین می‌رسد، با اتم‌ها یا هسته‌های هوا که اغلب نیتروژن و اکسیژن هستند برهم‌کنش کرده و تعداد زیادی ذره ثانویه تولید می‌کند. انرژی تقید نوکلئون‌های درون هسته در برهم‌کنش‌ها با انرژی‌های بالا (به دلیل ناچیز بودن زمان برهم‌کنش در مقایسه با زمان اعمال نیروی تقیدی بین نوکلئون‌ها) قابل صرف‌نظر کردن است؛ و این امر به معنی وقوع برهم‌کنش‌های هادرون-نوکلئون به‌طور مجزا و مستقل است [۱]. این ذرات ثانویه، بهمن‌های گسترده هوایی

پرتوهای کیهانی، هسته‌های باردار هستند که از خارج منظومه شمسی با انرژی‌های 10^9 تا 10^{20} الکترون‌ولت به زمین می‌رسند. شار ذرات کیهانی با افزایش انرژی به تندی کاهش می‌یابد. تعداد ذرات کیهانی از یک ذره بر مترمربع در ثانیه در انرژی 10^{11} الکترون‌ولت تا 1 ذره بر مترمربع در سال در انرژی 10^{15} الکترون‌ولت و تا یک ذره در کیلومترمربع در قرن در انرژی $10^{19} \times 6$ الکترون‌ولت تغییر می‌کند. وقتی یک

* نویسنده مسئول: sohaily@uk.ac.ir



(EAS)^۱ را تشکیل می‌دهند که اغلب شامل فوتون‌ها، الکترون‌ها، پوزیترون‌ها و میون‌ها (و ذرات دیگری که تعداد کمی دارند) است. تولید بهمن‌های گسترده هوایی، ویژگی‌های ذره اولیه را مستور و محاسبه انرژی و جرم در راستای اولیه ذره فرودی را مشکل می‌کند، با این حال، مطالعه بهمن‌های گسترده تنها راه دستیابی به اطلاعات این پرتوهای پر انرژی است.

آخرین نتایج حاصل از برخورد دهنده‌های هادرونی بزرگ (LHC)^۲ از برخوردهای نوکلئون-نوکلئون تا انرژی‌های مرکز جرم $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ به دست آمده است، در حالی که استفاده از تابش‌های کیهانی با انرژی بالا، دسترسی به انرژی‌های برخورد حدود $\sqrt{s} \cong \sqrt{2 m_{\text{air}} E_{\text{C.R.}}} = 450 \text{ TeV}$ را ممکن می‌سازد. بنابراین، استفاده از تابش‌های کیهانی با انرژی بالا، به عنوان منابع کم‌هزینه و قابل دسترس برای مطالعه برهم‌کنش‌های هادرونی تا انرژی‌های ۳۰ برابر بیشتر از انرژی هزینه شده در مجهزترین شتاب‌دهنده‌های ساخت بشر، سودمند است. استفاده از شبیه‌سازی آبخارهای هوایی و مقایسه نتایج حاصل با داده‌های تجربی امکان دستیابی به اطلاعات ترکیبات جرمی، منشأ پرتوهای کیهانی و نیز نحوه انتشار این پرتوها را فراهم می‌کند. برنامه‌های شبیه‌ساز مولد رویداد، با برون‌یابی اندازه‌گیری‌های دقیق، سطح مقطع و سایر ویژگی‌های برهم‌کنش‌های پرتوهای کیهانی با جو زمین را پیش‌بینی و به درک بهتر خصوصیات اساسی بهمن‌های گسترده کمک می‌کنند.

یکی از چالش‌های بنیادی در بررسی برهم‌کنش‌های هادرونی در آبخارهای هوایی، درک نحوه عملکرد فرآیندهای پراش است که با مدل‌های پدیده‌شناسی توصیف می‌شوند. بررسی نتایج حاصل از

پراکندگی‌های ناکشسان ژرف در برخوردهای هادرونی به دست آمده از شتاب‌دهنده‌ها حاکی از آن است که حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد برهم‌کنش‌های انجام‌شده از نوع برهم‌کنش‌های پراشیده هستند. مشخصه اصلی این فرآیندها، حضور یک هادرون دست‌نخورده و نیز وجود شکاف بزرگ تندی در حالت نهایی است. فرآیندهای پراش در حالت کلی با مبادله یک موجود بی‌رنگ با اعداد کوانتومی خلاء به نام پومرون^۳ توصیف می‌شوند [۲،۳]. از آنجاکه رخدادهای پراش بیشترین مقدار کشسانی را تولید می‌کنند، عامل مؤثر و مهمی در گسترش بهمن‌های گسترده هوایی هستند. کشسانی یکی از کمیت‌هایی است که بر گسترش بهمن تأثیر می‌گذارد و به معنای آن است که ذره ثانویه تولید شده در برهم‌کنش، بیشترین کسر انرژی را حمل می‌کند که به آن ذره پیشرو گفته می‌شود. یک ویژگی اساسی برهم‌کنش‌های پراشیده، وجود ذره پیشرو با انرژی بیشتر از سایر ذرات و نیز وجود تعداد کم ذرات ثانویه است. از آنجاکه وقوع پراش تأثیر مستقیم روی ناکشسانی برهم‌کنش دارد، مقدار قابل توجهی انرژی را در عمق جو انتقال می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود که وقوع برهم‌کنش‌های پراش خصوصیات کلی بهمن را دچار تغییر کند.

در این پژوهش به بررسی تأثیر وقوع برهم‌کنش‌های پراشیده بر گسترش طولی بهمن‌های گسترده هوایی پرداخته می‌شود. با استفاده از مدل مولد رویداد Sibyll2.3d در انرژی‌های بالا و نیز gheisha در انرژی‌های پایین، برهم‌کنش‌های هادرونی حاصل از برخورد ذرات کیهانی با مولکول‌های جو در نرم افزار کورسیکا^۴ شبیه‌سازی می‌شوند. در شبیه‌سازی بهمن، مشاهده‌پذیرهای عمق و تعداد بیشینه برای ذره فرودی پروتون و آهن در انرژی‌های 10^{14} تا 10^{17} الکترون‌ولت

³ Pomeron⁴ Cosmic Ray Simulation for Cascade (CORSIKA)¹ Extensive Air Showers² Large Hadron Colliders

تئوری رژی هستند و تنها در فلسفه تبادل نردبان پارتونی بین پراکنده و هدف تفاوت دارند [۹]. در این نوشتار، برای مطالعه برهم‌کنش‌های هادرونی بهمن‌های گسترده هوایی، از مولد رویداد Sibyll2.3d در انرژی‌های بالا و gheisha در انرژی‌های پایین در نرم‌افزار کورسیکا در دو حالت مختلف حضور رخدادهای پراش و نیز بدون در نظر گرفتن این فرآیند استفاده می‌شود. برای بررسی تأثیر پراش در آبشارهای گسترده هوایی از وارد کردن کلمه کلیدی DIFFLAG در فایل ورودی در نرم‌افزار کورسیکا نسخه ۷۵۶۰۰ استفاده شده است. در صورتی که مقدار این پارامتر در فایل ورودی برنامه $DIFFLAG=0$ باشد، برهم‌کنش‌های پراشیده و غیرپراشیده، هر دو در نظر گرفته می‌شوند و در حالتی که مقدار $DIFFLAG=-1$ باشد، برهم‌کنش‌های پراشیده در نظر گرفته نمی‌شوند. پارامترهای ورودی کورسیکا مانند نوع ذره فرودی، زاویه فرودی و انرژی ذره فرودی در هر حالت یکسان هستند. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌ها بدون در نظر گرفتن پدیده پراش به‌اندازه کافی واقعی نخواهند بود؛ اما حذف این فرآیندها امکان بررسی وابستگی مشاهده‌پذیرها و همین‌طور میزان تأثیر فرآیندهای پراش در نمو بهمن‌های گسترده را فراهم می‌کند. در مدل Sibyll تمرکز روی تولید ذرات در زاویه‌های کوچک است؛ بنابراین فرآیندهای تولید ذرات یا جت‌ها در تکانه‌های عرضی بزرگ مانند پراکندگی‌های پراش، در این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها مانند EPOS و QGSJET کمتر در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که

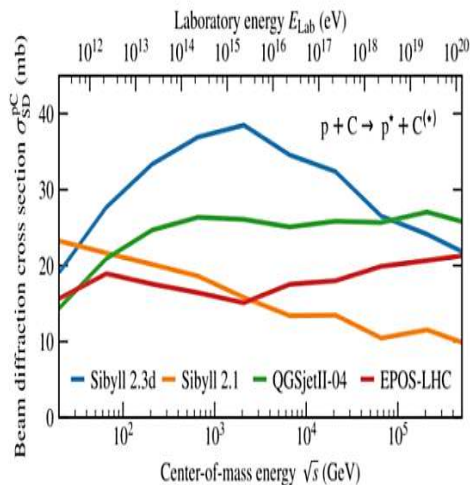
و زاویه فرودی ۱۰ درجه اندازه‌گیری شده است. همچنین نتایج در دو حالت حضور برهم‌کنش‌های پراش و نیز غیاب این رخدادها با هم مقایسه می‌شوند و تأثیر وجود پراش بر نمایه کلی بهمن و نیز مشاهده پذیرهای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. پیش‌تر در مرجع [۴] به بررسی اثر فرآیندهای پراشیده بر مشاهده‌پذیرهای بهمن‌ها پرداخته شده است. در آن مطالعه، از مدل‌های هادرونی قبل از LHC و برنامه AIRES [۵] برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین مدل هادرونی Sibyll به‌کار رفته در مرجع ذکر شده نسخه Sibyll2.1 است که یک مدل پایه برای توصیف برهم‌کنش‌های هادرونی است. درحالی‌که نسخه Sibyll2.3d که به تطابق با نتایج LHC و آزمایش‌های نجوم ذره‌ای ارتقاء یافته است، در این نوشتار استفاده شده است [۶]. در پژوهش‌های دیگر [۷۸] برای بررسی تأثیر پراش بر مشاهده‌پذیرهای آبشارهای هوایی، از برنامه‌های COSMOS 8.035 و CONEX v6.40 به‌منظور شبیه‌سازی بهمن‌ها استفاده شده است که تحلیل نتایج از طریق برازش با تابع گایزر-هیلاس^۱ و بررسی اولین برهم‌کنش ذره اولیه و هسته‌های هوا انجام شده است.

شبیه‌سازی بهمن‌های گسترده هوایی

برنامه‌های شبیه‌سازی مولد رویداد، با در نظر گرفتن ویژگی‌های اصلی برهم‌کنش‌های قوی و تولید هادرون‌ها در برهم‌کنش‌های پرتوهای کیهانی با مولکول‌های هوا در جو زمین، به درک بهتر بهمن‌های گسترده هوایی کمک می‌کنند. امروزه مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رخدادها منطبق با نتایج LHC وجود دارد که همه آنها بر پایه مدل پارتونی ساده مرتبط با

¹ Gaisser-Hillas Function

پراش، حکایت از تأثیر چشم گیر وقوع برهم کنش های پراشیده در مشاهده پذیرهای بهمن های گسترده هوایی دارد و بر اهمیت نتایج بررسی تأثیر پراش بر نمایه طولی آبشار دلالت می کند.



شکل ۱. سطح مقطع پراش در برهم کنش های کربن-پروتون در مدل های مختلف شبیه سازی پرتوهای کیهانی [۶].

تأثیر برهم کنش های ناکشسان ژرف پراشیده

بر گسترش طولی بهمن های گسترده هوایی

حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد برهم کنش های ناکشسان ژرف (DIS)^۱ در شتاب دهنده ها از نوع برهم کنش های پراشیده است. وجود شکاف بزرگ تندی و نیز هادرون دست نخورده ویژگی مشخص این برهم کنش ها است. وقوع پدیده های پراش در برهم کنش های هادرونی آبشارهای هوایی متناظر با کشسانی بالا و تعداد ذرات ثانویه کم است. این حقیقت به منزله وجود ذره پیشرو با انرژی بالا است که موجب پیشروی بیشتر در عمق و در نتیجه افزایش عمق بیشینه می شود. از طرفی وجود تعداد ذرات ثانویه کم در برهم کنش های پراش، کاهش تعداد ذرات بیشینه بهمین را به دنبال دارد؛ بنابراین انتظار

در شکل ۱ مشاهده می شود، در مدل Sibyll2.1، تعداد رخداد های پراش در برخوردهای کربن-هسته با افزایش انرژی مرکز جرم کاهش می یابد. در مدل Sibyll2.3 نیز در انرژی های مرکز جرم بالاتر از ۱ ترا الکترون ولت، روند کاهشی مشاهده می شود؛ در حالی که در سایر مدل ها تعداد رخداد های پراشیده افزایش می یابد [۶]. این اختلاف رفتار ناشی از تفاوت بستگی سطح مقطع پراشیده به مربع انرژی مرکز جرم (S) در مدل های مختلف است. به عنوان مثال سطح مقطع کل برخورد $\sigma_{tot} = \sigma_{Diff} + \sigma_{inel}$ و نیز سطح مقطع برهم کنش های ناکشسان (غیر پراشیده) σ_{inel} در مدل QGSJET و مدل Sibyll با $\ln^2 s$ متناسب هستند، در حالی که سطح مقطع رخداد های پراشیده σ_{Diff} در این مدل ها رفتار متفاوتی نشان می دهد:

$$\sigma_{Diff}^{sibyll} \propto \ln s \quad \text{و} \quad \sigma_{Diff}^{QGSJET} \propto \ln^2 s \quad ۱$$

بنابراین انتظار می رود در محدوده انرژی های فوق بالا، با افزایش انرژی، مولد رویداد Sibyll تفاوت کمتری نسبت به سایر مدل ها بین حالت های پراشیده و غیر پراشیده نشان دهد، البته شایان ذکر است که تفاوت سطح مقطع در مدل های مختلف نسبت به مقدار سطح مقطع کل (۴۰۰ mb) کم است و اختلاف چشمگیر و قابل ملاحظه ای بین مدل های مولد رویداد در توصیف بهمن های گسترده هوایی وجود ندارد. علیرغم آنکه مولد رویداد Sibyll برای حالت های با در نظر گرفتن رخداد های پراشیده و نیز در غیاب پراش تفاوت کمتری را نسبت به سایر مدل ها نشان می دهد، وجود تفاوت بین شبیه سازی ها در حالت حضور و حالت غیاب پراش در مدل Sibyll با در نظر گرفتن حداقل رخداد های

^۱ Deep Inelastic Scattering

نمو آبشارهای هوایی، شبیه‌سازی آبشارها در دو حالت حضور و عدم حضور پراش انجام شده است. رهیافت ارائه شده مقایسه‌ای بین پیش‌بینی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های کامل با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌هایی که برهم‌کنش‌های پراشیده در آنها لحاظ نشده‌اند انجام می‌دهد. به‌عنوان نمونه، مقادیر مربوط به بیشینه عمق جوی $\langle X_{\max} \rangle$ و همچنین بیشینه تعداد $\langle N_{\max} \rangle$ ذره اولیه پروتون (آهن) در انرژی 10^{17} الکترون ولت در جدول ۱ آورده شده است.

می‌رود با در نظر گرفتن پدیده پراش، نمایه طولی بهمن و مشاهده‌پذیرهای آن تغییر کنند. در این پژوهش تعداد ۳۰۰۰ آبشار با ذره اولیه پروتون و آهن با انرژی‌های 10^{14} تا 10^{17} الکترون‌ولت با زاویه فرودی ۱۰ درجه شبیه‌سازی شده است. ذرات ثانویه الکترون، میون، هادرون، ذرات باردار و هسته‌ها در ارتفاع ۱۴۲۰ متری از سطح دریا (سطح آشکارسازی رصدخانه اوژه) در نرم افزار کورسیکا [۱۰]، پس از میانگین‌گیری در هر انرژی و برای هر ذره اولیه محاسبه شده است. به‌منظور بررسی سهم رخداد‌های پراشیده در

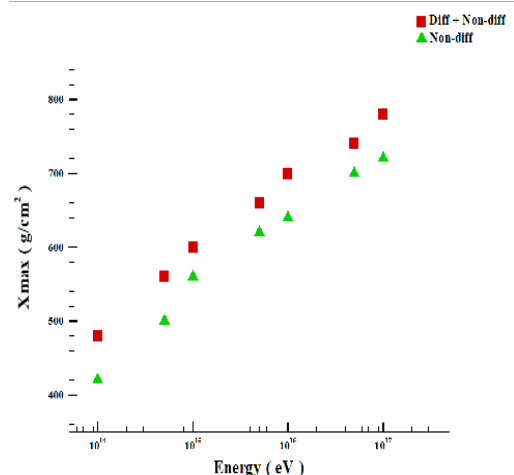
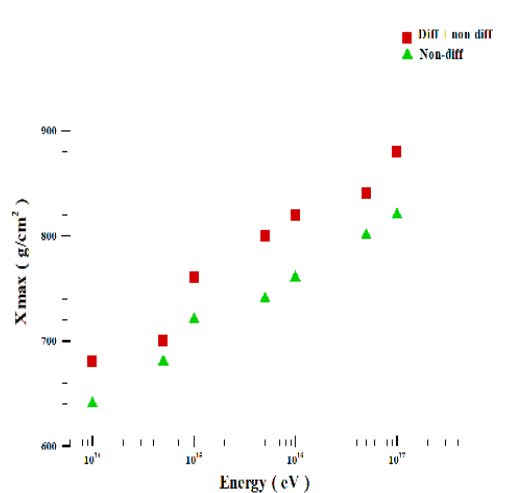
جدول ۱. مقادیر بیشینه تعداد و عمق بیشینه ذرات ثانویه مختلف با احتساب و عدم احتساب برهم‌کنش‌های پراشیده برای ذره اولیه پروتون (آهن) در انرژی اولیه 10^{17} الکترون‌ولت.

Sec. Par.	X_{\max} (g/cm ²)		N_{\max}	
	Non-diff	Diff + Non-diff	Non-diff	Diff + Non-diff
Electron	660 (560)	680 (580)	3.153×10^7 (2.953×10^7)	3.099×10^7 (2.912×10^7)
Muon	820 (720)	880 (780)	4.422×10^5 (6.108×10^5)	4.086×10^5 (5.702×10^5)
Hadron	560 (480)	600 (520)	1.921×10^5 (2.728×10^5)	1.719×10^5 (2.514×10^5)
Nuclei	540 (400)	560 (460)	15.008 (21.1)	12.864 (18.9)

۲ بالا و برای آهن اولیه در شکل ۲ پایین رسم شده است. مقایسه توزیع‌های طولی با در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های ناکشسان ژرف پراشیده با توزیع‌های در غیاب پراش، کند شدن پیشروی ذرات در جو، و افزایش مقدار عمق بیشینه در حضور پدیده پراش را نشان می‌دهد که این امر با وجود ذره پیشرو که الگوی انتقال انرژی در جو را تغییر می‌دهد قابل انتظار است. همچنین با در نظر گرفتن پراش، تعداد ذرات بیشینه کاهش می‌یابد که با توجه به کاهش تعداد ذرات ثانویه در برهم‌کنش‌های پراشیده (در مقایسه با عدم حضور پراش) توجیه‌پذیر است. بنابراین همان‌طور که در

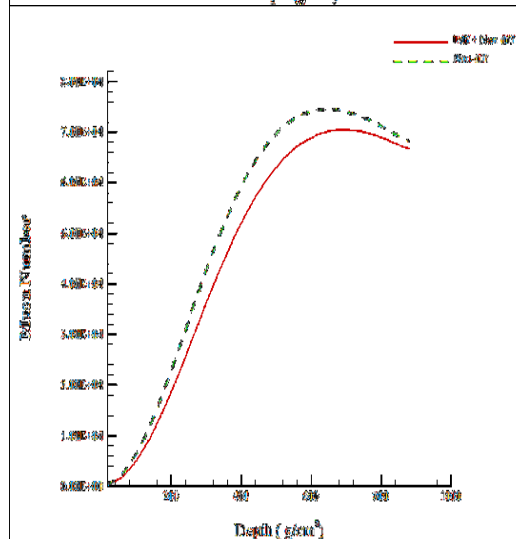
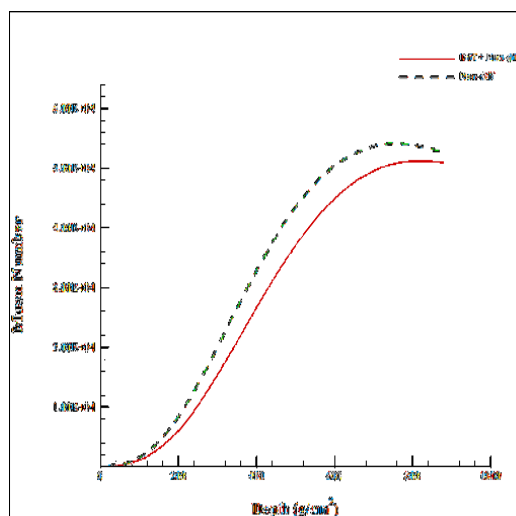
ردیف دوم جدول ۱، وضعیت شبیه‌سازی‌ها را در حالت شبیه‌سازی کامل که شامل برهم‌کنش‌های پراشیده و غیر پراشیده (ناکشسان) می‌شود و شبیه‌سازی حالت غیر پراشیده که برهم‌کنش‌های پراشیده در آنها لحاظ نشده و با برهم‌کنش‌های متناظر غیر پراشیده (ناکشسان) جایگزین شده‌اند نشان می‌دهد. تعداد زیاد آبشارهای شبیه‌سازی شده و همچنین فرآیند میانگین‌گیری به‌منظور افزایش دقت نتایج اعمال شده است. نمودار تعداد میون‌ها در بهمن‌های شبیه‌سازی شده، برحسب عمق جو در انرژی 10^{16} الکترون‌ولت برای پروتون اولیه در شکل

برهم کنش های پراشیده (فارغ از اینکه ذره فرودی بهمین پروتون باشد یا آهن) در هر انرژی داده شده، بیشتر از مقدار متناظر در غیاب پراش است، این امر با توجه به وجود هادرون دست نخورده در برهم کنش های پراشیده که به ذره پیشرو با انرژی قابل تعبیر است، توجیه می شود. ذره پیشرو با انرژی بالا، امکان نفوذ به عمق بیشتری در جو دارد و موجب افزایش عمق بیشینه بهمین می شود. عمق تولید میون به طور واضح به کشسانی برهم کنش های پایون حساس است.



شکل ۳. عمق بیشینه میونی در حضور (مربع قرمز) و غیاب (مثلث سبز) پراش برحسب انرژی برای ذره اولیه پروتون (بالا) و آهن (پایین).

شکل ۲ دیده می شود، وجود پدیده پراش موجب آرام تر و هموارتر شدن گسترش طولی بهمین می شود و نمایه کلی بهمین را اصلاح می کند. نمودارهای گسترش طولی بهمین در حضور و غیاب پراش برای انرژی های ۱۰^{۱۴} تا ۱۰^{۱۷} الکترون ولت هم به همین صورت است، از این رو برای نمونه و اجتناب از تکرار، نمودارهای مربوط به انرژی ۱۰^{۱۶} الکترون ولت آورده شده است.



شکل ۲. توزیع میون ها در شبیه سازی آبشار هوایی با ذره اولیه پروتون (بالا) و آهن (پایین) با انرژی ۱۰^{۱۶} الکترون ولت بر اساس عمق جوی در دو حالت حضور (خط قرمز) و عدم حضور فرآیندهای پراش (خط چین سبز).

همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، عمق بیشینه میونی در بهمین های شبیه سازی شده با در نظر گرفتن

بنابراین، میزان تغییر نسبی در X_{max} و N_{max} میونی پیش‌بینی شده در رهیافت ارائه شده در دو حالت حضور و عدم حضور پراش در برهم‌کنش‌های هادرونی را به صورت:

$$\Delta X \equiv \frac{\langle X_{max}^{\mu} \rangle_{Diff+nonDiff} - \langle X_{max}^{\mu} \rangle_{nonDiff}}{\langle X_{max}^{\mu} \rangle_{Diff+nonDiff}},$$

$$\Delta N \equiv \frac{\langle N_{max}^{\mu} \rangle_{nonDiff} - \langle N_{max}^{\mu} \rangle_{Diff+nonDiff}}{\langle N_{max}^{\mu} \rangle_{Diff+nonDiff}}$$

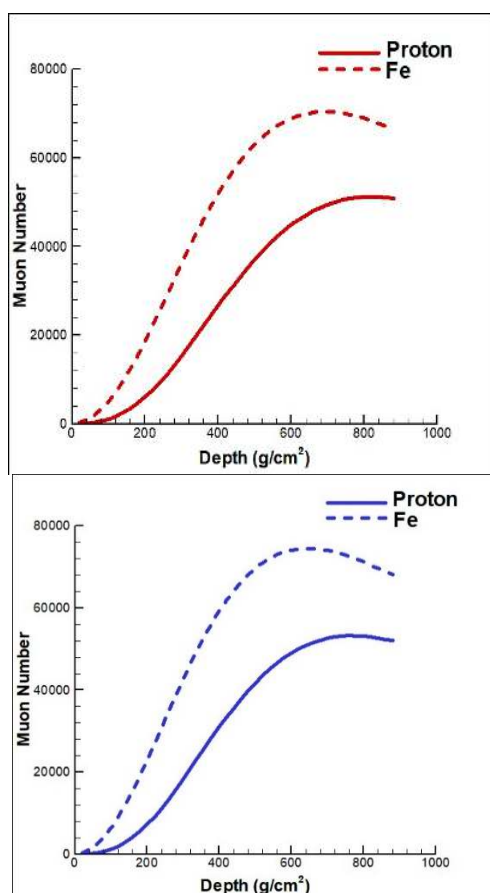
تعریف می‌کنیم. مقدار کمیت‌ها با نتایج متناظر در مرجع [۴] در جدول ۲ مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورد ذرات اولیه پروتون و آهن با انرژی اولیه 10^{17}eV با هسته‌های هوا در این نوشتار با نتایج متناظر در مرجع [۴] با انرژی 10^{20}eV مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، تغییر نسبی مقدار عمق و تعداد بیشینه میونی در شبیه‌سازی ارائه شده که از مدل Sibyll2.3 استفاده شده است بیشتر از مقدار متناظر در مرجع [۴] است. در مقاله مذکور از مدل Sibyll2.1 استفاده شده است که در آن تعداد رخداد‌های پراشیده کمتری در برخوردهای پروتون و آهن با هسته‌های هوا ایجاد می‌شود. از آنجا که برهم‌کنش‌های پراشیده تعداد ذرات ثانویه کمتری تولید کرده و به واسطه ذره دست نخورده پیشرو با انرژی بالا عمق بیشینه بیشتری را تأمین می‌کنند، این حقیقت قابل انتظار است. از طرف دیگر، هر چه انرژی اولیه ذره فرودی بیشتر باشد، احتمال وقوع برهم‌کنش‌های پراشیده افزایش می‌یابد، در نتیجه در انرژی‌های بالاتر تفاوت بیشتری بین دو حالت حضور و غیاب برهم‌کنش‌های پراشیده قابل انتظار است. علیرغم این، با آنکه انرژی فرودی در رهیافت ارائه شده (10^{17}eV) کمتر از انرژی فرودی مرجع [۴] (10^{20}eV) است، نتایج به دست آمده تفاوت بیشتری در عمق و تعداد بیشینه بین دو حالت حضور و غیاب پدیده پراش نشان می‌دهند. این حقیقت با توجه به تولید بیشتر رخداد‌های

این مسئله با توجه به این حقیقت درک می‌شود که میون‌ها در انتهای آبشارهای هادرونی بعد از چندین نسل برهم‌کنش‌های پایون-هوا تولید می‌شوند و در نتیجه یک افزایش بسیار کوچک در کشسانی برهم‌کنش‌های پایون-هوا می‌تواند منجر به یک جابه‌جایی بزرگ در مقدار $\langle X_{max} \rangle$ میون‌های ثانویه شود. همچنین با افزایش مقدار انرژی ذره فرودی، ذرات ثانویه تولید شده در برهم‌کنش‌های انجام شده با ذرات جو دارای انرژی بالاتر و امکان نفوذ به عمق بیشتر در جو هستند، بنابراین انتظار می‌رود با افزایش انرژی در حضور پراش و نیز در غیاب آن، عمق بیشینه جوی افزایش یابد. این حقیقت با روند افزایش عمق بیشینه برحسب انرژی در شکل ۳ تأیید می‌شود. به منظور تحلیل دقیقتر نتایج به دست آمده، مقدار تفاوت عمق و تعداد بیشینه میونی در حالت در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های هادرونی پراشیده از مقدار متناظر در حالت غیاب برهم‌کنش‌های پراشیده را بررسی می‌کنیم.

	Our Result	Ref.[4]
$(\Delta X)_p$	0.068	0.043
$(\Delta X)_{Fe}$	0.076	0.070
$(\Delta N)_p$	0.083	0.071
$(\Delta N)_{Fe}$	0.070	0.069

جدول ۲. مقدار تغییر نسبی کمیت‌های عمق و تعداد بیشینه میونی ΔX و ΔN نتایج به دست آمده در مقایسه با پژوهش [۴].

مقایسه توزیع میون‌ها برای ذرات اولیه پروتون و آهن در انرژی 10^{16} الکترون‌ولت با در نظرگرفتن برهم‌کنش‌های پراشیده (شکل بالا) و نیز بدون احتساب این برهم‌کنش‌ها (شکل پایین) در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ در حضور پراش (شکل بالا) و همچنین در غیاب پراش (شکل پایین) دیده می‌شود، گسترش طولی بهمین به‌ازای ذره اولیه پروتون در مقایسه با ذره اولیه آهن در یک انرژی یکسان هموارتر است، شبیه‌سازی بهمین با ذره فرودی پروتون عمق بیشینه بیشتر و تعداد ذرات بیشینه کمتری را نسبت به ذره فرودی آهن پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۴. نمودار مقایسه توزیع میون برای ذرات اولیه پروتون (خط‌پر) و آهن (خط‌چین) در انرژی 10^{16} الکترون‌ولت با احتساب برهم‌کنش‌های پراشیده (بالا) و بدون احتساب برهم‌کنش‌های پراشیده (پایین).

پراشیده در مدل Sibyll2.3 قابل درک است. استفاده از نسخه Sibyll2.3 در شبیه‌ساز کورسیکا که به تطابق با نتایج LHC و آزمایش‌های نجوم ذره‌ای ارتقا یافته است در پژوهش حاضر در مقایسه با نسخه Sibyll2.1 در شبیه‌ساز ARES در مرجع [۴]، اطلاعات دقیقتری از آبشارهای هوایی را در اختیار ما قرار می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی با مدل‌های برهم‌کنش‌های هادرونی اصلاح و بروز شده با نتایج تجربی LHC، بیان‌گر آن است که سهم رخدادهای پراشیده در برخوردهای هادرونی غیر قابل صرف‌نظر و اغماض است. از طرفی برای سنجش اهمیت میزان تغییر در عمق و تعداد بیشینه میونی، می‌توان از مقایسه مقدار این کمیت‌ها در دو حالت پراشیده و ناکشسان با عدم قطعیت آماری نتایج به‌دست آمده بهره گرفت. به‌عنوان مثال عدم قطعیت آماری نتایج مربوط به پروتون فرودی با انرژی 10^{16} eV در جدول ۳ آورده شده است. ستون نخست مقدار کمیت و ستون دوم مقدار عدم قطعیت آماری در کمیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود:

جدول ۳. میانگین عمق و تعداد بیشینه میونی برای ذره فرودی پروتون با انرژی 10^{16} eV و مقدار عدم قطعیت متناظر.

	Quantity	Error
$X_{\max}^{\text{Diff+NonDiff}}$	880 (gr/cm ²)	4.042 (gr/cm ²)
$X_{\max}^{\text{NonDiff}}$	820 (gr/cm ²)	5.454 (gr/cm ²)
$N_{\max}^{\text{Diff+NonDiff}}$	4.086×10^5	0.080×10^5
$N_{\max}^{\text{NonDiff}}$	4.420×10^5	0.083×10^5

مقدار عدم قطعیت نتایج به‌دست آمده در مقایسه با تغییر در عمق بیشینه میونی (60 gr/cm^2) و همچنین تغییر در تعداد بیشینه میونی (0.364×10^5) کوچک است. بنابراین، مقایسه عدم قطعیت آماری نتایج به‌دست آمده با میزان تغییر در کمیت‌ها در دو حالت پراشیده و ناکشسان گواه خوبی بر اعتبار نتایج به‌دست آمده می‌باشد. نمودار

متأثر از رخداد‌های پراشیده هستند، نتایج رهیافت ارائه شده تفاوت آشکاری بین دو حالت حضور و عدم حضور رخداد‌های پراشیده نشان می‌دهد. استفاده از این مدل با شرایط حضور حداقلی برهم‌کنش‌های پراشیده در رهیافت حاضر، بر اهمیت نتایج بررسی تأثیر پراش بر نمایه طولی آبشار دلالت دارد.

مرجع‌ها

[1] F. Halzen, A.D. Martin, Quarks and Leptons, John Wiley and Sons (1984).

[2] A. Aktas et al. (H1 Collab.), Diffractive Deep Inelastic Scattering with a Leading Proton at HERA, European Physical Journal C 48, (2006) 749-766. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-006-0046-0>.

[3] J.R. Forshaw, D.A. Ross, Quantum Chromodynamics and the Pomeron, Cambridge University Press (1997).

[4] R. Luna, A. Zepeda, Influence of diffractive interactions on cosmic ray air showers, Physical Review D 70 (2004) 114034. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.70.114034>

[5] S.J. Sciutto, The AIRES system for air shower simulations. An update. [arXiv: astro-ph/0106044 \(2001\)](https://arxiv.org/abs/2001.01064)

[6] F. Riehn et al, Hadronic interaction model SIBYLL 2.3d and extensive air shower, Physical Review D 102 (2020), 063002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.063002>

[7] K. Ohashi, H. Menjo, Y. Itow, MC study for the effect of diffractive events on air shower developments, proceedings of science, vol 356 (The 4th KMI International Symposium), (2019). <https://pos.sissa.it/356/026/>

آهن از ۵۶ نوکلئون تشکیل شده است که با توجه به انرژی بالای برخورد هسته آهن با جو زمین، پروتون‌ها و نوترون‌ها به‌طور مستقل و مجزا در برهم‌کنش‌های هادرونی شرکت می‌کنند. انرژی آهن فرودی بین ۵۶ نوکلئون تقسیم می‌شود و نوکلئون‌ها با انرژی کمتری (نسبت به حالت ذره اولیه پروتون) با مولکول‌های جو برخورد می‌کنند و پیش‌روی کمتری را در عمق جو تأمین می‌کنند. همچنین بیشتر بودن تعداد برهم‌کنش‌های هادرونی ناشی از برخورد نوکلئون‌ها به جو، تولید ذرات ثانویه بیشتر را موجب می‌شود که با افزایش بیشینه تعداد ذرات نمایان می‌شود. بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود گسترش طولی بهمن با ذره اولیه پروتون رفتار هموارتر از نمودار بهمن با ذره اولیه آهن است. بنابراین، نمو طولی بهمن با ذره فرودی پروتون در مقایسه با آهن، مشابه با نمودار گسترش طولی بهمن با در نظر گرفتن فرآیند پراش در مقایسه با عدم حضور برهم‌کنش‌های پراشیده است.

نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن پدیده پراش در برهم‌کنش‌های هادرونی در برخورد تابش‌های کیهانی با جو زمین، انتظار می‌رود به‌دلیل وجود هادرون با تندی بزرگ و نیز تعداد ذرات ثانویه کمتر در برهم‌کنش‌های پراشیده، عمق بیشینه جوی در بهمن‌های گسترده هوایی افزایش و تعداد بیشینه ذرات ثانویه کاهش یابد. در مقایسه با بهمن‌های شبیه‌سازی شده در غیاب پراش، گسترش طولی هموارتر و آرام‌تر نمودار بهمن‌های شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های پراشیده، تأثیر پدیده پراش در تغییر الگوی انتقال انرژی در جو را تأیید می‌کند. با آنکه آبشارهای تولید شده با مدل Sibyll کمتر از سایر مدل‌های برهم‌کنش‌های هادرونی

Conferences 208, (2019) 02002.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201920802002>

[10] D. Heck J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw, Report FZKA 6019 (1998) Forschungszentrum Karlsruhe.
<https://www.ikp.kit.edu/corsika/70.php>

[8] K. Ohashi, H. Menjo, Y. Itow, T. Sako, K. Kasahara, Simulation study on the effects of diffractive collisions on the prediction of the observables in ultra-high-energy cosmic ray experiments, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2015).
<https://academic.oup.com/ptep/article/2021/3/033F01/6132351>

[9] T. Pierog, Hadronic Interactions and Air Showers: Where Do We Stand?, EPJ Web of