

میوئوگرافی به عنوان ابزاری نوین در نقشه‌برداری سطحی/زیرسطحی

محسن شریف‌زاده^{۱*}

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

mssharifzadeh@aeoi.org.ir

(تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۲، تاریخ تصویب: مهر ۱۴۰۲)

چکیده

کسب دانش و در ادامه گسترش فناوری آشکارسازی پرتوهای کیهانی منجر به ایجاد ارتباطات نوینی بین رشته‌های دانشگاهی نظیر فیزیک، زمین‌شناسی، کشاورزی، معدن و باستان‌شناسی شده‌است. به سبب برهمکنش این پرتوها با اتمسفر زمین شار گسترده‌ای از ذرات ثانویه تولید و به زمین برخورد می‌کنند. میوئون‌ها به عنوان یکی از این ذرات باردار پرنانرژی قابلیت نفوذ در اجسام بزرگ سطحی و اعماق زمین را دارد که ابزاری نوین در نقشه‌برداری از سطح/زیرسطح را فراهم می‌کند. در این تکنیک با توجه به وابستگی تضعیف و پراکندگی این ذرات باردار به چگالی امکان تصویربرداری از انواع سازه‌های سطحی نظیر آتشفشان، آثار باستانی و ساختارهای عمرانی و یا مخازن، حفرات، پسماندهای رادیواکتیو و رگه‌های معدنی با رزش زیرسطحی فراهم است. هدف در این مقاله، مروری بر تحقیقات صورت گرفته در سنوات اخیر بر روی تکنیک نوین میوئوگرافی است و سعی گردید در اینجا در ساختاری جدید به کاربرد این تکنیک در هر سه حوزه تصویربرداری، نقشه‌برداری و سنجش از راه دور جهت استخراج اطلاعات از حجم‌های بزرگ سطح/زیر سطح زمین است.

واژگان کلیدی: پرتوهای کیهانی، میوئون، نقشه‌برداری، ابزار، نوین، سطحی، زیرسطحی.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

پرتوهای کیهانی در جهات و سرعت‌های مختلف در فضای بیرون از جو زمین وجود دارند. در این بین و به سبب برخورد پیش‌آمده بین این پرتوهای پرنرژی با اتمسفر ذرات ثانویه‌ای ایجاد می‌شوند که یکی از عمده‌ترین آن میوئون نام دارد [۱]. اگرچه درخصوص تاریخ کشف این ذره اختلاف نظرانی وجود دارد اما یک آزمایش معتبر در سال ۱۹۳۷ وجود ذره‌ای باردار با جرم بینابینی الکترون و پروتون را نشان می‌دهد [۲]. در ادامه و با تحقیقات گسترده و دقیق در این حوزه وجود این ذره اثبات گردید [۳]. این ذرات پرنرژی به سبب نیمه‌عمر واپاشی بسیار کوچک عملاً نمی‌توانند بایستی توان رسیدن تا سطح زمین را از منشا تولید خود که اتمسفر است داشته باشند اما به دلیل فرایند اتساع زمان به-عنوان یکی از برایندهای نظریه نسبیت خاص انشتین قادرند به راحتی به زمین رسیده و حتی در اعماق آن نفوذ کنند. این مهم آن را ابزاری بسیار مناسب برای تصویربرداری و تهیه نقشه‌های زیر سطحی می‌کند. نخستین کاربرد عملی این تکنیک تصویربرداری که به میوئوگرافی معروف است به سال ۱۹۵۰ میلادی برمی‌گردد که جورج امکان استفاده از تلسکوپ شمارنده گایگر را برای استنباط ضخامت یخ بالای یک تونل در یک معدن استرالیا مورد مطالعه قرار داد [۴]. در ادامه و با گذشت زمان و رشد تکنولوژی مورد استفاده در ابزار آشکارسازی این ذره مهم شاهد گسترش کاربردهای این تصویربرداری هستیم. نخستین کاربرد میوئوگرافی در باستان‌شناسی به دهه ۱۹۶۰ و تیم تحقیقاتی آلوارز برمی‌گردد که نسبت به جورج موفق به افزودن قابلیت بازسازی مسیر ذرات میوئون در کنار رصد آن‌ها شدند [۵]. در ادامه و طی مطالعه شبیه‌سازی در سال ۱۹۷۹ بکارگیری این ذره در اکتشافات معدن مورد بررسی قرار گرفت [۶]. با گسترش کاربردهای تصویربرداری میوئون تیم‌های ژاپنی به شکل فزاینده‌ای وارد عمل شدند و از این تکنیک نه تنها برای رصد بلکه برای پیش‌بینی توالی زمانی فوران‌های کوه آساما در ۲۰۰۹ استفاده کردند [۷]. در ادامه تصویربرداری با میوئون بیشترین کاربرد خود را در همین حوزه بررسی عملکرد آتشفشان‌های فعال و مهم دنیا داشته‌است. آنچه به عنوان دیدگاهی جدید تصویربرداری میوئون را دچار تحول اساسی کرد بررسی امکان بهره‌گیری از ذرات پراکنده به جای ذرات عبوری از موانع بود که در سال ۲۰۰۳ توسط برزدین و

همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به اینکه این ذرات پرنرژی در برخورد با میدان کولمبی بزرگ هسته در زوایای بزرگی پراکنده می‌شوند این امکان وجود دارد تا بتواند به عنوان فاکتوری مهم در تصویربرداری پس‌پراکنشی از مواد با اعداد اتمی متفاوت در بخش‌های خاصی نظیر ایمنی و امنیت داخلی کشورها مورد استفاده قرار گیرد [۸]. تعیین توزیع چگالی مواد در زیر سطح زمین در گذر زمان، پتانسیل ارائه یک تکنیک نظارتی حساس، مقرون به صرفه و دقیق برای تعیین جابجایی در مقیاس میدانی سیال مخزن ناشی از تزریق یا تولید مایعات یا گازها را می‌دهد. ذخیره سازی کربن زمین شناسی، ذخیره سازی گاز طبیعی، افزایش بازیافت نفت، ذخیره سازی هوای فشرده، ذخیره سازی و بازیافت آبخوان، ذخیره سازی فاضلاب و تولید نفت و گاز نمونه‌هایی از حوزه‌های کاربردی قابل بازرسی توسط تکنیک میوئوگرافی هستند. آشکارسازهای ذرات میوئون یا بر روی سطح زمین و یا درون گمانه قادر به شمارش شدت تضعیف‌شده این ذرات در عبور از مواد با چگالی‌های مختلف در زیر سطح زمین هستند. در روندی پیشروانه و با استفاده از مفهوم توموگرافی این امکان وجود دارد تا از تلفیق شمارش در زوایای مختلف نسبت به بازسازی تصویری سه-بعدی از چگالی زیرسطحی اقدام کرد. با این مفهوم می‌توان با هزینه کمتر و در زمانی مناسب تصاویر پیوسته و زمان-واقعی از جابجایی سیالات در مخازن زیرسطحی را بدست آورد. اگرچه زمان جمع‌آوری داده‌ها در این تکنیک در مقیاس زمانی چند هفته است اما به سبب تغییرات مهم زمین‌شناسی در زمان‌های به نسبت طولانی‌تر کاملاً قابل توجیه است [۹]. هدف در این مقاله، مروری بر تحقیقات صورت گرفته در سنوات اخیر بر روی تکنیک نوین میوئوگرافی است و سعی گردید در اینجا در ساختاری جدید به کاربرد این تکنیک در هر سه حوزه تصویربرداری، نقشه-برداری و سنجش از راه دور جهت استخراج اطلاعات از حجم-های بزرگ سطح/زیر سطح زمین است.

۲- تئوری میوئوگرافی

میوئون‌ها در نتیجه برهمکنش پرتوهای کیهانی با جو زمین ایجاد می‌شوند. در ادامه و به دلیل نیمه‌عمر پایین یک توزیع ذرات با بیشینه در زاویه عمود و کمینه در افق قابل رهگیری است که ذرات با جهت‌گیری افقی برای غلبه بر

نابودی حاصل از واپاشی دارای انرژی‌های بالاتر از ۱۰۰ گیگاوات هستند. پرتوهای کیهانی که به صورت همسانگرد به اتمسفر زمین برخورد می‌کنند دسته‌ای از ذرات به نام مزون‌ها را تولید می‌کنند که محتمل‌ترین آن‌ها پایون نامیده می‌شوند. پایون‌ها در ادامه و مطابق واکنش زیر در بازه زمانی اندک حدود ۲۶ نانوثانیه به یک میونون و یک نوترینومیونون واپاشی می‌کنند:



در ادامه ذرات میونون تولیدی خود در بازه زمانی حدود ۲/۲ میکروثانیه به سه ذره الکترون، نوترینوالکترون، و آنتی-نوترینوالکترون مطابق با مدل زیر واپاشی خواهند کرد:



با داشتن انرژی پایون‌ها امکان تعیین طیف انرژی میونون‌ها فراهم است. در یک حالت قریب به یقین که پایون‌ها قبل از رسیدن به سطح دریا تماماً واپاشی کنند طیف انرژی میونون‌ها با ادغام تابع توسعه پایون در عمق اتمسفر قابل محاسبه است [۱۰-۱۴]. نیمه‌عمر پایین میونون‌های تولیدی در شرایطی که با سرعت‌های نسبیتی حرکت می‌کنند می‌تواند اتساع یافته به‌گونه‌ای که پیش از واپاشی قادر به رسیدن به سطح دریا باشند. شانس بقای این ذرات W_μ در پیمایش طول مشخص L با معادله زیر قابل محاسبه است:

$$W_\mu \rightarrow \exp(-L/L_{decay}) \quad (3)$$

L_{decay} مسافت پیمایش شده توسط این ذره پیش از واپاشی است. در شرایطی که انرژی میونون E_μ بسیار بزرگتر از جرم سکون آن m_μ باشد مقدار این مسافت از فرمولاسیون زیر قابل اندازه‌گیری است:

$$L_{decay} = \gamma \tau = 3 \times 10^8 \left(\frac{m}{s}\right) \times \frac{E_\gamma}{m_\gamma} \times 2.2 \times 10^{-6} (s) = 0.66 \times \frac{E_\gamma}{m_\gamma} (km) \quad (4)$$

مسافت واقعی طی‌شده برای این ذرات که در زاویه θ در اتمسفر در حرکت هستند به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$L = (R^2 \cos^2 \theta + 2Rx + x^2)^{1/2} - R \cos \theta \quad (5)$$

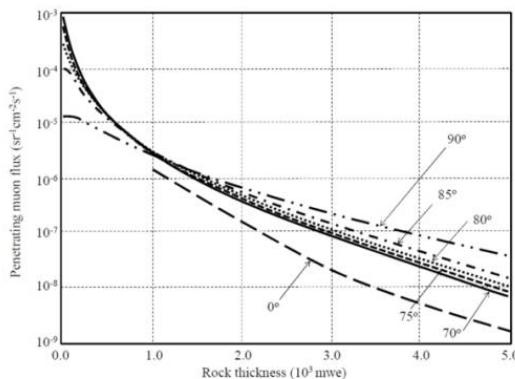
که R شعاع زمین و x ضخامت اتمسفر است. در ادامه و با استفاده از فرمول‌ها و پارامترهای شناخته شده به دست آمده از مدل استاندارد، اتلاف انرژی میون‌ها از طریق ماده را می‌توان به منظور میونوگرافی محاسبه کرد [۱۵]. این ذرات باردار در هنگام عبور از ماده با ایجاد یونیزاسیون در اتم‌ها انرژی خود را از دست می‌دهد که بازای انرژی‌های بالاتر از ۱۰ گیگاالکترون‌ولت رابطه بین نرخ اتلاف انرژی dE/dx ، از طریق یونیزاسیون در سنگ با رابطه زیر بدست می‌آید [۱۶]:

$$\frac{dE_\mu}{dx} \approx 1.888 + 0.0768 \ln \left(\frac{E_\mu}{m_\nu c^2} \right) \left(\frac{MeV}{(g/cm^2)} \right) \quad (6)$$

چنانچه این ذرات باردار دارای انرژی‌های بسیار بالاتر در محدوده تراالکترون‌ولت باشند سهم اتلاف انرژی از طریق یونیزاسیون اتمهای ماده به مقدار کمینه خود میل می‌کند. در این شرایط برهمکنشهای رقیبی نظیر تابش ترمزی، تولید زوج و برهمکنش با هسته اتمهای جاذب سهم بالاتر در اتلاف انرژی را از آن خود خواهند کرد. اتلاف انرژی dE/dx ، از این طریق با رابطه تقریبی زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۶]:

$$\frac{dE_\mu}{dx} \approx 3.9 E_\mu \times 10^{-6} \left(\frac{TeV}{(g/cm^2)} \right) \quad (7)$$

از آنجا که اتلاف انرژی میونون‌ها صرفاً به چگالی جرمی ماده جاذب وابسته است بنابراین با داشتن طول جاذب امکان اندازه‌گیری چگالی میانگین سنگ در طول مسیر فراهم و میونوگرافی به‌عنوان تکنیکی کارآمد در تصویربرداری از حفرات و مخازن زیرزمینی قابل کاربرد است.



شکل ۱- شار میونون‌های نفوذی عمودی و نزدیک افق به صورت تابعی از ضخامت سنگ در واحد کیلومتر آب معادل [۱۶].

۳- سیستم‌های آشکارسازی

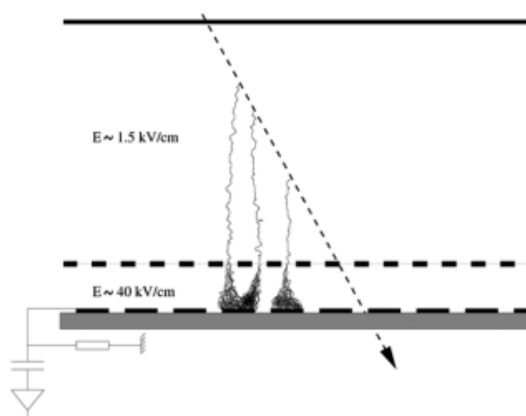
در فرایند آشکارسازی میوتون‌ها یکی از نکات مهم بازدهی جذب این ذرات است. در واقع به سبب شار اندک این ذرات ضروری است فرایند آشکارسازی در مدت زمان مناسب تا رسیدن به دقت مطلوب در تصاویر ادامه یابد. در این میان نوع آشکارساز مورد استفاده می‌تواند تا حدود زیادی در کاهش این زمان موثر باشد. سوسوزن‌ها، آشکارسازهای گازی و امولسیون‌های هسته‌ای انواع مختلف مورد استفاده هستند. ابعاد این سیستم‌های اندازه‌گیری کاملاً تابعی از جسم مورد نظر در تصویربرداری است. نمونه‌های مرسوم این آشکارسازها ابعادی از مرتبه ۳۰ در ۳۰ سانتیمتر مربع و بالاتر که گاهی به چند مترمربع می‌رسد دارند. انتخاب نهایی با ملاحظات همزمان هزینه، دقت شمارش، و امکانات حمل و نقل پرتابل صورت می‌پذیرد.

۳-۱- سوسوزن‌های پلاستیکی

پس از برهمکنش میوتون با ماده سوسوزن انرژی جذب‌شده خود را به صورت جرقه‌های سوسوزنی مرئی نشان می‌دهد که با هدایت به سمت یک تکثیرکننده نوری به الکترون و در ادامه با تقویت به تعداد زیادی از الکترون‌ها متناسب با سهم انرژی جذب‌شده در آشکارساز تبدیل می‌شود. از ویژگی‌های بارز این نوع آشکارسازها ساخت آسان و ارزان در عین استحکام و عدم حساسیت بالا به شرایط محیطی است [۱۷]. ضعف عمده این نوع آشکارساز نیز رزولوشن فضایی آنهاست که ارتباط مستیمی با ابعاد آن‌ها دارد. این آشکارسازها قابلیت ساخت در ابعاد و اشکال متنوعی را دارند و با بکارگیری چند تیوب تکثیرکننده نوری حساس به مکان خواهند شد [۱۸]. چینش‌های مختلف از این سوسوزن‌ها در آزمایشگاه فرمی در ایالات متحده به عنوان آشکارسازهای میوتون طراحی و مورد استفاده‌اند [۱۹-۲۱]. در طراحی‌های مربوط به تصویربرداری درون گمانه به دلیل فضای اندک در دسترس نیاز به ساخت آشکارساز سوسوزن در ابعاد فشرده برای شمارش در بیشینه زاویه قابل پذیرش است [۲۲-۲۴].

۳-۲- آشکارسازهای گازی

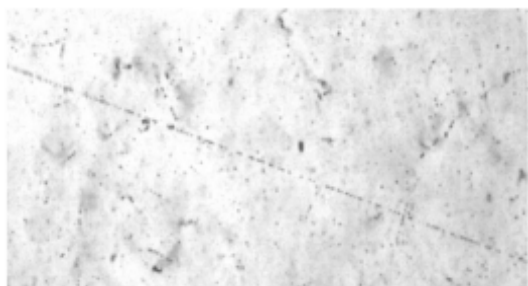
در نتیجه عبور میوتون و یونیزاسیون در محیط گازی این آشکارسازها امکان جمع‌آوری زوج الکترون-یون با استفاده از اختلاف پتانسیل الکتریکی فراهم می‌گردد [۲۵]. از مزایای بارز این آشکارسازها در ردگیری میوتون‌ها توان دستیابی به رزولوشن فضایی در ابعاد چند صد میکرومتر و حداقل ۱۰ برابر بهتر از سوسوزن‌ها و در عین حال هزینه به نسبت اندک می‌باشد.



شکل ۲- مکانیزم جذب میوتون‌های نفوذی در آشکارسازهای گازی [۲۵].

۳-۳- امولسیون‌های هسته‌ای

استفاده از صفحات امولسیونی جهت ردگیری ذرات میوتون دارای مزایای قابل توجهی در قیاس با دو آشکارساز سوسوزن و گازی است. در این بین داشتن رزولوشن فضایی واقعا بالا و عدم نیاز به بکارگیری الکترونیک جهت شمارش از مهمترین ویژگی‌های این نوع از آشکارسازها هستند. ایراد بارز آن نیز نیاز به فرایند ظهور فیلم است که به سبب برهمکنش‌های ذره باردار با میکروکریستال‌های برمید نقره در حافظه امولسیون مانده‌است. در ادامه این امولسیون توسط سیستم اسکنر قابل خوانش است [۲۶-۲۷].



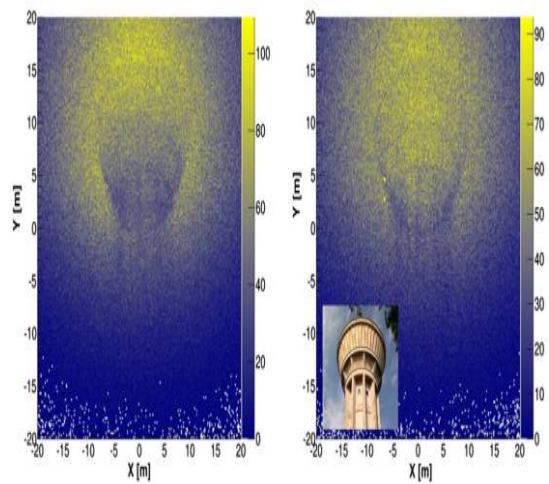
شکل ۳- مسیر حرکت میوتون‌های نفوذی در یک فیلم آشکارسازی امولسیون [۲۶].

۴- روندهای میونوگرافی

میونون‌ها به‌عنوان ذرات باردار در عبور از ماده انرژی خود را به‌طور پیوسته از دست داده و دچار پراکندگی‌های متوالی می‌شوند که منجر به دو روند متمایز قابل کاربرد در میونوگرافی می‌گردد.

۴-۱- آشکارسازی ذرات عبوری

در عبور ذرات باردار از یک ماده جاذب با توجه به انرژی و جهت ورود ذره بیشینه طول قابل پیمایش با استفاده از معادلات ۶ و ۷ قابل محاسبه است. در روندی که برپایه شمارش میونون‌های عبوری در یک جهت مشخص از ماده استوار است نرخ شمارش در طول مشخص کاملاً به چگالی میانگین در آن مسیر وابسته و امکان تصویربرداری میونوگرافی فراهم است [۲۸-۲۹].



شکل ۵- تصویر دوبعدی میونوگرافیک عبوری از برج ساکلی، چپ) با حضور آب درون مخزن، راست) بدون آب. هرکدام از این تصاویر در بازه زمانی چهار روز داده‌برداری با استفاده از آشکارساز تلسکوپی کوچک ۰/۲۵ مترمربعی بدست آمده‌اند [۳۰].

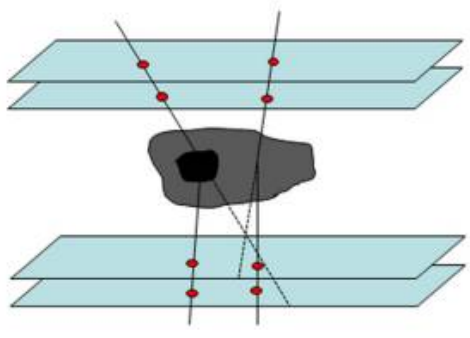
۴-۲- آشکارسازی ذرات پراکنده

توزیع زاویه‌ای میونون‌های پراکنده‌شده در ماده براساس نظریه مولر تقریباً از تابعی گاوسین حول مقدار میانگین صفر با انحراف استاندارد θ_{MS} پیروی می‌کند.

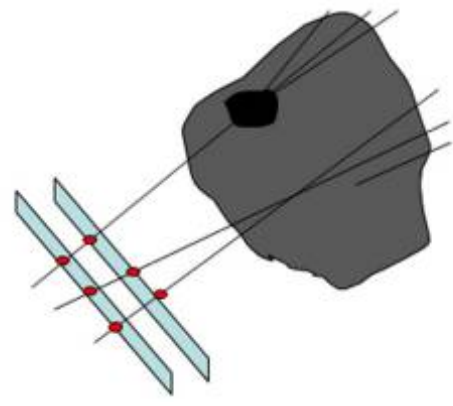
$$\theta_{MS} = \frac{13.6MeV}{\beta cp} Q \sqrt{\frac{x}{X_0} (1 + 0.038 \ln(\frac{x}{X_0}))} \quad (8)$$

که β فاکتور نسبیتی، p تکانه میونون در واحد MeV/c ، x ضخامت ماده جاذب، q بار الکتریکی مطلق میونون و X_0 طول تابش است که از رابطه تجربی زیر بدست می‌آید.

$$X_0 \approx \frac{716.4 g/cm^2}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log(\frac{287}{\sqrt{Z}})} \quad (9)$$



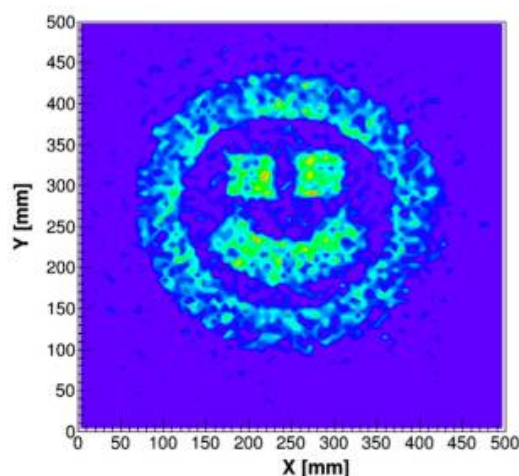
شکل ۶- شماتیک تصویربرداری میونوگرافیک ذرات پراکنده [۲۸].



شکل ۴- شماتیک تصویربرداری میونوگرافیک ذرات عبوری. ناحیه چگال درن جسم به رنگ تیره نشان داده شده‌است [۲۸].

آنچه مشخص است با بهره‌گیری از یک صفحه آشکارسازی تخت تصویری دوبعدی از توزیع چگالی در راستای عمود بر آن صفحه تشکیل می‌شود که برای توسعه آن به سه بعد نیاز است از تعداد بیشتری صفحه حول جسم و یا چرخاندن جسم حول محور ثابت استفاده و در ادامه با الگوریتم‌های بازسازی تصویر سه بعدی ایجاد شود. در تصویربرداری دوبعدی از اجسام بزرگ سهمی از ذرات پراکنده نیز وارد صفحه آشکارسازی می‌شوند که همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده‌است به عنوان نویز به محوشدگی تصویر منجر خواهند شد [۳۰].

همانگونه که مشهود است به مانند روند عبوری در روند پراکنده نیز زاویه پراکندگی به چگالی و البته تاحدودی مقادیر عدد اتمی Z و جرمی A وابسته است [۳۱].



شکل ۷- تصویر دوبعدی میکروگرافیک پراکنده از آرایشی از بلوک‌های سربی و عمود بر محور اسکن [۳۱].

۵- چالش‌های میکروگرافی

جهت کاهش زمان اندازه‌گیری در میکروگرافی ضروری است تا حد امکان با افزایش سطح آشکارساز بیشینه تابش-های موثر بر تصویر را جمع‌آوری کرد. این آشکارسازها نوعاً ابعادی در حدود ۳۰ در ۳۰ سانتیمترمربع تا چند مترمربع دارند. هزینه، قابلیت حمل و میزان شمارش مناسب ابعاد بهینه را مشخص خواهد کرد. پارامتر مهم دیگر تعیین دقت تصویربرداری است. در واقع دقت ذاتاً توسط شدت پرتوهای پراکنده دخیل در تصویر محدود می‌شود.

در ادامه و بطور ویژه در مورد ساختارهای با ابعاد بزرگ بایستی آشکارسازها دارای زاویه بازشدگی مناسب جهت مقبولیت تصویر گرفته‌شده باشند. در ساختارهای تلسکوپي با حداقل یک صفحه آشکارسازی تخت در بالادست و دیگری در پایین‌دست عملاً در یک جهت خاص امکان تصویربرداری است که یکی از راه‌کارها جهت افزایش مقبولیت تصویر می‌تواند بکارگیری صفحات دوار باشد که بتواند جسم را کامل احاطه کند. محدودیت بارز این چینش در ابعاد جسم مورد نظر است فلذا این وضعیت در تصویربرداری از گمانه بیشترین مقبولیت را خواهد داشت. در نهایت اینکه در گستره وسیعی از کاربردهای درجای میکروگرافی نیاز به استحکام کافی سیستم آشکارسازی در

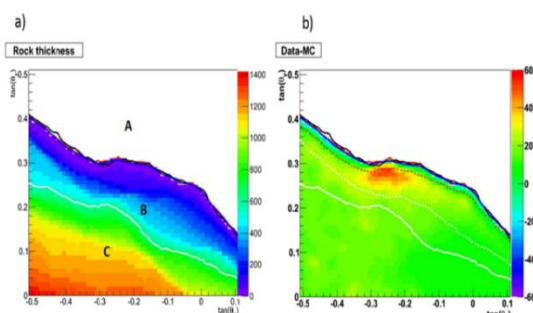
شرایط بد آب و هوایی، ارتعاش، رطوبت، غبار، طوفان، و ... وجود دارد.

۶- کاربردهای میکروگرافی

در واقع به دلیل انرژی بالا ذرات میوتون قادرند در اعماق مواد و موانع نفوذ کنند که امکان تصویربرداری از تغییرات چگالی درون این مواد را در مقیاس‌های بزرگ رو و زیرسطحی فراهم می‌کند.

۶-۱- مطالعات آتشفشان

استفاده از میکروگرافی به‌عنوان تکنیکی نوین در تصویربرداری از درون ساختارهای عظیم زمین‌شناختی در حال افزایش است. در این بین تلفیق دانش فیزیکدانان و زمین‌شناسانی که در حوزه مطالعه آتشفشان‌های فعال کار می‌کنند به نتایج جالب و حائز اهمیتی منتج شده‌است. مطالعات فوق در کشورهای ژاپن، ایتالیا و فرانسه صورت گرفته و اخیراً نیز در کلمبیا در حال انجام است [۳۲-۳۸]. در تصویربرداری دوبعدی از قله یک کوه می‌توان تغییرات ساختار داخلی سنگ‌ها را از روی تفاوت چگالی در تصویر میکروگرافی مشاهده و راجع به فعالیت آتشفشانی آن اطلاعات مفیدی را بدست آورد. در تازه‌ترین فعالیت در این حوزه کوه آتشفشانی استرامبولی در ایتالیا با ارتفاع ۹۲۰ متری از سطح دریا با استفاده از امولسیون طی یک بازه پنج ماهه داده‌برداری شد [۳۹]. آنگونه که در شکل ۸ نشان داده شده‌است این مطالعه ناحیه‌ای با چگالی خیلی کمتر را نسبت به سنگ‌های مجاور را با عدم دقت ۱۸٪ نشان می‌دهد.

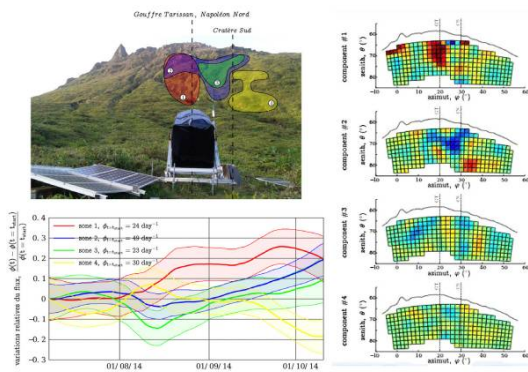


شکل ۸- (a) تصویر میکروگرافیک آتشفشان استرامبولی با آشکارساز امولسینی با رنگ‌آمیزی متناسب با ضخامت سنگ، (b) تمایز بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی مونت کارلو با رنگ‌آمیزی متناسب با شمارش میوتون. ناحیه A آسمان، ناحیه B و C نیز به ترتیب نواحی قابل تصویربرداری و غیرقابل تصویربرداری میکروگرافی به دلیل حضور شمارش نویز پس‌زمینه‌اند [۳۹].

در ارتباط با قله و سوسویوس در ناپل نیز به سبب خطر بالقوه آتشفشان و تاریخچه‌ای که از نابودی شهر باستانی پمپی دارد تصاویر دوبعدی با کمک آشکارسازهای سوسوزن و با دقت ۱۰ متر برای تشخیص ناپیوستگی‌های چگالی به عنوان نواحی مستعد حضور ماگما صورت گرفت [۴۰-۴۴]. قله دیگر پوی دیدوم با ارتفاع ۱۴۶۵ متر به‌نوعی از یک زنجیره آتشفشانی با شکل هندسی و شرایط عملیاتی مناسب و تعداد زیادی از داده‌های پیشین برای هدف میوتوگرافی با صفحات آشکارسازی تلسکوپی TOMUVOL انتخاب گردید [۴۵-۴۸]. در سال ۲۰۱۳ نیز در یک کارگروه همکاری مشترک بین TOMUVOL و TOMUVOL که هرکدام از آشکارسازهای خاص خود بهره می‌برند نقاط قوت و ضعف سیستم‌های خود را در کیفیت تصاویر حاصله با هم مقایسه کردند [۴۹]. تهیه نقشه‌های زمانی از روند حرکتی ماگما درون قله آتشفشانی ساتسوما-ایوجیما در ژاپن طی دو فصل در سال ۲۰۱۳ با استفاده از شش لایه صفحات سوسوزنی حساس به مکان و بهره‌گیری از صفحه سربی با ضخامت ۱۰ سانتیمتر جهت حذف نویزهای پس‌زمینه صورت گرفت [۵۰-۵۱]. در سال ۲۰۰۷ گروه فرانسوی دیافین با استفاده از آشکارسازهای سوسوزن تلسکوپی به شکل گسترده‌ای در زمینه تحقیقات میوتوگرافی وارد شدند. آن‌ها به توسعه روش‌های آنالیز داده پرداختند [۵۲] و پس از مطالعات مختلف تصاویر اخذشده از آتشفشان‌های فعال در کشورهای فرانسه، ایتالیا و فیلیپین تلسکوپ سه لایه بهینه با قابلیت حذف کسریزگی از نویزهای ناشی از پرتوهای پس‌زمینه کبهانی را ارائه دادند [۵۳-۵۴]. تحلیل نتایج توزیع زمانی ماه‌ها تصویربرداری قله سوفیر در گوادلوپ در شکل ۹ از روند پویایی سیستم هیدروترمال این قله با تبادل بزرگ گرما و آب حکایت دارد [۵۵].

در نمونه دیگری از تلسکوپ‌های سوسوزنی-MU RAY مورد استفاده در ایتالیا و با مشارکت INFN/INGV که در سال ۲۰۰۹ ساخته شد بر روی جنبه‌های ارتقاء رزولوشن زاویه‌ای تمرکز یافت [۵۶]. آتشفشان‌های اتنا و استرومبولی در تحقیقات دیگری نیز مورد مطالعه قرار گرفتند که در آن‌ها از آشکارساز چرنکوف به عنوان سنسورهای متمایز بهره‌برداری شد [۵۷]. در ژاپن تحقیقات مفصلی بر روی تصویربرداری همزمان از مجموعه‌ای از قلل آتشفشانی ساکوراجیما در حال انجام

است [۵۸-۶۲]. در حال حاضر و با افزایش تحقیقات در این حوزه و پیوستن کشورهای دیگری نظیر بلژیک و مجارستان فرصت بیشتری برای هماهنگی و هم‌افزایی بین‌المللی بر روی مطالعات آتشفشان‌ها با استفاده از تکنیک تصویربرداری میوتون فراهم شده‌است.



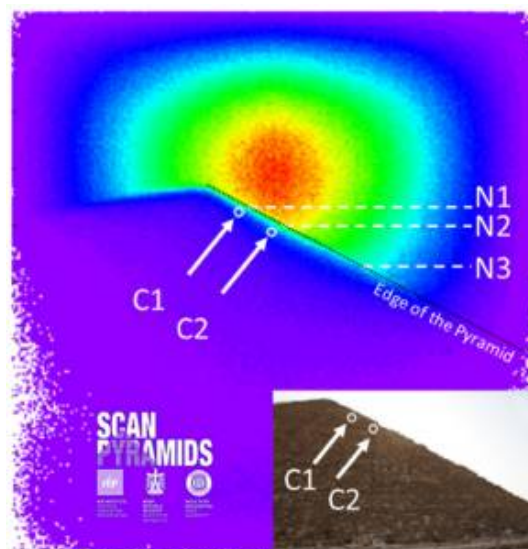
شکل ۹- تصویربرداری میوتوگرافیک عملکردی آتشفشان سوفیر در گوادلوپ، چپ بالا) تصویر دوربین تلسکوپی قرارگرفته روبروی قله، چپ پایین) تصاویر پویا مربوط به چهار ناحیه مورد نظر در قله، و راست) تحلیل مولف‌های برداری چهار تصویر [۵۵].

۲-۶- مطالعات باستان‌شناسی و عمرانی

ویژگی منحصربه‌فرد ذرات پراثری میوتون در عبور از موانع بزرگ در اوایل دهه ۱۹۶۰ آلوارز را بر آن داشت تا از اهرام ثلاثه مصر تصویربرداری کنند [۶۳]. این کار با نصب آشکارسازهای بزرگ روبروی هرم چفرن انجام گردید و منجر به کشف اتقاق‌های مخفی با ابعاد بزرگ شد. در ادامه و به سبب ابعاد بزرگ این هرم‌ها همچنان مطالعات باستان‌شناسی با استفاده از تصویر میوتوگرافی بر روی آن‌ها ادامه پیدا کرد. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۱ منچاکا و همکاران با نصب اتاقتک‌های تناسبی بر روی هرمی دیگر در مکزیک موفق شدند پس از سه سال داده‌برداری شکل واقعی را باوجود غیرهمگنی‌های زیاد در ساختار هرم بازسازی تصویر کنند [۶۴]. در سال ۲۰۱۵ پروژه‌ای تحت عنوان اسکن هرم‌ها با مشارکت پژوهشگاه HIP و دانشگاه مهندسی قاهره آغاز شد [۶۵]. در سال ۲۰۱۶ و پس از نصب امولسیون‌هایی توسعه‌یافته در نقاط مختلف پیرامون هرم خوفو حفره‌ای در پشت ضلع شمالی کشف شد [۶۶]. این اکتشاف پس از سه ماه داده‌برداری (نقطه C2) و در ادامه حفره‌ای دیگر در ارتفاع ۱۱۰ متری (نقطه C1) آنگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است یافت شد.

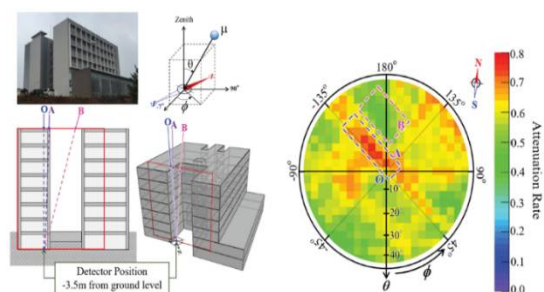
۶-۳- مطالعات پسماند رادیواکتیو

در ارتباط با دفن پسماندهای رادیواکتیو ناشی از نیروگاه‌های اتمی و مراکز تشخیص و درمان بیمارستانی در اعماق زمین، استفاده از تکنیک میونوگرافی آشکارسازهای پراکنده روشی مناسب و عملیاتی است که اگرچه به مدت زمان زیادی برای داده‌برداری نیاز دارد اما بدلیل عمق نفوذ این ذرات جایگزین سایر روش‌ها نظیر شمارش پرتوهای گامای گسیلی از این مواد خواهد بود. در ارتباط با ایمنی و امنیت هسته‌ای و خطرات ناشی از ورود قاجاق پسماندهای و چشمه‌های رادیواکتیو از مرزها [۷۳-۷۵] اگرچه اسکنرهای ایکس و گاما و یا دروازه‌های پایش تشعشعات ذاتی این مواد برای تشخیص عبور غیرمجاز بصورت مرسوم مورد استفاده است اما در شرایطی خاص و حفاظ‌گذاری پرتوی مناسب امکان عبور ناشناس وجود دارد که در این صورت امکان آلودگی زیست‌محیطی فوق‌العاده و بالتبع خسارات بزرگ در حوزه‌های سلامت و مالی برای کشور وجود دارد [۷۶-۷۷]. در این مواقع و به عنوان خط دوم امنیتی می‌توان از دروازه‌های پایشگر میونونی بهره برد [۷۶]. اخیراً پیشنهاد پژوهشی توسط گلاسر و همکاران بر روی امکان بکارگیری آشکارسازهای نواری سیلیکونی با ابعاد میکرومتر برای دروازه میونونی مورد بررسی قرار گرفته است [۷۸-۷۹]. از سال ۲۰۱۲ نمونه‌ای عملیاتی از دروازه میونونی در فرودگاه باهاما برای اسکن کانتینرهای جابجایی بین‌المللی کالا مورد استفاده است که به اسکن چندین هزار وسیله تا کنون پرداخته است [۸۰]. استفاده از میونوگرافی برای امور پادمانی مرتبط با صنعت هسته‌ای نیز بازرسی کسک‌های ذخیره-ساز سوخت مصرفی رآکتورها به‌منظور کشف موارد احتمالی تخلیه و یا جایگزینی آن با مواد سنگین دیگر و بدون اطلاع بازرسان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷۷ و ۸۱ و ۸۲]. در ارتباط با حادثه اتمی فوکوشیما در کشور ژاپن در سال ۲۰۱۱ مطالعات گسترده-ای صورت گرفت [۸۳-۸۶]. در این حادثه شعاعی حدود ۲۰ کیلومتر اطراف نیروگاه اتمی به عنوان شعاع آلوده از طرف دولت در نظر گرفته شد. یکی از سوالات اساسی در آن زمان مکان پخش سوخت ذوب‌شده به عنوان منشأ قوی آلودگی بود که بدلیل دز بالای محیطی در محدوده میلی‌سیورت بر ساعت استفاده از میونوگرافی به‌عنوان ابزار تصویربرداری بیرون از محوطه مطرح گردید. تابش زیاد گاما ناشی از



شکل ۱۰- نتایج تصویربرداری میونوگرافی از هرم بزرگ از وجه شرقی با موقعیت شکاف‌های بیرونی (N1، N2، N3) و حفرات درونی (C1 و C2) با استفاده از آنالیز میونون‌های پخش شده در امتداد لبه هرم [۶۶].

تحقیقات پیرامون تصویربرداری میونوگرافی از سازه‌های بزرگ صرفاً به هرم‌ها خلاصه نمی‌شود. در پژوهشی که اخیراً تعریف گردید قرار است بنای کاستاس آمفیپولی در یونان اسکن شود [۶۷]. دسته دیگری از تحقیقات بر روی صد جابجایی‌ها و تغییرشکل‌های ساز-های قدیمی تمرکز دارند که از آن جمله می‌توان به مطالعه لژ پالازودلا در برشا با استفاده از میونوگرافی اشاره کرد [۶۸]. در مطالعات مربوط به این حوزه غالباً از روند آشکارسازی میونون عبوری برای تصویرسازی استفاده می‌شود [۶۹-۷۱]. در مطالعه سازه‌ای نوین که اخیراً با یک تلسکوپ میونونی سیار انجام گرفت آنگونه که در شکل ۱۱ پیداست می‌توان به چگونگی نقشه‌برداری از هندسه داخلی یک سازه پیچیده با استفاده از آشکارسازی میونون‌های عبوری پی برد [۷۲].



شکل ۱۱- میونوگرافی از ساختمانی جدید، (چپ) نماهایی از ساختمان و ساختار درونی آن، (راست) نقشه تضعیف میونون در نقطه O محل قرارگیری آشکارساز [۷۲].

رادیاویوتوپ سزیم-۱۳۷ در چنین شرایطی و تاثیر فراوان آن در ایجاد نویز به عنوان تابش پس‌زمینه با بکارگیری حفاظت‌های سری مناسب و همچنین مدارات همزمانی تا حدود زیادی کاهش یافت [۸۵و۸۳].

۴-۶- مطالعات معادن

مطالعات ساختارهای زیرسطحی و همچنین خاک از جمله حوزه‌های مهم کاربردی برای تصویربرداری میونوگرافی است. برخی از تحقیقات جهت مکان‌یابی سنگ‌های معدنی چگال نظیر اورانیوم، طلا و یا سرب صورت گرفته است [۸۷]. میونوگرافی این قابلیت را دارد که برای حرکت در طول گمانه و بررسی حوزه‌های جدید معدنی سازگار و مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۶- مطالعات مخازن زیرمینی

بکارگیری تکنیک میونوگرافی می‌تواند تا حدود زیادی مانع از حفاری بی‌رویه و هزینه‌شود. با بکارگیری آرایه‌ای از آشکارسازها امکان تصویربرداری سه‌بعدی از گمانه فراهم می‌شود. بررسی هیدرولوژی خاک، شل‌های ژئولوژی و بررسی ذخایر کربن دی‌اکسید موجود در عمق زیاد از جمله کاربردهای دیگر مهم میونوگرافی هستند [۸۸].



شکل ۱۲- نمونه اولیه آشکارساز میونون گمانه متشکل از لایه‌هایی از پلی‌استایرن میله‌ای و فوتودتکتورهای سیلیکون [۹۰].

در ارتباط با مخازن کربن ژئولوژیکی می‌توان با استفاده از تعبیه آرایه‌ای از آشکارسازهای با ابعاد مناسب درن گمانه افقی و نزدیک مخزن غلظت کربن دی‌اکسید را در گذر زمان و تزریق آن به درون مخزن رصد کرد. تحقیقات میدانی نشان می‌دهند که امکان رصد جایگزینی خلل و فرج در مخزنی با ۲۰٪ تخلخل توسط کربن دی‌اکسید واقع در عمق ۹۰۰ متری زیر زمین و در بازه زمانی چند هفته تا چندماهه فراهم است [۸۹]. نمونه اولیه یک سیستم

میونوگرافی سازگار با ابعاد و شرایط محیطی پیچیده گمانه توسط بونویل و همکاران با استفاده از ۴ لایه یک سانتیمتری از میله‌های سوسوزنی از جنس پلی‌استایرن و با روکش تیتانیوم دی‌اکسید ساخته شد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۹۰].

۷- میونوگرافی در نقشه‌برداری و سنجش از راه دور

در مطالعه‌ای توسط کنستانتین در سال ۲۰۲۰ امکان بهره‌گیری از میونوگرافی در شناسایی خطرات زمین‌شناختی در قوس آتشفشانی فعال جنوب دریای اژه (SAAVA) بررسی شد. از آنجا که ساختار پیچیده آتشفشان‌ها هر دو نقشه‌برداری زمین‌شناسی و ژئوفیزیک معمولی را به چالش می‌کشد میونوگرافی به عنوان یک تکنیک جدید سنجش از دور می‌تواند از نفوذ پرتوهای کیهانی در ساختار قله تصاویری با وضوح فضایی بالا از فعالیت آتشفشانی تهیه کند [۹۱]. اندازه‌گیری‌های جزر و مدی از اهمیت بالایی برخوردار هستند، زیرا داده‌های ضروری را برای حفاظت از جوامع ساحلی و ترافیک دریایی در اختیار ما قرار می‌دهند. اگرچه در حال حاضر، ایستگاه‌های اندازه‌گیری جزر و مد و ارتفاع سنجی لیزری برای این اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود اما در کاری تحقیقاتی توسط تاناکا و همکاران در سال ۲۰۲۱ بکارگیری حسگرهای میونوگرافی در زیر بستر دریا در داخل یک تونل زیردریایی که زیرساخت‌های برقی و مخابراتی به راحتی در دسترس باشند به عنوان حسگرهای از راه دور مورد بررسی قرار گرفت. در این کار، اولین آرایه آشکارساز ذرات زیر دریا در جهان (آشکارساز عمقی زیردریایی TS-HKMSDD) در زیر بستر دریای توکیو مستقر و داده‌های تصویربرداری ۸۰ روزه متوالی به عنوان اطلاعات جزر و مدی پیوسته در طول تونل برای نظارت بر این آبراه پر ترافیک در توکیو و سایر مناطق مهم ترافیک دریایی در سراسر جهان استفاده شد [۹۲]. در مطالعه دیگری توسط تاناکا و همکاران در سال ۲۰۲۰ میونوگرافی جهت سنجش از راه دور ضخامت رسوبات نزدیک دهانه آتشفشانی فعال و در حال فوران به-

۱ Tokyo-bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector

منظور کسب اطلاعات مفیدی در مورد بزرگی و شدت فوران‌های آتشفشانی انفجاری و پتانسیل انتقال مجدد رسوبات به عنوان جریان‌های آتشفشانی خطرناک استفاده شد [۹۳]. استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشینی بر روی داده‌های سنجش از دور، فرصت‌های جدیدی را در طبقه‌بندی خودکار و پیش‌بینی پدیده‌های ژئوفیزیکی، از جمله مواردی که باعث ایجاد مخاطرات طبیعی مانند رانش زمین یا فوران‌های آتشفشان می‌شوند، باز کرده‌است. تصویربرداری مپوئوگرافی می‌تواند تغییرات ساختاری و چگالی را در اجسام زمین‌شناسی در ارتباط با پدیده‌های ژئوفیزیکی زیرسطحی نشان دهد. در مطالعه‌ای که توسط اولاه و همکاران در سال ۲۰۲۲ صورت گرفت از تلفیق پیشرفت‌های اخیر در پردازش تصویر مپوئوگرافی مبتنی بر یادگیری ماشین جهت آشکارسازی پدیده‌های آتشفشانی زیرسطحی و پیش‌بینی فوران آتشفشان استفاده گردید [۹۴]. حفراتی که توسط حیوانات نزدیک رودخانه ایجاد می‌شود عاملی مهم در پدیده لوله کشی آب و در ادامه آسیب ساختاری و ریزش در هنگام سیلاب است. در حال حاضر، مطالعات موردی در این حوزه عمدتاً با مدیریت و نگهداری سروکار دارد، در حالی که اسناد بسیار کمی برای ارزیابی مکانیسم‌های احتمالی خرابی ناشی از حیوانات وجود دارد. در تحقیقی که توسط باچانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ صورت پذیرفت امکان بهره‌برداری از رادیوگرافی میوئون‌های عبوری برای بررسی وضعیت حفاظت داخلی خاک‌ریزهایی که به‌طور آشکار در اثر فعالیت‌های حیوانات آسیب دیده‌اند، بررسی شد [۹۵]. به‌عنوان بخشی از کار ساخت و ساز برای ساخت متروی جدید در حومه پاریس (خط ۱۵)، یک تلسکوپ میوئون به مدت یک سال به ماشین حفاری تونل متصل شد و توانست مقادیر زیادی از داده‌های مربوط به چگالی زمین اطراف تونل را جمع‌آوری کند. در تحقیقی که توسط شوالیر و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی این ایده پرداخته شد که آیا مووگرافی متحرک قادر به ثبت وجود سازه‌های دست‌ساز است یا خیر و در صورت لزوم، چگونه می‌توان هندسه آن‌ها را به صورت سه‌بعدی و با دانش قبلی کمی بازسازی کرد [۹۶]. سنجش از دور به ابزاری ضروری برای نظارت بر پدیده‌های مختلف روی زمین از جمله ناآرامی‌ها و فوران‌های آتشفشانی تبدیل شده است [۹۷]. اگرچه اندازه‌گیری‌های زمینی در درک فعالیت‌های آتشفشانی قدرتمند هستند، اما در ارتباط با

آتشفشان‌های فعال که به‌دلیل عوامل مختلف از جمله توپوگرافی شیب‌دار و محیط‌های خطرناک دسترسی به آن‌ها میسر نیست، بکارگیری سیستم‌های سنجش از راه دور بسیار اهمیت دارد. تفسیر تصاویر نوری با مشاهده تغییرات مورفولوژی سطح یکی از روش‌های مورد استفاده است [۹۸]. استفاده از تصاویر رادار نیز منجر به مشاهده تغییرات مورفولوژیکی می‌شود. در حالی که امواج رادار به دلیل طول موج طولانی‌تر، وضوح فضایی کمتری نسبت به تصاویر نوری دارند، می‌توانند بدون توجه به آب و هوا در روز و شب عکس بگیرند و همچنین جابجایی‌های سطحی ناشی از دلایل مختلف از جمله مهاجرت مایعات ماگمایی در عمق و ناپایداری ساختمان آتشفشان را شناسایی کنند [۹۹-۱۰۰]. مهاجرت مایعات ماگمایی باعث آزاد شدن گازهای محلول در آن‌ها می‌شود. این گازها در سطح به صورت ناهنجاری‌های شیمیایی و دمایی مشاهده می‌شوند [۱۰۱]. سنجش از دور حرارتی با استفاده از مادون قرمز یا مادون قرمز حرارتی می‌تواند ناهنجاری‌های حرارتی را در وضوح فضایی بالا تشخیص دهد. بنابراین سنجش از دور حرارتی یکی از تکنیک‌های حیاتی برای درک فعالیت‌های آتشفشانی است. استفاده از تکنیک مپوئوگرافی در قیاس با روش‌های مورد اشاره در سنجش از راه دور دارای این برتری است که تا زمانی که اختلاف چگالی بین ساختارهای مجاور در حجم مورد اندازه‌گیری به اندازه‌ای کافی بزرگ باشد، در یک مقیاس زمانی معقول بتواند به ارائه نقشه تغییرات زمانی و مکانی محتوای درون حجم و استخراج اطلاعات عملکردی به‌خصوص در مورد آتشفشان‌ها بپردازد. در کاری تحقیقاتی که توسط مارتیو و همکارانش در سال ۲۰۱۸ صورت گرفت جزئیات یک آشکارساز میوئون متحرک ارتقا یافته با هدف انجام اندازه‌گیری در نقاط مختلف اطراف تپه آپولونیا در نزدیکی تسالونیک در شمال یونان ارائه شد [۱۰۲]. تکشیرا و همکارانش در سال ۲۰۲۳ مقاله‌ای را در ارتباط با استفاده از تکنیک مپوئوگرافی به‌منظور نقشه‌برداری در ارتباط با مسائل ژئوفیزیکی به‌عنوان هدف نهایی پروژه همکاری مشترک تحت عنوان لومو^۱ در کشور پرتغال منتشر کردند [۱۰۳]. تکشیرا و همکارانش در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ بر روی استفاده از این تکنیک نوین نقشه‌برداری در اطراف گسل موجود در معدن لوسان در کشور پرتغال کار کردند و

^۱ LouMu project

موفق به تصویربرداری با کنتراست قابل قبول بین دو ناحیه مجاور اطراف این گسل شدند که به سبب جابجایی زمین-شناختی در دو طرف ایجاد شده بود [۱۰۴-۱۰۵].

۸- نتیجه گیری

استفاده از تکنیک نوین میوئوگرافی این امکان را به بشر می‌دهد تا بتواند تصاویری کاربردی را از اجسام بزرگ در سطح زمین و تغییرات چگالی در اعماق زمین بدست آورد در حالیکه با روش‌های پیشین تصویربرداری عملاً این امکان میسر نبود. بدون هرگونه تخریب می‌توان از ساختار درونی قله آتشفشانی به منظور مطالعه فعالیت‌های درون آن و رفع خطرات احتمالی ناشی از فوران به‌ویژه در مورد آتشفشان-های فعال در سراسر دنیا اطلاعات مفید و نقشه‌های مکانی و زمانی تهیه کرد. در ارتباط با ساختارهای باستانی این امکان فراهم است تا با تصویربرداری از درون ساختار بصورت دو و یا سه‌بعدی اطلاعات مفیدی را در اختیار باستان-شناسان قرار دهد. در ارتباط با امور ایمنی و پادمان هسته-ای که با دزهای بالا از مواد رادیواکتیو سروکار وجود دارد میوئوگرافی روشی منحصر به فرد در مکان‌یابی مواد با چگالی بالا از محیط پیرامونی کم‌چگال است. مطالعات مخازن هیدروکربنی و کسب اطلاعات مفید در حوزه ذخیره‌سازی گاز تزریقی کمک شایان توجهی به کسب اطلاعات از حجم تخلخل مخزن و رفع موانع ازدیاد برداشت خواهد داشت و در انتها با استفاده از این تکنیک می‌توان با هزینه‌های کاهشی ناشی از عدم نیاز به حفاری‌های متعدد در حوزه-های معدنی به اکتشاف فلزات گرانبها نظیر اورانیوم، طلا و سرب پرداخت. مزیت بارز این روش در فراهم‌ساختن امکان تهیه نقشه تغییرات مکانی و زمانی چگالی درون ساختارهای رو- و زیرسطحی حجیم است که می‌تواند کمک شایان توجهی به استخراج اطلاعات مهم زمین‌شناختی کند. در ارتباط با شرایط خاص فیزیکی و شیمیایی خطرناک در تحقیق اطراف قله‌های فعال آتشفشانی استفاده از این تکنیک نوین با شتاب بالایی در کشورهای مختلف جهان در

حال گسترش است. در موقعیت‌های مختلف مطالعات سدها، جزر و مد، مخازن زیرزمینی آب و هیدروکربن با استفاده از نقشه‌های تولیدی توسط این تکنیک تصویربرداری امکان بررسی عملکردی و یا اطلاع از حضور حجم‌های مهم آب و هیدروکربن و یا تغییرات ضخامت به-سبب عوامل فرسایش و یا رسوب‌گذاری به صورت اندازه-گیری از راه دور فراهم خواهد بود. آنچه این تکنیک را در قیاس با دیگر تکنیک‌های سنجش از دور و با هدف تصویربرداری و نقشه‌برداری ممتاز می‌سازد بهره‌گیری از نفوذ بسیار بیشتر میوئون‌ها درون ساختارهای حجیم است که منتج به امکان تصویربرداری از درون این ساختارها و تشخیص نواحی با چگالی‌های متفاوت می‌گردد. در فرایندهای سنجش از دور وقتی جنبه تعیین تغییرات مورفولوژی سطوح اهمیت دارد روش‌های نوری و رادار پیشنهاد می‌گردد اما چنانچه استخراج اطلاعات از درون اجسام و یا زیر سطح مورد نظر باشد آنگاه این امواج الکترومغناطیسی فاقد نفوذ کافی به سبب طول موج بالای خود هستند و در این شرایط بهره‌گیری از تکنیک میوئوگرافی در دو روند متداول شمارش ذرات میوئون عبوری و پس‌پراکنده می‌تواند انقلابی در استخراج اطلاعات و پارامترهای مهم درون این اجسام ایجاد کند. در ارتباط با نقاط ضعف این تکنیک باید به شار اندک این ذرات کیهانی به خصوص با افزایش عمق زمین و یا ضخامت ماده جاذب اشاره کرد که سبب می‌شود برای دستیابی به تصاویر با کیفیت لازم و رزولوشن قابل قبول، زمان جمع‌آوری داده گاهاً هفته‌ها و ماه‌ها به طول بیانجامد که در مواقعی که نیاز به تصویربرداری آنلاین وجود داشته باشد از کارایی لازم برخوردار نیست. البته در راستای کاهش این ایراد اساسی سعی می‌شود بر روی ارتقاء بازدهی جذب میوئون توسط بخش آشکارسازی سیستم‌های میوئوگرافی کار شود که سبب می‌شود سهم حداکثری پرتوهای ورودی به این آشکارسازها برای افزایش کیفیت تصویر خوانش شود.

مراجع

- [۱] P. Galison, The discovery of the muon and the failed revolution against quantum electrodynamics, Centaurus 26 (1983) 262.
- [۲] C.D. Anderson, S. Neddermeyer, Note on the nature of cosmic-ray particles, Phys. Rev. 51, 884 51 (1937) 884, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.884>.

- [۳] C.D. Anderson, Early work on the positron and muon, *Am. J. Phys.* 29 (1961) 825, <https://doi.org/10.1119/1.1937627>.
- [۴] E.P. George, Cosmic rays measure overburden of tunnel, *Commonwealth Eng.* July 1 (1955) 455.
- [۵] L.W. Alvarez, et al., Search for hidden chambers in the pyramids, *Science* 167 (1970) 832.
- [۶] L. Malmqvist, G. Jönsson, K. Kristiansson, L. Jacobsson, Theoretical studies of in-situ rock density determination using cosmic-ray muon intensity measurements with application in mining geophysics, *Geophys.* 44(9) (1979) 1549, <https://doi.org/10.1190/1.1441026>.
- [۷] H. Tanaka, et al., Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): first results from measurements at Asama volcano, Japan, *Geophys. Res.Lett.* 36 (2009) 1944, <https://doi.org/10.1029/2009GL039448>.
- [۸] K.N. Borozdin, et al., Radiographic imaging with cosmic-ray muons, *Nature* 422 (2003) 277, <https://doi.org/10.1038/422277a>.
- [۹] Flygare J, Bonneville A, Kouzes R, Yamaoka J, Lintereur A. 2018 Muon borehole detector development for use in 4-D tomographic density monitoring. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 65, 2724–2731. (doi:10.1109/TNS.2018.2869196).
- [۱۰] R. Bull, W.F. Nash, B.C. Rustin, *Nuovo Cimento, XLA*, 2, 365-384 (1965).
- [۱۱] S. Matsuno, F. Kajino, Y. Kawashima, T. Kitamura, K. Mitsui, et al., *Phys. Rev. D* 29 1-23 (1984).
- [۱۲] E.V. Bugaev, A. Misaki, V.A. Naumov, T.S. Sinigovskaya, S.I. Sinigovsky, et al., *Phys. Rev. D*, 58, 054001 (1998).
- [۱۳] T. Gaisser and T. Stanev, *Phys. Lett. B*, 667, 254–260 (2008).
- [۱۴] T.K. Gaisser, *Earth Planets Space*, 62, 195–199 (2010).
- [۱۵] D.E. Groom, N.V. Mokhov and S.I. Striganov, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78, 183–356 (2001).
- [۱۶] R.K. Adair, and H. Kasha in: V W Hughes, C S Wu (Eds.), *Muon Physics*, 1, p 323 (New York: Academic Press) (1976).
- [۱۷] L. Alvarez, A.H. Compton, *Phys. Rev.* 43 (1933) 835.
- [۱۸] S. Piatek, *Silicon Photomultiplier. Operation, Performance & Possible Applications*, 2019, (https://www.hamamatsu.com/sp/hc/osh/sipm_webinar_1.10.pdf).
- [۱۹] G. Baccani, et al., The MIMA project. design, construction and performances of a compact hodoscope for muon radiography applications in the context of archaeology and geophysical prospections, *JINST* 13 (11) (2018) P11001, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/11/P11001>.
- [۲۰] G. Saracino, et al., The MURAVES muon telescope: technology and expected performances, *Ann. Geophys. Italy* 60 (1) (2017) S0103, <https://doi.org/10.4401/ag-7378>.
- [۲۱] A. Anastasio, et al., The MU-RAY experiment. an application of SiPM technology to the understanding of volcanic phenomena, *Nucl. Inst. Methods A* 718 (2013) 134, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.065>.
- [۲۲] A. Bonneville, et al., Borehole muography of subsurface reservoirs, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377 (2018) 0060, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0060>.
- [۲۳] J. Gluyas, et al., Passive, continuous monitoring of carbon dioxide geostorage using muon tomography, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377 (2018) 0059, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0059>.
- [۲۴] S. Ansoldi, et al., MGR: An innovative, low-cost and compact cosmic-ray detector, *Nucl. Inst. Methods A* 567 (1) (2006) 298, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.099>.
- [۲۵] See e.g., F. Sauli, *Gaseous Radiation Detectors*, Cambridge University Press, 2014.
- [۲۶] T. Nakano, PhD thesis, Nagoya University (in Japanese) (1997).
- [۲۷] C. Bozza on behalf of the OPERA Collaboration, 2005 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N14-159 751-755(2005).
- [۲۸] V. Hess, *Phys. Zeit.* 13 (1912) 1084.
- [۲۹] A.H. Compton, *Phys. Rev.* 43 (1933) 387.
- [۳۰] S. Bouteille, et al., *Nucl. Instrum. Methods A* 834 (2016) 223.
- [۳۱] K.N. Borozdin, et al., *Nature* 422 (2003) 277.

- [۳۲] H. Tanaka, Japanese volcanoes visualized with muography, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377 (2018) 2137, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0142>.
- [۳۳] R. D'Alessandro, et al., Volcanoes in Italy and the role of muon radiography, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377 (2018) 0050, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0050>.
- [۳۴] G. Saracino, C. Carloganu, Looking at volcanoes with cosmic-ray muons, *Phys. Today* 65 (2012) 60.
- [۳۵] J. Marteau, et al., Muon tomography applied to active volcanoes, *PoS PhotoDet2015* (2016) 004, <https://doi.org/10.22323/1.252.0004>.
- [۳۶] J. Peña Rodríguez, et al., Calibration and first measurements of MuTe: a hybrid Muon Telescope for geological structures, *Proceedings of the HAWC Contributions to the Thirty-sixth International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, (2019).
- [۳۷] H. Asorey, et al., Muon Tomography sites for Colombia volcanoes, 2017, arXiv:1705.09884 [physics.geo-ph].
- [۳۸] I. Guerrero, et al., Design and construction of a muon detector prototype for study the Galeras volcano internal structure, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1247 (2019) 012020, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012020>.
- [۳۹] V. Tioukov, et al., First muography of Stromboli volcano, *Sci. Rep.* 9 (2019) 6695, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43131-8>.
- [۴۰] F. Barberi, Risk assessment of Vesuvius volcano, 2013, (GIFT2013, General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna (Austria), http://static2.egu.eu/media/filer_public/2013/06/20/barberi.pdf
- [۴۱] F. Ambrosino, et al., The MU-RAY project: detector technology and first data from Mt. Vesuvius, *JINST* 9 (2014) C02029, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/02/C02029>.
- [۴۲] G. Saracino, et al., The MURAVES muon telescope: technology and expected performances, *Ann. Geophys. Italy* 60 (1) (2017) S0103, <https://doi.org/10.4401/ag-7378>
- [۴۳] A. Anastasio, et al., The MU-RAY experiment. an application of SiPM technology to the understanding of volcanic phenomena, *Nucl. Inst. Methods A* 718 (2013) 134, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.065>.
- [۴۴] R. D'Alessandro, et al., Volcanoes in Italy and the role of muon radiography, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377 (2018) 0050, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0050>.
- [۴۵] C. Cârloganu, et al., Towards a muon radiography of the Puy de Dôme, *Geosci. Inst. Methods Data Syst.* 2 (2013) 55, <https://doi.org/10.5194/gi-2-55-2013>.
- [۴۶] C. Cârloganu, Density imaging of volcanoes with atmospheric muons using GRPCs, *PoS EPS-HEP2011* (2011) 055, <https://doi.org/10.22323/1.134.0055>.
- [۴۷] S. Béné, et al., Volcano radiography with GRPCs, *Proceedings, International Conference on Calorimetry for the High Energy Frontier (CHEF 2013): Paris, France, April 22–25, 2013*, (2013), p. 414.
- [۴۸] V. Buridon, et al., First results of the CALICE SDHCAL technological prototype, *JINST* 11 (04) (2016) P04001, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/P04001>.
- [۴۹] F. Ambrosino, et al., Joint measurement of the atmospheric muon flux through the puy de dôme volcano with plastic scintillators and resistive plate chambers detectors, *J. Geophys. Res.* 120 (11) (2015) 7290, <https://doi.org/10.1002/2015JB011969>.
- [۵۰] Coordinating Committee for the Prediction of Volcanic Eruption of the Japan Meteorological Agency, Minutes of the 113th Volcanic Eruption Liaison Committee (in Japanese), 2009, (https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/Report/103/kaiho_103_32.pdf) Date and time: 13:00-17:30 on June 18, 2009.
- [۵۱] H.K.M. Tanaka, T. Kusagaya, H. Shinohara, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano, *Nat. Commun.* 5 (2014) 3381, <https://doi.org/10.1038/ncomms4381>.
- [۵۲] N. Lesparre, et al., *Geophys. J. Int.* A 183 (2010) 1348.
- [۵۳] N. Lesparre, et al., *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 1 (2012) 33.
- [۵۴] K. Jourde, et al., *Geophys. Res. Lett.* 40 (2013) 6334.
- [۵۵] K. Jourde, et al., *Nat. Sci. Rep.* 6 (2016) 33406.
- [۵۶] A. Anastasio, et al., *Nucl. Instrum. Methods A* 732 (2013) 423.
- [۵۷] V. Tioukov, et al., *Ann. Geophys.* 60 (2017) S0111.
- [۵۸] L. Oláh, et al., High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, *Sci. Rep.* 8 (1) (2018) 3207, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21423-9>.
- [۵۹] L. Oláh, et al., Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt. Sakurajima, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377 (2018) 0135, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0135>.

- [۶۰] D. Varga, et al., Detector developments for high performance muography applications, Nucl. Inst. Methods A (2019), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.077>.
- [۶۱] H. Tanaka, Japanese volcanoes visualized with muography, Philos. Trans. R. Soc. A 377 (2018) 2137, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0142>.
- [۶۲] L. Oláh, et al., Plug formation imaged beneath the active craters of Sakurajima volcano with muography, Geophys. Res. Lett. 46 (17–18) (2019) 10417, <https://doi.org/10.1029/2019GL084784>.
- [۶۳] L.W. Alvarez, et al., Science, New Series 167 (1970) 832.
- [۶۴] 33rd international cosmic ray conference, Rio de Janeiro (2013).
- [۶۵] <http://www.scanpyramids.org/>.
- [۶۶] <http://www.hip.institute/#press>.
- [۶۷] H. Gomez, et al., XIV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, TAUP 2015.
- [۶۸] A. Zenoni, et al., arXiv:14031709.
- [۶۹] J. Marteau, et al., DIAPHANE: muon tomography applied to volcanoes, civil engineering, archaeology, JINST 12 (02) (2017) C02008, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/C02008>.
- [۷۰] H. Gómez, et al., Studies on muon tomography for archaeological internal structures scanning, J. Phys. Conf. Ser. 718 (5) (2016) 052016, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/718/5/052016>.
- [۷۱] G. Saracino, et al., Applications of muon absorption radiography to the fields of archaeology and civil engineering, Philos. Trans. R. Soc. A 377 (2018) 0057, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0057>.
- [۷۲] K. Chaiwongkhot, et al., Development of a portable muography detector for infrastructure degradation investigation, IEEE Trans. Nucl. Sci. 65 (2018) 2316, <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2855737>.
- [۷۳] K.N. Borozdin, et al., Radiographic imaging with cosmic-ray muons, Nature 422 (2003) 277, <https://doi.org/10.1038/422277a>.
- [۷۴] A. Harel, D. Yaish, Lingacom muography, Philo. Trans. R. Soc. A 377 (2018) 0133, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0133>.
- [۷۵] F. Riggi, et al., The muon portal project: commissioning of the full detector and first results, Proceedings of the Eighth International Conference on New Developments in Photodetection (NDIP17), Tours, France, July 3–7, 2017, 912 (2018), p. 16, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.10.006>.
- [۷۶] P. Checchia, et al., INFN muon tomography demonstrator: past and recent results with an eye to near-future activities, Philos. Trans. R. Soc. A 377 (2018) 0065, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0065>.
- [۷۷] S. Vanini, et al., Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms, Philos. Trans. R. Soc. A 377 (2018) 0051, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0051>.
- [۷۸] V. Glasser, R. Lipton, Data analysis and detector troubleshooting for the Silicon Muon Scanner, Technical Report (FERMILAB-PUB-18-503-E), FNAL, 2018.
- [۷۹] CMS Collaboration, Commissioning and performance of the CMS silicon strip tracker with cosmic ray muons, JINST 5 (3) (2010) T03008, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03008>.
- [۸۰] Decision Sciences, “About us” page, 2019, (<https://decisionsciences.com/about-us/>).
- [۸۱] D. Poulson, et al., Cosmic ray muon computed tomography of spent nuclear fuel in dry storage casks, Nucl. Inst. Methods A 842 (2017) 48, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.10.040>.
- [۸۲] G. Jonkmans, et al., Nuclear waste imaging and spent fuel verification by muon tomography, Ann. Nucl. Energy 53 (2013) 267, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.09.011>.
- [۸۳] K. Borozdin, et al., Cosmic ray radiography of the damaged cores of the Fukushima reactors, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 152, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.152501>.
- [۸۴] H. Miyadera, et al., Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons, AIP Adv. 3 (5) (2013) 052133, <https://doi.org/10.1063/1.4808210>.
- [۸۵] N. Kume, et al., Muon trackers for imaging a nuclear reactor, JINST 11 (09) (2016) P09008, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/09/P09008>.
- [۸۶] H. Fujii, et al., Imaging the Inner Structure of a Nuclear Reactor by Cosmic Muon Radiography, 2019, arXiv:1902.01992 [physics.ins-det].
- [۸۷] D. Bryman, J. Bueno, J. Jansen, ASEG Extended Abstracts (2015) 1.
- [۸۸] V. Kudryavtsev, et al., Int. J. Green. Gas Contr. 11 (2012) 21.

- [۸۹] Flygare J, Bonneville A, Kouzes R, Yamaoka J, Lintereur A. 2018 Muon borehole detector development for use in 4-D tomographic density monitoring. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 65, 2724–2731. (doi:10.1109/TNS.2018.2869196).
- [۹۰] Bonneville A et al. 2017 A novel muon detector for borehole density tomography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A* 851, 108–117. (doi:10.1016/j.nima.2017.01.023).
- [۹۱] Athanassas, Constantin D. "Muography for geological hazard assessment in the South Aegean active volcanic arc (SAAVA)." *Mediterranean Geoscience Reviews* 2 (2020): 233-246.
- [۹۲] Tanaka, Hiroyuki KM, et al. "First results of undersea muography with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector." *Scientific reports* 11.1 (2021): 19485.
- [۹۳] Tanaka, Hiroyuki KM. "Development of the muographic tephra deposit monitoring system." *Scientific Reports* 10.1 (2020): 14820.
- [۹۴] Oláh, László, and Hiroyuki KM Tanaka. "Machine learning with muographic images as input: An application to volcano eruption forecasting." *Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles* (2022): 43-54..
- [۹۵] Baccani, G., et al. "The reliability of muography applied in the detection of the animal burrows within River Levees validated by means of geophysical techniques." *Journal of Applied Geophysics* 191 (2021): 104376.
- [۹۶] Chevalier, Antoine, et al. "Using mobile muography on board a Tunnel boring machine to detect man-made structures." *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2019. 2019.
- [۹۷] Pyle, David M., Tamsin A. Mather, and Juliet Biggs. "Remote sensing of volcanoes and volcanic processes: integrating observation and modelling—introduction." *Geological Society, London, Special Publications* 380.1 (2013): 1-13.
- [۹۸] Moussallam, Yves, et al. "Monitoring and forecasting hazards from a slow growing lava dome using aerial imagery, tri-stereo Pleiades-1A/B imagery and PDC numerical simulation." *Earth and Planetary Science Letters* 564 (2021): 116906.
- [۹۹] Pinel, Virginie, Michael P. Poland, and Andy Hooper. "Volcanology: Lessons learned from synthetic aperture radar imagery." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 289 (2014): 81-113.
- [۱۰۰] Biggs, Juliet, and Matthew E. Pritchard. "Global volcano monitoring: What does it mean when volcanoes deform?." *Elements* 13.1 (2017): 17-22.
- [۱۰۱] Ramsey, Michael S., and Andrew JL Harris. "Volcanology 2020: How will thermal remote sensing of volcanic surface activity evolve over the next decade?." *Journal of Volcanology and Geothermal research* 249 (2013): 217-233.
- [۱۰۲] Marteau, Jacques, et al. "Applied muography: from volcanology to archaeology with a mobile muon detector (DIAPHANE/ARCHÉ)." *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2018. 2018.
- [۱۰۳] Teixeira, Pedro, et al. "Advancements in the LouMu Project—Muography for Geophysical Surveys." *Meteorology and Geophysics*: 116.
- [۱۰۴] Teixeira, Pedro, et al. "Muography for Underground Geological Surveys: Ongoing Application at the Lousal Mine (Iberian Pyrite Belt, Portugal)." (2022).
- [۱۰۵] Pereira, Mário Gonzalez, et al. "Meteorology and Geophysics".