

Investigation of the Atmospheric Compositions using Lunar Eclipse Spectrum

Sayed Mohammad Reza Ahmadi^{1✉} , Mohammad Joghataei² , Mohammad Ali Haddad³ 

1. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan. (Corresponding Author). Emails: ahmadireza729@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 12/01/2026
Received in revised form: 03/02/2026
Accepted: 11/03/2026
Available online: 19/03/2026

Keywords:
Biosignatures,
Atmosphere,
Exoplanets, Lunar
Eclipse

ABSTRACT

A lunar eclipse provides a unique opportunity to investigate the composition of Earth's atmosphere using spectroscopic techniques. In this study, the atmospheric constituents of Earth during a lunar eclipse are analyzed through spectroscopic observations. The data used in this research were obtained from observations of the lunar eclipse on July 16, 2019, using a 10-inch Sky-Watcher reflecting telescope equipped with suitable spectroscopic instruments. During a lunar eclipse, sunlight passes through different layers of Earth's atmosphere, undergoes refraction at the atmospheric limb, and then reaches the lunar surface, carrying valuable information about the chemical composition of the atmosphere. Spectra recorded from the Moon before the onset of the lunar eclipse and during the eclipse were analyzed and compared using the Origin software. The spectral analysis reveals distinct absorption features corresponding to major and biologically significant atmospheric gases, including oxygen, water vapor, and ozone. A comparison of the spectra indicates noticeable variations in the absorption strength of these gases during the lunar eclipse relative to normal lunar observations, which can be attributed to the increased optical path length of sunlight through Earth's atmosphere. The results of this study demonstrate that lunar eclipse spectroscopy is an effective method for detecting and characterizing biosignature gases in Earth's atmosphere. Moreover, this technique serves as a natural analog for transmission spectroscopy of exoplanetary atmospheres and can be used as a valuable model for identifying potential biosignature gases and assessing the habitability of terrestrial exoplanets.

Cite this article: Ahmadi, S. Joghataei, M. & Haddad, M. (2026). Investigation of the Atmospheric Compositions using Lunar Eclipse Spectrum, *Kateb Scientific-Research Journal of Technology and Engineering*, 1 (1), 159-177.



بررسی ترکیبات جوی با استفاده از طیف‌سنجی در زمان ماه‌گرفتگی

سید محمد رضا احمدی^۱ , محمد جغتایی^۲ , محمدعلی حدادی^۳ 

۱. استاد قراردادی دیپارتمنت انجینیری سیول، پوهنځی انجینیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان. (نویسنده مسئول). ایمیل:

ahmadireza729@gmail.com

۲. استادیار گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳. استادیار گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله تحقیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲

تاریخ ارزیابی: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸

واژه‌های کلیدی:

گازهای زیستی، جو، سیاره

فراخورشیدی، ماه‌گرفتگی

ماه‌گرفتگی یکی از پدیده‌های نجومی مهم است که امکان بررسی غیرمستقیم ترکیبات جو زمین را از راه طیف‌سنجی فراهم می‌کند. در این مقاله، ترکیبات جو زمین در زمان وقوع ماه‌گرفتگی با استفاده از روش طیف‌سنجی بررسی شده است. داده‌های این پژوهش از رصد ماه‌گرفتگی ۲۵ سرطان ۱۳۹۸ به‌دست آمده که با استفاده از تلسکوپ بازتابی ۱۰ اینچ اسکای‌واچر و تجهیزات طیف‌سنجی مناسب انجام شده است. در این فرایند، نور خورشید پس از عبور از لایه‌های گوناگون جو زمین و شکست در لبه آن، به سطح ماه رسیده و اطلاعات ارزشمندی از ترکیب شیمیایی جو را در طیف خود ثبت کرده است. طیف‌های ثبت‌شده از ماه پیش از ماه‌گرفتگی و در حین ماه‌گرفتگی با استفاده از نرم‌افزار اورجین تحلیل و مقایسه شده‌اند. نتایج تحلیل طیفی نشان‌دهنده وجود خطوط جذبی مشخص مربوط به گازهای اصلی و زیستی جو زمین از جمله اکسیژن، بخار آب و ازن است. مقایسه طیف‌ها بیانگر تغییرات قابل‌توجه در شدت جذب این گازها در زمان ماه‌گرفتگی نسبت به حالت عادی است که ناشی از عبور نور از مسیر طولانی‌تر در جو زمین می‌باشد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طیف‌سنجی ماه‌گرفتگی می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد برای شناسایی گازهای زیستی در جو زمین به کار رود. همچنین این روش می‌تواند الگویی مناسب برای مطالعه و تشخیص گازهای زیستی در جو سیارات فراخورشیدی و ارزیابی قابلیت زیست‌پذیری آن‌ها فراهم کند.

استناد: احمدی، سید محمد رضا، جغتایی، محمد و حدادی، محمدعلی (۱۴۰۴). بررسی ترکیبات جوی با استفاده از طیف‌سنجی

در زمان ماه‌گرفتگی. مجله علمی - تحقیقی تکنالوژی و انجینیری کاتب، ۱ (۱)، ۱۷۷-۱۵۹.



© نویسندگان.

ناشر: پوهنتون کاتب.

مقدمه

مشاهدات فرازمینی ما را به این فکر فرو می‌برد که احتمال حیات فرازمینی نیز وجود دارد. طیف‌سنجی عبوری یکی از راه‌های مفید برای بررسی جو سیارهٔ فراخورشیدی است. این روش به دنبال ویژگی‌های جذب اضافی ناشی از جو سیاره‌ای در طیف ستارهٔ میزبان می‌گردد. می‌توان برخی از گونه‌ها را در جو سیاره با مشاهدهٔ نور ستاره‌ای از راه جو سیاره در یک گذر شناسایی کرد. بررسی جو سیارات فراخورشیدی زمینی به‌منظور جست‌وجوی گونه‌های جوی زنده، به اصطلاح «نشانه‌های زیستی»، مانند اکسیژن و ازن، بسیار جالب است. برای این منظور، از آن‌جا که زمین در حال حاضر تنها سیاره‌ای است که به دانش ما حیات در آن وجود دارد، اندازه‌گیری طیف‌های عبوری زمین می‌تواند نخستین گام به سوی مشاهدات آیندهٔ سیارات فراخورشیدی قابل سکونت باشد. ما می‌توانیم با مشاهدهٔ نور خورشید که توسط ماه در طول ماه‌گرفتگی بازتاب می‌شود، مشخصات جو زمین را به دست آوریم. نور خورشید پیش از رسیدن به ماه از جو زمین می‌گذرد [۱]. با تجزیه و تحلیل طیف‌های انتقال سیارات مشابه زمین، شکست نور نیز باید به‌درستی در نظر گرفته شود. در مورد سیاره‌ای که مانند مشتری داغ به دور ستارهٔ مرکزی می‌چرخد، می‌توان نور ستاره‌ای را که از کل جو سیاره عبور می‌کند مشاهده کرد. با این حال، در مورد سیاره‌ای دور مانند زمین که به دور خورشید می‌چرخد، تنها می‌توان نور ستاره‌ای را مشاهده کرد که از ارتفاع بحرانی به‌دلیل اثر انکسار عبور می‌کند. به همین دلیل، طیف عبوری شکسته در طیف وسیعی از طول‌موج قریب به مسطح می‌شود، حتی اگر ابری در جو وجود نداشته باشد [۲].

زمین یک فرصت یکتا برای به دست آوردن طیف‌های عبوری دقیق جو از راه یک ماه‌گرفتگی با وضوح زمانی (مکانی) بالا با استفاده از یک تلسکوپ بزرگ موجود ارائه می‌دهد. این طیف به ما کمک می‌کند تا ساختار عمودی سیارات فراخورشیدی مشابه زمین را در آینده درک کنیم. مشاهدات ما به موارد آزمایشی برای بررسی وابستگی طیف‌های عبوری به ارتفاعات در جو به معنای کلی‌تر تبدیل می‌شود. ترکیبات جو در عدم تعادل شیمیایی قوی نشان‌دهندهٔ فعالیت زیستی در مقیاس بزرگ است؛ درست مانند اکسیژن و متان در جو زمین. فعالیت زیستی روی زمین دارای محصولات جانبی زیادی می‌باشد؛ مانند اکسیژن و ازن که در ترکیب با بخار آب، متان و دی‌اکسید کربن است. این مولکول‌های زیستی، نوارهای مولکولی باریک جذبی را در طول موج‌های نوری و مادون قرمز نزدیک برای تشخیص در جو سیارات دیگر ارائه می‌کنند. تابش خورشید به زمین می‌تابد و آن نور دریافتی را به سمت نیمهٔ تاریک ماه بازتاب می‌کند؛ در واقع نوری که از زمین دریافت می‌شود، نور بازتاب‌شده از سطح سیارهٔ ماه است [۳]. با در نظر گرفتن زمین به‌عنوان نمونهٔ نخست یک سیارهٔ قابل سکونت، مشاهدات زمینی امکان تأیید حضور زیستی را با همان تکنیک‌هایی فراهم می‌کند که مشابه آن برای رصد ستارگان استفاده می‌شود. دلیل استفاده از مشاهدات زمینی، اثبات تشخیص طیفی رنگدانه‌های فتوسنتزی و مولکول‌های زیستی جو است و این نشان می‌دهد که حیات در سیارات دیگر نیز می‌تواند به روش مشابه شناسایی شود [۴].

یکی دیگر از روش‌های مشاهدهٔ طیفی زمین، در هنگام ماه‌گرفتگی است. تفاوت عمده با مشاهدات تابش زمین این است که در این مورد، تابش زیر تأثیر فرایندهای جذب انتخابی و پراکندگی نور خورشید

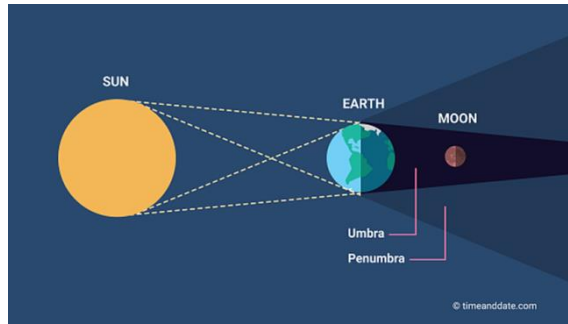
است که به جو زمین منتقل می‌شود. هندسه یک ماه‌گرفتگی نیز بیشتر شبیه به گذر سیاره فراخورشیدی در برابر ستاره میزبان خود است تا رصد کلاسیک زمینی و بنابراین، برای پژوهشگران سیارات فراخورشیدی جالب توجه است [۵]. از تمام سیاره‌هایی که تاکنون کشف شده‌اند و به دور ستاره‌های دیگر می‌چرخند، بیشتر از ۵۸ سیاره از قرص ستاره عبور می‌کنند؛ به این معنا که می‌توان آن‌ها را از راه کاهش دوره‌ای در شار نور ستاره‌ها شناسایی کرد [۶]. نور ستاره از جو سیاره عبور می‌کند و در موارد اندکی می‌توان ترکیب نخستین جوی سیاره را تخمین زد [۷]. با نزدیک‌تر شدن به یافتن آنالوگ‌های زمین، یک ملاحظه مهم برای توصیف جو سیارات فراخورشیدی این است که طیف عبوری زمین چه‌گونه به نظر می‌رسد. با پیشرفت‌های سریع در زمینه سیارات فراخورشیدی، سیارات فراخورشیدی بیشتری شناسایی می‌شوند. مشخص کردن جو آن‌ها با استفاده از مشاهدات گذار، به یک داده کلیدی در تلاش برای شناسایی یک سیاره فراخورشیدی شبیه زمین تبدیل خواهد شد. طیف عبوری جو زمین یک الگوی ایده‌آل برای مقایسه با نامزدهای آینده در خارج از زمین خواهد بود. یک هدف مهم در جست‌وجوی کشف یک سیاره فراخورشیدی مشابه زمین، شناسایی نشانه‌های زیستی گازی جو آن سیاره است. با مشاهده یک ماه‌گرفتگی که پیکربندی مشابهی با گذر سیاره فراخورشیدی ارائه می‌دهد، می‌توانیم ترکیبات جو زمین را مشخص کنیم [۸].

در مقاله حاضر نشان می‌دهیم که مدل‌سازی طیف سیارات فراخورشیدی می‌تواند اطلاعات مهمی از فراوانی نسبی برجسته‌ترین عناصر در طیف انتقال آن‌ها به ما ارائه دهد. به عنوان داده‌های رصدی، ما از طیف عبوری جو زمین استفاده می‌کنیم که از مشاهده ماه‌گرفتگی ۲۵ تیر ۱۳۹۸ با استفاده از تلسکوپ ۱۰ اینچ اسکای‌واچر به دست آمده است.

۱. روش تحقیق؛ طیف‌سنجی عبوری

یکی از بهترین روش‌های کشف سیاره فراخورشیدی و بررسی حیات در آن، روش گذر است. در این روش پس از شناسایی سیاره با استفاده از طیف‌سنجی عبوری می‌توان به وجود حیات در آن سیاره پی برد. ما نیز با استفاده از ماه‌گرفتگی موردی و طیف‌سنجی عبوری می‌خواهیم ترکیبات جو را مشخص کنیم.

۲۶ تیر/سرطان ۱۳۹۸ مردم در آسمان برخی از مناطق دنیا شاهد ماه‌گرفتگی بودند. این گرفتگی در قاره آسیا (به غیر از مناطق شمال شرقی)، اروپا، استرالیا، آفریقا و کشورهای آمریکای جنوبی (به جز شمال غرب آن) قابل مشاهده بود. این ماه‌گرفتگی ساعت ۲۳:۱۳:۵۱ سه‌شنبه ۲۵ تیر/سرطان به شکل نیم‌سایه که برای چشم انسان امکان تشخیص آن وجود ندارد، شروع گردید و گرفت جزئی ۳۱ دقیقه و ۴۳ ثانیه بامداد چهارشنبه ۲۶ تیر/سرطان آغاز شد. ساعت ۲:۰۰:۴۴ ثانیه اوج گرفت جزئی اتفاق افتاد و در ساعت ۳:۲۹:۳۹ ثانیه این گرفت جزئی به پایان رسید. خروج ماه از نیم‌سایه ۴:۴۷:۳۸ ثانیه است و گرفت جزئی بامداد چهارشنبه ۲۶ تیر/سرطان حدود ۲ ساعت و ۵۸ دقیقه به طول انجامید. شکل زیر شمایی از یک ماه‌گرفتگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱. شمای ماه‌گرفتگی کامل

در هر ماه‌گرفتگی نخست ماه وارد نیم‌سایه زمین می‌شود که قابل رؤیت با چشم انسان نیست و سپس مراحل جزئی و ادامه گرفت ماه قابل رصد خواهد بود. همچنین در پایان هر ماه‌گرفتگی مدتی ماه درون نیم‌سایه زمین قرار دارد و با خروج از نیم‌سایه زمین این رویداد به پایان می‌رسد.

۲. ابزارهای تحقیق

۲-۱. تلسکوپ اسکای‌واچر ۱۰ اینچ

این ماه‌گرفتگی با استفاده از تلسکوپ اسکای‌واچر ۱۰ اینچ مورد مشاهده قرار گرفته و توانستیم از هر رویداد ماه‌گرفتگی به‌گونه جداگانه داده را ثبت کنیم. شکل زیر نمونه‌ای از تلسکوپ ۱۰ اینچ اسکای‌واچر می‌باشد.



شکل ۲-۱. نمونه‌ای از تلسکوپ اسکای‌واچر

۲-۲. طیف‌سنج

طیف‌سنج یک ابزار علمی آزمایشگاهی همه‌کاره است که برای اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل برهم‌کنش نور و ماده استفاده می‌شود. این دستگاه پیچیده، از مطالعه واکنش‌های شیمیایی گرفته تا شناسایی مواد

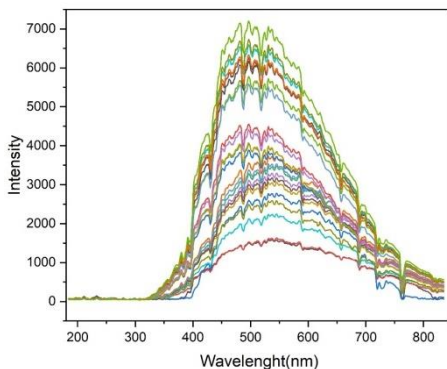
ناشناخته، در بسیاری از حوزه‌های گوناگون علمی و صنعتی، از جمله شیمی، زیست‌شناسی، فیزیک و علم مواد نقش اساسی دارد.

یک طیف‌سنج بر پایه اصول جذب، عبور یا بازتاب نور عمل می‌کند؛ به این صورت که یک پرتو نور به یک ماده تابیده می‌شود و اندازه‌گیری شدت نور پیش و پس از برهم‌کنش با آن ماده توسط دستگاه بررسی می‌گردد. در حقیقت، با اندازه‌گیری شدت نور عبوری یا بازتابی از ماده، می‌توان به ویژگی‌های ویژه‌ای از آن ماده، مانند غلظت عناصر موجود در آن پی برد. این تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای پژوهشگران را قادر می‌سازد تا میزان نور جذب‌شده را اندازه‌گیری کنند و اطلاعات قابل‌توجهی در مورد ویژگی‌های مواد و سیستم‌های زیر کنترل به دست آورند. طیف‌سنج از چندین جزء ضروری تشکیل شده که مهم‌ترین آن‌ها منبع نور، تکرنگ‌ساز یا سیستم طیف‌سنج، نگهدارنده نمونه، آشکارساز و نمایشگر یا دستگاه خروجی است. در این مقاله (مستخرج از پایان‌نامه) ما با استفاده از طیف‌سنج شدت نور ماه‌گرفتگی را در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر اندازه می‌گیریم و با نرم‌افزار اورجین، طیف‌های حاصل‌شده از این داده‌ها را تحلیل و بررسی می‌کنیم.

۳. داده‌های به‌دست‌آمده

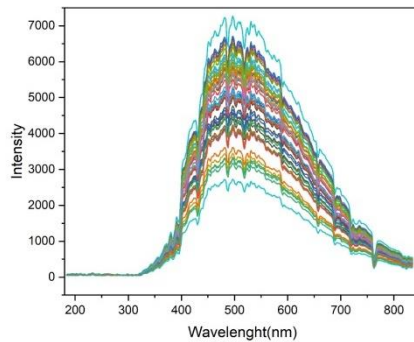
داده‌هایی که برای این پژوهش استفاده می‌شود از مشاهده ماه‌گرفتگی ۲۵ تیر/سرطان ۱۳۹۸ با استفاده از تلسکوپ ۱۰ اینچ اسکای‌واچر به دست آمده است. با مشاهده از هر رویداد ماه‌گرفتگی، داده‌ها را به‌گونه مستقل جمع‌آوری کردیم.

نخست پیش از ماه‌گرفتگی ۲۳ نمونه از داده‌ها را به دست آوردیم. این داده‌ها پیش از ماه‌گرفتگی از ساعت ۲۲:۵۱:۵۱ تا زمانی که ماه وارد نیم‌سایه می‌شود ثبت گردیده است. طیف این داده‌ها در شکل زیر نشان داده شده است.



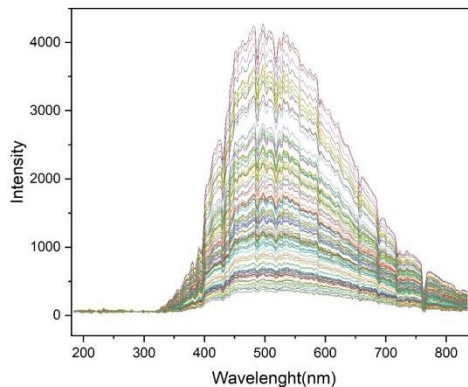
شکل ۳-۱. طیف جو پیش از ماه‌گرفتگی

ما همچنان به رصد کردن ماه ادامه دادیم و توانستیم ۵۱ نمونه از داده‌ها را ثبت کنیم. این داده‌ها از ساعت ۲۳:۱۳:۵۱ سه‌شنبه (که ماه وارد نیم‌سایه می‌شود) تا ساعت ۰۰:۳۱:۴۳ بامداد چهارشنبه (شروع ماه‌گرفتگی جزئی) به ثبت رسیده است. طیف این نمونه‌ها در شکل زیر نمایش داده شده است.



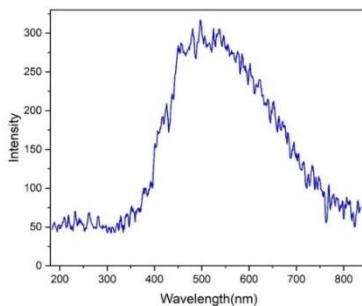
شکل ۲-۳. طیف جو در نیم‌سایه نخست ماه‌گرفتگی

زمانی که ماه‌گرفتگی جزئی شروع گردید، ما شروع به رصد کردن ماه کردیم و از شروع زمان ماه‌گرفتگی جزئی تا بیشینه ماه‌گرفتگی، توانستیم ۱۱۳ نمونه از داده‌ها را ثبت کنیم. این داده‌ها از ساعت ۰۰:۳۱:۴۳ تا ساعت ۰۲:۰۰:۴۴ ثبت گردیده است.



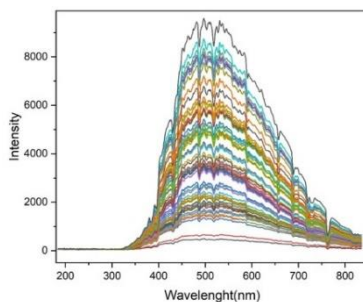
شکل ۳-۳. طیف جو در جریان ماه‌گرفتگی جزئی

در ادامه، از زمان اوج ماه‌گرفتگی با استفاده از تلسکوپ توانستیم داده‌های طیف جو را به دست آوریم. از شروع بیشینه ماه‌گرفتگی تا پایان بیشینه ماه‌گرفتگی، کمتر از یک دقیقه زمان داشتیم و در این مدت توانستیم یک نمونه از داده‌های ماه‌گرفتگی کامل را تهیه کنیم.



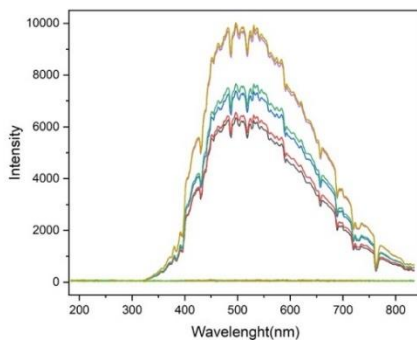
شکل ۳-۴. طیف جو در زمان بیشینه ماه گرفتگی

و در ادامه با رصد کردن ماه، توانستیم از زمانی که ماه گرفتگی جزئی به پایان می‌رسد ۱۲ نمونه از داده‌ها را حاصل کنیم.



شکل ۳-۵. طیف جو، پایان ماه گرفتگی جزئی

در پایان، با رصد کردن ماه هنگامی که ماه از نیم‌سایه زمین خارج می‌شد توانستیم ۱۲ نمونه از داده‌ها را ثبت کنیم.



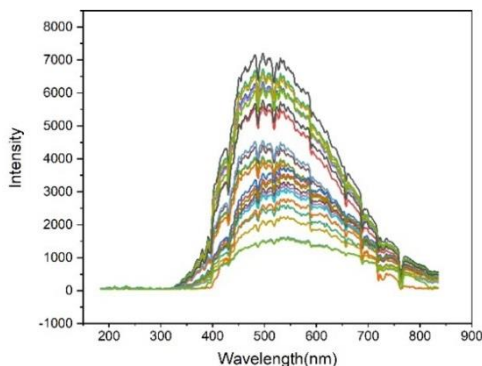
شکل ۳-۶. طیف جو در نیم‌سایه دوم ماه گرفتگی

۴. تحلیل داده‌ها و نتایج تحقیق

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار اورجین به تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌پردازیم. نخست طیف پیش از ماه‌گرفتگی را بررسی می‌کنیم. در ادامه طیف حاصل از جریان ماه‌گرفتگی بررسی می‌شود و در پایان به نتایج حاصل از این پژوهش می‌پردازیم.

۴-۱. طیف جو پیش از ماه‌گرفتگی

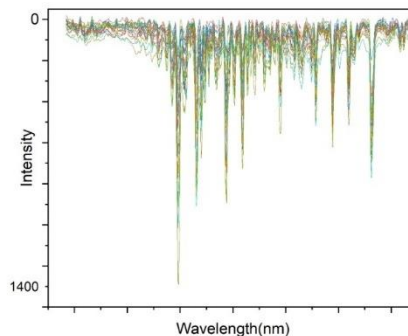
ما ۲۵ نمونه از داده‌ها را برای پیش از ماه‌گرفتگی رصد کرده بودیم. با ترسیم نمودار این داده‌ها، تعداد زیادی از نقاط دره و قله مشاهده گردید که هر نقطه مرتبط به یک طول موج ویژه و نیز مشخص‌کننده یک اتم یا مولکول است. پیش از این می‌دانیم که نقاط دره به مفهوم جذب امواج و قله‌ها نشان‌دهنده نشر امواج است. با ترسیم طیف این داده‌ها می‌توانیم مولکول‌های زیستی را مشخص کنیم.



شکل ۴-۱-۱. طیف جو پیش از ماه‌گرفتگی

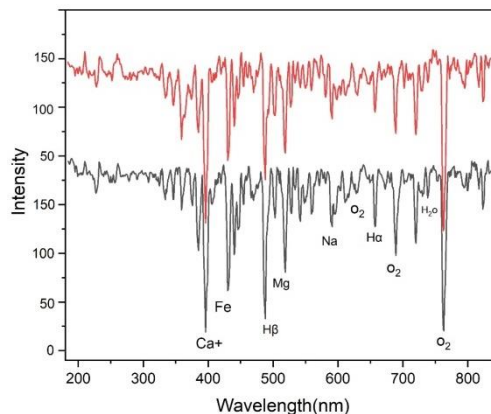
برای به‌دست آوردن نقاط جذبی طیف، در نخست با استفاده از نرم‌افزار اورجین^۱، خط زمینه را به دست آوردیم. در گام بعدی خط زمینه را از طیف اصلی کم کردیم که در نتیجه طیف زیر حاصل می‌شود. این فرایند را برای همه نمونه‌های خود انجام دادیم.

۱. نرم‌افزار ORIGINLAB ORIGINPRO یک ابزار حرفه‌ای و جامع برای تجزیه و تحلیل داده‌ها (DATA ANALYSIS) و رسم نمودارهای علمی (SCIENTIFIC GRAPHING) است. این نرم‌افزار که توسط شرکت ORIGINLAB ارائه شده است، قابلیت‌هایی مثل پردازش توابع ریاضی، آماری، تحلیل منحنی (CURVE FITTING) و ایجاد نمودارهای ۲ بعدی و ۳ بعدی با کیفیت بالا را برای محققان و مهندسان فراهم می‌کند.



شکل ۴-۱-۲. طیف جو پیش از ماه‌گرفتگی (با حذف خط زمینه از طیف اصلی)

در طیف حاصل شده توانستیم تعداد زیادی از عناصر و مولکول‌ها را مشاهده کنیم. عناصری چون منیزیم، کلسیم، سدیم، آهن و هیدروژن به‌وضوح در این طیف قابل مشاهده است. از آن‌جا که ما دنبال نشانه‌های زیستی جو می‌گردیم، نقاطی که مربوط به مولکول‌های زیستی می‌شود را نیز مشخص کردیم و در نتیجه در طول‌موج‌های میان ۳۰۰ تا ۸۳۰ نانومتر، اکسیژن در ۶۸۲/۳۷، ۷۱۶/۸۶، ۶۳۰، ۲/۵۳۲ و ۴۴۶ نانومتر و یک باند جذبی ازن در طول‌موج ۶۱۱ نانومتر و همچنین باند بخار آب را در طول‌موج‌های ۷۳۹، ۶۶۰ و ۶۰۶ نانومتر مشاهده کردیم.

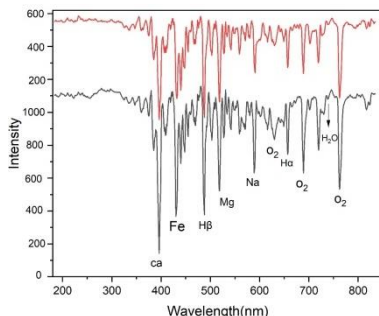


شکل ۴-۱-۳. طیف جو پیش از ماه‌گرفتگی

۴_۲. طیف جو در نیم‌سایه نخست ماه‌گرفتگی

تعداد زیادی نمونه از داده‌ها را در زمان ماه‌گرفتگی هنگامی که ماه وارد نیم‌سایه می‌شود، به دست آوردیم. طیف این داده‌ها را ترسیم و با کم کردن خط زمینه از آن، طیف به‌دست‌آمده را بررسی کردیم. در طول‌موج‌های میان ۳۰۰ تا ۸۳۰ نانومتر، افزون بر عناصری چون منیزیم، کلسیم، سدیم، آهن و هیدروژن، چندین مولکول زیستی در طول‌موج‌های گوناگون قابل مشاهده گردید که سه طول‌موج آن مربوط به بخار آب و ۶ طول‌موج آن مربوط به اکسیژن است. یک باند بخار آب جذب ضعیف را در طول‌موج ۷۳۹ نانومتر نشان می‌دهد و دو باند دیگر بخار آب؛ یکی در ۶۶۰ نانومتر و دیگری در ۶۰۶ نانومتر نشر به‌طور نسبی

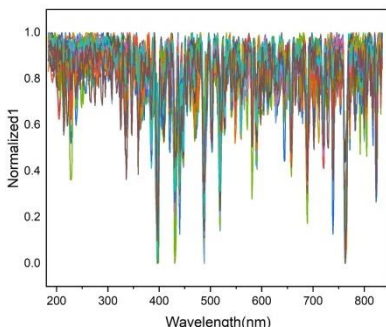
ضعیفی را نشان می‌دهد. برای اکسیژن در طول موج‌های $6/822$ نانومتر، $37/759$ نانومتر، $71/686$ نانومتر، 630 نانومتر، $2/477$ نانومتر و 446 نانومتر جذب صورت گرفته است. همچنین یک جذب مربوط به ازن در طول موج 611 نانومتر نیز مشاهده گردید.



شکل ۴-۲-۱. طیف در نیم‌سایه نخست ماه‌گرفتگی

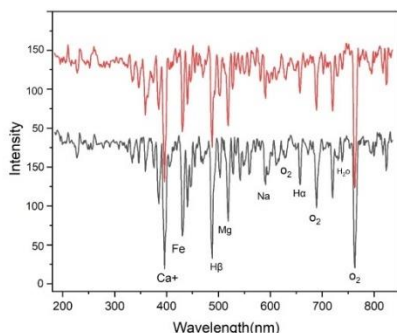
۴-۳. طیف جو در زمان ماه‌گرفتگی جزئی

از زمان ماه‌گرفتگی جزئی تا زمان ماه‌گرفتگی اعظمی، بیشترین نمونه‌های داده‌ها را ثبت کردیم و با استفاده از نرم‌افزار اورجین طیف این داده‌ها را ترسیم کردیم.



شکل ۴-۳-۱. طیف جو در زمان ماه‌گرفتگی جزئی (با حذف خط زمینه از طیف اصلی)

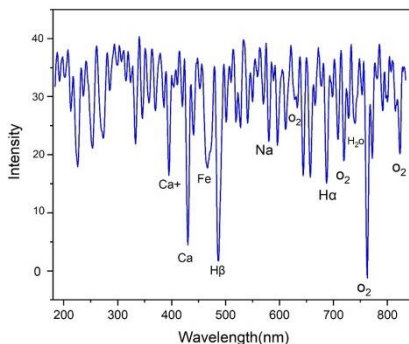
در طیف به‌دست‌آمده هفت باند از مولکول‌های زیستی مشاهده گردید. سه باند مشاهده‌شده مربوط به بخار آب و چهار باند آن مربوط به اکسیژن است. دو باند مشاهده‌شده بخار آب، طیف نشری است که در طول موج‌های 606 و 660 نانومتر قرار دارد و یک باند آن جذب را در طول موج 739 نانومتر نشان می‌دهد. همچنین شش باند جذبی اکسیژن در طول موج‌های $6/822$ ، $37/759$ ، $71/686$ ، 630 ، $2/477$ و 446 نانومتر قرار دارد. یک باند جذبی مربوط به ازن مشاهده شد که در طول موج 611 نانومتر قرار دارد.



شکل ۴-۳. طیف جو در جریان ماه گرفتگی جزئی

۴-۴. طیف جو در جریان بیشینه ماه گرفتگی

در زمان بیشینه ماه گرفتگی یک نمونه از داده را به دست آورده بودیم و با استفاده از نرم افزار اورجین طیف آن را ترسیم کردیم. در طیف به دست آمده هفت باند جذب مربوط به مولکول های زیستی قابل مشاهده است. جذب در طول موج های ۶۸۲۲/۳۷، ۷۱۶۸۶/۷۱، ۶۳۰ و ۷۴۴۶/۷ نانومتر مربوط به مولکول اکسیژن است. همچنین در طول موج ۶۶۰ نانومتر جذب دیده می شود که مربوط به بخار آب است و یک جذب در طول موج ۲/۵۳۲ نانومتر قابل مشاهده است که نیز مربوط به مولکول اکسیژن می شود.

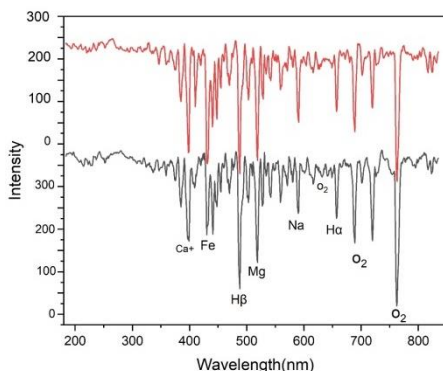


شکل ۴-۴-۱. طیف جو در جریان بیشینه ماه گرفتگی

۴-۵. طیف جو در پایان ماه گرفتگی جزئی

ما ۷۳ نمونه از داده ها را در جریان پایان ماه گرفتگی جزئی ثبت کرده بودیم. با ترسیم نمودار این داده ها و طیف حاصل از آن، تعداد زیادی از مولکول ها و عناصر قابل مشاهده بود. افزون بر کلسیم، سدیم، آهن و منیزیم، توانستیم شش طول موج مربوط به مولکول های زیستی را نیز مشاهده کنیم. چهار طول موج مشاهده شده مربوط به اکسیژن و دو طول موج مربوط به بخار آب است. طول موج های ۴۴۶، ۶۳۰، ۲/۵۷۷، ۳۷/۷۵۹ و ۷۱/۶۸۶ نانومتر جذب را نشان می دهد و طول موج ۶/۸۲۲ نانومتر نشان دهنده نشر است. طول موج های یاد شده، مربوط به مولکول اکسیژن است. طول موج ۶۰۶ نانومتر نشر و ۷۳۹ نانومتر جذب را

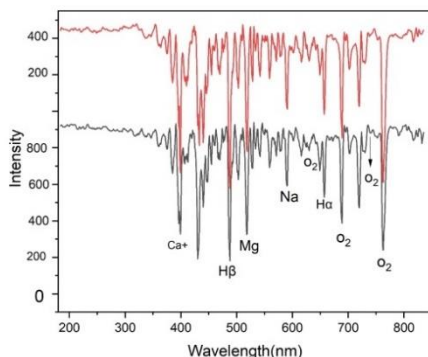
نشان می‌دهد که مربوط به مولکول آب است. یادآور می‌شویم که افزون بر مولکول‌های زیستی، عناصری چون منیزیم، کلسیم، سدیم، آهن و هیدروژن نیز در طیف ما مشاهده گردید.



شکل ۴-۵. طیف جو، در پایان ماه‌گرفتگی جزئی

۴-۶. طیف جو در نیم‌سایه دوم ماه‌گرفتگی

از زمانی که ماه از سایه خارج و وارد نیم‌سایه می‌شود تا زمانی که ماه از نیم‌سایه نیز بیرون می‌آید، ۱۲ نمونه از داده‌ها را به دست آورده بودیم. با مشاهده طیف این داده‌ها و جست‌وجوی نشانه‌های زیستی در این طیف، توانستیم ۱۰ طول موج مربوط به مولکول‌های زیستی را مشاهده کنیم. از طول موج‌های مشاهده‌شده، چهار طول موج آن مربوط به مولکول اکسیژن و سه طول موج آن مربوط به بخار آب است. چنان‌که در شکل نیز مشاهده می‌شود، طول موج مربوط به اکسیژن در ۶۸۲/۳۷، ۷۱۶/۶۸۶، ۷۳۹، ۶۶۰ و ۶۰۶ نانومتر قرار گرفته است. همچنین یک جذب در طول موج ۶۱۱ نانومتر مشاهده شد که مربوط به ازن می‌شود.



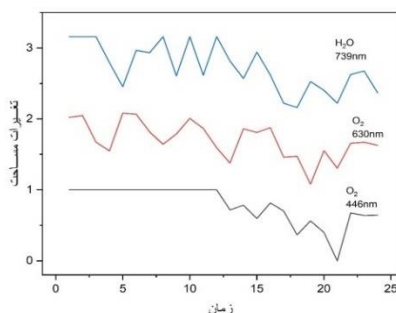
شکل ۴-۶. طیف جو، در پایان نیم‌سایه

۴-۷. تفکیک مولکول زیستی جو از مولکول زیستی بیرون جو

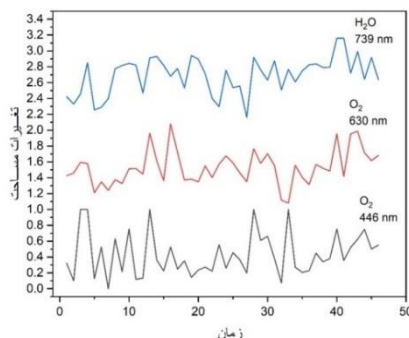
در جریان ماه‌گرفتگی خوشبختانه توانستیم تعداد زیادی از مولکول‌های زیستی را مشخص کنیم. اما نکته مهم این است که تفکیک کنیم این مولکول‌ها مربوط به جو زمین است نه خارج از جو زمین.

همان گونه که پیش از این نیز توضیح داده شده است، ما همه داده‌ها را در جریان ماه‌گرفتگی به‌ترتیب پیش از ماه‌گرفتگی، شروع نیم‌سایه، شروع ماه‌گرفتگی جزئی، بیشینه ماه‌گرفتگی، پایان ماه‌گرفتگی جزئی و پایان نیم‌سایه به دست آوردیم و در این بازه زمانی شدت نور در حال تغییر است و این تغییرات شدت نور باعث می‌شود که مساحت زیر نقاط جذبی تغییر کند و با به‌دست‌آوردن این تغییرات می‌توانیم مولکول‌های زیستی جو زمین را از مولکول‌های خارج از جو تفکیک کنیم.

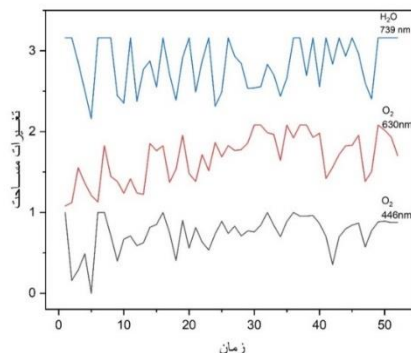
برای این کار تغییرات مساحت نسبت به زمان را برای مولکول‌های بخار آب در طول موج ۷۳۹ نانومتر و برای اکسیژن در طول موج‌های ۶۳۰ و ۴۴۶ نانومتر به دست می‌آوریم.



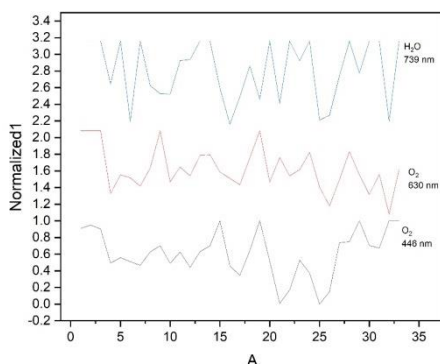
شکل ۴-۷-۱. تغییرات مساحت نقاط جذبی پیش از ماه‌گرفتگی



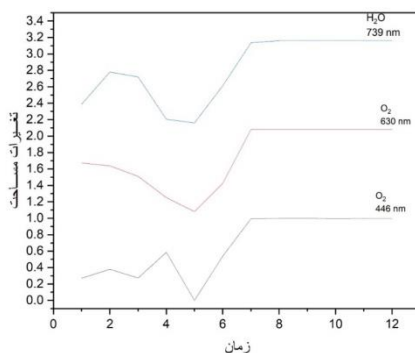
شکل ۴-۷-۲. تغییرات مساحت نقاط جذبی شروع نیم‌سایه



شکل ۴-۷-۳. تغییرات مساحت نقاط جذبی شروع ماه‌گرفتگی جزئی



شکل ۴-۷-۴. تغییرات مساحت نقاط جذبی پایان ماه‌گرفتگی جزئی



شکل ۴-۷-۵. تغییرات مساحت نقاط جذبی پایان نیم‌سایه

از آن‌جا که در جریان ماه‌گرفتگی شدت نور تغییر می‌کند، پس مولکول‌هایی که مربوط به جو است باید در جریان ماه‌گرفتگی مساحت نقاط جذبی آن تغییر کند و در صورتی که تغییرات مساحت نقاط جذبی به وجود نیاید، نتیجه می‌گیریم که آن مولکول‌ها خارج از جو است.

از مقایسه شکل‌های «۴-۷-۱» تا «۴-۷-۵» به‌وضوح تغییرات مساحت برای پیش از ماه‌گرفتگی و جریان ماه‌گرفتگی دیده می‌شود. از این‌رو، نتیجه می‌گیریم که این مولکول‌های زیستی مربوط به جو زمین است.

۵. نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش به دنبال پیدا کردن روش مناسب برای جست‌وجوی حیات در سیارات فراخورشیدی بودیم. با در نظر گرفتن زمین به‌عنوان نمونه نخست یک سیاره قابل سکونت، مشاهدات زمینی امکان تأیید حضور زیستی را با همان تکنیک‌هایی فراهم می‌کند که مشابه آن برای رصد ستارگان استفاده می‌شود. از آن‌جا که هیچ سیاره فراخورشیدی قابل سکونت تاکنون کشف نگردیده و تنها سیاره قابل دسترسی که در آن حیات وجود دارد، سیاره زمین است، ما در این پژوهش در زمان ماه‌گرفتگی موردی، زمین را به‌عنوان

یک سیاره فراخورشیدی در نظر گرفتیم و طیف عبوری زمین را بررسی کردیم و توانستیم تعداد زیادی از عناصر و مولکول‌ها را مشاهده کنیم. عناصری چون منیزیم، کلسیم، سدیم، آهن و هیدروژن به‌وضوح در این طیف قابل مشاهده است و چون ما دنبال نشانه‌های زیستی جو می‌گردیم، نقاطی که مربوط به مولکول‌های زیستی می‌شود را نیز مشخص کردیم و در نتیجه در طول موج‌های میان ۳۰۰ تا ۸۳۰ نانومتر، اکسیژن در ۶۸۲۲/۶، ۷۵۹/۳۷، ۶۸۶/۷۱، ۶۳۰/۵۳۲ و ۴۴۶ نانومتر و یک باند جذبی از ن در طول موج ۶۱۱ نانومتر و همچنین باند بخار آب را در طول موج‌های ۷۳۹، ۶۶۰ و ۶۰۶ نانومتر مشاهده کردیم.

اشتراسمایر و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از طیف‌سنجی انتقال یک گذر زمین با ردیابی طیف خورشیدی در طول ماه‌گرفتگی کامل ۲۱ ژانویه ۲۰۱۹، ترکیبات زیستی جو زمین را مورد کاوش قرار دادند. طیف‌های سری زمانی با ابزار قطبی و طیف‌سنجی با وضوح بالا گرفته شد. همچنین طیف‌سنج برای به‌دست‌آوردن منحنی نور ماه‌گرفتگی استفاده شد و در نتیجه آن‌ها جذب O_2 و H_2O را در چندین باند گزارش کردند که نتایج آن با نتایج حاصل از تجربه ما همخوانی دارد. آن‌ها افزون بر O_2 و H_2O ، شاهد جذب عناصری مانند سدیم، کلسیم، پتاسیم و منگنز نیز بودند [۹].

در رصد ما افزون بر مولکول‌های زیستی، عناصری مانند سدیم، کلسیم، پتاسیم و منگنز به‌وضوح قابل مشاهده است. اما یان و همکاران (۲۰۱۵) در زمان ماه‌گرفتگی جزئی، با استفاده از طیف عبوری زمین توانستند O_2 ، O_3 ، $O_2 \cdot O_2$ ، NO_2 و H_2O جو را مشخص کنند و مشاهدات آن‌ها ویژگی‌های جذب عناصری چون منیزیم، کلسیم، سدیم و آهن را که در رصدهای ما گزارش شده است، تأیید نمی‌کند. همچنین آن‌ها موجودیت خطوط فرانیهوفر در طیف مشاهده‌شده را به‌دلیل یک جزء پراکنده امان در نور خورشید پراکنده به جلو دانستند که در طیف سایه ماه ظاهر می‌شود. جذب بخار آب در طیف آن‌ها به‌طور نسبی ضعیف گزارش شده است که همخوانی خوبی با طیف ما دارد و علت آن را خشک بودن جو مورد مطالعه بیان داشتند [۱۰].

مونوز و همکاران (۲۰۱۲) انتقال نور ستاره‌ای را از راه جو زمین در ماه‌گرفتگی و عبورهای فراسیاره‌ای بررسی کردند. هدف اصلی آن‌ها روشن کردن شباهت‌ها و تفاوت‌های سیگنال جمع‌آوری‌شده توسط ناظران زمینی در هر دو نوع رویداد، با تأکید بر تأثیر انکسار بود. آن‌ها ماه‌گرفتگی زمین و گذر سیارات فراخورشیدی مشابه زمین را به‌گونه مقایسه‌ای بررسی کردند. ماه هنگامی که به‌طور کامل در سایه قرار می‌گیرد، نور غیر پراکنده خورشید را دریافت می‌کند که از راه بخشی از جو زمینی که توسط انکسار دیکته گردیده، منتقل شده است. در طول گذر منظومه زمین-خورشید، در اواسط رویداد، نور خورشید شکسته می‌شود و از راه یک حلقه حلقوی که به‌طور کامل سیاره را در بر می‌گیرد، منتقل می‌شود. خمش انکساری پرتوهای نور خورشید مانع از عبور پرتوهای نور خورشید از یک حلقه انکسار خارج از سطح سیاره از رسیدن به ناظر از راه دور می‌شود. برای سیستم زمین-خورشید، در اواسط عبور، این حلقه ۱۲ تا ۱۴ کیلومتر گسترش می‌یابد؛ بنابراین دسترسی ناظر به لایه‌های متراکم‌تر جو را مسدود می‌کند.

در طول این کار، آن‌ها آشکار کردند که دریافت طیف انتقال واقعی زمین در حال گذر، همان‌طور که از فاصله دور مشاهده می‌شود، دشوارتر از آن چیزی است که پیش‌بینی شده بود. طیف‌های ماه‌گرفتگی

به‌دست‌آمده در طول نیم‌سایه، بیشتر از طیف‌های به‌دست‌آمده در طول سایه، نشان‌دهنده طیف در حال عبور است. در زمینه سیارات فراخورشیدی مشابه زمین، طیف‌های ماه‌گرفتگی برای تنظیم دقیق طیف‌های مصنوعی که دانش به‌طور نسبی خوبی، حاصل از دهه‌ها پژوهش‌های جوی زمین را در بر می‌گیرد مفید است. آن‌ها نشان دادند که انکسار بر منحنی‌های نور سیارات فراخورشیدی در حال عبور مانند زمین تأثیر می‌گذارد. اهمیت آن به ویژگی‌های انکساری جو سیاره، اندازه ستاره و فاصله مداری سیاره بستگی دارد. همه این عوامل باید در آینده برای پیش‌بینی یا تفسیر منحنی‌های نور چنین سیاراتی در نظر گرفته شوند [۱۱]. با آن‌که کار آن‌ها متمرکز به تأثیر انکسار بر طیف سیارات در حال عبور بود، نتایج حاصل از کار ما با نتایج آن‌ها یکسان بوده است.

در طیف ما کربن قابل مشاهده نبود. اما ویدال و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از طیف‌سنجی طیف عبوری زمین در زمان ماه‌گرفتگی، توانستند حضور برخی از گونه‌ها مانند سدیم، هیدروژن، اکسیژن و کربن را در جو سیاره گزارش کنند [۱۲]. چگونگی کار آن‌ها به‌طور کامل شبیه به کار ما بود. تنها تفاوتی که داشت این بود که آن‌ها دو گیرنده را در سطح ماه قرار داده بودند و با استفاده از آن‌ها طیف عبوری زمین را بررسی کردند.

با وجود این‌که ما از تلسکوپ اسکای‌واچر ۱۰ اینچ برای رصد کردن ماه استفاده کردیم که نسبت به تلسکوپ یان و همکاران بسیار کوچک است، نتایج یکسان را به دست آوردیم. یان و همکاران (۲۰۰۹) ماه‌گرفتگی کامل در ۱۰ دسامبر ۲۰۰۱ را با استفاده از طیف‌نگار با وضوح بالا که بر روی تلسکوپ ۲/۱۶ متری نصب شده بود بررسی کردند. آن‌ها طیف ماه را زمانی که ماه به‌ترتیب در زیر سایه و خارج از سایه زمین (که به‌عنوان ماه درخشان از آن یاد می‌شود) مورد مطالعه قرار دادند و در نتیجه، عناصر زیستی جو زمین را شناسایی کردند [۱۳].

۶. پیشنهادها

موضوعات زیر می‌تواند به‌عنوان پیشنهادها در این زمینه ارائه شود تا توسط دانشجویان و پژوهشگران علاقه‌مند این بخش در آینده بررسی و پژوهش قرار گیرد:

۱- بررسی ترکیبات جوی با بهره‌گیری از طیف‌سنجی در زمان ماه‌گرفتگی موردی با تلسکوپ ۳/۴ متری.

۲- بررسی ترکیبات جوی با استفاده از طیف‌سنجی در زمان ماه‌گرفتگی موردی با بهره‌گیری از تلسکوپ چرخان.

۳- بررسی ترکیبات جوی با استفاده از طیف‌سنجی IR در زمان ماه‌گرفتگی موردی.

۴- تشخیص مولکول‌های جو از مولکول‌های خارج از جو با استفاده از تغییرات ارتفاع نقاط جذبی در جریان ماه‌گرفتگی.

۵- به‌دست‌آوردن ترکیبات جو سیاراتی مانند مریخ، مشتری و زحل زمانی که خورشید، زمین و آن سیاره در یک خط قرار می‌گیرند.

منابع و مراجعها

- [1] Dai, Z., Ni, D., Pan, L., & Zhu, Y., "Five methods of exoplanet detection", Journal of Physics: Conference Series, vol. 2012, no. 1, p. 012135, 2021.
- [2] Snellen, I. A. G., de Kok, R. J., Le Poole, R., Brogi, M., & Birkby, J., "Finding extraterrestrial life using ground-based high-dispersion spectroscopy", The Astrophysical Journal, vol. 764, no. 2, p. 182, 2013.
- [3] Deming, D., Seager, S., Winn, J., Miller-Ricci, E., Clampin, M., Lindler, D., ... Ennico, K., "Discovery and characterization of transiting super-Earths using an all-sky transit survey and follow-up by the James Webb Space Telescope", Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 121, no. 883, pp. 952-967, 2009.
- [4] Snellen, I. A. G., de Kok, R. J., Le Poole, R., Brogi, M., & Birkby, J., "Finding extraterrestrial life using ground-based high-dispersion spectroscopy", The Astrophysical Journal, vol. 764, no. 2, p. 182, 2013.
- [5] Arnold, L., Gillet, S., Lardi re, O., Riaud, P., & Schneider, J., "A test for the search for life on extrasolar planets: Looking for the terrestrial vegetation signature in the Earthshine spectrum", Astronomy & Astrophysics, vol. 392, no. 1, pp. 231-237, 2002.
- [6] Fauchez, T., Rossi, L., & Stam, D. M., "The O₂ A-band in the fluxes and polarization of starlight reflected by Earth-like exoplanets", The Astrophysical Journal, vol. 842, no. 1, p. 41, 2017.
- [7] Vidal-Madjar, A., Arnold, L., Ehrenreich, D., Ferlet, R., Des Etangs, A. L., Bouchy, F., ... Udry, S., "The Earth as an extrasolar transiting planet: Earth's atmospheric composition and thickness revealed by lunar eclipse observations", Astronomy & Astrophysics, vol. 523, p. A57, 2010.
- [8] Muñoz, A. G., Osorio, M. Z., Barrena, R., Monta  es-Rodríguez, P., Martín, E. L., & Pall , E., "Glancing views of the Earth: From a lunar eclipse to an exoplanetary transit", The Astrophysical Journal, vol. 755, no. 2, p. 103, 2012.
- [9] Strassmeier, K. G., Ilyin, I., Keles, E., Mallonn, M., Järvinen, A., Weber, M., ... Hill, J. M., "High-resolution spectroscopy and spectropolarimetry of the total lunar eclipse of January 2019", Astronomy & Astrophysics, vol. 635, p. A156, 2020.
- [10] de Hoop, A. T., Handbook of radiation and scattering of waves: Acoustic waves in fluids, elastic waves in solids, electromagnetic waves, Academic Press, 2001.
- [11] Muñoz, A. G., Osorio, M. Z., Barrena, R., Monta  es-Rodríguez, P., Martín, E. L., & Pall , E., "Glancing views of the Earth: From a lunar eclipse to an exoplanetary transit", The Astrophysical Journal, vol. 755, no. 2, p. 103, 2012.

- [12] Scheeline, A., "How to design a spectrometer", *Applied Spectroscopy*, vol. 71, no. 10, pp. 2237-2252, 2017.
- [13] Ehrenreich, D., Tinetti, G., Des Etangs, A. L., Vidal-Madjar, A., & Selsis, F., "The transmission spectrum of Earth-size transiting planets", *Astronomy & Astrophysics*, vol. 448, no. 1, pp. 379-393, 2006.