

تحلیل داده‌های رویداد گذر HD202772A ثبت شده به کمک ماهواره مساحی گذر سیارات فراخورشیدی (TESS)^۱ و تخمین پارامترهای فیزیکی سیاره آن

بنیامین صحرانورد*^۱؛ لیلا صادقی اردستانی^۲؛ سعید توسلی^۱

۱. دانشگاه خوارزمی، دانشکده فیزیک

۲. دانشگاه اکستر، گروه اختر فیزیک، انگلستان

دریافت: ۹۹/۰۷/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

چکیده

در این مقاله نحوه دریافت داده‌های ثبت شده به وسیله تلسکوپ فضایی TESS، پردازش داده‌ها و استخراج پارامترهای فیزیکی سیارات از آن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌ایم. امروزه پرکاربردترین و موفق‌ترین تکنیک برای یافتن سیارات فراخورشیدی روش گذر است که در این مقاله نیز از همین روش برای مطالعه سیاره همدم ستاره HD 202772A بهره گرفته شده است. با به دست آمدن منحنی نوری و داده‌های اعتبارسنجی مربوط به HD 202772A از طریق پایگاه داده MAST و با استفاده از روش BLS، که معمول‌ترین روش برای استخراج و تعیین پارامترهای گذر سیاره فراخورشیدی از منحنی نوری است، دوره تناوب مداری، عمق گذر و مدت گذر سیاره به ترتیب $0.0003 - 0.0000 + 0.0000$ روز، 0.0004 - $0.0010 + 0.0032$ و 0.05 ± 0.25 روز تعیین گردید. همچنین شعاع ستاره مادر نیز که در محاسبه عمق گذر و در نتیجه شعاع سیاره به کار می‌رود از کاتالوگ TICv8 انتخاب شده است. در نهایت شعاع سیاره هدف $R_p = 1.447258 + 0.201575 - 0.095917 R_j$ به دست آمد که تطابق نسبتاً خوبی با کمیات گزارش شده توسط وانگ و همکاران ۲۰۱۸ دارد.

واژگان کلیدی: سیارات فراخورشیدی، روش گذر، منحنی نوری، ماهواره مساحی گذر فراخورشیدی (TESS)، سیاره HD202772A

مقدمه

از آخرین دهه قرن بیستم که اولین سیاره خارج از منظومه خورشیدی تأیید شد تا امروز بیش از ۴۰۰۰ سیاره فراخورشیدی کشف شده است (برای اطلاع از تعداد دقیق و به روز می‌توان به سایت سیارات فراخورشیدی ناسا^۲ مراجعه کرد) که در تمامی این موارد هر نوع اثری که از سیاره قابل آشکارسازی باشد به مراتب ضعیف‌تر از ستاره مادر

^۱ Transiting Exoplanet Survey Satellite

*نویسنده مسئول beny.sahra@gmail.com

^۲ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

است. [۱]، [۲] در واقع باید سیگنال اطلاعات مربوط به سیاره را از زمینه پر نور و قوی ستاره نزدیکش جداسازی کرد. همچنین لازم است تمامی آثار حاضر در سر راه آن منظومه تا ما بعلاوه خطاهای ناشی از ابزار و روش‌های رصدی از داده‌های علمی جدا شود. [۳]

شاید بتوان روش گذر را موفق‌تر روش در کشف سیارات فراخورشیدی عنوان کرد زیرا تا به امروز بیشتر از ۷۰ درصد این سیارات با روش گذر، حدود ۲۰ درصد با روش سرعت شعاعی و درصد کم باقی مانده نیز با سایر روش‌ها آشکار شده‌اند.

پروژه‌های فضایی و زمینی بزرگی از جمله TESS، Kepler، WASP و ... با این تکنیک به رصد پرداخته‌اند. [۱] اولین سیاره فراخورشیدی کشف شده با تکنیک گذر توسط تلسکوپ زمینی OGLE^۳ در سال ۲۰۰۲ آشکارسازی شد [۳] و اولین پروژه فضایی که موفق به پدیده ثبت گذر شد MOST^۴ بود که به منظور بررسی تغییرات ستاره‌ای^۵ در سال ۲۰۰۳ به فضا پرتاب شده بود. [۵] در سال ۲۰۰۶ CoRoT^۶ با اولویت کشف سیارات با پدیده گذر در مدار زمین قرار گرفت و موفق به آشکارسازی سیارات با روش گذر شد. به دنبال این پروژه، تلسکوپ‌های فضایی دیگری مانند کپلر راه اندازی و اجرا شدند که عملکرد درخشانی داشتند. [۶]

مأموریت کپلر ناسا که یکی از مهم‌ترین تحقیقات در زمینه سیارات فراخورشیدی بود، برای یک دوره چهار ساله طراحی شده بود. این تلسکوپ در سال ۲۰۰۹ به فضا پرتاب شد و در مدار قرار گرفت. هدف تعیین شده بررسی یک میدان تقریباً ۱۷۰۰۰۰ ستاره‌ای و جست و جوی سیاراتی از ابعاد زمین بود. کپلر انقلابی در زمینه سیارات فراخورشیدی ایجاد کرد به صورتی که با وجود بازنشسته شدن این تلسکوپ، بیشتر سیارات شناخته شده تاکنون را کشف کرده است. برخلاف تیم‌های دیگری که به روش گذر کاوش می‌کنند، این تلسکوپ تنها ۳٪ از سیاراتش از ابعاد مشتری هستند ($0.9R_j <$)؛ در حالی که بیشتر آن‌ها سیاراتی با ابعاد زمین یا ابرزمین هستند. در سال ۲۰۱۳ میلادی دو ژيروسکوپ تلسکوپ از کار افتاد که باعث شد هدف‌گیری آن غیرقابل اطمینان شود از این رو عملیات علمی تحت نام "کپلر" متوقف شد اما تحت عنوان "K2" با برنامه علمی جدید دوباره به عرصه فعالیت علمی بازگشت. حالتی برای رصد با این تلسکوپ در نظر گرفته شده بود که فقط نیاز به یک ژيروسکوپ بود که با شرایط تلسکوپ سازگار باشد. قسمت‌های نزدیک به دایره البروج را برای حدود ۸۰ روز مشاهده کرد. توزیع سیارات یافت شده توسط K2 تقریباً مشابه کپلر است البته با ۸٪ سیارات غول بیشتر. ۲۵ سپتامبر ۲۰۱۸ تصویری با عنوان آخرین نورگیری از این پروژه فضایی منتشر شد و اعلام شد این تلسکوپ فضایی به پایان راه رسیده و سوخت آن رو به اتمام است و در یک ماه آینده برای حالت خواب تنظیم می‌شود. [۷]

³ Optical Gravitational Lensing Experiment

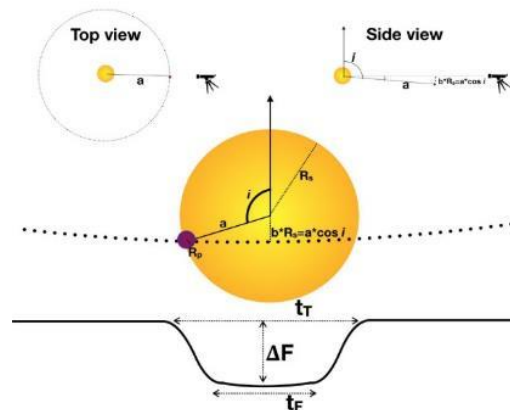
⁴ Microvariability and Oscillations of Stars

⁵ Asteroseismology

⁶ Convection, Rotation and planetary Transits

روش گذر

برای کشف سیارات فراخورشیدی تکنیک‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله از تکنیک گذر استفاده شده که در ادامه آن را توضیح خواهیم داد. این روش از این حقیقت استفاده می‌کند که زمانی که سیاره، در راستای دید ما، از مقابل قرص ستاره مادرش می‌گذرد، بخشی از نور دریافتی ستاره کم می‌شود و اگر به نمودار شدت نور ستاره بر حسب زمان نگاه کنیم می‌بینیم که برای مدت زمان معینی نور ستاره به مقدار کمی افت می‌کند و سپس دوباره به حالت اول باز می‌گردد. مقدار این افت نور برای بزرگ‌ترین و نزدیک‌ترین سیاراتی که تا به حال گذر آن‌ها از مقابل ستاره مرکزیشان رصد شده است از ابعاد چند صدم درصد نور ستاره است و با توجه به ابزارهای رصدی موجود آشکارسازی این میزان کوچک افت نور دقت بسیار بالایی را هم در مرحله انجام رصد و هم در پردازش داده‌ها می‌طلبد. برای تأیید یک سیاره فراخورشیدی دست کم باید سه افت نور رصد شود. این روش اطلاعات زیادی همچون منحنی نوری، اندازه سیاره، سرعت شعاعی، سرعت مداری، دوره تناوب مداری، نسبت قطر ستاره مادر به سیاره و حتی در برخی موارد اطلاعاتی از اتمسفر و جنس سیاره را به دست می‌دهد. این روش از رایج‌ترین روش‌های یافتن سیارات فراخورشیدی است.



شکل ۱: نمودار شدت درخشندگی بر حسب زمان و نمایش موقعیت سیاره نسبت به ستاره مادر در منحنی نوری (arXiv: 1803.07867)

در این مقاله پیش‌فرض‌های رایجی برای ساده‌سازی محاسبات در نظر گرفته شده است.

- مدار سیاره دایره است.
- سیاره همدم نسبت ستاره تاریک است و سهمی در شدت نور در منحنی نوری ندارد (اما با ابزارها و محاسباتی با دقت بالاتر می‌توان مقدار نور بازتابی از سطح سیاره را رصد کرد).
- نور دریافت شده همواره از یک ستاره است.
- گرفت‌ها به شکل U هستند و کف نسبتاً صافی دارند نشان دهنده آن است که سیاره تقریباً از مرکز قرص ستاره عبور کرده است.
- دوره تناوب مداری سیاره از فاصله دو گذر متوالی به دست می‌آید.

• درخشندگی قرص ستاره یکنواخت در نظر گرفته شده و از اثر تاریکی لبه صرف نظر شده است. [۸]
از رصد و نورسنجی ابتدا منحنی نوری را به دست می‌آوریم که به ما افت نوری را می‌دهد و با توجه به فرمول زیر نسبت شعاع سیاره به شعاع ستاره مشخص می‌شود:

$$\Delta F \approx \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 = k^2 \quad (1)$$

همچنین رصد به ما دو پارامتر t_T و t_F را می‌دهد که به ترتیب زمان کل گذر (از ورود جزئی سیاره به قرص خورشید تا خروج از آن) و زمانی که کل قرص سیاره کاملاً در داخل قرص ستاره قرار دارد و درخشندگی تقریباً ثابت می‌ماند (صرف نظر از اثر درخشندگی ناهمسان قرص ستاره)، هستند. از این پس t_T در این مقاله زمان یا مدت گذر و t_F زمان یا مدت گرفت نامیده می‌شود. با استفاده از این دو پارامتر، k و دوره تناوب مداری (P) که آن هم از رصد مشخص می‌شود، در رابطه زیر حداقل فاصله گذر سیاره از مرکز ستاره (b) به دست می‌آید:

$$b \equiv \frac{a}{R_s} \cos i = \left\{ \frac{(1-k)^2 - [\sin^2(t_F\pi/P) / \sin^2(t_T\pi/P)](1+k)^2}{\cos^2(t_F\pi/P) / \cos^2(t_T\pi/P)} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

حال b را یافته‌ایم. همچنین می‌دانیم که b متناسب است با شعاع مداری سیاره (a) بخش بر شعاع ستاره. پس می‌توان این نسبت را از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\frac{a}{R_s} = \frac{1}{\tan(t_T\pi/P)} \sqrt{(1+k)^2 - b^2} \quad (3)$$

باتوجه به این نکته که نسبت شعاع سیاره به ستاره مقدار بسیار کوچکی است می‌توان به این نکته پی‌برد که افت نوری که رصد می‌شود به نسبت درخشندگی ستاره مادر بسیار کوچک است و نیاز به دقت بالایی دارد. [۸]، [۹]، [۱۰]
پس در این روش با استفاده از منحنی نوری پارامترهایی مانند مدت زمان گذر، عمق گذر، دوره تناوب را مستقیماً استخراج می‌کنیم سپس سایر پارامترهای روابط بالا را به دست می‌آوریم.
یکی از کاستی‌های این روش این است که سیاراتی که صفحه مداری آن‌ها تقریباً عمود بر راستای دید است با این روش دیده نمی‌شوند، در حقیقت احتمال رصد گذر در بین تمام سیارات موجود بسیار کم است.

تلسکوپ فضایی TESS

تلسکوپ فضایی TESS که در سال ۲۰۱۸ به فضا پرتاب شده جایگزین ماهواره کپلر در یافتن سیارات فراخورشیدی با روش گذر شد. این تلسکوپ طی دو سال ۸۵٪ آسمان را مساحی کرد و با مشاهده ستارگان کوتوله قرمز به دنبال سیارات نزدیک و در مقیاس زمین خواهد گشت. برخلاف تلسکوپ کپلر که تنها ۰٫۲۵٪ درصد آسمان را رصد کرد و بیشتر سیاراتی دور دست و ستارگانی از رده‌های طیفی مانند خورشید را مشاهده کرد، بیشتر تلسکوپ‌های فضایی و زمینی

(که معمولاً بازتابی هستند) قدرت تفکیک بالایی دارند اما میدان دید آن‌ها کوچک است اما برخی تلسکوپ‌ها مانند TESS در فضا و WASP روی زمین از لنزهایی با میدان دید باز برای رصد استفاده می‌کنند. از همین جهت نگاه کپلر به آسمان عمق‌تر اما نگاه TESS وسیع‌تر است. هدف پروژه TESS این است که میزان بیشتری از آسمان را پوشش دهد و قسمت‌هایی از آسمان را به منظور یافتن سیاراتی با دوره تناوب بالا به مدت حدوداً یک سال به صورت پیوسته رصد کند.

آشکارساز این تلسکوپ از چهار دوربین میدان دید باز در بازه اپتیکی و فرورسرخ تشکیل شده که هر دوربین خود چهار CCD مجزا دارد. به منظور پوشش بیشتر آسمان در هر رصد، میدان دید دوربین‌ها با هم همپوشانی ندارد و به صورت موزاییکی کنار هم قرار گرفته است. میدان دید هر دوربین $(24^{\circ} \times 24^{\circ})$ و مجموع چهار دوربین $(24^{\circ} \times 96^{\circ})$ است که به آن یک "بخش" می‌گویند. در حقیقت میدان دید TESS 23.04° درجه مربع است که در مقایسه با کپلر با میدان دید 115° درجه مربع، بسیار گسترده است. در هر نیم کره 13° بخش تعریف شده و تلسکوپ 27 روز به هر بخش خیره می‌شود. در نهایت بعد از دو سال مساحی هر دو نیم کره به پایان رسید و قسمت اول مأموریتش خاتمه یافت. [۱۱] به دلیل وسعت میدان دید TESS مزاحمت نورهای منظومه خورشیدی به خصوص ماه برای آن بیشتر است به همین دلیل زاویه‌های دید و موقعیت‌های رصدی TESS که در مداری با دوره $13/7$ روزه و تقریباً عمود بر صفحه مداری ماه دور زمین در گردش است، با در نظر گرفتن دور ماندن از این نورهای مزاحم برنامه ریزی شده است. این مشکل برای کپلر کم در دسترس‌تر بود. تلسکوپ کپلر با استفاده از گرانش زمین در مداری به دور خورشید گردش می‌کرد. [۱۲] واحد مدیریت داده (DHU) نرم افزارهای لازم را برای کنترل دوربین‌ها، هدایت ماهواره، پردازش و ارسال داده‌ها و اطلاعات به زمین را فراهم می‌کند. دوربین‌های این تلسکوپ تصاویری با زمان نوردهی 2 ثانیه ثبت می‌کنند. DHU علاوه بر پردازش اولیه داده، تصاویر خام را به دو صورت پیکسل‌های هدف 2 دقیقه‌ای و تصاویر تمام فریم 30 دقیقه‌ای مهیا می‌کند. داده‌ها هر $13/7$ روز یک بار به زمین ارسال می‌شود، زمانی که تلسکوپ یک دور در مدارش گردش می‌کند و به حضیض می‌رسد. در این زمان رصد متوقف می‌شود. پس ثبت داده‌ها و فاصله‌های زمان بین آن‌ها در هر دور گردش ماهواره بستگی به قرار گیری اجرام منظومه خورشیدی (نورهای مزاحم) و عملیات‌های مربوط به ماهواره مانند ارسال داده‌ها و ارتباط با زمین است. [۱۱]، [۱۳]

هدف اصلی این تلسکوپ فضایی رصد ستارگان رده طیفی M به منظور یافتن سیارات فراخورشیدی خاکی است. این دسته از ستارگان به دلایل زیر انتخاب شده‌اند:

- رصد سیارات اطراف ستاره‌های کوچک‌تر آسان‌تر است.
- بیشتر ستاره‌های اطراف ما از این نوع هستند.
- در طول موج‌های قرمز پیدا کردن فوتون‌های نویز ساده‌تر است.
- اثرات سیاره‌های کوچک و خنک روی ستاره‌های رده M بهتر قابل مشاهده هستند. [۱۴]

⁷ Sector

⁸ Data Handling Unit

گذرگاه باند آشکارساز TESS از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر را پوشش می‌دهد و حد بالای طول موج‌های بلند برای آشکارسازهای CCD در محدوده فرسرخ است و توسط اندازه بازده آن‌ها تنظیم می‌شود و انتهای طول موج کوتاه توسط یک پوشش (فیلتر عبور طول موج بالای حد آستانه) روی یکی از عدسی‌های هر دوربین تنظیم می‌شود. در مقایسه با کپلر، پهنای باند TESS نسبتاً گسترده نیست اما طول موج‌های قرمزتر را پوشش می‌دهد که نشان دهنده اولویت‌های مختلف هدف دو مأموریت است (ستاره‌های خورشید مانند برای کپلر؛ ستاره‌های کوچک و خنک برای TESS). عرض ۴۰۰ نانومتر بزرگترین انتخاب عملی برای طراحی اپتیکی بود. [۱۵]

تلسکوپ فضایی TESS در دو سال اول مأموریت خود تمام کره آسمان را با برنامه‌ریزی برای اهدافی با اولویت سیارات فراخورشیدی رصد کرد و دو سال بعدی برنامه‌ای تحت عنوان محققین مهمان^۹ (GI programs) خواهد داشت به این صورت که محققین پیشنهادات رصد خود را ارسال می‌کنند تا توسط تیم علمی TESS بررسی شود. TESS ستاره‌های کوچک درخشانی که در نزدیکی زمین هستند را بررسی می‌کند و به محققین اجازه می‌دهد علاوه بر جست و جو برای یافتن سیارات فراخورشیدی به بررسی خود این ستارگان نیز بپردازند؛ تحقیقاتی نظیر نوسان ستارگان، ستارگان دو یا چندتایی و سایر موارد. همچنین به دلیل فراهم کردن تصاویر تمام فریم که بخش‌های وسیعی از آسمان را پوشش می‌دهد، امکان استفاده از این تصاویر برای بررسی محیط‌های میان ستاره‌ای و یافتن ابرنواخترها وجود دارد. [۱۱]، [۱۶]

ثبت و پردازش داده

برای بررسی و بایگانی داده‌های تلسکوپ فضایی TESS، تیم‌ها و مؤسسات گوناگونی در مراحل مختلف وظایفی را ایفا می‌کنند. در این بخش به مسیری که داده‌ها از ماهواره تا رسیدن به دست محققین طی می‌کنند می‌پردازیم. در ابتدا شبکه فضای ژرف (DSN)^{۱۰} داده‌ها را دریافت سپس در اختیار مرکز عملیات بارگذاری (POC)^{۱۱} زیر نظر مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)^{۱۲} قرار می‌دهد. POC داده‌های کالیبره نشده ولی دسته‌بندی شده را به مرکز پردازش و بهره‌برداری علمی (SPOC)^{۱۳} از بخش NASA Ames تحویل می‌دهد. داده‌ها شامل پیکسل‌های ثبت شده، لیست اهداف رصد شده، موقعیت تلسکوپ، داده‌های بخش فنی و مدل‌های تعیین مشخصات صفحه کانونی است. به دو بخش POC و SPOC در مجموع مرکز بهره‌برداری علمی (SOC)^{۱۴} می‌گویند که مسئولیت پردازش داده‌ها را به عهده دارند. SPOC داده‌های علمی را در دو مرحله کالیبره می‌کند. اول به وسیله مدار و سپس به وسیله بخش. این تیم هر بخش را با نرم افزار جست و جو، سپس هر افت نور قابل اندازه‌گیری (TCE)^{۱۵} را ثبت می‌کند. داده‌های کالیبره

⁹ Guest Investigator programs

¹⁰ Deep Space Network

¹¹ Payload Operations Center

¹² Massachusetts Institute of Technology

¹³ Science Processing & Operations Center

¹⁴ Science Operations Center

¹⁵ Threshold Crossing Event

شده فایل پیکسل‌های اهداف (TPF)^{۱۶}، تصاویر تمام فریم (FFI)^{۱۷} و TCEها به دفتر علمی TESS (TSO)^{۱۸} ارسال می‌شوند (TSO شامل MIT و رصدخانه اختر فیزیک اسیمت‌سونین، SAO، می‌شود). این دفتر مسئول تحلیل جزییات TCEها و اجرام جالب توجه TESS (TOIs)^{۱۹} است. TSO فهرست TOIها را در اختیار بایگانی تلسکوپ‌های فضایی میکولسکی (MAST)^{۲۰} می‌گذارد. موقعیت و اطلاعات مستندسازی روند بررسی فهرست‌ها، داده‌های پردازش شده و داده‌های کمکی به صورت ماهانه روی سایت MAST بارگذاری می‌شود. این سایت بایگانی اصلی داده‌های علمی TESS است و ابزارهای کار با این داده‌ها را نیز برای محققین فراهم کرده است.

داده‌هایی که بعد از پایپلاین که در بالا اشاره شد در اختیار محققین قرار می‌گیرد به صورت زیر است:

- فایل پیکسل‌های اهداف
- منحنی نوری اهداف
- تصاویر تمام فریم
- پیکسل‌های پلهو به پلهو
- اطلاعات اعتبارسنجی داده‌ها
- داده‌های کمکی پایپلاین و بردارهای پایه همسو

[۱۱۱]، [۱۱۲]، [۱۱۵]

در این پروژه از داده‌های منحنی نوری استفاده شده است.

دریافت داده

در این مقاله ستاره و سیاره همدش با اسم HD 202772A و یا TID290131778 (شناسه مختص TESS) به عنوان هدف انتخاب شده است.

با داشتن موقعیت مکانی ستاره هدف به سایتی^{۲۱} که به منظور فهرست‌بندی اجرام رصد شده تلسکوپ فضایی TESS راه اندازی شده وارد می‌شویم تا پیدا کنیم که ستاره مورد نظر ما در کدام بخش از تصاویر ثبت شده تلسکوپ قرار دارد. موقعیت مکانی ستاره هدف در آسمان:

RA: 319.6990

Dec: -26.162

ستاره TID290131778 در داده‌های ثبت شده TESS به موقعیت زیر است:

Sector1 / Camera1 / CCD4

[۱۱۷]

¹⁶ Target Pixel Files

¹⁷ Full Frame Images

¹⁸ TESS Science Office

¹⁹ TESS Objects Interest

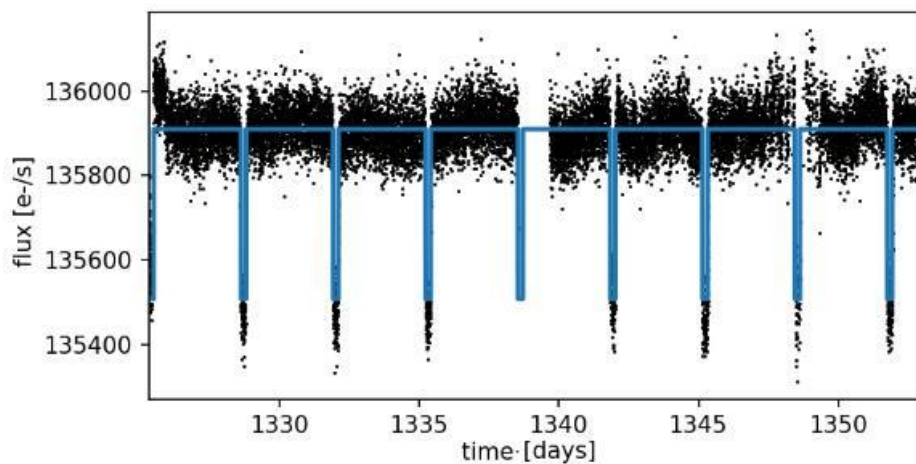
²⁰ Mikulski Archive for Space Telescope

²¹ <https://tess.mit.edu/observations/>

حال برای دریافت داده‌های مربوطه به سایت MAST مراجعه می‌کنیم. Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescope که به اختصار MAST گفته می‌شود سایتی است که چندین مجموعه از داده‌های نجومی و تصاویر را در یک بایگانی دیجیتال گردهم آورده است. داده‌های جرم مورد نظر ما در آدرسی در این پرتال قرار دارد^{۲۲}. داده‌های دریافت شده شامل هفت فایل است. سه فایل فیتس (FITS)^{۲۳}، دو فایل پی دی اف (PDF) و یک فایل متنی. پیکسل‌های ستاره هدف، منحنی نوری، اطلاعات اعتبارسنجی داده‌ها و داده‌های کمکی خط سیر داده در فرمت‌های فایل فیتس، پی دی اف و فایل متنی هستند. [۱۸]

منحنی نوری

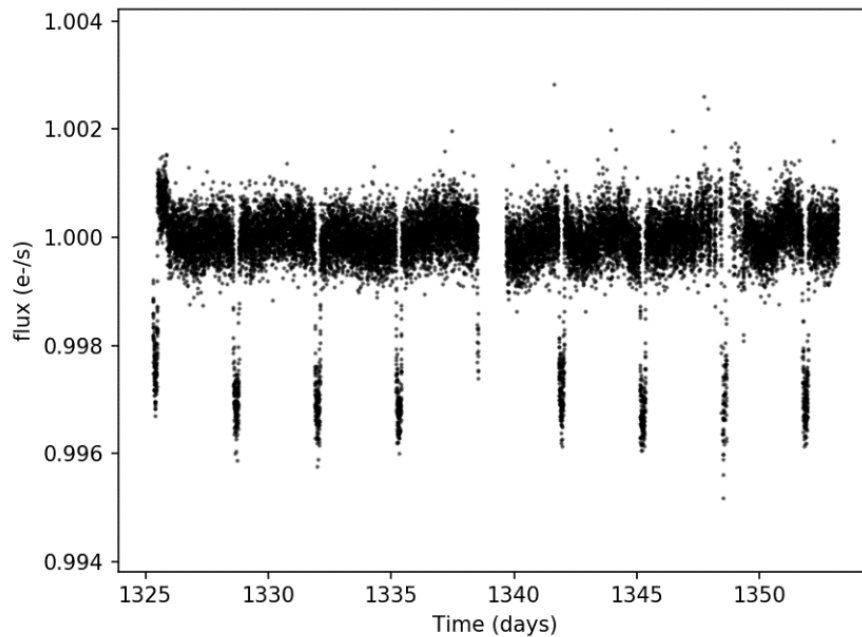
همان‌طور که قبل‌تر گفته شد TESS به هر بخش ۲۷ روز نگاه می‌کند پس منحنی نوری کلی با نوردهی بلند مدت (long cadence) ستاره نیز باید همین مقدار باشد، در حقیقت نوردهی بلند مدت یعنی نوری که از هدف در تمام مدت رصد آن بخش توسط تلسکوپ TESS جمع آوری شده است. یک هدف ممکن است در قسمت‌های مشترک بخش‌ها باشد که بدین ترتیب TESS به آن برای مدت طولانی‌تری خیره شده است که بدین ترتیب آن هدف دو یا چند منحنی نوری در دو یا چند بخش خواهد داشت. در این مقاله برای رسم منحنی‌ها و کار با داده‌ها از زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است. منحنی نوری کلی ستاره TID290131778 به این صورت است:



شکل ۲: منحنی نوری کلی به همراه مدل‌سازی برای دوتایی TID290131778

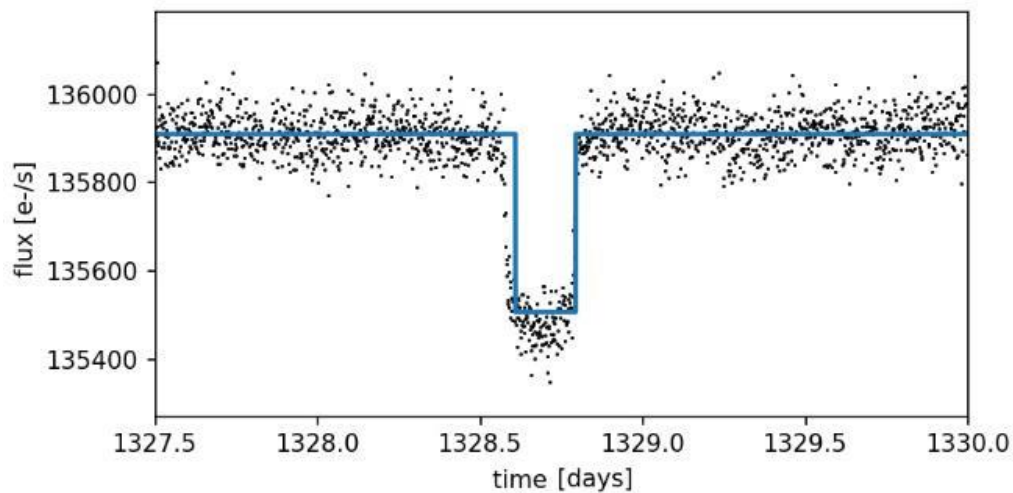
²² <https://archive.stsci.edu/missions/tess/tid/s0001/0000/0002/9013/1778>

²³ Flexible Image Transport System



شکل ۳: منحنی نوری کلی (نوردهی بلند مدت) TID290131778

همچنین نمودار منحنی نوری برای یک دوره گرفت سیاره، شدت افت نور بر حسب فاز گرفت، به صورت زیر است:



شکل ۴: نمودار شدت افت نور بر حسب فاز برای دوتایی TID290131778

استخراج پارامترهای فیزیکی و مداری سیاره HD 202772A b

اکنون که منحنی نوری را دریافت کردیم می‌توانیم با مدل‌سازی داده‌ها پارامترهایی نظیر دوره تناوب مداری و عمق گذر را استخراج کنیم. دوره تناوب مداری که به اختصار دوره هم نامیده می‌شود مدت زمانی است که سیاره یک دور

کامل در مدار خود دور ستاره میزبان می‌زند. در هنگام گذر، نور دریافتی از ستاره میزبان کاهش پیدا می‌کند. با رسم نمودار شدت نور دریافتی بر حسب زمان در بازه‌ای بزرگ‌تر از زمان گذر منحنی نوری شامل افت‌های قابل اندازه‌گیری می‌شود. اندازه این افت نورها را عمق گذر می‌گویند.

برای مدل‌سازی داده و استخراج پارامترها از الگوریتم BLS^{24} استفاده شده است. این الگوریتم یک ابزار آماری است که برای داده‌هایی که به صورت سری‌های زمانی هستند کاربرد دارد. به منظور یافتن سیارات فراخورشیدی و ستاره‌های دوتایی گرفتی به کار می‌رود و بر اساس فیت کردن مستطیل‌های یکسان در قسمت‌های افت نوری منحنی عمل می‌کند.

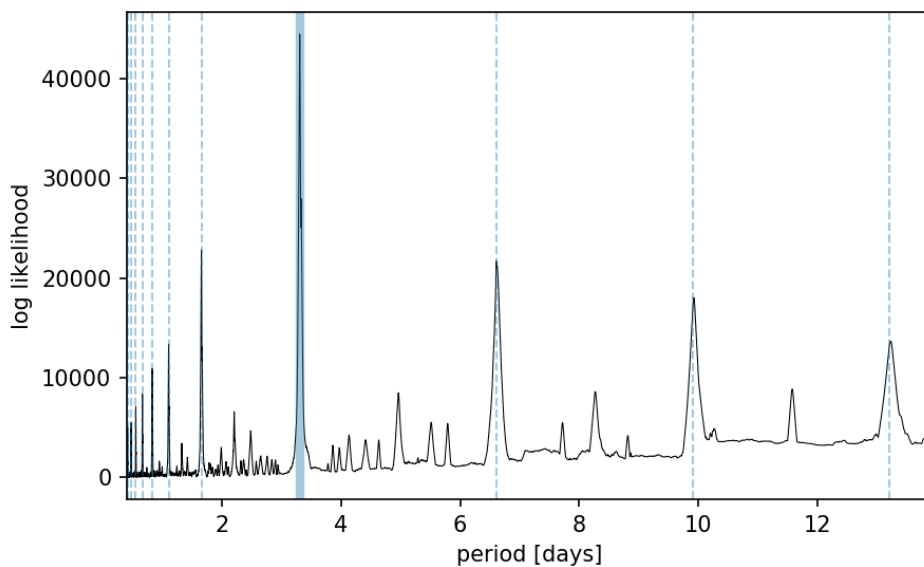
این روش از معمول‌ترین الگوریتم‌ها برای مدل‌سازی منحنی نوری سیارات فراخورشیدی است. [۱۹]، [۲۰] فایل فیتسی که انتهای نام آن IC نوشته شده است و به معنی نوردهی بلند مدت است که در داده‌های دریافت شده قرار دارد را در کد BLS بارگذاری می‌کنیم یا آدرس این فایل در بایگانی سایت MAST را در کد قرار می‌دهیم تا مستقیم دانلود و پردازش شود.

با اجرا شدن BLS نمودار periodogram رسم می‌شود سپس پارامترهای زیر به دست می‌آید:

دوره تناوب مداری: ۳/۳۰۹۱۰۱۷۶ روز

عمق گذر: ۰/۰۰۳۲۱۲۶۳

مدت گذر: ۰/۲۵۰۰۰ روز



شکل ۵: این الگوریتم دوره‌های تناوب مختلف را به منحنی نوری فیت می‌کند و با رسم آن بهترین دوره تناوب را مشخص می‌کند.

²⁴ Box Least Squares

محاسبه شعاع سیاره HD 202772A b

با توجه با این که ستاره‌ها و سیارات به صورت کره وجود دارند، تصویر دریافتی از آن‌ها به صورت دایره است. زمانی که گذر اتفاق می‌افتد، از دید ناظر زمینی، سیاره داخل قرص ستاره مادر خود می‌شود و به اندازه مساحت سیاره، نور ستاره مادر برای ناظر مسدود می‌شود. در نتیجه نسبت مساحت ستاره به مساحت سیاره برابر می‌شود با کل نور دریافتی (نسبت (۱) به میزان افت نور. پس نسبت زیر همواره برقرار است:

$$\frac{\pi R_*^2}{\pi R_p^2} = \frac{1}{\text{Depth}} \quad (۴)$$

از معادله بالا داریم:

$$\text{Depth} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (۵)$$

معادله ۵ رابطه شعاع ستاره و سیاره را با عمق گذر نشان می‌دهد. شعاع ستاره را از منابع جایگذاری می‌کنیم و عمق گذر را از منحنی نوری به دست می‌آوریم. در نهایت شعاع سیاره را خواهیم یافت. حال برای به دست آوردن شعاع سیاره نیاز است شعاع ستاره مادر را داشته باشیم. این مقدار را از کاتالوگ ورودی TESS، TICv8، برای ستاره TID290131778 انتخاب می‌کنیم. مشخصات ستاره از جمله شعاع آن در داده‌های اعتبارسنجی هم که دریافت کردیم وجود دارد اما با TICv8 تفاوت دارد و در حقیقت از کاتالوگ TICv7 است. شعاع گزارش شده در جدیدترین کاتالوگ TESS تا به امروز (TICv8) به شرح زیر است:

$$R_* = 2.62392 R_{\odot} \quad [۲۳],[۲۲],[۲۱]$$

حال که عمق گذر و شعاع ستاره میزبان را در اختیار داریم مقدار شعاع سیاره را به دست می‌آوریم:

$$R_p = 1.38458962 R_j \quad (۷)$$

مقایسه پارامترهای به دست آمده با گزارش وانگ و همکاران ۲۰۱۸

اکنون که پارامترهای سیاره را از داده‌های منحنی نوری استخراج و محاسبه کردیم می‌توانیم آن‌ها را با مقادیری که تیم وانگ در مقاله سال ۲۰۱۸ گزارش کرده‌اند مقایسه کنیم تا درستی و دقت پروژه بررسی شود. پارامترهای ستاره در ابتدا از کاتالوگ TICv7 بوده اما با به روز رسانی این پارامترها در کاتالوگ بعدی یعنی TICv8 از پارامترهای جایگزین استفاده شده. اندازه شعاع ستاره به میزان قابل توجهی از ۱/۳۱۹ برابر خورشید به ۲/۶۲۴ برابر خورشید تغییر کرده است؛

همراه منحنی نوری داده‌های کمکی و اعتبارسنجی دریافت شد همچنین اطلاعات و مشخصات ستاره و سیاره هدف نیز در کنار آن‌ها بود که در آن شعاع سیاره $7/8308$ برابر شعاع زمین (یعنی $0/69860743$ برابر شعاع مشتری) گزارش شده بود. دلیل این اعداد استفاده از مقدار $1/319$ برابر خورشید برای شعاع ستاره از TICv7 است که در TICv8 شعاع ستاره به $2/624$ برابر خورشید اصلاح شده است. دلیل این تغییر بزرگ استفاده از سری دوم داده‌های انتشار یافته Gaia (GaiaDR2) در کاتالوگ TICv8 است. پس مقایسه نتایج با گزارشات قبلی TESS (TICv7) نتیجه‌گیری مطلوبی نخواهد داشت و در جدول و نتیجه‌گیری لحاظ نشده است. همچنین به منظور بررسی بهتر، پارامترهای به دست آمده با مقادیر گزارش شده در مقاله وانگ و همکاران ۲۰۱۸، مقایسه شده است. [۲۴]

جدول ۱: داده‌های محاسبه شده و داده‌های گزارش شده در مقاله arXiv: 1810..2341v1

پارامتر	واحد	محاسبه شده	خطا	مقاله وانگ ۲۰۱۸	خطا
شعاع ستاره	شعاع خورشید	-	-	۲/۶۱۴	+۰/۰۸۰ -۰/۱۱
شعاع سیاره	شعاع مشتری	۱/۴۴۷۱۵۸	+۰/۲۰۱۵۷۵ -۰/۰۹۵۹۱۷	۱/۵۶۲	+۰/۰۵۱ -۰/۰۶۹
عمق گذر	-	۰/۰۰۳۲۱۳	+۰/۰۰۰۹۵۷ -۰/۰۰۰۴۱۲	۰/۰۰۳۷۷۵	+۰/۰۰۰۱۰ -۰/۰۰۰۹۹
مدت گذر	روز	۰/۲۵۰۰۰۰	$\pm 0/050000$	۰/۲۳۴۵۸	+۰/۰۰۱۱ -۰/۰۰۱۲
دوره	روز	۳/۳۰۹۱۰۲	+۰/۰۰۰۰۰۲ -۰/۰۰۰۲۶۳	۳/۳۰۸۹۶۰	$\pm 0/000082$

همچنین با دانستن پارامترهای شعاع ستاره از مقاله وانگ، دوره، مدت گذر و شعاع سیاره از منحنی نوری که در بالا قابل مشاهده است و استخراج مدت گرفت از منحنی نوری می‌توان پارامترهای مداری این سیاره را محاسبه کرد. مدت گرفت $0/108742$ روز محاسبه شده و با استفاده از معادله‌های ۱، ۲ و ۳ پارامترهای زیر به دست آمده است:

جدول ۲: داده‌های به دست آمده از پارامترهای اولیه و داده‌های گزارش شده در مقاله arXiv: 1810..2341v1

پارامتر	واحد	محاسبه شده	خطا	مقاله وانگ ۲۰۱۸	خطا
Transit Impact Parameter (b)	-	۰/۸۳۲	+۰/۰۳۰ -۰/۲۱۶	۰/۴۱۶	+۰/۰۵۵ -۰/۰۷۸
نیم قطر بزرگ (a)	واحد نجومی (AU)	۱/۹۴۴۱۶	+۰/۵۱۱۲۵ -۰/۱۵۰۶۴	۰/۰۵۱۹۰	+۰/۰۰۰۷۵ -۰/۰۰۱۲۰
زاویه تمایل مداری (i)	درجه	۸۹/۷۰	+۰/۱۱ -۰/۰۴	۸۴/۲۰	+۱/۱۰ -۰/۸۶

نتیجه‌گیری

در این مقاله تکنیک گذر برای کشف سیارات فراخورشیدی و پروژه TESS به صورت مختصر توضیح داده شد. سپس به دریافت و پردازش داده‌ها پرداختیم. پارامترهای دوره تناوب مداری، عمق و دوره گذر و در نتیجه شعاع سیاره HD 202772A b به دست آورده شد. در نهایت مقادارهای به دست آمده در جدولی با مقادارهای گزارش شده در مقاله وانگ و همکاران ۲۰۱۸ مقایسه شد. همانطور که در جدول مشخص است داده‌های به دست آمده از منحنی نوری با روش BLS با گزارش این مقاله همخوانی قابل قبولی دارد. به عنوان مثال مقدار عمق گذر به دست آمده در این مقاله 0.003213 و مقدار عمق گذر گزارش شده در مقاله وانگ 0.003775 است. به نظر می‌رسد که دلیل اختلاف در میزان گرفت این نکته باشد که احتمالاً در مقاله وانگ گذرهای اول، پنجم و هشتم در نظر گرفته نشده است اما در این مقاله کل منحنی نوری لحاظ شده است که در شکل ۳ نمایش داده شده است. گذر اول کامل نیست اما عمق آن مشهود و قابل اندازه‌گیری است ولی کاملاً تخت نیست. در گذر پنجم نه تنها منحنی گذر کامل مشخص نیست بلکه عمق آن نیز به درستی ثبت نشده. همچنین به نظر می‌رسد ثبت داده‌ها در قسمتی از منحنی نوری که گذر هشتم در آن قسمت قرار دارد با اختلال همراه بوده است که ممکن است در مقادیر پارامترها تأثیرگذار باشد.

در ادامه بخش قبل پارامترهای مداری که به صورت غیرمستقیم از منحنی نوری به دست می‌آیند نیز در جدول ۲ آورده و با داده‌های مقاله وانگ و همکاران ۲۰۱۸ مقایسه شده‌اند. برخلاف پارامترهای اولیه که تطابق خوبی داشتند این پارامترها با گزارشات وانگ و همکاران ۲۰۱۸ اختلاف دارند. دلیل این اتفاق به رصدهای دنبال کننده^{۲۵} برمی‌گردد. در مقاله وانگ ۲۰۱۸ علاوه بر داده‌های TESS از رصدخانه‌های دیگری همچون Keck استفاده شده و اضافه بر روش گذر، پارامترها از روش‌های دیگری همچون سرعت شعاعی نیز بررسی شده‌اند. پس آشکارا می‌توان نتیجه گرفت برای یافتن و محاسبه تمام پارامترهای یک سیاره نیاز به رصدهای دنبال کننده و مداوم با استفاده از تکنیک‌های مختلف است. با اینکه روش گذر در یافتن سیارات فراخورشیدی بسیار درخشان عمل کرده است اما برای بررسی دقیق‌تر آن‌ها روش‌های مکملی مانند روش سرعت شعاعی لازم است.

منابع

1. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
2. <http://exoplanet.eu/catalog/>
3. شناخت و رصد سیاره‌های فراخورشیدی: بروس ال. گری، امیرنظام امیری و آتیلا پرو، نشر دانش پژوهان جوان، چاپ اول، ۱۳۹۵
4. <http://ogle.astrouw.edu.pl/>

²⁵ Follow-up

5. https://astro-canada.ca/le_telescope_spatial_most-the_most_space_telescope ng#:~:text=MOST%20stands%20for%20Microvariability%20and,planets%20orbiting%20ar ound%20other%20stars.
6. P.Barge et al. “Transiting exoplanets from the CoRoT space mission I – CoRoT- Exo-1b: a low-density short-period planet around a G0V star” submitted on 21 Mar 2008. (ArXiv: 0803.3202)
7. https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html
8. S.Seager et al. “On the Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve” submitted on 13 Jun 2002. (ArXiv: astro-phy/0206228)
9. Hans J. Deeg, Roi Alonso. “Transit Photometry as an Exoplanet Discovery Method” submitted on 21 Mar 2018. (ArXiv: 1803.07867)
10. Sara Seager et al. “Extrasolar Planet Transit Light Curves and a Method to Select the Best Planet Candidates for Mass Follow-up” Submitted on 2 Oct 2002. (ArXiv: astro-ph/0210076)
11. George R. Ricker et al. “The Transiting Exoplanet Survey Satellite” submitted to journal of Astronomical Telescope, Instruments, and Systems on 1 Jun 2014. (ArXiv: 1406.0151)
12. <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess>
13. Jon M. Jenkins “TESS Science Processing Operations Center Pipeline and Data Products” Submitted to American Astronomical Society on Aug 2019
14. Peter W. Sullivan et al. “The Transiting Exoplanet Survey Satellite: Simulations of planet detection and astrophysical false positives” Submitted to Astrophysic Journal on 11 Jun 2015. (ArXiv: 1506.03845)
15. Jon M. Jenkins “The TESS science processing operations center” Submitted on 8 Aug 2016
16. <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/proposing-investigations.html>

17. <https://tess.mit.edu/observations/>
18. <https://archive.stsci.edu/tess/index.html#searchtools>
19. G. Kovacs, S. Zucker, T. Mazeh. “A box-fitting algorithm in the search for periodic transits” submitted on 6 Jun 2002. (ArXiv: astro-ph/0206099v1)
20. Laura Kreidberg. “BATMAN: Basin Transit Model cAlculatioN in Python” submitted on 29 Jul 2015. (ArXiv: 1507.08285)
21. Keivan G. Stassun et al. “The TESS Input Catalog and Candidate Target List” Submitted to Astronomical Journal on 1 Jun 2017. (ArXiv: 1706.00495)
22. Keivan G. Stassun et al. “The Revised TESS Input Catalog and Candidate Target List” Submitted to American Astronomical Society on 25 May 2019. (ArXiv: 1905.10694)
23. <https://outerspace.stsci.edu/display/TESS/TIC+v8+and+CTL+v8.xx+Data+Release+Notes>
24. Songhu Wang et al. “HD 202772A B: A Transiting Hot Jupiter Around A Bright, Mildly Evolved Star In Visual Binary Discovered By TESS” submitted to AAS journal on 4 Oct 2018. (ArXiv: 1810.02341)

Analysis of HD202772A transit event data recorded with the help of Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) and estimation the physical parameters of its planet

Saeed Tavassoli^{*(1)}, Leila Sadeghi Ardestani⁽²⁾, Benyamin Sahranavard⁽¹⁾;

1. Kharazmi University, Physics Faculty

2. Astrophysics Group, University of Exeter, Exeter EX4 4QL, UK

Abstract

In this paper, we examine how to receive data recorded by the TESS Space Telescope, process the data, and extract the physical parameters of the planets from them. Today, the most widely used and successful technique for finding exoplanets is the transit method, which is used in this article to study the companion planet of HD 202772A star. By obtaining the light curve and validation data of HD 202772A through the MAST database and using the BLS method, which is the most common method for extracting and determining the transit parameters of the exoplanets from the light curve, the orbital period, the transit depth and the transit duration of the planet was extended $3.3091 + 0.0000 - 0.0003$ days, $0.0032 + 0.0010 - 0.0004$ and 0.25 ± 0.05 day were determined, respectively. Also, the radius of the parent star, which is used to calculate the depth and therefore the radius of the planet, is selected from the TICv8 catalog. Finally, the radius of the target planet $R_p = 1.447258 + 0.201575 - 0.095917 R_j$ was obtained, which is a relatively good match with the quantities reported by Wang et al. 2018.

Key words: Exoplanet, Transit, lightcurve, Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), HD 202772A planet

*Corresponding Author: beny.sahra@gmail.com