

جستجوی داده‌های تلسکوپ تس برای سامانه‌های دوتایی کشف شده با رصدهای طیف‌سنجی گایا

عارف اسدی و صدیقه سجادیان

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی: aref.as121315@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱)

چکیده:

در این مقاله، نتایج بررسی داده‌های ماهواره تس از نامزدهای سامانه‌های دوتایی که در ابتدا توسط تلسکوپ گایا کشف شده‌اند، گزارش می‌شود. تلسکوپ فضایی تس با دقت فوتومتری بسیار بالا ستاره‌هایی که عمدتاً درخشان و نزدیک هستند را با فاصله زمانی از مرتبه چند دقیقه تا نیم ساعت رصد می‌کند. در این پژوهش، داده‌های فوتومتری تلسکوپ تس برای ۱۶۱ سامانه دوتایی کشف شده از طریق رصدهای طیف‌سنجی توسط تلسکوپ فضایی گایا، بررسی شد تا اثرات تناوبی با دوره تناوب مداری شبیه به گرفت نور یا خودهم‌گرایی گرانشی را در داده‌های فوتومتری این سامانه‌ها پیدا کنیم. هدف اصلی، تعیین زاویه انحراف مداری و سایر پارامترهای فیزیکی اجرام از روی داده‌های فوتومتری، در صورت مشاهده چنین نشانه‌هایی، بود. نتایج نشان داد که هیچ سامانه‌ای با اطمینان دارای چنین نشانه‌های فوتومتری و تناوبی با دوره تناوب دقیقاً مساوی با دوره تناوب مداری گزارش شده توسط تلسکوپ گایا نیست. بنابراین، برای همه این سامانه‌ها مدار ستاره‌ها از دید ناظر از لبه دیده نمی‌شوند. البته برای تعدادی از این سامانه‌ها دوره تناوب گزارش شده توسط تلسکوپ فضایی گایا و دوره تناوب تغییرات داده‌های فوتومتری به هم نزدیک بودند (با اختلاف حدود ۱۰ روز یا بیشتر). در ادامه این پژوهش، داده‌های فوتومتری این سامانه‌ها از سایر تلسکوپ‌ها نیز بررسی خواهد شد تا بتوانیم ماهیت تغییرات فوتومتری نور آن‌ها را آشکارسازی کنیم.

واژه‌های کلیدی: دوتایی‌های طیف‌سنجی، تلسکوپ تس، تلسکوپ گایا

۱. مقدمه

ستارگان نوترونی اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. زیرا شناسایی این اجسام، پنجره‌ای جدید به فرایند تغییر ستارگان پر جرم و سازوکارهای تشکیل این گونه اجسام باز خواهد کرد. علاوه بر این، کشف چنین سامانه‌هایی کمک می‌کند تا نرخ تشکیل اجسام فشرده در کهکشان راه‌شیری را تخمین زده و تکامل آن‌ها را بهتر درک کنیم. از دیگر کاربردهای مطالعه سامانه‌های دوتایی، شناسایی منابع امواج گرانشی است که به وسیله آشکارسازهایی مانند لایگو^۱ و ویرگو^۲ رصد می‌شوند. بررسی دقیق چنین

سامانه‌های دوتایی همواره به عنوان آزمایشگاه‌های کیهانی مورد توجه اخترفیزیکدانان هستند. این سامانه‌ها یکی از پرکاربردترین ابزارها برای بررسی و مطالعه نحوه تکامل یا تحول و خواص ستارگان به شمار می‌روند. به ویژه، دوتایی‌های طیف‌سنجی با کمک داده‌های طیفی، اندازه‌گیری سرعت شعاعی و دیگر پارامترهای مداری و فیزیکی اجسام همدم را فراهم می‌کند. این مطالعات، با کشف اجسام فشرده مانند کوتوله‌های سفید و

سامانه‌هایی به کمک داده‌های گایا و تس، امکان پیش‌بینی دقیق-تری از نرخ ادغام این اجرام و تولید امواج گرانشی را فراهم می‌کند.

تلسکوپ فضایی گایا^۱ به کمک طیف‌سنجی دقیق، اطلاعات زیادی در مورد موقعیت، حرکت و ویژگی‌های طیفی ستارگان فراهم می‌کند [۱]. همچنین تلسکوپ فضایی تس^۲ با دقت نورسنجی بسیار بالا می‌تواند برای تعیین تغییرات فوتومتری با منشأ غیرذاتی و ذاتی بسیار مفید باشد [۲]. این تلسکوپ ستاره‌هایی که عمدتاً درخشان و نزدیک هستند را با فاصله زمانی از مرتبه چند دقیقه تا نیم ساعت رصد می‌کند [۳و۴]. ترکیب داده‌های این دو تلسکوپ امکان مطالعه سامانه‌های دوتایی طیف‌سنجی و تعیین پارامترهای مداری از جمله زاویه انحراف مداری نسبت به خط دید ناظر را فراهم می‌کند.

اگرچه تحقیق‌هایی بر روی داده‌های تلسکوپ گایا و تس به صورت جداگانه انجام شده است، اما تلفیق و بررسی همزمان این داده‌ها به منظور جستجو و مطالعه سامانه‌های دوتایی همچنان به طور کامل صورت نگرفته است. پژوهش حاضر با هدف پرکردن این شکاف، داده‌های نورسنجی تس و طیف‌سنجی گایا را ترکیب کرده تا سامانه‌های دوتایی که صفحه مداری آن‌ها از دید ناظر از لبه قرار گرفته است و در ابتدا با رصد طیف‌سنجی توسط گایا کشف شده‌اند را با داده‌های فوتومتری تلسکوپ تس تأیید و مشخصه‌یابی کند. این پژوهش با بررسی چنین سامانه‌هایی می‌تواند منجر به شکست تبه‌گنی در تعیین پارامترهای فیزیکی اجرام درون این سامانه‌ها شود.

در مورد تحقیقاتی که به کمک داده‌های گایا برای جستجوی سامانه‌های دوتایی فشرده (شامل همدم فشرده) انجام شده است، می‌توان به مقاله [۵] اشاره کرد که پس از حذف نوفه و اثرات اختلال، داده‌های طیف‌سنجی بررسی شده و دو منبع J۰۶۲۳ و J۰۷۰۹ به‌عنوان کاندیدهای اجرام فشرده (احتمالاً سیاه‌چاله یا ستاره نوترونی) معرفی شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده

از روش‌های دینامیکی بر روی داده‌های گایا می‌تواند منجر به کشف اجرام فشرده بیشتری در کهکشان راه شیری شود [۵].

نکته قابل توجه این است که تعیین یکنای برخی از پارامترهای فیزیکی اجرام درون سامانه‌های دوتایی نیازمند بررسی داده‌های فوتومتری آن‌ها است. داده‌های تس تاکنون عمدتاً در مطالعات سیارات فراخورشیدی استفاده شده و به ظرفیت آن برای مطالعه سامانه‌های دوتایی کمتر توجه شده است. تاکنون نشانه‌هایی از گرفت و پدیده عدسی گرانشی در برخی سامانه‌های دوتایی که توسط تس رصد شده‌اند گزارش شده است [۶].

بر اساس مطالعه‌ای مبتنی بر شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو، تعداد کوتوله‌های سفید، ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌های کم‌جرم ستاره‌ای که انتظار داریم از رصدهای تلسکوپ تس کشف شود، به ترتیب برابر با ۱۸ - ۱۵، ۷ - ۶ و کمتر از یک هستند. این پیش‌بینی‌ها مربوط به لیست اصلی نامزدهای رصد شده توسط تلسکوپ تس^۳ است [۷].

همان‌طور که گفته شد، داده‌های تس ظرفیت بالایی در آشکارسازی تغییرات نوری دارند. از طرفی این داده‌ها کمتر در مطالعه سامانه‌های دوتایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، پژوهش‌های ترکیبی اخیر هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارند. مطالعه پیش‌رو درصدد است تا شکاف‌های موجود در پژوهش‌های پیشین را پر کند و به این پرسش پاسخ دهد که آیا می‌توان با بهره‌گیری از داده‌های گایا و تس برای سامانه‌های دوتایی، طیف‌سنجی ویژگی‌های مداری و فیزیکی آن‌ها را به کمک داده‌های فوتومتری مشخص کرد؟ این بررسی پتانسیل آن را دارد که راه‌گشای بینش‌ها و اطلاعات جدید درباره تحول سامانه‌های دوتایی باشد.

۲. استخراج دوتایی‌های طیف‌سنجی گایا

در مرحله نخست، داده‌های گایا مربوط به سامانه‌های دوتایی کشف شده با دوره تناوب مشخص را با استفاده از دستور جست‌وجوی داده‌های نجومی^۴ استخراج کردیم (داده‌هایی که

۱. Gaia Space Telescope

۲. Tess space telescope

۳. TESS Candidate Target List (CTL)

۴. Astronomical Data Quarry Language (ADQL)

۳. جستجوی شناسه سامانه‌های دوتایی در پایگاه داده‌های تس

پس از استخراج داده‌های مورد نظر از بایگانی گایا^۲، گام بعدی شناسایی منابع استخراج شده در پایگاه داده‌های تس بود. به عبارت دیگر، باید شناسه فهرست ورودی تس^۳ را برای هر سامانه دوتایی پیدا می‌کردیم. بدین منظور، ابتدا داده‌های مربوط به بخش‌های رصد شده از آسمان توسط تس را از وبگاه رسمی مأموریت تس^۴ دریافت کردیم. نمونه‌ای از این داده‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است که دریافت همه بخش‌ها ضروری نبوده و در این تحقیق به طور تصادفی بخش‌های ۱ تا ۳۰، ۳۶، ۴۱، ۴۵، ۴۹، ۵۲، ۵۵، ۵۸، ۶۵ تا ۷۱، دریافت شدند. گزینش این بخش‌ها همان‌طور که در ادامه مشخص خواهد شد، دلیل خاصی ندارد و محدودیت فنی یا علمی برای تحقیق ما ایجاد نمی‌کند.

با توجه به این‌که مختصات بعد و میل سماوی برای منابع خروجی از بایگانی گایا را در دسترس داشتیم، گام بعدی محاسبه فاصله بین موقعیت این منابع و موقعیت هر منبع در داده‌های تس بود (محاسبه فاصله زاویه‌ای بین منابع). از طرف دیگر می‌توانستیم به کمک پارالاکس (π) و خطای پارالاکس (σ_π) که در داده‌های گایا برای هر منبع گزارش شده است، از تطابق‌های اشتباه در اثر تصادفی دیده‌شدن دو منبع متفاوت در یک جهت آسمان، جلوگیری کنیم. بدین ترتیب، قادر به تشخیص شناسه سامانه دوتایی کشف‌شده از داده‌های گایا در پایگاه داده‌های تس خواهیم شد. برای درک بهتر این فرایند، گام‌های زیر مرحله به مرحله ارائه می‌شود:

۱) فرض کنید به دنبال شناسه (TIC_ID) یک سامانه دوتایی در داده‌های تس هستیم، در این صورت فاصله زاویه‌ای بین این سامانه و هر منبع رصدشده توسط تلسکوپ تس، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\sqrt{(ra-RA_i)^2 + (dec-DEC_i)^2}$$

که در آن ra و dec به ترتیب بعد و میل سماوی سامانه دوتایی

جدول ۱. نمونه‌ای از داده‌های مربوط به بخش ۱ (Sector 1 – Target List)، رصدشده توسط تلسکوپ تس (در این جا تنها ۳ منبع اول نشان داده شده‌اند).

#TIC_ID	RA (deg)	DEC (deg)
۸۱۹۵۱۸۸	۳۱۱/۳۹۳۱۹۶۶	-۴۰/۱۹۱۹۷۲۱۲
۸۱۹۵۲۱۶	۳۱۱/۴۰۵۶۲۲۲	-۴۰/۱۳۷۸۱۶۵۸
۸۱۹۵۲۷۴	۳۱۱/۳۷۳۲۱۳۳	-۳۹/۹۹۳۳۹۷۹

پتانسیل نشانه‌های فوتومتری دارند). این فرایند در چند مرحله انجام شد. در ابتدا، دستور جست‌وجوی داده‌های نجومی برای یافتن سامانه‌هایی با دوره تناوب بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ روز در مختصات قطب‌های شمال و جنوب دایره‌البروج تنظیم شد. در مرحله بعد، سامانه‌هایی با دوره تناوب بین ۵۰ تا ۱۰۰ روز را در همان نواحی جست‌وجو کردیم.

انتخاب قطب‌های شمال و جنوب دایره‌البروج به‌عنوان نواحی مورد نظر به این دلیل انجام شد که تلسکوپ تس این نواحی را تقریباً در تمام روزهای سال رصد می‌کند. در نتیجه، این نواحی تعداد بیشتری از داده‌های رصدی را نسبت به سایر بخش‌های دایره‌البروج دارد. این موضوع به شناسایی دقیق‌تر و جامع‌تر سامانه‌های دوتایی کمک می‌کند. لازم به ذکر است دوره‌های تناوب بیشتر از ۲۰۰ روز ممکن است توسط تس قابل رصد نباشد. درحالی‌که، برای دوره‌های کمتر از ۵۰ روز احتمال مشاهده خودهم‌گرایی گرانشی یا گرفت نوری (که یکی از نشانه‌های وجود جرم سنگین در دوتایی‌ها می‌تواند باشد) را کاهش می‌دهد. برای افزایش دقت و اطمینان از شناسایی صحیح سامانه‌های دوتایی واحد بازبهنجارشده خطای وزنی^۱ که به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم برای شناسایی دوتایی بودن سامانه‌ها شناخته می‌شود، کمتر از ۴ تنظیم شد. از طرف دیگر، انتخاب این مقدار به دلیل این بود که مقادیر بالای این کمیت معمولاً نشان‌دهنده حضور دو جسم همدم «درخشان و واضح» در یک سامانه ستاره‌ای دوتایی است.

۱. Renormalized Unit Weight Error (RUWE)

۲. <https://gea.esac.esa.int/archive>

۳. TESS Input Catalog ID(TIC_ID)

۴. <https://archive.stsci.edu/hlsp/tess-spoc>

تلسکوپ گایا و تس عمدتاً روی ستارگان درون کهکشان راه شیری متمرکزند. داخل کهکشان راه شیری عملاً اثر سرخ‌گرایی کیهانی قابل چشم‌گیری نداریم، زیرا سرعت شعاعی معمول ستارگان راه شیری کمتر از چند صد کیلومتر بر ثانیه است و این مقدار در مقایسه با سرعت نور بسیار کم است:

$$\Delta Z = \frac{V}{c} \sim \frac{10^2}{10^5} = 10^{-3}$$

از آن‌جا که سرعت ستارگان درون کهکشان راه شیری از چند صد کیلومتر بر ثانیه کمتر است، با توجه به این که سرعت نور از مرتبه 10^5 کیلومتر بر ثانیه است، بنابراین از ΔZ مرتبه 10^{-4} تا 10^{-3} قرار می‌گیرد. این مقدار به مراتب کمتر از ΔZ های کیهانی حالت‌های دور دست است [۸].

۴. پردازش منحنی‌های نوری با استفاده از کتابخانه لایت کرو^۱ در زبان پایتون

با در اختیار داشتن شناسه منابع در داده‌های تس، مراحل دریافت، رسم، پردازش و تحلیل منحنی‌های نوری با استفاده از کتابخانه لایت کرو در زبان پایتون انجام شد. این مراحل شامل گام‌های زیر بودند:

(۱) جستجوی منحنی‌های نوری

در ابتدا منحنی‌های نوری مربوط به هر منبع که در زمان‌های مختلف توسط مأموریت تس ثبت شده است، بازیابی می‌شود. به عنوان مثال، مشخصات منحنی‌های نوری منبع TIC 233691985 در شکل ۱ نشان داده شده است.

(۲) دریافت داده‌ها

در این مرحله، تمامی منحنی‌های نوری مربوط به منبع مورد نظر دریافت و برای پردازش آماده می‌شوند.

(۳) پردازش منحنی‌های نوری

پردازش منحنی‌های نوری شامل مراحل زیر بود:

- الف) اتصال منحنی‌های نوری از بخش‌های مختلف به یکدیگر.
- ب) بهنجارسازی همه داده‌ها به میزان شار پس‌زمینه واحد.
- ج) حذف نویزها و دیگر منابع تغییرات بلندمدت با هم‌بستگی زیاد در نور ستاره در طول زمان.

استخراج شده از داده‌های تلسکوپ گایا، و RA_i و DEC_i به ترتیب مختصات هر منبع رصد شده از یک بخش مشخص در داده‌های تس هستند؛ به طوری که i مشخص‌کننده شماره هر ردیف در جدول ۱ است. اگر کمترین فاصله زاویه‌ای کمتر از 0.01° ثانیه قوسی باشد، دو منبع تقریباً روی یک نقطه در آسمان به صورت هم خط قرار دارند و احتمال می‌دهیم هر دو جرم واحدی هستند.

(۲) در ادامه، فاصله نجومی d هر منبع از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{Gaia} = \frac{1}{\omega_{Gaia}}$$

که در آن ω_{Gaia} برحسب ثانیه قوسی و فاصله برحسب پارسک است.

(۳) در واقع، تلسکوپ تس خودش مستقیماً پارالاکس را نمی‌سنجد، ولی در فهرست ورودی تس برای هر منبع، پارالاکس و خطای پارالاکس را از داده‌های گایا وارد کرده‌اند. بنابراین، وقتی یک منبع از تس را انتخاب می‌کنیم، آن منبع یک پارالاکس و خطای پارالاکس هم دارد که توسط گایا اندازه‌گیری شده است (زیرا تس از داده‌های گایا استفاده کرده است).

(۴) وقتی پس از مرحله (۱)، یک تطابق زاویه‌ای برای فاصله بین دو منبع از گایا و تس پیدا کردیم، دو مقدار داریم: الف) d_{Gaia} به همراه خطای پارالاکس گایا، و ب) d_{Tess} به همراه خطای پارالاکس تس.

(۵) برای این که اطمینان یابیم هر دو منبع، در واقع جرم واحدی هستند، باید ببینیم آیا این دو فاصله d_{Tess} و d_{Gaia} در بازه‌های خطا (خطای نجومی) هم‌پوشانی دارند یا خیر.

(۶) در نهایت، پس از انجام محاسبات لازم به کمک کد و با بهره‌گیری از روش انتشار خطا، تنها آن تطابق‌هایی پذیرفته شدند که علاوه بر هم‌خوانی زاویه‌ای، از نظر فاصله نیز با یکدیگر سازگاری آماری داشتند.

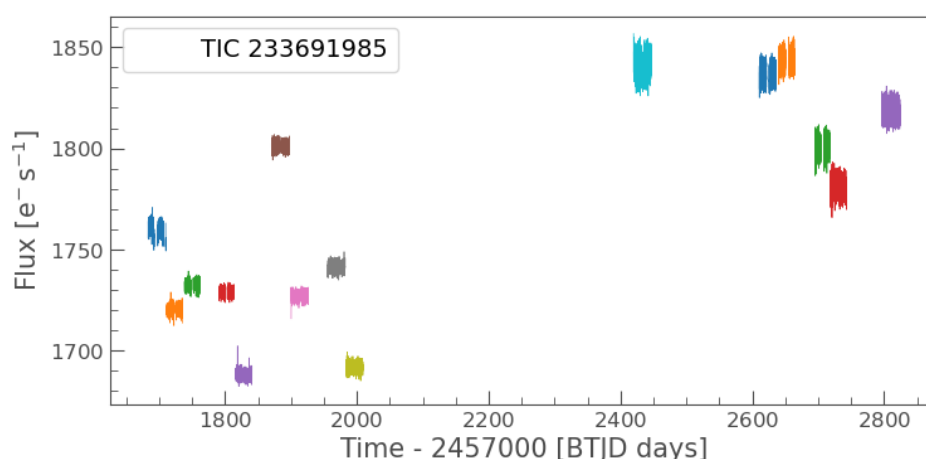
به دلیل حجم بالای داده‌ها و تعداد زیاد منابع، برای انجام مراحل گفته شده از یک کد اختصاصی استفاده شد که TIC_ID هر منبع را به صورت خودکار استخراج کند.

لازم به ذکر است که در مورد اثر سرخ‌گرایی، هر دو مأموریت

SearchResult containing 15 data products.

#	mission	year	author	exptime s	target_name	distance arcsec
0	TESS Sector 14	2019	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
1	TESS Sector 15	2019	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
2	TESS Sector 16	2019	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
3	TESS Sector 18	2019	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
4	TESS Sector 19	2019	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
5	TESS Sector 21	2020	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
6	TESS Sector 22	2020	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
7	TESS Sector 24	2020	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
8	TESS Sector 25	2020	TESS-SPOC	1800	233691985	0.0
9	TESS Sector 41	2021	TESS-SPOC	600	233691985	0.0
10	TESS Sector 48	2022	TESS-SPOC	600	233691985	0.0
11	TESS Sector 49	2022	TESS-SPOC	600	233691985	0.0
12	TESS Sector 51	2022	TESS-SPOC	600	233691985	0.0
13	TESS Sector 52	2022	TESS-SPOC	600	233691985	0.0
14	TESS Sector 55	2022	TESS-SPOC	600	233691985	0.0

شکل ۱. مشخصات داده‌های به‌دست‌آمده مربوط به منبع TIC 233691985.



شکل ۲. منحنی‌های نوری خام مربوط به زمان‌های مختلف رصد منبع TIC 233691985.

نوری چندین مقدار مختلف را امتحان کنیم تا بهترین مقدار تعیین شود.

در این تابع پارامتر دیگری وجود دارد که تعیین می‌کند آیا بخش‌های مختلف منحنی نوری به‌صورت یکپارچه به‌نجارسازی شوند یا هر بخش به‌طور مستقل. این پارامتر تعیین می‌کند که حداکثر فاصله زمانی بین قسمت‌های مختلف رصدی چقدر باشد تا دستور آن‌ها را با هم به‌نجار کند و نه به صورت جداگانه. ما برای همه منحنی‌های نوری، مقدار ۵۰ روز را برای این پارامتر در نظر گرفتیم.

برای حذف نوفه‌ها، پارامتر مورد نیازی که باید در دستور مقداردهی شود، طول پنجره^۱ است. براساس این پارامتر، داده‌های زمانی به یک ماتریس دو بعدی تبدیل می‌شوند؛ به‌طوری‌که تعداد سطرهای ماتریس برابر با طول پنجره، و تعداد ستون‌ها تابعی از تعداد کل داده‌ها و طول پنجره است.

انتخاب طول پنجره باید براساس تعداد داده‌ها انجام شود. اگر مقدار آن بیش از حد بزرگ انتخاب شود، تغییر محسوسی در داده‌ها ایجاد نخواهد شد. اما اگر بیش از اندازه کوچک باشد تابع مسطح‌سازی^۲ همه سیگنال‌ها را نیز با نوفه‌ها حذف خواهد کرد. بنابراین، برای تعیین مقدار بهینه آن باید برای هر منحنی

۱. Window length

۲. Flatten function

۵. رسم دوره‌نما^۱ با استفاده از روش BLS^۲

برای یافتن دوره تناوب غالب فوتومتري (مثلاً ناشی از گرفت یا خودهم‌گرایی) از الگوریتم (BLS) موجود در کتابخانه لایت-کرو استفاده کردیم. BLS برای تحلیل داده‌های سری زمانی نوری ستارگان با هدف شناسایی عبورهای دوره‌ای استفاده می‌شود. این الگوریتم به دنبال نشانه‌های است که با تغییرات تناوبی بین دو سطح روشنایی مجزا مشخص می‌شوند، به گونه‌ای که نور ستاره تنها بخش کوچکی از زمان را در سطح پایین‌تر، یعنی هنگام عبور، سپری می‌کند [۹].

اساس کار BLS به شرح زیر است:

(۱) ابتدا یک بازه از دوره‌های تناوب مختلف را با دستور زیر تعریف می‌کنیم (این بازه باید شامل دوره تناوب مداری که گایا گزارش کرده است، باشد):

$\text{period} = \text{np.linspace}(80.0, 200.0, 10000)$

این دستور از دوره تناوب ۸۰ تا ۲۰۰ روز، ۱۰۰۰۰ دوره تناوب مختلف با فاصله‌های یکسان از یکدیگر را ایجاد می‌کند (انتخاب مقدار ۱۰۰۰۰ برای پوشش دادن دقیق دوره‌ها و عدم از دست دادن نشانه‌های احتمالی است).

(۲) برای هریک از این دوره‌ها، منحنی نوری را فازبندی (Phase-folded) می‌کند و الگویی جعبه‌ای که دو حالت سطح پایه (خارج از عبور^۳) و عمق گرفت دارد را بر داده‌ها برازش می‌کند (همان‌طور که در مقاله [۹] به دو سطح روشنایی مجزا^۴ اشاره شده است). در واقع BLS سعی می‌کند یک ناحیه مستطیلی (الگوی جعبه) را درون منحنی نوری پیدا کند که در آن، در طول مدت گرفت، مقدار نور به اندازه یک عمق یا افت کاهش یابد.

(۳) برای هر دوره تناوب فرضی در بازه تعریف شده، سه پارامتر اصلی بهینه می‌شوند: الف) عمق گرفت، ب) زمان گرفت، و ج) مدت گرفت.

(۴) با تنظیم گزینه objective روی 'snr' در کتابخانه لایت‌کرو،

BLS دوره‌ای را به عنوان دوره تناوب غالب استخراج می‌کند که بیشترین نسبت سیگنال به نوفه را در الگوی متناظر خود داشته باشد.

در پایان این فرایند، دوره تناوب غالب فوتومتري، زمان شروع رویداد^۵ و مدت رویداد^۶ استخراج می‌شود.

تطبیق دوره‌های تناوب: مقادیر دوره تناوب به دست آمده از روش BLS با داده‌های گایا مقایسه شدند. اختلاف اندک میان این مقادیر نشان‌دهنده آن است که سامانه دوتایی مدنظر از دید ناظر در راستای لبه قرار گرفته است و این تغییرات فوتومتري مربوط به خاصیت دوتایی بودن سامانه است.

در نهایت، منحنی نوری تاشده^۷ براساس دوره تناوب‌های محاسبه شده از روش کمترین مربعات جعبه و نیز دوره‌های گزارش شده در داده‌های گایا رسم می‌شود. این نمودارها جهت بررسی دقیق وجود افت نوری ناشی از گرفت یا قله خودهم‌گرایی استفاده می‌شوند.

۶. سامانه‌های دوتایی بررسی شده و تحلیل نتایج

تعداد منابع استخراج شده از بایگانی تلسکوپ گایا عبارتند از: در ناحیه قطب جنوب دایره‌البروج و برای دوره‌های تناوب بین ۲۰۰-۱۰۰ روز، تعداد ۵۰ منبع انتخاب شدند. برای دوره‌های تناوب بین ۱۰۰-۵۰ روز در همین ناحیه، تعداد ۲۳ منبع انتخاب شدند.

در ناحیه قطب شمال دایره‌البروج برای بازه تناوبی ۲۰۰-۱۰۰ روز، تعداد ۵۱ منبع و برای بازه ۱۰۰-۵۰ روز، تعداد ۳۷ منبع گزینش شدند.

در مجموع تعداد ۱۶۱ سامانه دوتایی مطالعه و بررسی شدند. از مهمترین نشانه‌های فوتومتري سامانه‌های دوتایی که از لبه دیده می‌شوند، افت نوری ناشی از گرفت و قله خودهم‌گرایی است. در تحلیل اطلاعات و منحنی‌های نوری تاشده، به دنبال تغییرات ناشی از این دو رویداد بودیم. همان‌گونه که پیش‌تر

۱. Periodogram

۲. Box Least Squares

۳. Out of transit

۴. Two discrete levels

۵. Epoch or t_0

۶. Duration

۷. Folding

جدول ۲. مشخصات ۱۵ منبع بررسی شده دارای ارزش مطالعه بیشتر

دوره	تناوب	تناوب	دوره
رویداد	BLS	گایا	source_id
(روز)	(روز)	(روز)	
۰/۱۵	۱۴۷/۵۹	۱۶۸/۰۵	۵۴۹۵۷۵۴۸۰۶۶۶۸۱۹۰۰۰۰۰
۰/۰۵	۲۱۴/۵۲	۱۴۶/۹۹	۵۲۸۰۰۶۵۹۸۱۴۷۱۰۱۰۰۰۰۰
۰/۳۳	۱۲۰/۸۲	۱۷۵/۷۵	۱۴۲۲۴۶۷۴۶۷۳۵۱۴۰۰۰۰۰۰
۰/۱۵	۱۶۳/۹۹	۱۷۱/۲۲	۱۶۳۲۶۸۳۴۰۸۹۹۹۲۵۰۰۰۰۰۰
۰/۱	۱۷۵/۲۲	۱۵۷/۶۰	۱۶۳۲۹۳۳۴۱۰۴۵۵۸۶۰۰۰۰۰۰
۰/۳۳	۱۸۵/۴۵	۱۹۱/۹۳	۱۶۵۲۴۱۶۰۳۴۹۴۶۳۷۰۰۰۰۰۰
۰/۳۳	۱۹۶/۳۰	۱۵۲/۲۴	۲۱۶۰۷۸۵۱۳۱۶۵۲۹۰۰۰۰۰۰۰
۰/۲۵	۱۴۴/۳۷	۱۷۷/۶۵	۱۴۳۴۳۹۰۴۷۲۶۵۹۶۸۰۰۰۰۰۰
۰/۲	۱۸۳/۲۹	۱۴۰/۶۹	۱۶۳۹۲۹۹۵۸۲۷۸۰۷۱۰۰۰۰۰۰
۰/۳۳	۱۷۳/۶۳	۱۵۷/۹۰	۱۶۵۲۵۴۷۱۱۷۳۴۷۲۷۰۰۰۰۰۰
۰/۳۳	۱۴۱/۸۳	۱۳۰/۹۱	۲۱۵۷۹۷۹۹۶۸۲۵۳۴۴۰۰۰۰۰۰
۰/۱۵	۱۳۲/۲۴	۱۴۶/۴۷	۲۱۵۸۳۲۴۵۹۶۴۲۸۳۶۰۰۰۰۰۰
۰/۲	۱۵۶/۹۵	۱۹۰/۷۶	۲۱۵۹۱۵۲۰۴۷۶۴۷۹۴۰۰۰۰۰۰
۰/۰۵	۱۸۷/۸۵	۱۸۷/۷۹	۲۲۵۶۳۸۸۸۰۱۵۵۹۰۴۰۰۰۰۰۰
۰/۱	۱۰۹/۱۹	۹۸/۰۵	۱۴۲۲۹۱۹۴۳۹۶۴۵۹۶۰۰۰۰۰۰

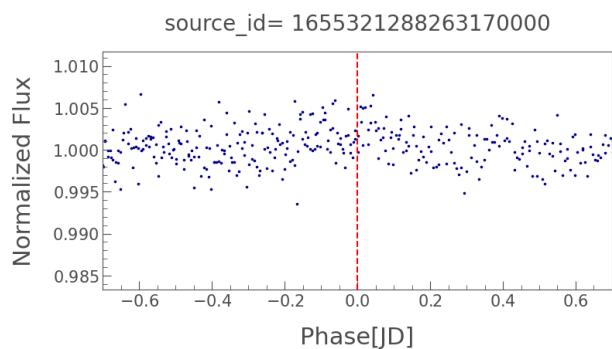
اشاره شد، اختلاف اندک بین دوره تناوب به دست آمده از دستور کمترین مربعات جعبه و دوره تناوب گایا می‌توانست نشانه خوبی باشد. در جدول ۲ از بین ۱۶۱ منبع، مشخصات ۱۵ مورد که پتانسیل بیشتری برای بررسی و مطالعه دارند، آورده شده است. چند نمونه از منحنی‌های نوری تاشده برای تعدادی از این سامانه‌ها در شکل‌های ۳ تا ۱۱ آمده است. هدف از نمایش این شکل‌ها آن است که از بین نمودارهای رسم شده برای ۱۶۱ سامانه، نمودار مربوط به سامانه‌هایی که بیشتر از همه شبیه به نمودار یک سامانه با نشانه خودهم‌گرایی یا گرفت است، معرفی شود. زیرا اگر دقت شود در فاز صفر مربوط به این نمودارها یک قله (افزایش شار بهنجار شده) شبیه به قله خودهم‌گرایی مشاهده می‌شود. بنابراین، این سامانه‌ها به عنوان نامزدهای مناسبی برای بررسی‌های بیشتر، با استفاده از داده‌های تکمیلی تلسکوپ‌های دیگر یا به کارگیری روش‌های تحلیلی به غیر از BLS، معرفی شده‌اند.

شایان ذکر است که اولین مشاهده از قله خودهم‌گرایی گرانشی در مقاله اریک اگل^۱ [۱۰] معرفی شده است. در این مقاله قله افزایش شار (دامنه خودهم‌گرایی) تقریباً به اندازه ۰/۰۰۱ است. در مجموع، ما نتوانستیم سامانه‌ای را شناسایی کنیم که در آن تغییرات فوتومتری موجود در داده‌های تلسکوپ تس با دوره تناوب گایا، که براساس رصدهای طیف‌سنجی گزارش شده است، تطابق داشته باشد. یکی از دلایل آن می‌تواند این نکته باشد که احتمال از لبه دیده شدن سامانه‌های دوتایی کم و حدود نیم درصد است. برای آشکارسازی نشانه دوتایی بودن در داده‌های طیف‌سنجی (تغییرات تناوبی سرعت شعاعی یکی از اجرام در طیف آن‌ها) نیازی به آن نیست که صفحه مدار کاملاً از لبه دیده شود. درحالی‌که برای مشاهده اثر گرفت یا خودهم‌گرایی گرانشی نیاز است دو ستاره تقریباً در راستای خط دید ناظر باشند.

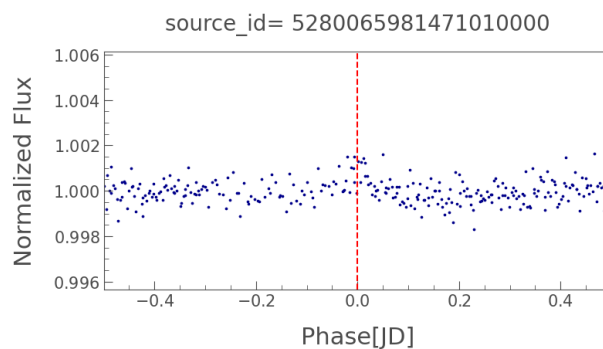
در آینده، این پژوهش را ادامه می‌دهیم و برای تعداد بیشتری از این سامانه‌ها، دوره‌های تناوب را بررسی می‌کنیم. البته همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، برای تعدادی از این سامانه‌ها دوره تناوب گزارش شده با گایا و دوره تناوب به دست آمده از تحلیل منحنی نوری تس به هم نزدیک بودند (با اختلاف حدود ۱۰ روز یا بیشتر). قصد داریم برای این سامانه‌ها داده‌های تلسکوپ‌های دیگر را نیز بررسی کنیم تا ماهیت این تغییرات را در منحنی نوری آن‌ها با دقت بیشتری تعیین کنیم.

۷. نتیجه‌گیری

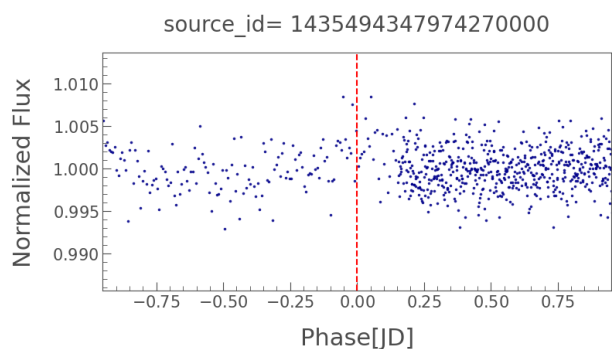
در این پژوهش، برای تعدادی از سامانه‌های دوتایی کشف شده براساس رصدهای طیف‌سنجی گایا، داده‌های فوتومتری گرفته شده توسط تلسکوپ فضایی تس را استخراج کردیم و دوره تناوب غالب‌ترین تغییرات درون آن‌ها را به کمک روش‌های عددی به دست آوردیم. اگر این دوره تناوب دقیقاً با دوره تناوب مداری گزارش شده در داده‌های گایا تطابق داشت، در این صورت این تغییرات منشأ غیرذاتی داشتند که می‌توانست به دلیل گرفت نور و یا اثر خودهم‌گرایی گرانشی نور یکی از اجسام درون سامانه دوتایی باشد.



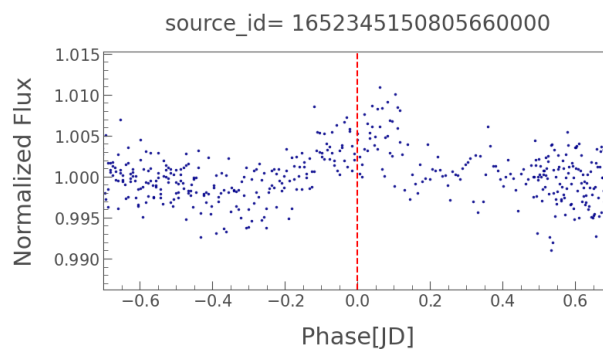
شکل ۷. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



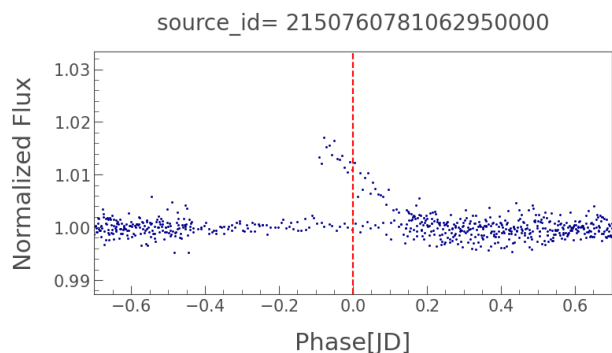
شکل ۳. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



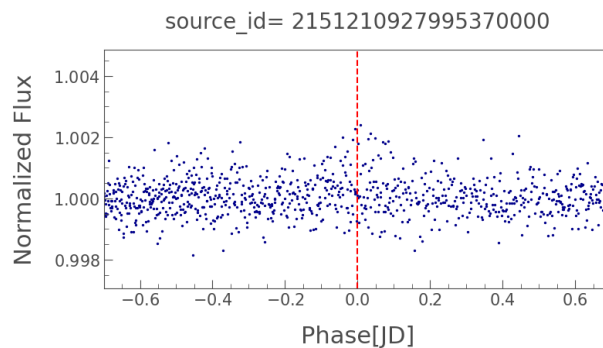
شکل ۸. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



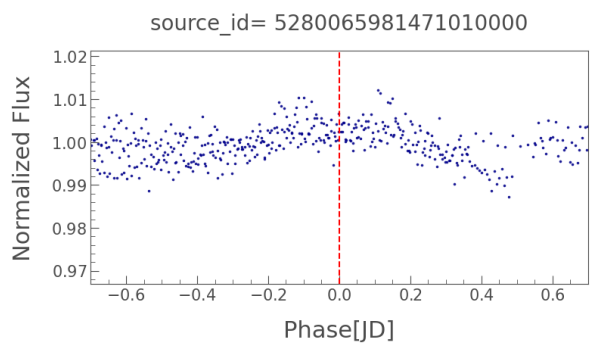
شکل ۴. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



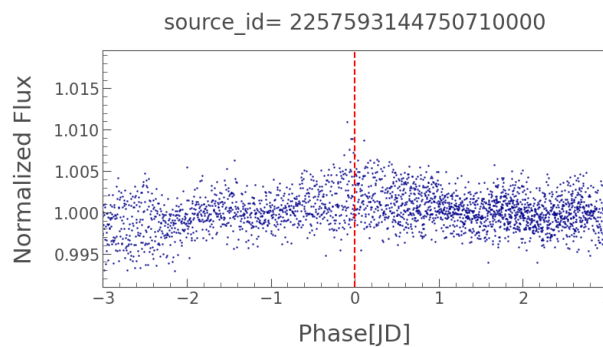
شکل ۹. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



شکل ۵. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



شکل ۱۰. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS



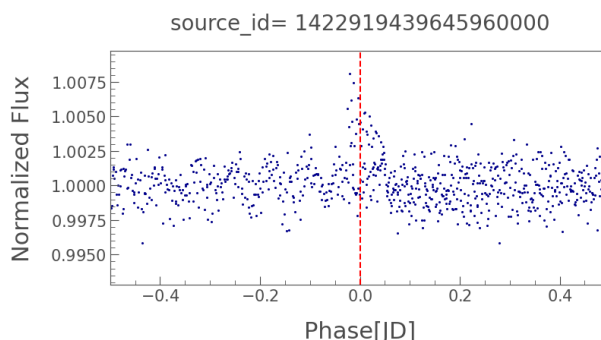
شکل ۶. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب .BLS

فوتومتری تناوبی برابر با دوره تناوب مداری گزارش شده توسط گایا یافت نشد. از آن‌جا که احتمال از لبه دیده شدن یک سامانه دوتایی به گونه‌ای که اثرات گرفت یا خودهم‌گرایی در داده‌های نوری آن قابل مشاهده باشد، بسیار اندک است، این نتیجه برای این مجموعه ۱۶۱ عددی با انتظار نظری نیز سازگار است. احتمال مشاهده چنین حالتی با روش BLS در میان ۱۶۱

منبع بررسی شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{161} \times 100 \approx 0.621\%$$

بنابراین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که احتمال مشاهده سامانه‌های دوتایی از لبه برای ۱۶۱ منبع بررسی شده، و در نتیجه امکان مشاهده اثرات گرفت یا خودهم‌گرایی گرانشی برای این منابع، کمتر از ۰/۷ درصد است. البته این نتیجه با انتظار نظری نیز هم‌خوانی دارد. در چنین سامانه‌هایی، دوره تناوب این تغییرات فوتومتری (گرفت یا خودهم‌گرایی گرانشی) با دوره تناوب مداری در چنین سامانه‌هایی برابر است. با وجود این، برای برخی از منابع، دوره تناوب گزارش شده در داده‌های گایا و دوره تناوب به دست آمده به روش کمترین مربعات جعبه به هم نزدیک بودند (با اختلاف ۱۰ روز یا بیشتر). در پژوهش بعدی، برای تعیین ماهیت تغییرات فوتومتری، داده‌های رصدی تلسکوپ‌های دیگر نیز بررسی خواهند شد.



شکل ۱۱. منحنی نوری پس از پردازش، رسم شده با دوره تناوب BLS.

مشاهده این اثرات در داده‌های فوتومتری می‌تواند دلیل محکمی برای تشخیص درست دوتایی بودن ستاره یا تعیین زاویه انحراف مداری باشد. همچنین با الگوسازی دقیق منحنی نوری، می‌توان اطلاعات بیشتری برای آن سامانه دوتایی به دست آورد. به ویژه، اگر یکی از این اجرام تاریک باشد (مانند کوتوله سفید یا ستاره نوترونی) این موضوع اهمیت ویژه‌ای پیدا خواهد کرد. زیرا با مشاهده و الگوسازی نشانه‌های مربوط به دوتایی بودن در داده‌های فوتومتری می‌توان جرم جسم تاریک و در نهایت ماهیت آن را آشکارسازی کرد.

برای ۱۶۱ سامانه دوتایی کشف شده از طریق طیف‌سنجی در داده‌های گایا، داده‌های تلسکوپ تس مربوط به آن‌ها را استخراج کردیم. با این حال در هیچ کدام از این منابع تغییرات

مراجع

1. G Collaboration, *A&A* **674** (2023) A1.
2. Statsun, *et al.*, *ApJ* **156** (2018) 102.
3. <https://archive.stsci.edu/missions-and-data/tess>
4. <https://tessgi.github.io/TessGiWebsite/faq.html>
5. J Fu, *et al.*, *ApJ* **940** (2022) 2.
6. N M Sorabella, S G T Laycock, D M Christodoulou, and S Bhattacharya, *ApJL* **961** (2024) 45.
7. S Sajadian, N Afshordi, *ApJ* **168** (2024) 298.
8. M A Strauss, and J A Willick, *Physics Reports* **261** (1995) 271.
9. G Kovacs, S Zucker, and T Mazeh, *A&A* **391** (2002) 369.
10. E Kruse, E Agol, *Science* **344** (18 Apr 2014) 275.