

محاسبه جرم ستاره نوترونی PSR J۲۲۱۵+۵۱۳۵ با استفاده از مدل ELC

راضیه رنجبر^{۱*}، امین فرهنگ^۱

^{۱*} پژوهشکده نجوم، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، صندوق پستی ۵۵۳۱-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از روش‌های مؤثر برای شناسایی ستاره‌های نوترونی با جرم بالا، بررسی سامانه‌های دوتایی حاوی تپ‌اخترهای میلی‌ثانیه‌ای است. در این سامانه‌ها، ستاره‌ی همدم تحت تأثیر تابش شدید تپ‌اختر قرار می‌گیرد که این تابش، باعث تغییر در درخشندگی ظاهری همدم شده و امکان برآورد جرم ستاره‌ی نوترونی را فراهم می‌سازد. این تابش همچنین موجب جابه‌جایی مرکز نوری ستاره نسبت به مرکز جرم آن می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش عدم قطعیت در تعیین دقیق پارامترهای مداری و جرم ستاره‌ی نوترونی می‌گردد. در این مطالعه، با استفاده از مدل‌سازی Eclipsing Light Curve که به اختصار آن را ELC می‌نامیم و داده‌های آرشیوی نورسنجی و طیف‌سنجی، به بررسی سامانه‌ی PSR J۲۲۱۵+۵۱۳۵ پرداختیم و جرم ستاره‌ی نوترونی آن را از طریق مدل‌سازی کامل تابش سامانه محاسبه کردیم. این سامانه در فاصله حدودی ۳ کیلوپارسک از زمین قرار دارد و تپ‌اختر آن دارای دوره چرخش ۲/۶۱ میلی‌ثانیه و مدار آن دارای دوره تناوب ۴/۱۴ ساعت است. برای این منظور، با در نظر گرفتن مدلی فیزیکی از ستاره‌ی همدم در شرایط تابش‌یافته، منحنی‌های نور در سه باند مختلف و همچنین منحنی‌های سرعت شعاعی مربوط به دو گروه طیفی متفاوت را به‌طور هم‌زمان برازش دادیم. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سرعت مرکز جرم ستاره‌ی همدم برابر با $K_1 = 414/6^{+4/6}_{-2/6}$ کیلومتر بر ثانیه و زاویه‌ی میل مدار برابر با $i = 64/1$ درجه است. همچنین، جرم ستاره‌ی نوترونی $M_2 = 2/28^{+0/11}_{-0/12}$ جرم خورشیدی و جرم ستاره‌ی همدم $M_1 = 0/32 \pm 0/10$ جرم خورشیدی برآورد شد. در بخشی از این پژوهش، اثر حضور لکه‌های داغ روی سطح ستاره‌ی همدم بررسی شد و نتایج به‌دست‌آمده با حالتی که لکه‌ها لحاظ نشده بودند، مقایسه گردید.

برای پرهیز از انحصار در تحلیل داده‌های مربوط به سامانه‌های دوتایی با جرم فشرده، بهره‌گیری از مدل‌های عمومی و در دسترس، ضروری است؛ زیرا این امکان را فراهم می‌سازد تا نتایج به‌صورت مستقل توسط گروه‌های مختلف پژوهشی بازتولید و اعتبارسنجی شوند. اهمیت این مطالعه در آن است که برخلاف بسیاری از ابزارهای اختصاصی، مدل ELC به‌صورت عمومی در اختیار جامعه علمی قرار دارد. دستیابی به نتایجی با بیش از ۹۹ درصد انطباق با مدل‌های اختصاصی، جایگاه این مدل را به‌عنوان ابزاری معتبر و قابل اعتماد در مطالعات آینده—از جمله پروژه‌های مرتبط با رصدخانه ملی ایران—تثبیت می‌کند. افزون بر این، شناسایی ستاره‌های نوترونی با جرمی به این بزرگی، می‌تواند محدودیت‌های مهمی بر معادلات حالت ماده در چگالی‌های بالا تحمیل کرده و به بازنگری در برخی مدل‌های نظری موجود منجر شود.

واژگان کلیدی: ستاره نوترونی، تپ‌اختر، دوتایی، اشعه ایکس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

شاپای چاپی: 493x-2588

شاپای الکترونیکی: 4921-2588

پست الکترونیکی:

r.ranjbar@ipm.ir



۱- مقدمه

همدم را فراهم می‌سازد. این بررسی‌ها فرصت ارزشمندی برای اندازه‌گیری جرم ستاره‌های نوترونی بازچرخیده ایجاد می‌کنند. با این حال، همان‌طور که در این پژوهش بررسی می‌شود، تابش شدید ستاره‌ی نوترونی می‌تواند بر اندازه‌گیری سرعت‌های شعاعی تأثیر گذاشته و منجر به خطاهای سیستماتیک در تخمین جرم شود. بنابراین، مدلسازی دقیق اثر تابش اهمیت بسیاری دارد [7].

سامانه‌ی دوتایی PSR J2215+5135 با دوره چرخش ۲/۶۱ میلی‌ثانیه و دوره مداری ۴/۱۴ ساعت، به‌عنوان یکی از کوتاه‌ترین تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای ها دوتایی نوع سرخ پشت در صفحه‌ی کهکشان کشف شده است [8]. اگرچه این سامانه تاکنون فقط در حالت تپاختر (بدون قرص) مشاهده شده، اما میزان بالای پرتو ایکس ثبت‌شده از آن، احتمال گذار به حالت برافزایشی را در آینده مطرح می‌کند. علاوه بر این، مشاهدات نوری نشان‌دهنده‌ی تغییرات نوری مداری ناشی از تابش شدید ستاره‌ی نوترونی به ستاره‌ی همدم هستند [9][10].

مدل‌های گردش باد جوی در ستارگان همدم تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای دوتایی نشان می‌دهند که منحنی نوری و سرعت‌های شعاعی به شدت تحت تأثیر بادهای سطحی هستند [11]. این بادهای باعث جابه‌جایی فاز نوری و ایجاد عدم تقارن در منحنی نوری می‌شوند که پهنای خطوط طیفی ابزار مفیدی برای اندازه‌گیری سرعت باد سطحی فراهم می‌کند. در مورد سامانه J2215+5135، مدل‌های گرمایش ناشی از باد^۳ نسبت به گرمایش مستقیم از نظر آماری برتری دارند، هرچند مدل نقطه‌ی داغ^۴ بهترین برازش را ارائه می‌دهد. این اثرات معمولاً باعث افزایش زاویه میل مداری و کاهش سرعت مرکز جرم ستاره‌ی همدم می‌شوند که به نوبه‌ی خود جرم استنباط‌شده‌ی ستاره‌ی نوترونی را کاهش می‌دهد [11]. با وجود این کاهش، جرم به‌دست‌آمده برای ستاره‌ی نوترونی برابر با $2.28^{+0.1}_{-0.2}$ جرم خورشید است که از بزرگ‌ترین جرم‌های

تپاخترها زیرمجموعه‌ای از ستاره‌های نوترونی هستند که با سرعت‌های بسیار بالا حول محور خود می‌چرخند و به دلیل میدان مغناطیسی قوی، پرتوهای الکترومغناطیسی منظمی در طول موج‌های مختلف از جمله رادیویی، پرتو ایکس و پرتو گاما منتشر می‌کنند. این اجرام معمولاً بر اساس دوره‌ی چرخش و ویژگی‌های تابشی‌شان دسته‌بندی می‌شوند. تپاخترهای معمولی دارای دوره‌های چرخش از چند ده میلی‌ثانیه تا چند ثانیه هستند، در حالی‌که گروهی از آن‌ها که به تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای معروفاند، دارای دوره‌های بسیار کوتاه (چند میلی‌ثانیه) هستند و عموماً در سامانه‌های دوتایی شکل می‌گیرند [۲][۱]. در این سامانه‌ها، ستاره‌ی همدم نقش مهمی در فرایند بازچرخش ایفا می‌کند، به‌طوری که انتقال جرم از همدم به ستاره‌ی نوترونی باعث افزایش سرعت چرخش آن می‌شود. از میان این سامانه‌ها، دو دسته‌ی شناخته‌شده‌ی سرخ پشت و بیوه‌های سیاه قرار دارند که همدم‌های کم‌جرم دارند و تحت تابش شدید باد تپاختر قرار می‌گیرند [۳].

با استفاده از تلسکوپ فضایی فرمی^۱، تاکنون تعداد زیادی از تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای در منظومه‌های دوتایی فشرده با دوره‌های مداری کمتر از یک روز کشف شده‌اند [4]. در این سامانه‌ها، ستاره‌ی همدم معمولاً جرم کمی دارد (حدود ۰/۱ جرم خورشیدی در سامانه‌های نوع پشت قرمز و حتی کمتر در بیوه‌های سیاه) و در بسیاری موارد تحت تابش شدید باد تپاختر و پرتوهای پرنرژی حاصل از چرخش سریع ستاره‌ی نوترونی قرار می‌گیرد. برخی از این تپاخترها بین دو حالت فعال: حالت تپاختر رادیویی و حالت قرصی (دارای قرص برافزایشی)، تغییر وضعیت داده‌اند؛ که این پدیده، ارتباط مستقیمی میان تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای و دوتایی‌های پر جرم پرتو ایکس^۲ برقرار می‌کند [5][6].

بسیاری از این سامانه‌ها در فاصله‌ای کمتر از ۴ کیلوپارسک از زمین و در نواحی با جذب میان‌ستاره‌ای پایین قرار دارند [3]؛ شرایطی که امکان انجام مشاهدات طیف‌سنجی نوری دقیق و بررسی دینامیکی ستاره‌ی

³Wind Heating
⁴Heated Spot

¹Fermi-LAT
²LMXBs

شناخته شده محسوب می شود و برای بررسی معادله ی حالت ماده ی چگال بسیار اهمیت دارد [11][12].

در بخشی از این مطالعه، با وارد کردن مختصات لکه ی داغ ستاره ی همدم J۲۲۱۵ بر اساس داده های ارائه شده در مرجع [11] در مدل ELC امکان مقایسه ی نتایج در دو حالت با و بدون حضور لکه ی داغ فراهم شد. همچنین، مجموعه ای از داده های نوری جدید مربوط به سامانه ی J۲۲۱۵ که در سال ۲۰۱۴ با استفاده از سه تلسکوپ مختلف از جمله تلسکوپ جی تی سی^۵ به قطر ۱۰/۴ متر گردآوری شده اند، مورد تحلیل قرار گرفته اند (بخش ۲). با هدف تعیین دقیق تر جرم ستاره ی نوترونی و بررسی خطاهای سیستماتیک ناشی از تابش، نوع طیفی و سرعت شعاعی ستاره ی همدم در طول مدار با دقت بالا اندازه گیری شده است.

پژوهش های پیشین، از جمله اوریوس و هاوشیلد (۲۰۰۰) [13] بیشتر بر توسعه ی کد ELC و مدل های جو ستاره ای واقع بینانه تمرکز داشتند، و شرویدر و هالپرن (۲۰۱۴) [14] نیز با استفاده از همین کد، تنها منحنی های نور سامانه ی PSR J2215+5135 را مدلسازی کردند. در این مطالعه، با ترکیب داده های نورسنجی و طیفسنجی و لحاظ اثر لکه های داغ، نتایج دقیق تر و قابل اعتمادتری برای جرم ستاره ی نوترونی و پارامترهای مداری به دست آمده است. این رویکرد، علاوه بر بازتولید نتایج پیشین، امکان اعتبارسنجی مستقل با استفاده از کد عمومی ELC را نیز فراهم می کند.

در این راستا، لینارس و همکاران برای مدلسازی منحنی های نوری در سه باند مختلف و منحنی های سرعت شعاعی دو گروه طیفی، از مدل XRBCURVE استفاده کرده اند؛ برنامه ای که برای تحلیل سامانه های دوتایی پرتو ایکس، کوتوله های سفید^۶ و تپاخترهای میلی ثانیه ای طراحی شده است. با این حال XRBCURVE، به صورت عمومی در دسترس نیست. به همین دلیل می بایست دید آیا می شود نتایج آنها را با مدل های در دسترس عموم بازتولید کرد یا خیر.

در بخش ۳ مطالعه ی حاضر، با استفاده از داده های آرشیوی، به محاسبه مجدد جرم ستاره نوترونی با استفاده از مدل ELC می پردازیم. سپس در بخش ۴، تحلیل منحنی های نوری و سرعت های شعاعی که به صورت هم زمان مدل سازی شده اند، ارائه می شود. در بخش ۵، پیامدهای این یافته ها برای مدل سازی سامانه های دوتایی فشرده با تابش شدید مورد بررسی قرار گرفته اند و در نهایت، در بخش ۶، جمع بندی نتایج و دستاوردهای کلیدی پژوهش ارائه شده است.

۲- داده های رصدی

در این پژوهش، از داده های نوری و طیفی منتشر شده توسط لینارس و همکاران (۲۰۱۸) [3] برای سامانه ی PSR J۲۲۱۵+۵۱۳۵ استفاده شده است. آن ها نورسنجی فاز-رزولوشن دار این سامانه را با بهره گیری از تلسکوپ های آی ای سی^۷ ۸۰ و ویلیام هرشل^۸ به ترتیب در رصدخانه های تپیده^۹ و روکه د لوس موچاخوس^{۱۰}، طی چهار شب رصدی، انجام داده اند. جزئیات رصد، کاهش داده و اندازه گیری ها در مقاله لینارس و همکاران آورده شده است که در زیر بصورت خلاصه به آن ها می پردازیم.

۱-۲ نورسنجی

مشاهدات نورسنجی با فیلترهای SDSS در باندهای g' و r' و i' و با زمان های نوردهی مختلف انجام شد تا تغییرات روشنایی ستاره همراه در طول مدار ۴/۱۴ ساعته تپاختر بررسی شود. مشاهدات با تلسکوپ آی ای سی^۷ ۸۰ در تاریخ های ۲ و ۳ اوت ۲۰۱۴ و با دوربین بهبودیافته ی کموت^{۱۱} (با مقیاس تصویری ۰/۳۰ ثانیه قوسی بر پیکسل) در فیلترهای g' و r' انجام شده اند. زمان نوردهی هر تصویر ۴۲۰ یا ۶۰۰ ثانیه بوده و از بینینگ ۲×۲ برای افزایش نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است.

تصاویر گرفته شده با ویلیام هرشل مربوط به تاریخ های ۱۱ اوت و ۱ سپتامبر ۲۰۱۴ هستند. این داده ها با دوربین ای کم^{۱۲} (با مقیاس تصویری ۰/۲۵ ثانیه قوسی بر پیکسل) و در فیلترهای r' ، g' و i'

⁹ Teide

¹⁰ Roque de los Muchachos

¹¹ CAMELOT

¹² ACAM

⁵GTC

⁶CVs

⁷ IAC-۸۰

⁸ William Herschel

شد که کل مدار $4/14$ ساعته را پوشش می‌دهد. برش‌های تصاویر پس از تصحیحات بایاس و میدان تخت در آیرف^{۱۴} پردازش و طیف‌ها با روش استخراج بهینه، استخراج و پس‌زمینه آسمان حذف شدند. برای کالیبراسیون طول‌موج در داده‌های ویلیام هرشل از طیف‌های آرک (CuNe، CuAr) استفاده شد که خطوط آن‌ها با یک چندجمله‌ای مرتبه چهارم برازش یافت (انحراف باقیمانده‌ها به ترتیب $0/05$ و $0/02$ آنگستروم). همین فرآیند برای تمام طیف‌ها تکرار و جابه‌جایی‌های ناشی از انحراف ابزار (حدود 1 آنگستروم) نیز اصلاح شد. در داده‌های جی تی سی - OSIRIS کالیبراسیون طول‌موج با آرک‌های ثبت‌شده در شب دوم انجام شد و انحراف باقیمانده $0/06$ آنگستروم بود. در نهایت، خط آسمانی O I در 5577 آنگستروم برای تصحیح جابه‌جایی‌های کوچک (کمتر از 10 کیلومتر بر ثانیه) به‌کار گرفته شد.

۳-۲ تحلیل طیفی

در ادامه، تحلیل طیفی با تمرکز بر تعیین سرعت شعاعی و دمای ستاره همراه صورت گرفت. برای این کار، طیف‌ها به کمک کتابخانه‌ای از طیف ستارگان مرجع با انواع طیفی مختلف مقایسه شدند. روش همبستگی متقابل برای استخراج سرعت شعاعی و روش تفریق بهینه برای یافتن بهترین تطابق طیفی و تخمین پارامترهای فیزیکی استفاده شد. سرعت شعاعی ستاره با برازش یک تابع سینوسی به داده‌ها به دست آمد که در آن پارامترهایی مانند دامنه تغییر سرعت، سرعت سیستم و زمان عبور از فاز مرجع تعیین شدند. برای کاهش نویز و افزایش دقت، طیف‌ها در بازه‌های مشخصی از فاز مداری میانگین‌گیری شدند. خطوط جذبی بالمر و سه‌خطی منیزیم به‌طور ویژه برای ردیابی تغییرات سرعت ستاره در طول مدار مورد استفاده قرار گرفتند. با این حال، در برخی خطوط برای انواع طیفی زودتر از FO پدیده‌ی دو قله‌ای شدن در تابع همبستگی دیده می‌شد که موجب انحراف از مدل سینوسی می‌شد. به همین دلیل، در تحلیل نهایی تنها از طیف‌های گرمتر از نوع FO استفاده شد. همچنین در تحلیل نهایی، اصلاحاتی نسبت به نسخه‌های پیشین اعمال شده است. برای اندازه‌گیری سرعت‌های شعاعی، از خطوط بالمر و الگوی طیفی G5V به‌جای الگوی A5V استفاده شده است. این تغییر به‌منظور

به‌دست آمده‌اند. در هر نوردی، زمان ثبت تصویر 60 ثانیه بوده و برای کاهش زمان خواندن CCD، ناحیه‌ای با اندازه‌ی 501×501 پیکسل در اطراف منبع موردنظر انتخاب شده است. زمان سربرار به دلیل خواندن CCD و تعویض فیلتر بین 6 تا 9 ثانیه متغیر بوده است. فرآیند کالیبراسیون اولیه شامل اصلاح بایاس و فلت‌فیلد برای تمام تصاویر بوده که با استفاده از روتین‌های استاندارد آیرف انجام شده است. سپس با بهره‌گیری از پایپ‌لاین و شعاع استخراج متغیر، نورسنجی روزنه‌ای^{۱۳} نسبت به یک ستاره‌ی مرجع ثابت و غیراشباع در نزدیکی منبع صورت گرفته است. به این ترتیب، مقادیر نهایی قدر تفاضلی نسبت به همان ستاره‌ی مرجع محاسبه شده‌اند که نسبت به نوسانات خفیف جوی یا ابرهای نازک حساسیت چندانی ندارند. (گرچه شرایط جوی در طول مشاهدات به‌طور کلی مطلوب بوده‌اند.)

کالیبراسیون شار مطلق بر پایه‌ی ستاره‌ای از کاتالوگ AAVSO-APASS انجام شده است. عدم قطعیت در این کالیبراسیون برای فیلتر i' حدود $0/05$ قدر و برای فیلترهای g' و i' حدود $0/1$ قدر برآورد شده است. برای ارزیابی صحت این کالیبراسیون، نتایج با داده‌های ستارگان نزدیک از کاتالوگ‌های USNO-B1 و PANSTARRS مقایسه شده‌اند. تنها اختلاف قابل توجه در فیلتر i' به مقدار $0/16$ قدر مشاهده شده است.

۲-۲ طیف سنجی

ستاره همدم سامانه دوتایی J2215 با تفکیک‌پذیری متوسط با تلسکوپ WHT طیف‌سنجی شد تا اطلاعات مربوط به نوع طیفی و سرعت شعاعی آن به‌دست آید.

در مشاهدات ابزار ISIS از توری‌های پراشی (R600B بازوی آبی، 4500 آنگستروم) و (R600 بازوی قرمز، 6400 آنگستروم) با عرض شکاف $1''$ استفاده شد. در تلسکوپ GTC نیز ابزار OSIRIS در حالت شکاف بلند با توری پراشی R2000B VPH و عرض شکاف $1''$ به کار گرفته شد. در مجموع 17 طیف ویلیام هرشل - ISIS و 21 طیف جی تی سی - OSIRIS با زمان نوردهی حدود 900 تا 935 ثانیه ثبت

¹⁴ IRAF

¹³ Aperture Photometry

می توان تشخیص داد که آیا ستاره ی همدم در حال از دست دادن جرم است یا خیر، و اینکه جریان ماده به سمت جسم فشرده (مثلاً ستاره ی نوترونی یا سیاه چاله) شکل گرفته است یا نه.

در سامانه های دوتایی فشرده، یکی از اهداف اصلی مدل سازی، بررسی این موضوع است که آیا جریان ماده از ستاره ی همدم به سوی جسم فشرده (مانند ستاره ی نوترونی یا سیاه چاله) شکل گرفته است یا خیر. ELC علاوه بر مدل سازی هندسی دقیق سامانه، این امکان را نیز فراهم می کند تا اثرات فیزیکی و تابشی مختلفی که بر منحنی نوری تأثیر گذارند، در محاسبات لحاظ شوند.

از جمله این اثرات، اثر بازتاب^{۲۰} است که ناشی از گرم شدن نیم کره ای از ستاره ی همدم در اثر تابش ستاره ی فشرده می باشد که رو به ستاره فشرده قرار گرفته است و معمولاً منجر به روشن تر شدن آن بخش از سطح ستاره می شود. همچنین، تابش پرتو ایکس که از ناحیه ی نزدیک به جسم فشرده منتشر می شود، می تواند سطح ستاره ی همدم را به صورت ناهمسان گرد گرم کرده و موجب بروز تغییرات مشخصی در منحنی نوری در طول چرخه ی مداری شود.

مدل ELC قابلیت استفاده از دو نوع الگوریتم بهینه سازی را فراهم می کند: الگوریتم ژنتیک^{۲۱} و زنجیره های مارکوف اختلافی^{۲۲}. در عمل، عملکرد این دو روش به شرایط مدل سازی بستگی دارد و ممکن است در مسائل مختلف، یکی نسبت به دیگری برتری داشته باشد.

در این مطالعه، ابتدا مدل را با استفاده از الگوریتم ژنتیک اجرا کرده و بهترین مدل برازش شده را از میان نتایج آن انتخاب کردیم. سپس، این مدل به عنوان نقطه ی شروع برای اجرای الگوریتم DEMCMC مورد استفاده قرار گرفت. پس از پایان اجرای DEMCMC، بهترین مدل نهایی از میان نمونه های خروجی انتخاب شده و مجدداً به عنوان ورودی برای اجرای نهایی مدل به کار گرفته شد.

حذف پروفایل های دوپیکری در تابع همبستگی متقابل (CCF) در فاز مداری ۰/۵ و بهبود دقت اندازه گیری انجام شده است.

تمام فازهای مداری مورد استفاده در تحلیل منحنی های نوری و سرعت های شعاعی، بر پایه ی زمان های اصلاح شده نسبت به زمان گرانیگاهی^{۱۵} محاسبه شده اند. برای این منظور، از افریس های^{۱۶} نهایی و به روز استفاده شده که شامل مقدار دقیق دوره ی مداری و زمان عبور از حضیض مداری است. دوره ی مداری سامانه از زمان سنجی تپاختر برابر با $۰/۱۷۲۵۰۲۱۰۴۹۰۷$ روز با عدم قطعیتی برابر با $۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۷۶۷$ به دست آمده است. همچنین، زمان عبور از حضیض (T_0) با بهره گیری از داده های سرعت شعاعی تلسکوپ جی تی سی و در مقیاس زمانی TDB برابر با $۰/۰۰۰۰۸ \pm ۵۶۹۷۶/۹۵۰۱$ تعیین شده است. به روزرسانی این افریس ها، دقت مدل سازی مداری سامانه را به شکل چشمگیری افزایش داده و زمینه ی مناسبی را برای بررسی تأثیر تابش بر اندازه گیری های دینامیکی، به ویژه تعیین دقیق جرم ستاره ی نوترونی، فراهم ساخته است.

۳- مدل سازی ELC^{۱۷}

ELC یکی از ابزارهای محاسباتی قدرتمند و پیشرفته در اخترفیزیک است که برای مدل سازی دقیق منحنی های نوری و منحنی های سرعت شعاعی در سامانه های ستاره ای، به ویژه سامانه های دوتایی فشرده، توسعه یافته است. این مدل توسط جرم اوروز^{۱۸} طراحی شده و از زمان معرفی خود، به عنوان یکی از استانداردهای تحلیلی در مطالعات سیستم های دوتایی با تعامل های دینامیکی و تابشی پیچیده شناخته می شود [15].

یکی از ویژگی های کلیدی ELC، استفاده از هندسه ی روچ^{۱۹} است. در سامانه های دوتایی نزدیک، اثرات کشندی موجب تغییر شکل ستارگان می شود و ستاره ها به جای شکل کروی، به صورت کشیده و نامتقارن در می آیند. ELC این تغییر شکل را به صورت کامل مدل می کند و امکان بررسی دقیق پرشدگی لب روچ را فراهم می سازد. از طریق این قابلیت،

²⁰ Reflection effect

²¹ Genetic

²² Differential Evolution Markov Chain Monte Carlo (DEMCMC)

¹⁵ Barycentered times

¹⁶ Ephemeris

¹⁷ Eclipsing Light Curve

¹⁸ Jerome A. Orosz

¹⁹ Roche geometry

همدم است. وجود گرمایش ناشی از تابش پرتوهای ایکس می‌تواند باعث ایجاد انحراف سیستماتیک در این اندازه‌گیری‌ها شود. مدل ELC برای جبران بخشی از این خطاها، از الگوریتمی استفاده می‌کند که در آن سرعت هر ناحیه‌ی سطحی با توجه به شار تابشی محلی آن وزن‌دهی می‌شود. این رویکرد به بهبود دقت مدل‌سازی دینامیکی کمک می‌کند. همچنین مدل بهینه حاصل از محاسبات، دمای میانگین بالایی را برای ستاره‌ی همدم پیش‌بینی می‌کند، در حالی که جرم این ستاره نسبتاً پایین است. این عدم تناسب به‌وضوح ناشی از گرمایش خارجی، به‌ویژه از سوی تابش ایکس، است. با این حال، مدل اتمسفری مورد استفاده در ELC فرض می‌کند هر ناحیه‌ی سطحی مانند یک ستاره‌ی معمولی با همان دما تابش می‌کند. در شرایطی که دمای یک ناحیه‌ی سطحی به‌واسطه‌ی تابش خارجی افزایش یافته باشد، این فرض ممکن است دقت محدودی داشته باشد، زیرا گسیل تابشی آن لزوماً مشابه تابش یک ستاره‌ی عادی با آن دما نخواهد بود.

در مجموع، انعطاف‌پذیری بالا، دقت در بازتولید ویژگی‌های نوری-مداری، و امکان اعمال پدیده‌های پیچیده‌ی تابشی و هندسی، مدل ELC را به یکی از ابزارهای برجسته در مدل‌سازی سامانه‌های دوتایی و تحلیل دینامیکی ساختار آن‌ها تبدیل کرده است؛ به‌ویژه در مطالعه‌ی تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای، ستاره‌های نوترونی و سیستم‌های دارای تابش پرنرزی.

4 - اجرای مدل و تنظیم پارامترها

در این مطالعه، برای دستیابی به برآوردی دقیق از جرم ستاره‌ی نوترونی و تعیین پارامترهای مداری سامانه‌ی PSR J2215+5135، شبیه‌سازی هم‌زمانی بر روی منحنی‌های نوری در سه فیلتر r' ، g' و i' ، به‌همراه منحنی‌های سرعت شعاعی استخراج‌شده از خطوط جذبی منیزیم و بالمر انجام شد. این شبیه‌سازی با استفاده از مدل پیشرفته‌ی ELC صورت گرفت؛ ابزاری که پیش‌تر برای مدل‌سازی سامانه‌های

با توجه به اینکه در این تحلیل فرض شده‌است که گرفت²³ پرتوهای ایکس مشاهده نمی‌شود، یک قید ناظر بر این فرض در فایل ورودی مدل‌سازی²⁴ اضافه شده‌است تا این شرط در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ گردد. همچنین اگر یک مدل، گرفت اشعه ایکسی تولید کند که مدت زمان آن بزرگتر از صفر درجه در فاز باشد، آنگاه منجر به χ^2 های بزرگ می‌گردد. افزون بر این، مدل ELC قادر است لکه‌های سطحی²⁵ را نیز در تحلیل‌های خود لحاظ کند. این لکه‌ها مناطقی با دمای بالاتر یا پایین‌تر نسبت به بقیه‌ی سطح ستاره هستند که به‌صورت موضعی موجب نوسانات کوچک اما قابل اندازه‌گیری در منحنی نوری می‌شوند. لکه‌های سطحی نقش بالقوه‌ی در بهبود مدل‌سازی نوری دارند که در بخشی از این مطالعه این اثرات در نظر گرفته شده است. دیگر عوامل مانند توزیع دمای غیر یکنواخت در سطح ستاره، تاریکی لبه‌ای²⁶ و اثر گرانشی سطح نیز در مدل‌سازی نور گنجانده می‌شوند تا دقت بازتولید منحنی نوری به بیشترین حد ممکن برسد.

از نظر ورودی، کاربر می‌تواند پارامترهایی همچون دوره‌ی مداری، نسبت جرم‌ها، زاویه‌ی میل، دمای مؤثر ستاره‌ها، نوع تابش، نسبت پرشدگی لب‌روچ، میزان تابش خارجی، هندسه‌ی سیستم و... را به دقت مشخص کند. خروجی‌های مدل نیز شامل منحنی‌های نوری و شعاعی مدل‌سازی‌شده، فایل‌های متنی حاوی پارامترهای بهینه، و داده‌های قابل تحلیل گرافیکی برای مقایسه با مشاهدات هستند.

همچنین ELC دارای قابلیت بهینه‌سازی خودکار پارامترها با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند جستجوی شبکه‌ای MCMC²⁸، و کمینه‌سازی²⁹ است، که به پژوهشگران امکان می‌دهد بهترین مجموعه‌ی پارامترها را با کمترین انحراف از داده‌های مشاهداتی بیابند. در فرآیند استفاده از مدل ELC، امکان ویرایش پارامترهای ورودی همواره وجود دارد، بدون توجه به نحوه تولید اولیه آن‌ها.

در مدل‌سازی دینامیکی سامانه، یکی از چالش‌های اساسی، بررسی میزان تطابق داده‌های سرعت شعاعی با حرکت مرکز جرم ستاره‌ی

²⁷ limb darkening

²⁸ Markov chain Monte Carlo

²⁹ Minimization

²³ Eclipse

²⁴ gridloop.opt

²⁵ Chi-squared- χ^2

²⁶ Spots

دوتایی شامل ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌ها نیز به‌کار گرفته شده است.

در قالب این مدل، ستاره‌ی همدم به‌صورت ستاره‌ای در نظر گرفته شد که به‌طور قابل‌توجهی سطح روچ خود را پر کرده و تحت تابش مستقیم و پرنرژی از سوی جسم فشرده قرار دارد. این تابش منجر به گرم‌شدن موضعی سطح ستاره‌ی همدم و ایجاد تغییرات آشکاری در منحنی نوری سامانه می‌شود. از آن‌جا که در طیف‌های نوری نشانه‌ای از حضور خطوط گسیلی مشاهده نشد، فرض حضور قرص برافزایشی در اطراف ستاره‌ی نوترونی منتفی شد و بنابراین این مؤلفه در مدل نادیده گرفته شد. در این بخش، پارامترهای اصلی مورد استفاده در مدل‌سازی سامانه‌ی دوتایی مورد بررسی قرار می‌گیرند. این پارامترها نقش کلیدی در بازسازی دقیق منحنی‌های نوری و سرعت شعاعی سامانه ایفا می‌کنند و پایه‌گذار استنتاج‌های نهایی درباره‌ی جرم ستاره‌ی نوترونی و ویژگی‌های مداری هستند.

پارامترهای پایه‌ی مدل شامل جرم ستاره‌ی نوترونی (M_2)، جرم ستاره‌ی همدم (M_1)، نسبت جرم‌ها ($Q = M_2/M_1$)، زاویه‌ی میل مداری (i) و دمای میانگین سطحی ستاره‌ی همدم (T_1) هستند. از آن‌جایی که ستاره‌ی همدم تحت تابش شدید از سوی ستاره‌ی فشرده قرار دارد، دمای سطحی آن به‌صورت موضعی افزایش می‌یابد. این گرمایش موضعی با استفاده از مدل‌های اتمسفری NEXTGEN و با در نظر گرفتن توزیع ناهمگن دما روی سطح ستاره، شبیه‌سازی شده است.

همچنین، با وارد کردن مشخصات لکه‌ی داغ در بخشی از مدل، اثر حضور آن و تأثیرش بر جرم و سایر پارامترهای سامانه مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات لکه‌ی داغ در سامانه‌ی دوتایی به‌صورت $(\theta_{HS}, \varphi_{HS})$ در نظر گرفته شده است، که متناظر با طول جغرافیایی 324° درجه و عرض جغرافیایی $73/2^\circ$ درجه نسبت به مرکز مختصات $(0,0)$ در نیم‌کره‌ی شمالی ستاره‌ی همدم و در شعاع زاویه‌ای $r_{HS} = 15/5$ قرار دارد [11]. شدت دما در این ناحیه با ضریب $1 + A_{HS}$ که در این

مطالعه مقدار $A_{HS} = 0.6$ در نظر گرفته شده است (نسبت به دمای زیرین تنظیم شده است).

همچنین برای مدل‌سازی دقیق تابش، از قانون تیرگی لبه‌ای مرتبه دوم بهره گرفته شد که در آن کاهش شدت نور از مرکز دیسک ستاره به لبه‌ها در نظر گرفته می‌شود. این امر باعث می‌شود توزیع شدت نور در سطح ستاره واقعی‌تر و همخوان‌تر با داده‌های نوری مشاهده‌شده باشد. مدل‌سازی منحنی‌های سرعت شعاعی نیز با استفاده از طیف‌های الگو و تحلیل خطوط جذبی انجام گرفت. عمق خطوط بالمر و تریپلت منیزیم وابسته به دمای موضعی سطح است، و از این رابطه برای استخراج دقیق سرعت شعاعی استفاده شده است. به این ترتیب، حرکت ستاره‌ی همدم در مدار به‌صورت دقیق‌تری بازسازی شد.

برای تعیین بهترین مجموعه‌ی پارامترها، از الگوریتم آماری مارکوف‌چین مونت‌کارلو^{۳۰} با روش تکامل تفاضلی استفاده شده است. این روش با کاوش گسترده در فضای پارامترها، امکان دسترسی به کمینه‌ی سراسری تابع هزینه و برآورد عدم قطعیت‌های آماری را فراهم می‌کند. افزون بر این، اطلاعات رادیویی به‌دست‌آمده از زمان‌سنجی تپ‌اختر نیز به‌عنوان یک قید مستقل در فرایند مدل‌سازی وارد شده و به بهبود دقت مدل کمک کرده است.

در این تحلیل، اثرات ثانویه‌ی همچون جابجایی فاز در منحنی نوری یا سرعتی، و همچنین اختلاف‌های سیستماتیک بین خطوط منیزیم و بالمر در نظر گرفته شده‌اند تا مدل نهایی با دقت بیشتری با داده‌های واقعی منطبق شود.

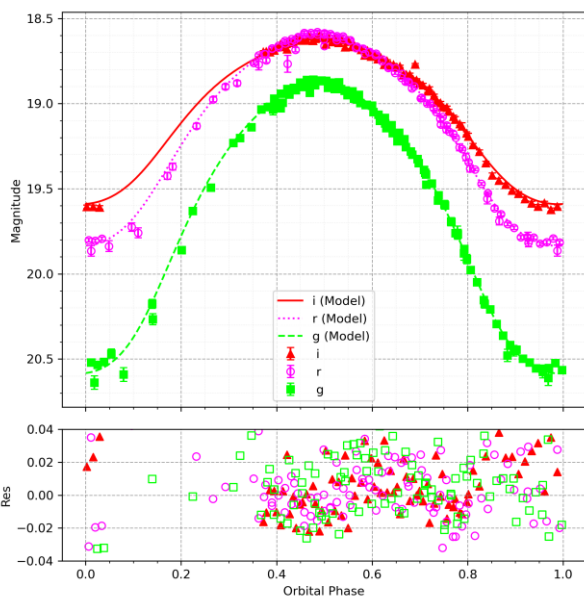
داده‌ها در قالب پنج مجموعه‌ی جداگانه شامل سه منحنی نوری (در فیلترهای r' ، g' و i') و دو منحنی سرعت شعاعی (بر پایه‌ی خطوط بالمر و منیزیم) تقسیم شدند. برای بهینه‌سازی برازش نهایی، به هر مجموعه وزن نسبی متناسب با کیفیت و پوشش داده‌ای آن اختصاص داده شد. سپس با نرمال‌سازی مقدار مربع کای کاهش‌یافته برای هر مجموعه، برازش نهایی انجام شد.

نتیجه‌ی این مدل‌سازی، دستیابی به مقادیر دقیق جرم برای ستاره‌ی نوترونی و ستاره‌ی همدم است. این مقادیر در ادامه‌ی مقاله به‌عنوان

یافته‌های اصلی مورد تحلیل و مقایسه قرار خواهند گرفت. تمام مدل‌سازی‌ها با استفاده از ابررایانه‌ی مرکز تحقیقات نجوم مؤسسه‌ی IPM صورت گرفت. اجرای محاسبات برای ۱۰۰ نسل با توجه به تعداد نوده‌های اختصاص‌یافته، حدود ۳ روز زمان می‌برد. بدیهی است که برای تعداد نسل‌های بالاتر، مدت زمان بیشتری مورد نیاز خواهد بود. با این حال، همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر پارامترها از حدود نسل ۲۰ به بعد به حالت پایدار می‌رسند.

5- نتایج

از آن‌جا که هدف اصلی این مطالعه، بازیابی نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش لینارس است، تمرکز ما بر استفاده از مدل ELC برای تحلیل داده‌های نوری سامانه‌ی PSR J2215+5135 بوده است. این تحلیل نشان داد که مدل ELC نه تنها توان بازتولید نتایج حاصل از مدل اختصاصی XRBCURVE را با دقتی در بازه ۱ سیگما آنها دارد، بلکه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ی بهینه‌سازی و داده‌های چندطیفی، توانسته است به یک تخمین دقیق و قابل‌اعتماد از پارامترهای مداری و جرم ستاره‌ی نوترونی دست یابد. در واقع تصحیح تجربی K^{31} توانسته است یکی از مهم‌ترین منابع عدم‌قطعیت سیستماتیک در سامانه‌های دوتایی با تابش شدید را برطرف سازد؛ به‌ویژه اختلاف میان مرکز جرم و مرکز تابش نوری ستاره‌ی همدم که در صورت نادیده‌گرفته‌شدن می‌تواند منجر به تخمین نادرست جرم ستاره‌ی نوترونی شود. در سامانه‌ی J2215 که لینارس و همکاران مورد بررسی قرار دادند، مقدار به‌دست‌آمده برای سرعت شعاعی مرکز جرم ستاره‌ی همراه برابر با $K_1 = 412/3 \pm 5/0$ کیلومتر بر ثانیه بود. این مقدار به تابع جرمی معادل $1/2$ جرم خورشید منجر شد که به‌تنهایی یک کران پایین قطعی برای جرم ستاره‌ی نوترونی فراهم می‌کند. با در نظر گرفتن این مقدار همراه با نسبت جرم Q که از برازش مدل استخراج شد، حداقل جرم ستاره‌ی نوترونی به $1/6$ جرم خورشید می‌رسد.



شکل ۱. بالا: منحنی‌های نور نوری J2215 در سه باند، همان‌طور که نشان داده شده است. نقاط داده، کمپین رصد IAC-80 و WHT 2014 لینارس و همکاران را نشان می‌دهند. نقاط سبز رنگ باند g نقاط صورتی مربوط به باند r و نقاط قرمز رنگ باند i را نشان می‌دهند. خطوط ممتد برازش‌های ما با استفاده از مدل ELC می‌باشد. میله‌های خطا در گوشه بالا سمت راست، عدم قطعیت در کالیبراسیون قدر را نشان می‌دهند. پایین: باقیمانده‌های برازش در پنل پایین نشان داده شده است.

دو ویژگی کلیدی در روش ما باعث شده‌اند که نتایج به‌دست‌آمده نسبت به مطالعات پیشین دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر باشد. نخست، استفاده از تصحیح K بر پایه‌ی اندازه‌گیری‌های تجربی سرعت شعاعی با دو مجموعه‌ی مستقل از خطوط جذبی، یعنی خطوط بالمر و منیزیم، که

مدل‌سازی‌ها با استفاده از ابررایانه‌ی مرکز تحقیقات نجوم مؤسسه‌ی IPM صورت گرفت. اجرای محاسبات برای ۱۰۰ نسل با توجه به تعداد نوده‌های اختصاص‌یافته، حدود ۳ روز زمان می‌برد. بدیهی است که برای تعداد نسل‌های بالاتر، مدت زمان بیشتری مورد نیاز خواهد بود. با این حال، همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر پارامترها از حدود نسل ۲۰ به بعد به حالت پایدار می‌رسند.

5- نتایج

از آن‌جا که هدف اصلی این مطالعه، بازیابی نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش لینارس است، تمرکز ما بر استفاده از مدل ELC برای تحلیل داده‌های نوری سامانه‌ی PSR J2215+5135 بوده است. این تحلیل نشان داد که مدل ELC نه تنها توان بازتولید نتایج حاصل از مدل اختصاصی XRBCURVE را با دقتی در بازه ۱ سیگما آنها دارد، بلکه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ی بهینه‌سازی و داده‌های چندطیفی، توانسته است به یک تخمین دقیق و قابل‌اعتماد از پارامترهای مداری و جرم ستاره‌ی نوترونی دست یابد. در واقع تصحیح تجربی K^{31} توانسته است یکی از مهم‌ترین منابع عدم‌قطعیت سیستماتیک در سامانه‌های دوتایی با تابش شدید را برطرف سازد؛ به‌ویژه اختلاف میان مرکز جرم و مرکز تابش نوری ستاره‌ی همدم که در صورت نادیده‌گرفته‌شدن می‌تواند منجر به تخمین نادرست جرم ستاره‌ی نوترونی شود. در سامانه‌ی J2215 که لینارس و همکاران مورد بررسی قرار دادند، مقدار به‌دست‌آمده برای سرعت شعاعی مرکز جرم ستاره‌ی همراه برابر با $K_1 = 412/3 \pm 5/0$ کیلومتر بر ثانیه بود. این مقدار به تابع جرمی معادل $1/2$ جرم خورشید منجر شد که به‌تنهایی یک کران پایین قطعی برای جرم ستاره‌ی نوترونی فراهم می‌کند. با در نظر گرفتن این مقدار همراه با نسبت جرم Q که از برازش مدل استخراج شد، حداقل جرم ستاره‌ی نوترونی به $1/6$ جرم خورشید می‌رسد.

مدل‌سازی کامل سامانه ما را به تخمین قابل‌توجهی از جرم ستاره‌ی نوترونی رساند؛ به‌طوری‌که مقدار نهایی جرم آن برابر با M_1

³³Romani

³⁴Edge-on

³¹ K-correction

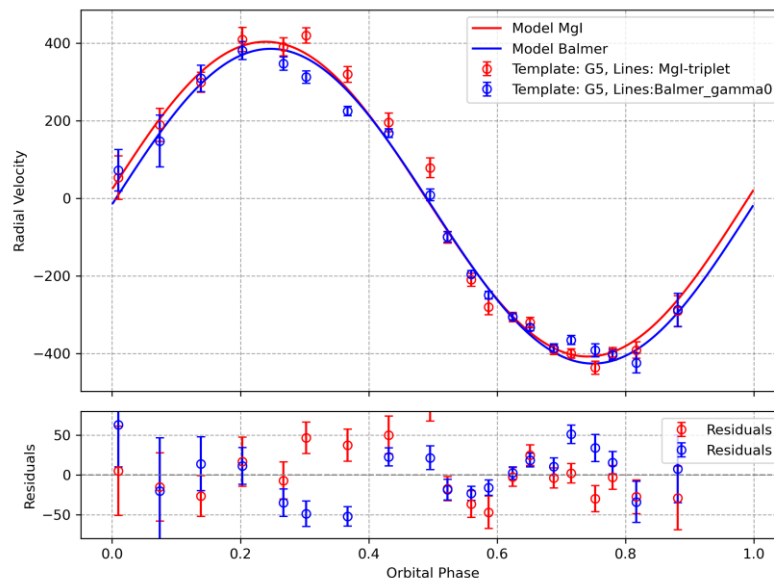
³²Antoniadis

(شکل ۱) و همچنین منحنی های نوری در سه باند (شکل ۲) را با χ^2 کاهش یافته کلی ۳ برازش می دهد.

شکل ۱ منحنی های نوری سیستم دوتایی J2215 را در سه باند نوری i' ، I' و g' برحسب فاز مداری نمایش می دهد (پنل بالا)، و همچنین باقی مانده های مدل سازی را در پنل پایین نشان می دهد. نقاط داده، داده های رصدی به دست آمده از تلسکوپ های آی ای سی ۸۰ و ویلیام هرشل در سال (۲۰۱۴) هستند، و خطوط مختلف (پرننگ، نقطه چین و خط چین) مدل نوری حاصل از پارامترهای بهینه شده ما را در هر باند نشان می دهند. مدل به خوبی توانسته تغییرات نوری را در طول فاز مداری بازتولید کند، به ویژه در نواحی کمینه و بیشینه که به پارامترهایی چون شعاع، دما و میل مداری حساس هستند. میله های خطا در گوشه ی بالا سمت راست، میزان عدم قطعیت در کالیبراسیون قدر نوری را نمایش می دهند. دامنه ی نوسانات در فیلتر g' بزرگ تر از سایر باندهاست که این موضوع بیانگر حساسیت بیشتر آن به تغییرات دمایی است. باقی مانده ها در پنل پایین، در بازه ای بسیار کوچک (حدود ± 0.3) قدر قرار دارند و فاقد ساختار یا روند مشخص هستند، که نشان دهنده ی انطباق مناسب بین مدل و داده های رصدی و در نتیجه، اعتبار مدل سازی انجام شده است.

امکان بررسی اثرات تابش و انتقال مرکز نور را به طور مجزا فراهم کرد. دوم، در نظر گرفتن لکه داغ بر روی ستاره همدم که باعث بهبود برازش مدل به داده ها می شود. لکه های داغ، حتی با دریافت تنها بخش کمی از انرژی باد تپاختر، گرمایش موضعی قابل توجهی ایجاد می کنند که شکل منحنی های نور را تغییر می دهد و باعث کاهش مقدار χ^2 برازش و کاهش عدم قطعیت در پارامترهای مداری و جرم ستاره ی نوترونی می گردد. همچنین برای یک تپاختر میلی ثانیه ای وقتی $a \sin(i)$ صفر نباشد، نسبت جرم دوتایی از $a \sin(i)$ محاسبه می شود و از تخمین عدم قطعیت روی مقدار $a \sin(i)$ به عنوان بخشی از محاسبه استفاده می شود که کمک شایانی به محدودسازی پارامترهای مدل می کند. گرچه همچنان احتمال وجود خطاهای سیستماتیک پنهان وجود دارد، اما این نوآوری های روش شناختی، خروجی این تحقیق را از لحاظ دقت و اطمینان پذیری نسبت به مطالعات پیشین متمایز می سازد.

توزیع پارامترها از برازش های ELC برای J2215 در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. همه پارامترهای مدل به خوبی محدود شده اند و توافق کلی بین داده ها، مدل های پیشین و مدل ما خوب است. مدل فیزیکی ما به طور همزمان منحنی های سرعت شعاعی بالمر و منیزیم



شکل ۲. سرعت شعاعی ستاره همراه در J2215، در مدار خود به دور تپاختر، که با همبستگی متقابل با الگوی G5 با استفاده از (i) خطوط بالمر (نقاط آبی) و (ii) خطوط سه تایی Mg I (نقاط قرمز) اندازه گیری شده است. واحد سرعت شعاعی در محور عمودی کیلومتر بر ثانیه می باشد. خطوط آبی خط چین و قرمز ممتد، به ترتیب برازش های سینوسی با RVC های Balmer و Mg I توسط مدل ELC را نشان می دهند (در هر دو مورد، بهترین برازش سرعت سیستمی کسر شده است). باقیمانده های برازش سینوسی در پنل پایین نشان داده شده اند.

جدول ۱. خلاصه‌ای از χ^2 برای باندهای نوری و طیف‌های مختلف

تعداد داده	χ^2	باند نوری
۱۱۱	۴۲۴/۹۸	باند g'
۱۱۱	۳۶۶/۷۵	باند r'
۸۱	۴۰۷/۲۹	باند i'
۲۰	۸۲/۵۴	بالمر RV
۲۰	۴۸/۳۴	منیزیم RV
۳۴۳	۱۳۲۹/۹۲	کل

جدول ۲ بهترین برازش ما و عدم قطعیت آنها را در مقایسه با مطالعه قبلی لینارس و همکاران برای J۲۲۱۵ در سه روش مدل‌سازی مختلف شامل XRBCURVE و ELC با و بدون لکه سطحی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده تلاش‌های ما برای تعیین پارامترها بر اساس اندازه‌گیری‌های مدل ELC در بازه ۱ سیگما خطا لینارس و همکاران است. به تمام خطاها، خطای سیستماتیک ۰/۱ اضافه شده است. در ادامه، پارامترهای مدل‌سازی سیستم دوتایی مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

جرم ستاره اول در هر سه مدل در حدود ۰/۳۲ تا ۰/۳۴ جرم خورشیدی برآورد شده است و اختلافات جزئی میان مدل‌ها قابل مشاهده است. با این حال، در هر سه حالت، جرم ستاره دوم به مراتب بیشتر بوده و در بازه ۲/۲۷ تا ۲/۲۸ جرم خورشیدی قرار دارد. این نسبت جرم پایین ($q \approx 0.14$) به وضوح حاکی از حضور جرمی فشرده در نقش همدم ستاره‌ای است، که می‌تواند یک ستاره نوترونی یا سیاه‌چاله باشد. نسبت پر شدن لوب روچ برای ستاره اول نیز وابسته به مدل تغییر می‌کند؛ در مدل XRBCURVE این مقدار تقریباً ۰/۹۵ است که نشان‌دهنده نزدیکی ستاره به پر کردن کامل لوب روچ خود است، در حالی که در مدل ELC بعلاوه لکه داغ این مقدار به ۰/۷۹ کاهش یافته است. این کاهش ممکن است ناشی از حضور ناهمگونی‌های سطحی باشد که روی تحلیل منحنی نور تأثیرگذارند.

شکل ۲ منحنی‌های سرعت شعاعی را برحسب فاز مداری برای خطوط طیفی متفاوت نشان می‌دهد. داده‌های رصدی با استفاده از خطوط سه‌تایی منیزیم (دایره‌های قرمز) و خطوط بالمر (دایره‌های آبی) استخراج شده‌اند، و مدل‌های برازش‌شده به ترتیب با خطوط قرمز و آبی نمایش داده شده‌اند. این منحنی‌ها نوسانات سرعت شعاعی ستاره‌ی همراه را در طول یک چرخه‌ی مداری کامل توصیف می‌کنند. مدل‌ها به خوبی شکل کلی تغییرات سرعت را بازتولید کرده‌اند، اگرچه در برخی فازها (مثلاً در حدود $\Phi_{orb} = 0.3$ یا 0.8) اختلافات کوچکی میان مدل و داده قابل مشاهده است. در پند پایین، باقی‌مانده‌های هر مدل نسبت به داده‌های مربوطه نشان داده شده‌اند که به‌طور کلی در بازه‌ای محدود (حدود ± 50 کیلومتر بر ثانیه) قرار دارند. این باقی‌مانده‌ها فاقد روند سیستماتیک واضح هستند و نشان‌دهنده‌ی دقت نسبتاً مناسب مدل‌سازی و روش استخراج سرعت شعاعی از خطوط مختلف طیفی هستند. تفاوت‌های جزئی میان خطوط منیزیم و بالمر ممکن است ناشی از منشأ فیزیکی متفاوت این خطوط یا اثرات محیطی در اطراف ستاره‌ی هدف باشد. باقیمانده‌های کوچک در برازش‌های منحنی‌های نوری (به‌ویژه نزدیک $\Phi_{orb} = 0.8$) و در برازش‌های منحنی‌های سرعت شعاعی (در $\Phi_{orb} = 0.5$) مشهود هستند. خطوط جذبی منیزیم از سمت تاریک و خطوط بالمر از سمت روشن ستاره منشأ می‌گیرند. این تمایز، امکان برآورد دقیق سرعت مرکز جرم ستاره‌ی همدم (K_1) را بین دو کران فراهم کرده و خطای سیستماتیک ناشی از اختلاف بین مرکز نور و مرکز جرم را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد.

جدول ۱ مقادیر آماره‌ی χ^2 و تعداد نقاط داده‌ای را برای برازش مدل در باندهای مختلف نوری (باندهای r' ، g' و i') و طیفی (خطوط منیزیم و بالمر) نشان می‌دهد. بالاترین مقدار χ^2 مربوط به باند g' است که بیانگر بیشترین انحراف مدل از داده‌های نوری در این باند است. در بخش طیفی، داده‌های منیزیم با کمترین χ^2 بهترین تطابق را با مدل نشان می‌دهند. مقدار کلی از مجموع ۳۴۳، $\chi^2 = 1329/92$ به دست آمده و معیار نهایی برای ارزیابی کیفیت برازش مدل به کل داده‌ها محسوب می‌شود.

الگوریتم در فضای پارامترهاست. اما با افزایش تعداد نسل‌ها، هم میانگین و هم میانه به سمت مقادیر پایدار همگرا می‌شوند و دامنه انحراف معیار کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده همگرایی تدریجی جمعیت به یک جواب بهینه و کاهش عدم قطعیت پارامترها در طی فرایند بهینه‌سازی است. پنل پایینی نیز تغییرات انحراف معیار پارامترها را نسبت به نسل نمایش می‌دهد. کاهش قابل ملاحظه در انحراف معیار تا حدود نسل ۴۰ و پایداری نسبی آن در ادامه، دلالت بر رسیدن به همگرایی عددی مناسب و تثبیت پاسخ مدل دارد. این روند نشان می‌دهد که انتخاب تعداد کافی نسل برای الگوریتم نقش مهمی در دستیابی به نتایج قابل اطمینان دارد.

6- خلاصه و بحث

از آن‌جا که هدف اصلی این مطالعه، بازیابی نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش لینارس است، تلاش شد تا با استفاده از مدل ELC و به‌کارگیری داده‌های نوری دقیق، نتایج آن مطالعه با دقت بالا محاسبه شد. این بازتحلیل نشان می‌دهد که مدل ELC قادر است ساختار نوری و دینامیکی سامانه را با دقتی قابل قبول محاسبه کند و نتایج حاصل همخوانی خوبی با تحلیل‌های پیشین دارد.

در این پژوهش، داده‌های گردآوری‌شده از تلسکوپ‌های ویلیام هرشل، جی تی سی و آی ای سی ۸۰ مورد استفاده قرار گرفتند. در صورت تأیید مستقل زاویه‌ی میل سامانه، می‌توان J۲۲۱۵ را یکی از پرجرم‌ترین ستارگان نوترونی کشف‌شده در کهکشان دانست. این جرم بالا، حد پایین جدیدی در حدود ۲/۳ جرم خورشید را برای جرم پیشینه‌ی ستاره‌های نوترونی پیشنهاد می‌دهد. چنین مقداری پیامدهای عمیقی برای درک ما از فیزیک ماده در چگالی‌های بالا دارد، چرا که وجود ستاره‌هایی با این جرم بالا مدلی را که شامل حالت‌های خاصی از ماده هستند، به چالش می‌کشد و می‌تواند بسیاری از آن‌ها را از اعتبار بپندازد.

با توجه به کشف سالانه ۱۰ تا ۳۰ تپ‌اختر میلی‌ثانیه‌ای جدید در کهکشان، پیش‌بینی می‌شود که دامنه‌ی جرمی شناخته‌شده برای

سرعت شعاعی ستاره اول نیز در مدل‌های مختلف مقادیری بین ۳۹۲ تا ۴۱۵ کیلومتر بر ثانیه دارد. پایین‌تر بودن این مقدار در مدل دارای لکه $(7/2 \pm 392/3)$ ممکن است ناشی از تأثیر ویژگی‌های سطحی بر انتقال دوپلری باشد. از سوی دیگر، دمای مؤثر ستاره اول نیز در مدل‌های مختلف تفاوت‌هایی دارد، به‌طوری‌که از ۵۶۳۰ کلون در مدل XRBCURVE تا ۶۸۹۶ کلون در مدل ELC بعلاوه لکه سطحی متغیر است. افزایش دما در مدل حاوی لکه، به‌عنوان نوعی جبران‌سازی برای کاهش شار نوری ناحیه‌های لکه‌دار قابل توجیه است. زاویه میل مدار^{۳۵} یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر محاسبه جرم‌ها است. این زاویه در مدل XRBCURVE حدود ۶۳/۹ درجه و در مدل ELC بعلاوه لکه داغ حدود ۶۵/۳ درجه برآورد شده است که می‌تواند باعث تغییر در مقدار نهایی جرم تخمین‌زده‌شده شود. شعاع ستاره اول در تمامی مدل‌ها برابر ۰/۳۹ برابر شعاع خورشیدی محاسبه شده و هم‌خوانی بالایی با یکدیگر دارد. همچنین مقدار سرعت چرخشی $V_{rot} \sin(i)$ که بیانگر مؤلفه قابل مشاهده‌ی سرعت چرخشی ستاره است، در مدل‌ها بین ۹۸ تا ۱۰۳ کیلومتر بر ثانیه قرار دارد.

در مجموع، با وجود هم‌خوانی کلی میان سه مدل در تعیین ویژگی‌های کلی سیستم، تفاوت‌های موجود در برخی پارامترها (به‌ویژه دما، نسبت پر شدن لوب روزه، و زاویه میل) نشان می‌دهد که حضور ناهمگونی‌های سطحی مانند لکه‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تحلیل نهایی داشته باشد. بنابراین، استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر و در نظر گرفتن جزئیات فوتومتریک برای دستیابی به برآوردهای دقیق‌تر، ضروری به نظر می‌رسد.

شکل‌های ۳ و ۴ روند تغییرات پارامترهای جرم ستاره نوترونی و زاویه میل مداری را در طول نسل‌های الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهند. در پنل بالایی، میانگین مقدار جرم ستاره نوترونی و زاویه میل مداری در هر نسل (با خط مشکی پیوسته)، همراه با انحراف معیار ۱ سیگما (به‌صورت خطوط نقطه‌چین)، و همچنین میانه توزیع (با خط قرمز) رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که در نسل‌های اولیه، نوسانات و پراکندگی قابل توجهی وجود دارد که ناشی از جست‌وجوی اولیه

³⁵ Inclination

ستارگان نوترونی در سال‌های آینده گسترش یابد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- منحنی‌های سرعت شعاعی استخراج شده از خطوط منیزیم و خطوط بالمر و منحنی‌ها در سه باند فیلتر نوری با تقریب خوبی با نتایج حاصل از کار لینارس همخوانی دارد.

مدل‌سازی هم‌زمان منحنی‌های نوری در سه فیلتر نوری و دو منحنی سرعت شعاعی، مقادیر دقیق زیر را ارائه داد:

$$K_1 = 414 / 6^{+4/6}_{-2/6} \quad \text{سرعت مرکز جرم ستاره‌ی همدم};$$

کیلومتر بر ثانیه

$$i = 64 / 1^{+0/2}_{-1/0} \quad \text{زاویه‌ی میل مداری};$$

ستاره‌ی همدم با ضریب پرشدگی $0/81$ تقریباً تمام سطح روش خود را پر کرده است.

- مدل‌سازی فیزیکی انجام شده، توزیع شار نوری و سرعت‌های شعاعی مشاهده شده را بدون نیاز به فرض تابش گسترده یا منبع انرژی اضافی بازتولید می‌کند. تنها شواهدی محدود از وجود گرمایش نامتقارن در سطح ستاره یافت شد.

- بر پایه‌ی نتایج به دست آمده، ستاره‌ی همدم در این سامانه یک ستاره‌ی نوع G5 با جرم $M_1 = 0/32 \pm 0/10$ جرم خورشیدی است. در کنار آن، ستاره‌ی نوترونی بسیار پرجرمی با جرم $M_2 = 2/28^{+0/11}_{-0/12}$ جرم خورشیدی قرار دارد که یکی از بالاترین جرم‌های ثبت شده برای این دسته از اجرام آسمانی به شمار می‌رود.

- در صورتی که مقدار زاویه‌ی میل به صورت مستقل تأیید شود، نتایج این پژوهش حاکی از آن‌اند که جرم بیشینه‌ی ستاره‌های

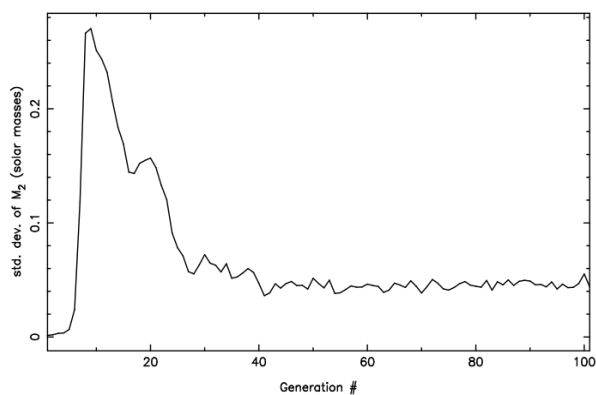
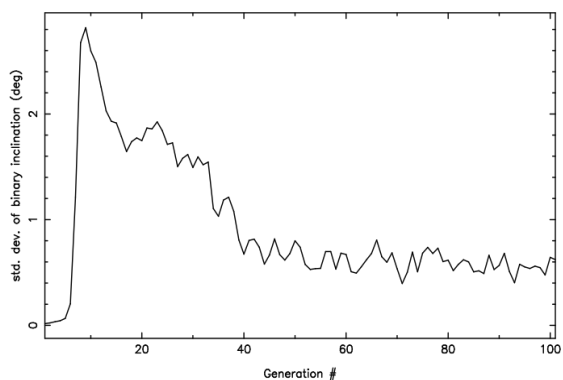
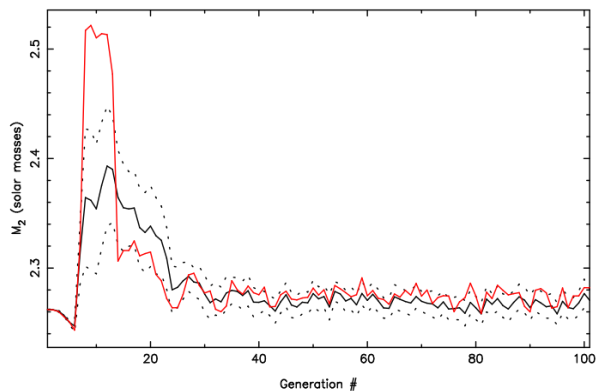
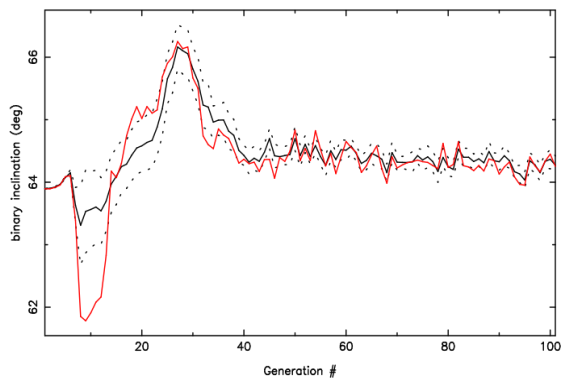
نوترونی می‌تواند حداقل به حدود $2/3$ جرم خورشید برسد. چنین جرمی محدودیت‌های شدیدی بر معادلات حالت ماده در چگالی‌های فوق‌هسته‌ای اعمال می‌کند، چرا که بسیاری از مدل‌های نظری حاوی اجزایی چون هایپرون‌ها یا فاز کوارکی را به چالش می‌کشد.

- با در نظر گرفتن اثر لکه داغ بر روی ستاره همدم نتایج بهبود می‌یابند و باعث کاهش عدم قطعیت در تعیین پارامترهای مداری و جرم ستاره نوترونی می‌شود، کاری که لینارس و همکاران در نظر نگرفتند. در مجموع، این تحقیق با فراهم کردن یک چارچوب مدل‌سازی دقیق، مبتنی بر داده‌های نوری و طیفی با کیفیت بالا و استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌ی بهینه‌سازی در مدل ELC گامی مؤثر در راستای تعیین دقیق جرم ستارگان نوترونی در سامانه‌های دوتایی بر می‌دارد.

با توجه به کشف سالانه ۱۰ تا ۳۰ تپاختر میلی‌ثانیه‌ای جدید در کهکشان، پیش‌بینی می‌شود که دامنه‌ی جرمی شناخته شده برای ستارگان نوترونی در سال‌های آینده گسترش یابد. این امر از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا جرم ستاره‌های نوترونی یکی از مهم‌ترین پارامترها برای آزمودن نظریه‌های حالت ماده در چگالی‌های فوق‌هسته‌ای به شمار می‌رود. دستیابی به جرم‌های بالا، نظیر آنچه در این مطالعه به دست آمد، موجب محدود شدن فضای پارامتری مدل‌های نظری می‌شود و در بسیاری از موارد، برخی از حالت‌های پیشنهادی ماده — از جمله آن‌هایی که در بردارنده‌ی هایپرون‌ها، بوزون‌ها، یا فاز کوارکی هستند — را با چالش مواجه می‌سازد.

تشکر و قدردانی

در نهایت نویسندگان از داوران محترم برای نظرات سازنده شان کمال تشکر را دارند. همچنین از سردبیر محترم مجله برای تسریع در زمان رسیدگی و رفتار حرفه‌ای شان سپاسگزاری می‌کنند.



شکل ۴

شکل ۳

شکل ۳ و ۴: نمودار سمت راست بالا میانگین جرم ستاره نوترونی (شکل ۳) و نمودار سمت چپ بالا میانگین زاویه میل (شکل ۴) و خطاهای ۱ سیگما آن (خطوط سیاه) و میانه پارامتر (خط قرمز) را در مقابل شماره پارامتر نشان می‌دهد و نمودار پایینی انحراف معیار پارامتر را در مقابل شماره نسل برای هر دو شکل نشان می‌دهد.

جدول ۲. خلاصه نتایج پارامترهای فیزیکی با استفاده از مدل ELC

پارامتر	XRBCURVE	ELC	ELC + لکه داغ
جرم ستاره ۱ [M_{\odot}]	$0.33^{+0.02}_{-0.02}$	$0.32^{+0.01}_{-0.01}$	$0.30^{+0.01}_{-0.01}$
جرم ستاره ۲ [M_{\odot}]	$2.27^{+0.17}_{-0.15}$	$2.28^{+0.11}_{-0.12}$	$2.10^{+0.11}_{-0.11}$
لب روچ ستاره ۱	$0.95^{+0.01}_{-0.01}$	$0.81^{+0.01}_{-0.01}$	$0.87^{+0.01}_{-0.01}$
سرعت k ستاره ۱ [km/s]	$412/3^{+5/0}_{-5/0}$	$414/6^{+4/6}_{-2/6}$	$407/0^{+0/3}_{-2/9}$
دمای ستاره ۱ [K]	5630^{+52}_{-71}	6547^{+52}_{-65}	6064^{+20}_{-36}
زاویه میل [$^{\circ}$]	$63/9^{+2/4}_{-2/7}$	$64/1^{+1/0}_{-0/2}$	$65/3^{+0/1}_{-0/6}$
شعاع ستاره ۱ [R_{\odot}]	0.39	0.39	0.39
سرعت چرخش ستاره ۱ [km/s]	1.3	1.2	98
نسبت جرمی	0.144	0.143	0.145

[9] Romani, R. W., & Shaw, M. S., *ApJL*, 743, L26

[10] Crawford, F., Lyne, A. G., Stairs, I. H., et al., *ApJ*, 776, 20, 2013.

[11] Kandel, D. and Romani Roger W, *ApJ*, 892, 2, id.101, pp, . 2020.

[12] Romani, R. W., Graham, M. L., Filippenko, A. V., & Kerr, M., *ApJL*, 809, L10, 2015.

[13] Orosz, J. A. & Hauschildt, P. H. *A&A*, v.364, p.265-281, 2000.

[14] Schroeder, J., and Halpern, J. *ApJ*, 793, 2, 2014.

[15] Orosz, J. A. Manual for the eclipsing light curve (elc) code version 7.

[16] Antoniadis, J., Freire, P. C. C., Wex, N., et al., *Sci*, 340, 448, 2013.

[17] Romani, R. W., & Sanchez, N., *ApJ*, 828, 7, 2016.

[1] Alpar, M. A., Cheng, A. F., Ruderman, M. A., & Shaham, J., *Natur*, 300, 728, 1982.

[2] Backer, D. C., Kulkarni, S. R., Heiles, C., Davis, M. M., & Goss, W. M., *Natur*, 300, 615, 1982.

[3] M. Linares, et al, *ApJ*, 859, 54, 2018.

[4] Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., et al., *ApJ*, 697, 1071, 2009.

[5] Ruderman, M., Shaham, J., & Tavani, M., *ApJ*, 336, 507, 1989.

[6] Fruchter, A. S., Gunn, J. E., Lauer, T. R., & Dressler, A., *Natur*, 334, 686, 1988a.

[7] Kluzniak, W., Ruderman, M., Shaham, J., & Tavani, M., *Natur*, 334, 225, 1988.

[8] Hessels, J. W. T., Roberts, M. S. E., McLaughlin, M. A., et al., in *AIP Conf. Ser. 1357, Radio Pulsars*, ed. M. Burgay et al. (Melville, NY: AIP), 40, 2011.

Mass Determination of the Neutron Star PSR J2215+5135 Using the ELC Model

¹ Razieh Ranjbar*, ² Amin Farhang

^{1*} School of Astronomy, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), P. O. Box 19395-5531, Tehran, Iran

Article details

Received: 2025/08/16

Accepted: 2025/09/16

Published: 2025/09/16

ISSN: 2588-493x

eISSN: 2588-4821

email:

r.ranjbar@ipm.ir



Abstract

One of the effective methods for identifying high-mass neutron stars is to study binary systems containing millisecond pulsars. In such systems, the companion star is affected by intense pulsar irradiation, which alters its apparent brightness and allows for the estimation of the neutron star's mass. This irradiation also displaces the optical center of the companion relative to its center of mass, which in turn increases the uncertainty in precisely determining the orbital parameters and the neutron star mass. In this study, we investigated the binary system PSR J2215+5135 using Eclipsing Light Curve (ELC) modeling along with combined photometric and spectroscopic data, and estimated the mass of the neutron star through comprehensive modeling of the system's irradiation. The binary system lies at an estimated distance of ~ 3 kpc from Earth. Its neutron star is a rapidly rotating millisecond pulsar with a spin period of 2.61 ms, while the binary orbit has a period of 4.14 hr. To achieve this, we employed a physical model of the irradiated companion star and simultaneously fitted light curves in three different bands as well as radial velocity curves from two distinct spectral groups. Our results yield a center-of-mass velocity for the companion star of $K_1 = 414.6_{-2.6}^{+4.6}$ km/s and an orbital inclination angle of $i = 64.1^\circ$. The neutron star's mass was determined to be $M_2 = 2.28_{-0.11}^{+0.12} M_\odot$, and the companion star's mass was estimated at $M_1 = 0.32 \pm 0.10 M_\odot$. In part of this work, the effect of hot spots on the companion's surface was examined and compared to models excluding such features.

To avoid exclusivity in analyzing data from compact-object binaries, the use of accessible and general-purpose modeling tools is essential, as it enables independent reproduction and validation of results by various research groups. The significance of this study lies in the fact that, unlike many proprietary tools, the ELC model is publicly available to the scientific community. Achieving results with over 99% consistency compared to specialized codes underscores the credibility and reliability of this model for future studies—including projects related to the Iranian National Observatory. Moreover, the identification of a neutron star with such a high mass places stringent constraints on the equation of state of dense matter and may prompt revisions of existing theoretical models.

Keywords: Neutron star, Pulsar, Binary system, X-ray