

## تعیین چرخه فعالیت مغناطیسی ستاره‌های کوتوله رده طیفی M با استفاده از تکنیک GLS و شاخص $H_{\alpha}$ ؛ ستاره پروکسیما قنطورس

فاطمه عزیزی<sup>۱\*</sup> و رحیمه فروغی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. دانش‌مؤخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۱۱/۲۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

### چکیده

پروکسیما قنطورس نزدیک‌ترین ستاره به خورشید با نوع طیفی M5.5V، کم‌نورترین عضو سیستم ستاره‌ای سه‌تایی آلفا قنطورس است که در حدود ۱۴۰۰ واحد نجومی نزدیک‌تر به زمین نسبت به سایر اعضای آن قرار گرفته است. این ستاره علی‌رغم سن بالای خود، یک ستاره فعال محسوب می‌شود و همانند خورشید دارای چرخه فعالیت است. لذا مطالعه این ستاره با توجه به شباهت آن با خورشید و امکان داشتن منظومه؛ یعنی حضور سیاراتی در اطراف آن و به تبع آن بررسی حیات در این سیارات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجایی که ستاره‌هایی با نوع طیفی M به دلیل ضعف نوری‌شان چندان بررسی نشده‌اند، مطالعه این ستاره برای شناخت ستاره‌های خیلی سرد نیز می‌تواند مفید باشد. هدف اصلی این مقاله علاوه بر تعیین چرخه فعالیت ستاره پروکسیما قنطورس با شاخص  $H_{\alpha}$ ، ارزیابی تکنیک GLS برای تعیین دوره تناوب ستاره‌های کوتوله فعال نیز می‌باشد. برای این منظور از داده‌های طیفی رصد خانه لاسیلا در شیلی که بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ را پوشش می‌دهد، استفاده شد. دوره تناوب فعالیت این ستاره ۲۳۴۹ روز به دست آمد که در توافق خوبی با نتایج به دست آمده از سایر روش‌ها برای دوره تناوب این ستاره است. در واقع نتایج تأییدکننده کارایی و برتری تکنیک GLS در تعیین دوره تناوب ستاره‌های کوتوله فعال سرد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کوتوله‌های سرد، ستاره فعال، دوره تناوب، تکنیک تناوب‌نگار، پروکسیما قنطورس.

### ۱. مقدمه

همکاران، ۱۹۹۵؛ لوئیز و همکاران، ۲۰۱۱؛ عزیزی و میرترابی، ۲۰۱۸). تعیین دقیق چرخه فعالیت این ستارگان برای یافتن سیاراتی که به گرد این ستاره‌ها در حال گردش هستند حائز اهمیت است. این موضوع به‌ویژه در کشف اخیر یک سیاره فراخورشیدی در حال گردش در منطقه قابل سکونت نزدیک‌ترین همسایه به خورشید منظومه شمسی، یعنی ستاره پروکسیما قنطورس، جالب توجه است.

به‌طور کلی برای ستاره‌های نوع طیفی مؤخر، به دلیل کم‌نور بودنشان، نتایج کمی در دست است؛ لذا تعداد کمی از ستاره‌هایی با نوع طیفی M4 و مؤخرتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پروکسیما قنطورس نزدیک‌ترین ستاره با این ویژگی برای مشاهده است و گزارش‌هایی مبنی بر داشتن چرخه در این ستاره وجود دارد.

بررسی وجود حیات یا منطقه قابل سکونت در جایی از عالم، ورای کره زمین از موارد مهم تحقیقات چند ده سال اخیر فیزیکدانان حوزه نجوم و اخترفیزیک بوده و تحقیقات بیشماری به صورت نظری و تجربی انجام شده و در حال انجام است.

با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه ابزارهای رصدی، مطالعه دقیق‌تر این موضوع به صورت تجربی فراهم شده است. در واقع موضوع مطرح و مهم مطالعات نجومی چند دهه اخیر مبنی بر آشکارسازی ستاره‌های فعال و سیارات فراخورشیدی و به دنبال آن یافتن حیات در مناطق دیگری ورای کره زمین در عالم است. در این راستا کشف ستاره‌هایی با ویژگی خورشید و بررسی فعالیت و تعیین چرخه فعالیت این ستاره‌ها یکی از الزامات این هدف بوده و تاکنون افراد زیادی در این حوزه مطالعه کردند که می‌توان به چند مورد اشاره کرد (بالیناس و

## ۲. ستاره پروکسیما قنطورس

در آسمان نیمکره جنوبی، در صورت فلکی قنطورس، یکی از ستاره‌های سیستم سه‌تایی، آلفا قنطورس ( $\alpha$  Centauri) به نام پروکسیما قنطورس (Proxima Centauri)، با قدر مرئی ۱۱/۰۱، در فاصله ۱/۳ پارسکی از خورشید و نزدیک‌ترین ستاره به ما بعد از خورشید است. این ستاره در سال ۱۹۱۵ توسط روبرت اینز (Robert Innes) کشف شد و ویژگی‌های فیزیکی آن مثل سن ( $4/85$  Gyr)، جرم ( $0/2 M_{\odot}$ )، دوره تناوب دورانی ( $35 \pm 1/5$ )، شعاع ( $1/7 R_{\odot}$ ) تعیین شده است (آلن، ۱۹۷۶؛ پترسن، ۱۹۸۰).

هایش و همکاران (۱۹۹۰) پیشنهاد کردند که این ستاره کوتوله سرد با رده طیفی  $MV5.5$  (راینز و بصری، ۲۰۰۸) و دمای مؤثر  $3042 \pm 117$  K (سگران‌سان و همکاران، ۲۰۰۳)، دارای چرخه فعالیت است. پس از آن تلاش‌ها برای به‌دست آوردن چرخه فعالیت این ستاره آغاز شد.

دوره تناوب دورانی این ستاره چندین بار تخمین زده شده است. بندیکت (۱۹۸۰) به کمک مشاهدات نورسنجی دوره تناوب دورانی این ستاره را  $83/5$  روز تعیین کردند، در حالی که دوئل (۱۹۸۷) از روی فعالیت کروموسفری، دوره تناوبی در حدود  $51 \pm 12$  روز را برای این ستاره اندازه گرفت. لازم به‌ذکر است که پیزال‌اتو و همکاران (۲۰۰۳) در خصوص ارتباط بین فعالیت کروموسفری و دوران در ستاره‌های خورشیدگون، مطالعاتی نیز انجام داده‌اند.

گاینز و مورگان (۱۹۹۶) با مطالعه خطوط  $Mg II h\&K$  دوره تناوب دورانی این ستاره را  $35 \pm 1/5$  روز به‌دست آورده‌اند. مطالعات دیگری در محدوده طول‌موجی پرتوهای X و UV با هدف بررسی فعالیت این ستاره انجام شده است (برای مثال: بیرنی و مکی، ۱۹۸۹؛ ریل و همکاران، ۱۹۹۷؛ هایش و همکاران، ۱۹۹۰؛ بندیکت و همکاران، ۱۹۹۸) اشاره کرد. به‌عنوان مثال بندیکت و همکاران (۱۹۹۸) به کمک مشاهدات نورسنجی، چرخه فعالیت با دوره تناوبی در حدود ۱۱۰۰ روز را به‌دست

آوردند. همچنین بندیکت (۲۰۰۷) به کمک نورسنجی، چرخه فعالیت ۳ساله‌ای را با دقت پایین ارائه کردند. شاخص فعالیت مربوط به خطوط کلسیم، CaII H&K، شاخصی معروف برای بررسی میزان فعالیت ستاره‌ای می‌باشد (بالیناس و همکاران، ۱۹۹۵؛ لوئیز و همکاران، ۲۰۱۱). بالیناس و همکاران (۱۹۹۵) به کمک این شاخص به بررسی چرخه فعالیت ۱۱۱ ستاره با رده طیفی F2-M2 پرداختند. همچنین لوئیز و همکاران (۲۰۱۱) نیز به کمک این شاخص به بررسی چرخه فعالیت  $304$  ستاره خورشیدگون پرداخته‌اند. از آنجایی که این خطوط در کروموسفر ستاره شکل می‌گیرند، برای مطالعه ستاره‌های سردی مثل پروکسیما قنطورس مناسب نیستند. در واقع اکثر مشاهدات و بررسی‌ها با استفاده از این شاخص بر روی ستاره‌هایی با نوع طیفی F تا K متمرکز بوده است. برای ستاره‌هایی با نوع طیفی M مانند پروکسیما قنطورس، در محدوده طول موجی خطوط جذبی CaII H&K نیاز به نوردهی بالا است، چراکه این ستاره‌ها در این محدوده دارای طول‌موجی کم‌نور و قرمز هستند. لذا حضور شاخص‌های دیگری در محدوده طول موجی بالاتر برای بررسی این نوع از ستاره مناسب‌تر است.

با توجه به ضعف شاخص مربوط به خطوط جذبی کلسیم برای ستاره هدف، سینکونگی و ماوس (۲۰۰۴) از شاخص  $H\alpha$  با توجه به طول‌موج بلندترش برای بررسی فعالیت این ستاره سرد استفاده کرده‌اند و دوره تناوبی در حدود ۱۳۰۰ روز را به‌دست آوردند.

بالاترین گواه نوری برای وجود چرخه فعالیت در این ستاره از پروژه ASAS (All Sky Automated Survey) به‌دست آمده است که در آن میلیون‌ها ستاره، با قدری درخشان‌تر از قدر ۱۴ را در باندهای V و I در آسمان شمالی (۲۰۰۶) و جنوبی (۱۹۹۷) بررسی می‌کند (پاچینسکی، ۲۰۰۲). نتایج این بررسی‌ها احتمال حضور چرخه با دوره تناوب  $6/9 \pm 0/5$  سال را نشان می‌دهد و بعدها در مشاهدات چاندرا (Chandra Observatory) توسط گاینز (۲۰۱۰) به  $7/6$  سال تصحیح شد. ساوانوف

ابزاری متداول در تحلیل فرکانس داده‌های غیریکنواخت معادل با برازش حداقل مربعات امواج سینوسی به شکل  $y = a \cos \omega t + b \sin \omega t$  است. معادله این تناوب‌نگار توسط (برنینگ، ۱۹۶۳؛ لمب، ۱۹۷۶ و اسکارگل، ۱۹۸۲) ارائه شده است. برای یک سری زمانی  $(y_i, t_i)$  با میانگین صفر یا  $\bar{y} = 0$ ، تناوب‌نگار لمب-اسکارگل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{P}(\omega) = \frac{1}{\sum y_i^2} \left\{ \frac{[\sum y_i \cos \omega(t_i - \hat{\tau})]^2}{\sum \cos^2 \omega(t_i - \hat{\tau})} + \frac{[\sum y_i \sin \omega(t_i - \hat{\tau})]^2}{\sum \sin^2 \omega(t_i - \hat{\tau})} \right\} \quad (2)$$

که پارامتر  $\hat{\tau}$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tan 2\omega\hat{\tau} = \frac{\sum \sin 2\omega t_i}{\sum \cos 2\omega t_i} \quad (3)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس است.

دو اشکال در این تعریف وجود دارد:

نخست اینکه تناوب‌نگار لمب-اسکارگل، خطاهای اندازه‌گیری را به حساب نمی‌آورد. این مشکل با معرفی مجموع وزنی حل شده است (جیچیلند و بالیناس، ۱۹۸۷؛ ایروین و همکاران، ۱۹۸۹). دوم اینکه برای تحلیل، میانگین داده‌ها کسر شده است؛ یعنی فرض می‌شد میانگین داده‌ها با میانگین تابع سینوسی برازش شده یکسان است. افزودن یک ثابت  $c$  به معادله موج سینوسی برازش یافته به صورت  $y = a \cos \omega t + b \sin \omega t + c$ ، این مشکل را حل می‌کند. این تصحیحات منجر به یک تعمیم در این تناوب‌نگار شد، که تناوب‌نگار لمب-اسکارگل تعمیم یافته (GLS) نام گرفته است. لازم به ذکر است هنگامی که تعداد مشاهدات کم و یا مدت زمان کمیت مورد اندازه‌گیری (دوره تناوب‌ها) طولانی‌تر از مدت زمان مشاهدات باشد، روش لمب-اسکارگل ضعیف‌تر نیز می‌شود (کامینگ و همکاران، ۱۹۹۹).

راه حل تحلیلی برای تناوب‌نگار GLS توسط زکمایستر و کرستر (۲۰۰۹) با استفاده از روش لمب (۱۹۷۶) انجام شد.

(۲۰۱۲) با استفاده از همین داده‌های ASAS و تکنیک طیف توان، قله پهنی را در حدود ۸ سال به همراه چندین قله دیگر در دوره تناوب‌های کوتاه‌تر مشاهده کرد. سوارز ماسکارنو (۲۰۱۶)، با استفاده از داده‌های ASAS-3، چرخه‌هایی را برای ۹ ستاره از نوع طیفی M4 یا مؤخرتر، شامل پروکسیما قنطورس به دست آورده‌اند ( $6/8 \pm 0/3$  سال).

### ۳. روش کار و محاسبه

#### ۳-۱. معرفی شاخص فعالیت $H_\alpha$

شاخص  $H_\alpha$  برای بررسی فعالیت‌های کروموسفری مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای مطالعه ستاره‌های نوع طیفی مؤخر که در بخش قرمز طیف تابش بیشتری دارند، توصیه شده است (سینکونگی و همکاران، ۲۰۰۷a). این شاخص همچنین توسط بویز و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از یک باند مرکزی نسبتاً پهن‌تر محاسبه شده است. بانفیس و همکاران (۲۰۰۷) ثابت کردند که خط  $H_\alpha$  نسبت به فعالیت کروموسفری میانگین حساس است. آنها شاخص  $H_\alpha$  را به صورت زیر تعریف کردند:

$$H_\alpha - \text{Index} = \frac{F_{H_\alpha}}{F_1 + F_2} \quad (1)$$

که  $F_1$  و  $F_2$  پیوستار در دو طرف خط مورد نظر است. پهنای این خط برابر  $0/678$  آنگستروم و طول موج مرکزی آن  $6562/808$  آنگستروم است و  $F_1$  و  $F_2$  به ترتیب در قسمت پیوستار طیف، بازه‌های طول موجی  $6556/245 - 6545/495$  و  $6584/684 - 6575/934$  آنگستروم را پوشش می‌دهند (بانفیس و همکاران، ۲۰۰۷). در این مقاله در مرحله اول، از این دستورالعمل برای اندازه‌گیری عمق خط جذبی  $H_\alpha$  (اندازه‌گیری  $H_\alpha - \text{Index}$ ) در بازه زمانی رصدی ستاره استفاده شده است.

#### ۳-۲. تکنیک (Generalized Lamb-Scargle) GLS

تناوب‌نگار لمب-اسکارگل (LS, Lamb-Scargle)

برخوردار است.

همان‌گونه که مشاهده می‌کنید، تنها تفاوت تناوب‌نگار GLS با تناوب‌نگار لمب-اسکارگل در این است که آن به برازش یک موج سینوسی کامل، شامل یک ثابت و یک تابع وزن تعمیم داده می‌شود.

#### ۴. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبات

##### ۴-۱. داده‌های رصدی

مجموعه‌ای شامل ۲۰۰ طیف از ستاره پروکسیما قنطورس که توسط HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) رصد شده است را در این تحلیل در نظر گرفتیم (جدول پیوست) HARPS (<http://www.eso.org/instruments/harps/>) طیف‌نگاری است که بر روی تلسکوپ ۶/۳ متری کاسگرین در رصدخانه جنوبی اروپا واقع در لاسیلا شیلی نصب شده است. این ابزار به منظور اندازه‌گیری دقیق سرعت‌های شعاعی از مرتبه ۱ m/s در تحقیقات سیارات فراخورشیدی به کار می‌رود. ناحیه طیفی تحت پوشش، ۳۷۸-۶۹۱ نانومتر و توان تفکیکی آن ۱۱۵۰۰۰ است. این ستاره توسط این طیف‌نگار در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ رصد شده است (مایور و همکاران، ۲۰۰۳). تمامی داده‌ها در آرشیو رصدخانه اروپای جنوبی واقع در لاسیلا شیلی در دسترس است (<http://archive.eso.org>).

##### ۴-۲. محاسبه دوره تناوب ستاره پروکسیما قنطورس

##### با استفاده از تکنیک GLS

ابتدا شاخص  $H_{\alpha}$  برای ستاره پروکسیما قنطورس به کمک معادله (۱)، برای تمامی طیف‌های رصدی اندازه‌گیری شد، نتایج در جدول ضمیمه ۱ آورده شده است. سپس با استفاده از تکنیک GLS، تابع طیف توان برای سری زمانی خط طیفی  $H_{\alpha}$  ستاره هدف محاسبه شد (شکل ۱). راه‌حل تحلیلی و معادله تابع طیف توان که در این محاسبات استفاده شده است، در بخش ۳-۲ آورده‌ایم.

اگر  $y_i$ ،  $N$  اندازه‌گیری یک سری زمانی در زمان  $t_i$  و با خطای  $\sigma_i$  باشد، با برازش یک تابع سینوسی کامل به شکل:

$$y = a \cos \omega t + b \sin \omega t + c \quad (۴)$$

در یک فرکانس  $\omega$ ، اختلاف مربعات بین داده‌های  $y_i$  و تابع مدل  $y(t)$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\chi^2 = \sum_i^N \frac{[y_i - y(t_i)]^2}{\sigma_i^2} = W \sum \omega_i [y_i - y(t_i)]^2 \quad (۵)$$

که

$$\omega_i = \frac{1}{W} \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (W = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} \quad \sum \omega_i = 1) \quad (۶)$$

وزن‌های بهنجار شده هستند. برای کمینه‌شدن  $\chi^2$ ، مشتق‌های جزئی  $\chi^2$  نسبت به ضرایب  $a$ ،  $b$  و  $c$  باید صفر شوند. سپس با استفاده از کمینه  $\chi^2$  که به واحد بهنجار شده است، تابع طیف توان،  $P(\omega)$ ، به صورت تابعی از فرکانس  $\omega$  که به واحد بهنجار شده، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P(\omega) = \frac{1}{\sum \omega_i y_i^2 - (\sum \omega_i y_i)^2} \left[ \frac{(\sum \omega_i y_i \cos \omega(t_i - \tau) - \sum \omega_i y_i \sum \omega_i \cos \omega(t_i - \tau))^2}{\sum \omega_i \cos^2 \omega(t_i - \tau) - (\sum \omega_i \cos \omega(t_i - \tau))^2} + \frac{(\sum \omega_i y_i \sin \omega(t_i - \tau) - \sum \omega_i y_i \sum \omega_i \sin \omega(t_i - \tau))^2}{\sum \omega_i \sin^2 \omega(t_i - \tau) - (\sum \omega_i \sin \omega(t_i - \tau))^2} \right] \quad (۷)$$

که در آن  $\tau$  به صورت زیر تعیین شده است:

$$\tan 2\omega\tau = \frac{2CS}{CC - SS} = \frac{\sum \omega_i \sin 2\omega t_i - 2 \sum \omega_i \cos \omega t_i \sum \omega_i \sin \omega t_i}{\sum \omega_i \cos 2\omega t_i - [(\sum \omega_i \cos \omega t_i)^2 - (\sum \omega_i \sin \omega t_i)^2]} \quad (۸)$$

$P(\omega)$  در بازه  $0 \leq P \leq 1$  تغییر می‌کند که  $P = 0$  بیانگر عدم برازش و  $P = 1$  برازش کامل تابع مدل  $y(t)$  بر روی داده‌ها است. به بیان واضح‌تر، تناوب‌نگار، طیف توان را برای سیگنال‌های ورودی محاسبه می‌کند. فرکانس مربوط به بلندترین پیک در این تابع، فرکانس درست است. هرچقدر ارتفاع پیک به یک نزدیک‌تر باشد، فرکانس خروجی از دقت بالاتری

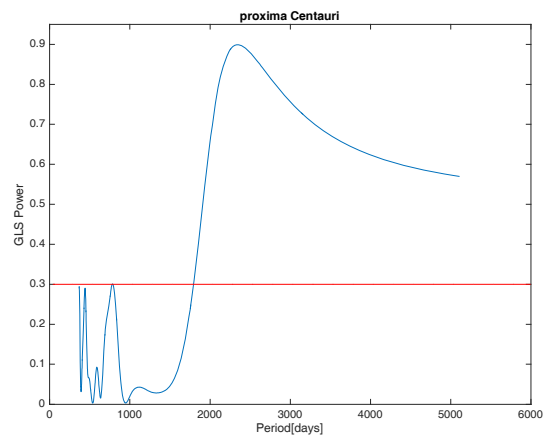
(False Alarm Probability) نامیده می‌شود (استاراک و اسکارگل، ۲۰۱۰)؛ بنابراین ارتفاع تمامی قله‌هایی که در داده‌های رصدی از تراز ۰/۳ کوچک‌تر هستند، نمی‌توانند نشان‌دهنده حضور یک سیگنال باشند. در واقع قله به‌دست آمده از تناوب‌نگار لمب-اسکارگل تعمیم‌یافته حاصل از داده‌های رصدی، زمانی معتبر است که از تراز FAP بالاتر باشد. در این نمودار، تراز FAP یک درصد در نظر گرفته شده است. به این معنی که قله مشاهده‌شده حاصل از GLS، به احتمال ۹۹ درصد معتبر است و نمی‌تواند مربوط به نویز گاوسی باشد. البته قله‌هایی با درصد اعتبار پایین‌تر که بالاتر از تراز FAP قرار می‌گیرند را نیز می‌شود، به‌عنوان قله غیرنویزی در نظر گرفت که در این صورت دوره تناوب تعیین شده از دقت پایین‌تری برخوردار است. با توجه به توضیحات بالا و مقداری که برای FAP به‌دست آوردیم، قله تناوب‌نگار ستاره پروکسیما قنطورس در روز ۲۳۴۹ که در شکل ۱ نشان داده‌ایم، قله‌ای با اعتبار است و حاصل نویز نمی‌باشد.

بررسی این ستاره با توجه به نوع طیفی آن در محدوده طول‌موج‌های پایین کم‌نور بوده و بررسی آن در ناحیه طول‌موج‌های بالاتر از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. تعدادی از بررسی‌های قبلی به‌کمک شاخص خطوط جذبی CaII H&K انجام شده است. برای ستاره‌هایی با نوع طیفی M مانند پروکسیما قنطورس، در محدوده طول‌موجی خطوط جذبی CaII H&K نیاز به نوردهی بالا است، چراکه این ستاره‌ها در این محدوده دارای طول‌موجی کم‌نور و قرمز هستند. لذا حضور شاخص‌های دیگری در محدوده طول‌موجی بالاتر برای بررسی این نوع از ستاره مناسب‌تر است که به‌نوعی تأییدی بر شاخص انتخابی ما می‌باشد.

همان‌گونه که در بخش ۲-۱ گفته شد، افراد زیادی بر روی این ستاره مطالعه کردند. سینکونگی و ماوس (۲۰۰۵) با استفاده از خط طیفی H $\alpha$  دوره تناوب این ستاره را ۱۳۰۰ روز به‌دست آورده‌اند. آنها برای محاسبه تناوب‌نگار از تکنیک LS استفاده کردند. با مراجعه به

## ۵. نتایج، بحث و نتیجه‌گیری

همان‌گونه که از شکل ۱ پیداست، تناوب‌نگار لمب-اسکارگل تعمیم‌یافته (GLS) دارای بیشینه‌ای نزدیک به یک در  $2349 \pm 327$  روز می‌باشد که طبق آنچه در بخش ۲-۳ گفتیم بیانگر برازش تابع سینوسی مدل با داده‌ها بر روی سری زمانی است. لازم به‌ذکر است که برای محاسبه تناوب‌نگار، از شاخص‌های اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی کمتر از ۱۰۰ روز میانگین‌گیری شد. همچنین با توجه به دوره تناوب دورانی این ستاره که در تمامی مراجع زیر ۱۰۰ روز گزارش شده است، این مقدار از تمامی محاسبات ما در اندازه‌گیری دوره تناوب چرخه فعالیت ستاره پروکسیما قنطورس حذف شده است؛ بنابراین می‌توان مطمئن بود که دوره تناوب به‌دست آمده از این تکنیک صرفاً مربوط به فعالیت ستاره است.



شکل ۱. تناوب‌نگار لمب-اسکارگل تعمیم‌یافته برای سری زمانی ستاره پروکسیما قنطورس، خط قرمز نشان‌دهنده FAP یک درصد است.

برای ارزیابی اعتبار ارتفاع قله در تناوب‌نگار حاصل از داده‌های رصدی (شکل ۱)، ابتدا به‌کمک شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعدادی داده نویزی با توزیع گاوسی و با همان بازه‌های زمانی داده‌های رصدی تولید شد. سپس تناوب‌نگار لمب-اسکارگل تعمیم‌یافته برای این داده‌های نویزی محاسبه شد. تناوب‌نگار قله‌ای در ۰/۳ داشت که در شکل ۱ با رنگ قرمز نشان داده شده است که تراز FAP

وجود دو شرط اساسی در تکنیک GLS که منجر به اعتبار بیشتر آن نسبت به LS می‌شود، دوره تناوب به‌دست آمده در توافق خوبی با نتایج به‌دست آمده از دیگران برای این ستاره است.

از موارد دیگری که به اعتبار کار ما می‌افزاید، در اختیار داشتن داده‌های رصدی در یک بازه زمانی ۱۳ ساله هست که در فرایند تحلیل داده‌ها برای آشکارسازی چرخه‌های بالای ۵ سال به‌نظر ضروری می‌آید.

در تحقیقات قبلی‌مان، کارایی این تکنیک در سنجش تغییرات زمانی سری‌های ناهمگن و تعیین دوره تناوب فعالیت ستاره‌های خورشیدگون بررسی شده است (عزیزی و میرترابی، ۲۰۱۸). همین‌طور دوره تناوب ستاره‌های متغیر دلتا اسکوتی نیز با این تکنیک بررسی شد و جواب قابل‌قبولی به‌دست آمد (عزیزی و میرترابی، ۱۳۹۸). در این مقاله علاوه بر تعیین دوره تناوب فعالیت یک ستاره کوتوله سرد (انتخاب ستاره پروکسیما قنطورس به‌جهت اهمیت آن) به کمک خط جذبی  $H\alpha$  و طیف‌های رصدی با توان تفکیک بالای HARPS، کارایی تکنیک GLS برای ستاره‌های فعال سرد تأیید شد.

## مراجع

عزیزی، ف. و میرترابی، م. ت.، ۱۳۹۸، محاسبه دوره تناوب ستاره‌های متغیر دلتا اسکوتی با استفاده از تکنیک تناوب‌نگار لمب-اسکارگل تعمیم‌یافته، م.

فیزیک زمین و فضا، ۴۵، ۸۱-۸۸.

Azizi, F. and Mirtorabi, M. T., 2018, A survey of  $\text{TiO}\lambda 567$  nm absorption in solar-type, MNRAS, 475, 2253–2268.  
Allen, C. W., 1976, Astrophysical Quantities (Astrophysical Quantities, London: Athlone, 3rd edition).  
Baliunas, S. L., Donahue, R. A., Soon, W. H., Horne, J. H., Frazer, J., Woodard-Eklund, L., Bradford, M., Rao, L. M., Wilson, O. C., Zhang, Q., Bennett, W., Briggs, J., Carroll, S. M., Duncan, D. K., Figueroa, D., Lanning, H. H., Misch, T., Mueller, J., Noyes, R. W., Poppe, D., Porter, A. C., Robinson, C. R., Russell, J., Shelton, J. C., Soyumer, T.,

جدول ۱ مقاله آنها، بازه زمانی داده‌های رصدی آنها ۱۹۱۹/۸۸ روز می‌باشد که در مقایسه با بازه زمانی داده‌های رصدی ۴۹۶۶/۶۲ روزه ما کوتاه محسوب می‌شود. علاوه بر آن تعداد مشاهدات آنها ۲۲ و تعداد مشاهدات ما ۲۰۰ است. همان‌گونه که در بخش ۲-۳ بیان شد، مستقل از اعمال دو شرط مهم در تکنیک به‌کارگرفته شده توسط GLS (که تکنیک LS برآورده نمی‌سازد)، اگر تعداد مشاهدات کم یا مدت‌زمان کمیت مورد اندازه‌گیری (دوره تناوب‌ها) طولانی‌تر از مدت‌زمان مشاهدات باشد، از اعتبار روش LS کاسته می‌شود (کامینگ و همکاران، ۱۹۹۹).

لذا کم‌بودن تعداد مشاهدات و همین‌طور کوتاه‌بودن بازه رصدی آنها، می‌تواند تأثیر به‌سزایی در نتیجه حاصل از محاسبه تناوب‌نگارشان داشته باشد و دوره تناوب ۱۳۰۰ روز نمی‌تواند مرجع مقایسه معتبری برای کار ما باشد. لازم به‌ذکر است که با مراجعه به نمودار ۵ مقاله سینکونگی و همکاران (۲۰۰۷b)، اعتبار قله‌های مربوط به تناوب‌نگار آنها در حدود ۵۰ الی ۸۰ درصد FAP می‌باشد؛ در حالی که اعتبار قله مربوط به تناوب‌نگار ما با اعتبار ۹۹ درصد است.

گابینز، (۲۰۱۰) با نورسنجی در ناحیه مرئی دوره تناوبی در حدود ۷/۶ سال را برای این ستاره به‌دست آورد. ساوانوف (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های نورسنجی ASAS و تکنیک طیف توان، چرخه فعالیتی در حدود ۸ سال را گزارش کرد. سوارز ماسکارنو (۲۰۱۶) با همین داده‌های ASAS چرخه‌ای در حدود ۶/۸ سال را به‌دست آوردند. علاوه بر

Vaughan, A. H. and Whitney, J. H., 1995, Chromospheric Variations in Main-Sequence Stars, ApJ, 438, 269.  
Benedict, G. F., 1980, UBV surface photometry of the center of N4314, AJ, 85:513-520.  
Benedict, G. Fritz., McArthur, Barbara., Nelan, E., Story, D., Whipple, A. L., Shelus, P. J., Jefferys, W. H., Hemenway, P. D., Franz, Otto G., Wasserman, L. H., Duncombe, R. L., Altena, Wm. Van. and Fredrick, L. W., 1998, Photometry of Proxima Centauri and Barnard's Star Using Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor 3: A Search for Periodic Variations, AJ, 116, 429.

- Benedict, G. F., 2007, Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor Parallaxes of Galactic Cepheid Variable Stars: Period-Luminosity Relations, *AJ*, 1810,1827.
- Bonfils, X., Mayor, M., Delfosse, X., Forveille, T., Gillon, M., Perrier, C., Udry, S., Bouchy, F., Lovis, C., Pepe, F., Queloz, D., Santos, N. C. and Bertaux, J. L., 2007, the HARPS search for southern extra-solar planets, *A&A*, 474:293-299.
- Burning, F. J. M., 1963, *Bull. Astr. Inst. Netherlands*, 17, 22.
- Boisse, I., Moutou, C., Vidal-Madjar, A., Bouchy, F., Pont, F., Hebrard, G., Bonfils, X., Croll, B., Delfosse, X., Desort, M., Forveille, T., Lagrange, A.-M., Loeillet, B., Lovis, C., Matthews, J. M., Mayor, M., Pepe, F., Perrier, C., Queloz, D., Rowe, J. F., Santos, N. C., Segransan, D. and Udry, S., 2009, Stellar activity of planetary host star HD 189 733, *A&A*, 495, 959.
- Byrne, P. B. and McKay, D., 1989, Activity in late-type stars, *A&A*, 223, 241-245.
- Cincunegui, C. and Mauas, P. J. D., 2004, Chromospheric activity in Proxima Centauri, 13th Cool Stars Workshop, Hanburg.
- Cincunegui, C. and Mauas, P. J. D., 2005, Chromospheric activity in Proxima Centauri, 13th Cambridge Workshop on cool star, stellar systems and the sun, Vol.560. P.479.
- Cincunegui C., Diaz R. F. and Mauas P. J. D., 2007a,  $H\alpha$  and the Ca II H and K lines as activity proxies for late-type stars, *A&A*, 469, 309.
- Cincunegui, C., Diaz, R.F. and Mauas, P. J. D., 2007b, A possible activity cycle in Proxima Centauri, *A&A*, 1107-1113.
- Cumming, A., Marcy, G. W. and Butler, R. P., 1999, The Lick Planet Search: Detectability and Mass Thresholds, *ApJ*, 526, 890.
- Doyle, J. G. 1987, An activity-rotation relationship in F-M dwarfs from MG II H and K flux, *MNRAS*, 224, 1P.
- Gilliland, R. L. and Baliunas, S. L., 1987, Objective characterization of stellar activity cycles. I - Methods and solar cycle analyses, *ApJ*, 314, 766.
- Guinan, E. and Morgan, N., 1996, Proxima Centauri :Rotation,chromospheric Activity ,and Flares. *AmericanAstronomical society*, 942.
- Guinan, E., 2010, An X-ray Study of The Red Dwarf Next Door: The Long-Term Activity of Proxima Cen, Chandra proposal ID 12200639.
- Haisch, B. M., Butler, C. J., Foing, B., Rodono, M. and Giampapa, M. S., 1990, Rotational modulation and flares on RS Canum Venaticorum and BY Draconis-type stars. XV. Observations of Proxima Centauri and solar calibration data, *A&A*, 232, 387-395.
- Irwin A. W., Campbell, B., Morbey C. L., Walker, G. A. H. and Yong S., 1989, Long-period radial-velocity variations of Arcturus, *PASP*, 101, 147.
- Lomb, N. R., 1976, Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, *Ap. Space Sci.*, 39, 447.
- Lovis, C., Dumusque, X., Santos, N. C., Bouchy, F., Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Segransan, D. and Udry, S., 2011, The HARPS search for southern extra-solar planets. XXXI. Magnetic activity cycles in solar-type stars: statistics and impact on precise radial velocities, *Arxiv e-prints* 1107.5325L.
- Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Bouchy, F., Rupprecht, G., Locurto, G., Avila, G., Benz, W., Bertaux, J.-L., Bonfils, X., Dall, TH., Dekker, H., Delabre, B., Eckert, W., Fleury, M., Gilliotte, A., Gojak, D., Guzman, J. C., Kohler, D., Lizon, J.-L., Longinotti, A., Lovis, C., Megevand, D., Pasquini, L., Reyes, J., Sivan, J.-P., Sosnowska, D., Soto, R., Udry, S., Van Kesteren, A., Weber, L. and Weilenmann, U., 2003, *The Messenger*, 114, 20
- Petterson, J.A., (1980), Accretion disks in cataclysmic variables.I.The Eclipse-Related phase shifts in DQ Herculis and UX ursae Majoris, *ApJ*, ), 241:247-256.
- Pizzolato, N., Maggio, A., Micela, G., Sciortino, S. and Ventura, P., 2003, The stellar activity-rotation relationship revisited :Dependence of saturated and non-saturated X-ray emission regimes on stellar mass for late-type dwarfs, *A&A*, 397:147-157.
- Paczynski, B., 2002, Massive Variability Search and Monitoring by OGLE and ASAS (All-Sky Automated Survey), *astro.ph.12144P*
- Reale, G., Micela, G., Peres, G., Betta, R. and Serio, S., 1997, Stellar flaring loops, *MmSAF*, 68, 1103R.
- Reiner, A. and Basri, G., 2008, The moderate magnetic field of the flare star Proxima Centauri, *ApJ*, in press, [arxiv:0805.1059]
- Scargle, J. D., 1982, Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *ApJ*, 263, 835-853.
- Ségransan, D., Kervella, P., Forveille, T. and Queloz, D., 2003, First radius measurements of very low mass stars with the VLTI, *A&A*, 397 (3): L5-L8.
- Savano, I. S., 2012, Activity Cycles of M Dwrs, *Astronomicheskii Zhurnal*, 793-799.
- Suaraz Mascareno, A. R., 2016, Rotation periods of late-type dwarf stars from time series highresolution. *MNRAS*, 2745-2756.
- Sturrock, P. A. and Scargle, J. D., 2010, False-

alarm Probability in Relation to Oversampled Power Spectra, with Application to Super-Kamiokande Solar Neutrino Data, *ApJ*, 718, 527.

Zechmeister, M. and Kurster M., 2009, The generalised Lomb-Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms, 496, 577.



## پیوست

شاخص  $H_{\alpha}$  حاصل از داده‌های طیفی ستاره Prox Cen

Star name:	Prox Cen						
HJD(days)	$H_{\alpha} - Index$	HJD(days)	$H_{\alpha} - Index$	HJD(days)	$H_{\alpha} - Index$	HJD(days)	$H_{\alpha} - Index$
53060.35937	8.4388	53812.27491	5.3865	54883.35572	4.9479	54992.14112	5.4596
53152.09045	4.8588	53835.25258	8.7055	54904.26643	8.6954	55053.05029	4.7196
53153.14257	8.237	54233.18635	8.435	54906.31386	8.7034	55275.26358	4.3659
53203.02946	3.2498	54296.08606	4.5685	54909.3173	8.6913	55283.271	4.8457
53207.0005	5.1662	54299.09034	4.921	54910.31634	8.6861	55284.27422	8.6918
53492.20069	8.4422	54658.05627	4.6319	54912.32798	8.7009	55288.2918	8.6941
53810.27638	5.5371	54879.32506	5.1168	54989.14257	4.1563	55291.34046	8.683
55292.29472	4.2754	56371.29822	5.3684	56417.24252	4.8713	56420.06174	5.3157
55301.30863	8.6747	56373.22979	5.0454	56417.26446	5.1332	56420.09253	4.6981
55304.2679	8.5828	56388.35451	8.4442	56417.29611	4.9488	56420.09869	4.8402
55305.23664	8.7052	56390.18312	8.4305	56417.34731	5.1463	56420.14874	5.0759
55349.08192	8.6757	56390.36298	8.4348	56417.36987	4.887	56423.98019	5.17
55352.94259	8.6935	56391.25299	8.428	56417.39181	5.1001	56423.98802	5.1807
55387.05848	8.656	56391.38984	8.419	56417.39912	4.9742	56424.1442	5.1585
55403.9985	8.6886	56394.21356	8.4404	56417.99799	5.2116	56425.9903	4.7803
55434.99627	8.7056	56394.38254	8.4251	56418.01147	5.242	56426.03473	3.9678
55436.99043	8.6955	56396.3294	8.4288	56418.01764	5.2396	56426.07949	4.4325
55614.37112	8.4218	56397.12434	8.4271	56418.0238	5.3249	56426.10117	4.7453
55625.33506	8.428	56400.13184	8.4374	56418.02995	5.3042	56426.23239	4.5628
55630.31545	8.4254	56400.31231	8.4415	56418.05458	5.2733	56426.97445	5.0831
55631.32823	8.6973	56401.10312	8.4487	56418.07981	5.2274	56656.31314	4.9372
55635.34703	8.667	56402.1186	8.4322	56418.09212	5.3178	56661.30191	4.9768
55641.24405	4.5037	56402.34575	8.4254	56418.09829	5.245	56661.34675	4.8983
55644.28359	4.4739	56403.1001	8.4309	56418.11676	5.2073	56663.35185	4.5771
55647.22234	0.6752	56404.09871	8.4305	56418.1358	5.321	56663.36621	4.4144
55648.31078	4.8092	56405.34429	8.435	56418.15427	5.3413	56667.27597	4.8723
55648.35153	8.6978	56407.23318	8.4312	56418.16043	5.3221	56721.31863	8.6411
55656.14344	5.6375	56408.27288	8.4272	56418.17275	5.1822	56725.36573	8.6577
55675.19927	8.4287	56409.08474	8.1221	56418.18608	5.1173	56732.32263	8.6173
56010.23824	8.4269	56409.27997	8.4176	56418.20455	4.9204	56737.27798	8.6779
56052.25177	8.4315	56410.0815	8.4139	56418.24839	4.6057	56738.1812	8.6739
56057.28815	8.4216	56417.00411	4.9978	56418.2607	4.6551	56744.20253	8.6764
56079.10874	8.424	56417.03337	5.1448	56418.27302	4.8587	56745.34187	8.6622
56085.16946	8.4279	56417.04068	5.1229	56418.29149	4.8277	57056.35832	8.7094
56320.36307	3.6178	56417.05531	5.1386	56418.3038	4.8601	57057.36473	8.6878
56322.32409	5.0201	56417.07851	5.221	56418.31004	4.8672	57058.36547	8.5948
56354.31446	4.4299	56417.08582	4.9258	56418.32236	4.8459	57064.34508	8.6769
56356.29862	4.6295	56417.09314	4.8747	56418.33468	4.9559	57464.37903	4.5036
56361.33221	4.8391	56417.1224	5.0063	56418.34083	4.9168	57905.01764	4.0298
56363.2712	4.8743	56417.12971	4.7752	56418.3593	4.7224	57937.13238	4.8411
56365.31124	4.3897	56417.16197	3.5121	56418.37295	4.828	57944.03591	4.2465
56367.26578	5.1973	56417.16928	3.6397	56419.16075	4.8539	57945.08227	3.9551
56369.24737	5.0918	56417.18391	3.6479	56419.16691	4.8466	57946.03132	4.3114
56370.22035	8.674	56417.19123	3.6494	56420.04824	5.1765	57948.14516	4.5623
56370.37882	8.6245	56417.23521	4.7583	56420.05439	5.251	57949.16118	4.8017
57960.97639	5.2488	57987.01771	4.4686	58020.95768	5.6934	57960.97639	5.2488
57961.96261	5.18	57996.96301	3.5377	58021.95821	5	57961.96261	5.18
57963.96397	5.1763	57997.9757	5.0405	58022.96036	5.5722	57963.96397	5.1763
57971.95732	4.4025	57998.96893	5.476	58024.96789	4.9689	57971.95732	4.4025
57972.95737	4.4309	57999.97189	4.7844	58025.97398	5.0309		
57986.00849	2.4676	58007.02281	4.9473	58026.97498	5.6958		

## Calculating magnetic activity cycle of M-type dwarf stars using GLS technique and index- $H_{\alpha}$ ; Proxima Centauri

Azizi, F.<sup>1\*</sup> and Foroughi, R.<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

2. M.Sc. Graduated, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

(Received: 13 Feb 2021, Accepted: 25 May 2021)

### Summary

The study of the existence of life or habitable zone somewhere in the universe, beyond the Earth, has been one of the important research areas in the field of astronomy and astrophysics in the last few decades. Countless studies have been done and are being done theoretically and experimentally.

Proxima Centauri ( $\alpha$  Cen C = Gliese551) with visual magnitude of 11.01 and at a distance of 1.3 pc is the closest star to Earth after the Sun and is especially important for our knowledge of very cool stars. This M5.5V spectral type star is the faintest member of the Alpha Centauri ternary star system, located about 1400 astronomical units closer to Earth than the other members. The physical characteristics of this star, including radius ( $1.7R_{\odot}$ ), mass ( $0.2M_{\odot}$ ), rotational periodicity ( $1.5 \pm 35$ ) and its age, which is about 4.85 billion years old, are well determined. Despite its old age, Proxima Centauri is an active star, and like the sun it has activity cycle (the activity cycle of the sun is about 11 years).

Generally, M-type stars are hard to study due to their optical faintness. But Studying Proxima Centauri can improve our knowledge of very cool stars as its proximity lets us to observe it with great accuracy. Moreover, its similarity to the sun and the possibility of having a system of planets around it and consequently the study of life on these planets is of particular importance.

This paper aims to determine the activity cycle of Proxima Centauri star using spectral line  $H_{\alpha}$  and to evaluate the generalized Lamb-Scargel periodogram technique (GLS) to determine the period of active dwarf stars, including Proxima Centauri.

The GLS is an extension to the Lomb-Scargle periodogram which takes into account the measurement of errors and also is more suitable for time series with non-zero average. GLS tries to fit the sinusoidal equation to the time series and find the power spectrum for frequencies. We consider a given periodogram peak, derived from GLS, significant when it exceeds the one present "false alarm probability" level (FAP), which means there is 99% confidence that it is real and could not be simulated by Gaussian noise. FAP levels are calculated by performing random permutations of the data with similar times of observations.

For this purpose, we used HARPS spectroscopic data over a period from 2004 to 2017. HARPS, the High Accuracy Radial velocity Planet Searcher at the European Southern Observatory La Silla 3.6m Cassegrain telescope is dedicated to the discovery of extrasolar planets. It is a fibre-fed high resolution echelle spectrograph. This instrument is used to accurately measure radial velocities of the order of 1 m/s in extrasolar planet research. The spectral area is 378-691 nm and its resolution 115,000. Therefore, from this point of view, we can say that our analysis is more accurate than others.

The magnetic activity period of Proxima Centauri is obtained as 2349 days, which is in good agreement with the results obtained from other methods. Therefore, our results confirm the efficiency and superiority of the generalized Lamb-Scargel periodogram technique in determining the period of active cool dwarf stars.

**Keywords:** Cool dwarfs, Active star, Period, Periodogram technique, Proxima Centauri.

\* Corresponding author:

f.azizi@pnu.ac.ir