

محاسبه مقدار غبار ایجادشده توسط ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان NGC 6822

حمیدرضا ماهانی^۱، عاطفه جوادی^{۱*}، هدیه عبدالهی^۲، و فاطمه خاتم‌ساز^۱

۱. پژوهشکده نجوم، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران

۲. رصدخانه کنکولی، مرکز ستاره‌شناسی و علوم زمین، بوداپست

پست الکترونیکی: atefeh@ipm.ir و mahani@ipm.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸)

چکیده:

از دست دادن جرم توسط ستاره‌های تحول‌یافته، به‌ویژه ستاره‌های متغیر بلنددوره، نقش کلیدی در غنی‌سازی محیط میان‌ستاره‌ای و تحول کهکشانی ایفا می‌کند. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های فروسرخ تلسکوپ‌های زمینی در بازه طول‌موجی ۱٫۲ تا ۲٫۲ میکرومتر و داده‌های تلسکوپ فضایی اسپیتزر در طول‌موج‌های ۳٫۶ و ۴٫۵ میکرومتر، میزان کاهش جرم ناشی از ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان کوتوله نامنظم NGC 6822 بررسی شده است. برای این منظور، با به‌دست‌آوردن طیف توزیع انرژی این ستاره‌ها و تحلیل ویژگی‌های تابشی آن‌ها، نرخ کلی از دست دادن جرم ستاره‌های کربنی و اکسیژنی تعیین گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار کل کاهش جرم ایجاد شده توسط مجموع ستاره‌های متغیر بلنددوره 2.7×10^{-5} برابر جرم خورشید در هر سال است که از این مقدار، سهم تولید غبار تقریباً 3.7×10^{-9} جرم خورشید در سال و مابقی مربوط به گاز خروجی می‌باشد. همچنین، سهم ستاره‌های اکسیژنی و کربنی از کل کاهش جرم ستاره‌های متغیر بلنددوره، به‌ترتیب ۲۲ و ۷۸ درصد به‌دست آمد، که با توجه به فراوانی فلزی کم این کهکشان، نقش غالب ستاره‌های کربنی در افزایش غبار محیط میان‌ستاره‌ای قابل انتظار است. با در نظر گرفتن نرخ تخمینی ستاره‌زایی کنونی در ناحیه میله‌ای شکل کهکشان NGC 6822، که 1.7×10^{-2} جرم خورشید در سال گزارش شده است، نتایج این بررسی نشان می‌دهد که جرم بازگشتی از سوی ستاره‌های متغیر بلنددوره برای تأمین ماده میان‌ستاره‌ای مورد نیاز جهت ادامه فرایند ستاره‌زایی در این کهکشان، کافی نیست.

واژه‌های کلیدی: ستاره‌های تحول‌یافته، غبار، گروه محلی، کهکشان کوتوله، کهکشان نامنظم، طیف انرژی

دینامیک و تحول کهکشان‌ها اهمیت بسزایی دارد [۲،۳].

۱. مقدمه

ستاره‌های متغیر بلنددوره^۲ دسته‌ای از ستاره‌های تحول‌یافته هستند که در مراحل پایانی تحول خود قرار دارند. این ستاره‌ها به‌دلیل ناپایداری‌های دینامیکی و تپش‌های حرارتی، تغییرات قابل‌توجهی در درخشندگی خود را در مقیاس زمانی بیش از صد روز تجربه می‌کنند [۴]. متغیرهای بلنددوره نقش کلیدی در تولید و تحول غبار در کهکشان‌ها ایفا می‌نمایند، زیرا در این مرحله، بادهای ستاره‌ای شدید موجب افزودن مقدار زیادی ماده از لایه‌های بیرونی آن‌ها به محیط میان‌ستاره‌ای می‌شود. این فرآیند، که با تشکیل غبارهای سیلیکاتی و کربنی همراه است،

تحول دینامیکی و غنی‌سازی شیمیایی کهکشان‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر کاهش جرم و تولید غبار توسط ستاره‌های تحول‌یافته قرار دارد [۱]. این ستاره‌ها، که اغلب در شاخه مجانبی غول‌ها^۱ قرار دارند، به‌دلیل از دست دادن مقدار قابل‌توجهی از ماده در مراحل پایانی تحول خود، از مهم‌ترین تأمین‌کنندگان محیط میان‌ستاره‌ای محسوب می‌شوند. بررسی سازوکارهای مؤثر در تولید غبار و درک چگونگی وابستگی این فرآیندها به ویژگی‌های ستاره‌ای و محیطی، برای مطالعه

۱. Asymptotic giant branch (AGB)

۲. Long period variables (LPV)

در ادامه، ما به بررسی کمی نرخ کاهش جرم ناشی از ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان $NGC\ 6822$ و تعیین نرخ کلی تولید غبار در این سامانه خواهیم پرداخت. برای این منظور، با بهره‌گیری از روش پیشنهاد شده توسط جوادی و همکاران [۲]، و با استفاده از داده‌های فروسرخ نزدیک و میانی، طیف توزیع انرژی^۱ ستاره‌های متغیر را محاسبه نموده و میزان کاهش جرم را برای جمعیت‌های غنی از کربن و اکسیژن به‌طور جداگانه بررسی می‌کنیم. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر سهم ستاره‌های متغیر بلنددوره در غنی‌سازی محیط میان‌ستاره‌ای و تأثیر آن‌ها بر تحول کهکشان‌های کوتوله نامنظم کمک کند.

۲. داده‌ها و مدل

برای انجام این مطالعه، داده‌های منتشرشده در پژوهش وایتلاک و همکاران [۹] مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها شامل رصدهای فروسرخ نزدیک از ستاره‌های متغیر در کهکشان $NGC\ 6822$ هستند که با استفاده از تلسکوپ $1/4$ متری رصدخانه‌ی آفریقای جنوبی گردآوری شده‌اند. در این رصدها، از دوربین تصویربرداری فروسرخ استفاده شده است که توانایی ثبت داده‌ها در سه باند J, H, K را داراست (جدول ۱). این مجموعه داده در طی یک دوره سه‌ساله جمع‌آوری شده و شامل منحنی‌های نوری ستاره‌های متغیر بلنددوره می‌باشد. این منحنی‌های نوری امکان بررسی تغییرات درخشندگی ستاره‌ها و محاسبه دوره نوری آن‌ها را فراهم کرده است. در این پژوهش، تنها از ستاره‌هایی با دوره نوری بیش از ۱۰۰ روز استفاده شده است تا فرآیند کاهش جرم و تولید غبار بلند دوره‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

به‌منظور بهبود دقت تحلیل، داده‌های این پژوهش با فهرست رصدی هیرشائر و همکاران [۱۰] مطابقت داده شده‌اند. این فهرست رصدی شامل داده‌های فروسرخ نزدیک و میانی است که از رصدهای تلسکوپ فروسرخ^۲ مستقر در جزایر هاوایی و تلسکوپ فضایی اسپیتزر گردآوری شده‌اند. تلسکوپ‌های فروسرخ یکی از مهم‌ترین ابزارهای بررسی ستاره‌های تحول‌یافته و سحابی‌های غباری در طول‌موج‌های فروسرخ نزدیک محسوب می‌شوند.

تأثیر عمیقی بر چرخه ماده در کهکشان‌ها داشته و به غنی‌سازی محیط میان‌ستاره‌ای با عناصر سنگین کمک می‌کند [۲]. علاوه بر این، غبار تولیدشده توسط این ستاره‌ها در شکل‌گیری نسل‌های بعدی ستاره‌ها و تحول کهکشانی نقش مهمی ایفا می‌نماید. در این مطالعه، هدف ما بررسی کمی کاهش جرم ناشی از ستاره‌های متغیر بلنددوره از طریق تحلیل طیف این ستاره‌ها در کهکشان کوتوله نامنظم $NGC\ 6822$ است.

کهکشان‌های کوتوله نامنظم محیط‌های منحصربه‌فردی برای مطالعه چرخه غبار میان‌ستاره‌ای فراهم می‌کنند. این کهکشان‌ها در نجوم رصدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، زیرا در تفسیر نتایج بررسی‌های اعماق کیهان و همچنین در درک تحول ستاره‌ها و ذرات محیط میان‌ستاره‌ای، اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهند [۵].

کهکشان $NGC\ 6822$ ، که با نام «کهکشان بازارد» نیز شناخته می‌شود، عضوی ایزوله از گروه محلی است که در صورت فلکی قوس و در مختصات بُعد $296/24$ درجه و میل $14/80$ درجه واقع شده است. تفاوت چشمگیر بین جرم ستاره‌ای و جرم کل کهکشان، نشان می‌دهد که $NGC\ 6822$ یک کهکشان تحت سیطره ماده‌ی تاریک است [۶]. این کهکشان دارای یک مرکز نوری درخشان میله‌ای شکل بوده که تقریباً در راستای شمال-جنوب قرار گرفته و میزبان محیط‌های فعال ستاره‌زایی می‌باشد [۷].

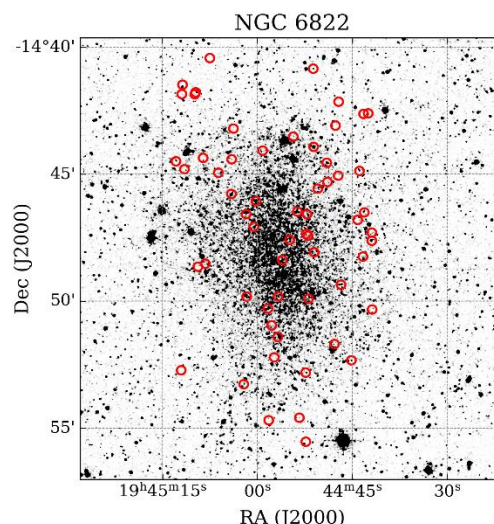
یکی از ویژگی‌های برجسته $NGC\ 6822$ ، وجود جمعیتی از ستاره‌های متغیر بلنددوره است که در مراحل پایانی تحول ستاره‌ای قرار دارند. این کهکشان، میزبان هر دو نوع ستاره‌های کربنی و ستاره‌های غنی از اکسیژن است، که از نظر ترکیبات شیمیایی و پارامترهای موثر بر کاهش جرم با یکدیگر تفاوت دارند. در ستاره‌های کربنی، بیشتر ذرات غبار از مولکول‌های غنی از کربن مانند گرافیت تشکیل شده، در حالی که در ستاره‌های اکسیژنی، غبارها بیشتر از ترکیبات سیلیکاتی و آلومینیوم اکسید تشکیل می‌شوند. این تفاوت در ترکیب شیمیایی، بر ویژگی‌های تابشی این ستارگان در طول‌موج‌های فروسرخ و در نهایت بر میزان و نرخ تولید غبار آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۸].

۱. Spectral energy distribution (SED)

۲. United Kingdom infrared telescope (UKIRT)

جدول ۱. مشخصات فیلترهای استفاده شده.

فیلتر	طول موج میانی (آنگستروم)	پهنای باند عبوری (آنگستروم)
J	۱۲۵۴۶٫۹۸	۱۴۷۲٫۸۴
H	۱۶۳۵۴٫۳۴	۲۷۷۲٫۳۴
Ks	۲۲۰۵۸٫۳۵	۳۱۷۸٫۸۳
[۳/۶]	۳۵۳۷۸٫۴۱	۶۸۳۶٫۱۸
[۴/۵]	۴۴۷۸۰٫۴۹	۸۶۴۹٫۹۲



شکل ۱. توزیع ستاره‌های متغیر بلند دوره این پژوهش در کهکشان NGC ۶۸۲۲. در این شکل دایره‌های قرمز رنگ، مکان متغیرهای بلند دوره مورد مطالعه را نمایش می‌دهند.

داده‌های پیمایش زمینی این مطالعه در باندهای J, H, K ثبت شده‌اند که برای بررسی ستاره‌های شاخه غول‌های مجانبی و فرآیندهای کاهش جرم آن‌ها در کهکشان NGC ۶۸۲۲ حائز اهمیت هستند. علاوه بر داده‌های فروسرخ نزدیک، فهرست هیرشائر شامل اطلاعات به‌دست‌آمده از تلسکوپ فضایی اسپیتزر در باندهای ۳/۶ و ۴/۵ میکرومتر می‌باشد. شکل ۱ توزیع ستاره‌های متغیر بلند دوره به‌دست‌آمده از دو پیمایش یادشده را در کهکشان هدف این مطالعه نمایش می‌دهد. فراوانی ستاره‌های متغیر بلند دوره، ۵۸ ستاره است که از تعداد، ۴۸ ستاره دارای جو کربنی و ۱۰ ستاره دارای جو اکسیژنی هستند.

شکل ۲ توزیع ستاره‌های مورد نظر این پژوهش را در نمودار قدر-رنگ ناحیه طیفی فروسرخ نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، متغیرهای بلنددوره در

محدوده فروسرخ نزدیک به‌دلیل دمای مؤثر پایین خود، درخشندگی قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهند، زیرا طیف توزیع انرژی آن‌ها در طول موج‌های فروسرخ نزدیک به بیشینه می‌رسد. شاخص رنگ $J - K$ ، معیاری برای دمای مؤثر و حضور غبار پیراستاره‌ای^۱ است. مقادیر قرمزتر این شاخص معمولاً به ستارگان سردتر یا ستارگانی با خاموشی قابل‌ملاحظه ناشی از غبار، اشاره دارند. این متغیرهای بلنددوره در نمودارهای قدر-رنگ، به دلیل درخشندگی بالا و از دست دادن جرم ناشی از تپش‌های ستاره‌ای، اغلب در نواحی درخشان‌تر و قرمزتر، بالای بیشینه شاخه غول‌های قرمز قرار می‌گیرند.

مسیرهای همسن^۲ که از مدل‌های تحول ستاره‌ای مانند PARSEC استخراج شده‌اند و بر روی نمودار قدر-رنگ ترسیم می‌شوند، به تخمین سن و فراوانی فلزی (فراوانی عناصر سنگین‌تر از هلیوم) جمعیت‌های متغیرهای بلنددوره کمک می‌کنند [۱۱]. با مقایسه موقعیت‌های مشاهده‌شده این متغیرها با مسیرهای همسن نظری، می‌توان سن جمعیت ستاره‌ای را محاسبه کرد. جمعیت‌های جوان‌تر (با سن تقریبی ۱ تا ۲ میلیارد سال) دارای ستارگان تحول‌یافته پرجرم‌تر و درخشان‌تر با رنگ‌های متمایز هستند، در حالی که جمعیت‌های پیرتر (بیش از ۵ میلیارد سال) ستارگان تحول‌یافته کم‌نورتر را نشان می‌دهند. انحراف از مسیرهای همسن، مانند رنگ‌های آبی‌تر یا قرمزتر، ممکن است به تغییرات در فراوانی فلزی یا اثرات غبار پیراستاره‌ای اشاره داشته باشد، که اطلاعات بیشتری درباره ویژگی‌های تحولی و محیطی این جمعیت‌های ستاره‌ای فراهم می‌کند.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های تابشی و غباری ستاره‌های متغیر بلنددوره، از کد عددی DUSTY استفاده گردید [۱۲]. این کد یکی از پرکاربردترین ابزارهای عددی برای محاسبه انتقال تابش در محیط‌های غبارآلود محسوب می‌شود. DUSTY قادر است معادلات مربوط به گرمایش و سرد شدن غبار، پراکندگی و جذب تابش در یک پوسته کروی را تحلیل کرده و طیف تابشی خروجی را محاسبه کند.

۱. Circumstellar

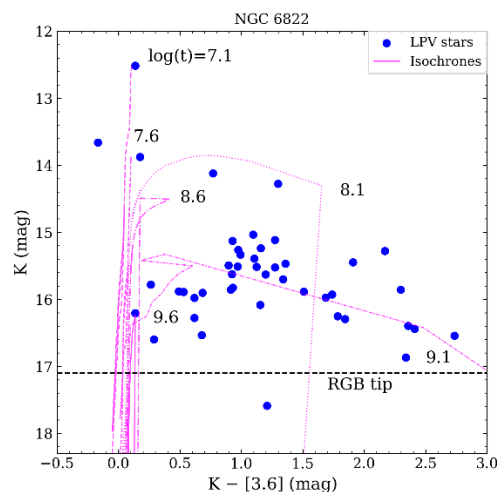
۲. Isochrone

در شکل ۳، طیف بازسازی شده برای چهار ستاره نمونه، نمایش داده شده است. در این نمودارها، شار به دست آمده از رصد به همراه طیف منتج شده از *DUSTY* نشان داده شده‌اند. همان گونه که دیده می‌شود، تطابق طیف‌ها بسته به نوع شیمیایی ستاره (کربنی یا اکسیژنی) متفاوت است. برای تبیین ریشه‌های این تفاوت، در ادامه به بررسی فرآیند شکل‌گیری ستاره‌های کربنی و اکسیژنی پرداخته می‌شود.

تشکیل ستاره‌های غنی از کربن در شاخه مجانبی غول‌ها به شدت به جرم اولیه و فراوانی فلزی ستاره وابسته است. در فراوانی فلزی خورشید محدوده جرمی ستارگانی که به ستاره-های کربنی تبدیل می‌شوند، تقریباً بین ۲ تا ۴/۵ برابر جرم خورشید می‌باشد [۱۵]. در ستاره‌های کم جرم، اگرچه فرآیند آمیختن شدید است، اما لایه همرفتی بیرونی آن قدر عمیق نیست که بتواند کربن را از هسته به سطح برساند. در نتیجه، جو این ستاره‌ها غنی از کربن نمی‌شود. در مقابل، در ستاره‌های پر جرم‌تر از ۴/۵ برابر جرم خورشید، کربن تولید شده در هسته، پیش از آنکه از طریق مخلوط شدن به سطح منتقل شود، در همجوشی‌های بعدی شرکت کرده و به عناصر سنگین‌تر تبدیل می‌شود [۱۶].

در بازه میانی جرم، یعنی برای ستاره‌های با جرم اولیه بین ۲ تا ۴/۵ برابر جرم خورشید، مسیرهای تحولی متفاوتی طی می‌شود که به تفاوت در ترکیب شیمیایی سطحی آن‌ها منجر می‌گردد [۱۵]. در همه این ستاره‌ها، کربن در فاز سوزاندن هلیوم از طریق فرآیند سه گانه آلفا تولید می‌شود [۱۷]. با این حال، انتقال این کربن به سطح ستاره تحت تأثیر جرم ستاره و فرآیندهای آمیختن داخلی آن قرار دارد. این دسته از ستاره‌ها قادر هستند که مقدار کافی از کربن را از طریق فرآیند سومین صعود همرفتی^۳ به سطح خود منتقل کنند. این فرآیند موجب افزایش نسبت کربن به اکسیژن در جو ستاره شده و در نهایت به شکل‌گیری ستاره‌های کربنی منجر می‌شود.

با کاهش فراوانی فلزی، این محدوده جرمی به مقادیر کمتری انتقال می‌یابد.



شکل ۲. نمودار قدر-رنگ ستاره‌های متغیر بلنددوره. خطوط منحنی، مسیرهای همسن تحولی را با فراوانی فلزی ۰/۰۰۳ و ماژول فاصله^۱ ۲۳/۴۵ mag نمایش می‌دهند. خط چین افقی بیشینه درخشندگی ستاره‌های غول سرخ را نشان می‌دهد [۱۱].

چنین محاسباتی به‌ویژه در مطالعه ستاره‌های شاخه مجانبی غول‌ها اهمیت فراوانی دارد، چراکه این ستاره‌ها در مراحل پایانی تحول خود، مقادیر قابل توجهی جرم را از طریق بادهای ستاره‌ای از دست داده و پوسته‌های غباری گسترده‌ای پیرامون خود ایجاد می‌کنند.

پارامترهای ورودی کد شامل دمای مؤثر ستاره، ترکیب شیمیایی و اندازه ذرات غبار، چگالی و دمای پوسته غباری هستند که همگی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری طیف خروجی دارند [۱۴، ۱۳]. در این پژوهش، مقادیر مشاهده شده در باندهای مختلف فروسرخ نزدیک و میانی، که از مطالعات پیشین گردآوری شده‌اند [۱۰، ۹]، برای تعیین سازگارترین طیف‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای هر ستاره، مجموعه‌ای از طیف‌های متفاوت با تغییر پارامترهای یادشده به دست آمد و بهترین انطباق میان داده‌های رصدی و محاسبات عددی، با بهره‌گیری از آزمون مربع کای^۲، انتخاب گردید. این روش امکان برآورد پارامترهای فیزیکی مرتبط با فرآیند کاهش جرم و ویژگی‌های غبار پیرامونی ستاره‌های متغیر را فراهم می‌سازد. مقادیر استفاده برای عمق نوری هر ستاره در جدول ۲ مشخص شده است.

۱. Distance modulus

۲. Chi square test

۳. Third dredge-up

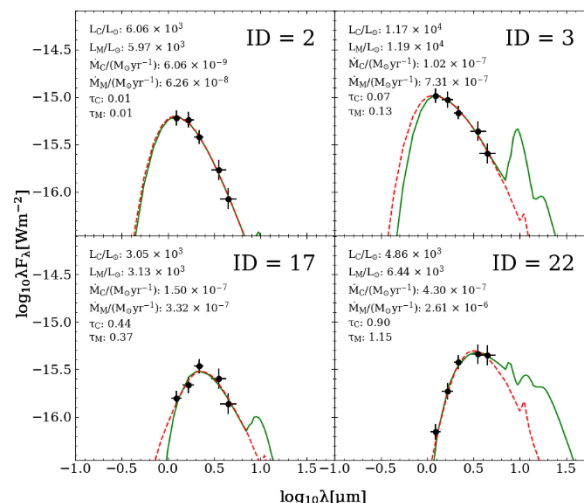
این کمیت‌ها درک دقیق‌تری از فرآیند کاهش جرم و تولید غبار در ستاره‌های تحول‌یافته و نقش آن‌ها در تغییر فراوانی فلزی کهکشان‌ها ارائه می‌دهد. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده برای دو پارامتر کلیدی یعنی درخشندگی ستاره‌ها و عمق نوری آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱.۳ درخشندگی

یکی از چالش‌های اساسی در بررسی ارتباط بین نرخ کاهش جرم و درخشندگی، دشواری یافتن یک وابستگی مستقیم میان این دو پارامتر از طریق روش‌های رصدی است. این چالش ناشی از تغییرات هم‌زمان سایر کمیت‌ها از جمله جرم، دمای مؤثر، و ویژگی‌های نوسانی است که همگی در طول تحول روی شاخهٔ مجانبی غول‌ها دچار تغییر می‌شوند. با وجود همبستگی کلی میان درخشندگی و نرخ کاهش جرم، داده‌های مشاهده‌ای پراکندگی قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که حاکی از پیچیدگی‌های موجود در این رابطه است.

یکی از علل اصلی این پراکندگی، مراحل تحول ستاره‌ای و مسیرهای متفاوت تحول ستارگان است. ستاره‌ها در مراحل گوناگون تحول، مانند شاخهٔ غول‌های سرخ یا شاخهٔ مجانبی غول‌ها، حتی با درخشندگی یکسان، الگوهای متفاوتی در از دست دادن جرم از خود نشان می‌دهند [۲].

به‌عنوان مثال، در شکل ۱۰ از نتایج منتشرشدهٔ حاصل از پژوهش جوادی و همکاران [۲]، ملاحظه می‌شود که ستاره‌های کربنی با یک درخشندگی مشخص و کمتر از 10^4 برابر درخشندگی خورشید، هنوز به بیشینهٔ تحول خود نرسیده‌اند. این در حالی است که در همین درخشندگی، ستاره‌های اکسیژنی با جرم کمتر از ۱/۱ برابر جرم خورشید، کاهش جرم بیشتری را تجربه کرده‌اند. این تفاوت به این دلیل است که ستاره‌های اکسیژنی در این بازهٔ جرمی، در پایان فاز تحولی شاخهٔ مجانبی غول‌ها قرار دارند و ستاره‌های کربنی در این بازه، به‌دلیل تفاوت در مسیر تحول‌شان، به ستاره‌های اکسیژنی تبدیل نخواهند شد. بنابراین انتظار می‌رود ستاره‌های کربنی، فرایند تحول خود را در مقادیر بیشتری از درخشندگی و نرخ کاهش جرم ادامه دهند تا به پایان مرحله‌ی تحول برسند.



شکل ۳. نتایج کد *DUSTY* برای چهار ستارهٔ نمونه در کهکشان ۶۸۲۲ *NGC*. خط سبز نشان‌دهندهٔ ستاره‌های اکسیژنی و خط چین قرمز بیانگر ستاره‌های کربنی می‌باشد. نشانگرهای سیاه‌رنگ شار انرژی به‌دست‌آمده از فهرست‌های رصدی را به همراه خطای موجود در این فهرست‌ها نمایش می‌دهد. نتایج کامل همه ستاره‌های متغیر بلنددوره در جدول شماره ۱ قابل مشاهده است.

دلیل این امر آن است که ستارگان کم‌فلز دارای میزان اولیهٔ اکسیژن کمتری هستند. از آنجایی که یک ستاره زمانی به‌عنوان ستارهٔ کربنی طبقه‌بندی می‌شود که نسبت کربن به اکسیژن در جو آن از ۱ فراتر رود، میزان اولیهٔ کمتر اکسیژن باعث می‌شود که حتی مقدار کمی از کربن منتقل‌شده به سطح، منجر به تبدیل ستاره به یک ستارهٔ کربنی شود. در نتیجه، احتمال شکل‌گیری ستارگان کربنی در محیط‌های کم‌فلز بیشتر است [۱۸].

در کهکشان ۶۸۲۲ *NGC* با فراوانی فلزی $Z = 0.003$ ، تخمین زده می‌شود که ستاره‌هایی با جرم اولیهٔ بین ۱/۱ تا ۴ برابر جرم خورشید، در مراحل پایانی تحول خود به ستاره‌های کربنی تبدیل شوند، در حالی که ستاره‌های خارج از این بازه، یعنی با جرم‌های کمتر یا بیشتر، به‌صورت ستارگان اکسیژنی باقی خواهند ماند [۹].

۳. نتایج

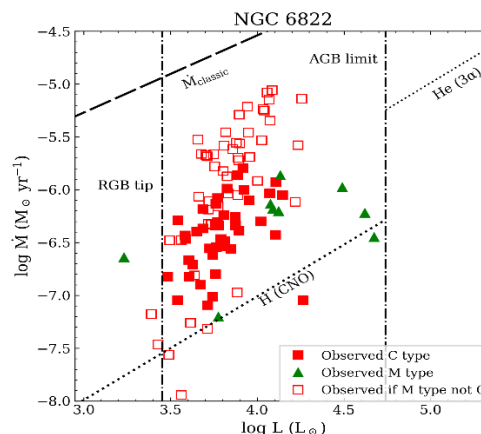
در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل داده‌های ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان ۶۸۲۲ *NGC* ارائه می‌شود. محاسبات انجام‌شده بر اساس داده‌های مشاهده‌ای در باندهای فروسرخ نزدیک و میانی، امکان تعیین درخشندگی و عمق نوری پوسته‌های غباری را برای این ستاره‌ها فراهم کرده است. بررسی

نسبت به ستاره‌های کربنی دارند، نرخ از دست دادن جرم آن‌ها مشابه با ستاره‌های کربنی است. طبق تحقیقات ون لوون و همکاران [۲۰]، نرخ از دست دادن جرم، بیشتر از درخشندگی ستاره‌های تحول‌یافته، به دمای مؤثر آن‌ها وابسته است. بنابراین، اگرچه انتظار می‌رود غول‌های قرمز به دلیل درخشندگی بیشتر خود، جرم بیشتری از دست دهند، اما این ستاره‌ها به اندازه ستاره‌های کربنی سرد نمی‌شوند. در نتیجه و بدون توجه به درخشندگی بالاترشان، نرخ از دست دادن جرم آن‌ها مشابه با ستاره‌های کربنی باقی می‌ماند.

در کهکشان NGC ۶۸۲۲ میزان کاهش جرم ستاره‌های اکسیژنی در بازه $۲/۶ \times 10^{-8}$ تا $۴/۱ \times 10^{-6}$ جرم خورشید بر سال و نرخ کاهش جرم ستاره‌های کربنی در بازه $۳/۲ \times 10^{-9}$ تا $۶/۱ \times 10^{-۱۰}$ جرم خورشید بر سال به دست آمد. مجموع نرخ از دست دادن جرم ستاره‌های کربنی معادل $۲/۱ \times 10^{-5}$ جرم خورشید بر سال و برای ستاره‌های اکسیژنی $۶/۶ \times 10^{-6}$ جرم خورشید بر سال گردید.

۲.۳ عمق نوری

درخشندگی یک ستاره یکی از ویژگی‌های بنیادی آن است که اطلاعات ارزشمندی درباره جرم، شعاع و وضعیت تحولی آن ارائه می‌دهد. با این حال، در مورد ستاره‌های شاخهٔ مجانبی غول‌ها، وجود یک پوشش چگال پیراستاره‌ای پیچیدگی قابل توجهی ایجاد می‌کند. به گونه‌ای که عمق نوری این پوشش می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای قدر مشاهده‌شدهٔ ستاره را، به خصوص در طول موج‌های کوتاه‌تر تغییر دهد. درون این پوشش پیراستاره‌ای، تابش منتشرشده از ستارهٔ مرکزی توسط ذرات غبار جذب و در طول موج‌های بلندتر بازگسیل می‌شود. این فرآیند که به عنوان خاموشی درونی^۱ شناخته می‌شود، می‌تواند منجر به برآورد کمتر از قدر ستاره، به ویژه در طول موج‌های مرئی و فروسرخ نزدیک شود. دلیل این امر آن است که این طول موج‌ها نسبت به طول موج‌های بلندتر حساسیت بیشتری به خاموشی غباری دارند. عمق نوری این پوشش به عوامل متعددی بستگی دارد، از جمله چگالی پوشش، نسبت غبار به گاز، و طول موج تابش. به طور کلی، عمق نوری در طول موج‌های کوتاه‌تر و در نواحی نزدیک‌تر به ستاره مقدار بیشتری دارد.



شکل ۴. نرخ کاهش جرم بر حسب درخشندگی. در این شکل، مثلث‌های سبز رنگ ستاره‌های اکسیژنی و مربع‌های قرمز ستاره‌های کربنی هستند. مربع‌های بدون رنگ ستاره‌های کربنی هستند که نرخ کاهش جرم آن‌ها توسط مدل‌های اکسیژنی محاسبه شده است. خط-چین‌های عمودی بیشینه درخشندگی ستاره‌های غول سرخ [۱۱]، و حد کلاسیک ستاره‌های شاخهٔ مجانبی غول‌ها را نمایش می‌دهند. آهنگ کاهش جرم توسط فرآیند هیدروژن‌سوزی لایه‌های بیرونی (چرخه کربن-نیتروژن-اکسیژن) ستاره‌های شاخهٔ مجانبی غول‌ها، و هلیوم‌سوزی در هسته (واکنش سه‌گانه آلفا) در ابرغول‌های قرمز با خطوط مورب نقطه‌چین نشان داده شده‌اند. حد نرخ از دست دادن جرم در بادهای ناشی از غبار به علت پراکندگی کلاسیک با خط چین مورب نمایش داده شده است [۱۷].

در شکل ۴ مشاهده می‌گردد که نرخ کاهش جرم، همبستگی مثبتی با درخشندگی دارد. بیشترین نرخ‌های کاهش جرم عموماً در درخشان‌ترین ستاره‌ها دیده می‌شود که این یافته با نتایج پیشین در ابرهای ماژلانی همخوانی دارد [۱۹]. با این حال، حتی در یک سطح ثابت از درخشندگی نیز پراکندگی قابل توجهی در نرخ کاهش جرم دیده می‌شود که ناشی از تأثیر تفاوت‌های تحولی و مسیرهای متفاوت تحولی ستارگان است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ستاره‌های اکسیژنی در دو سوی ستاره‌های کربنی در محور درخشندگی قرار گرفته‌اند. این توزیع ناشی از تحول ستاره‌ها در بازه‌های جرمی درون و بیرون $۱/۱$ تا ۴ برابر جرم خورشید است.

در شکل ۴، ستاره‌های اکسیژنی با درخشندگی بیش از $۱۰^{۴/۵}$ برابر درخشندگی خورشید، غول‌های قرمزی هستند که جرم اولیه آن‌ها بیشتر از ۴ برابر جرم خورشید بوده است. نکته قابل توجه این است که اگرچه این ستاره‌ها درخشندگی بیشتری

فرآیند کاهش جرم در شاخه غول قرمز پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر برهمکنش چگالی ستونی غبار و میدان تابشی ستاره قرار دارد. عمق نوری، که معیاری برای سنجش میزان کدورت یک محیط نسبت به تابش است، نقش کلیدی در این فرآیند ایفا می‌کند. ذرات غبار موجود در لایه‌های بیرونی تر پوشش ستاره با میدان تابشی آن برهم‌کنش دارند. در عمق‌های خاصی از این پوشش، عمق نوری به حدی می‌رسد که ذرات غبار به دلیل جفت شدن با میدان تابشی، به‌طور موثری به بیرون شتاب می‌گیرند [۲۱]. بازده این مکانیزم و در نتیجه نرخ کاهش جرم، به عمق نوری وابسته است. به بیان دقیق‌تر، توانایی فشار تابشی در پراکندن مواد پوشش پیراستاره‌ای با افزایش چگالی و عمق نوری افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که عمق نوری بالاتر به معنای جذب بیشتر تابش توسط ذرات غبار و در نتیجه انتقال تکانه بیشتر از میدان تابشی به این ذرات است.

شکل ۵ رابطه بین عمق نوری و شاخص رنگ متغیرهای بلنددوره را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عمق نوری یک ستاره، شاخص رنگ آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌گردد که در یک شاخص رنگ ثابت، عمق نوری ستاره‌های اکسیژنی بیشتر از ستاره‌های کربنی است. این تفاوت به دلیل میزان کدورت کمتر سیلیکات‌ها نسبت به کربن است. برای اینکه محیطی با ترکیب سیلیکاتی به همان اندازه گسترده‌تری مورد نیاز است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نرخ کاهش جرم ستاره‌های متغیر بلند دوره در کهکشان NGC ۶۸۲۲ را با برازش طیف توزیع انرژی به داده‌های به‌دست‌آمده از مشاهدات در طول‌موج‌های فروسرخ نزدیک و میانی محاسبه نمودیم. این کهکشان یک سامانه ستاره‌ای فعال بوده و میزان زیادی گاز در خود جای داده است. نسبت جرم گاز به غبار موجود در این کهکشان برابر با ۷۲۰۰ گزارش شده است [۲۲].

نسبت جرم گاز به غبار در کهکشان‌ها به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در مطالعه تحول کهکشانی شناخته می‌شود و به‌طور مستقیم با فراوانی فلزی در ارتباط است. مطالعات نشان

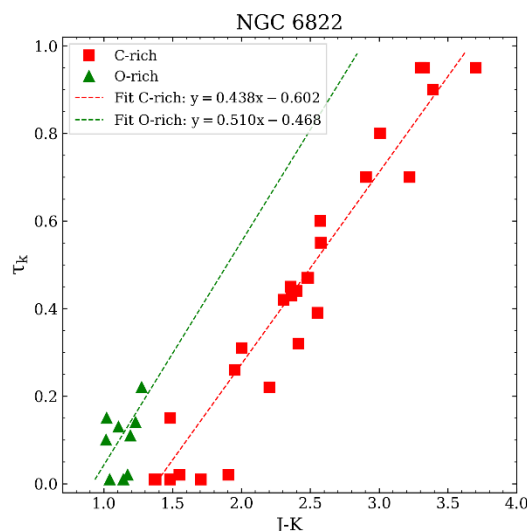
داده‌اند که نسبت جرم گاز به غبار با فراوانی فلزی به‌صورت یک رابطه معکوس و غیرخطی تغییر می‌کند [۲۳] و در کهکشان‌هایی با فراوانی فلزی پایین، نسبت جرم گاز به غبار بالاتر است، زیرا غبار که عمدتاً از عناصر سنگین مانند کربن، اکسیژن و سیلیسیم تشکیل شده، به میزان کمتری تولید می‌شود [۲۴]. این وابستگی به این دلیل است که غبار در محیط میان‌ستاره‌ای از طریق تراکم گاز و فرآیندهای شیمیایی شکل می‌گیرد و این فرآیندها به حضور عناصر سنگین وابسته هستند. مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی متعددی در وابستگی نسبت جرم گاز به غبار و فراوانی فلزی نقش دارند. در کهکشان‌هایی با فراوانی فلزی بالا، مانند کهکشان راه شیری، غبار به‌طور مؤثرتری از گاز میان‌ستاره‌ای تشکیل می‌شود، زیرا فراوانی عناصر سنگین امکان تراکم سریع‌تر و پایدارتر غبار را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، در کهکشان‌هایی با فراوانی فلزی پایین، مانند کهکشان‌های کوتوله نامنظم، کمبود عناصر سنگین منجر به کاهش نرخ تشکیل غبار می‌شود و در نتیجه نسبت جرم گاز به غبار افزایش می‌یابد. علاوه بر این، فرآیندهایی مانند بادهای ستاره‌ای و انفجارهای ابرنواخترها می‌توانند غبار را تخریب کرده یا از کهکشان خارج کنند، که این اثر در کهکشان‌های کم‌جرم با فراوانی فلزی پایین به دلیل گرانش ضعیف‌ترشان برجسته‌تر می‌باشد [۲۵].

همان‌گونه که اشاره گردید، محاسبات ما نشان می‌دهد که نرخ از دست دادن جرم در ستاره‌های متغیر بلنددوره غنی از کربن در کهکشان NGC ۶۸۲۲ برابر با $۲/۱ \times ۱۰^{-۵}$ جرم خورشید در سال است، در حالی که این مقدار برای ستاره‌های غنی از اکسیژن $۶/۶ \times ۱۰^{-۶}$ جرم خورشید در سال برآورد می‌شود. بنابراین، نرخ کلی کاهش جرم این ستاره‌ها برابر با $۲/۷ \times ۱۰^{-۵}$ جرم خورشید در سال است. این نتایج نشان می‌دهد که ستاره‌های غنی از کربن نقشی غالب در غنی‌سازی محیط میان‌ستاره‌ای این کهکشان ایفا می‌کنند که با مطالعات بوبر و همکاران هم‌خوانی دارد [۲۶]. موادی که این متغیرهای بلنددوره آزاد می‌کنند، متشکل از گاز و غبار، بر تحول دینامیکی و شیمیایی محیط میان‌ستاره‌ای تأثیر گذاشته و می‌توانند در فرایند شکل‌گیری ستارگان جدید نقش داشته باشند.

متغیرهای بلنددوره است. این اختلاف نشان می‌دهد که منابع دیگری همچون ستاره‌های شاخهٔ مجانبی غول‌ها، انفجارهای ابرنواختری و ستارگان آبرپر جرم نیز باید به‌عنوان عوامل مهم در غنی‌سازی محیط میان‌ستاره‌ای و تأمین جرم مورد نیاز برای تشکیل ستارگان جدید در نظر گرفته شوند [۳۰]. در نهایت، برهم‌کنش بازخوردهای ستاره‌ای^۲ و جریان‌های ورودی و خروجی کهکشانی، نقش کلیدی در تنظیم نرخ ستاره‌زایی در کهکشان‌های کوتوله‌ای مانند *NGC ۶۸۲۲* دارند. این مسئله ضرورت مطالعات چندطولی‌موجی را برای بررسی جامع چرخه جرم غبار در این سیستم‌ها برجسته می‌کند.

در مطالعه‌ای مشابه، جوادی و همکاران غبار حاصل از همهٔ ستاره‌های متغیر (بلنددوره‌ها و شاخهٔ مجانبی) در ناحیهٔ مرکزی کهکشان *M۳۳* را محاسبه کرده و نرخ کاهش جرم این ستاره‌ها را از مرتبه $۱۰^{-۳}$ جرم خورشید در هر سال و در واحد سطح گزارش نمودند [۵]. آن‌ها با مقایسهٔ جرم افزوده‌شده توسط ستاره‌های تحول‌یافته به محیط میان‌ستاره‌ای، و نرخ ستاره‌زایی این ناحیه، نشان دادند که در کهکشان *M۳۳* شارش جرم از نواحی بیرونی به بخش مرکزی جریان دارد.

در مطالعه‌ای دیگر عبداللّهی و همکاران [۳۱] نرخ کاهش جرم متغیرهای دوره‌بلند در کهکشان آندرومدا ۹ را معادل $۷/۱ \times ۱۰^{-۷}$ جرم خورشید بر سال تعیین کردند. صارمی و همکاران [۳۲] این مقدار را برای کهکشان آندرومدا ۱ برابر با $۸/۲ \times ۱۰^{-۶}$ جرم خورشید در هر سال محاسبه نمودند. نکتهٔ مهمی که کهکشان‌های مورد بررسی در این دو مطالعه را از مطالعهٔ ما و *M۳۳* متمایز می‌کند، وضعیت فعالیت ستاره‌زایی آن است. دو کهکشان آندرومدا ۱ و آندرومدا ۹ کهکشان‌های غیرفعال و خاموش هستند، در حالی که کهکشان *NGC ۶۸۲۲* همچنان فعالیت ستاره‌زایی دارد. همان‌طور که در بخش ۱.۳ اشاره شد، با توجه به حضور ستاره‌های جوان، ستاره‌های اکسیژنی با جرمی بیش از ۴ برابر جرم خورشید نیز در فهرست ستاره‌های *NGC ۶۸۲۲* مشاهده می‌شوند. اما در کهکشان‌های آندرومدا ۱ و آندرومدا ۹ هیچ متغیر دوره‌بلندی با جرم اولیهٔ بیش از ۲ برابر جرم خورشید مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۵. عمق نوری فیلتر K بر حسب شاخص رنگ فروسرخ نزدیک. مربع‌های قرمز ستاره‌های کربنی و مثلث‌های سبز ستاره‌های اکسیژنی را نمایش می‌دهند. خط‌چین‌های مشخص شده نیز بهترین برازش را با داده‌های رصدی نمایش می‌دهند.

از کل جرم بازگشتی توسط مجموع ستاره‌های کربنی و اکسیژنی، سهم غبار برابر با $۳/۷ \times ۱۰^{-۹}$ جرم خورشید در سال است و باقی‌ماندهٔ آن را گاز تشکیل می‌دهد. با این حال، نرخ نسبتاً پایین تولید غبار در *NGC ۶۸۲۲* در مقایسه با کهکشان‌های غنی‌تر از نظر فراوانی فلزی نشان می‌دهد که منابع دیگری نظیر انفجارهای ابرنواختری یا ستارگان متغیر آبی درخشان^۱ نیز ممکن است در توضیح محتوای غباری مشاهده‌شده نقش داشته باشند [۲۷]. افزون بر این، دانه‌های غباری که توسط این ستارگان آزاد می‌شوند، ممکن است در محیط میان‌ستاره‌ای دستخوش فرآیندهای فیزیکی مختلفی از جمله تخریب بر اثر امواج ضربه‌ای و رشد از طریق تجمع در محیط‌های چگال‌تر شوند [۲۸]، که این امر بر میزان بقای غبار و نقش آن در شکل‌گیری ستارگان تأثیر می‌گذارد.

همچنین، ارزیابی این مسئله ضروری است که آیا بازگشت گاز از سوی ستارگان متغیر بلنددوره به‌تنهایی می‌تواند نرخ ستاره‌زایی مشاهده‌شده را تأمین کند یا خیر. خاتم‌ساز و همکاران [۲۹]، نرخ ستاره‌زایی اخیر در ناحیهٔ میله کهکشان *NGC ۶۸۲۲* را در حدود $۱/۷ \times ۱۰^{-۲}$ جرم خورشید در سال گزارش کرده‌اند که چندین مرتبه بزرگی بیشتر از کل جرم بازگشتی از سوی

۱. Luminous blue variables (LBV)

۲. Stellar feedback

جدول ۱. نتایج به‌دست‌آمده برای ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان NGC 6822.

شناسه	بعد (درجه)	میل (درجه)	عمق نوری	درخشندگی ($10^3 L_{\odot}$)	کاهش جرم ($10^{-6} M_{\odot}/yr$)	محتوای شیمیایی
۱	۲۹۶/۱۸۳۹۵	-۱۴/۷۸۰۰۸	۰/۱۵	۱/۷۱	۰/۲۲۸	اکسیژنی
۲	۲۹۶/۲۵۲۳۱	-۱۴/۷۸۴۶۷	۰/۰۱	۵/۹۷	۰/۰۶۳	اکسیژنی
۳	۲۹۶/۲۲۳۶	-۱۴/۷۷۴۶۴	۰/۱۳	۱۱/۹۲	۰/۷۳۱	اکسیژنی
۴	۲۹۶/۲۱۸۱۶	-۱۴/۸۸۰۲۸	۰/۱	۱۳/۳	۰/۶۲۶	اکسیژنی
۵	۲۹۶/۲۱۳۲	-۱۴/۶۸۰۸۹	۰/۱۴	۱۲/۳۱	۰/۶۵۷	اکسیژنی
۶	۲۹۶/۲۰۴۲۶	-۱۴/۷۴۲۶۴	۰/۰۲	۴۱/۷۶	۰/۶۰۱	اکسیژنی
۷	۲۹۶/۲۵۰۹	-۱۴/۷۶۷۷۸	۰/۱۱	۳۰/۹۵	۱/۰۵	اکسیژنی
۸	۲۹۶/۱۸۸۰۵	-۱۴/۸۷۲۲۳	۰/۲۲	۱۳/۶۱	۱/۳۷	اکسیژنی
۹	۲۹۶/۲۶۷۰۴	-۱۴/۷۶۳۰۷	۰/۰۱	۴۷/۲۳	۰/۳۵۵	اکسیژنی
۱۰	۲۹۶/۲۰۳۸۵	-۱۴/۷۵۵۲۷	۰/۰۱	۲/۷۲	۰/۰۰۳	اکسیژنی
۱۱	۲۹۶/۲۳۶۳۵	-۱۴/۸۳۰۴۱	۰/۱۵	۵/۵۲	۰/۰۹۷	کربنی
۱۲	۲۹۶/۱۸۰۰۷	-۱۴/۷۱۰۵۵	۰/۰۱	۴/۰۸	۰/۰۰۵	کربنی
۱۳	۲۹۶/۲۲۶۳۲	-۱۴/۷۲۵۴۷	۰/۳۹	۴/۷۱	۰/۱۲۶	کربنی
۱۴	۲۹۶/۲۸۵۶۵	-۱۴/۷۳۹۴۴	۰/۰۱	۲/۳۹	۰/۰۰۲	کربنی
۱۵	۲۹۶/۲۱۰۲۳	-۱۴/۷۵۹۶۴	۰/۰۲	۳/۱۶	۰/۰۰۶	کربنی
۱۶	۲۹۶/۱۸۰۴۵	-۱۴/۸۰۴۱۸	۰/۲۶	۵/۹۱	۰/۴۹۴	کربنی
۱۷	۲۹۶/۱۷۴۳۹	-۱۴/۸۳۸۸۸	۰/۴۴	۳/۰۵	۰/۱۵	کربنی
۱۸	۲۹۶/۲۹۰۶	-۱۴/۶۹۶۳۸	۰/۰۱	۴/۹۶	۰/۰۰۵	کربنی
۱۹	۲۹۶/۱۷۷	-۱۴/۷۱۰۲	۰/۰۱	۴/۱۷	۰/۰۰۴	کربنی
۲۰	۲۹۶/۲۱۸۰۴	-۱۴/۹۲۵۶۷	۰/۰۲	۳/۶۴	۰/۰۰۶	کربنی
۲۱	۲۹۶/۲۳۳۵۳	-۱۴/۸۰۶۴۸	۰/۳۵	۴/۰۶	۰/۱۵	کربنی
۲۲	۲۹۶/۲۷۵۶۳	-۱۴/۷۴۹۱۸	۰/۹	۴/۸۶	۰/۴۳	کربنی
۲۳	۲۹۶/۱۹۴۸۱	-۱۴/۸۲۲۶۱	۰/۳۲	۳/۴۸	۰/۰۹	کربنی
۲۴	۲۹۶/۱۷۴۶۵	-۱۴/۷۹۳۷۶	۰/۰۱	۷/۳۳	۰/۰۰۹	کربنی
۲۵	۲۹۶/۳۰۰۱۴	-۱۴/۸۷۸۷۶	۰/۳۱	۵/۷۶	۰/۱۵۹	کربنی
۲۶	۲۹۶/۱۹۶۴۷	-۱۴/۷۰۲۵۵	۰/۰۴	۱۸/۴۴	۰/۰۹	کربنی
۲۷	۲۹۶/۳۰۳۵۳	-۱۴/۷۴۱۶۶	۰/۴۳	۵/۵۵	۰/۲۴۲	کربنی
۲۸	۲۹۶/۱۷۴۶۱	-۱۴/۷۸۸۴۱	۰/۴۵	۵/۳۳	۰/۲۷۸	کربنی
۲۹	۲۹۶/۱۹۹۱۹	-۱۴/۸۶۱۵۶	۱/۳	۳/۴۸	۰/۵۱۳	کربنی
۳۰	۲۹۶/۲۱۲۵۹	-۱۴/۸۰۱۳۲	۰/۷	۳/۸۵	۰/۳۴۲	کربنی
۳۱	۲۹۶/۱۸۳	-۱۴/۷۴۸	۰/۴۸	۴/۲۵	۰/۱۹۶	کربنی
۳۲	۲۹۶/۲۱۷۲۸	-۱۴/۷۷۶۴۲	۰/۴۷	۶/۱۴	۰/۲۹۲	کربنی
۳۳	۲۹۶/۲۲۲۳	-۱۴/۹۰۹۹	۰/۸	۳/۸۵	۰/۳۶۸	کربنی
۳۴	۲۹۶/۲۲۹۳۳	-۱۴/۶۵۲۴۹	۰/۲۲	۵/۱۹	۰/۰۸۱	کربنی
۳۵	۲۹۶/۲۴۰۵۲	-۱۴/۸۴۹۳۲	۰/۷	۴/۰۳	۰/۲۱۷	کربنی
۳۶	۲۹۶/۲۹۹۲	-۱۴/۶۹۱۴۲	۰/۴۷	۷/۰۴	۰/۲۷۳	کربنی
۳۷	۲۹۶/۱۷۹۵۶	-۱۴/۷۷۵۱۷	۰/۵۵	۶/۱۹	۰/۳۴۱	کربنی
۳۸	۲۹۶/۲۴۲۴۸	-۱۴/۹۱۱۵۶	۱/۶	۴/۸۷	۰/۶۵۳	کربنی

محتوای شیمیایی	کاهش جرم ($10^{-6} M_{\odot}/yr$)	درخشندگی ($10^3 L_{\odot}$)	عمق نوری	میل (درجه)	بعد (درجه)	شناسه
کربنی	۰/۴۵۷	۵/۹۷	۰/۴۴	-۱۴/۸۵۶۹۲	۲۹۶/۲۳۶۵۲	۳۹
کربنی	۰/۴۵۶	۵/۸۴	۰/۶	-۱۴/۷۹۳۲۸	۲۹۶/۲۲۸۷۴	۴۰
کربنی	۰/۹۹۶	۸/۳۹	۱/۳۵	-۱۴/۷۳۴۶۵	۲۹۶/۲۴۶۴۳	۴۱
کربنی	۰/۳۲۵	۶/۴۸	۰/۴۲	-۱۴/۸۳۸۲۸	۲۹۶/۲۴۲۹۸	۴۲
کربنی	۰/۵	۱۰/۵۱	۰/۴۷	-۱۴/۷۴۰۳۳	۲۹۶/۲۶۶۸۷	۴۳
کربنی	۱/۰۲۷	۶/۷۲	۱/۵۵	-۱۴/۸۷۰۲۶	۲۹۶/۲۳۸۸۴	۴۴
کربنی	۰/۷۳	۵/۷۸	۱/۸۵	-۱۴/۷۲۰۱۹	۲۹۶/۲۶۵۷	۴۵
کربنی	۰/۵۷۴	۶/۴۱	۰/۳۵	-۱۴/۷۸۹۲۹	۲۹۶/۲۱۷۷۳	۴۶
کربنی	۰/۳۷۶	۱۲/۷۶	۰/۰۹	-۱۴/۶۹۷۶۸	۲۹۶/۲۹۱۱۴	۴۷
کربنی	۰/۵۵۵	۷/۴۹	۰/۲۵	-۱۴/۷۹۰۴۶	۲۹۶/۲۱۶۶۳	۴۸
کربنی	۰/۴۰۹	۷/۸۶	۰/۶	-۱۴/۶۹۷۵۶	۲۹۶/۲۹۹۶۳	۴۹
کربنی	۰/۸۳۲	۵/۹۱	۱/۶	-۱۴/۶۷۳۹۲	۲۹۶/۲۸۱۲۲	۵۰
کربنی	۰/۹۳	۱۱/۷۹	۰/۴۶	-۱۴/۸۱۰۷۹	۲۹۶/۲۸۹۰۵	۵۱
کربنی	۰/۷۹۲	۸/۹۸	۰/۹۵	-۱۴/۷۷۶۳۴	۲۹۶/۲۵۷۳۵	۵۲
کربنی	۰/۴۰۱	۴/۴۸	۱/۴	-۱۴/۸۳۰۴۴	۲۹۶/۲۵۶۹۸	۵۳
کربنی	۱/۱۷۵	۱۲/۸۲	۰/۹۵	-۱۴/۷۱۸۲۳	۲۹۶/۱۹۸۵۵	۵۴
کربنی	۰/۴۵۵	۷/۵۲	۰/۹۵	-۱۴/۷۵۱۱	۲۹۶/۱۹۶۸	۵۵
کربنی	۰/۸۸۸	۱۴/۰۲	۰/۲۵	-۱۴/۸۰۸۸۵	۲۹۶/۲۸۴۲۸	۵۶
کربنی	۱/۳۶۳	۷/۷۱	۱/۶	-۱۴/۸۳۱۸۶	۲۹۶/۲۱۶۲۹	۵۷
کربنی	۱/۶۱	۸/۲۶	۱/۶۵	-۱۴/۷۴۶۸۴	۲۹۶/۲۹۷۹۵	۵۸

۵. جمع‌بندی

در این مطالعه، نرخ کاهش جرم ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان *NGC ۶۸۲۲* را با استفاده از طیف‌های به‌دست‌آمده از مشاهدات رصدی، در فیلترهای فروسرخ نزدیک و میانی محاسبه نمودیم. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

- نرخ کاهش جرم ستاره‌های بلنددوره اکسیژنی 6.6×10^{-6} و کربنی 2.1×10^{-5} جرم خورشید بر سال به‌دست آمد. با توجه به فراوانی فلزی کم این کهکشان ($Z=0.03$)، درصد فراوانی اکسیژن در مقایسه با کربن کمتر بوده، در نتیجه سهم ستاره‌های کربنی در تولید مواد میان‌ستاره‌ای بیشتر است.

- مجموع کاهش جرم ستاره‌های متغیر بلنددوره در کهکشان *NGC ۶۸۲۲* برابر 2.7×10^{-5} جرم خورشید

بر سال برآورد گردید، که سهم غبار در آن 3.7×10^{-9} جرم خورشید بر سال و مابقی، سهم گاز خروجی ستاره‌های بلنددوره می‌باشد.

- با در نظر گرفتن نرخ ستاره‌زایی کنونی ناحیه میله-ای‌شکل این کهکشان که 1.7×10^{-2} جرم خورشید در سال گزارش گردیده است، نرخ کاهش جرم ستاره‌های متغیر بلنددوره از مرتبه 10^{-5} برابر این نرخ ستاره‌زایی است و به‌تنهایی نمی‌تواند بودجه جرمی مورد نیاز ستاره‌زایی را تامین نماید.
- جزئیات نتایج حاصل از این پژوهش برای عمق نوری، درخشندگی و نرخ کاهش جرم ستاره‌های متغیر بلنددوره مشاهده‌شده در کهکشان *NGC ۶۸۲۲*، در جدول ۱ ارائه می‌گردد.

مراجع

1. C Gall, J Hjorth, A C Andersen, *Astronomy and Astrophysics*. **19** (2011) 43.
2. A Javadi, J T van Loon, H Khosroshahi, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **432** (2013) 2824.
3. A Javadi, J T van Loon, H Khosroshahi, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **464** (2017) 2103.
4. A Javadi, J T van Loon, M T Mirtorabi, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **41** (2011) 3394.
5. M Geha, M Blanton, R Yan, et al., *Astrophysical Journal*. **757** (2012) 85.
6. O Valenzuela, G Rhee, A Klypin, et al., *Astrophysical Journal*. **657** (2007) 773.
7. P Hodge, *Astrophysical Journal*. **241** (1980) 125.
8. S Hofner, H Olofsson, *Astronomy and Astrophysics*. **26** (2018) 1.
9. P A Whitelock, J W Menzies, M W Feast, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **428** (2013) 2216.
10. A S Hirschauer, L Gray, M Meixner, et al., *Astrophysical Journal*. **892** (2020) 91.
11. M R Cioni, H Habing, *Astronomy and Astrophysics*. **429** (2005) 837.
12. Z Ivezić, M Elitzur, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **287** (1997) 799.
13. H Mahani, A Javadi, J T van Loon, et al., *Astrophysical Journal*. **992** (2025) 94.
14. H Mahani, A Javadi, *Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory*. **72** (2025) 369.
15. A I Karakas, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **445** (2014) 347.
16. N Mowlavi, *Astronomy and Astrophysics*. **344** (1999) 617.
17. R Kippenhahn, A Weigert, *Stellar Structure and Evolution*. **1** (2013) 1.
18. E Marini, F Dell'Agli, M A T Groenewegen, et al., *Astronomy and Astrophysics*. **647** (2021) A69.
19. J T van Loon, M A T Groenewegen, A de Koter, et al., *Astronomy and Astrophysics*. **351** (1999) 559.
20. J T van Loon, M R Cioni, A Zijlstra, et al., *Astronomy and Astrophysics*. **438** (2005) 273.
21. S Bladh, S Höfner, *Astronomy and Astrophysics*. **546** (2012) A76.
22. F P Israel, *Astronomy and Astrophysics*. **317** (1997) 65.
23. J T van Loon, J R Marshall, A A Zijlstra, *Astronomy and Astrophysics*. **442** (2005) 597.
24. A Remy-Ruyer, S C Madden, F Galliano, et al. *Astronomy and Astrophysics*. **563** (2014) A31.
25. S Aoyama, K C Hou, H Hirashita, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **478** (2018) 4905.
26. M L Boyer, S Srinivasan, D Riebel, et al., *Astrophysical Journal*. **748** (2012) 40.
27. C Agliozzo, N Phillips, A Mehner, et al., *Astronomy and Astrophysics*. **655** (2021) A98.
28. A P Jones, A G Tielens, D J Hollenbach, et al., *Cardiff University Press*. **402** (1997) 595.
29. F Khatamsaz, M Abdollahi, H Abdollahi, et al., *Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory*. **71** (2024) 394.
30. K B W McQuinn, E D Skillman, J M Cannon, et al., *Astrophysical Journal*. **724** (2010) 49.
31. H Abdollahi, A Javadi, M T Mirtorabi, et al., *Astrophysical Journal*. **948** (2023) 63.
32. E Saremi, A Javadi, J T van Loon, et al., *Astrophysical Journal*. **894** (2020) 135.