

بررسی تأثیر ادغام‌های کهکشانی در آهنگ ستاره‌زایی با استفاده از نقشه‌های جرمی

معین مصلح^{۱،۲*} و سیده زهرا حسینی شاهی سوندی^{۱،۲}

۱. بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

۲. رصدخانه ابوریحان بیرونی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

پست الکترونیکی: moein.mosleh@shirazu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱/۱۴)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های جرمی کهکشان‌ها با توان تفکیک تلسکوپ فضایی هابل، در انتقال به سرخ‌های کمتر از ۲، به بررسی تأثیر ادغام‌های کهکشانی بر روی تغییر آهنگ ستاره‌زایی پرداخته شده است. بهره‌گیری از نقشه‌های جرمی به جای روش معمول استفاده از تصاویر نوری، موجب کاهش اثر توده‌های ستاره‌زا در شنا سایی کهکشان‌های ادغامی، به ویژه در انتقال به سرخ‌های بالاتر از یک می‌شود. با استفاده از روش‌های غیرپارامتری بر روی نقشه‌های جرمی و محاسبه کمیت‌هایی همانند ضریب جینی (Gini)، ممان دوم توزیع جرمی نقاط پرجرم (M20) و شاخص عدم تقارن (A)، کهکشان‌های ادغامی با جرم ستاره‌ای بیشتر از جرم خورشیدی انتخاب شده‌اند. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که نسبت کهکشان‌های ادغامی به کهکشان‌های ستاره‌زا در بالا و پایین رشته اصلی ستاره‌زایی کهکشان‌ها به طور نسبی تفاوت قابل توجهی ندارد. به بیانی نتایج نشان دهنده این است که ادغام‌ها تأثیر نسبتاً اندکی در توزیع کهکشان‌ها بر روی رشته اصلی و یا افزایش نرخ ستاره‌زایی دارند.

واژه‌های کلیدی: ساختار کهکشان‌ها، تحول کهکشان‌ها، توزیع جرم در کهکشان‌ها، ستاره‌زایی

۱. مقدمه

اصولی ستاره‌زایی کهکشان‌ها در انتقال به سرخ‌های مختلف، راه را برای درک بهتر نحوه تشکیل ساختارهای کهکشانی و همچنین فرایندهای مرتبط با خاموشی ستاره‌زایی و تشکیل رشته قرمز فراهم می‌کند. ادغام‌های کهکشانی و بازخوردهای هسته‌های کهکشانی فعال از جمله فرایند فیزیکی هستند که می‌توانند در این تغییرات مؤثر باشند [۴ و ۵].

مشاهدات و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نشان داده‌اند که فرایندهای ادغام، هم در افزایش و تشدید ستاره‌زایی مؤثرند و هم در خاموش کردن نهایی ستاره‌زایی کهکشان‌ها [۶، ۷ و ۸]. برای نمونه، انتظار این است که ادغام کهکشان‌های غنی از گاز،

کهکشان‌ها از جمله ساختارهای پیچیده کیهان هستند که درک بهتر از تاریخچه پیدایش و شکل‌گیری آنها، نیازمند مشاهدات گسترده در کنار توسعه مدل‌های فیزیکی مرتبط است. امروزه مشاهدات چندطول موجی و نمونه‌برداری‌های آماری از این اجرام، اطلاعات زیادی را در خصوص ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌ها نشان داده است که به روابط مقیاسی معروفند. از مهم‌ترین این روابط، می‌توان به ارتباط تنگاتنگ بین آهنگ ستاره‌زایی و جرم ستاره‌ای کهکشان‌های ستاره‌زا (رشته اصلی ستاره‌زایی)، اشاره کرد [۱، ۲ و ۳]. بررسی دقیق رشته

شاخص‌ها می‌توان شاخص‌های سه‌گانه عدم تقارن، توده‌ای بودن و میزان تمرکز نوری (معروف به شاخص‌های سه‌گانه CAS)، استفاده از ضریب جینی (Gini) و ممان دوم توزیع نوری برای مناطق پرنور (M20) را نام برد [۱۴-۱۹].

علی‌رغم این، تمایز قائل شدن میان کهکشان‌های ادغامی و کهکشان‌های توده‌ای یکی از چالش‌های موجود در این بررسی‌هاست؛ چرا که در انتقال به سرخ‌های بالا، همان‌طور که تعداد کهکشان‌های ادغامی بیشتر می‌شود، حضور توده‌های ستاره‌زایی بزرگ نیز بیشتر و مشخص‌تر می‌شود و در نتیجه تمایز توده‌های جرمی ناشی از ادغام، از توده‌های ستاره‌زا مشکل‌تر می‌شود [۲۰]. بررسی نقشه‌های نوری و آهنگ ستاره‌زایی برای کهکشان‌های ستاره‌زای پرجرم نشان می‌دهند که تقریباً ۲۰ تا ۵۰ درصد از شار کل کهکشان متعلق به توده‌های عظیم است. این در حالی است که بررسی‌ها بر روی نقشه‌های جرم ستاره‌ای آنها، میزان بسیار کمتری را برای سهم این توده‌ها از کل جرم ستاره‌ای، نشان می‌دهند [۲۱-۲۳]. همچنین مطالعات بر روی کهکشان‌های انتقال به سرخ بالاتر از یک با استفاده از مجموعه شاخص‌های CAS بر روی داده‌های نوری، نشان می‌دهند که امکان تفکیک توده‌های ستاره‌زای بزرگ از اثرات به جا مانده از ادغام، وجود ندارد، به این دلیل که اثرات توده‌های ستاره‌زا نیز مانند اثرات ادغام شکل نمایه نوری کهکشان را تغییر می‌دهند [۲۴]. بنابراین چنانچه بخواهیم ماهیت این توده‌ها را به درستی تشخیص دهیم، علاوه بر داده‌های نوری، نیاز هست تا داده‌های طیف سنجی (اطلاعات سینماتیک جزئی با استفاده از روش میدان واحد یکپارچه (IFU)^۱ را نیز استفاده کنیم. اما چنانچه به جای استفاده از داده‌های نوری (بازه طول موجی مشخص)، از نقشه جرمی تفکیک شده استفاده کنیم، نیاز به داده‌های طیف سنجی را بسیار کاهش می‌دهد. در چنین شرایطی کهکشان‌های توده‌ای نقشه‌های جرم ستاره‌ای منظم و نمایه‌هایی با تراکم نسبتاً متقارن مرکزی دارند، در حالی که کهکشان‌های ادغامی توزیع جرمی نامتقارن، هسته‌های چندگانه و یا گستردگی نامتقارن مناطق

باعث افزایش دوره‌ای آهنگ ستاره‌زایی شود [۹ و ۱۰] و ادغام کهکشان‌های کم‌گاز باعث سرکوب آهنگ ستاره‌زایی شود [۱۱] و [۱۲]. برخی از مطالعات اخیر با بررسی کهکشان‌ها در انتقال به سرخ‌های مختلف نشان داده‌اند که فرایند ادغام، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ستاره‌زایی ندارند؛ البته به جز بر روی کهکشان‌هایی که بسیار بالاتر از رشته اصلی هستند و نشانی از تأثیر فرایند ادغام در به راه انداختن فعالیت ستاره‌فشانی نشان داده‌اند [۱۳]. با این حال، به دلیل پیچیدگی مشاهداتی در تشخیص کهکشان‌های در حال ادغام از کهکشان‌های معمول، پرسش اصلی همچنان باقی است که تا چه اندازه، ادغام‌های کهکشانی در تغییر توزیع و پراکندگی مشاهده شده در رشته اصلی ستاره‌زایی اثربخشند و آیا این ادغام‌ها باعث افزایش دوره‌ای فعالیت کلی ستاره‌زایی کهکشان‌ها می‌شوند یا خیر؟ و چگونه می‌توان اثرات مناطق توده‌ای را از اثرات ادغام در کهکشان‌های مشاهده شده، از هم تمیز داد و نمونه آماری بهتری برای مطالعه و مقایسه در انتقال به سرخ‌های مختلف را انتخاب کرد؟

اگرچه از لحاظ مشاهداتی، جداسازی و شناسایی کهکشان‌های ادغامی بسیار پیچیده است، اما روش‌های متعددی برای این مورد، با استفاده از بررسی کهکشان‌ها از منظر ریخت‌شناسی (بررسی شکل ظاهری) یا مطالعه سینماتیک آنها، توسعه داده شده‌اند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴-۱۶]. استفاده از روش بررسی ریخت‌شناسی، یک روش به صرفه و سریع در جداسازی و تشخیص نمونه قابل قبول از کهکشان‌های ادغامی است. در این راستا استفاده از روش‌های غیرپارامتری (بی‌نیاز به مدل‌سازی نوری)، کارآمدتر و از پیچیدگی‌های فنی کمتری برخوردار هستند. در این خصوص، شاخص‌های متعددی تعریف شده‌اند تا بتوان میزان و درجه بی‌نظمی‌های ظاهری یا عدم تقارن‌ها را تشخیص داد، و با کمک گرفتن از نحوه توزیع این شاخص‌ها بر اساس یکدیگر و یا دیگر کمیت‌های فیزیکی، احتمال قرار گرفتن کهکشان‌ها را در دسته‌بندی ادغامی یا غیرادغامی تعیین کرد. از مهم‌ترین این

۱. Integral Field Unit

در این پژوهش انتخاب شده، که با در نظر گرفتن قیدهایی همچون رصد در حداقل سه صافی رصدی و به دور بودن از نزدیک ستاره‌های درخشان و لبه‌های تصاویر اصلی (به دلیل نوبه بسیار زیاد) در نهایت، نمونه به ۴۸۸۷ کهکشان تقلیل یافته است. با توجه به این که، تمرکز این پژوهش بر روی کهکشان‌های ستاره‌زا بوده، با استفاده از نمودار رنگ - رنگ UJV [۲۷]، تعداد ۳۵۲۴ کهکشان ستاره‌زا انتخاب شده‌اند.

با استفاده از این نمونه، نقشه‌های جرم ستاره‌ای دوبعدی ساخته شده؛ که روش آن به تفصیل در پژوهش اخیر مصلح و همکاران ۲۰۲۰ توضیح داده شده است [۲۸]. به اختصار، برای ساخت نقشه‌های جرمی، تصاویر موزاییکی مورد بررسی این کهکشان‌ها در طول موج‌های مختلف، از سایت رسمی 3D-HST گرفته شده‌اند. برای دو میدان GOODS-South و GOODS-North تصاویر در ۷ فیلتر موجود V606، B435، JH140، J125، z850i775 و H160 و برای سه میدان UDS، COSMOS و AEGIS تصاویر در ۵ فیلتر موجود V606، JH140، J125، z814 و H160 استفاده شده‌اند. سپس با استفاده از برازش توزیع انرژی طیفی برای کهکشان‌ها، و اعمال آن بر روی تک تک خانه‌های تصویر متعلق به کهکشان‌ها، کمیت‌های فیزیکی جرم ستاره‌ای، آهنگ ستاره‌زایی، سن و غیره تخمین زده شده و نقشه دوبعدی جرمی برای هر کهکشان به دست آمده است. برای این منظور، از کد iSEDfit [۲۹] با در نظر گرفتن تابع جرم اولیه شابریر [۳۰] ۲۰۰۳ و مدل ستاره‌ای برژوال و شارلت [۳۱] ۲۰۰۳ استفاده شده است.

۳. جداسازی کهکشان‌های ادغامی

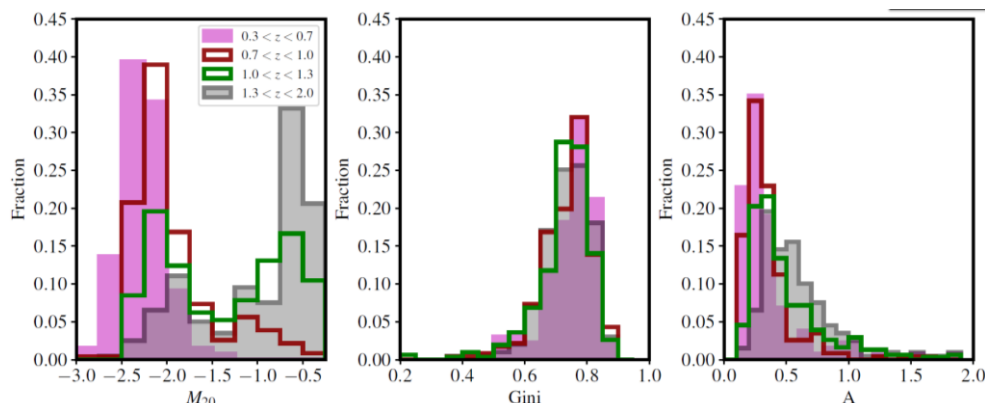
از نقشه‌های جرمی به دست آمده جهت محاسبه شاخص‌های غیرپارامتری سه گانه CAS، ضریب جینی و M_{20} کهکشان‌ها بهره برده‌ایم. با توجه به این، شاخص جینی تمرکز نسبی جرم ستاره‌ای کهکشان را نشان می‌دهد. این ضریب می‌تواند برای بررسی ادغام‌های عمده و جزئی مورد استفاده قرار گیرد. این شاخص اولین بار توسط آبراهام و همکاران [۱۴] ۲۰۰۳ تحت معادله زیر تعریف شده که در این معادله n تعداد کل خانه‌های

برجرم دارند [۲۵]. بدیهی است که توزیع نوری، منعکس کننده توزیع جرمی درون کهکشان‌ها است، لیکن با توجه به این که اثراتی همچون توده‌های ستاره‌زا به طول موج وابسته است، تبدیل توزیع نوری به جرم موجب حذف این وابستگی و یک دست شدن نقشه‌ها در بازه‌های انتقال به سرخ می‌شود. در نتیجه استفاده از نقشه‌های جرم ستاره‌ای برای تشخیص کهکشان‌های ادغامی بسیار مهم‌تر و کارآمدتر است.

در این پژوهش تلاش داریم تا ارتباط ادغام کهکشانی با آهنگ ستاره‌زایی کهکشان‌ها را به صورت دقیق‌تر در بازه بلند مدت زمان کیهانی بررسی کنیم. به این منظور از کامل‌ترین و جدیدترین نمونه نقشه‌های جرمی تفکیک شده با دقت کافی در انتقال به سرخ‌های کمتر از ۲، استفاده شده است. سپس با استفاده از اندازه‌گیری شاخص‌های غیرپارامتری همانند عدم تقارن، ضریب جینی و ممان دوم توزیع جرمی، کهکشان‌های ادغامی را تفکیک کرده و با بهره‌بردن از محل قرارگیری آنها بر روی رشته اصلی ستاره‌زایی، تأثیر ادغام در آهنگ ستاره‌زایی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. مزیت دیگر استفاده از این نمونه، علاوه بر بهره‌بردن از نقشه‌های جرمی در مقایسه با کارهای گذشته (که عمدتاً بر اساس نقشه‌های نوری بوده‌اند)، کم شدن تأثیرات انحراف کیهانی با استفاده از تصاویر پنج میدان اصلی و مهم رصدشده کهکشان‌ها در انتقال به سرخ‌های بالا توسط تلسکوپ فضایی هابل و افزایش جامعه آماری آنهاست.

۲. انتخاب نمونه

به منظور انجام این پژوهش، داده‌های تصویربرداری چند-طول‌موجی و فهرست‌های منتشر شده از برنامه سه بعدی تلسکوپ فضایی هابل (3D-HST) از ۵ میدان مساحی کندلز (CANDELS) استفاده شده است [۲۶]. سپس با اعمال محدودیت بر روی بازه انتقال به سرخ و پارامتر جرم ستاره‌ای موجود در این فهرست‌ها، کهکشان‌های مورد نظر این مطالعه در بازه‌های $2 < z < 0.3$ و با جرم ستاره‌ای بیشتر از $\log(M) = 9.1$ جرم خورشیدی انتخاب شده‌اند. با اعمال این محدودیت ۵۵۵۷ کهکشان از همه ۵ میدان کندلز برای مطالعه



شکل ۱. توزیع ستونی شاخص‌های غیرپارامتری، به ترتیب از چپ به راست، ممان دوم توزیع جرمی، ضریب جینی و عدم تقارن، برای کهکشان‌های ستاره‌زا در بازه انتقال به سرخ ۰/۳ تا ۲ و با جرمی بیشتر از $\log(M) = 10/5$ جرم خورشیدی است. شاخص M_{20} بیشترین تغییرات انتقال به سرخ، نسبت به شاخص جینی و عدم تقارن دارد.

$$A = \sum_{ij} \frac{|I(i, j) - I_{180}(i, j)|}{|I(i, j)|} - \sum_{ij} \frac{|B(i, j) - B_{180}(i, j)|}{|I(i, j)|}, \quad (۴)$$

شکل ۱ توزیع ستونی یا بافت‌نگار شاخص‌های اندازه‌گیری شده به تفکیک بازه انتقال به سرخ برای کهکشان‌های ستاره‌زا را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش انتقال به سرخ، مقادیر شاخص‌های M_{20} به طور متوسط افزایش می‌یابد؛ اما به طور نسبی توزیع شاخص جینی تغییرات قابل ملاحظه‌ای ندارد. شاخص جینی، مشابه با شاخص مورد استفاده اقتصاددان‌ها، ابزاری برای سنجش میزان انحراف نسبت به توزیع یکنواخت جرم در کل تصویر کهکشان است. کمینه آن، یعنی صفر بودن این عدد، به معنای توزیع یکسان جرم در تمامی نقاط کهکشان و بیشینه آن، یک، به معنی قرارگرفتن کل جرم کهکشان در یک خانه تصویر است [۱۴]. مزیت استفاده از این شاخص، نسبت به تمرکز جرمی در سه گانه CAS، کارآمدی بیشتر آن برای کهکشان‌هایی است که شکل نامنظم‌تری دارند. شاخص M_{20} که از حساسیت بیشتری نسبت به شاخص جینی برخوردار است، می‌تواند در تشخیص کهکشان‌های چند هسته‌ای بهتر عمل کند و اثرات به جا مانده از ادغام را بهتر شناسایی کند. بنابر این استفاده از شاخص جینی به همراه M_{20} راه حل مناسب‌تری برای شناسایی کهکشان‌های ادغامی است [۳۳]. اگر هسته کهکشان بسیار پر جرم باشد، نتیجه مقدار بالای شاخص جینی است، این در حالی است که وجود چندین

تصویر، \bar{f} مقدار متوسط جرم و f_i مقدار جرم هر خانه تصویر است:

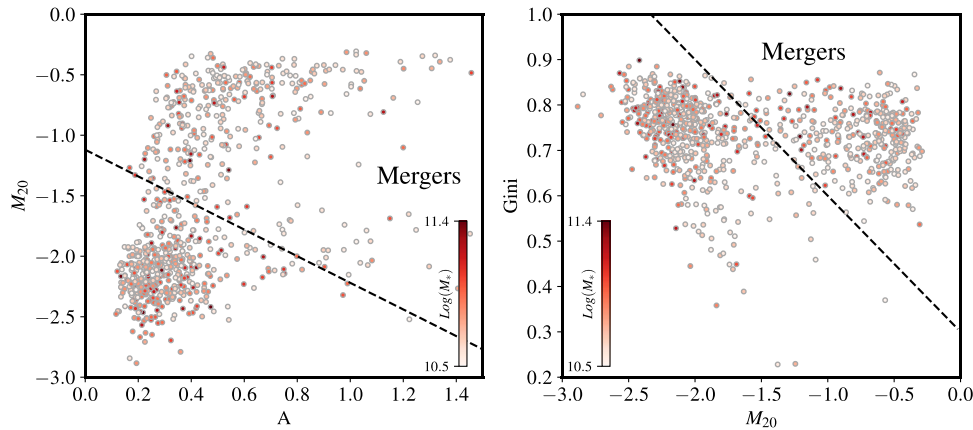
$$Gini = \frac{1}{|f|/n(n-1)} \sum_i^n (\gamma_i - n - 1) / f_i, \quad (۱)$$

برای به دست آوردن شاخص M_{20} بر روی نقشه‌های جرمی، ابتدا طبق معادلات زیر M_{tot} را به دست می‌آوریم. در واقع ممان دوم توزیع جرمی کل کهکشان است که به صورت حاصل ضرب f_i در مجذور فاصله از مرکز کهکشان محاسبه می‌شود و سپس در معادله نهایی جایگذاری می‌شود [۱۶]:

$$M_{tot} = \sum_i^n M_i = \sum_i^n f_i [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2], \quad (۲)$$

$$\sum_i f_i < 0.2 f_{tot}, \text{ برای } M_{20} = \log \left(\frac{\sum_i M_i}{M_{tot}} \right)_{10}, \quad (۳)$$

برای محاسبه شاخص عدم تقارن (A) از سه گانه CAS، بایستی ابتدا تصویر را به اندازه 180° درجه چرخاند و سپس تصویر جدید را از تصویر اصلی کم کرده و نهایتاً بهنجار کرد. هر چه مقدار A بیشتر باشد حضور ساختارهای مختل شده در تصویر بیشتر است. معادله آن به شرح زیر است که در آن $I(i, j)$ شدت (جرم) هر خانه تصویر، $I_{180}(i, j)$ شدت هر خانه تصویر وقتی 180° درجه چرخیده باشد، و $B(i, j)$ شدت مربوط به پس زمینه تصویر است [۳۲]:



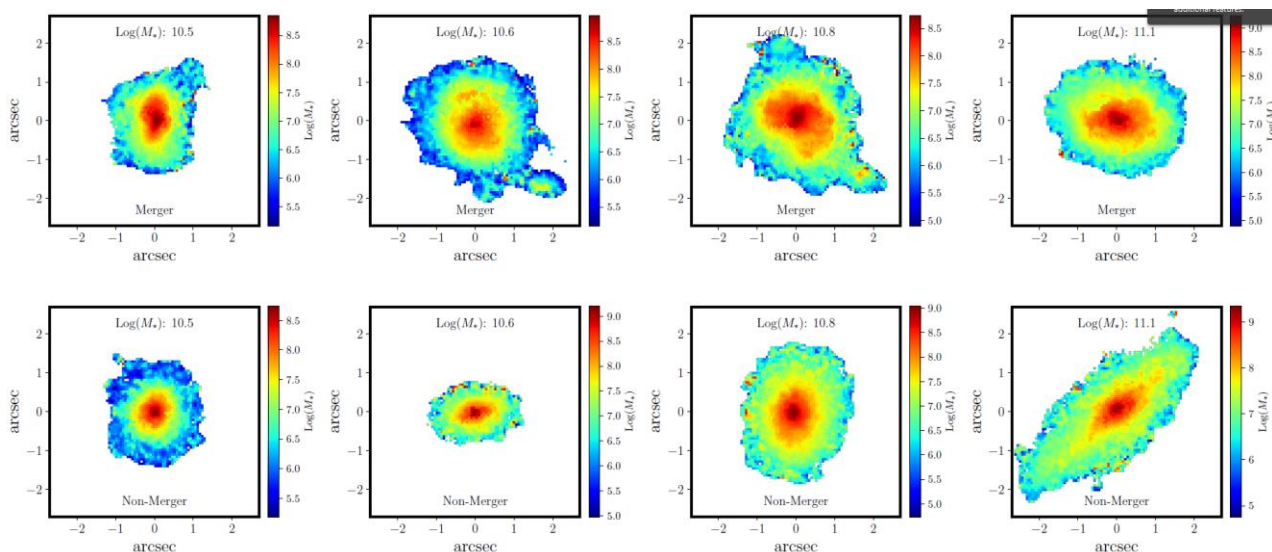
شکل ۲. سمت راست: نمودار توزیع شاخص‌های اندازه‌گیری شده جینی و M_{20} برای کهکشان‌های ستاره‌زا در بازه انتقال به سرخ ۰/۳ تا ۲ و با جرمی بیشتر از $\log(M) = 10.5$ جرم خورشیدی است. خط چین نشان دهنده خطوط تفکیک کننده کهکشان‌های ادغامی و معمول است. سمت چپ: نمودار مشابه، برای شاخص‌های M_{20} و A است.

سمت چپ شکل ۱). البته با توجه به سایر شواهد، افزایش نسبی ادغام‌های کهکشانی با افزایش انتقال به سرخ هم تأثیرگذار است.

در گام بعد، به منظور جداسازی کهکشان‌های ادغامی و معمول، از رابطه به دست آمده توسط چیبیل و همکاران ۲۰۱۵ [۲۵] از نحوه توزیع کهکشان‌های شبیه‌سازی شده بر روی نمودار M_{20} -A، یعنی $M_p > -1/1 \times A - 1/12$ ، استفاده شده است. همان طور که در نمودار سمت چپ شکل ۲ مشاهده می‌شود، تجمع کهکشان‌های معمول در بخش‌های سمت چپ - پایین نمودار M_{20} -A است. همچنین برای اطمینان از نمونه به دست آمده و نتیجه‌گیری نهایی، نمونه ثانویه دیگری بر اساس توزیع کهکشان‌ها بر روی نمودار $Gini$ - M_{20} و رابطه $Gini > 0.3 \times M_p + 0.3$ تعیین شده است (نمودار سمت راست شکل ۲). به طور کلی در بازه انتقال به سرخ این مطالعه، به ترتیب حدود ۴۶ و ۳۹ درصد از کهکشان‌های ستاره‌زا، به صورت ادغامی با استفاده از روش‌های اول و دوم شناسایی شده‌اند، که ۹۷ درصد کهکشان‌های ادغامی نمونه دوم با نمونه اول مشترک هستند. لازم به ذکر است که همان طور که در مطالعات اخیر همانند چیبیل و همکاران ۲۰۱۵ [۲۵] مورد بحث قرار گرفته است، تغییرات در مرزهای تفکیکی و نقطه صفر این معادلات، تأثیر محسوسی در نتایج علمی نهایی

هسته یا مرکز پرجرم یا درخشان در کهکشان مقدار بالای شاخص M_{20} را نتیجه می‌دهد [۱۶]. نتیجه شبیه‌سازی و مشاهدات نشان داده است که ترکیب دو شاخص M_{20} و عدم تقارن بر روی نقشه‌های جرمی می‌تواند با درصد خوبی در تعیین کهکشان‌های ادغامی استفاده شوند [۲۵].

با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در مطالعه مصلح و همکاران ۲۰۲۰، خطای نقشه‌های جرمی برای کهکشان‌ها، با کاهش جرم افزایش می‌یابد. این به دلیل کاهش نسبت سیگنال به نوفه و خطای ذاتی در دقت محاسبه جرم ستاره‌ای کهکشان‌ها، به ویژه در انتقال به سرخ‌های بالاست. بنابراین برای اطمینان بیشتر، نتایج این مطالعه صرفاً به کهکشان‌هایی با جرم ستاره‌ای بیشتر از $\log(M) = 10.5$ جرم خورشیدی اختصاص یافته است. لازم به ذکر است که کاهش دقت نقشه‌های جرمی به ویژه در نواحی بیرونی کهکشان‌ها، موجب پدیدار شدن تغییرات موضعی جرم در این نقشه‌ها می‌شود و در نتیجه ممکن است مقدار شاخص ممان دوم را افزایش دهد. این موضوع در انتقال به سرخ‌های بالاتر از حدود ۱/۵ محتمل‌تر است؛ به ویژه در مناطق رصدی که پهنای میدان بر عمق تصاویر غالب بوده است [۲۸]. تأثیر این عوامل در جابه‌جایی توزیع شاخص ممان دوم و مقدار میانی آن در نمودار توزیع ستونی، نسبت به بازه‌های انتقال به سرخ پایین‌تر، خود را نشان می‌دهد (نمودار



شکل ۳. نقشه جرمی تعدادی از کهکشان‌های ادغامی یا برخوردی، شناسایی شده توسط روش غیرپارامتری در ردیف بالا نشان داده شده است و با کهکشان‌های غیر ادغامی هم جرم در در ردیف پایین مقایسه شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی این کهکشان‌ها، عدم تقارن در توزیع مناطق پرجرم کهکشان قابل رؤیت است.

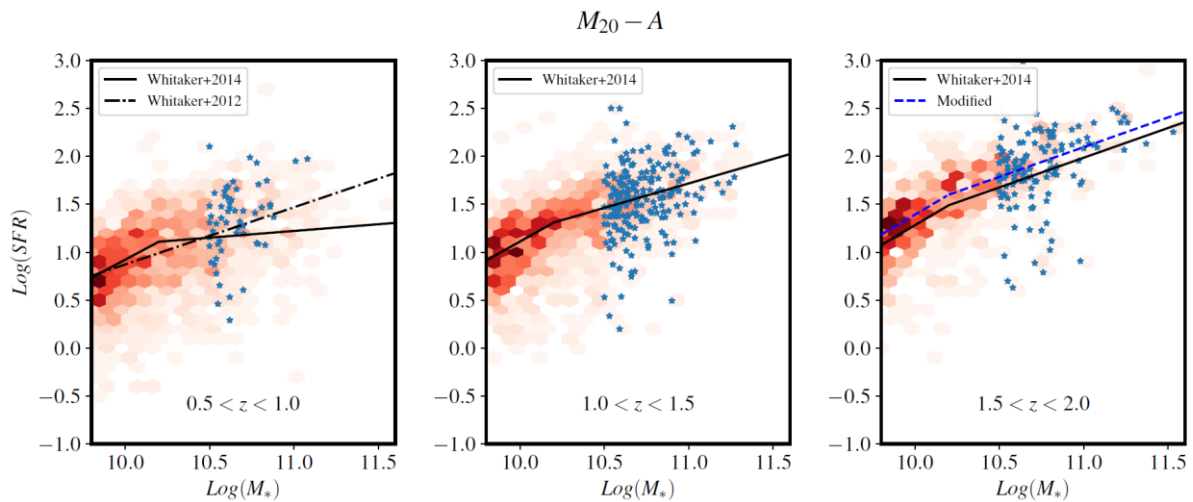
حاصل شده ندارد.

در شکل ۳، چند نمونه از کهکشان‌های برخوردی و غیر برخوردی تفکیک شده با استفاده از این روش، نشان داده شده‌اند. لازم به یادآوری است که نقشه‌های جرمی کهکشان‌های عادی به طور معمول نسبت به تصاویر نوری آنها از تقارن و یکنواختی قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند. بنابراین همان طور که ملاحظه می‌شود، عدم تقارن توزیع جرمی و حضور توده‌ای مناطق پرجرم در این کهکشان‌های ادغامی قابل تشخیص هستند. این نشان می‌دهد که روش به کار گرفته شده، به نسبت، توان تشخیص کهکشان‌های ادغامی را دارد.

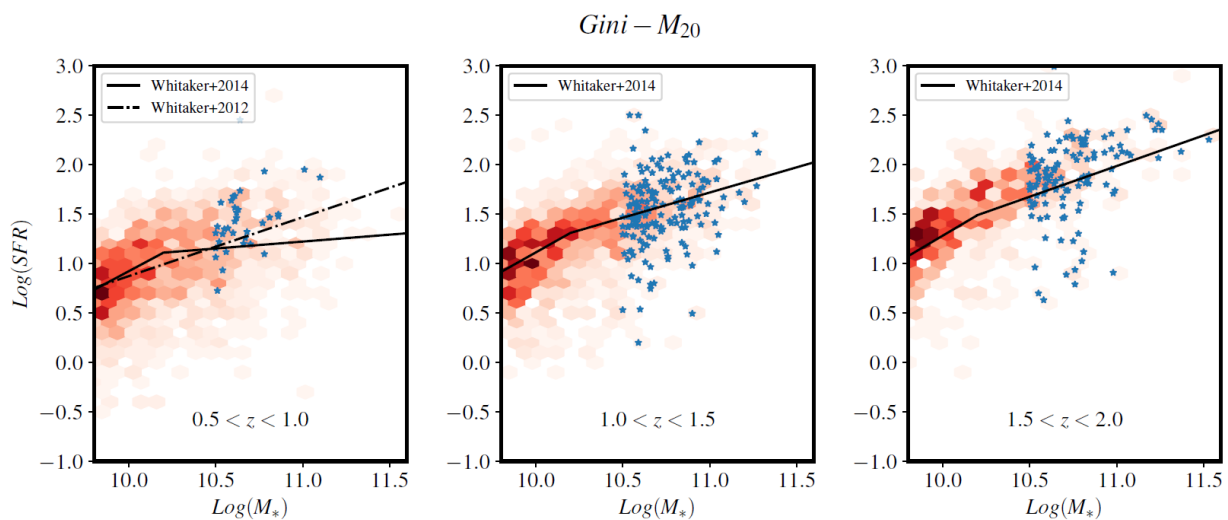
۴. نتایج

با انتخاب نمونه‌ها، می‌توان به بررسی بیشتر اثر ادغام در ستاره‌زایی کهکشان‌ها پرداخت. برای این منظور، توزیع نامزدهای مورد نظر در هر انتقال به سرخ را در اطراف رشته اصلی ستاره‌زایی بررسی می‌کنیم. شکل ۴ نامزدهای منتخب بر اساس روش M₂₀-A که با ستاره‌های رنگ آبی نمایش داده شده‌اند را در سه بازه مختلف انتقال به سرخ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، تعداد کهکشان‌های ادغامی در

انتقال به سرخ‌های بالای یک بیشتر است که یکی از دلایل آن افزایش تعداد نمونه آماری کلی کهکشان‌ها در این بازه‌های زمانی است. محاسبات نشان می‌دهند که در انتقال به سرخ‌های پایین ($z < 1$) تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد کهکشان‌های ستاره‌زا دچار ادغام می‌شوند، اما این کسر با افزایش انتقال به سرخ افزایش می‌یابد؛ که هم‌راستا با نتایج دیگر مطالعات اخیر است [۳۷-۳۴]. بر اساس ارزیابی این پژوهش، در دو بازه انتقال به سرخ بین ۱ - ۰/۵ و ۱/۵ - ۱، کسر کهکشان‌های ستاره‌زا که دچار ادغام شده‌اند در بالا و پایین رشته اصلی، تفاوت چشمگیری ندارند. به عنوان مثال در بازه انتقال به سرخ بین ۱/۵ - ۱، حدود ۴۸ درصد از کهکشان‌های ادغامی در بالای رشته اصلی و حدود ۵۲ درصد در پایین رشته اصلی قرار دارند. به بیانی دیگر، نسبت کهکشان‌های ادغامی در بالا و پایین رشته اصلی به کل کهکشان‌های ستاره‌زا با جرمی بیشتر از $\log(M) = 10/5$ جرم خورشیدی، 3 ± 28 و 4 ± 31 درصد است. این رفتار در بازه انتقال به سرخ ۰/۵ تا ۱ هم مشابه است و این نسبت به ترتیب 2 ± 10 و 2 ± 7 درصد است. در بازه انتقال به سرخ ۱/۵ تا ۲، حدود ۶۰ درصد از کهکشان‌های ادغامی در بالای رشته اصلی و حدود ۴۰ درصد در پایین رشته اصلی هستند. از آنجایی که



شکل ۴. توزیع نامزدنامزد کهکشان‌های ادغامی (ستاره‌های آبی) بر روی نمودار رشته اصلی ستاره‌زایی در انتقال به سرخ‌های مختلف. خطوط نشان‌دهنده بهترین برازش رشته اصلی از مطالعات ویتاکر و همکاران ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ هستند [۴۰ و ۴۱]. خط چین آبی، نمایانگر تغییرات اعمال شده در تعریف بهترین برازش رشته اصلی است تا از نتایج به دست آمده، اطمینان حاصل شود.



شکل ۵. مشابه با شکل ۴، با این تفاوت که نمونه کهکشان‌های ادغامی (ستاره‌های آبی) بر اساس توزیع آنها در نمودار Gini-M20 انتخاب شده‌اند.

و ۵۲ درصد می‌رسند، که حتی با نتایج ذکر شده در انتقال به سرخ‌های پایین سازگاری بهتری دارد. جهت بازبینی بیشتر، نتایج حاصل از نمونه انتخاب شده بر اساس توزیع کهکشان‌ها بر روی نمودار $Gini-M_{20}$ (شکل ۵) نیز بررسی شده‌اند. براساس تحلیل مشابه با آنچه گفته شد، از این آزمون نیز نتیجه مشابهی به دست آمده است.

به طور کلی این نتایج نشان می‌دهد که اختلاف قابل توجهی

بهترین برازش رابطه رشته اصلی ستاره‌زایی، می‌تواند در انتخاب نمونه اندکی تغییر ایجاد کند، تلاش شد تا با تغییرات اندک در این رابطه، نتایج حاصله را دوباره بررسی کنیم (خط چین آبی در شکل ۴). مشاهده شد که علی‌رغم این تغییرات، همچنان، نتایج تغییر قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهند و حتی در بازه انتقال به سرخ انتقال به سرخ ۱/۵ تا ۲، نسبت کهکشان‌های ادغامی در بالا و پایین رشته اصلی، به حدود ۴۸

در نهایت به نظر می‌رسد برای درک بهتر اثر ادغام‌ها در ستاره‌زایی و توزیع رشته اصلی کهکشان‌ها، لازم است که به جزئیات بیشتر و دقیق‌تری در خصوص مراحل ادغام، میزان گاز موجود در کهکشان‌ها در زمان ادغام، توزیع ستاره‌زایی در درون کهکشان‌های در حال ادغام و یا بررسی اثرات هسته‌های کهکشانی در ادغام‌ها نیز پرداخته شود. به عنوان مثال، برخی شواهد نشان می‌دهند که در کیهان محلی ادغام‌ها باعث فعال شدن هسته‌های کهکشانی می‌شوند [۳۸]. همچنین بایستی به این نکته هم توجه شود که نسبت جرمی ادغام‌ها در شناسایی و ردیابی ادغام‌ها اثر گذارند [۴۳]. مطالعه این موارد فراتر از این مطالعه بوده است و امید است که در آینده به آن پرداخته شود.

۵. جمع بندی

در این مطالعه نقشه‌های جرمی کهکشان‌ها با انتقال به سرخ کمتر از ۲ از پنج میدان اصلی تصاویر عمیق هابل، جهت بررسی اثر ادغام مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از نقشه‌های جرمی جهت تفکیک کهکشان‌های معمول و ادغامی، برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به تصاویر نوری دارد؛ چراکه حضور توده‌های ستاره‌زایی در تصاویر بازه‌های مختلف طول موجی تأثیر گذار است. از این رو، با استفاده از بزرگ‌ترین نمونه نقشه‌های جرمی کهکشان‌ها در انتقال به سرخ‌های بالا و بهره‌گیری از روش‌های غیرپارامتری به تفکیک این اجرام پرداخته شده است. با استفاده از این نمونه‌ها، تأثیر ادغام در افزایش ستاره‌زایی کهکشان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این کار نشان می‌دهد که ادغام‌ها تأثیر نسبتاً کمی در افزایش کلی ستاره‌زایی در کهکشان‌های ادغام شده می‌گذارند. این در سازگاری با مطالعات اخیر حتی با استفاده از روش‌های دیگر همانند یافتن جفت کهکشان‌های بسیار نزدیک (سیلوا و همکاران ۲۰۱۸ [۴۲]) است. جداسازی ادغام‌ها در مراحل مختلف، در کنار عوامل مؤثر دیگر در افزایش ستاره‌زایی و خاموشی کهکشان‌ها از قدم‌های بعدی برای بررسی بیشتر این موضوع خواهد بود.

در توزیع کهکشان‌های ادغامی در بالا و پایین رشته اصلی مشاهده نمی‌شود و توزیع تقریباً یکنواختی بین این اجرام حول رشته اصلی وجود دارد. در کنار موارد ذکر شده، در هر بازه انتقال به سرخ نیز مشاهده می‌شود که کهکشان‌های ادغامی پراکندگی و یا توزیع ستاره‌زایی مشابه با کل کهکشان‌های ستاره‌زا در بالا و پایین رشته اصلی دارند. بنابراین به نظر می‌رسد ستاره‌زایی در کهکشان‌هایی که ادغام در آنها صورت گرفته به طور ویژه افزایش چشمگیری ندارد. مطالعات اخیر توسط الیسون و همکاران ۲۰۱۳ و نپن و همکاران ۲۰۱۵ نیز بیانگر این است که به طور متوسط تغییر ایجاد شده در ستاره‌زایی در اثر ادغام، از مرتبه دو تا سه بوده که کمتر از انتظار است [۳۸ و ۳۹]. همچنین نپن و همکاران ۲۰۱۵ نشان داده‌اند که ادغام‌ها می‌توانند گاهی باعث کاهش ستاره‌زایی نیز بشوند [۳۹] که در مقام مقایسه با این مطالعه، نسبت قابل توجه کهکشان‌های ادغامی در زیر رشته اصلی ستاره‌زایی احتمالاً هم‌راستا با این موضوع باشد. البته بایستی به این نکته توجه داشت که به دلیل مشکلات رصدی و طولانی بودن نسبی زمان فرایند ادغام، امکان اندازه‌گیری ستاره‌زایی، قبل و بعد از ادغام وجود ندارد. همچنین روش به کار برده شده، عمدتاً به شناسایی ادغام‌هایی می‌پردازد که تأثیر اعوجاجی آنها بر روی نقشه‌های جرمی قابل اندازه‌گیری باشد که معمولاً بازه زمانی کمتر از ۳۰۰ میلیون سال را در بر می‌گیرد و نسبت جرمی آنها حدوداً بیشتر از یک به شش است [۲۵]. به بیانی این روش در شناسایی کهکشان‌هایی که در مراحل اولیه ادغام هستند و می‌توانند به دلیل برهمکنش، ستاره‌زایی را در کهکشان مقابل القا کنند، کاربردی نیست. بنابراین نتایج حاصله با فرض این که کهکشان‌های ادغامی در مراحل بعد از ادغام هستند، بهتر قابل ارزیابی است. علی‌رغم این، مطالعات اخیر که به بررسی این موضوع با استفاده از روش‌های دیگر همانند یافتن جفت کهکشان‌های بسیار نزدیک (سیلوا و همکاران ۲۰۱۸ [۴۲]) انجام شده است، با نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه همچنان سازگار است [۱۳].

مراجع

1. J Brinchmann, *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **351** (2004) 1151.
2. K E Whitaker, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **754** (2012) L29.
3. J S Speagle, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **214** (2014) 15.
4. E F Bell, *et al.*, *Astrophys. J.* **608** (2004) 752.
5. S M Faber, *et al.*, *Astrophys. J.* **665** (2007) 265.
6. T J Cox, *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **373** (2006) 1013.
7. R Teyssier, D Chapon, and F Bournaud, *Astrophys. J. Lett.* **720** (2010) L149.
8. W Luo, X Yang, and Y Zhang, *Astrophys. J. Lett.* **789** (2014) L16.
9. J E Barnes, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **350** (2004) 798
10. S M Niemi, *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **421** (2012) 1539.
11. L J M Davies *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **452** (2015) 616
12. A S G Robotham, *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **444** (2014) 3986.
13. W J Pearson, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **631** (2019) A51.
14. R G Abraham, S van den Bergh, and P Nair, *Astrophys. J.* **588** (2003) 218.
15. C J Conselice, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **147** (2003) 1.
16. J M Lotz, J Primack, and P Madau, *Astron. J.* **128** (2004) 163.
17. D R Law, *et al.*, *Astrophys. J.* **656** (2007) 1.
18. C Scarlata, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172** (2007) 406.
19. C J Conselice, S Rajgor, and R Myers, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **386** (2008) 909.
20. N M Förster Schreiber and S Wuyts, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **58** (2020) 661.
21. N M Förster Schreiber, *et al.*, *Astrophys. J.* **739** (2011) 45.
22. Y Guo, *et al.*, *Astrophys. J.* **757** (2012) 120.
23. S Wuyts, *et al.*, *Astrophys. J.* **753** (2012) 114.
24. M Huertas Company, *et al.*, *arXiv preprint arXiv:1406.1175* (2014).
25. A Cibinel, *et al.*, *Astrophys. J.* **805** (2015) 181.
26. R E Skelton, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **214** (2014) 24.
27. R J Williams, *et al.*, *Astrophys. J.* **691** (2009) 1879
28. M Mosleh, *et al.*, *Astrophys. J.* **905** (2020) 170M.
29. J Moustakas, *et al.*, *Astrophys. J.* **767** (2013) 50.
30. G Chabrier, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **115** (2003) 763.
31. G Bruzual and S Charlot, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **344** (2003) 1000.
32. C J Conselice, M A Bershad, and A Jangren, *Astrophys. J.* **529** (2000) 886.
33. J M Lotz, *et al.*, *Astrophys. J.* **636** (2006) 592.
34. J C Berrier, *et al.*, *Astrophys. J.* **652** (2006) 56.
35. C J Conselice, C Yang, and A F L Bluck, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **394** (2009) 1956.
36. J M Lotz, *et al.*, *Astrophys. J.* **742** (2011) 103.
37. A Rodríguez-Puebla, *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **470** (2017) 651.
38. S Ellison, *et al.*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **435** (2013) 3627.
39. J H Knapen, M Cisternas, and M Querejeta, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **454** (2015) 1742.
40. K E Whitaker, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **754** (2012) L29.
41. K E Whitaker, *et al.*, *Astrophys. J.* **795** (2014) 104.
42. A Silva, *et al.*, *Astrophys. J.* **868** (2018) 46.
43. R Nevin, *et al.*, *Astrophys. J.* **872** (2019) 76.