

مجله فیزیک کاربردی دانشگاه الزهراء (س)

شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۲

پیش‌بینی طیف پیوسته کوازارهای تابان از SDSS با $z \sim 3$ در جنگل لیمان آلفا

زینب کیامهر^۱

علیرضا آقائی^۲ و^۳

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۹

تاریخ تصویب: ۹۲/۴/۱۳

چکیده

دسته‌ای از منابع رادیویی که ظاهری شبیه ستارگان دارند اما رده‌ای از دسته‌های کهکشانی فعال هستند، کوازار می‌نامند. در طیف کوازارهای دور و در ناحیه‌ی طول موج‌های کوچکتر از تابش لیمان آلفای کوازار تعداد زیادی خطوط جذبی مشاهده می‌گردد که ناشی از هیدروژن خنثی موجود در فضای بین کهکشانی است. این خطوط جذبی که به خط لیمان آلفای هیدروژن تعلق دارند و به دلیل فراوانی بالای آن‌ها، به جنگل لیمان آلفا مشهور هستند. برای

^۱ مری گروه علوم پایه، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار؛ z.kiamehr@cmu.ac.ir

^۲ استادیار فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۳ پژوهشکده نجوم، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

پیش‌بینی طیف پیوسته کوازار در جنگل آلفا داده‌های طیفی ۲۱ کوازار تابان از SDSS با $z \sim 3$ و نسبت سیگنال به نوفه بزرگتر از ۲۰ ($S/N > 20$) و قدر ظاهری کمتر از ۱۸ ($m_g < 18$) مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله ضمن تعیین طیف پیوسته این کوازارها به روش تحلیل مولفه‌های اصلی و اندازه‌گیری میزان جذب هیدروژن خنثی فضای بین کهکشانی در انتقال به سرخ‌های متفاوت، بستگی آن به انتقال به سرخ را بررسی و با آخرین اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط گروه‌های دیگر مقایسه می‌نمایم.

واژه‌های کلیدی: کیهان‌شناسی مشاهده‌ای، طیف پیوسته کوازار، فضای بین کهکشانی، آنالیز مولفه‌های اصلی.

۱- مقدمه

کوازارها به عنوان زیرگروهی از هسته‌های کهکشانی فعال بسیار پرانرژی و دور شناخته می‌شوند. آن‌ها دسته‌ای از منابع رادیویی شبه ستاره‌ای هستند و بسیار درخشان هستند. در پیمایش SDSS^۱ بیش از ۱۰۵۰۰۰ کوازار مشاهده شده‌اند. این کوازارها دارای انتقال به سرخ در محدوده ۰/۰۶ تا بیش از ۶ می‌باشند [1-3]. در طیف کوازارهای دور و در ناحیه‌ی طول‌موج‌های کوچکتر از تابش لیمان آلفای کوازار تعداد زیادی خطوط جذبی مشاهده می‌گردد که ناشی از هیدروژن خنثی موجود در فضای بین کهکشانی است [4-5]. جهت تعیین مقدار نور جذب شده کوازار توسط فضای بین کهکشانی در انتقال به سرخ‌های مختلف بایستی طیف پیوسته کوازار در ناحیه جنگل لیمان آلفا تعیین گردد. تعیین این طیف پیوسته در طیف‌هایی با تفکیک پذیری پائین و انتقال به سرخ بالا، به دلیل فراوانی خطوط جذبی تقریباً غیرممکن است [6]. روش‌های متفاوتی در تعیین این طیف

¹ Sloan Digital Sky Survey

پیوسته وجود دارد [7-16]. هدف به کار بردن روش آمار-تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ به پیش بینی طیف پیوسته کوازارهای تابان در جنگل لیمان آلفا (قسمت آبی طیف با بازه طول موج ۱۰۲۰ تا ۱۲۱۶ آنگستروم)، با استفاده از طیف طول موج‌های بزرگتر از خط نشری لیمان-آلفای کوازار (قسمت قرمز طیف با بازه طول موج از ۱۲۱۶ تا ۱۶۰۰ آنگستروم) است [17].

۲- روش آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین طیف پیوسته کوازار

با استفاده از روش آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌توان تعداد زیادی متغیر همبسته را با تعداد محدودی متغیر مستقل جدید که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند جایگزین نمود. به این ترتیب بُعد مساله تقلیل می‌یابد و مؤلفه‌هایی از مجموعه داده شده با بیشترین تأثیر در واریانس حفظ می‌شود. هدف ما پیش‌بینی طیف پیوسته کوازار در جنگل لیمان آلفا (قسمت آبی طیف ۱۲۱۶-۱۰۲۰ آنگستروم)، با استفاده از طیف طول موج‌های بزرگتر از خط نشری لیمان آلفای کوازار (قسمت قرمز طیف ۱۶۰۰-۱۲۱۶ آنگستروم) است. این عمل با توجه به همبستگی بالایی که بین دو قسمت طیف وجود دارد و در مقاله سوزوکی و همکارانش در ۲۰۰۵ نشان داده شد، امکان‌پذیر می‌باشد. برای تعیین این طیف پیوسته ابتدا باید کوواریانس V را برای N کوازار از طریق رابطه زیر محاسبه نمود.

$$V(\lambda_m, \lambda_n) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [q_i(\lambda_m) - \mu(\lambda_m)][q_i(\lambda_n) - \mu(\lambda_n)] \quad (1)$$

با تجزیه ماتریس کوواریانس V و تولید ماتریس متعامد P می‌توان مؤلفه‌های اصلی را به‌دست آورد (A : یک ماتریس قطری است).

$$V = P^{-1} \Lambda P \quad (2)$$

ویژه مقادیر فوق را مؤلفه‌های اصلی می‌نامند که با ستون‌های ماتریس P متناظراند. ضریب وزنی C_{ij} مربوط به مؤلفه اصلی i ام طیف کوازار j ام به صورت زیر قابل محاسبه است:

¹ PCA: Principal Component Analysis

$$c_{ij} = \int_{1020}^{1600} [q_i(\lambda) - \mu(\lambda)] \varepsilon_j(\lambda) d\lambda \quad (۳)$$

این ضرایب وزنی به کل طیف (قسمت آبی و قرمز طیف) بستگی دارند. سه مرحله را برای تعیین رابطه بین قسمت‌های آبی و قرمز طیف کوازارها به کار می‌بریم: (۱)، m مؤلفه‌ی اصلی اولیه $\varepsilon_j(\lambda)$ با ضرایب وزن‌های c_{ij} را پیدا می‌کنیم. از تمام طول‌موج‌ها مربوط به هر دو قسمت آبی و قرمز طیف (۱۶۰۰-۱۰۲۰ آنگستروم) استفاده می‌کنیم. (۲)، تکرار مرحله‌ی اول البته فقط با به کار بردن قسمت قرمز طیف. مؤلفه اصلی اولیه به دست آمده در این مرحله را با $\xi_j(\lambda)$ و ضرایب وزن‌های مربوطه را با d_{ij} نشان می‌دهیم. حال می‌توان ضرایب وزن‌ها را در ماتریسی $(N \times m)$ برای $C = c_{ij}$ و به طور مشابه برای $D = d_{ij}$ نوشت. (۳)، پیدا کردن ماتریس $(m \times m)$ برای $X = x_{ij}$ که تبدیل‌کننده ضرایب وزنی پیدا شده در قسمت قرمز طیف به ضرایب کل طیف است.

$$C = D.X \quad (۴)$$

حال طیف پیوسته جنگل لیمان آلفا را برای هر کوازار به کمک مؤلفه‌های اصلی و صرفاً قسمت قرمز طیف بازسازی می‌نماییم. برای به دست آوردن طیف پیش‌بینی شده سه مرحله زیر را انجام می‌دهیم: (۱)، پیدا کردن ضرایب وزن‌ها برای قسمت قرمز طیف.

$$b_{ij} = \int_{1216}^{1600} [q_i(\lambda) - \mu(\lambda)] \xi_j(\lambda) d\lambda \quad (۵)$$

(۲)، با استفاده از ضرایب وزنی به دست آمده از قسمت قرمز طیف می‌توان ضرایب وزنی کل طیف را به دست آورد.

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^m b_{ij} x_{kj} \quad (۶)$$

(۳)، ساخت طیف پیش‌بینی.

$$P_{i,m}(\lambda) = \mu(\lambda) + \sum_{j=1}^m a_{ij} \varepsilon_j(\lambda) \quad (۷)$$

با بهبود متوسط طیف مؤلفه‌های اصلی $\varepsilon_j(\lambda)$ و $\xi_j(\lambda)$ و ماتریس X می‌توان به فرضیات بهتری دست یافت [17].

انتخاب داده‌ها

نمونه آماری داده‌ها را از مجموعه بیش از ۱۰۵۰۰۰ کوازار منتشر شده در SDSS انتخاب نمودیم، تعداد ۲۱ کوازار انتقال به سرخ $z \sim 3$ و نسبت سیگنال به نوفه بزرگتر از ۲۰ و قدرظاهری کمتر از ۱۸ دارند (جدول ۱). از کوازارهای با توان جدا سازی بالا استفاده می‌کنیم ($R \sim 2000$) تا طیف‌های SDSS را متمرکز و کالیبره کنیم. تعداد کمی از کوازارهای با خطوط طیفی خاص را که در گستره‌ی طول موج از ۱۰۲۰ تا ۱۶۰۰ آنگستروم قرار دارند در نظر می‌گیریم. کوازارهای مورد مطالعه در اینجا، با داشتن محدوده‌ی کامل جنگل لیمان آلفا و نسبت سیگنال به نوفه بالا انتخاب می‌شوند. بدین منظور نیاز به کوازارهایی با انتقال به سرخ بیشتر از $2/82$ و پائین‌تر ۳ داریم. محدود کردن بازه‌ی انتقال به سرخ به دو دلیل است: جنگل لیمان آلفا برای کوازارهای با $z \geq 2/7$ کامل است. گاهی یونیزه کردن شار در انتهای قسمت آبی طیف‌های SDSS مشکلاتی را به همراه دارد که برای رفع آن این بازه را در نظر می‌گیریم. در این خطوط طیفی و با توجه به حضور سیستم‌های DLA^1 که در انتقال به سرخ بزرگتر از $3/7$ مشاهده می‌شود، انتظار می‌رود شار برای $\lambda_{obs} \leq 4280 \text{ \AA}$ صفر باشد. توجه داشته باشید که به جای آن، شار برای طول موج‌های کمتر از ۴۰۰۰ آنگستروم افزایش می‌یابد. این اختلاف شار با مقدار صفر برای یک طیف نرمالیزه شده، به این معنی است که این بخش از طیف احتمالاً نباید در تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گیرد. از آنجائی که معمولاً مطالعه جنگل به فراتر از خطوط نشری OVI با طول موج ۱۰۵۰ آنگستروم محدود می‌شود حداقل انتقال به سرخ $2/82$ خواهد بود. در حد بالا تعداد خطوط طیفی جهت تخمین دقیق یک طیف پیوسته توسط محقق معمولاً درباره تعداد خطوط طیف مورد نیاز برای تحلیل طیف توافق در این جا مجموعه مورد توافق $z=3$ را در بر دارد از طرفی خطوط طیفی با توان جدا سازی یا وضوح بالا و نسبت سیگنال به نوفه بزرگتر از ۲۰ انتخاب شدند، زیرا فرمول‌بندی استاندارد PCA پیکسل نوفه را در بر نمی‌گیرد، در حالی که اکثر کوازارهای مشاهده شده در SDSS نسبت سیگنال به نوفه پائین دارند ($S/N < 10$). فرانسیس و همکاران در سال ۱۹۹۲ استدلال کردند که

^۱ سیستم‌های لیمان آلفای میرا شده

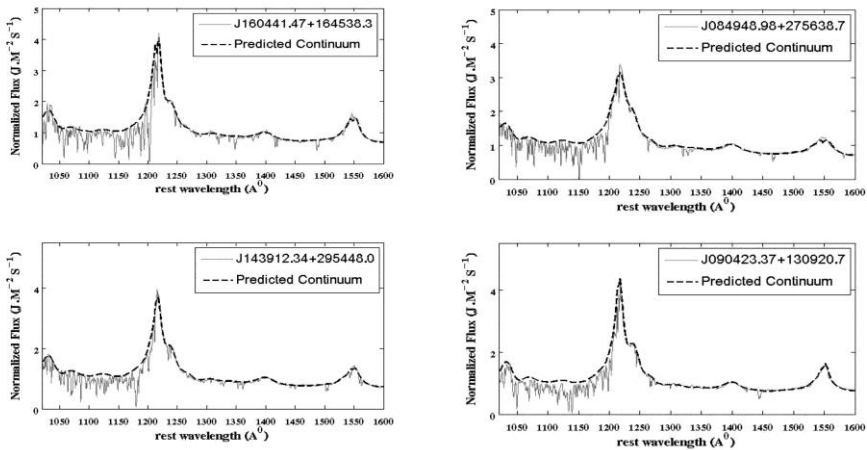
خطاهای طیف‌های پیوسته برازش شده بر طیف‌های مشاهده‌شده به‌طور مستقیم از مقیاس سطح نوفه ناشی می‌شوند [18]. پس طیف‌هایی با وضوح و نسبت سیگنال به نوفه بالا می‌توانند در رسیدن به منحنی‌های خطوط نشری ضعیف و کاهش خطاها در پیش‌بینی طیف پیوسته برازش شده ابتدائی و طولانی‌تر شدن گستره‌ی طول موج در قسمت قرمز طیف به ما کمک کنند. انتظار نداریم تفاوت انتقال به سرخ‌ها بین کوازارهای DR7 یک مسئله‌ی مهم باشد، حتی برای کوازارهای سوزوکی و همکاران، (۲۰۰۵)، به این دلیل که طی مطالعات مختلف گفته شد که سیر تکاملی کمی در انتقال به سرخ خطوط طیفی کوازارها وجود دارند. با این حال، واضح است که منحنی خطوط طیفی کوازارها به مقدار قابل توجهی به میزان تابندگی بستگی دارد، مانند اثر شناخته‌شده‌ی بالدوین که بین توان خط نشری CVI در طول موج ۱۵۴۹ آنگستروم و تابندگی کوازار ارتباطی وجود ندارد. از این رو با بررسی کوازارهای تابان با قدر ظاهری کمتر از ۱۸ منطقی به‌نظر می‌رسد که تفاوتی معنی‌دار در منحنی‌های خطوط طیفی ارائه‌شده در این جا و طیف‌های مقایسه‌شده در مقاله سوزوکی و همکاران وجود دارد، دلیل این است که نمونه آماری سوزوکی و همکاران، از کوازارهای نزدیک با تابندگی نسبتاً کم تشکیل شده که با کوازارهای مورد مطالعه در این جا متفاوت است. کوازارهای SDSS-DR7 تابندگی معمولی دارند در حالی که کوازارهای سوزوکی و کوازارهای ما، به ترتیب ضعیف‌تر و روشن‌تر هستند. با این حال، ترکیب توزیع‌های تابندگی کوازارهای مقایسه‌شده در این جا به‌طور قابل توجهی در تمام گستره‌ی کوازارهای SDSS-DR7 با یکدیگر هم‌پوشانی دارند [19]. با اعمال روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، طیف پیوسته این کوازارهای تابان در ناحیه جنگل لیمان‌آلفا پیش‌بینی شد [17]. برای تمام کوازارهای مذکور کارهای زیر به ترتیب انجام می‌گیرد: ابتدا باید طیف‌ها را به طیف مشاهده‌ای در چارچوب ناظر ساکن انتقال داد:

$$\lambda_f = \lambda_i / (z_i + 1) \quad (۸)$$

λ_f , λ_i طول موج کوازار در چارچوب ناظر ساکن و طول موج مشاهده‌ای کوازار و Z_i انتقال به سرخ است. گستره طول موج را به صورت زیر با گام ۰/۵ آنگستروم در نظر می‌گیریم:

$$1020 \leq \lambda_{Rest\ Frame} \leq 1600 \quad (9)$$

برای به‌دست آوردن طیف بهنجار ابتدا میانگین شار ۲۱ پیکسل حول ۱۲۸۰ آنگستروم را به‌دست آورده شار هر کوازار را بر میانگین مربوطه تقسیم می‌کنیم. بر طیف حاصل توسط نرم‌افزار متلب، طیف بهنجاری را برازش می‌کنیم با این شرط که این طیف خطوط جذبی را حذف و تنها خطوط نشری را به هم وصل کند. برای پیش‌بینی طیف پیوسته با استفاده از معادله (۵) ضرایب وزنی قسمت قرمز طیف را به‌دست می‌آوریم. در مرحله بعد با استفاده از ضرایب وزنی قسمت قرمز طیف مرحله پیش ماتریس تبدیل‌کننده ضرایب وزنی قسمت آبی و قرمز طیف، ضرایب وزنی کل طیف را با استفاده از معادله (۶) به دست می‌آوریم. در پایان با استفاده از این ضرایب طبق معادله (۷) می‌توان طیف پیوسته مربوط به کل طیف را پیش‌بینی کرد. به عنوان نمونه در شکل ۱ طیف مشاهده‌ای و طیف پیش‌بینی شده با این روش برای تعداد چهار کوازار جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: طیف پیوسته کوازارهای ردیف ۴، ۱۳، ۱۷ و ۲۱ به‌دست آمده با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی.

جدول ۱: لیست کوازارهای با انتقال به سرخ $z \sim 3$ ، قدر ظاهری کمتر از ۱۸ و $S/N > 20$

۴۰ / پیش‌بینی طیف پیوسته کوازارهای تابانی از SDSS با $z=3$ در جنگل لیمان آلفا

QSO	z	S/N	m_g
J123549.46+591027.0	۲/۸۲	۲۸/۹	۱۷/۰۵۳
J020950.71-000506.4	۲/۸۴۱	۲۹/۱	۱۷/۰۲۶
J103249.88+054118.3	۲/۸۴۵	۲۸/۴	۱۷/۳۴۷
J084948.98+275638.7	۲/۸۴۸	۲۱/۴	۱۷/۹۶۴
J012156.03+144823.9	۲/۸۶۹	۳۱/۱	۱۷/۴۲۲
J160843.90+071508.6	۲/۸۷۵	۳۵/۳	۱۷/۸۰۳
J105236.34+253956.1	۲/۸۷۸	۲۳/۶	۱۷/۸۵۳
J093207.46+365745.5	۲/۸۹۳	۲۷	۱۷/۶۹۶
J135044.66+571642.9	۲/۸۹۶	۲۷/۳	۱۷/۴۴۵
J003311.34-171041.5	۲/۹۰۵	۲۰/۶	۱۷/۹۷۳
J152119.68-004818.7	۲/۹۳۳۹	۲۵/۵	۱۷/۹۳۲
J075326.11+403038.6	۲/۹۲۹	۲۰/۹	۱۷/۹۱۷
J160441.47+164538.3	۲/۹۳۲	۳۸	۱۶/۹۰۸
J111038.63+483115.6	۲/۹۵۳	۳۳	۱۶/۷۹۲
J130337.21+194926.7	۲/۹۵۳	۲۲/۵	۱۷/۸۴۴
J134811.76+281801.8	۲/۹۶۵۵	۳۹/۴	۱۷/۵۶۶
J090423.37+130920.7	۲/۹۶۸	۳۰/۶	۱۷/۵۹۶
J120331.29+152254.7	۲/۹۷۶۳	۳۲/۷	۱۷/۹۳۳
J132255.66+391207.9	۲/۹۷۸	۲۵/۴	۱۷/۷۵۲
J120006.25+312630.8	۲/۹۸۴	۳۴	۱۷/۶۱۹
J143912.34+295448.0	۲/۹۹۲۳	۲۴/۱	۱۷/۶۵۴

۳- تعیین مقدار متوسط جذب هیدروژن خنثی

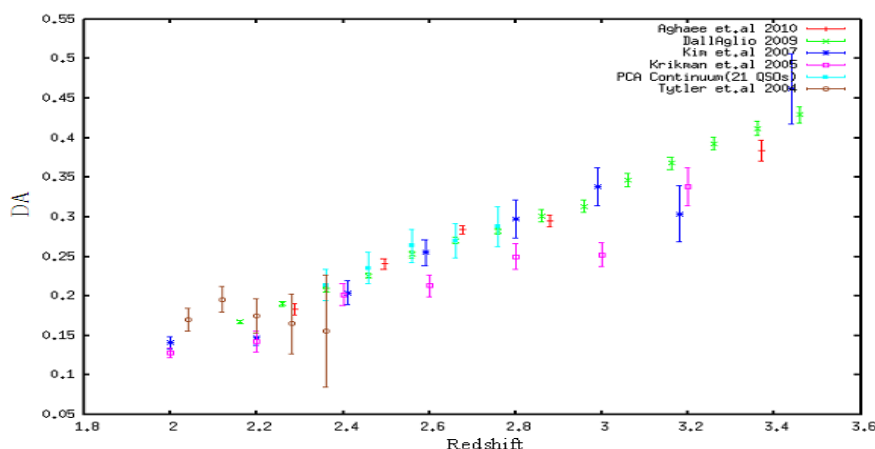
پس از تعیین طیف پیوسته برای تمامی کوازارها و به منظور تعیین مقدار متوسط جذب هیدروژن خنثی توسط فضای بین کهکشانی، پارامتر DA که طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود را در ناحیه‌ی جنگل لیمان آلفا محاسبه می‌کنیم.

$$DA = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{(F_{cont} - F_{obs})}{F_{cont}} d\lambda \quad (10)$$

برای این که از اثر نزدیکی به کوازار بر حذر باشیم گستره‌ی طول موجی انتخابی برای محاسبه‌ی DA را بین $\lambda_{Ly\alpha}(1 - 5000(km/s)/c)$ و $\lambda_{Ly\beta}(1 + 3000(km/s)/c)$ در نظر گرفتیم و bin هایی که کمتر از ده کوازار داشتند را کنار گذاشتیم (در این روابط c سرعت نور است و g ام انتقال به سرخ $\Delta z=0.1$ است). مقدار متوسط جذب هیدروژن خنثی در انتقال به سرخ‌های متفاوت همواره عددی بین صفر و یک خواهد بود و عدد صفر بیانگر عدم جذب یا حداقل جذب و عدد یک بیانگر حداکثر جذب ممکن می‌باشد. مقدار متوسط جذب هیدروژن خنثی در انتقال به سرخ‌های متفاوت، اندازه‌گیری (جدول ۲) و نتایج نهائی همراه نتایج اندازه‌گیری‌های سایرین [6, 9, 14, 15, 16] جهت مقایسه در شکل ۲ آمده است. همان‌طور که از شکل قابل ملاحظه است در انتقال به سرخ‌های مختلف نتایج حاصله از کار ما با نتایج دیگران هم‌خوانی خوبی دارد. برای تحقیقات آینده ممکن است از سه روش دیگر پیش‌بینی طیف پیوسته (SL, IE, PL)، روی همین نمونه‌ی آماری استفاده شود. نتایج روش تجزیه-تحلیل مؤلفه‌های اصلی در اینجا نتایج خوبی به-همراه داشت اما فکر می‌کنیم، که بهترین روش برای تعیین طیف پیوسته کوازار احتمالاً روشی ترکیبی از این روش‌ها خواهد بود.

جدول ۲. مقدار متوسط جذب هیدروژن خنثی DA ، برحسب تابعی از طول موج

z	DA	Error
2/36	۰/۲۱۳۷	۰/۰۱۹۹۳
2/46	۰/۲۳۵۶	۰/۰۱۹۴۰
2/56	۰/۲۶۳۴	۰/۰۲۰۵۸
2/66	۰/۲۷۰۱	۰/۰۲۱۵۸
2/76	۰/۲۸۷۶	۰/۰۲۵۰۳



شکل ۲: مقدار متوسط جذب هیدروژن خنثی DA در انتقال به سرخ‌های متفاوت، با گام انتقال به سرخ $\Delta z = 0.1$ و نتایج نهائی با نتایج سایرین جهت مقایسه در شکل آمده است [6, 9, 14, 15, 16].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله از ۲۱ طیف پیوسته برآزش شده بر خطوط طیفی با انتقال به سرخ $z \sim 3$ ، $S/N > 20$ و $m_g < 18$ استفاده شد و در پایان، نتایج با سایرین مقایسه گردید. سوزوکی برای تجزیه-تحلیل مؤلفه‌های اصلی در انتقال به سرخ $z < 1$ از خطوط طیفی ۵۰ کوازار با تابندگی نسبتاً کم و نسبت سیگنال به نوفه پائین ($S/N > 10$) استفاده کرد، این کوازارها خط جذب پهن را در بر نمی‌گیرند، چون در انتقال به سرخ پائین هستند و خطوط طیفی جنگل لیمان آلفا خیلی متراکم و چگال نیستند. با استفاده از روش تجزیه-تحلیل مؤلفه‌های اصلی به توصیف تنوع طیف‌های کوازار پرداختیم و فهمیدیم که ۱۱۶۱ پیکسل (در بازه طول موجی از ۱۰۲۰ تا ۱۶۰۰ آنگستروم با گام ۰/۵ آنگستروم) می‌تواند به وسیله ضرائب وزنی هفت مؤلفه اصلی ابتدائی طیف خلاصه شود چون پیکسل‌ها مستقل نیستند اما بسیار همبسته و وابسته به همدیگر هستند. پیش‌بینی طیف پیوسته مشابه طیفی است که در انتقال به سرخ پائین اندازه‌گیری شده ($z < 1$)، اما عرض نسبی خطوط نشری در انتقال به سرخ پائین، بزرگتر است. پس از پیش‌بینی طیف پیوسته هر کوازار مقدار DA برای انتقال به سرخ‌های متفاوت با گام $\Delta z = 0.1$ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود

نتایج به دست آمده در این روش با نتایج سایر گروه‌ها هم‌خوانی و مطابقت دارد. سایر محققان می‌توانند از روش‌های دیگر برآزش طیف پیوسته روی همین کوازارها استفاده کنند و نتایج نهایی خود را با این نتایج مقایسه کنند.

۵-منابع

- [1] C. Croft, H. Weinberg, N. Katz, and L. Hernquist; "Recovery of the Power Spectrum of Mass Fluctuations from Observations of the Ly alpha Forest"; *Astrophysical Journal* **495** (1998) 44.
- [2] C. Pichon, L. Vergely, E. Rollinde, S. Colombi, and P. Petitjean; "Inversion of the Lyman α forest: three-dimensional investigation of the intergalactic medium"; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **326** (2001) 597-620.
- [3] P. McDonald, U. Seljak, R. Cen, D. H. Weinberg, S. Burles, D. P. Schneider, D. J. Schlegel, N. A. Bahcall, J. Brinkmann, Z. Ivezic, S. Kent, and D. E. Vanden Berk; "the Linear Theory Power Spectrum from the Ly α Forest in the Sloan Digital Sky Survey"; *The Astrophysical Journal* **635** (2005) 761-783.
- [4] P. Petitjean and C. Ledoux; "Damped Lyman α Systems"; *Astrophysics and Space Science* **265** (1999) 483-486.
- [5] T. Theuns; "Numerical simulations of quasar absorbers, Probing Galaxies through Quasar Absorption Lines", IAU Colloquium Proceedings of the International Astronomical Union 199, held March 14-18 2005, Shanghai, People's Republic of China, edited by Peter R. Williams, Cheng-Gang Shu and Brice Menard. Cambridge: Cambridge University Press (2005) 185-204.
- [6] A. Aghaee, P. Petitjean, R. Srianand, S. Stalin, and R. Guimarães; "Determination of the Mean HI Absorption of the Intergalactic Medium"; *Journal of Astrophysics and Astronomy* **31** (2010) 59-79.
- [7] P. Schneider, M. Schmidt, and E. Gunn; "PC 1247 + 3406 - an optically selected quasar with a redshift of 4.897"; *Astronomical Journal* **102** (1991) 837-840.
- [8] H. Press and B. Rybicki; "Properties of High-Redshift Lyman-Alpha Clouds. II. Statistical Properties of the Clouds"; *Astrophysical Journal* **418** (1993) 585.

- [9] S. Kim, J. Bolton, M. Viel, G. Haehnelt, and R. Carswell; “An improved measurement of the flux distribution of the Ly α forest in QSO absorption spectra: the effect of continuum fitting, metal contamination and noise properties”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **382** (2007) 1657-1674.
- [10] M. Bernardi, R. K. Sheth, M. SubbaRao, G.T. Richards, S. Burles, A.J. Connolly, J. Frieman, R. Nichol, J. Schaye, D.P. Schneider, et al; “A Feature at $z \sim 3.2$ in the Evolution of the Ly α Forest Optical Depth”, *The Astronomical Journal* **125** (2003) 32-52.
- [11] U. Seljak and R. Cen; “Precision cosmology from the Lyman α forest: power spectrum and bispectrum”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **344** (2003) 776-788.
- [12] B. Aracil, P. Petitjean, C. Pichon, and J. Bergeron; “Metals in the intergalactic medium”; *Astronomy and Astrophysics* **419** (2004) 811-819.
- [13] A. Songaila; “the Evolution of the Intergalactic Medium Transmission to Redshift 6”; *The Astronomical Journal* **127** (2004) 2598-2603.
- [14] D. Tytler, D. Kirkman, M. O'Meara, N. Suzuki, A. Orin, and D. Lubin; “Mean amount of Absorption from the Intergalactic Medium”; American Astronomical Society Meeting 205, #129.06; *Bulletin of the American Astronomical Society* **36** (2004) 1557.
- [15] D. Kirkman et al; “The HI opacity of the intergalactic medium at redshifts $1.6 < z < 3.2$ ”; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **360** (2005) 1373-1380.
- [16] A. Dall’Aglio, L. Wisotzki, and G. Worseck; “the UV background photoionization rate at $2.3 < z < 4.6$ as measured from the Sloan Digital Sky Survey”; *Submitted to the Astrophysical Journal*, astro-ph/0906, **1484** (2009) 1-14.
- [17] N. Suzuki, D. Tytler, M. John, and D. Lubin; “Predicting QSO Continua in the Iya Forest”; *Astrophysical Journal* **618** (2005) 592-600.
- [18] J. Francis, C. Hewett, B. Foltz, and H. Chaffee; “an objective classification scheme for QSO spectra”; *Astrophysical Journal* **398** (1992) 476-490.
- [19] G. Lee, N. Suzuki, and N. Spergel; “Mean-flux-regulated Principal Component Analysis Continuum Fitting of Sloan Digital Sky Survey Ly α Forest Spectra”; *The Astronomical Journal* **143** (2011) 51.