بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی اپتیکی طیف‌سنج چند شیئ با توان تفکیک بالا برای تلسکوپ رصدخانه ملی ایران

سارا خداجوی کویشاهی [۱] ؛ معصومه دشتدار [۱و۲]

[۱]دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی؛ تهران اوین

[۲]رصدخانه ملی ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

چکیده- هدف این پژوهش طراحی سیستم اپتیکی است که بتواند از خروجی تلسکوپ رصد خانه ملی ایران با قطر ۳/۴ متر، طیف و تصویر بگیرد. طیف‌سنج چند شئ مورد نظر که با نرم افزار زیمکس طراحی شده است، دارای توان تفکیکی در حدود ۴۰۰۰ بوده و برای بازه بسیار بزرگ طیفی ۳۵۰ تا ۹۵۰ نانومتر بهینه شده است. به عبارت دیگر این طیف‌سنج طیف‌های ناحیه فرابنفش، مرئی و فروسرخ را تا حد بسیار مطلوبی تفکیک می‌کند. این سیستم که برای میدان‌دید ۶ دقیقه قوسی در آسمان بهینه شده است، قابلیت آن‌را دارد که ۹۸ درصد انرژی دریافت شده را در فضای ۲ × ۲ پیکسل از آشکارساز محصور نماید و همچنین تمامی سطوح کروی بکاررفته در این طیف سنج، ضمن کاهش هزینه‌های ساخت، فرایند ساخت آن‌را نیز تسهیل می‌کنند. در این پژوهش ضمن شرح جزئیات بخش‌های مختلف این طیف‌سنج، به بیان قابلیت‌های آن پرداخته خواهد شد.

کلید واژه- توان‌تفکیک، زیمکس، سیستم اپتیکی، طیف‌سنج، میدان دید.

The Optical Design of a Multi Object and high Resolution Spectrometer for Iranian National Observatory Telescope

Sara Khodajoye Kavishahi[1]; Masoomeh Dashtdar[1, 2]

[1]Department of Physics, Shahid Beheshti University; Tehran, Evin

[2]Iranian National Observatory, Institute for research in fundamental science (IPM)

Abstract- Our goal in this research is to design an optical system that can take the spectrum and picture of the Iranian National Observatory (INO) telescope output with a diameter of 3/4 meter. This multi object spectrometer that is designed by Zemax software has a spectral resolution of about 4000, and has been optimized for 350 to 950 nm spectral range. In other words, this spectrometer separate, very good, ultraviolet, visible and infrared region of the spectrum. This system is optimized for 6 arc min field of view in the sky. The system also has the capability to enclosure 98% of the received energy in the space of 2 × 2 pixels of the detector. Also, all surfaces are spherical that reduce cost and facilitate fabrication. In this paper, we present a detailed description of different sections of the spectrometer and its capabilities.

Keywords: Spectral resolution, Zemax, Optical system, Spectrometer, Field of view.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

۱- مقدمه

طیف‌سنجی از دیرباز یکی از مهمترین ابزارهای در دسترس منجمان برای انجام محاسبات نجومی و کیهانی در فضاست که این امر تنها با در دست‌داشتن طیف‌سنج‌های دقیق قابل دسترسی است. طیف‌سنج ها متناسب با اهداف نجومی، در بازه های طیفی متفاوت، با قدرت تفکیک مختلف، به صورت تک شیئی یا چند شیئی (توانایی طیف سنجی چند هدف نجومی را هم زمان دارد) طراحی شده اند. در این مقاله برای اولین بار طیف سنج چند شیئی برای تلسکوپ رصدخانه ملی ایران طراحی شده است. این طیف‌سنج برای میدان دید ۶ دقیقه قوسی بهینه شده و دارای توان تفکیکی در حدود ۴۰۰۰ است، که در گروه طیف‌سنج‌ها با توان تفکیک بالا قرار می‌گیرد. گفتنی است که تمامی طیف‌سنج‌هایی که با چنین توان تفکیکی تاکنون برای تلسکوپ های مختلف دنیا طراحی شده-اند، بازه طیفی بسیار محدودی را تحت پوشش قرار می‌دهند، در حالی‌که این طیف‌سنج قابلیت آن‌را دارد که طیف‌ها در ناحیه فرابنفش، مرئی و فروسخ را به طور همزمان، تا حد بسیار مطلوبی تفکیک نماید.

۲- اهداف و محدودیت‌های کلی در طراحی

از ویژگی‌های اساسی تلسکوپ ها که تا حد زیادی تعیین کننده شکل نهایی طیف‌سنج طراحی شده برای آن ها است: قطر روزنه، نسبت کانونی و پهنای شکاف (معادل با دید جوی در مکان تلسکوپ) است. قطر روزنه تلسکوپ ملی ایران، ۳/۴متر، نسبت کانونی ۱۱/۲۳ و پهنای شکاف ۰/۵ ثانیه قوسی در آسمان است. علاوه بر مشخصات تلسکوپ، ابعاد و اندازه پیکسل های آشکار ساز عامل موثری دیگری در طراحی اپتیکی طیف سنج به شمار می رود که ایجاد محدودیت در فاصله کانونی دوربین به کار رفته در سیستم خواهد کرد[۱]. آشکار ساز مد نظر دارای ابعاد $4k\times4k$ با اندازه پیکسل ۱۵ میکرون است. با توجه به ابعاد آشکار ساز و تفکیک مورد نیاز، توری با تعداد خطوط توری ۶۰۰ خط بر میلی‌متر به عنوان قطعه پراش دهنده نور انتخاب شد. به کمک معادله توری پراش، $a(sin\theta_i + sin\theta_m) = m\lambda$، می توان زاویه بین بالاترین و پایین ترین طول موج را محاسبه نمود و از طریق تطبیق آن با ابعاد آشکارساز، فاصله کانونی مناسب را برای دوربین تخمین زد. اگر f_2 فاصله کانونی دوربین و φ زاویه بین بالاترین و پایین‌ترین طول موج باشد، آن گاه مساحتی از آشکارساز که با طیف دریافت شده روشن خواهد شد برابر است با: $X = 2f_2 \tan\frac{\varphi}{2}$. از سوی دیگر اگر θ میدان دید تلسکوپ برحسب درجه و f_t فاصله کانونی کل سیستم باشد، آن گاه جابجایی طیفی روی آشکارساز برای میدان دید ۶ دقیقه قوسی برابر با $x = f_t \tan\theta$ است. حال f_2 باید به گونه‌ای انتخاب شود که رابطه $X + x < 4k$ برقرار باشد. برای طول موج های ۳۵۰ تا ۹۵۰ نانومتر، $\varphi = 11.32°$ بوده و f_2 برای برقراری شرط بالا حدود ۱۳۰ mm در نظر گرفته شده است. در زیر شرایط کلی حاکم بر محاسبات اولیه مربوط به طراحی طیف-سنج که علاوه بر بالا بردن توان تفکیک سیستم، کمک می‌کند تا طیف‌سنج ارائه شده، هیچ یک از پرتوهایی را که در میدان-دید ۶ دقیقه قوسی قرار دارند (میدان‌دید مطلوب برای تلسکوپ ملی ایران) از دست ندهد، بیان شده است[۲]:

شرط اول: $F_c < F_T$ ، که F_c نسبت کانونی موازی کننده و F_T نسبت کانونی تلسکوپ است.

شرط دوم: $r > 1$، که r، فاکتور تغییر شکل دهنده سیستم بوده، و از رابطه زیر محاسبه می‌شود: $r = \frac{\cos\alpha}{\cos\beta}$ در این رابطه α زاویه ورودی به سطح توری و β زاویه پراش است.

شرط سوم: $\frac{f_1}{f_2} \geq 2$، که f_1 و f_2 به ترتیب فاصله کانونی موازی کننده و دوربین هستند.

شرط چهارم: $\frac{f_2}{d_2} \geq F_o$، که f_2 و F_o به ترتیب، فاصله کانونی و نسبت کانونی دوربین و d_2 قطر باریکه خروجی از توری پراش است.

توان تفکیک با توجه به مشخصات ذکر شده برای قسمت های مختلف طیف سنج و پهنا در نصف ماکزیمم از تصویر ستاره بر روی آشکار ساز در راستای پاشندگی، $FWHM_t$، به دست می آید که برابر است با $R = \frac{r.f_2}{FWHM_t}(tan\alpha + \frac{sin\beta}{cos\alpha})$.

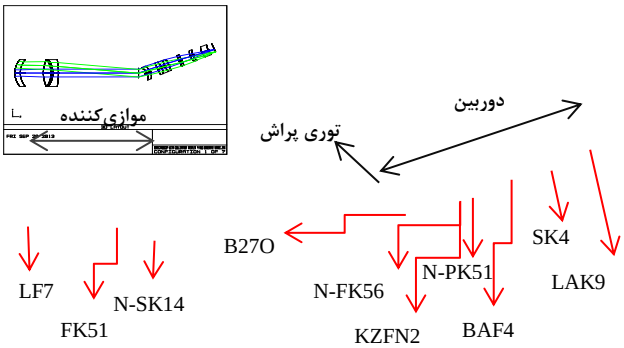
۳- پیکربندی اپتیکی

در شکل (۱) پیکر بندی اپتیکی طیف‌سنج، که دارای سه بخش اصلی موازی‌کننده، توری پراش و دوربین است، به همراه نام شیشه به کار رفته در هر عدسی نمایش داده شده است، که همگی از فهرست محصولات شرکت شات (schott) انتخاب شده اند. در ادامه به تشریح این بخش‌ها خواهیم پرداخت.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

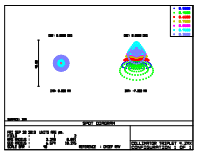
۳-۱- موازی‌کننده

موازی‌کننده از ۳ عدسی تشکیل شده است که پرتو ها را در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از کانون تلسکوپ دریافت می‌کند.



شکل۱: پیکربندی اپتیکی طیف‌سنج شامل موازی‌کننده، توری‌پراش و دوربین

عدسی اول نقش اصلی را در موازی کردن پرتوها بر عهده دارد و دو عدسی دیگر به منظور تصحیح ابیراهی‌های موجود در سیستم به کار گرفته شده‌اند. فاصله کانونی موازی‌کننده ۳۵۷/۲۴۴ میلی‌متر بوده و نسبت کانونی آن ۶/۵ است. طول کلی سیستم ۲۰ سانتی‌متر است. می توان به طور واضح مشاهده نمود که شرط اول در طراحی موازی‌کننده کاملا برقرار است. در شکل (۲) تصویر نقطه‌ای موازی‌کننده در صفحه کانونی آن، که با قرار دادن یک سطح پاراکسیال در مقابلش تصویر گیری شده، نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، مشکل ابیراهی تا حد مطلوبی رفع شده است[۳].



شکل ۲: تصویر نقطه ای موازی‌کننده در صفحه کانونی آن، که توسط قرار دادن یک سطح پاراکسیال در مقابل موازی‌کننده ثبت شده است.

در شکل(۲) مقدار ریشه مربع متوسط شعاع(RMS radius) برای میدان‌های دید صفر و ۶ دقیقه قوسی محاسبه و نمایش داده شده است، که به ترتیب ۳ و ۸ میکرون هستند. از آنجا که اندازه هر پیکسل آشکارساز در حدود ۱۵ میکرون است، مقادیر فوق کیفیت بالای موازی‌کننده را تأیید می‌کنند.

۳-۲- توری پراش

توری پراش شامل ۶۰۰ خط بر میلی‌متر بوده و در فاصله ۲۹ سانتی‌متری از آخرین عدسی موازی‌کننده قرار دارد. زاویه برخورد پرتوها به سطح توری نزدیک به خط عمود بوده و زاویه پراش برای طول موج میانی با ۶۵۰ nm ، در حدود ۲۳° خواهد بود. در اینجا می‌توان برقرار بودن شرط دوم در طراحی یک طیف‌سنج را، برای طول موج میانی، مورد بررسی قرار داد. طبق تعریف داریم: $r=\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}=1.08$. از آنجا که $r>1$ است پس شرط دوم برقرار خواهد بود. حال اگر به جای توری عبوری، از توری فروزیده با زاویه فروزش $۱۷/۵^\circ$ استفاده نماییم، تنها کافیست که دوربین را در زاویه $۲۴/۷۳^\circ$ نسبت به توری قرار دهیم تا به همین تفکیک دست یابیم.

۳-۳- دوربین

سیستم کانونی‌کننده یا دوربین به کار رفته در این طیف‌سنج، شامل یک عدسی سه‌گانه و چهار عدسی منفرد است. طول کلی سیستم ۲۹/۷ cm بوده و دارای فاصله کانونی ۱۲۹/۹۷۳ mm است. نسبت کانونی آن ۲/۹۵ است. به خوبی می‌توان مشاهده نمود که شرط سوم نیز که در طراحی طیف‌سنج باید مد نظر قرار گیرد، کاملا برقرار است.

در بررسی شرط چهارم قبل از هر چیز باید d_2 را محاسبه کنیم. $d_2=\frac{\cos\beta}{\cos\alpha}\cdot\frac{f_1}{f_2}+\frac{X.P.N}{f_2}$، که در این رابطه $X=30mm$ فاصله بین توری و اولین عدسی کانونی‌کننده، $p=15\mu$ اندازه هر پیکسل آشکارساز و $N=4k=4096$ تعداد پیکسل‌های آشکارساز مورد نظر است. برای طول موج ۶۵۰ nm ، $\alpha=0^\circ$ و $\beta=22.95^\circ$ است. با قرار دادن مقادیر فوق در معادله، مقدار ۴۳/۴۳ mm برای d_2 محاسبه خواهد شد. و داریم: $\frac{f_2}{d_2}=3$، که این مقدار بزرگتر از $F_o=2.95$، نسبت کانونی دوربین است. بنابراین شرط آخر نیز در اینجا برقرار است.

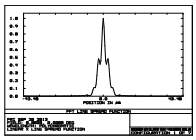
در شکل (۳) تصویر نقطه‌ای پرتوها را در صفحه کانونی دوربین،

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

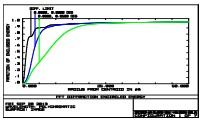
برای میدان‌دید °۲۳- تا °۲۳ نشان داده شده است. این میدان با توجه به زاویه پراش توری برای طول موج‌های مختلف محاسبه شده است. که بزرگترین آن‌ها در حدود ۶ میکرون است. اندازه لکه برای هر طول موج در صفحه کانونی طیف-سنج، محدوده‌ای کمتر از یک پیکسل را به خود اختصاص می-دهد. به این روش تصویرگیری، که در آن نور دریافت شده، در فضایی کمتر از یک پیکسل کانونی می‌شود، اصطلاحا نمونه برداری کم می‌گویند[۴]. که این امر ناشی از افزایش کیفیت اطلاعات و کاهش نویز در سیستم است. این طیف‌سنج برای زاویه دید ۳۶۰ ثانیه قوسی در آسمان بهینه شده است که در شکل (۴) پاسخ ضربه‌ای سیستم برای طول موج ۵۵۰ نانومتر و میدان‌دید صفر درجه، نشان داده

شکل۳: اندازه لکه در صفحه کانونی دوربین، به ترتیب از چپ به راست برای طول موجهای ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰، ۶۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ نانومتر

شده است. حد فاصل دو خط قرمز محدوده یک پیکسل را نشان می دهد. در شکل (۶) نیز نمودار انرژی محصور در سطح آشکارساز برای کل سیستم دیده می شود که با محدوده پراش مقایسه شده است. در این شکل می‌توان مشاهده نمود که ۹۸ درصد انرژی در مساحت ۲×۲ پیکسل از سطح آشکارساز محصور شده است[۵]. این سطح انرژی همان طور کاملا با محدوده پرلش قابل مقایسه است.



شکل ۴: پاسخ ضربه‌ای سیتم برای طول‌موج ۵۵۰ نانومتر و میدان‌دید صفر درجه، حد فاصل بین دو خط قرمز، محدوده یک پیکسل را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمودار انرژی پراش در سطح آشکارساز برای همه طول موج ها و میدان دید صفر و ۶ دقیقه قوسی طیف‌سنج

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، طیف‌سنج با توان‌تفکیکی در حدود ۴۰۰۰ برای تلسکوپ رصد خانه ملی ایران طراحی شده است. طیف-سنج‌هایی که تا کنون طراحی شده‌اند بازه طیفی بسیار محدودی را شامل می‌شوند اما طیف‌سنج طراحی شده، توانایی آن را دارد که بازه طیفی بسیار گسترده‌ای را پوشش دهد و به طور همزمان طیف‌ها را در ناحیه فرابنفش، مرئی و فروسرخ تا حد بسیار مطلوبی تفکیک نماید. تصویر نقطه‌ای سیستم در صفحه کانونی آن، که برای تمامی طول موج‌ها دارای شعاعی کمتر از یک پیکسل است، بیانگر کیفیت بالا در دریافت اطلاعات طیفی و کاهش نویز در تفکیک نهایی آن‌ها است. از سوی دیگر استفاده از کمترین تعداد عدسی در طراحی این سیستم موجب کاهش وزن و ابعاد آن شده است. همچنین شایان ذکر است که تمامی عدسی‌های به کار رفته در سیستم، شامل سطوح کروی هستند که این امر فرایند ساخت طیف سنج را نیز تسهیل می‌کند.

مراجع

[1] Stephen A. Smee, Robert H. Barkhouser, Karl Glazebrook, *Design of a multi-object,high throughput, low resolution fiber spectrograph for WFMOS*, **proceeding of the SPIE**, vol.6269, pp.626921, 2006

[2] Oleron, France, *Astronomical Spectroscopye for Amateurs*, **edp sciences**, vol. 47, pp. 39-71, 2011

[3] Morgan, G. E, Ringwald, F. A, Buil, C, Garrett, M, *Spectra and Light Curve Analysis of Nova V475 Scuti*, **NASA ADS**, vol. 117, pp.938-943, 2005

[4] Oleron, France, *Astronomical Spectroscopye for Amateurs*, **edp sciences**, vol. 47, pp. 39-71, 2011

[5] Jian Ge, Alex Kutyerv, Bruce Dean, Harvey Moseley, bruc .Woodgate&Cathy Marx, *the Optical design of rapid infrared-visible multi-object spectrometer: a NGST Demonstration Instrument*, **proceeding of the SPIE**, vol.4850, pp.535-543, 2003

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]