




Design of a type of optical optical spectrometer in the UV- A spectral region

A. Rezaei-latifi * 

Associate Professor, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

(Received: 19/05/2023 revised: 07/08/2023 Accepted:12/09/2023 published: 07/11/2023)

DOR:<https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.12.5>

Abstract


An optical spectrometer is a tool used to separate an electromagnetic radiation into its wavelength components and has a variety of applications in science and industry. . In this paper, an optical spectrometer in the UV-A spectral region, which has not been investigated before, is designed. For this design, a holographic diffraction grating with a groove density of 3600 lines/mm and a number of lenses with different materials suitable for the ultraviolet region are used. To achieve high contrast and resolution, the beams of each wavelength scattered by the grating must be carefully focused on the detector screen. For this purpose, eight lenses made of silica and fused silica, which have a high transfer coefficient in the ultraviolet region, were used. Then, after the initial calculations and determining the estimated radius of curvature of the surfaces, in order to achieve the desired results, the lenses were placed at a distance of 1 mm from each other and by using appropriate operands defined in the merit function editor of Zemax software, the thickness of the surfaces and the radius of curvature of the lenses was optimized in several stages . After optimization, at the central wavelength, all points of the spot diagram were located inside the Airy disk and the resolution of approximately 30 pm was obtained, which is a very good result compared to the previous works of researchers in other areas of the electromagnetic spectrum.

Keywords: Spectrometer, Diffraction grating, UV-A, Resolution, Spot diagram, Airy disk

* Corresponding author E-mail: r_latifi@hormozgan.ac.ir

علمی - پژوهشی

طراحی یک نوع طیف‌سنج اپتیکی بهینه در ناحیه طیفی UV-A

علی رضائی لطیفی* 

دانشیار، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱، انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.12.5>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons Attribution توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

طیف‌سنج یا اسپکترومتر اپتیکی ابزاری است که برای جداسازی و تفکیک یک تابش الکترومغناطیسی به مولفه‌های طول‌موجی‌اش مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربرد متنوعی در علوم و صنایع دارد. در این مقاله یک اسپکترومتر اپتیکی منحصراً در ناحیه طیفی UV-A که قبلاً مورد تحقیق قرار نگرفته است طراحی شده است. برای این طراحی، از توری پراش هولوگرافی با چگالی شیار ۳۶۰۰ خط بر میلی‌متر و تعدادی عدسی با جنس‌های مختلف مناسب در ناحیه فرابنفش استفاده شده است. برای رسیدن به کنتراست و توان تفکیک بالا باید پرتوهای مربوط به هر طول موج پراشیده شده توسط توری، با دقت بالایی بر روی صفحه آشکارساز کانونی شوند. برای این منظور هشت عدسی از جنس‌های سلیکا و سلیکای ذوب شده که دارای ضریب انتقال بالایی در ناحیه فرابنفش هستند به کار برده شد. سپس بعد از محاسبات اولیه و تعیین تخمینی شعاع انحنای سطوح، جهت رسیدن به نتایج مطلوب، عدسی‌ها را به فاصله ۱ میلی‌متر از هم قرارداد و با کمک عملوندهای مناسب تعریف شده در ویرایشگر تابع شایسته نرم‌افزار زیمکس، ضخامت سطوح و شعاع انحنای عدسی‌ها در چند مرحله بهینه‌سازی شدند. پس از بهینه‌سازی، در طول موج مرکزی، تمام نقاط نمودار نقطه‌ای داخل دیسک ایری واقع شدند و توان تفکیک سامانه تقریباً ۳۰ پیکومتر به دست آمد که در مقایسه با کارهای قبلی محققان در سایر نواحی طیف الکترومغناطیسی، نتیجه بسیار مطلوبی است.

کلیدواژه‌ها: کلیدواژه‌ها: طیف‌سنج، توری پراش، فرابنفش نزدیک، توان تفکیک، نمودار نقطه‌ای، دیسک ایری.

۱- مقدمه

گاهی در میان مؤلفان بین طیف‌سنج (اسپکترومتر) و اسپکتروفوتومتر یک سردرگمی دیده می‌شود و این دو با هم اشتباه گرفته می‌شود. با این حال، یک تفاوت اساسی بین اسپکترومتر و اسپکتروفوتومتر وجود دارد. اسپکترومتر وسیله‌ای است که برای توصیف ماده بر اساس طول‌موج‌های شناسایی شده در طیف استفاده می‌شود، در حالی که اسپکتروفوتومتر ماده را بر اساس شدت نور در هر طول موج درگیر در برهم‌کنش نور با ماده (جذب، بازتاب، عبور) تجزیه و تحلیل می‌کند. در واقع اسپکترومتر قسمتی از اسپکتروفوتومتر است. یک اسپکتروفوتومتر از دو ابزار تشکیل شده است، یک اسپکترومتر برای ایجاد طول‌موج‌های مختلف با توان تفکیک معین و یک فتومتر برای اندازه‌گیری شدت نور هر طول‌موج [۱۵-۱۷]. بنابراین اسپکترومتر نور را دریافت می‌کند و آن را بر اساس طول موج جدا می‌کند و طیفی ایجاد می‌کند که شدت نسبی این طول‌موج‌های جداگانه توسط فتومتر اندازه‌گیری می‌شود. طیف‌سنج‌های نوری معمولاً شامل یک شکاف ورودی، یک توری

طیف‌سنج ابزاری است که اجزای طیفی یک موج الکترومغناطیسی را جدا و اندازه‌گیری می‌کند. طیف‌سنج اپتیکی برای جمع‌آوری اطلاعات در مورد یک ماده بر اساس نور مرئی، فرابنفش و فروسرخ که از آن خارج می‌شود، استفاده می‌شود و می‌تواند در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار بگیرد [۱-۱۰]. در این میان دامنه کاربردهای انواع طیف‌سنج‌های اپتیکی UV-VIS به سرعت در حال گسترش است و در طی سال‌های اخیر کاربردهای جدیدی گزارش شده است. سادگی، دقت و مقرون‌به‌صرفه بودن به محبوبیت این روش در زمینه‌هایی مانند داروسازی، علوم زیستی، مواد غذایی، مطالعات محیطی، پزشکی قانونی و کانی‌شناسی کمک زیادی کرده است [۱۱-۱۴].

می‌شود. طیف‌سنج UV-A می‌تواند در اسپکتروفتومترهای UV-A برای اندازه‌گیری کمی و کیفی انواع مواد معدنی و آلی که جاذب تابش UV-A هستند مورد استفاده قرار بگیرد و در زمینه‌های مختلف صنعتی، پزشکی و تحقیقات علمی مانند کنترل کیفیت مواد خام و ترکیبات بیولوژیکی، تعیین توزیع و ساختار اجزای تشکیل‌دهنده اتمسفر و تعیین ترکیب داروهای مختلف بکار برده شود. تا کنون عمده طیف‌سنج‌های اپتیکی جهت کاربرد در ناحیه طیفی مرئی طراحی و ساخته شده‌اند و پهنای باند بعضی از آنها قسمتی از ناحیه فرابنفش و یا فرورسرخ را هم در بر می‌گیرد. ولی هر چه پهنای باند گسترده‌تر باشد، به دلیل افزایش مقدار ابیراهی‌ها، محدودیت بیشتری در افزایش دقت و قدرت تفکیک میانگین ایجاد می‌شود. تصحیح ابیراهی‌ها برای طول موج کوتاه‌تر دشوارتر است؛ زیرا قطر (شعاع) دیسک ایری با طول موج رابطه مستقیم دارد (سکشن ۳ را ببینید) و از این رو برای عدد f یکسان شعاع دیسک ایری در ناحیه فرابنفش نسبت به ناحیه مرئی کوچک‌تر است؛ بنابراین نسبت شعاع RMS به شعاع دیسک ایری در ناحیه فرابنفش بزرگ‌تر از ناحیه مرئی است. یعنی در ناحیه طیفی فرابنفش، ابیراهی‌ها در مقایسه با ناحیه مرئی ضعیف‌تر تصحیح می‌شوند که معمولاً باعث می‌شود در این ناحیه قدرت تفکیک‌پذیری ضعیف‌تر باشد. هدف اصلی این تحقیق طراحی یک طیف‌سنج اپتیکی با قدرت تفکیک بالا منحصراً در پهنای باند طیفی UV-A می‌باشد که قبلاً مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته است. عناصر اپتیکی به‌کاررفته در این طراحی شامل توری پراش هولوگرافی با تعداد شکاف ۳۶۰۰ در میلی‌متر و بر خلاف بیشتر طراحی‌های محققان قبلی در این کار جهت ایجاد دسته پرتو موازی و کانونی کردن پرتوها روی آشکارساز، به‌جای آینه، از تعدادی عدسی مناسب نور فرابنفش استفاده می‌شود که باعث می‌شود به توان تفکیک بالاتری دست یابیم. در ادامه مقاله، ابتدا مواد و عناصر بکار رفته و روش انجام طراحی تشریح می‌شود و سپس نتایج به‌دست‌آمده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش طراحی

عناصر اصلی این طراحی عبارت‌اند از ۱- عدسی موازی‌ساز یا کلیماتور ۲- توری پراش ۳- عدسی‌های کانونی ساز ۴- آشکارساز (صفحه‌تصویر). جهت موازی‌سازی نور گسیل شده از چشمه نقطه‌ای، از یک عدسی دوتایی بافاصله کانونی مؤثر $50/7$ میلی‌متر و فاصله کانونی جلویی ۴۳ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متر از شرکت اپتوسیگما استفاده می‌کنیم. جنس شیشه‌های این عدسی از سیلیکا است. شیشه سیلیکا دارای ضریب انبساط حرارتی بسیار کم باکیفیت نوری خوب و انتقال‌دهنده عالی در منطقه فرابنفش است؛ بنابراین چشمه نقطه‌ای را در فاصله ۴۳ میلی‌متری این عدسی دوتایی قرار می‌دهیم تا دسته پرتو موازی جهت ورود به توری پراش ایجاد شود. پهنای

پراش یا منشور، یک آشکارساز و تعدادی آینه یا عدسی هستند و ممکن است دارای فیلترهایی جهت حذف سیگنال‌های ناخواسته باشد. علاوه بر مشخصاتی مانند حجم، وزن و هزینه ساخت که برای هر سامانه‌ای دارای اهمیت نسبی است برای یک طیف‌سنج اپتیکی قدرت تفکیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و طراحان سعی می‌کنند در پهنای باند موردنظر سامانه را با قدرت تفکیک بالایی طراحی کنند. توان یا قدرت تفکیک طیف‌سنج که به آن وضوح هم می‌گویند حداقل فاصله بین دو خط طیفی مجاور روی آشکارساز است که سامانه به‌عنوان دو طول موج مجزا از هم تشخیص می‌دهد.

اشعه فرابنفش UV قسمتی از طیف تابش الکترومغناطیسی با طول موج تقریباً ۱۸۰ تا ۴۰۰ نانومتر می‌باشد و معمولاً به باندهای طیفی زیر تقسیم‌بندی می‌شود: [۱۸]:

UV-A (فرابنفش نزدیک)، طول موج ۳۱۵-۴۰۰ نانومتر

UV-B (فرابنفش متوسط)، طول موج ۲۸۰-۳۱۵ نانومتر

UV-C (فرابنفش دور)، طول موج ۱۸۰-۲۸۰ نانومتر

ابرها و گازهای موجود در جو تمام تابش UV-C و ۹۰ درصد اشعه UV-B را جذب می‌کنند [۱۹]. بنابراین، تنها اشعه UV-A و مقدار کمی از اشعه UV-B که از خورشید ساطع می‌شود به سطح زمین می‌رسند. از این رو، UV-A اصلی‌ترین مؤلفه تابش خورشیدی در ناحیه فرابنفش است و تأثیر بیولوژیکی مهمی بر موجودات زنده دارد.

در سال‌های اخیر تعدادی اسپکترومتر اپتیکی در ناحیه مرئی و فرابنفش توسط محققان طراحی شده است. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۰۲ ریزنبرگ و همکارانش [۲۰] با کمک توری اپتیکی و آرایه‌ای از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی MEMS یک نوع اسپکترومتر کوچک در ناحیه مرئی-فرابنفش با توان تفکیک ۱٫۲ نانومتر طراحی کردند. در سال ۲۰۱۸ گوددانگ و همکارانش [۲۱] بر اساس ساختار نامتقارن و به کمک توری پراش و آینه‌های کاو یک طیف‌سنج قابل حمل در ناحیه مرئی-فرابنفش با تفکیک‌پذیری ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر طراحی کردند. در سال ۲۰۱۹ سونگ هون اوه و همکارانش [۲۲] یک طیف‌سنج پلیمری یکپارچه ساخته شده توسط لیتوگرافی چاپی UV که دارای توان تفکیک ۵ نانومتر برای محدوده طول موج ۴۰۰-۶۵۰ نانومتر بود، پیشنهاد کردند. ماژول طیف‌سنج یکپارچه پیشنهادی آنان شامل یک موجبر نوری مسطح با یک آینه مقعر، یک شبکه پراش نانو مسطح با گام غیریکنواخت، یک فیبر نوری و یک آرایه دیود نوری بود.

در این کار به کمک نرم‌افزار زیمکس یک اسپکترومتر در ناحیه طیفی فرابنفش نزدیک یعنی باند طیفی ۳۱۵-۴۰۰ نانومتر طراحی

بعد از جداسازی طول‌موج‌های مختلف اکنون باید هر طول موج در یک نقطه صفحه‌تصویر (آشکارساز) کانونی شود. کانونی سازی هم‌زمان طول‌موج‌های مختلف پرتو پراشیده توسط یک عدسی منفرد به طور مطلوب شدنی نیست؛ بنابراین در این کار از هشت عدسی از جنس‌های سلیکا و سلیکای ذوب شده استفاده شد که نحوه چیدمان و تعیین شعاع انحنای آنها در زیر توضیح داده می‌شود.

می‌خواهیم فاصله کانونی سیستم اپتیکی کانونی ساز ما حدود ۴۰ میلی‌متر بشود؛ لذا توان اپتیکی آن ۲۵ دیوپتر خواهد بود. برای این کار اگر از ۸ عدسی نازک کنار هم استفاده کنیم توان هر کدام ۳/۱ دیوپتر خواهد بود. چنانچه هر کدام از این عدسی‌ها را دو کوژ با شعاع انحنای یکسان در نظر بگیریم شعاع انحنای آنها برابر خواهد با [۲۵]:

$$R = \frac{2(n-1)}{\phi} = 320 \text{ mm}$$

در رابطه فوق ϕ توان اپتیکی و n ضریب شکست سلیکا در طول موج مرکزی است. اکنون این هشت عدسی دو کوژ که یک‌درمیان از جنس سلیکا و سلیکای ذوب شده هستند با شعاع فوق، ضخامت سه میلی‌متر و فاصله یک میلی‌متر از همدیگر قرار می‌دهیم و سپس جهت رسیدن نتیجه مطلوب به کمک تابع شایسته و عملوندهای مناسب در نرم‌افزار زیمکس، سیستم کانونی ساز را بهینه‌سازی می‌کنیم. بهینه‌سازی را در دو مرحله اصلی انجام می‌دهیم. در مرحله اول فاصله بین عدسی‌ها را متغیر در نظر می‌گیریم و به کمک عملوندهای TRAC و سایر عملوندهای در ویرایشگر تابع شایسته بهینه‌سازی کلی را انجام می‌دهیم و سپس جهت رسیدن به نتایج مطلوب‌تر هر بار شعاع برخی عدسی‌ها را متغیر گرفته و بر روی سیستم بهینه‌سازی محلی انجام می‌دهیم. در فرایند بهینه‌سازی تلاش بر این است که تابع شایسته MF را به مقدار مینیمم ممکن برسانیم. تابع شایسته طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i}$$

که در رابطه فوق W_i وزن‌آمین عملوند، V_i مقدار جاری عملوند و T_i مقدار هدف عملوند می‌باشند. در بهینه‌سازی با تغییر متغیرهای سامانه مانند جدایی بین عدسی‌ها و شعاع عدسی‌ها، مقدار جاری عملوندها به مقدار هدف آن نزدیک می‌شوند. عملوند TRAC میانگین شعاعی همه پرتوهای گسیل شده از یک نقطه چشمه را در یک طول موج معین نسبت به مرکز محاسبه می‌کند و مقدار هدف آن در فرایند بهینه‌سازی صفر در نظر گرفته می‌شود.

باند چشمه موج مطابق با باند طیفی UV-A از ۳۱۵ نانومتر تا ۴۰۰ نانومتر انتخاب شده است.

از توری پراش جهت جداسازی طول‌موج‌های مختلف نور استفاده می‌شود. پس از خروج موج از توری، پرتوهای نور در هر طول موج موازی خواهند بود. در این طراحی یک توری پراش عبوری به چگالی شیار ۳۶۰۰ خط بر میلی‌متر با ابعاد 25×25 میلی‌متر و زیر لایه شیشه کوارتز که مناسب ناحیه طیفی فرابنفش است به کار برده شده است.

اگر مطابق شکل (۱) دو پرتو موازی فرودی بر دو شکاف مجاور با زاویه‌های تابش و پراش α و β در نظر بگیریم در این صورت اختلاف راه این دو پرتو برابر است با [۲۳ و ۲۴]:

$$\Delta S = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (1)$$

برای تداخل سازنده باید اختلاف راه مضرب صحیحی از طول را مساوی یک در نظر m اگر $\Delta S = m\lambda$ موج باشد یعنی بگیریم در این صورت

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = \lambda \quad (2)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که برای α و d ثابت با تغییر طول موج، زاویه پراش β تغییر می‌کند بنابراین در پهنای طیفی A UV- طول موج‌های مختلف پس از عبور از توری با زاویه‌های پراش متفاوت از هم جدا می‌شوند.

اگر زاویه تابش را طوری در نظر بگیریم که مساوی زاویه پراش برای طول موج مرکزی λ_0 باشد در این صورت خواهیم داشت

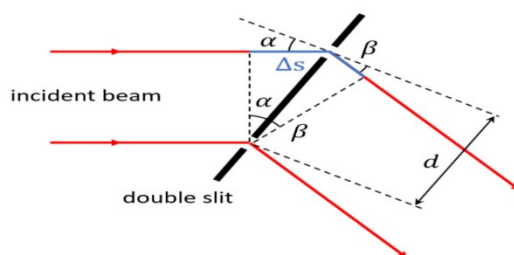
$$\sin\alpha = \frac{\lambda_0}{2d}$$

باتوجه به اینکه در این طراحی چگالی شیار برابر با ۳۶۰۰ خط بر میلی‌متر است لذا $d = \frac{1}{3600} \text{ mm}$ و بعلاوه طول موج مرکز $\lambda_0 = 357.75 \text{ nm}$ است لذا $\sin\alpha = 0.64395$ و در نتیجه $\alpha = 40.087^\circ$

باتوجه به مقدار α و d زاویه پراش مربوط به ابتدا و انتهای طیف به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\lambda = 315 \text{ nm} \rightarrow \beta_{\min} = 27.9921^\circ$$

$$\lambda = 400 \text{ nm} \rightarrow \beta_{\max} = 56.8802^\circ$$



شکل (۱): مبانی نظری توری پراش با دو شکاف [۲۳]

شعاعی هر سطح از محور اپتیکی که در آن تمام پرتوهای نور فرود می‌آیند را مشخص می‌کند. سطوح شکست مختصات سطوح فیزیکی نیستند و در این سطوح پرتوهای نور شکست و یا بازتاب پیدا نمی‌کنند. از این سطوح برای تعریف کردن یک سیستم مختصات جدید بر حسب سیستم مختصات موجود و برای چرخش یک سطح حول محورهای مختصات یا جابه‌جا کردن سطح نسبت به محور اپتیکی استفاده می‌شود.

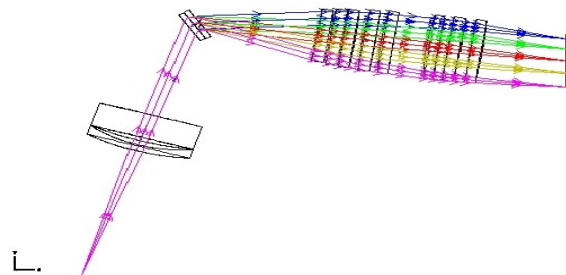
پس از انجام فرایند بهینه‌سازی، داده جدول ۱ را برای طراحی سامانه اسپکترومتر به دست می‌آوریم. در این جدول شعاع هر سطح در ستون مربوط به شعاع مشخص شده است. شعاع صفحه‌تصویر و توری پراش بی‌نهایت است؛ چون دارای سطح تخت می‌باشند. ضخامت هر سطح فاصله بین رأس هر سطح تا سطح بعدی است. ستون جنس شیشه نوع ماده هر سطح عدسی تا سطح بعدی را مشخص می‌کند. ستون نیم قطر فاصله

جدول (۱): داده طراحی سامانه اسپکترومتر

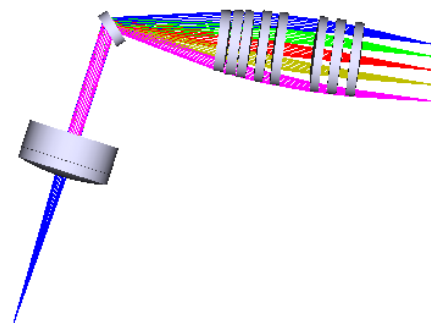
شماره سطح	نوع سطح	شعاع (میلیمتر)	ضخامت (میلیمتر)	جنس شیشه	نیم قطر (میلیمتر)	میکرومتر/خط	مرتبه پراش	چرخش حول محور X (درجه)
شی	استاندارد	بی‌نهایت	۴۲/۰۰۰		۰			
۱	استاندارد	۵۴,۴۰۰	۲/۰۰۰	SILICA	۱۳/۰۰۰			
۲	استاندارد	۳۴,۵۰۰	۱/۴۰۰		۱۳/۰۰۰			
۳	استاندارد	۶۷,۹۶۷	۹/۰۰۰	SILICA	۱۳/۰۰۰			
۴	استاندارد	-۲۸/۵۹۰	۳۰/۰۰۰		۱/۳۶۴			
۵	شکست مختصات		۰		۰			۴۰/۰۸۷
۶	استاندارد	بی‌نهایت	۱/۵۰۰	QUARTZ	۱۲/۵۰۰			
۷	توری پراش	بی‌نهایت	۱/۵۰۰	QUARTZ	۱۲/۵۰۰	۳/۶۰۰	-۱	
۸	استاندارد	بی‌نهایت	۰		۲/۰۶۸			
۹	شکست مختصات		۰		۰			۴۰/۰۸۷
۱۰	استاندارد	بی‌نهایت	۲۸/۷۵۵	SILICA	۱/۷۸۵			
۱۱	استاندارد	-۱۴۱/۲۲۵	۳/۰۰۰		۷/۷۶۵			
۱۲	استاندارد	-۷۶/۷۴۲	۰/۰۰۱	F_SILICA	۸/۲۲۸			
۱۳	استاندارد	-۴۰۰/۰۰۰	۳/۰۰۰		۸/۳۶۵			
۱۴	استاندارد	۴۰۰/۰۰۰	۰/۱۰۰	SILICA	۸/۷۲۷			
۱۵	استاندارد	۳۰۱/۷۴۲	۳/۰۰۰		۸/۷۸۵			
۱۶	استاندارد	۱۴۶/-۰۵۷	۱/۷۷۶	F_SILICA	۹/۰۷۴			
۱۷	استاندارد	۱۵۴/۵۵۷	۳/۰۰۰		۹/۳۸۹			
۱۸	استاندارد	-۳۴۴/۷۸۱	۱/۴۳۲	SILICA	۹/۵۷۴			
۱۹	استاندارد	۹۴/۸۳۵	۳/۰۰۰		۹/۷۶۴			
۲۰	استاندارد	۵۲۹/۹۶۴	۸/۰۱۵	F_SILICA	۹/۸۳۹			
۲۱	استاندارد	۷۱/۵۱۴	۳/۰۰۰		۱۰/۲۸۴			
۲۲	استاندارد	۳۹۹/۸۲۴	۲/۳۴۳	SILICA	۱۰/۲۵۶			
۲۳	استاندارد	۴۰۰	۳/۰۰۰		۱۰/۲۴۴			
۲۴	استاندارد	-۴۰۰	۲/۳۰۲	F_SILICA	۱۰/۲۱۲			
۲۵	استاندارد	۴۰۰	۳/۰۰۰		۱۰/۱۳۷			
۲۶	استاندارد	-۱۷۴/۹۶۶	۲۶/۵۰۹	SILICA	۱۰/۰۶۵			
۲۷	شکست مختصات		۰		۰			-۷/۹۷۲
تصویر	استاندارد	بی‌نهایت	-		۸/۶۴۳			

۳- نتایج و بحث

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب طرح بهینه سه‌بعدی و طرح سایه‌دار خروجی مدل را نشان می‌دهند. موج الکترومغناطیسی UV-A با پهنای طول موج ۸۵ میکرومتر به طیف‌سنج وارد می‌شود و پس از خروج از آن به طول‌موج‌های مختلف تفکیک می‌شود که در اینجا طول‌موج‌های تفکیکی نشان داده شده از ۰/۳۳۶۲۵، ۰/۳۱۵، ۰/۳۵۷۷۵، ۰/۳۷۸۷۵ و ۰/۴۰۰ میکرومتر.



شکل (۲): طرح سه‌بعدی مدل



شکل (۳): طرح مدل سایه‌دار

ابیراهی‌های مختلف موجود در هر سیستم اپتیکی مانع بزرگی برای کانونی شدن پرتوهای گسیل شده از هر نقطه شیء یا چشمه می‌باشند که این موضوع باعث کاهش کیفیت تصویر می‌شود. در این طراحی چون چشمه را نقطه‌ای روی محور اپتیکی در نظر گرفته‌ایم با ابیراهی‌های خارج محور مانند کما، واپیچش و آستیگماتیسم مواجه نمی‌باشیم و فقط ابیراهی رنگی و کروی وجود دارند. اما توری طول‌موج‌های مختلف را از هم جدا می‌کند و در اسپکترومتر بر خلاف ادواتی مانند دوربین عکاسی که سعی می‌شود تمام طول‌موج‌ها در یک نقطه متمرکز شوند، هر طول موج جداگانه بر روی صفحه تصویر متمرکز می‌شود. یعنی پس از خروج موج از توری امواج تکفامی ایجاد می‌شوند که هر کدام از این امواج تکفام در نقاط مختلف آشکارساز باید متمرکز شوند؛ لذا به دلیل تکفام بودن امواج خروجی از توری، ابیراهی رنگی نداریم و صرفاً با ابیراهی کروی مواجه می‌باشیم. بنابراین لازم است برای طول‌موج‌های مختلف ابیراهی کروی

کاهش دهیم؛ اما چنانچه به کمک عملوند SPHA ویرایشگر تابع شایسته در نرم‌افزار زی‌مکس بخواهیم ابیراهی کروی را برای طول موج مرکزی به مینیمم برسانیم ممکن است ابیراهی کروی برای سایر طول‌موج‌ها مقدار قابل توجهی باشد؛ لذا با کمک عملوندهای TRAC^۱ در تابع شایسته پیش‌فرض، سامانه طیف‌سنج بهینه‌سازی می‌شود تا مقدار ابیراهی کروی به طور هم‌زمان برای هر کدام از طول‌موج‌ها به مقدار قابل قبولی کاهش یابند. جدول (۲) مقدار ضریب ابیراهی سیدل برای ابیراهی کروی در ۵ طول موج مختلف پس از بهینه‌سازی سامانه را نشان می‌دهد.

جدول (۲): ضریب ابیراهی کروی سیدل برای طول‌موج‌های مختلف

طول موج	ضریب ابیراهی کروی سیدل
$0.31500 = \lambda_1$ μm	$w_{040} = 0.0205 \lambda_1 = 0.00645$ μm
$0.33625 = \lambda_2$ μm	$w_{040} = 0.019155 \lambda_2 = 0.00644$ μm
$0.35775 = \lambda_3$ μm	$w_{040} = 0.017985 \lambda_3 = 0.00643$ μm
$0.37875 = \lambda_4$ μm	$0.00642 \mu m = w_{040} = 0.016970 \lambda_4$
$0.40000 = \lambda_5$ μm	$0.00642 \mu m = w_{040} = 0.016052 \lambda_5$

شکل (۴) نمودار نقطه‌ای تصویر برای طول‌موج مرکزی ۰/۳۵۷۷۵ میکرومتر نشان می‌دهد. شعاع^۲ RMS و شعاع هندسی نمودار به ترتیب برابرند با ۳/۶۷۵ و ۵/۴۰۴ میکرومتر. شعاع RMS شعاع آماری پرتوها در نمودار نقطه‌ای نسبت به پرتو اصلی است و شعاع هندسی حداقل شعاع دایره‌ای با مرکزیت پرتو اصلی در نمودار نقطه‌ای است که تمام پرتوها در داخل آن واقع می‌شوند.

هنگامی که نور از دیافراگم سیستم اپتیکی می‌گذرد پدیده پراش رخ می‌دهد. الگوی پراش حاصل، یک ناحیه روشن در مرکز، همراه با یک سری حلقه‌های متحدالمرکز با شدت روبه‌کاهش در اطراف آن است که این الگو دیسک ایری^۳ نامیده می‌شود. دیسک ایری در واقع کوچک‌ترین نقطه‌ای است که پرتوهای گسیل شده از یک نقطه شیء را در غیاب هر نوع ابیراهی می‌توان متمرکز کرد. قطر دیسک ایری طبق رابطه زیر به طول موج و عدد کانونی کاری ($f \neq$) بستگی دارد [۲۶]:

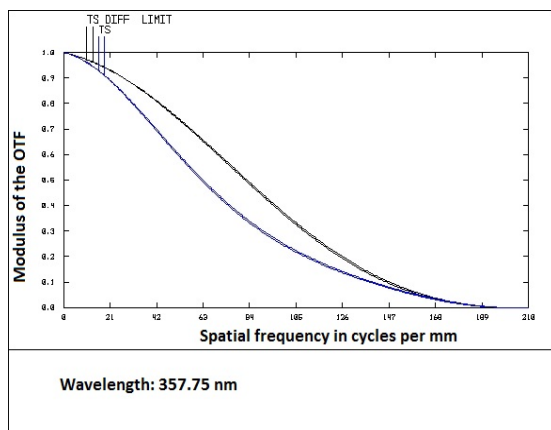
$$B_{diff} = 2.44\lambda(f/\#)$$

1-Transverse ray aberration centroided

2-Root-mean-square

3-Airy

فرکانس فضایی بر حسب واحد جفت خط بر میلی متر است و محور ν قدر مطلق تابع انتقال فاز (کنتراست) است. یک انسان به طور کلی به کنتراست ۰/۱ یا بالاتر نیاز دارد تا بتواند تفاوت خطوط را ببیند. منحنی مشکی نمودار حد پراش است که اگر سیستم اپتیکی مورد نظر، ایده آل و بدون ابیراهی باشد، نمودار MTF آن مماس بر این نمودار است. نمودار MTF برای پرتوهای مماسی T (یعنی پرتوهایی که در صفحه قائم قرار می گیرند) و پرتوهای پیکانی S (یعنی پرتوهایی که در صفحه افقی قرار می گیرند) مجزا رسم می شوند ولی در اینجا نمودار این دو پرتو برای طول موج مرکزی تقریباً بر روی هم منطبق شده است. در این شکل نمودار MTF به وضعیت ایده آل (حد پراش) نسبتاً نزدیک می باشد و نشان دهنده این است که تصویر از کنتراست مطلوبی برخوردار است. خروجی مدل نشان می دهد که با فاصله از طول موج مرکزی مقداری از کنتراست تصویر کاسته می شود ولی نتایج در حد خوبی قابل قبول است.

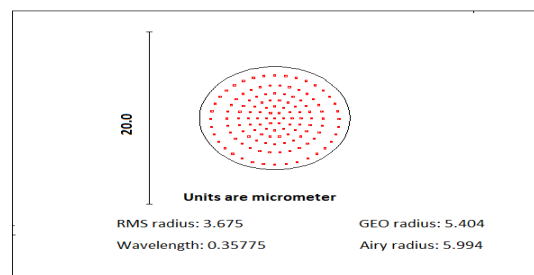


شکل (۶): تابع انتقال مدولاسیون در طول موج مرکزی

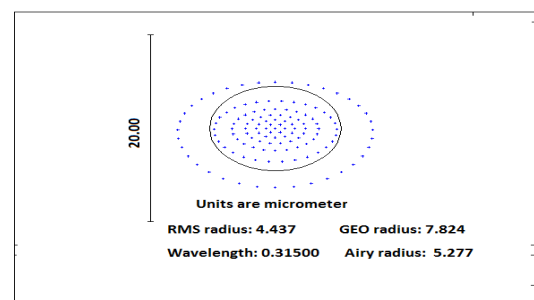
برطبق معیار ریلی اگر فاصله بین دونقطه از جسم از شعاع دیسک ایری بزرگتر باشد آن دونقطه قابل تشخیص است [۲۷]. در طیف سنج به جای دونقطه از جسم دو طول موج مختلف در صفحه تصویر از هم تفکیک می شود. در این طراحی طبق شکل (۴) برای طول موج مرکزی شعاع دیسک ایری ۵/۹۹۴ میکرومتر است. با توجه به اینکه طبق جدول ۱ پهنای آشکارساز یعنی قطر صفحه تصویر ۲۸/۱۷ میلی متر است؛ لذا با تقسیم پهنای آشکارساز به شعاع دیسک ایری عدد ۲۸۸۰ به دست می آوری؛ یعنی این تعداد طول موج در صفحه تصویر از هم قابل تشخیص است. اما پهنای باند این اسپکترومتر ۸۵ نانومتر است؛ بنابراین با تقسیم این پهنای باند به عدد ۲۸۸۰ توان تفکیک دستگاه به دست می آوری که برابر ۳۰/۵۱ ~ ۲۹ پیکو متر می شود. برای اینکه صحت نتیجه به دست آمده را چک کنیم در این طراحی فقط دو طول موج با اختلاف ۳۰ پیکو متر یعنی ۳۵۷/۷۵ و

در این طراحی عدد f کاری ۱۳/۷۳ می باشد؛ بنابراین طبق رابطه فوق قطر دیسک ایری ۱۱/۹۸ میکرومتر و شعاع دیسک ۵/۹۹ میکرومتر دست می آید.

مقایسه شعاع دیسک ایری با شعاع RMS معیار مناسبی برای بررسی کیفیت تصویر به دست آمده در هر طول موج بر روی آشکارساز است. طبق شکل (۴) قطر دیسک ایری نمودار نقطه‌ای بزرگتر از شعاع RMS و شعاع هندسی است؛ بنابراین تمام پرتوها داخل دیسک ایری قرار گرفته اند که نشان دهنده این است که پرتوهای طول موج مرکزی به طور بسیار مطلوبی کانونی شده اند. در سایر طول موجها نیز نقاط نمودار تقریباً تماماً داخل دیسک ایری قرار می گیرند؛ ولی در ابتدا و انتهای طیف تعدادی از نقاط در خارج از دیسک ایری قرار می گیرند. شکل (۵) نمودار نقطه‌ای برای ابتدای طیف یعنی طول موج ۳۱۵ نانومتر نشان می دهد. اگر چه تمام نقاط پرتو در دیسک ایری قرار نگرفته اند؛ ولی چون شعاع RMS کوچکتر از شعاع دیسک ایری است و بیشتر نقاط داخل دیسک ایری قرار گرفته اند؛ لذا نتیجه قابل قبولی است.



شکل (۴): نمودار نقطه‌ای برای طول موج مرکزی باند UVA

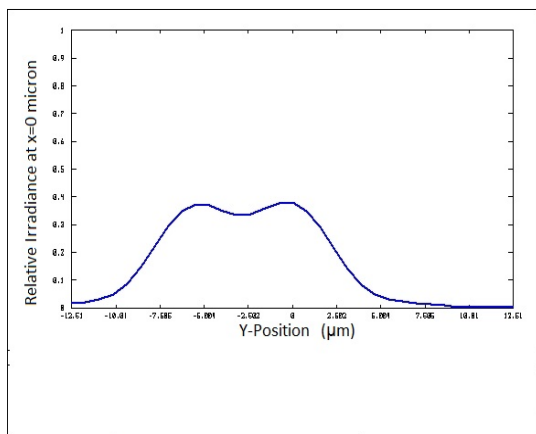


شکل (۵): نمودار نقطه‌ای برای طول موج ابتدای باند UV-A

شکل (۶) تابع انتقال مدولاسیون $^1(MTF)$ را به عنوان تابعی از فرکانس فضایی برای طول موج مرکزی توصیف می کند. در سیستم نوری ایده آل جبهه امواج نوری گسیل شده از جسم بدون هیچ انحرافی منتقل می شود. اما در هر سیستم نوری واقعی محدودیتی برای دیافراگم وجود دارد و دیافراگم باعث ایجاد پراش می شود که MTF را کاهش می دهد. در این شکل محور افقی

نسبتاً گسترده، چگالی نسبتاً کم شیارهای توری و عدم مطلوب تصحیح ابیراهی‌ها بر روی آشکارساز باشد. طبق آنچه در مقاله ذکر شده است شعاع نمودار نقطه‌ای که دقیقاً مشخص نشده است منظور شعاع RMS یا شعاع هندسی است، ۰,۰۸ میلی‌متر است که مقدار بزرگی است و نشان‌دهنده این است که پرتوها روی صفحه‌تصویر به‌خوبی کانونی نشده‌اند. در طراحی ما شعاع RMS و شعاع هندسی از مرتبه میکرون می‌باشند که نشان می‌دهد به نحو مطلوبی پرتوها در هر طول موج کانونی شده‌اند.

باقری یزدآبادی و همکارانش [۳۰] در سال ۲۰۱۷ توسط نرم افزار زیمکس و به کمک توری پراش ۱۲۰۰ خط بر میلی‌متر و یک آینه مقعر با فاصله کانونی ۷۰ میلی‌متر، یک طیف‌سنج اپتیکی در طول موج مرکزی ۷۸۰ نانومتر طراحی کردند. در این کار اگر چه دقیقاً محدوده‌ی طول موج نور ورودی طیف‌سنج مشخص نشده است ولی قدرت تفکیک بدست آمده برای طول موج مرکزی ۷۸۰ نانومتر برابر ۰,۰۴ نانومتر ذکر شده است. اگر چه طول موج مرکزی آن طراحی بزرگتر از طول موج مرکزی در این شبیه‌سازی است ولی به هر حال سیستم طراحی شده در این کار دارای توان تفکیک بهتر ۰,۰۳۰ نانومتر است. ضمناً چون پراکندگی نور در طول موج‌های پایین‌تر بیشتر از طول‌موج‌های بالاتر است لذا بهینه‌سازی و بدست آوردن توان تفکیک مطلوب‌تر برای طول‌موج‌های پایین‌تر مشکل‌تر است.



شکل (۷): نمودار پهن شده‌گی نقطه‌ای PSF بر حسب مکان در صفحه تصویر در راستای محور Y

۵- نتیجه‌گیری

یک اسپکترومتر با توان تفکیک بالا با مقدار ۳۰/۵۱~۲۹ پیکومتر در ناحیه فرابنفش نزدیک طراحی شد. در طراحی جهت موازی‌سازی نور ورودی به توری پراش از یک عدسی دوتایی سلیکا با فاصله کانونی جلوبی ۴۳ میلی‌متر ساخته شده توسط کمپانی اپتوسیگما استفاده شد. توری استفاده شده جهت

۳۵۷/۷۸ نانومتر را وارد می‌کنیم و سپس نمودار پهن‌شدگی نقطه‌ای PSF^۱ را رسم می‌کنیم (شکل ۷). این نمودار نشان می‌دهد که دو قله تقریباً در صفر و ۵/۹- از هم قابل تشخیص می‌باشند که از آن صحت محاسبات انجام شده برای مقدار توان تفکیک به‌دست‌آمده، نتیجه می‌شود [۲۸].

۴- مقایسه با طراحی‌های مشابه

باتوجه به اینکه داده‌های تجربی برای این نوع اسپکترومتر در دسترس نیست؛ لذا سیستم طراحی شده را با کارهای مشابه قبلی محققان مقایسه می‌شود. اطلاعات هیچ نوع طیف‌سنج اپتیکی که دقیقاً در پهنای باند شبیه‌سازی شده در این مقاله باشد، در دسترس نیست؛ لذا با سایر سامانه‌هایی که عموماً دارای پهنای باند بزرگ‌تری هستند؛ ولی به طور کامل یا تا حدی این پهنای باند را شامل می‌شوند و یا با طراحی‌هایی که شبیه این کار با نرم‌افزار زیمکس انجام شده است مقایسه می‌شوند.

اسپکترومتر طراحی شده توسط ریزنبرگ و همکارانش [۲۰] که در مقدمه به آن اشاره شد دارای حجم حدود ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب و توان تفکیک ۱,۲ نانومتر است. در طراحی ما ابعاد سیستم اسپکترومتر بر حسب میلی‌متر ۲۷×۸۶×۱۱۲ و بنابراین حجم آن حدود ۲۶۰ سانتی‌متر مکعب است و توان تفکیک آن نیز همان‌طور که در قسمت قبل بررسی شد حدود ۳۰ پیکومتر است؛ بنابراین طراحی ما نسبت به این اسپکترومتر دارای توان تفکیک بهتر بوده و همچنین حجم کمتری اشغال می‌کند. ولی باید توجه داشت که کاربرد این طراحی در ناحیه طیفی ۴۰۰-۳۱۵ نانومتر است در صورتی‌که اسپکترومتر ریزنبرگ و همکارانش برای محدوده طیفی ۶۷۵-۲۴۰ نانومتر طراحی شده است که البته هر چه پهنای باند طیف وسیع‌تر باشد رسیدن به مقدار کوچک‌تر برای توان تفکیک کار مشکل‌تری خواهد بود. ریزنبرگ و همکارانش جهت طراحی از توری پراش و تعدادی آینه‌های میکروالکترومکانیکی استفاده کردند؛ ولی جزئیات دقیقی در مورد نحوه طراحی و مشخصات فنی قطعات استفاده شده مانند تعداد آینه‌های به‌کاررفته و چگالی شیارهای توری پراش ارائه ندادند.

موداسر و همکارانش [۲۹] در سال ۲۰۲۲ با کمک زیمکس و به‌وسیله یک توری پراش با چگالی ۶۰۰ خط بر میلی‌متر و دو آینه مقعر برای پهنای باند ۷۷۰-۳۸۰ نانومتر یک طیف‌سنج اپتیکی طراحی کردند که توان تفکیک آن در قسمت فرابنفش نزدیک (در طول موج ۳۸۰ نانومتر) مقدار ۳۹ نانومتر اعلام کردند که دقت آن به طور قابل‌ملاحظه‌ای از این طراحی کمتر است. دلیل قدرت تفکیک پایین آن طراحی می‌تواند پهنای باند

- Astronomical Instrumentation, World Scientific, pp. 159-175 2021.
https://doi.org/10.1142/9789811203770_0007
- [11] V. V. Abrameshin, Y. B. Grudzinov, A. I. Schmidt, V. I. Fokin, and E. A. Sukhanov, "A Device that uses the UV Region to Detect and Photographically Record Fingerprints at an Event site," *J. Opt. Technol.*, vol. 80, no. 4, pp. 256–258, 2013.
<https://doi.org/10.1364/JOT.80.000256>
- [12] J. Roberts, A. Power, J. Chapman, S. Chandra, and D. Cozzolino, "The use of UV-Vis Spectroscopy in Bioprocess and fermentation Monitoring," *Fermentation*, vol. 4, no. 1, p. 18, 2018.
<https://doi.org/10.3390/fermentation4010018>
- [13] H. Lyu, N. Liao, H. Li, and W. Wu, "High Resolution ultraviolet Imaging Spectrometer for latent Image Analysis," *Opt. Express*, vol. 24, no. 6, pp. 6459–6468, 2016.
 DOI: 10.1364/OE.24.006459
- [14] F. G. France, "Advanced Spectral Imaging for Noninvasive Microanalysis of cultural Heritage Materials: Review of Application to Documents in the US Library of Congress," *Appl. Spectrosc.*, vol. 65, no. 6, pp. 565–574, 2011.
 DOI: 10.1366/11-06295
- [15] <https://felixinstruments.com/blog/Spectrophotometry-in-2021/>
- [16] <https://www.excedr.com/Blog/Spectrometer-vs-spectrophotometer/>
- [17] <https://Socratic.org/Questions/what-is-Difference-Between-Spectrophotometry-and-Spectroscopy>
- [18] S. Khan, D. Newport, and S. Le Calvé, "Gas Detection using Portable Deep-UV Absorption Spectrophotometry: A Review," *Sensors (Basel, Switzerland)*, 28-Nov-2019. [Online].
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/Articles/PMC6929016/>.
- [19] S. K. Amar, S. Goyal, A. K. Srivastav, D. Chopra, and R. S. Ray, "Combined effect of Benzophenone-2 and ultraviolet Radiation Promote Photogenotoxicity and Photocytotoxicity in Human keratinocytes," *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 95, pp. 298–306, 2018.
 DOI: 10.1016/j.yrtph.2018.04.003
- [20] R. Riesenberger, G. Nitzsche, A. Wuttig, and B. Harnisch, "Micro Spectrometer and MEMS for space," in *Smaller Satellites: Bigger Business?*, Springer, pp. 403–406, 2002.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3008-2_58
- [21] W. Guodong, X. Guo, L. Zhiyuan, H. Mingyong, and L. Hongbo, "Design and key Technology Research of Portable UV-VIS Spectrometer," *Opto-Electronic Eng.*, vol. 45, no. 10, pp. 180191–180195, 2018.
 DOI: 10.12086/oe.2018.180195
- [22] S.-H. Oh, K.-D. Ahn, and H. Choi, "Fabrication of Integrated Spectrometer Module Based on Optical Waveguide Platform with Planar Nano Diffraction grating Using UV Imprint lithography," *Microelectron. Eng.*, vol. 217, p. 111130, 2019.
<https://support.zemax.com/hc/en-us/Articles/1500005578762-How-to-Build-a-Spectrometer-Theory>
- [24] E. G. Loewen and E. Popov, *Diffraction Gratings and Applications*. CRC Press, 2018.
- [25] J. M. Geary, "Introduction to Lens Design With Practical ZEMAX® Examples. Willmann-Bell," Inc., Richmond, 2002
 ISBN: 978-0943396750
- [26] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 2008. ISBN: 9780071476874
- [27] P. F. Meilan and M. Garavaglia, "Rayleigh Resolution Criterion for light Sources of Different Spectral Composition," *Brazilian J. Phys.*, vol. 27, pp. 638–643, 1997.
 DOI: 10.1117/12.294397
- [28] <https://Support.zemax.com/Hc/En-us/Articles/1500005578862-How-to-build-a-Spectrometer-Implementation>

جداسازی طول موج‌های تابش ورودی دارای چگالی شیار ۳۶۰۰ خط بر میلی‌متر و شیشه زیرلایه آن کوارتز در نظر گرفته شد. برای کانونی‌سازی طول موج‌های مجزا در صفحه آشکارساز از هشت عدسی همگرا از جنس سلیکا و سلیکای ذوب شده به طور یک‌درمیان استفاده شد. عدسی‌ها ابتدا دو کوژ با ضخامت ۳ میلی‌متر و فاصله جدایی ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد؛ ولی در فرایند بهینه‌سازی شعاع انحنای سطوح عدسی‌ها و همچنین فاصله جدایی عدسی‌ها تغییر کرد. بررسی ما پس از بهینه‌سازی سامانه نشان داد که سامانه دارای کنتراست و قدرت تفکیک بالایی است و نسبت به طراحی‌های سایر محققان که در سایر نواحی طیف الکترومغناطیسی انجام شده است نتیجه مطلوبی است. چنانچه سطوح عدسی‌ها را غیرکروی در نظر می‌گرفتیم در فرایند بهینه‌سازی نتایج بهتری حاصل می‌شد؛ ولی از آنجایی که ساخت عدسی‌های غیر کروی مشکل‌تر است و باید هزینه و وقت بیشتری صرف شود؛ لذا سطوح همه عدسی‌ها کروی در نظر گرفته شد.

۶- مراجع

- [1] F. Grandmont, L. Drissen, and G. Joncas, "Development of an Imaging Fourier Transform Spectrometer for Astronomy," in *Specialized Optical Developments in Astronomy*, vol. 4842, pp. 392–401, 2003.
 DOI: 10.1117/12.457339
- [2] P. Gatkine, S. Veilleux, and M. Dagenais, "Astrophotonic Spectrographs," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 2, p. 290, 2019.
<https://doi.org/10.3390/app9020290>
- [3] D. C. Price, "Spectrometers and polyphase filterbanks in Radio Astronomy," in *The WSPC Handbook of Astronomical Instrumentation: Volume 1: Radio Astronomical Instrumentation*, World Scientific, pp. 159–179, 2021.
https://doi.org/10.1142/9789811203770_0007
- [4] C. Baker, "The Design and Construction of High-Resolution Spectrometers for Exoplanet Discovery and Characterisation," *Queen Mary University of London*, 2020.
<https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/71805>
- [5] B. Henderson and G. F. Imbusch, *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids*, vol. 44. Oxford University Press, 2006.
 ISBN: 9780199298624
- [6] J. R. Albani, *Principles and Applications of fluorescence Spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2007.
 DOI: 10.1002/9780470692059
- [7] B. C. Wilson, M. Jermyn, and F. Leblond, "Challenges and Opportunities in Clinical Translation of Biomedical Optical Spectroscopy and Imaging," *J. Biomed. Opt.*, vol. 23, no. 3, p. 30901, 2018.
 DOI: 10.1117/1.JBO.23.3.030901
- [8] M. Baranska, *Optical Spectroscopy and Computational methods in biology and Medicine*, vol. 14. Springer Science & Business Media, 2013.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-7832-0>
- [9] R. Richards-Kortum and E. Sevick-Muraca, "Quantitative Optical Spectroscopy for Tissue Diagnosis," *Annu. Rev. Phys. Chem.*, vol. 47, no. 1, pp. 555–606, 1996.
 DOI: 10.1146/annurev.physchem.47.1.555
- [10] D. C. Price, "Spectrometers and Polyphase Filterbanks in Radio Astronomy," in *The WSPC Handbook of Astronomical Instrumentation: Volume 1: Radio*

- [29] M. Naeem, T. Imran, M. Hussain, & Bhatti, A. S. . Design Simulation and Data Analysis of an Optical Spectrometer, Optics and photonics, 2022.
DOI:10.20944/preprints202207.0094.v1
- [30] A. Bagheri Yazdabadi, M. Nazari, A. Sajedi Bidgoli and Milad Kolahi, " Design and Construction of a Spectrometer With 0.04 nm Resolution at 78 nm Central Wavelength," 23rd Iranian Conference on Optics Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2017 (in Persian).
<http://opsi.ir/article-1-1367-en.html>