

طراحی و ساخت دستگاه تصویربردار و ردگیر خورشیدی به منظور کاربردهای تحقیقاتی و طیف‌سنجی

احمد کیاست‌پور و سید مهرداد حسینی

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه اصفهان

پست الکترونیکی: mehrdad.hosseini@sci.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۹/۲۰)

چکیده

در این پژوهش که برای نخستین بار در کشور تحت نظارت مرکز نجوم ادیب اصفهان انجام شده است، طراحی و ساخت دستگاه تصویربرداری و ردگیر خورشیدی به منظور کاربردهای تحقیقاتی و طیف‌سنجی، ارائه شده است. دستگاه تصویربردار مذکور که قابلیت استفاده به عنوان تلسکوپ^۱، اسپکتروسکوپ^۲، اسپکتروفوتومتر^۳ و اسپکتروهلوسکوپ^۴ را دارا می‌باشد، در مراحل تست و ارزیابی داده‌های حاصل شده، کارایی قابل قبولی را کسب کرده است. داده‌های حاصل شده از این دستگاه به منظور تحقیق در زمینه‌های متعدد فیزیک، از جمله بررسی طیف‌های جذبی خورشید و عناصر روی سطح آن، گذر سیاره‌ها از مقابل خورشید، اثرات دوپلری^۵، ارزیابی خطوط فرانهوفر، نمودار شدت بر حسب طول موج و بررسی شارهای خورشیدی، انطباق قابل قبولی را با نتایج تئوری دارا است. در این پژوهش گزارش طراحی و ساخت دستگاه مذکور به همراه پاره‌ای از نتایج حاصل شده ارائه شده است.

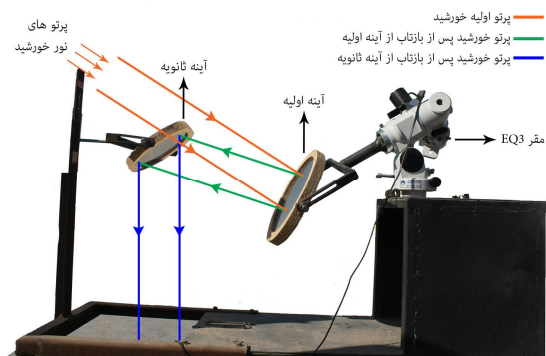
واژه‌های کلیدی: اسپکتروهلوسکوپ، اثرات دوپلری، خطوط فرانهوفر، طیف‌سنج

۱. مقدمه

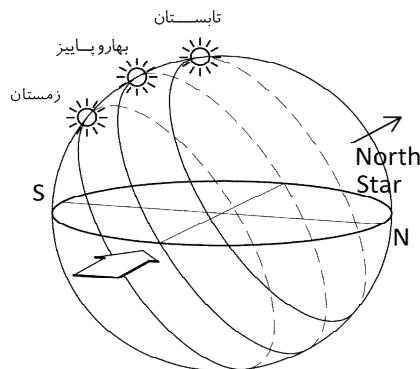
دیگران ساخته شد. این وسیله شامل یک موازی ساز به منظور جمع‌آوری نور منبع و انتقال آن روی یک وجه منشور بود و نور پس از شکست به طیف‌های مختلف تجزیه می‌شد [۱]. از مهم‌ترین ستارگانی که طیف‌نگاری در آن سهم به سزایی داشته، خورشید است و در واقع فرانهوفر و ششی از پیشگامان اسپکتروسکوپی خورشیدی بودند. طیف تشعشعات خورشیدی بسیار وسیع است و بیشترین اطلاعات ما در مورد خورشید از راه تجزیه طیفی نور آن فراهم می‌گردد. طیف مرئی خورشید

تاریخچه طیف‌نگاری نجومی به نخستین مشاهدات نیوتون از نور خورشید پراکنده شده با منشور برمی‌گردد. در اوایل قرن بیستم، نخستین دستگاه طیف‌نگار توسط فرانهوفر انگلستروم و

۱. Telescope
۲. Spectroscope
۳. Spectrophotometer
۴. Spectroheliograph
۵. Doppler Effect



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمای کلی سیستم اپتیکی و مقر.



شکل ۱. کره سماوی و حرکت ظاهری خورشید روی آن [۴].

ثابت در اختیار داشت [۳]. شکل ۱ چگونگی حرکت خورشید در طول یک شبانه روز را نشان می‌دهد.

۲. کلیات سیستم

دستگاه طراحی شده از دو بخش اصلی تشکیل شده است که عبارت اند از: الف) قسمت تثبیت کننده تصویر خورشید، ب) دستگاه طیف نگار خورشیدی. در این مقاله شرح چگونگی ساخت این دستگاه به همراه نتایج به دست آمده از آن که دلالت بر استفاده دستگاه به عنوان وسیله‌ای آموزشی و تحقیقاتی دارند، ارائه شده است.

۳. قسمت تثبیت کننده تصویر

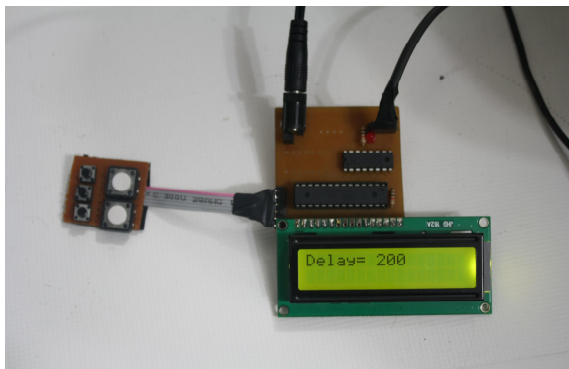
در این قسمت از دو آینه یکی متحرک و دیگری ثابت استفاده کرده‌ایم. ابتدا نور خورشید توسط آینه اول جمع آوری شده و سپس روی آینه دوم بازتاب می‌شود؛ آینه دوم با زاویه خاصی قرار گرفته که باعث می‌شود تصویر خورشید به پایین منتقل شود. این قسمت از سه بخش تشکیل شده است: مقر از نوع EQ۳، سیستم اپتیکی، مدار الکترونیکی. شکل ۲ نمای کلی دستگاه طراحی شده را نشان می‌دهد.

۳.۱. مقر EQ۳

مطابق شکل ۳ آینه اول در امتداد محور قطبی مقر EQ۳ قرار گرفته است. این مقر دارای یک دوربین قطبی کننده می‌باشد که می‌توان در شب محور آن را دقیقاً در امتداد شمال سماوی قرار

همانند بیشتر ستارگان، طیف پیوسته‌ای است همراه با یک سری خطوط تیره که به آنها خطوط جذبی یا خطوط فرانهور می‌گویند. سطح خورشید تشعشعات پیوسته صادر می‌کند که طبیعتاً فاقد هر گونه خط تیره است، اما با عبور تشعشعات مذکور از درون جو زیرین خورشید، خطوط تاریک طیفی در آن پدیدار می‌گردند. با تعیین هویت خطوط طیف خورشیدی، تا کنون وجود ۶۵ عنصر از ۹۲ عنصری که ما در زمین می‌شناسیم در خورشید تشخیص داده شده است. هیدروژن، کربن، نیتروژن، اکسیژن، آلومینیوم، آهن، کبالت، کادمیم، سرب و پلاتین در زمره عناصری هستند که در لایه برگردان خورشید وجود دارد. همچنین با بررسی خطوط طیفی، می‌توان میزان درصد عناصر شیمیایی مختلف در سطح خورشید را اندازه‌گیری کرد [۲].

برای بررسی و مطالعه به روی خورشید، به دلیل حرکت آن روی دایره البروج، نیاز به یک تثبیت کننده نور با دقت بالا هستیم. در این پژوهش با استفاده از سیستم‌های اپتیکی و مدارهای الکترونیکی توانستیم تثبیت کننده‌ای با دقت بالا (یک میلی‌متر جابه‌جایی در طی مدت چهار ساعت برای تصویر قرص خورشید به قطر ۲۰ سانتی‌متری) طراحی کنیم. خورشید در طی یک روز روی یک مسیر دایره‌ای شکل حول شمال سماوی گردش می‌کند. حال اگر محور یک آینه دقیقاً در امتداد خورشید قرار گیرد و همراه با حرکت خورشید این آینه حول محور خود چرخش کند، تصویر خورشید همواره روی آینه قرار دارد و از بازتاب آن می‌توان تصویر خورشید را به صورت



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مدار درایو موتور پله‌ای.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) محور آینه در امتداد ستاره قطبی.

آی سی ۸ ATmega قابل برنامه نویسی و یک درایو می‌باشد. برنامه نویسی این آی سی با نرم افزار Code Vision انجام شده است و به موتور پله‌ای فرمان می‌دهد که چند درجه در چه مدت چرخش کند. منبع تغذیه این مدار ۶ ولت DC بوده که توسط یک آداپتور تامین می‌گردد. این مدار دارای تعدادی کلید برای تنظیم دستی و همچنین تنظیم خودکار می‌باشد که به طور دقیق می‌توان سرعت حرکت آینه را به وسیله موتور پله‌ای با سرعت حرکت خورشید تنظیم کرد و تصویر خورشید را به طور ثابت در اختیار داشت. در شکل ۴ مدار درایو موتور پله‌ای نشان داده شده است.

۳.۴. کاربردهای دستگاه

به وسیله این دستگاه می‌توان داده‌های مختلفی به دست آورد. این دستگاه تصویر خورشید را تثبیت کرده که از این تصویر می‌توان برای عکس برداری از خورشید استفاده کرد. شکل ۵ نمونه‌ای از تصویر خورشید گرفته شده توسط دستگاه می‌باشد. به وسیله این دستگاه گذر سیاره‌هایی از جمله ناهید از مقابل خورشید قابل بررسی بوده و می‌توان با نصب تلسکوپ در انتهای این دستگاه تصویر خورشید را به صورت ثابت در اختیار داشت. دقت این دستگاه در نوع خود بالا می‌باشد به طوری که در طی چهار ساعت مقدار جابه‌جایی قرص خورشید (قرصی به شعاع ۲۰ سانتی‌متر) یک میلی‌متر اندازه‌گیری گردید که این خطا مربوط به دقت میکروکنترل و همچنین تغییر اندک بعد خورشید در طی یک روز می‌باشد.

داد همچنین می‌توان با استفاده از عرض جغرافیایی محل، این مقرر را قطبی کرد که به این منظور روی مقرر درجه بندی ای بر حسب عرض جغرافیایی نیز قرار دارد.

۳.۲. سیستم اپتیکی

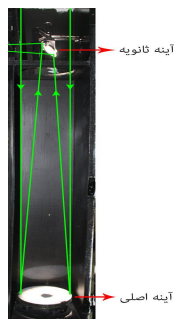
همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سیستم اپتیکی دستگاه متشکل از دو آینه می‌باشد. آینه اول یک آینه تخت ۸ اینچی و آینه دوم یک آینه تخت ۶ اینچی است که توسط مرکز صنایع اپتیک صایران اصفهان لایه نشانی شده است. این دو آینه در قاب‌هایی قرار دارند. آینه اول روی مقرر EQ۳ نصب شده است که محور این آینه در راستای شمال سماوی می‌باشد. محور این آینه توسط یک موتور پله‌ای متصل به مقرر EQ۳ چرخش می‌کند و طی حرکت خورشید در طول روز محور آینه شروع به دوران کرده و خورشید را ردگیری می‌کند. به منظور انجام فرایند همگام سازی ما بین حرکت خورشید و ردگیری آن توسط آینه اول، از مدارهای الکترونیکی استفاده شده است. آینه دوم ثابت بوده و فقط در یک راستا دوران می‌کند و نور خورشید پس از بازتاب از آینه اول بر روی آن قرار می‌گیرد و تصویر خورشید از روی آن به داخل اتاق زیر آن منتقل می‌شود.

۳.۳. مدار الکترونیکی

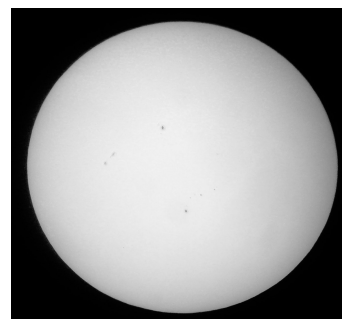
قسمت الکترونیکی این دستگاه از یک موتور پله‌ای و یک برد الکترونیکی تشکیل شده است. برد الکترونیکی متشکل از یک



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شکاف ۰ میکرومتر.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مسیر حرکت نور در تلسکوپ.



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر خورشید.

۴. طیف نگار خورشیدی

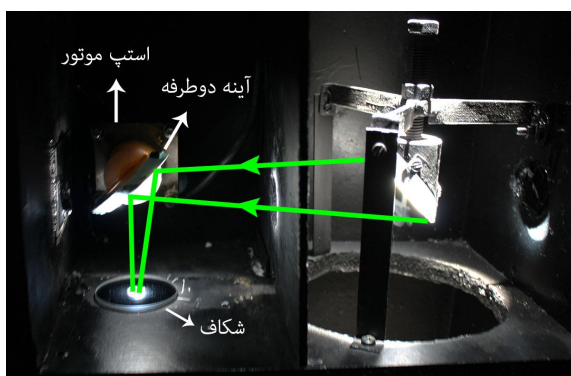
یکی از مهم‌ترین کاربردهای این دستگاه، استفاده آن به عنوان طیف نگار خورشیدی است. این دستگاه از ۴ قسمت تشکیل شده است که عبارت اند از: تلسکوپ، طیف نما، اسپکتروفوتومتر، اسپکتروهلوسکوپ.

۱.۴. تلسکوپ

قسمت نخستین این دستگاه تلسکوپ است که در شکل ۶ نشان داده شده است. نور خورشید پس از تثبیت به وسیله تثبیت کننده وارد دهانه دستگاه شده و پرتوهای موازی نور به آینه مقعر ۶ اینچی با فاصله کانونی ۱ متر برخورد کرده و روی آینه مورب ۶ سانتی متری کانونی می‌شوند. این آینه در دو جهت چرخش می‌کند که در شکل ۶ مسیر حرکت پرتوهای نور نشان داده شده است. سپس با چرخش آینه در جهت راست، تصویر خورشید از دستگاه خارج شده و می‌توان تصویری کامل از قرص خورشید در اختیار داشت، همچنین می‌توان با نصب دوربین عکاسی نجومی روی چشمی این دستگاه از خورشید عکس‌های نجومی مختلفی گرفت.

۲.۴. طیف نما

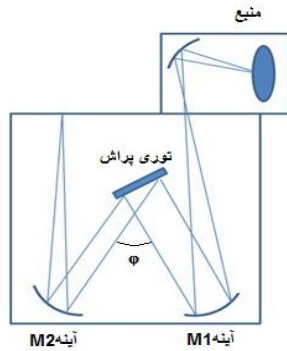
نور خورشید پس از ورود به بخش تلسکوپ با چرخاندن آینه مورب، وارد قسمت طیف نما می‌شود. در این قسمت یک آینه نیم نقره به صورت مورب بر سر راه نور قرار دارد؛ این آینه به یک موتور پله‌ای متصل می‌باشد که در هر ثانیه ۳۰ بار حرکت



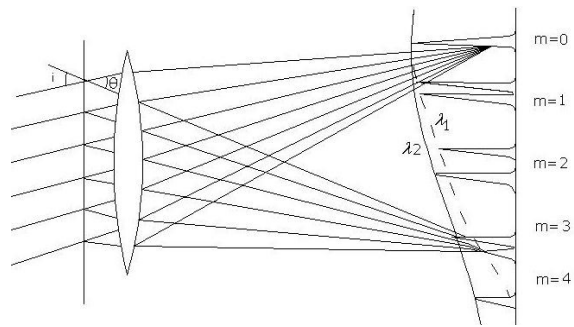
شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مسیر حرکت نور.

رفت و برگشت انجام می‌دهد. سپس نور خورشید پس از برخورد به طرف اول این آینه به صورت عمودی روی شکاف تعبیه شده در پایین این آینه می‌نشیند. شکاف مزبور یک تیغه شیشه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد که روی آن لایه نشانی شده است و شکافی معادل ۱۰ میکرومتر ایجاد شده است. محل شکاف در شکل ۷ نشان داده شده است.

قرص خورشید روی این شکاف، پس از بازتاب از آینه مورب که به موتور پله‌ای متصل است، تشکیل می‌شود و از شکاف عبور می‌کند. به دلیل حرکت موتور پله‌ای تصویر در طرف زیرین شکاف پیوسته بوده و قرص خورشید قابل مشاهده است. شکل ۸ مسیر حرکت پرتو نور در این قسمت از دستگاه را نشان می‌دهد. نور خورشید پس از عبور از شکاف بر روی آینه مقعر ۴ اینچی فرود می‌آید و از روی آن بر روی توری پراش بازتاب می‌شود. توری پراش نور را به طول موج‌های مختلف تجزیه می‌کند و نور تجزیه شده روی آینه مقعر ۴



شکل ۱۰. مونوکروماتور [۷].



شکل ۹. توری پراش و مرتبه‌های آن [۶].

که در آن λ طول موج نور برحسب متر، d فاصله دو شکاف متوالی بر حسب متر، a مساحت روشن شده توری بر حسب متر مربع می‌باشد. حال اگر پیکر بندی شکل ۱۰ را داشته باشیم (که به آن مونوکروماتور می‌گویند) نور پس از بازتاب از توری پراش تجزیه شده که در چنین حالتی رابطه حاکم بر آن به رابطه (۴) تبدیل می‌گردد.

$$d(\sin\theta + \sin(\varphi + \theta)) = m\lambda \quad (4)$$

که در آن d فاصله دو شکاف متوالی بر حسب متر، φ زاویه بین پرتوی فرودی و بازتابی بر حسب درجه، θ زاویه فرود پرتو به توری پراش بر حسب درجه که بسیار کوچک است، m مرتبه پراش و λ طول موج بر حسب متر است. d فاصله دو شکاف متوالی می‌باشد که با معکوس کردن آن می‌توان رابطه طول بر واحد را استخراج نمود (رابطه (۵)).

$$g = \frac{1}{d} \quad (5)$$

چون مقدار θ کوچک می‌باشد می‌توان آن را بسط داد و با استفاده از تقریب مرتبه اول می‌توان رابطه (۴) را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\lambda = \theta \frac{(1 + \cos\varphi)}{mg} + \frac{\sin\varphi}{mg} \quad (6)$$

که در آن g تعداد خط بر واحد، φ زاویه بین پرتوی فرودی و بازتابی بر حسب درجه، θ زاویه فرود پرتو به توری پراش بر حسب درجه که بسیار کوچک است، m مرتبه پراش و λ طول موج بر حسب متر است. توان تفکیک یک مونوکروماتور از رابطه (۷) به دست می‌آید.

اینچی دیگری فرود می‌آید.

۴.۲.۱. محاسبات طیف نگاری

ابتدا روابط مربوط به توری پراش و رابطه توان تفکیک برای هر طول موج با اندازه شکاف و بقیه پارامترهای مساله را بیان می‌کنیم. اگر یک دسته نور موازی تحت زاویه i به توری بتابد و تحت زاویه θ از توری خارج شود برای نقاط روشن اختلاف راه نوری مضرب صحیحی از λ خواهد بود به طوری که اگر d فاصله بین دو شکاف در توری باشد رابطه (۱) برقرار می‌شود [۵].

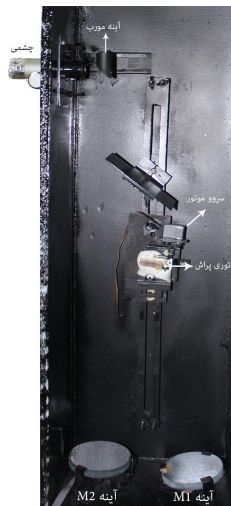
$$d(\sin i \pm \sin\theta) = m\lambda \quad (1)$$

با در نظر گرفتن زاویه تابش صفر رابطه (۲) را به دست می‌آوریم.

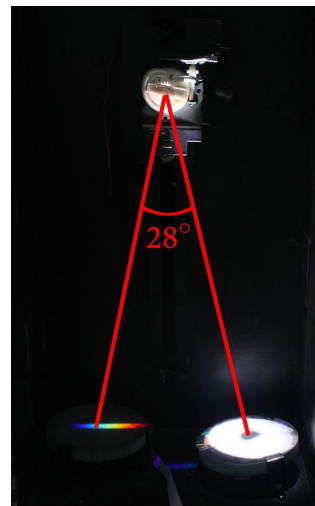
$$d \sin\theta = m\lambda \quad (2)$$

که در آن i زاویه نور فرودی برحسب درجه، θ زاویه نور خروجی برحسب درجه، d فاصله بین دو شکاف بر حسب متر، λ طول موج نور بر حسب متر و m مرتبه پراش است. تصویری را که در $m=1$ تشکیل می‌شود تصویر مرتبه اول می‌نامیم، به همین ترتیب در تمام دامنه طرفین $m=0$ تصاویر از مراتب بالاتر نیز وجود خواهد داشت، که در شکل ۹ نشان داده شده است. با تغییر زاویه θ و با ثابت نگه داشتن فاصله d و $m=1$ می‌توان طول موج‌های مختلفی را در بازتاب از سطح توری ایجاد کرد. توان تفکیک توری پراش از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{d}{ma} \quad (3)$$



شکل ۱۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایی از دو آینه و توری پراش.



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) زاویه بین پرتو فرودی و بازتابی.

چشمی می‌توان طیف‌های تجزیه شده را مشاهده کرد (شکل ۱۲). طیف‌های مشاهده شده دارای خطوط تیره‌ای بوده که حاکی از جذب نور توسط عناصر مختلف خورشید است. توری پراش روی یک موتور سروا سوار شده است که با دو کلید در دو جهت حرکت می‌کند. با حرکت توری پراش، طیف تجزیه شده جابه‌جا و درون چشمی دستگاه به صورت نوار متحرک این خطوط قابل رویت است. این کار توسط یک مدار الکترونیکی و دو کلید انجام می‌شود.

۳.۴ اسپکتروفوٹومتر

توسط این دستگاه می‌توان شدت نور بر حسب طول موج‌های تجزیه شده توسط توری پراش را رسم کرد. نور پس از بازتاب از آینه M2 به آینه مورب فرود می‌آید حال با یک ضامن این آینه را از جلوی پرتو نور کنار زده و نور وارد محفظه مشخص شده در شکل ۱۳ می‌شود.

این محفظه کاملاً تاریک بوده و عایق نوری شده است. در این محفظه یک CCD قرار دارد که شدت نور برای طول موج‌های مختلف را اندازه‌گیری می‌کند. CCD توسط مدار الکترونیکی به کامپیوتر متصل شده و داده‌ها به کامپیوتر انتقال داده می‌شود. حال توسط یک برنامه که با سی شارپ نوشته شده

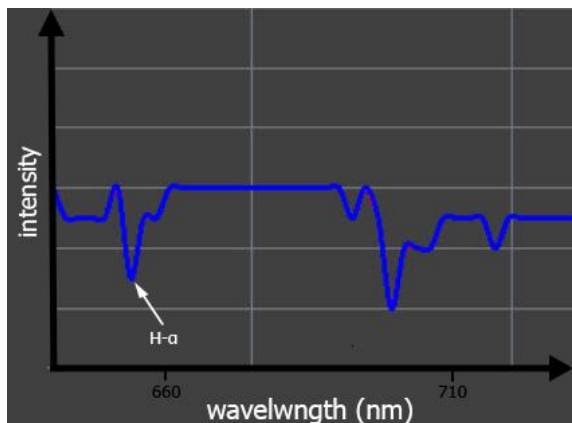
$$\Delta\theta = \frac{t}{F}, \quad (7)$$

که در آن θ زاویه نور فرودی به توری پراش بر حسب درجه، اندازه شکاف بر حسب متر و F فاصله کانونی آینه M1 بر حسب متر است. حال با مشتق‌گیری از رابطه (۶) و استفاده از رابطه (۷) می‌توان رابطه مفیدی را به دست آورد (رابطه (۸)).

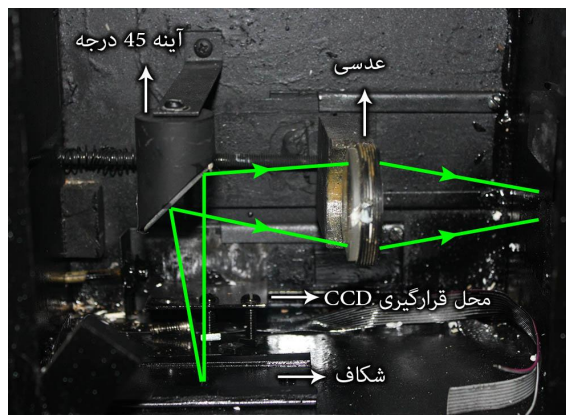
$$\Delta\lambda = \frac{t(1 + \cos\phi)}{F m g}, \quad (8)$$

که در آن λ طول موج نور بر حسب متر، t اندازه شکاف بر حسب متر، F فاصله کانونی آینه M1 بر حسب متر، g تعداد خط بر واحد بر حسب یک بر متر و ϕ زاویه بین پرتوی فرودی و بازتابی بر حسب درجه، m مرتبه پراش است. هرچه $\Delta\lambda$ کوچک‌تر باشد توان تفکیک دستگاه بالا تر بوده و طول موج‌های تجزیه شده بهتر از یکدیگر تفکیک می‌شوند. در این دستگاه اندازه شکاف 10^{-6} میکرو متر، فاصله کانونی آینه M1 یک متر، زاویه بین پرتو فرودی و بازتابی ۲۸ درجه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، توری پراش با 600 خط بر میلی‌متر و مرتبه پراش یک ($m=1$) در نظر گرفته شده است. با محاسبه توری این داده‌ها $\Delta\lambda$ به دست آمده 0.03 نانومتر است. که توان تفکیک بالای این دستگاه را نشان می‌دهد.

نور پس از تجزیه از آینه M2 بازتاب شده و روی آینه مورب بر روی چشمی دستگاه کانونی می‌شود و از داخل



شکل ۱۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار شدت نور بر حسب طول موج.



شکل ۱۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قسمت اسپکتروفوتومتر.

جدول ۱. طیف‌های مشاهده شده در بازه زمانی یک ماه.

تاریخ	بعد خورشید	میل خورشید	عکس (رنگی در نسخه الکترونیکی)
۲ آذر	۱۵h۵۴m	۲۰°۱۸'	
۸ آذر	۱۶h۱۹m	۲۱°۲۷'	
۱۳ آذر	۱۶h۴۱m	۲۲°۱۲'	
۱۷ آذر	۱۶h۵۸m	۲۲°۴۱'	
۲۰ آذر	۱۷h۱۲m	۲۳°۰۰'	

موتور پله‌ای) فرود می‌آید و از آن بازتاب شده، نور خورشید توسط عدسی دیگری روی چشمی کانونی می‌شود که در انتهای دستگاه قرار دارد. حال به علت حرکت رفت و برگشت موتور پله‌ای ۳۰ بار در ثانیه این قرص به صورت پیوسته قابل مشاهده می‌باشد. با بررسی این قرص می‌توان روی شراره‌های خورشیدی مطالعه کرد.

۵. بررسی نتایج حاصل شده

از طیف‌های مشاهده شده در بازه از دوم تا بیستم آذر ماه، عکس‌های مختلفی گرفتیم و آنها را با یکدیگر در جدول ۱

است، این داده‌ها به صورت نموداری رسم می‌شوند. از روی این نمودار می‌توان خطوط جذبی برای عناصر مختلف را بررسی کرد، همچنین می‌توان با چرخاندن توری پراش و درجه بندی کردن دستگاه، شدت در هر طول موج دلخواه را بررسی کرد. شکل ۱۴ قسمتی از این نمودار را نشان می‌دهد.

۴.۴. اسپکتروهلوسکوپ

همچنین توسط این دستگاه می‌توان قرص خورشید را در تمامی طول موج‌ها مشاهده کرد. با کنار زدن CCD و عبور طیف از یک عدسی، نور روی طرف دوم آینه متحرک (آینه متصل به



شکل ۱۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف جذبی خورشید [۷].



شکل ۱۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) جابه‌جایی به قرمز و آبی.

می‌کند که فوتونی که به ما نزدیک می‌شود به خاطر اثر دوپلری جابه‌جایی به آبی و فوتونی که از ما دور می‌شود جابه‌جایی به قرمز پیدا می‌کند و به همین خاطر طیفی که ما از این اتم ثبت می‌کنیم تیز نبوده و کمی محو به نظر می‌رسد.

قدردانی

در اینجا بر خود فرض می‌دانیم از زحمات مدیریت مرکز نجوم ادیب اصفهان، جناب آقای مزروعی و دکتر مهدی اسحاقی و همچنین کیان کیانی، سینا رضایی، حمید مقدس پور، عطیه هاشمیان و آقای کریمی که در طول انجام این پروژه با حمایت‌های خود نقش مؤثری را در راهبرد این پروژه ایفا نمودند، داشته باشیم.

مقایسه کردیم. خطوط مشاهده شده هیچ جابه‌جایی نداشته و مختص به عناصر مورد بررسی می‌باشند. همچنین این داده‌ها را با عکس‌های گرفته شده از ناسا مطابق شکل ۱۵ مقایسه کردیم و خطوط بر آن منطبق بود [۷].

خطوط جذبی هیدروژن که نسبت به بقیه خطوط مطابق شکل ۱۶ تیز نبوده کمی محو به نظر می‌رسد. علت آن جابه‌جایی دوپلری است که برای این عنصر در جو خورشید اتفاق می‌افتد. عنصر هیدروژن در جو خورشید نسبت به دیگر عناصر درصد بالاتری دارد و از سطح تا جو بیرونی با درصد بالایی وجود دارد. حال وقتی این اتم برانگیخته می‌شود و به حالت پایه برمی‌گردد از خود فوتون تابش می‌کند حال این فوتون آزادانه در این فضا (بین سطح و جو خورشید) حرکت

مراجع

1. J C D Brand, "Lines of Light", CRC Press, (1995).
2. D R Williams, Sun fact sheet, Retrieved February 1 (2004) 2011.
3. H Kinoshita and S Aoki, *Celestial mechanics* 31 (1983) 329.
4. A B Sproul, *Renewable Energy* 32 (2007) 1187.
5. C A Palmer, E G Loewen, and R Thermo,

"Diffraction grating handbook", Newport Corporation Springfield, Ohio, USA (2005).

6. B H Kleemann, and J Erxmeyer, *journal of modern optics* 51 (2004) 2093.

7. J D Ingle Jr, and S R Crouch, "Spectrochemical analysis", (1988).