

طراحی و ساخت دستگاه تصویربردار و ردگیر خورشیدی به منظور کاربردهای تحقیقاتی و طیف سنجی

دکتر احمد کیاست پور^۱، سید مهرداد حسینی^۲

۱- هیئت علمی گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه اصفهان، ایران

۲- گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه اصفهان، ایران

mehrdad.hosseini@sci.ui.ac.ir

خلاصه

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 طیف سنجی، ارائه شده است. دستگاه تصویربردار مذکور که قابلیت استفاده به عنوان تلسکوپ^۱، اسپکتروسکوپ^۲، اسپکتروفتومتر^۳ و اسپکتروهلوسکوپ^۴ را دارا می باشد، در مراحل تست و ارزیابی داده های حاصل شده، کارایی قابل قبولی را کسب کرده است. داده های حاصل شده از این دستگاه به منظور تحقیق در زمینه های متعدد فیزیک، از جمله بررسی طیف های جذبی خورشید و عناصر روی سطح آن، گذر سیاره ها از مقابل خورشید، اثرات دوپلری^۵، ارزیابی خطوط فرانوفر، نمودار شدت بر حسب طول موج و بررسی شراره های خورشیدی، انطباق قابل قبولی را با نتایج تئوری دارا است. در این پژوهش گزارش طراحی و ساخت دستگاه مذکور به همراه پاره ای از نتایج حاصل شده ارائه شده است.

کلمات کلیدی: اسپکتروهلوسکوپ، اثرات دوپلری، خطوط فرانوفر، طیف سنج

Designing and manufacturing of a solar imaging and tracking system

¹Ahmad Kiasatpour, ²Mehrdad Hosseini

^{1,2} Physics department of Isfahan University

Abstract – in this study, designing and manufacturing of solar imaging and tracking system in order to research and spectroscopy applications are investigated. The device has the ability to be used as a Telescope, spectroscope, spectrophotometer and spectrohelioscope.

¹ Telescope

² Spectroscope

³ Spectrophotometer

⁴ Spectroheliometer

⁵ Doppler Effect

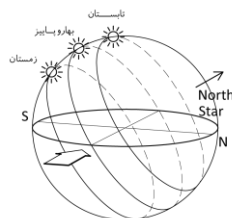
The results obtained from this device are used in the various field of research such as absorption spectra of the surface of the sun, transit of planets in front of the sun, Doppler effects, evaluation of the Fraunhofer lines, plot of intensity versus wavelength and studying of Solar Flares. In this research, design and manufacture of the device, along with some of the results, are reported.

Keywords: Doppler effects, Fraunhofer lines, absorption spectra

۱- مقدمه

تاریخچه ی طیف نگاری نجومی به نخستین مشاهدات نیوتون از نور خورشید پراکنده شده با منشور برمی گردد. در اوایل قرن بیستم، نخستین دستگاه طیف نگار توسط فرانیهوفر انگستروم و دیگران ساخته شد. این وسیله شامل یک کلیماتور به منظور جمع آوری نور منبع و انتقال آن روی یک وجه منشور بود و نور پس از شکست به طیف های مختلف تجزیه می شد. [۱] از مهم ترین ستارگانی که طیف نگاری در آن سهم بسزایی داشته، خورشید است و در واقع فرانیهوفر و سشی 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 می گردد. طیف مرئی خورشید همانند بیشتر ستارگان، طیف پیوسته ای است همراه با یک سری خطوط تیره که به آنها خطوط جذبی یا خطوط فرانیهوفر می گویند. سطح خورشید تشعشعات پیوسته صادر می کند که طبیعتاً فاقد هر گونه خط تیره است، اما با عبور تشعشعات مذکور از درون جو زیرین خورشید، خطوط تاریک طیفی در آن پدیدار می گردند. با تعیین هویت خطوط طیف خورشیدی، تا کنون وجود ۶۵ عنصر از ۹۲ عنصری که ما در زمین می شناسیم 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، می توان میزان درصد عناصر شیمیائی مختلف در سطح خورشید را اندازه گیری کرد. [۲]

برای بررسی و مطالعه به روی خورشید، به دلیل حرکت آن روی دایره البروج، نیاز به یک ثبت کننده نور با دقت بالا هستیم. در این پژوهش با استفاده از سیستم های اپتیکی و مدارهای الکترونیکی توانستیم تثبیت کننده ای با دقت بالا (یک میلیمتر جابجایی در طی مدت چهار ساعت برای تصویر قرص خورشید به قطر ۲۰ سانتی متری) طراحی کنیم. خورشید در طی یک روز روی یک مسیر دایره ای شکل حول شمال سماوی گردش می کند. 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 می توان تصویر خورشید را به صورت ثابت در اختیار داشت. [۳] شکل (۱) چگونگی حرکت خورشید در طول یک شبانه روز را نشان می دهد.



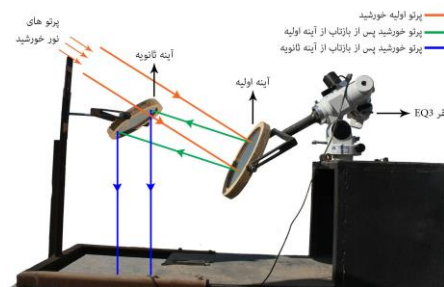
شکل ۱: کره ی سماوی و حرکت ظاهری خورشید روی آن [۴]

۲- کلیات سیستم

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

۳- قسمت تثبیت کننده ی تصویر

در این قسمت از دو آینه یکی متحرک و دیگری ثابت استفاده کرده ایم. ابتدا نور خورشید توسط آینه اول جمع آوری شده و سپس روی آینه دوم بازتاب می شود؛ آینه دوم با زاویه خاصی قرار گرفته که باعث می شود تصویر خورشید به پایین منتقل شود. این قسمت از سه بخش تشکیل شده است: مقر از نوع EQ3، سیستم اپتیکی، مدار الکترونیکی. شکل (۲) نمای کلی دستگاه طراحی شده را نشان می دهد.



شکل ۲: نمای کلی سیستم اپتیکی و مقر

۳-۱- مقر EQ3

مطابق شکل (۳) آینه اول در امتداد محور قطبی مقر EQ3 قرار گرفته است. این مقر دارای یک دوربین قطبی کننده می باشد که می توان در شب محور آن را دقیقاً در امتداد شمال سماوی قرار داد همچنین می توان با استفاده از عرض جغرافیایی محل، این مقر را قطبی کرد که به این منظور روی مقر درجه بندی ای بر حسب عرض جغرافیایی نیز قرار دارد.



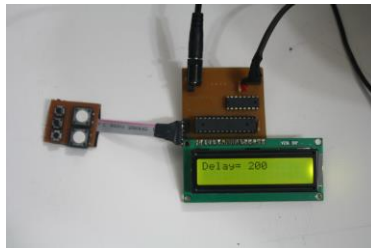
شکل ۳: محور آینه در امتداد ستاره ی قطبی

۳-۲- سیستم اپتیکی

همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سیستم اپتیکی دستگاه متشکل از دو آینه می باشد. آینه اول یک آینه ی تخت ۸ اینچی و آینه دوم یک آینه ی تخت ۶ اینچی است که توسط مرکز صنایع اپتیک صایران اصفهان لایه نشانی شده است. این دو آینه در قاب هایی قرار دارند. آینه ی اول روی مقر EQ3 نصب شده است که محور این آینه در راستای شمال سماوی می باشد. محور این آینه توسط یک استپر موتور متصل به مقر EQ3 چرخش می کند و طی حرکت خورشید در طول روز محور آینه شروع به دوران کرده و خورشید را ردگیری می کند. به منظور انجام فرآیند همگام سازی ما بین حرکت خورشید و ردگیری آن توسط آینه ی اول، از مدارات الکترونیکی استفاده شده است. آینه ی دوم ثابت بوده و فقط در یک راستا دوران می کند و نور خورشید پس از بازتاب از آینه ی اول بر روی آن قرار می گیرد و تصویر خورشید از روی آن به داخل اتاق زیر آن منتقل می شود.

۳-۳- مدار الکترونیکی

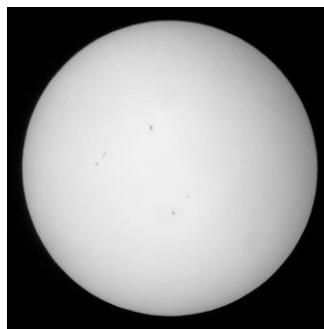
قسمت الکترونیکی این دستگاه از یک استپر موتور و یک برد الکترونیکی تشکیل شده است. برد الکترونیکی متشکل از یک آی سی ATmega8 قابل برنامه نویسی و یک درایومی باشد. برنامه نویسی این آی سی با نرم افزار Code Vision انجام شده است و به استپر موتور فرمان می دهد که چند درجه در چه مدت چرخش کند. منبع تغذیه این مدار ۶ ولت DC بوده که توسط یک آداپتور تامین می گردد. این مدار دارای تعدادی کلید برای تنظیم دستی و همچنین تنظیم خودکار می باشد که به طور دقیق می توان سرعت حرکت آینه را به وسیله ی استپر موتور با سرعت حرکت خورشید تنظیم کرد و تصویر خورشید را به طور ثابت در اختیار داشت. در شکل (۴) مدار درایو استپر موتور نشان داده شده است.



شکل ۴ : مدار درایو استپر موتور

۳-۴- کاربردهای دستگاه

به وسیله ی این دستگاه می توان داده های مختلفی به دست آورد. این دستگاه تصویر خورشید را تثبیت کرده که از این تصویر می توان برای عکس برداری از خورشید استفاده کرد. شکل (۵) نمونه ای از تصویر خورشید گرفته شده توسط دستگاه می باشد. به وسیله ی این دستگاه گذر سیاره هایی از جمله ناهید از مقابل خورشید قابل بررسی بوده و می توان با نصب تلسکوپ در انتهای این دستگاه تصویر خورشید را به صورت ثابت در اختیار داشت. دقت این دستگاه در نوع خود بالا می باشد به طوری که در طی چهار ساعت مقدار جابجایی قرص خورشید (قرصی به شعاع ۲۰ سانتی متر) یک میلی متر اندازه گیری گردید که این خطا مربوط به دقت میکروکنترل و همچنین تغییر اندک بُعد خورشید در طی یک روز می باشد.



شکل ۵: 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، اسپکتروفتومتر، اسپکتروهلوسکوپ.

۴-۱- تلسکوپ

قسمت نخستین این دستگاه تلسکوپ است که در شکل (۶) نشان داده شده است. نور خورشید پس از تثبیت به وسیله ی تثبیت کننده وارد دهانه ی دستگاه شده و پرتو های موازی نور به آینه ی مقعر ۶ اینچی با فاصله کانونی ۱ متر برخورد کرده و روی آینه مورب ۶ سانتی متری کانونی می شوند. این آینه در دو جهت چرخش می کند 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 می توان تصویری کامل از قرص خورشید در اختیار داشت، همچنین می توان با نصب دوربین عکاسی نجومی روی چشمی این دستگاه از خورشید عکس های نجومی مختلفی گرفت.



شکل ۶: مسیر حرکت نور در تلسکوپ

۲-۴- طیف نما

نور خورشید پس از ورود به بخش تلسکوپ با چرخاندن آینه ی مورب، وارد قسمت طیف نما می شود. در این قسمت یک آینه ی نیم نقره به صورت مورب بر سر راه نور قرار دارد؛ این آینه به یک استپر موتور متصل می باشد که در هر ثانیه ۳۰ بار حرکت رفت و برگشت انجام می دهد. سپس نور خورشید پس از برخورد به طرف اول این آینه به صورت عمودی روی شکاف تعبیه شده در پایین این آینه می نشیند. شکاف مزبور یک تیغه ی شیشه ای به ضخامت ۳ میلی متر می باشد که روی آن لایه نشانی شده است و شکافی معادل ۱۰ میکرومتر ایجاد شده است. محل شکاف در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷: شکاف ۱۰ میکرومتر

قرص خورشید روی این شکاف، پس از بازتاب از آینه ی مورب که به استپر موتور متصل است، تشکیل می شود و از شکاف عبور می کند. به دلیل حرکت استپر موتور 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 می دهد. نور خورشید پس از عبور از شکاف بر روی آینه مقعر ۴ اینچی فرود می آید و از روی آن بر روی توری پراش بازتاب می شود. توری پراش نور را به طول موج های مختلف تجزیه می کند و نور تجزیه شده روی آینه ی مقعر ۴ اینچی دیگری فرود می آید.



شکل ۸: مسیر حرکت نور

۱-۲-۴- محاسبات طیف نگاری

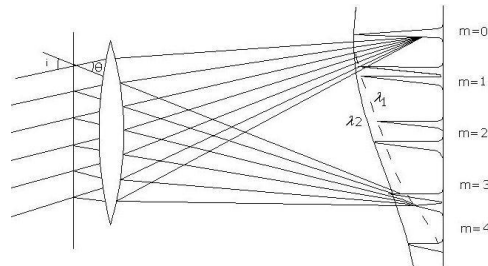
ابتدا روابط مربوط به توری پراش و رابطه ی توان تفکیک برای هر طول موج با اندازه ی شکاف و بقیه ی پارامتر های مساله را بیان می کنیم. اگر یک دسته نور موازی تحت زاویه i به توری بتابد و تحت زاویه θ از توری خارج شود برای نقاط روشن اختلاف راه نوری مضرب صحیحی از λ خواهد بود به طوری که اگر d فاصله بین دو شکاف در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

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

با در نظر گرفتن زاویه تابش صفر رابطه ی (۲) را بدست می آوریم.

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

که در آن i زاویه نور فرودی بر حسب درجه، θ زاویه نور خروجی بر حسب درجه، d فاصله بین دو شکاف بر حسب متر، λ طول موج نور بر حسب متر، m مرتبه پراش هستند. تصویری که در $m=1$ تشکیل می شود را تصویر مرتبه اول می نامیم، 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 ی d و $m=1$ می توان طول موج های مختلفی را در بازتاب از سطح توری ایجاد کرد.



شکل ۹: توری پراش و مرتبه های آن [۶]

توان تفکیک توری پراش از رابطه (۳) بدست می آید.

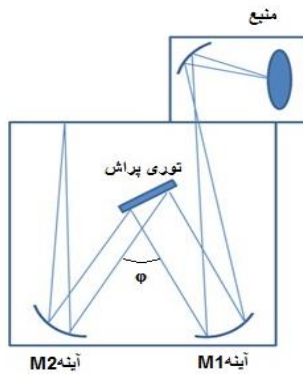
$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{d}{ma} \quad (3)$$

که در آن λ طول موج نور بر حسب متر، d فاصله ی دو شکاف متوالی بر حسب متر، a مساحت روشن شده ی توری بر حسب متر مربع می باشد. حال اگر پیکربندی شکل (۱۰) را داشته باشیم (که به آن مونوکروماتور می گویند) نور پس از بازتاب از توری پراش تجزیه شده که در چنین حالتی رابطه ی حاکم بر آن به رابطه ی (۴) تبدیل می گردد.

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

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

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



شکل ۱۰: مونوکروماتور [۷]

چون مقدار θ کوچک می باشد می توان آن را بسط داد و با استفاده از تقریب مرتبه اول می توان رابطه ی ۴ را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\lambda = \theta \frac{(1 + \cos\phi)}{mg} + \frac{\sin\phi}{mg} \quad (۶)$$

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

$$\Delta\theta = \frac{t}{F} \quad (۷)$$

که در آن θ زاویه نور فرودی به توری پراش بر حسب درجه، t اندازه ی شکاف بر حسب متر، F فاصله کانونی آینه $M1$ بر حسب متر هستند. حال با مشتق گیری از رابطه ی ۶ و استفاده از رابطه ی ۷ می توان رابطه ی مفیدی را بدست آورد. (رابطه ی ۸)

$$\Delta\lambda = \frac{t(1 + \cos\phi)}{F m g} \quad (۸)$$

که در آن λ طول موج نور بر حسب متر، t اندازه ی شکاف بر حسب متر، F فاصله کانونی آینه $M1$ بر حسب متر، g تعداد خط بر واحد بر حسب یک بر متر، ϕ زاویه ی بین پرتوی فرودی و بازتابی بر حسب درجه، m مرتبه ی پراش هستند. هرچه $\Delta\lambda$ کوچکتر باشد توان تفکیک دستگاه بالا تر بوده و طول موج های تجزیه شده بهتر از یکدیگر تفکیک می شوند. در این دستگاه اندازه ی شکاف ۱۰ میکرو متر، فاصله ی کانونی آینه $M1$ یک متر، زاویه بین پرتو فرودی و بازتابی ۲۸ درجه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، توری پراش با ۶۰۰ خط بر میلیمتر و مرتبه ی پراش یک ($m=1$) در نظر گرفته شده است. با محاسبه ی تئوری این داده ها $\Delta\lambda$ بدست آمده ۰,۰۳ نانومتر است. که توان تفکیک بالای این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۱۱: زاویه بین پرتو فرودی و بازتابی

نور پس از تجزیه از آینه M2 بازتاب شده و روی آینه مورب بر روی چشمی دستگاه کانونی می شود و از داخل چشمی می توان طیف های تجزیه شده را مشاهده کرد (شکل ۱۲). طیف های مشاهده شده دارای خطوط تیره ای بوده که حاکی از جذب نور توسط عناصر مختلف خورشید است.

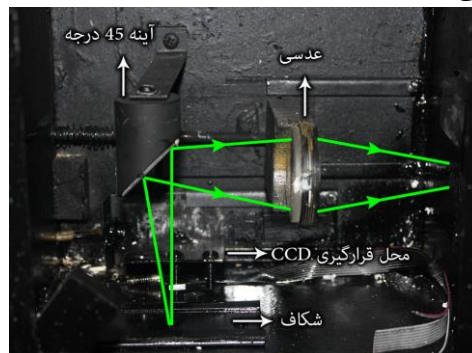


شکل ۱۲: نمایی از دو آینه و توری پراش

توری پراش روی یک سرو موتور سوار شده است که با دو کلید در دو جهت حرکت می کند. با حرکت توری پراش، طیف تجزیه شده جابجا و درون چشمی دستگاه به صورت نوار متحرک این خطوط قابل رویت است. این کار توسط یک مدار الکترونیکی و دو کلید انجام می شود.

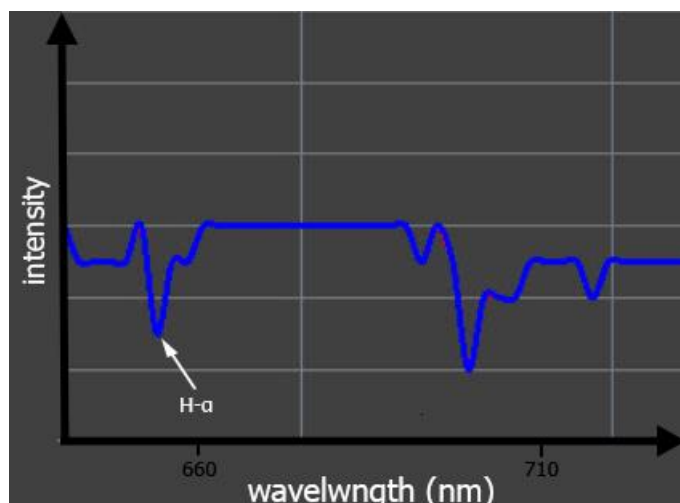
۴-۳- اسپکتروفوتومتر

توسط این دستگاه می توان شدت نور بر حسب طول موج های تجزیه شده توسط توری پراش را رسم کرد. نور پس از بازتاب از آینه M2 به آینه ی مورب فرود می آمد حال با یک ضامن این آینه را از جلوی پرتو نور کنار زده و نور وارد محفظه ی مشخص شده در شکل ۱۳ می شود.



شکل ۱۳: قسمت اسپکتروفوتومتر

این محفظه کاملا تاریک بوده و عایق نوری شده است. در این محفظه یک CCD قرار دارد که شدت نور برای طول موج های مختلف را اندازه گیری میکند. CCD توسط مدار الکترونیکی به کامپیوتر متصل شده و داده ها به کامپیوتر انتقال داده می شود. حال توسط یک برنامه که با C# نوشته شده است، این داده ها به صورت نموداری رسم می شوند. از روی این نمودار می توان خطوط جذبی برای عناصر مختلف را بررسی کرد، همچنین می توان با چرخاندن توری پراش و کالیبره کردن دستگاه شدت در هر طول موج دلخواه را بررسی کرد. شکل ۱۴ قسمتی از این نمودار را نشان می دهد.



شکل ۱۴: نمودار شدت نور بر حسب طول موج

۴-۴ اسپکترو هلیوسکوپ

همچنین توسط این دستگاه می توان قرص خورشید را در تمامی طول موج ها مشاهده کرد. با کنار زدن CCD و عبور طیف از یک عدسی، نور روی طرف دوم آینه متحرک (آینه ی متصل به استپر موتور) فرود می آید و از آن بازتاب شده، نور خورشید توسط عدسی دیگری روی چشمی کانونی می شود که در انتهای دستگاه قرار دارد. حال به علت حرکت رفت و برگشت استپر موتور ۳۰ بار در ثانیه این قرص به صورت پیوسته قابل مشاهده می باشد. با بررسی این قرص می توان روی شاراه های خورشیدی مطالعه کرد.

۵- بررسی نتایج حاصل شده

از طیف های مشاهده شده در بازه ی از دوم تا بیستم آذر ماه، عکس های مختلفی گرفتیم و آن ها را با یکدیگر در جدول ۱ مقایسه کردیم. خطوط مشاهده شده هیچ جابجایی نداشته و مختص به عناصر مورد بررسی می باشند. همچنین این داده ها را با عکس های گرفته شده از ناسا مطابق شکل ۱۵ مقایسه کردیم و خطوط بر آن منطبق بود. [۷]

عکس	بعد و میل خورشید	تاریخ
	۱۵h۵۴m -۲۰°۱۸'	۲ آذر
	۱۶h۱۹m -۲۱°۲۷'	۸ آذر
	۱۶h۴۱m -۲۲°۱۲'	۱۳ آذر
	۱۶h۵۸m -۲۲°۴۱'	۱۷ آذر

۱۷h۱۲m -۲۳°۰۰'	۲۰ آذر
-------------------	--------

جدول ۱: طیف های مشاهده شده در بازه ی زمانی یک ماه



شکل ۱۵: طیف جذبی خورشید [۷]

خطوط جذبی هیدروژن که نسبت به بقیه خطوط مطابق شکل ۱۶ تیز نبوده و کمی محو به نظر می رسد. علت آن جابجایی دوپلری است که برای این عنصر در جو خورشید اتفاق می افتد. عنصر هیدروژن در جو خورشید درصد بالاتری نسبت به دیگر عناصر دارا می باشد و از سطح تا جو بیرونی با درصد بالایی وجود دارد. حال وقتی این اتم برانگیخته می شود و به حالت پایه برمی گردد از خود فوتون تابش می کند حال این فوتون آزادانه در این فضا (بین سطح و جو خورشید) حرکت می کند که فوتونی که به ما نزدیک می شود به خاطر اثر دوپلری جابجایی به آبی و فوتونی که از ما دور می شود جابجایی به قرمز پیدا می کند و به همین خاطر طیفی که ما از این اتم ثبت می کنیم تیز نبوده و کمی محو به نظر می رسد.



شکل ۱۶: جابجایی به قرمز و آبی

۶- قدردانی

در اینجا بر خود فرض می دانیم 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 کرمی که در طول انجام این پروژه با حمایت های خود نقش موثری را در راهبرد این پروژه ایفا نمودند، داشته باشیم.

۷- مراجع

1. J. C. D. Brand, *Lines of Light* (CRC Press, 1995).
2. D. R. Williams, "Sun fact sheet," Retrieved February 1, 2011 (2004).
3. H. Kinoshita, and S. Aoki, "The definition of the ecliptic," *Celestial mechanics* **31**, 329-338 (1983).
4. A. B. Sproul, "Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis," *Renewable Energy* **32**, 1187-1205 (2007).
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, "Independent electromagnetic optimization of the two coating thicknesses of a dielectric layer on the facets of an echelle grating in Littrow mount," *journal of modern optics* **51**, 2093-2110 (2004).

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