

ارائه یک مدل مبتنی بر ناحیه فروسرخ نزدیک برای آشکارسازی ستاره‌ها در روز

عباس بشیری^۱، کارشناسی ارشد؛ ایرج هادی نژاد^۲، کارشناسی ارشد؛ اصغر فاطمی^۳، دکتری؛ ابوالفضل چمن مطلق^۴، استادیار

۱- دانشکده برق- دانشگاه امام حسین(ع)- تهران- ایران- kpbashiri@ihu.ac.ir

۲- دانشکده برق- دانشگاه امام حسین(ع)- تهران- ایران- kphadinj@ihu.ac.ir

چکیده: ناوبری ستاره‌ای می‌تواند گزینه‌ای برای جایگزینی GPS باشد. یکی از چالش‌های مهم در این جایگزینی، آشکارسازی ستارگان در روز است. در ناحیه فروسرخ نزدیک افت تابش خورشیدی قابل توجه است و به همین دلیل تابندگی آسمان (که همان پراکندگی نور خورشید در آسمان است) در این پنجره طیفی کاهش محسوسی دارد. این ناحیه توسط CCD مرئی پوشش داده می‌شود، بنابراین امکان‌سنجی آشکارسازی ستارگان در فروسرخ نزدیک می‌تواند به کاهش چشمگیر هزینه‌ها در مقایسه با سامانه‌های رایج فروسرخ کوتاه‌موج منجر شود. در این مقاله گذردهی آسمان برای طول‌موج‌ها و زوایای مختلف خورشیدی محاسبه می‌شود. بر اساس یک مدل ارائه‌شده شدت نور ستارگان در ناحیه فروسرخ نزدیک شبیه‌سازی می‌شود و با ارزیابی مولفه‌های سامانه اپتیکی برای نخستین بار یک مدل برای آشکارسازی ستارگان در فروسرخ نزدیک ارائه می‌شود. قدر ستاره‌های Betelgeuse، Vega و Mirach توسط مدل ارائه‌شده شبیه‌سازی می‌شود. همچنین قدر آسمان برای شرایط مشاهده با سه سامانه اپتیکی پیشنهادی شبیه‌سازی می‌شود و امکان آشکارسازی ستاره‌های ذکر شده در شرایط مدل‌شده تأیید می‌شود. در نهایت با استفاده از افزاره‌های مناسب اپتیکی و سروموتور مناسب (برای رهگیری ستاره در آسمان) داده‌های تجربی اندازه‌گیری می‌شود که این داده‌ها مدل ارائه‌شده را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی ستارگان، فروسرخ نزدیک، تابندگی آسمان، فروسرخ کوتاه موج، قدر ستاره.

Presentation A near infrared model for stars detection in daytime

Abbas Bashiri¹, MSc; Iraj Hadinejad², MSc; Asghar Fatemi³, PhD; Abolfazl Chamanmotlagh⁴, Assistant professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Imam Housein University, Tehran, Iran, Email: kpbashiri@ihu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Imam Housein University, Tehran, Iran, Email: kphadinj@ihu.ac.ir

Abstract: Star based navigation could be a good alternative for GPS. However there are some limitations. The most important problem is stars detection in daytime. In the near infrared region, reduction of solar radiation is noticeable, hence, radiance of sky (which is sunlight scattering in the sky) noticeably decreases in this spectral window. This region was covered by visible CCD so feasibility study of stars detection in daytime in near infrared can significantly reduce costs in comparison common shortwave infrared systems. In this paper, sky transmittance is calculated for different wavelengths and sun zenith angles. According to a given model, the intensity of stars light is simulated in near-infrared and evaluated the components of the optical system until a model is presented about stars detection in daytime for the first time. Magnitude of some stars such as Betelgeuse, Vega and Mirach are simulated by the presented model. Also observed magnitude through three optical systems simulated and Ability to detect of the mentioned stars are confirmed. Finally, experimental data are measured by using appropriate optical equipment and servo motor (for star tracking in sky) that these data confirm result of presented model.

Keywords: Stars detection, near infrared, radiance of sky, star magnitude, shortwave infrared.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۴، ۱۳۹۷/۰۸/۱۹، ۱۳۹۷/۱۲/۰۷ و ۱۳۹۸/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲

نام نویسنده مسئول: عباس بشیری

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده برق، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۱-مقدمه

استفاده از ستارگان برای شمال‌یابی و موقعیت‌یابی جایگزین مناسبی برای GPS است و درعین‌حال محدودیت بزرگ آشکارسازی ستارگان در روز این روش را محدود می‌کند. در این پژوهش سعی بر این است تا روشی مناسب برای غلبه بر این محدودیت که درواقع گلوگاه این فناوری است ارائه شود. به‌همین علت عوامل مهم بررسی، تحلیل و شبیه‌سازی می‌شود و بر مبنای آن نتایج نهایی ارائه می‌شود. دانستن قدر^۱ ستارگان برای تصویربرداری نجومی بسیار ضروری است. قدر ستارگان در واقع اندازه‌ای برای سنجش درخشندگی ستارگان نسبت به یک مقدار مرجع است. طبق توافقات بین‌المللی ستاره‌ی Vega در تمام پنجره‌های طیفی به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و روشنایی دیگر ستارگان برای محاسبه‌ی قدر با آن قیاس می‌شود. رابطه ۱ معرف قدر ستارگان است.

$$M = -2.5 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

که در آن I شدت نور ستاره مورد ارزیابی و I_0 شدت نور ستاره مرجع در پنجره طیفی یکسان است. اندازه‌گیری قدر ستارگان در پنجره‌ی طیفی V (۵۹۹-۵۱۱nm) به شکل گسترده توسط افزاره‌های اپتیکی اندازه‌گیری شده است و در پنجره‌های طیفی I, J, H, K به‌ندرت و برای ستارگان خاصی انجام شده است. پنجره طیفی I مربوط به ناحیه ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، J مربوط به ۱۱۰۰ تا ۱۳۵۰ نانومتر، H مربوط به ۱۵۰۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر و K مربوط به ۲۲۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است [۱].

پنجره I در ناحیه‌ی فروسرخ نزدیک قرار دارد و سه پنجره‌ی دیگر مربوط به ناحیه فروسرخ کوتاه موج هستند. تأکید بر این پنجره‌ها به این دلیل است که اطلاعاتی از تصاویر آسمان در این نواحی در دسترس است که در ناحیه‌ی مرئی آشکار نیست. خلاصه‌ی تاریخچه تحقیقات آشکارسازی ستارگان در روز در ادامه آمده است.

کومن در سال ۱۹۵۸ امکان آشکارسازی ستارگان در ارتفاع صد هزار فوت از سطح زمین را در پنجره طیفی J بررسی کرده است. این بررسی برای ارتفاع صد هزار فوت انجام شده است. در این بررسی از یک لنز ۱۳۵ میلی‌متری و همچنین یک دوربین SWIR^۲ استفاده شده است و دلیل این کار کم شدن اثرات اتمسفری به‌علت کاهش غلظت آن در آن ارتفاع بیان شده است [۲]. زومین شن در سال ۲۰۰۴ با روش‌های پردازش تصویر توانسته از زمینه نویزی تصاویر آسمان در طول روز، ستاره را استخراج کند. در این پژوهش پردازش تصویر هدف اصلی بوده و در مورد ماهیت سخت‌افزاری تصویربرداری سخنی به‌میان نیامده است [۳].

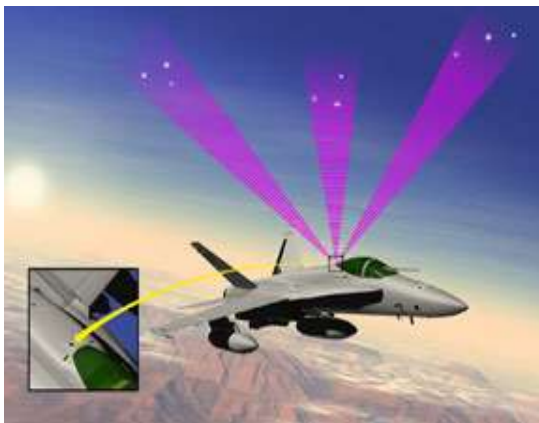
گیووانی در سال ۲۰۰۴ امکان آشکارسازی ستارگان در پنجره طیفی I و با استفاده از لنز ۱۳۵ میلی‌متری و در ارتفاع ۳۰ الی ۴۰ کیلومتری سطح زمین بررسی کرده است. در این پژوهش رسیدن به تصویربرداری در روز با افزاره‌های تصویربرداری مرئی مدنظر بوده است تا از طریق نصب بر بالن در ارتفاع ذکر شده یک موقعیت‌یاب اپتیکی ارزان‌قیمت فراهم شود [۴]. خانم روژین ژانگ در سال ۲۰۱۲ اثر فیلترهای مختلف بر

آشکارسازی ستارگان در ناحیه مرئی با تلسکوپ نجومی در طول روز را بررسی کرده است و هدف بررسی فیلترهای طیفی و فیلتر قطبش بر نور دریافتی بوده است و با توجه به اثر پراکندگی نور خورشید در آسمان، استفاده از هر دو فیلتر طیفی و قطبش مفید شناخته شده است [۵].

شرکت Trex Enterprises متعلق به کشور آمریکا در سال ۲۰۱۶ مدعی ساخت موقعیت‌یاب اپتیکی با قابلیت آشکارسازی ستارگان از سطح دریا تا قدر ۶/۳ شده است. این سامانه دارای سه محور اپتیکی و قابل نصب بر روی هواپیما است. درواقع این سامانه مستقل از GPS رفتار کرده و باعث مقاوم شدن مکان‌یابی پرنده در برابر اختلالات GPS می‌شود [۶].



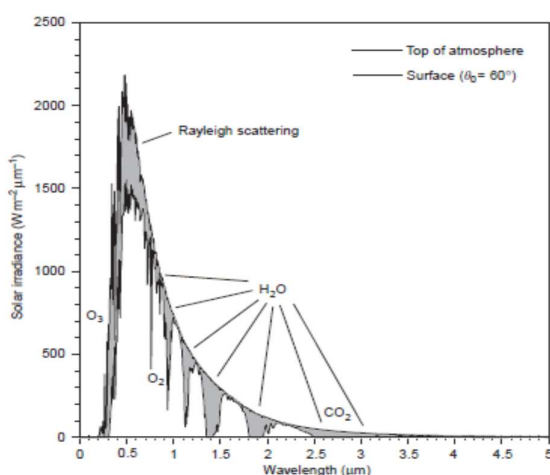
شکل ۱: موقعیت‌یاب اپتیکی ساخت شرکت Trex Enterprises [۶].



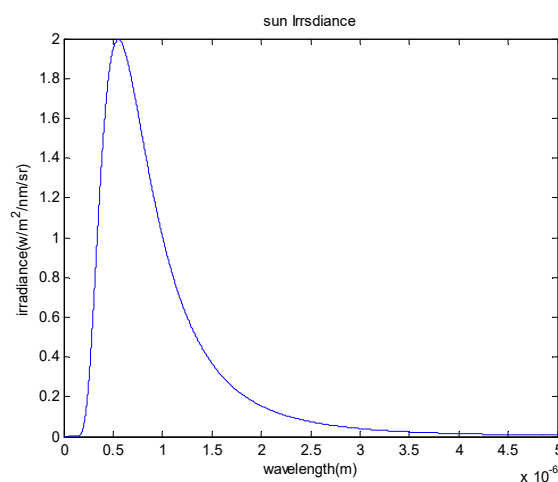
شکل ۲: طرح‌واره استفاده از موقعیت‌یاب اپتیکی روی هواپیما [۶].

در این پژوهش ابتدا چگونگی آشکارسازی ستارگان در روز و مشکلات پیش‌روی مسیر بحث می‌شود و سپس با ارائه یک مدل شبیه‌سازی شده، آشکارسازی بعضی از ستارگان در روز پیش‌بینی شده و در نهایت این پیش‌بینی توسط افزاره‌های مناسب راستی‌آزمایی می‌شود و همه این مراحل گام ابتدائی برای رسیدن به موقعیت‌یاب اپتیکی با قابلیت کار در طول روز است.

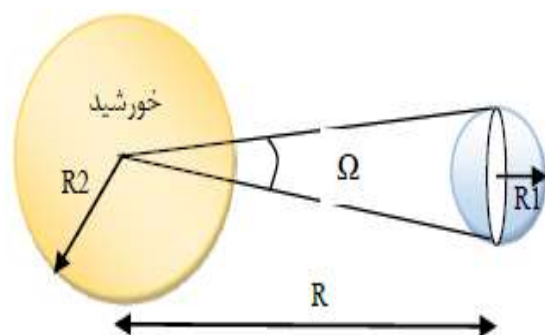
به طوری که r فاصله‌ی زمین تا خورشید و Ω معرف زاویه‌ی فضایی است. در شکل ۵ طرح‌واره‌ای از زاویه‌ی فضایی زمین نسبت به خورشید نشان داده می‌شود.



شکل ۳: شدت تابش خورشید در بالای جو و سطح زمین [۸]



شکل ۴: نمودار جسم سیاه با دمای ۵۲۵۰ کلوین



شکل ۵: زاویه فضایی زمین از مکان خورشید

در ادامه این مقاله در بخش ۲ شدت نور ستارگان در سطح زمین بر مبنای مدل ارائه شده شبیه‌سازی می‌شود و در بخش ۳ عوامل مؤثر در درخشش آسمان در طول روز بحث و بررسی می‌شود. در بخش ۴ گذردهی اتمسفر در شرایط مختلف محاسبه و شبیه‌سازی می‌شود و در بخش ۵ مدلی ارائه می‌شود که امکان آشکارسازی ستاره در روز را با ادوات مختلف اپتیکی بررسی می‌کند و در نهایت در بخش ۶ امکان پیش‌بینی شده در بخش ۵، توسط افزارهای آزمایشگاهی مناسب آزمایش می‌شود.

۲- شدت نور ستارگان در سطح زمین

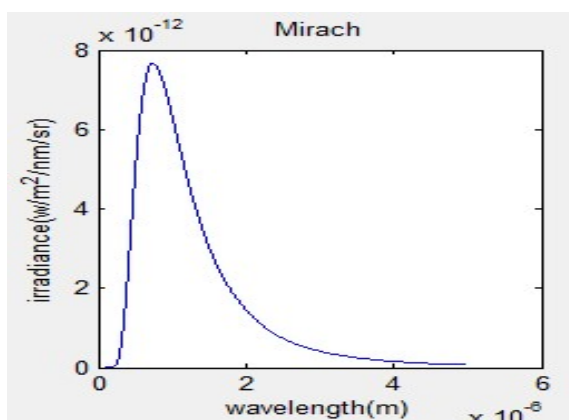
چون ستارگان با تقریب خوبی همانند جسم سیاه رفتار می‌کنند. برای به دست آوردن تابندگی ستارگان از رابطه‌ی تابش جسم سیاه پلانک استفاده می‌شود. [۷].

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2)$$

این رابطه معرف تابندگی جسم سیاه در بازه‌ی $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ است. برای تطبیق این رابطه با تابندگی ستاره باید اندازه‌ی سطح بیرونی ستاره در آن ضرب شود و برای به دست آوردن شدت تابش، فاصله تا زمین و زاویه فضایی نیز در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله قصد بر این است که قدر سه ستاره در پهنه‌ی طیفی فروسرخ نزدیک توسط یک روش تئوری محاسبه شود و نمودار روشنایی آن‌ها در این پهنه شبیه‌سازی شود. در این روش یک ستاره که اطلاعات خوبی از آن در دسترس است انتخاب شده و قدر و روشنایی دیگر ستارگان بر مبنای آن استخراج می‌شود. ستاره‌ای انتخاب می‌شود که تابش آن با تابش محاسبه شده از جسم سیاه هماهنگی خوبی داشته باشد. برای افزایش دقت باید فاصله‌ی ستاره از انتخابی تا زمین و همچنین شعاع آن با دقت خوبی مشخص باشد. با این استدلال از انتخاب ستاره‌های سرخ به دلیل تغییرات زیاد در حجمشان خودداری می‌شود. در نهایت خورشید به عنوان ستاره‌ای که شدت تابش آن روی زمین شباهت بسیار زیادی با جسم سیاه با دمای k ۵۲۵۰ دارد انتخاب می‌شود. شکل ۳ شدت تابش خورشید در بالای جو زمین و در سطح دریا را نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه‌های جذبی و عوامل اصلی جذب مشخص شده‌اند. [۸]

شکل ۴ نمودار شدت تابش یک جسم سیاه با دمای ۵۲۵۰ کلوین و با حجم خورشید را در فاصله‌ی برابر خورشید تا زمین نشان می‌دهد. این نمودار به شکل خوبی با شدت تابش خورشید توافق دارد. با محاسبه شدت تابش جسم سیاه با این دما (طبق فاصله‌ی خورشید تا زمین و شعاع خورشید) و قیاس آن با شدت تابش اندازه‌گیری شده از خورشید توسط افزارهای اپتیکی، مناسب بودن این انتخاب تأیید می‌شود. برای محاسبه شدت تابش خورشید روی زمین از عبارت زیر استفاده می‌شود:

$$L(\lambda, T) = B_{\lambda}(\lambda, T) * \frac{\Omega}{r^2}$$



شکل ۸: نمودار مربوط به شدت تابش Mirach با روش پیشنهادی در محدوده ۰/۱ تا ۵ میکرومتر

همان گونه که در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شده است شدت تابش Betelgeuse و Mirach در طول موج های بلندتر بیشتر از Vega است و علت آن دمای کمتر آن ها نسبت به ستاره Vega است. با این وضعیت می توان نتیجه گرفت که آشکارسازی ستارگانی که دمای کمتری دارند در پنجره طیفی NIR آسان تر است و نیاز به پردازش های کمتری روی تصویر وجود دارد.

۳- شدت نور آسمان در سطح زمین

روشنایی آسمان روز از سه عامل ناشی می شود که برخی از آن ها سهم بیشتر و برخی دیگر سهم کمتری در تابندگی آن دارند. در ادامه این سه عامل توضیح داده می شود.

۳-۱- پراکندگی رایلی

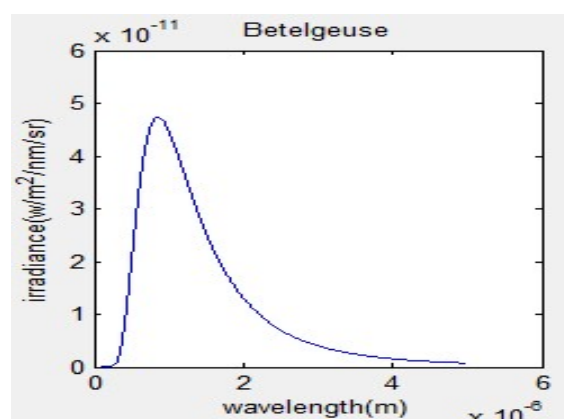
در پراکندگی رایلی عامل اصلی مولکول های هوا هستند. به طوری که مولکول های گاز به طور تقریبی به عنوان دوقطبی های منفرد در نظر گرفته می شوند. میدان مغناطیسی وارد شده بر مولکول باعث القای دوقطبی های نوسانی می شود و دوقطبی ها به وسیله فرکانس نور ورودی نوسان می کنند و به دلیل اینکه شامل تعداد زیادی دوقطبی هستند، جسم مورد نظر در همه جهات، نور فرودی را پراکنده می کنند. بیشترین سهم تابندگی آسمان مربوط به پراکندگی رایلی است. شدت نور پراکنده شده برابر است با:

$$I = \frac{I_0}{r^2} \alpha^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \quad (3)$$

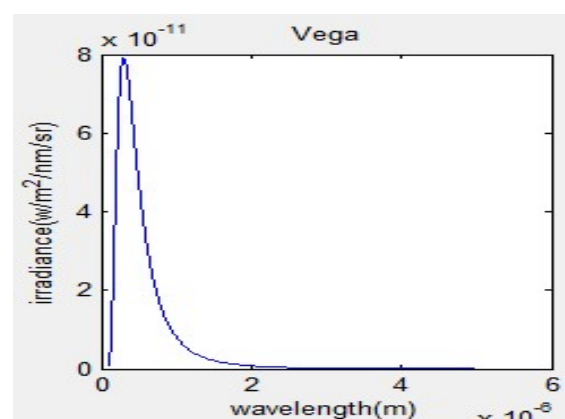
که در آن θ زاویه بین پرتو ورودی و پرتو پراکنده شده است. [۹] رابطه (۳) بیان گر این است که بیشترین پراکندگی وقتی دیده می شود که مولکول های هوا در راستای دید انسان و خورشید باشند و به همین دلیل نواحی نزدیک به خورشید شدت نور بیشتری دارند. شکل ۹ هندسه پراکندگی رایلی را نشان می دهد که مؤید رابطه فوق است.

برای به دست آوردن قدر ستارگان دیگر به متوسط دمایی و قدر ظاهری آن در پنجره ی طیفی V نیاز است. برای به دست آوردن شدت تابش ستارگان در پنجره ی طیفی دلخواه به ترتیب زیر عمل می شود:

نخست شدت تابش خورشید در پنجره ی طیفی V محاسبه می شود و با استفاده از قدر ستاره ی مورد نظر در پنجره ی طیفی V، شدت تابش آن در پنجره ی طیفی V به دست می آید. با جایگزینی شدت تابش ستاره و دمای آن با شدت تابش و دمای خورشید در رابطه ی ۲ فاصله ای که خورشید همانند ستاره ی مورد نظر رفتار می کند به دست می آید. سپس با تغییر ناحیه طول موجی در محاسبات می توانیم روشنایی و قدر ستاره مورد نظر را در پنجره های طیفی مختلف حساب کنیم. مقادیر محاسبه شده با مقادیر تجربی شدت تابش ستارگان اختلاف اندکی دارد که ناشی از عدم تطبیق کامل ستارگان با جسم سیاه است. این اختلاف در مورد ستارگان سرخ کمی بیشتر است. شکل های شدت تابش برای سه ستاره Betelgeuse، Vega و Mirach در ادامه آورده شده است.



شکل ۶: نمودار مربوط به شدت تابش Betelgeuse با روش پیشنهادی در محدوده ۰/۱ تا ۵ میکرومتر



شکل ۷: نمودار مربوط به شدت تابش Vega با روش پیشنهادی در محدوده ۰/۱ تا ۵ میکرومتر

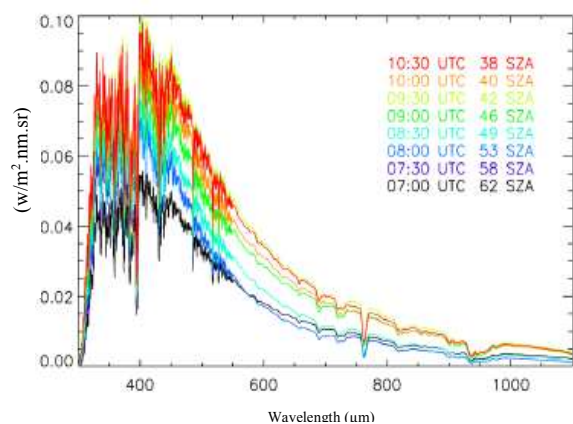
گسیل نور از یک LED دانست. منبع انرژی شیمیایی نور فرابنفش خورشید است که در طول روز مولکول‌های اکسیژن را به اتم‌های تفکیک‌ناپذیر تبدیل می‌کند و از بازترکیب این اتم‌ها پدیده درخشش آسمان رخ می‌دهد. اتم‌ها و مولکول‌های دیگری نیز وجود دارند که منبع تولید درخشش آسمان محسوب می‌شوند که عبارت‌اند از اتم‌های اکسیژن و سدیم و مولکول‌های OH و NO. یون‌هایی شبیه N_2^+ نیز به‌عنوان گسیلنده‌ی این تابش محسوب می‌شوند. درخشش آسمان در مجموع پدیده‌های درخشش شب^۴، درخشش روز^۵ و درخشش نزدیک صبح^۶ را شامل می‌شود. مولکول‌های O_2 و OH بیشترین منبع تولید درخشش آسمان محسوب می‌شوند و باندهای طیفی آن‌ها بیشتر ناحیه مرئی و فرو سرخ نزدیک را شامل می‌شود و سهم درخشش آسمان نسبت به پراکندگی مای و رایلی در تابندگی آسمان اندک است. [۱۱]

۳-۴- طیف تابندگی آسمان

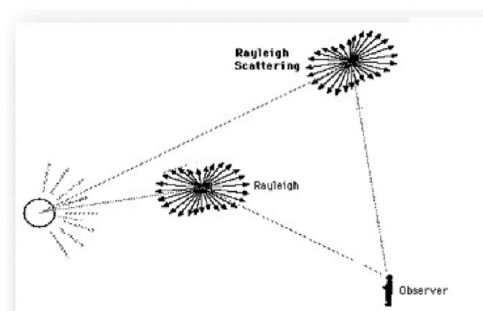
پراکندگی نور خورشید در آسمان که از آن به‌عنوان تابندگی آسمان نیز یاد می‌شود در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. شکل ۱۳ مربوط به اندازه گیری تجربی تابندگی آسمان و شکل ۱۴ مربوط به شبیه‌سازی تابندگی آسمان با نرم‌افزار مدترن است. دو نمودار توافق خوبی با یکدیگر دارند و مؤید نقش عوامل تابندگی آسمان هستند.

شکل ۱۱ اندازه تابندگی آسمان در شهر هانور^۷ در ارتفاع ۶۰ متر بالاتر از سطح دریا در ساعات مختلف را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری در تاریخ دوم ماه می ۲۰۰۷ انجام شده است. همان‌طور که در شکل پیداست بیشترین شدت تابندگی آسمان مربوط به ۴۵۰ نانومتر است و با افزایش طول موج تابندگی کاهش می‌یابد. [۱۲]

شکل ۱۲ شبیه‌سازی تابندگی و پنجره‌های طیفی عبوری آسمان در شهر هالاکالا^۸ در زمان اعتدال بهاری و ساعت ۷ صبح را نشان می‌دهد. این شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار مدترن انجام شده است. با قیاس خطوط این نمودار با هندسه پراکندگی رایلی و مای، روشن می‌شود که خطوط بنفش بیان‌کننده بیشینه شدت پراکندگی رایلی و مای و خطوط سبز بیان‌کننده کمترین شدت آن‌ها هستند.



شکل ۱۱ اندازه تابندگی آسمان در شهر هانور آلمان در ارتفاع ۶۰ متر بالاتر از سطح دریا. [۱۲]



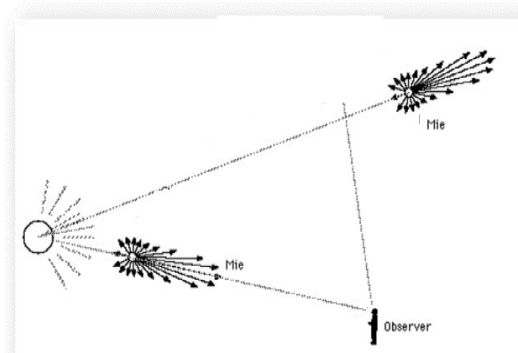
شکل ۹: هندسه پراکندگی رایلی [۹]

به دلیل تناسب پراکندگی رایلی با وارون λ^4 و سهم عمده این پراکندگی در تابندگی آسمان، در طول موج‌های کوتاه‌تر آسمان به‌عنوان منبع نور قوی‌تری رفتار می‌کند و در نتیجه در آن نواحی کار آشکارسازی سخت‌تر می‌شود.

۳-۲- پراکندگی مای

پراکندگی مای زمانی اتفاق می‌افتد که اندازه ذرات موجود در جو بزرگ‌تر یا برابر با طول موج تابش وارد شده به آن ذره باشد. در حالت کلی پراکندگی مای با استفاده از رابطه زیر، اگر $X=1$ باشد رخ می‌دهد که شعاع ذره و λ طول موج تابش فرودی است.

$$X = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (۴)$$



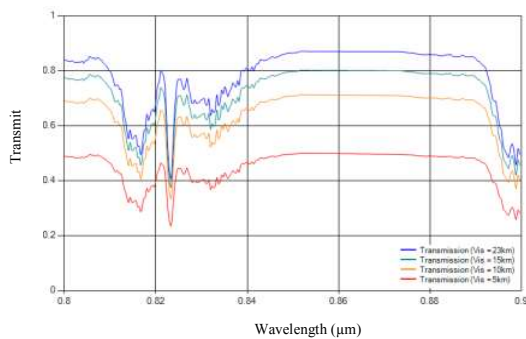
شکل ۱۰: هندسه پراکندگی مای [۱۰]

هندسه پراکندگی مای در شکل ۱۰ نشان داده شده است و بیان‌کننده این واقعیت است که در پراکندگی مای بیشترین مقدار پراکندگی رو به جلو است و این امر موجب می‌شود بیشترین درخشش برای پراکندگی بیشینه به‌وجود بیاید و چون همه طول موج‌ها دچار این پراکندگی مای شوند آن ناحیه سفید به نظر می‌رسد. این پراکندگی در هوای غبار آلود و همچنین هنگامی که ابرها هستند خود را بیشتر نشان می‌دهد. زاویه بین مسیر مشاهده تا مشاهده گر و مسیر خورشید تا مشاهده گر هرچه کمتر باشد اثر پراکندگی مای بیشتر است. [۱۰]

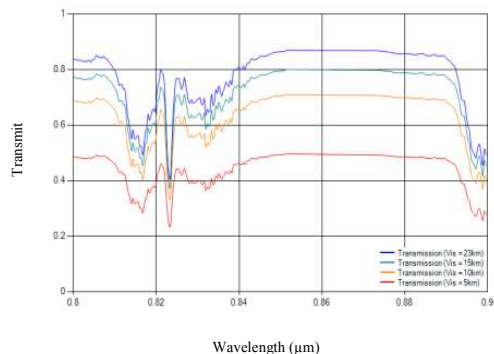
۳-۳- پدیده درخشش آسمان

درخشش آسمان^۹ در واقع گسیل نور توسط اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته شده توسط فرایند شیمیایی در لایه‌های بالایی جو است. منابع تابش دیگری نیز در آسمان وجود دارند که دلایل متفاوتی دارند. گسیل درخشش آسمان از نوع تابش شیمیایی است و می‌توان آن را شبیه

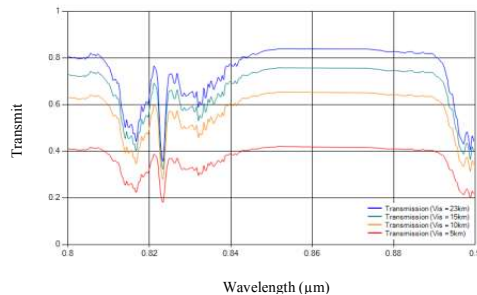
از شکل ۱۳ مشخص می‌شود که در پنجره طیفی I، ناحیه ۰/۸ تا ۰/۹ دارای کمترین جذب و بیشترین گذردهی است. همچنین گذردهی در این ناحیه بسیار نزدیک به عبور دهی پنجره‌های J، H و K است. انتخاب پنجره I به این دلیل است که این ناحیه توسط CCD های مرئی پوشش داده می‌شود و درواقع انتخاب ارزان‌تری محسوب می‌شود. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ گذردهی برای زوایای ۰، ۳۰ و ۶۰ نسبت به اوج آسمان نشان داده می‌شود و این معنا واضح است که با افزایش زاویه نسبت به اوج آسمان گذردهی کمتر و بنابراین آشکارسازی ستاره باید دشوارتر باشد. همچنین نسبت سیگنال به نویز در شرایط دید ۵ کیلومتر نسبت به شرایط دید ۲۳ کیلومتر ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.



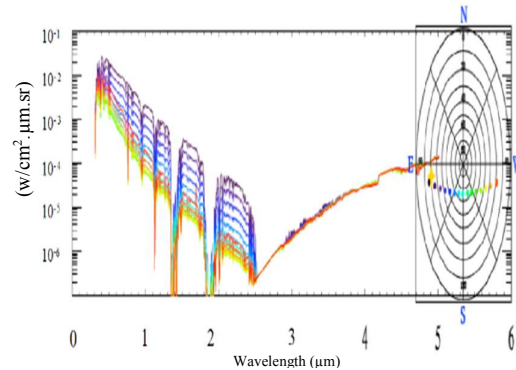
شکل ۱۴: نمودار گذردهی اتمسفر در شرایط دید ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۳ کیلومتر و زاویه صفر درجه نسبت به اوج آسمان و ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در ناحیه طول موجی ۰/۸ تا ۰/۹ میکرومتر



شکل ۱۵: نمودار گذردهی اتمسفر در شرایط دید ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۳ کیلومتر و زاویه ۳۰ درجه نسبت به اوج آسمان و ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در ناحیه طول موجی ۰/۸ تا ۰/۹ میکرومتر



شکل ۱۶: نمودار گذردهی اتمسفر در شرایط دید ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۳ کیلومتر و زاویه ۶۰ درجه نسبت به آسمان و ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در ناحیه طول موجی ۰/۸ تا ۰/۹ میکرومتر



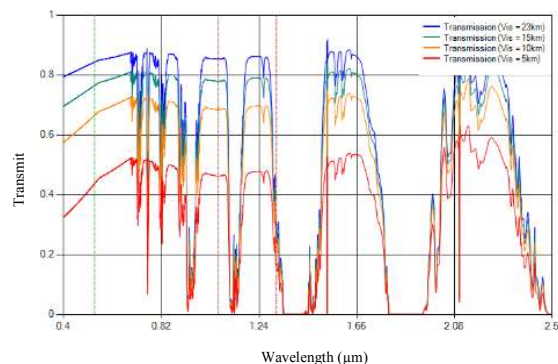
شکل ۱۲: شبیه‌سازی تابندگی و پنجره‌های طیفی عبوری آسمان در شهر هالاکالا توسط نرم‌افزار مد ترن [۱۳]

نکته بسیار حائز اهمیت این است که میدان دید سامانه‌ای که از درون آن به آسمان نظاره می‌شود به صورت مستقیم در تابندگی که از آسمان مشاهده می‌شود مؤثر است به طوری که هرچه میدان دید کوچک‌تر باشد سهم کمتری از آسمان به عنوان منبع نورانی دیده می‌شود و در نتیجه مقدار تابندگی کاهش می‌یابد.

۴- عبور دهی اتمسفر

برای این که نشان داده شود آشکارسازی در پنجره‌های طیفی مختلف چه وضعیتی می‌تواند نسبت به هم داشته باشند، گذردهی اتمسفر در ناحیه ۰/۱ تا ۲/۵ میکرومتر شبیه‌سازی شد که مبتنی بر در نظر گرفتن اثرات جذب و پراکندگی مولکولی و هواویزها و در نظر گرفتن گازهای O_3 ، HNO_3 ، N_2O ، CH_4 ، H_2S ، CO ، CO_2 ، H_2O ، O_2 ، N_2 و همچنین از مدل هریس پریستر^۱ برای تغییرات چگالی با ارتفاع و تصحیح چگالی هوا استفاده شده است. [۱۴]

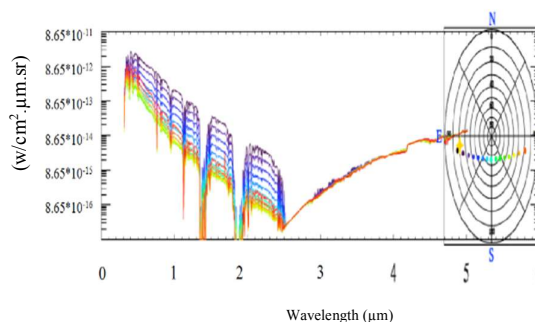
در این شبیه‌سازی که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است مؤلفه‌های مهمی مانند زاویه ستاره نسبت به اوج آسمان، دما، فشار، رطوبت نسبی، ارتفاع محل دریافت از سطح دریا، دامنه طیفی و شرایط دید ۵ تا ۲۳ کیلومتر انجام شد. نتیجه برای ارتفاع ۱۵۰۰ متر و رطوبت ۵۰ درصد و فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۵ درجه سلسیوس نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار گذردهی اتمسفر در شرایط دید ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۳ کیلومتر و زاویه صفر درجه نسبت به اوج آسمان و ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در ناحیه طول موجی ۰/۴ تا ۲/۵ میکرومتر

۵-ارائه مدل برای آشکارسازی ستاره در روز

انتظار می‌رود اگر شرایطی ایجاد شود که ستاره به‌عنوان هدف به‌اندازه ۱ واحد قدر از آسمان به‌عنوان زمینه روشن‌تر باشد آشکارسازی در روز بدون نیاز به پردازش تصویر انجام شود. برای انجام مدل‌سازی و پیش‌بینی آشکارسازی در روز، سه ستاره که در بخش ۱ عنوان شد در نظر گرفته می‌شود. علت انتخاب این ستاره‌ها نخست متفاوت بودن قدر آن‌ها در بازه ۰ تا ۲ است و دوم تفاوت دمای آن‌هاست که باعث تفاوت در قله تابشی آن‌ها می‌شود. مدل‌سازی به دو بخش تقسیم می‌شود که یکی به‌دست‌آوردن قدر ستارگان در نواحی مختلف است و دیگری محاسبه قدر آسمان با توجه به مؤلفه‌های نوری است. در مورد آسمان ابتدا شدت تابش آن باید محاسبه شود. در شکل ۱۷ شدت تابش آسمان توسط نرم‌افزار مدرن شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که دیده می‌شود شکل طیفی نسبت به تابندگی آسمان تغییر نکرده و فقط شدت آن کاهش یافته است.



شکل ۱۷: شبیه‌سازی شدت تابش و پنجره‌های طیفی عبوری آسمان در شهر هالاکالا توسط نرم‌افزار مدرن [۱۳]

در محاسبه شدت تابش آسمان میدان دید امری تعیین‌کننده است و قدر آسمان برحسب λ (زاویه قوسی) محاسبه می‌شود. در ادامه با استفاده از مدل‌سازی که در بخش ۱ بیان شد و با تأیید دادن مؤلفه‌های تأثیرگذار شرایط وضوح دید در ۴ پنجره I، J، H و K محاسبه شده است که در نهایت نتایج پنجره I در شرایط تجربی راستی‌آزمایی می‌شود. شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ مدل‌سازی انجام‌شده توسط نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد. محاسبات در شرایط وضوح دید ۲۳ کیلومتر انجام می‌شود. محاسبات به‌ترتیب مربوط به ستاره‌های Vega، Betelgeuse و Mirach هستند.

از آن‌جاکه منبع تابندگی آسمان ناشی از پراکندگی نور خورشید توسط مولکول‌های هوا است می‌توان نتیجه گرفت اندازه درخشش قابل‌مشاهده به میدان دید لحظه‌ای یک سامانه، یعنی کمترین زاویه قابل‌تفکیک یک سامانه اپتیکی مرتبط است. به همین علت باید گفته شود که هرچه فاصله کانونی یک سامانه اپتیکی بزرگ‌تر شود، میدان دید لحظه‌ای آن کوچک‌تر می‌شود و عوامل پراکندگی نور به‌اندازه کمتری در مسیر دید آن وجود خواهند داشت و معنای آن کاهش شدت زمینه است. برای به‌دست‌آوردن قدر آسمان توان دریافتی از تابندگی آسمان در سطح زمین در میدان دید لحظه‌ای سامانه نوری ضرب می‌شود و با استفاده از رابطه ۱ قدر آسمان محاسبه می‌شود. حد بالای

افزایش فاصله کانونی تا جایی است که قدر زمینه مشاهده‌شده یک واحد کوچک‌تر از قدر ستاره مورد آشکارسازی شود. به‌همین دلیل محاسبه قدر ستاره ضروری است که از طریق مدلی که در بخش ۲ پیشنهادشده انجام می‌شود. به‌دلیل افزایش جرم و حجم، استفاده از فاصله کانونی خیلی بزرگ پذیرفته نیست و باید یک مصالحه‌ای در انجام این کار صورت گیرد. تمامی محاسبات انجام‌شده با در نظر گرفتن ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا است و چنانچه ارتفاع بخواهد از این مقدار کمتر باشد به‌علت افزایش غلظت مولکولی اتمسفر قدر آسمان بیشتر شده و نتایج اندکی تغییر می‌کند ولی تغییرات تأثیرگذاری کمی در نتیجه نهایی خواهد داشت. و با افزایش ارتفاع نیز به‌علت کاهش غلظت مولکولی قدر آسمان کمتر شده و باعث تغییر در نتایج خواهد شد. از ارتفاع ۵۰۰۰ متر به بالا به‌دلیل تغییرات اندک غلظت مولکولی قدر آسمان تغییرات کمی خواهد داشت ولی از ۱۵۰۰ متر تا ۵۰۰۰ متر این تغییرات شدید است. در نرم‌افزار نوشته‌شده موارد زیر لحاظ می‌شود:

الف- قدر مرئی ستاره و دمای آن به نرم‌افزار داده می‌شود و از طریق مدل ذکرشده در بخش ۲ قدر ستاره در پنجره‌های طیفی دیگر محاسبه می‌شود.

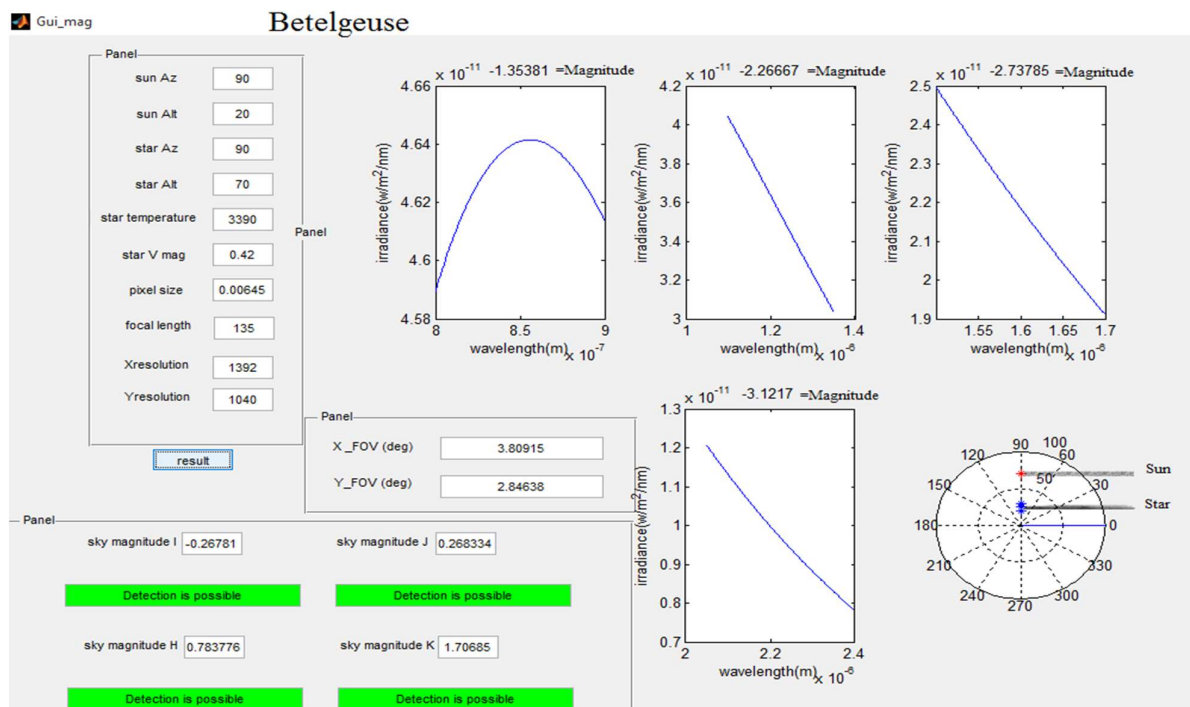
ب- زاویه ستاره از خورشید در نظر گرفته‌شده و تأثیرگذاری بر پراکندگی رایلی و اندازه قدر آسمان محاسبه می‌شود که این اندازه برحسب زاویه قوسی است.

ج- مشخصات سامانه اپتیکی از قبیل ابعاد حساسه آشکارساز و فاصله کانونی سامانه به نرم‌افزار داده می‌شود تا میدان دید لحظه‌ای محاسبه‌شده و قدر آسمان که توسط سامانه‌ی اپتیکی مشاهده می‌شود به‌دست آید.

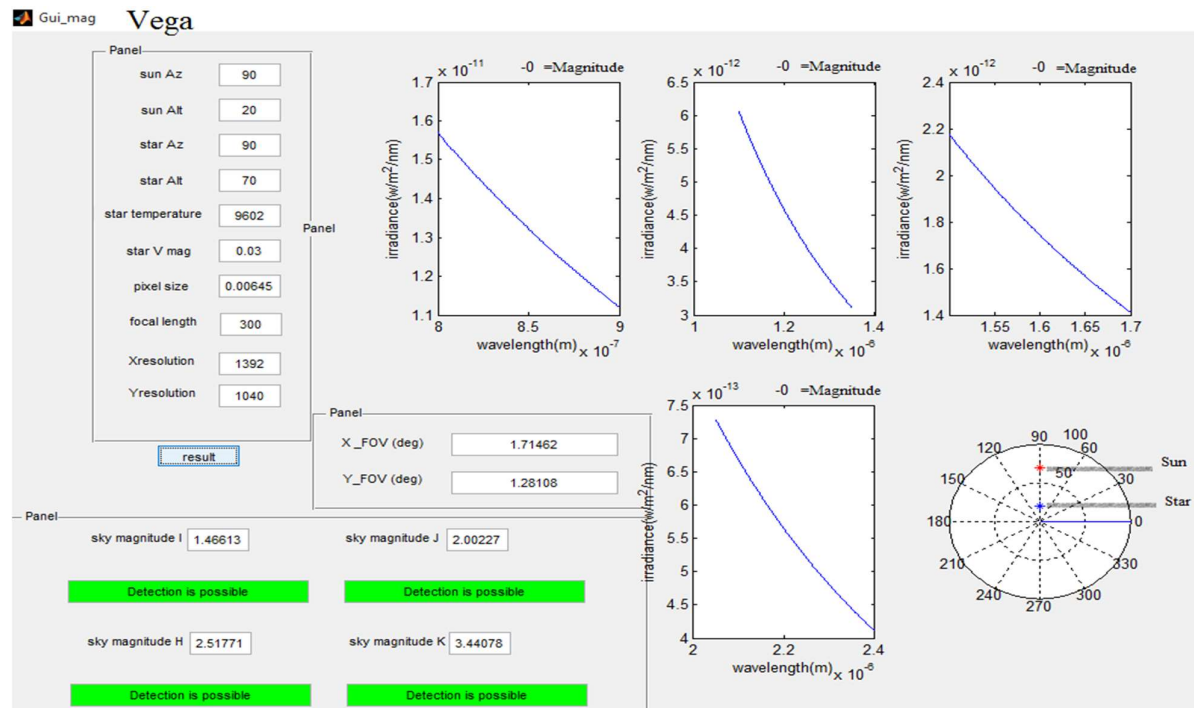
د- قدرهای محاسبه‌شده ستاره و آسمان باهم قیاس می‌شوند و اگر قدر ستاره یک واحد بیشتر از قدر آسمان باشد اعلام می‌شود که آشکارسازی امکان‌پذیر است و اگر چنین نباشد اعلام می‌شود که آشکارسازی امکان‌پذیر نیست.

برای یک ستاره خاص اگر شرایط شبیه‌سازی از قبیل فاصله زاویه‌ای از خورشید، ابعاد حساسه آشکارساز و دیگر ورودی‌های نرم‌افزار تغییر نکند نتیجه مدل‌سازی ثابت خواهد بود و تابع زمان نیست. البته این مدل‌سازی برای ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا انجام‌شده است و با تغییر ارتفاع محاسبات تابندگی آسمان تغییر می‌کند. چنانچه ارتفاع بخواهد از این مقدار کمتر باشد به‌علت افزایش غلظت مولکولی اتمسفر قدر آسمان بیشتر شده و نتایج اندکی تغییر می‌کند ولی تغییرات تأثیرگذاری کمی در نتیجه نهایی خواهد داشت. و با افزایش ارتفاع نیز به‌علت کاهش غلظت مولکولی قدر آسمان کمتر شده و باعث تغییر در نتایج خواهد شد. از ارتفاع ۵۰۰۰ متر به بالا به‌دلیل تغییرات اندک غلظت مولکولی قدر آسمان تغییرات کمی خواهد داشت ولی از ۱۵۰۰ متر تا ۵۰۰۰ متر این تغییرات شدید است. با توجه به اینکه قدرهای کمتر نشانه‌ی روشنایی بیشتر است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سامانه‌ای که یک ستاره با قدر مشخصی را آشکارسازی کند می‌تواند تمامی قدرهای

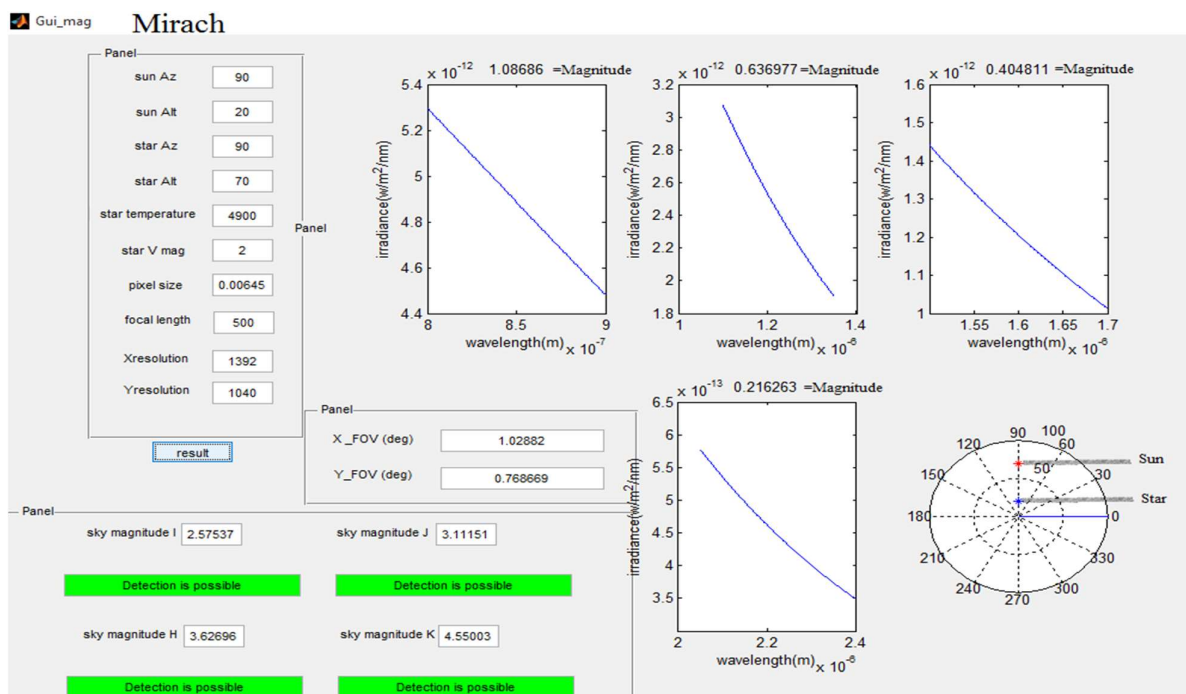
قبل از آن را نیز آشکارسازی کند ولی توانایی آشکارسازی قدرهای بیشتر از آن را نخواهد داشت و برای این کار سامانه‌ی اپتیکی باید تغییر کند.



شکل ۱۸: نتیجه مدل‌سازی امکان آشکارسازی ستاره Betelgeuse در زاویه ۵۰ درجه نسبت به خورشید با مشخصات اپتیکی که در ستون عمودی وارد شده در ۴ پنجره طیفی I، J، H و K.



شکل ۱۹: نتیجه مدل سازی امکان آشکارسازی ستاره Vega در زاویه ۵۰ درجه نسبت به خورشید با مشخصات اپتیکی که در ستون عمودی وارد شده در ۴ پنجره طیفی J، I، H و K.



شکل ۲۰: نتیجه مدل سازی امکان آشکارسازی ستاره Mirach در زاویه ۵۰ درجه نسبت به خورشید با مشخصات اپتیکی که در ستون عمودی وارد شده در ۴ پنجره طیفی J، I، H و K.

THORLAB بوده و کیفیت قابل قبولی دارد. در مرحله سوم محدودیت ذاتی سامانه برای تفکیک زاویه‌ای، تعیین کننده زاویه قوسی سامانه است. سامانه اپتیکی به دلیل محدودیت پراش تصویر یک نقطه را به صورت لکه نشان می‌دهد. دایره‌ی مرکزی حلقه‌های پراش دربرگیرنده ۸۴ درصد انرژی دریافتی از نقطه است. این دایره قرص ایری^{۱۱} نام دارد که قطر آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود. بین قرص ایری و ابعاد پیکسل آشکارساز، هرکدام کوچک‌تر باشد معیار میدان دید لحظه‌ای سامانه قرار می‌گیرد. رابطه ۵ معرف قطر قرص ایری است. [۱۶]

$$D = 2.44\lambda F\# \quad (5)$$

در مرحله سوم باید به حذف نورهای مزاحم و سرگردان پرداخته شود. منشأ تولید نورهای سرگردان را می‌توان در قالب موارد زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- منبع موردنظر در میدان دید سامانه تصویربرداری باشد، ولی به هر دلیلی پرتوهای آن از مسیری ناخواسته و غیرمعمول به سامانه اپتیکی وارد شوند و یا درخشندگی بیشتری نسبت به هدف داشته باشند.

۲- منبع خارج از میدان دید باشد مانند تشعشعات حاصل از ماه، خورشید و ستاره‌ها.

۳- منبع داخل میدان دید اما خارج از سامانه باشد مانند پرتوهایی که میان عدسی‌ها بازتاب پیدا می‌کنند.

۴- منبع داخل سامانه اپتیکی باشد مانند تشعشعات مادون قرمز ناشی از اجزای اپتیکی و مکانیکی درون سامانه.

نورهای سرگردان اثرات متفاوتی روی اجزای اپتیکی سامانه تصویربرداری به وجود آورده که در نهایت منجر به کاهش کیفیت داده‌های دریافت شده می‌شود. استفاده از پوشش‌های سطح سیاه و لایه‌های ضد بازتاب در سطوح مختلف و همچنین طراحی مناسب محفظه، سپرها و پره‌های اپتومکانیکی از جمله متداول‌ترین راه‌های کاهش تأثیر نورهای سرگردان بر کیفیت تصویر است. [۱۷]

سامانه‌های انتخاب شده، از نوع مدرن سامانه‌های تصویربرداری محسوب می‌شوند که تا حد مطلوبی کاهش نورهای سرگردان در آن مورد توجه قرار گرفته است. دو لنز و یک تلسکوپ با اعداد کانونی ۲، ۴ و ۸/۲ به ترتیب برای آشکارسازی ستاره‌های Betelgeuse، Vega و Mirach انتخاب شدند که این انتخاب‌ها بر مبنای پارامترهای ورودی در مدل‌سازی انجام شد.

۴-۲- نتیجه آزمایش

در این آزمایش سامانه‌ی الکترواپتیکی بر روی یک موتور سرو نصب شد و با استفاده از الگوریتم ردیابی ستارگان، آشکارسازی در ساعات مختلف روز امتحان شد.

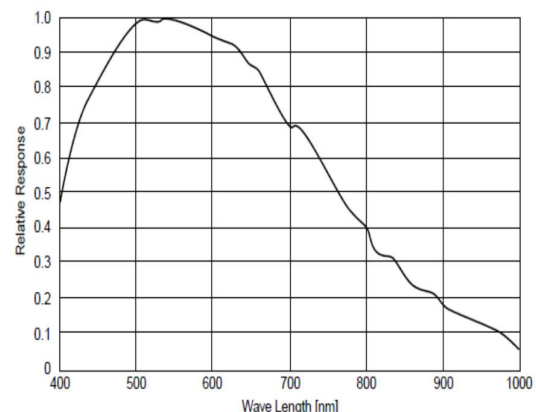
از آن‌جا که بیشترین شدت تابندگی آسمان در هنگام ظهر است، زمان آزمایش از ساعتی قبل از طلوع تا ظهر در نظر گرفته شد و توسط موتور سرو و الگوریتم ردیابی ستارگان، ستاره در طول زمان آزمایش

ستون عمودی معرف مؤلفه‌هایی است که برای محاسبه باید وارد شوند که شامل سمت و ارتفاع خورشید و ستاره برحسب درجه، دمای ستاره، قدر ستاره در پنجره مرئی ۷، ابعاد پیکسل دوربین مورد استفاده، فاصله کانونی لنز و تعداد حساسه‌های آشکارساز است. ستون افقی اول بیان کننده میدان دید سامانه پیشنهادشونده است و ستون افقی دوم قدر آسمان در پنجره‌های طیفی مختلف و امکان آشکارسازی ستاره در آن پنجره با شرایط پیشنهادشده را بیان می‌کند. نمودار قطبی ترسیم شده نشان دهنده‌ی موقعیت خورشید و ستاره نسبت به یکدیگر است و در نمودارها توان دریافتی از ستاره نمایش داده می‌شود که محور افقی بیان کننده‌ی طول موج و محور عمودی بیان کننده توان دریافتی برحسب وات بر مترمربع بر نانومتر است. عدد بالای نمودار نیز بیان کننده قدر ستاره است.

با توجه به شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ با فراهم شدن زوایای قوسی^{۱۱} ۱۰ و ۵ و آشکارسازی Betelgeuse و Vega و Mirach در زوایای ۵۰ درجه نسبت به خورشید ممکن می‌شود. قدر آسمان با زوایای قوسی ذکر شده به ترتیب ۰/۲۶- و ۱/۴۶ و ۲/۵۷ در پنجره طیفی I است.

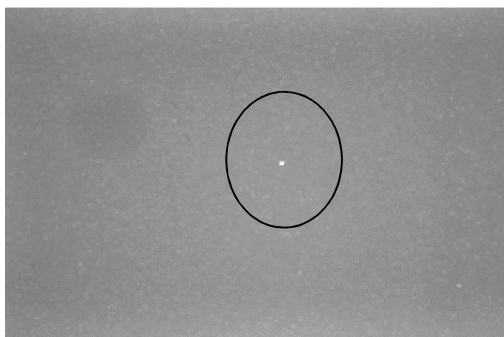
۶- آزمایش‌ها و نتایج

در آزمایش‌های تجربی چند عامل مهم داریم که باید بررسی شود، نخست اینکه باید آشکارسازی انتخاب شود که در ناحیه‌ی NIR اثر کوانتومی قابل قبولی داشته باشد. یعنی درصد تولید الکترون به ازای فوتون ورودی مقدار قابل قبولی داشته باشد که به طور معمول این عدد بیشتر از ۵۰ درصد در قله پاسخ‌دهی انتخاب می‌شود. آشکارساز انتخابی ICX285 ساخت شرکت سونی است. شکل ۲۱ نمودار مربوط به اثر کوانتومی ICX285 را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر بیشینه پاسخ‌دهی در پهنای طیفی ۵۰۰ الی ۵۵۰ نانومتر است و در محدوده ۸۰۰ الی ۹۰۰ نانومتر که مدنظر این مقاله است بین ۲۰ الی ۳۰ درصد است که با افزایش زمان نورگیری سنسور، کاهش اثر کوانتومی جبران می‌شود. ابعاد پیکسل آشکارساز ICX285، ۶/۴۵×۶/۴۵ میکرومتر است. [۱۵]



شکل ۲۱: اثر کوانتومی نسبی آشکارساز ICX285. [۱۵]

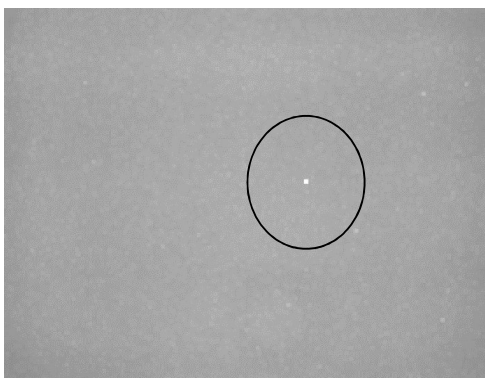
در مرحله دوم استفاده از فیلتر مناسب برای ناحیه موردنظر یعنی ۰/۸ تا ۰/۹ میکرومتر است. فیلتر استفاده شده ساخت شرکت



شکل ۲۵: تصویر مربوط به ستاره Vega. ابعاد پیکسل‌ها بزرگ شده است.



شکل ۲۶: تصویر سامانه‌ای استفاده شده برای ردیابی ستاره Mirach.



شکل ۲۷: تصویر مربوط به ستاره Mirach. ابعاد پیکسل‌ها بزرگ شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله گذردهی آسمان برای طول موج‌های مختلف خورشیدی در زوایای مختلف محاسبه شد و بر طبق یک مدل ارائه شده شدت نور ستارگان در ناحیه فروسرخ نزدیک شبیه‌سازی شد و با ارزیابی مؤلفه‌های سامانه اپتیکی برای نخستین بار یک مدل برای آشکارسازی ستارگان در فروسرخ نزدیک در طول روز ارائه شد که برای سه ستاره با قدرهای ۰، ۰/۴ و ۲ مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت با استفاده از افزاره‌هایی که دارای مؤلفه‌های اپتیکی پیش‌بینی شده در مدل‌سازی هستند و همچنین

ردیابی شد و مشخص شد که با تغییر مکان خورشید نسبت به افق، نتایج دچار تغییر اساسی نخواهد شد که این واقعیت در شبیه‌سازی‌ها نیز مشخص شده است. دوربین استفاده شده در هر سه آزمایش یکسان است ولی لنزها تغییر می‌کند. شکل‌های ۲۲ تا ۲۷ افزاره‌ها و نتایج مربوط به این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲۸: لنز ۱۳۵ میلی‌متری Nikon و دوربین 175 lu استفاده شده برای آشکارسازی Betelgeuse



شکل ۲۹: تصویر مربوط به ستاره Betelgeuse. ابعاد پیکسل‌ها بزرگ شده است.



شکل ۳۰: لنز ۳۰۰ میلی‌متری Cannon و دوربین 175 lu استفاده شده برای آشکارسازی Vega

- [8] I. Muhammad. An Introduction to Solar Radiation, Elsevier, 2012.
- [9] B. Anthony. "Rayleigh-Scattering calculations for the terrestrial atmosphere," *Applied Optics*, vol. 34, no. 15, pp. 2765–2773, 1995.
- [10] D. Hong. "Mie-Scattering calculation." *Applied Optics* vol. 43, no. 9, pp. 1951–1956, 2004.
- [11] J. H. Hecht, "Instability Layers and Airglow Imaging," *Reviews of Geophysics*, vol. 42, no. 1, 2004.
- [12] D. Pissulla, G. Seckmeyer, and S. Wuttke. "Sky Radiance in Hannover, Germany and Antarctica," *Institute of Meteorology and Climatology, Leibniz University Hannover, Germany*, 2015.
- [13] K. Jim, B. Gibson, and E. Pier. "Daytime sky brightness modeling of haleakala," In *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2011.
- [14] H. Volland, "Full Wave Calculations of Gravity Wave Propagation through the Thermosphere," *Journal of Geophysical Research*, vol. 74, no. 7 pp. 1786–1795, 1969.
- [15] <http://www.ccd.com/pdf/ccd.285.pdf>
- [16] D. Malacara-Hernández and Z. Malacara-Hernández. *Handbook of Optical Design*, CRC Press Published, 2016.

[۱۷] محمد اسدنژاد، عبدالله اسلامی مجد، حسن حاج قاسم، «کمینه نمودن نورهای سرگردان در دوربین ماهواره با استفاده از سپر و پره‌های اپتومکانیکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷.

با استفاده از یک موتور سرو برای ردیابی ستاره. نتایج به‌دست‌آمده راستی‌آزمایی شدند که صحت مدل‌سازی را تأیید می‌کند.

مراجع

- [1] A. T. Tokunaga, *Infrared Astronomy*, Allen's Astrophysical Quantities, 4th ed, Springer, 2000.
- [2] M. J. Koomen, "Visibility of stars at high altitude in daylight," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 49, no. 6, pp. 626–629, 1959.
- [3] G. Fazio. Giovanni, "Feasibility study of Utilizing Existing Infrared Array Cameras for Daylight Star Tracking on NASA's Ultra long Duration Bafloon (ULDB) Missions," *Smithsonian Institution Astrophysical Observatory Cambridge, Massachusetts*, 2004.
- [4] M. Zhu, X. H. Shen, and C. Wu. "Study of star image detecting technology in daytime strong background," *7th International Conference on Signal Processing Proceedings, ICSP*, vol. 3. pp. 2514–2517, 2004.
- [5] R. Zhang, H. Xian, C. Rao, and S. Wang. "Study on application of spectral filter in detecting stars in daytime," *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*, 2012.
- [6] <http://www.trexenterprises.com>.
- [7] S. I. Glass, *Handbook of Infrared Astronomy*, vol. 1. Cambridge University Press, 1999.

زیرنویس‌ها

⁷ Hannover

⁸ Haleakala

⁹ Harris-Priester

¹⁰ Arc second

¹¹ Spot size

¹ Magnitude

² Shortwave infrared

³ Air glow

⁴ Night glow

⁵ Day glow

⁶ Twilight glow