



E-ISSN: 2676-4253



Original Research Paper

Star Trackers Evaluation by Statistical Analysis

Mohammad Sajjad Mahdiyari, Mehran Nosratollahi* , and Reza Zardashti 

Department of Flight Dynamics and Control, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 17 February 2023

Revised 09 June 2023

Accepted 13 June 2023

Available Online 13 June 2023

Keywords:

Star tracker

Performance specifications

Statistical design

PST3

Satellite

ABSTRACT

A comprehensive statistical analysis and comparison on the characteristics of star trackers used in the world can provide valuable information to researchers, manufacturers and customers in this field. In this regard, with a comprehensive search, 12 indicators of star sensors (accuracy, maximum trackable rotation rate, acquisition time, data transmission rate, field of view, star magnitude, mass, volume, power, voltage, temperature and lifetime) among 72-star trackers has been investigated and compared in this article. Also, by fitting the curves in the comparative graphs, relationships were extracted that provide statistical design for the manufacturers. By scoring each index from 1 to 10, it is possible to compare all the characteristics of the sensors by radar charts at the same time, and it gives the satellite designers the opportunity to identify and choose the best available star sensor for their purpose and mission by weighting the criteria. Among the other features of these statistical studies is the investigation of sensors made inside the country, which shows that by taking modeling from the hardware and software of sensors such as PST3, it will be possible to upgrade and improve products in less time.

* Corresponding Author's E-mail: m_nosratollahi@sbu.ac.ir

How to Cite this Article:

M. S. Mahdiyari, M. Nosratollahi, and R. Zardashti, "Star Trackers Evaluation by Statistical Analysis," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 41-66, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.1.4>

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





ارزیابی حسگرهای ستاره با تحلیل‌های آماری

محمدسجاد مهدیاری^۱، مهران نصرت‌اللهی^{۲*}، و رضا زردشتی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه آموزشی دینامیک پرواز و کنترل، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه آموزشی دینامیک پرواز و کنترل، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه آموزشی دینامیک پرواز و کنترل، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

یک مقایسه و تحلیل آماری جامع روی مشخصات حسگرهای ستاره به‌کاررفته در دنیا، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار پژوهشگران، سازندگان و مشتریان این حوزه قرار دهد. در این راستا در این مقاله با یک جستجوی جامع، ۱۲ شاخصه از حسگرهای ستاره (دقت، سرعت قابل‌ردیابی، زمان شناسایی اولیه، فرکانس، میدان دید، قدر ستاره، جرم، حجم، توان، ولتاژ، دما و عمر) در میان ۷۲ حسگر ستاره مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. همچنین با برازش منحنی‌ها در نمودارهای مقایسه‌ای روابطی استخراج گردیده که امکان طراحی آماری را برای سازندگان میسر می‌نماید. با امتیازدهی هر شاخصه از نمره ۱ تا ۱۰، امکان مقایسه هم‌زمان تمام مشخصات حسگرها به‌وسیله نمودارهای راداری فراهم شده و به طراحان ماهواره این امکان را داده تا با وزن‌دهی به معیارها، بهترین حسگر ستاره موجود را برای هدف و مأموریت خود، شناسایی و انتخاب نمایند. از جمله ویژگی‌های دیگر این مطالعات آماری نیز، بررسی حسگرهای ساخته شده در داخل کشور می‌باشد که مشخص می‌نماید با الهام‌گیری از سخت‌افزار و نرم‌افزار حسگرهایی چون PST3 امکان ارتقا و پیشرفت محصولات در زمان کمتری قابل حصول خواهد بود.

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

دریافت ۲۸ بهمن ۱۴۰۱
بازنگری ۱۹ خرداد ۱۴۰۲
پذیرش ۲۳ خرداد ۱۴۰۲
اولین انتشار ۲۳ خرداد ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

حسگر ستاره
مشخصات عملکردی
طراحی آماری
PST3
ماهواره

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m_nosratollahi@sbu.ac.ir

How to Cite this Article:

M. S. Mahdiyari, M. Nosratollahi, and R. Zardashti, "Star Trackers Evaluation by Statistical Analysis," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 41-66, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.1.4>

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



۱ مقدمه

در تاریخ صنعت فضایی و ماهواره‌ها همواره یکی از دغدغه‌های اصلی برای طراحان و بهره‌برداران این صنعت، تعیین وضعیت دقیق سامانه‌های فضایی بوده‌است. در این راستا ایده‌های متنوعی از گذشته تا کنون مطرح شده است تا بتوان از طریق رصد و پردازش محیط پیرامون (همچون امواج مغناطیسی، پردازش تصویر، موقعیت اجرام سماوی چون خورشید، ماه، زمین، ستارگان و ...) و محاسبات مستقل از محیط (با ژایروسکوپ‌ها و ...) وضعیت ماهواره را تعیین نمود. چگونگی ترکیب حسگرهای مختلف و استفاده از الگوریتم‌های ریاضی زمینه طرح ایده‌های نوین را فراهم آورده است.

یکی از روش‌های متداول و بسیار دقیق در تعیین وضعیت، محاسبه وضعیت فضاپیما نسبت به ستارگان آسمان می‌باشد. نظم و ساختاری که در حرکت اجرام سماوی نهفته است اطلاعات بسیار دقیق و فراوانی را از وضعیت، موقعیت، زمان و ... ارائه می‌دهد به طوری که با یک لحظه نگاه به هر قسمت کوچک از آسمان تمام این اطلاعات قابل استخراج است.

برای بهره‌گیری از قابلیت مذکور در دنیای سماوی، حسگری (با اصطلاح Star Tracker) طراحی شده است که مانند یک دوربین دیجیتال هر لحظه با نورگیری مناسب تصویر ستاره‌ها را ثبت کرده و با پردازش و مقایسه آن تصویر با کاتالوگ ستاره‌ها، وضعیت بدنه حسگر را مستقیماً نسبت به مختصات سماوی و اینرسی محاسبه می‌نماید.

حسگر ستاره دقیق‌ترین ابزار تعیین وضعیت محسوب می‌شود که می‌تواند به تنهایی وضعیت سه محور ماهواره را با دقتی در رنج ثانیه قوسی محاسبه نماید؛ لذا این حسگر نقش مهمی در ماهواره‌ها داشته و همواره مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران این حوزه بوده تا قابلیت‌های آن افزایش یابد. این حسگر پیچیده دارای مشخصات عملکردی متنوعی می‌باشد که ارتقاء هم‌زمان آن‌ها نیازمند پشتوانه علمی- عملی و نرم‌افزاری- سخت‌افزاری بسیار قوی می‌باشد. رصد پژوهش‌ها در این زمینه و مشخصات محصولات موجود می‌تواند دید خوبی نسبت به جایگاه فنی این حسگر و مسیر توسعه آن در آینده ایجاد نماید.

تاکنون حسگرهای ستاره متنوعی در مراکز صنعتی و دانشگاهی ساخته شده است که دسترسی به تمام اطلاعات آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لکن با یک جستجوی وسیع تا حد امکان اطلاعات مربوط به ۱۰۰ حسگر ستاره که از سال ۱۹۹۵ میلادی به بعد ساخته شده‌اند، جمع‌آوری شده است. این اطلاعات بیشتر از مشخصات

محصول‌ها^۱ إحصاء شده‌است؛ ولی برای تکمیل آن‌ها از اطلاعات موجود در مقالات و مراجع مختلف نیز استفاده شده‌است. با جمع این داده‌ها، اطلاعات ارزشمندی از مشخصات مختلف حسگرها شکل گرفته که امکان مقایسه و تحلیل‌های مهمی را میسر می‌نماید. در این مقاله ۲۱ مورد از مشخصات مربوط به یک حسگر ستاره معرفی شده و با توجه به اطلاعات در دسترس، مقایسه‌ها در رابطه با ۱۲ شاخص صورت گرفته است. با توجه به ظرفیت محدود یک مقاله، به همین حد اکتفا شده است؛ ولی این اطلاعات خیلی بیشتر از این موارد قابل استفاده بوده و امکانات بااهمیتی را در اختیار پژوهشگران، سازندگان و مشتریان این حوزه قرار می‌دهد. سازندگان با ارزیابی این داده‌ها می‌توانند به جایگاه فعلی هر نوع فناوری و مشخصه در حوزه حسگر ستاره دست یافته و مسیر پیش‌رو برای ارتقاء و توسعه را ترسیم نمایند.

با توجه به توضیحات مذکور، رویکرد اصلی در این مقاله مقایسه تحلیلی شاخصه‌های گوناگون در حسگرهای مختلف می‌باشد که در بخش ۱-۳ بیشتر یک شاخص به صورت مستقل ارزیابی شده، در بخش ۱-۴ روابط بین شاخصه‌ها استخراج شده و در بخش ۱-۵ مقایسه‌های کلی‌تری با بررسی شاخصه‌های بیشتر به صورت هم‌زمان ارائه شده است.

همچنین برای درک بهتر این سه بخش تحلیلی، ابتدا در دو قسمت ۱-۱ و ۱-۲ آشنایی بیشتری با حسگر ستاره و مشخصات عملکردی آن صورت پذیرفته است.

۱.۱ آشنایی با حسگر ستاره

طبق شکل ۱، حسگر ستاره از بخش‌های مختلفی تشکیل می‌شود که در یک تقسیم بندی کلی، می‌توان دو بخش اصلی زیر را در نظر گرفت:

۱- واحد هد اپتیکی^۲ که شامل لنزها^۳، حساسه نوری نیمه‌هادی^۴ برای تصویربرداری از ستاره‌ها و تبدیل اطلاعات به سیگنال‌های دیجیتال، و همچنین سپر پوششی^۵ برای حفاظت از عبور نورهای مزاحم (چون تشعشعات خورشید) می‌باشد [1].

۲- واحد پردازش داده^۶ که وظیفه پردازش سیگنال، اجرای الگوریتم‌های تعیین وضعیت بر اساس کاتالوگ ستاره و برقراری ارتباط با سایر زیرسیستم‌های ماهواره را داشته و برای حسگر حالت خودکار ایجاد می‌نماید.

4. HAS detector
5. Baffle
6. DPU: Data Processing Unit

1. Data Sheet
2. CHU: Camera Head Unit
3. Objective

مهم‌ترین بخش یک حسگر ستاره را می‌توان همان پردازشگر آن دانست. چراکه باید در کمترین زمان ممکن، موقعیت ستارگان را با بیشترین دقت ممکن استخراج نماید و با کاتالوگ ستاره‌ها تطبیق دهد. پس از استخراج وضعیت تصویر نسبت به نقشه ستارگان، وضعیت حسگر ستاره نسبت به مختصات سماوی (مرجع اینرسی J2000) قابل محاسبه خواهد بود که معمولاً در قالب پارامترهای کواترنیون‌ها ارائه می‌گردد.

باتوجه به توضیحات مذکور فرایند پردازش و استخراج وضعیت را

می‌توان در گام‌های ذیل خلاصه نمود [1].

۱- تشخیص ستاره‌ها در تصویر

۲- مرکز یابی ستارگان

۳- پیدا کردن موقعیت تصویر در نقشه ستارگان

۴- محاسبه وضعیت تصویر نسبت به مختصات سماوی

۵- ارسال داده وضعیت به صورت مستمر و با فرکانس بالا

مرحله ۱ و ۲ در گام‌های مذکور مربوط به الگوریتم‌های پردازش تصویر می‌باشد و از مهمترین و سخت‌ترین وظایف حسگر به شمار می‌رود. این امر زمانی که تشعشعات نور خورشید، زمین و ماه، زمینه تصویر را روشن می‌نمایند، دشوارتر می‌گردد.

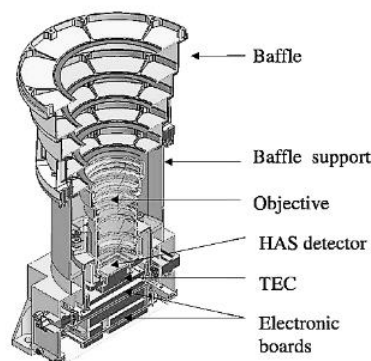
۲.۱ مشخصات عملکردی حسگر ستاره

در قسمت قبل، یک آشنایی اجمالی با ساختار و عملکرد کلی حسگر ستاره صورت گرفت. در این قسمت نیز مشخصات عملکردی حسگر ستاره به صورت مشخص‌تر معرفی خواهد شد. البته تمام مشخصاتی که ارائه می‌گردد، لزوماً مرتبط با عملکرد نیستند؛ ولی جهت ارزیابی و مقایسه حسگرها اهمیت دارند. در ادامه به ۲۱ مشخصه که کاربرد بیشتری دارند، با توضیح مختصری اشاره می‌گردد.

۱- دقت حسگر

دقت اندازه‌گیری در یک حسگر، مهم‌ترین شاخصه برای ارزیابی عملکرد آن به شمار می‌آید. باید دقت نمود که این کمیت دقیقاً به چه معنایی به کار رفته است. چراکه ممکن است در مواردی به معنای دقت نسبی و Precision به کار رود و در مواردی به معنای دقت مطلق و Accuracy. مورد اول به معنای مقدار نوسانات اندازه‌گیری حول میانگین مقادیر است و مورد دوم به معنای خطای اندازه‌گیری از مقدار صحیح و حقیقی می‌باشد. در اصطلاح تخصصی به تعریف اول "دقت اندازه‌گیری" و به تعریف دوم "صحت اندازه‌گیری" اطلاق می‌گردد.

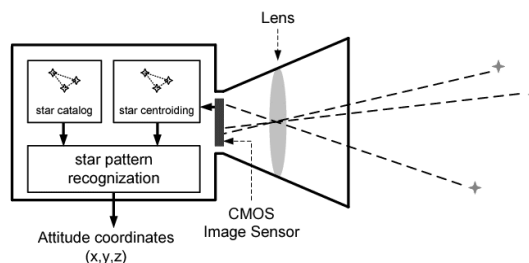
معمولاً در کاتالوگ‌های حسگر ستاره، دقت اندازه‌گیری یا همان نوسانات خروجی حول هر محور حسگر گزارش می‌گردد. اغلب این حسگر وضعیت مختصات بدنی خود نسبت به مختصات سماوی و



شکل ۱- نمای قطعی از یک حسگر ستاره [2]

حساس نوری مورد استفاده در قسمت اپتیکی، تأثیر مهمی در عملکرد حسگر دارد. در حال حاضر با پیشرفت‌های حاصل شده، بیشتر از ^۱ CMOS (APS^۲) به جای CCD^۳ استفاده می‌گردد. [3] در CMOS برای هر ردیف پیکسل یک ماژول آنالوگ به دیجیتال^۴ جداگانه وجود دارد که باعث می‌شود فضای کمتری از شعاع نورانی استفاده شده و حافظه کمتری اختصاص یابد. در این صورت ابعاد و وزن و هزینه هم کاهش می‌یابد. همچنین دارای مقاومت تشعشعی بهتری نسبت به CCD می‌باشد و در مجموع با رشد فناوری آن کاربرد بیشتری پیدا کرده است.

طبق شکل ۲، حسگر ستاره مانند یک دوربین عکاسی قادر است با یک لنز اپتیکی با قطر دهانه و فاصله کانونی مشخص در یک زمان نورگیری مشخص، تصویر مقابل خود را ثبت نماید. نوری که توسط حساسه CMOS یا CCD جمع‌آوری شده، به صورت اطلاعاتی در مورد هر پیکسل برای پردازشگر ارسال می‌گردد. این اطلاعات به زبان ساده می‌تواند عددی بین صفر تا ۲۵۵ باشد که متناسب با شدت نور رسیده به هر پیکسل به آن اختصاص می‌یابد و در یک بایت ذخیره می‌شود. هر چه تعداد پیکسل‌های حساسه بیشتر باشد، رزولوشن و دقت تصویر بیشتر خواهد بود؛ لکن حجم تصویر نیز بیشتر خواهد شد و پردازش آن نیز به زمان و توان بیشتری نیاز خواهد داشت. لذا رزولوشن بهینه باید متناسب با محدودیت‌های زمان، توان و حافظه انتخاب گردد.



شکل ۲- شمای کلی از عملکرد حسگر ستاره [4]

3. Charge Coupled Device
4. A2D

1. Complementary Metal Oxide Semiconductor
2 Active Pixel Sensor

از عکس برداری در مود $LISA^2$ به مود Tracking می‌رود. معمولاً الگوریتم حسگرها در اولین مواجهه با آسمان متفاوت با شرایط در مود ردیابی است. در اولین مواجهه حسگر در کل کاتالوگ ستاره به دنبال الگوی موردنظر می‌گردد؛ ولی در زمان ردیابی موقعیت را در نقشه آسمان می‌داند و فقط مقدار جابه‌جایی را محاسبه می‌نماید.

۶- زمان راه‌اندازی^۳

زمانی است که پس از هر بار روشن شدن حسگر طول می‌کشد فرایند راه‌اندازی طی شده و حسگر اولین داده را ارسال نماید.

۷- نرخ ارسال داده

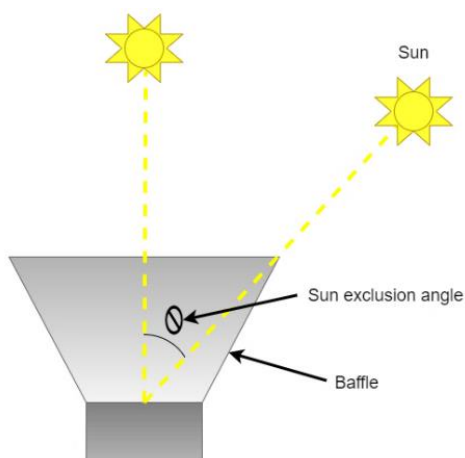
منظور حداکثر فرکانسی است که حسگر می‌تواند در مود Tracking داده‌ها را ارسال نماید.

۸- دقت زمان‌سنجی^۴

معمولاً حسگر ستاره به داده‌های خود یک برچسب زمانی نیز الصاق می‌نماید که نشان‌دهنده زمان عکس‌برداری طبق تایمر داخلی حسگر یا زمان مطلق ژولینی می‌باشد. هر چقدر دقت این تایمر بیشتر باشد تعیین وضعیت ماهواره بر اساس داده حسگر هم می‌تواند دقیق‌تر صورت پذیرد. معمولاً برای تصحیح خطای این تایمر از پالس PPS در GPS استفاده می‌گردد که می‌تواند هر یک ثانیه یکبار خطای تایمر را به‌وسیله ساعت‌های اتمی اصلاح نماید.

۹- زاویه دفع^۵

باتوجه به شکل ۳ اگر زاویه محور اپتیکی حسگر با یک جرم نورانی چون خورشید کمتر از این زاویه گردد، دیگر حسگر قادر به شناسایی موقعیت ستارگان نخواهد بود. این زاویه دفع برای اجرامی چون خورشید، زمین و ماه قابل تعیین خواهد بود.



شکل ۳- نمایشی از زاویه دفع خورشید در حسگر ستاره [5]

اینرسی (J2000) را در قالب مقادیر کوآرتینون‌ها بیان می‌نماید که قابل تبدیل به زوایای اویلر می‌باشد. تغییرات این زوایای اویلر حول مقدار میانگین در مقادیر کوچک می‌تواند همان نوسانات حول هر محور حسگر را نشان دهد. این دقت با افزایش سرعت چرخش حول هر محور کاهش یافته و باید برای سرعت‌های مختلف گزارش گردد.

لکن جهت محاسبه صحت اندازه‌گیری باید با ابزاری دقیق‌تر از حسگر ستاره وضعیت بدنه حسگر (که معمولاً با یک مکعب آینه‌ای بسیار دقیق مشخص می‌گردد) را نسبت به مختصات سماوی استخراج نمود و با خروجی حسگر مقایسه کرد.

۲- بازدهی

نسبت داده‌های معتبر و صحیح، نسبت به کل داده‌هایی که حسگر ارسال می‌نماید را می‌توان بازدهی حسگر محسوب نمود که نشان‌دهنده عملکرد آن در مواجهه با الگوهای ستارگان مختلف می‌باشد. البته طبعاً هرچه سرعت حرکت نسبت به آسمان بیشتر می‌گردد بازدهی تغییر کرده و باید گزارش گردد. تعریف دیگری نیز می‌توان برای بازدهی داشت که نسبت تعداد داده‌های دریافتی به کل داده‌های مورد انتظار با فرکانس مشخص حسگر را بیان می‌نماید. قابلیت‌های سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای ارتباطی نیز بر روی این بازدهی تأثیرگذار است و می‌تواند در فرایند انتقال داده از پردازشگر حسگر به مقصد ثبت داده اختلال ایجاد نماید.

همچنین مواجهه با نورهای زیاد خورشید و زمین و ماه تأثیر مستقیم بر بازدهی خواهد داشت که در بررسی این مشخصه باید لحاظ گردد.

۳- حداکثر نرخ چرخش قابل ردیابی

منظور حداکثر سرعت چرخش (حول هر محور حسگر) می‌باشد که تا آن سرعت حسگر قادر به شناسایی موقعیت ستارگان می‌باشد. در تعیین این سرعت هم باید مشخص نمود چه مقدار دقت و بازدهی برای عملکرد حسگر مورد انتظار می‌باشد. طبعاً هر چه سرعت بیشتر می‌گردد دقت و بازدهی کاهش می‌یابد تا جاییکه دیگر داده‌ای قابل دریافت نخواهد بود. معمولاً برای تعریف راحت‌تر همان سرعت نهایی لحاظ می‌گردد که بعد از آن دیگر حسگر قادر به شناسایی نمی‌باشد.

۴- حداکثر نرخ شتاب قابل ردیابی

این مشخصه کاملاً شبیه شاخصه قبلی بوده با این تفاوت که به‌جای سرعت، تأثیر مقدار شتاب حرکت حسگر نسبت به آسمان بر روی عملکرد آن بررسی می‌گردد.

۵- زمان شناسایی اولیه^۱

مقدار زمانی است که طول می‌کشد حسگر در اولین مواجهه با آسمان، موقعیت ستارگان را شناسایی نماید. به عبارت تخصصی‌تر زمانی است که حسگر پس

4. Timing
5. Exclusion Angle

1. Acquisition Time
2. Lost in Space
3. Boot

خود را دارد. برخی از حسگرها به صورت هم‌زمان از چند درگاه برای بالابردن قابلیت اطمینان استفاده می‌نمایند.

۱۹- قابلیت اطمینان^۳

قابلیت اطمینان مشخصه مهمی است که بر اساس قابلیت اطمینان اجزاء تشکیل‌دهنده یک قطعه، مدل چیدمان آن‌ها کنار هم و تعبیه رزروها و مسیرهای موازی قابل محاسبه می‌باشد. هر چقدر این کمیت به یک نزدیک‌تر باشد احتمال خرابی قطعه کمتر خواهد بود. وجود الگوریتم‌های تشخیص عیب و رفع آن‌ها (FDIR^۴) نیز می‌تواند قابلیت اطمینان را بالا ببرد.

۲۰- عمر عملکردی

عمر عملکردی و مفید مدت زمانی است که حسگر می‌تواند عملکرد خود را حفظ نماید. حسگر در شرایط محیطی فضایی مدام در معرض تشعشعات فضایی، برخورد یون‌ها و سایش مولکول‌های هوا، تغییرات دمایی زیاد و غیره می‌باشد که به تدریج باعث اختلال‌های موقت و خرابی‌های دائمی می‌گردد؛ لذا با توجه به تجربیات موجود در فضا عمر مفید حسگرها قابل تخمین خواهد بود که معمولاً بیشتر از سه سال می‌باشد.

۲۱- سابقه استفاده در فضا^۵

یکی از معیارهای مهم برای تأیید عملکرد یک حسگر، سابقه استفاده حسگرهای هم نوع آن در فضا می‌باشد. بهترین و کامل‌ترین مرجع برای انجام انواع تست‌های عملکردی و محیطی، خود فضا می‌باشد؛ لذا هر چقدر تعداد حسگرهای مشابه و مقدار زمانی که در فضا حضور داشته‌اند بیشتر باشد، اعتبار و قابلیت اطمینان حسگر موردنظر بیشتر خواهد شد.

۳.۱ مقایسه حسگرها (با نمودارهای تک شاخه‌ای)

پس از آشنایی مختصر با مشخصات یک حسگر ستاره در قسمت قبلی، در این بخش برخی از مشخصاتی که اطلاعات آن‌ها در دسترس‌تر بوده است را برای تعدادی از حسگرهای ستاره مقایسه می‌نماییم. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، طبق جستجوهای وسیع انجام شده حدود ۱۰۰ حسگر ستاره در دنیا شناسایی شده است. لکن برای مقایسه، برخی از مدل‌های نسبتاً مشابه در یک شرکت سازنده حذف شده و ۷۲ مورد از آن‌ها که اطلاعات کامل‌تری داشته‌اند انتخاب شده است. اسامی و نام شرکت و کشور سازنده این حسگرها مطابق جدول ۱ می‌باشد. بیشتر اطلاعات این حسگرها از دیتابیس‌ها استخراج شده است؛ ولی برای تکمیل اطلاعات، از برخی مقالات، پایان‌نامه‌ها و مراجع دیگر نیز استفاده شده که در جدول ۱ کنار اسامی حسگرها، به این مراجع و منبع دیتابیس‌ها اشاره شده است [2-61].

۱۰- میدان دید^۱

زاویه‌ای که حسگر می‌تواند در هر عکس از آسمان مشاهده نماید. معمولاً چون عکس‌ها به صورت یک مستطیل ذخیره می‌گردند، میدان دید را می‌توان زاویه قطر این مستطیل در نظر گرفت.

۱۱- بیشینه قدر ستاره قابل تشخیص

بیشترین قدر ستاره‌ای که حسگر موقعیت آن را می‌تواند استخراج نماید. هر چه مقدار کمیت قدر ستاره‌ای بیشتر می‌گردد، شدت نور آن کمتر می‌شود. چشم انسان می‌تواند حدوداً ستارگان تا قدر ۶ را تشخیص دهد و معمولاً حسگرهای ستاره هم در همین رنج کارایی دارند.

۱۲- جرم کل و جرم بافل

مقدار جرم کل ماهواره و جرم بافل آن به صورت جداگانه؛ بافل برخی از حسگرها قابل تغییر می‌باشد که دارای جرم‌ها و ابعاد مختلفی هستند.

۱۳- ابعاد

کوچک‌ترین مکعبی که حسگر ستاره داخلش جای می‌گیرد.

۱۴- توان مصرفی

میزان توان الکتریکی که حسگر در مدهای مختلف مصرف می‌نماید و معمولاً بیشترین مقدار لحاظ می‌گردد.

۱۵- ولتاژ ورودی

ولتاژ کارکردی حسگر که مقدار ثابتی می‌باشد.

۱۶- دمای کارکردی

بازه دمایی که حسگر در آن محدوده می‌تواند کارکرد خود را حفظ نماید. البته بازه‌های دمایی مختلفی برای نگهداری، تست محیطی، کارایی و عملکرد کامل حسگر قابل‌بیان می‌باشد و باید دقت و بازدهی حسگر در دماهای مختلف گزارش گردد.

۱۷- مقاومت تشعشعی

مقاومت حسگر در مقابل تشعشعات کیهانی که بسته به شدت و زمان مواجهه قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد. این شاخصه می‌تواند محدودیت‌هایی برای ارتفاع مداری ماهواره ایجاد نماید. چون با افزایش ارتفاع، تشعشعات افزایش یافته و می‌تواند باعث اختلال در عملکرد حسگر گردد.

۱۸- درگاه‌های ارتباطی^۲

درگاه‌ها و پروتکل‌های مختلفی برای انتقال داده حسگر چون CAN، RS232، RS422، RS485 و ... وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب

4. Fault Detection, Isolation and Recovery
5. Heritage

1. Field of View
2. Interface
3. Reliability

	Star sensor name	Manufacturing Company	Country of Origin
24	FAR-MST [26] [3]		
25	T1 [27]	TERMA	Denmark
26	HE-5AS [28]		
27	OPC [29]	Optical Physics Company (OPC)	
28	interferometric star tracker [30]		
29	MIST [31]	Space Micro	USA
30	μ STAR Tracker-100M [32]		
31	μ STAR Tracker-200M [33]		
32	μ STAR Tracker-200H [34]		
33	μ STAR Tracker-400M [34]		
34	AURIGA [35]	SODERN	France
35	HYDRA (4 Heads) [36]		
36	HYDRA-M [37]		
37	HYDRA-TC [38]		
38	SED16 [3]		
39	SED26 [39]		
40	SED36 [40]		
41	A-STR [41] (AUTONOMOUS STAR TRACKER)	Leonardo Finmeccanica Selex ES Galileo Avionica	Italy
42	A-STR* [42]		
43	AA-STR [3]		
44	AA-STR* [42]		
45	HR-STR [43]		
46	SpaceStar [44]		
47	Andromeda [45]	Andromeda	
48	StarTracker [46]	Tyvak	
49	Altair HB+ [34]	SURREY Satellite Technology Limited (SSTL)	England
50	Altair-HB [47]		
51	Procyon [48] (Altair-APS)		
52	Procyon* [46]		
53	Rigel-L [2]		
54	PASS (Payload Autonomous Star Sensor) / WASS / AST20 [49]	Sira Electro-Optics Ltd and MMS(UK)	
55	CT-602 [50]	Ball Aerospace & Technologies Corp. (Ball)	USA
56	CT-611 [50]		
57	CT-633 [3] [45] [49] [50]		
58	CT 2020 [51]		
59	HAST [52] (High Accuracy Star Trackers)		
60	FSC-701 [53] (Flexible Space Camera)		
61	HD-1003 (Narrow FOV) [49]	GoodRich	

جدول ۱- لیست اسامی حسگرهای مورد بررسی

	Star sensor name	Manufacturing Company	Country of Origin
1	Sensor 1	Private Company	Iran
2	[6] Sensor2	State-Owned Company	
3	Pico Star Tracker (PST-3) [7]	TY-Space	China
4	Nano Star Tracker (NST-1) [8]		
5	Nano Star Tracker (NST-4) [9]		
6	CubeStar [10] (Nano Star Tracker)	Electronic Systems Laboratory (ESL)	South Africa
7	SUNSAT star sensor [11]	Stellenbosch University	
8	Star Mapper [12]	New Space Systems	Canada
9	ST-16RT2 (No Baffle) [13]	Sinclair Interplanetary	
10	(Short Baffle) [14]		
11	ASC [15] (Advanced Stellar Compass)	DTU (Technical University of Denmark)	Denmark
12	KU Leuven [16]	KU Leuven Department of Mechanical Engineering	Belgium
13	ST200 [17] [18]	Berlin Space Technologies (BST)	Germany
14	ST400 [19]		
15	VST-41M [20]	VECTRONIC Aerospace GmbH	
16	VST-68M [21]	Würzburg University support from German Space Agency DLR1	
17	STELLA [22]		
18	PYXIS Tracker [23]	Andrews Space	USA
19	LLNL STSC [24]	Lawrence Livermore National Labs	
20	BCT Standard NST [14]	Blue Canyon Technologies (BCT)	
21	Miniature (MST) [10]	AeroAstro / MIT (Massachusetts Institute of Technology Space Systems Laboratory)	
22	Coarse Star Tracker [25]		
23	LIST [26] (Lightweight Inexpensive Star Tracker)		

لازم به ذکر است که دو حسگر ایرانی دقتی در حدود ۲۰ ثانیه قوسی دارند که رتبه‌های ۵۳ و ۶۱ را در میان ۷۲ حسگر مورد بررسی کسب کرده‌اند. با توجه به اینکه این حسگرها اولین تجارب ساخت حسگر ستاره در کشور می‌باشند، این رتبه‌ها جایگاه مورد قبولی می‌باشد.

طبق جدول ۲ مشاهده می‌گردد که دقت حول محور x و y با عناوین Cross Boresight و Pointing نیز معرفی می‌گردد و عبارات Boresight و Rolling برای محور z به کار می‌رود. به طور کلی در حسگر ستاره راستای محور اپتیکی Boresight نام دارد و همان محور z بدنه محسوب می‌شود. نام‌های Roll و pitch و Yaw نیز در حسگر ستاره برای محورهای z و y و x به کار می‌رود که در علوم هوافضا متداول برعکس این ترتیب بوده و Roll برای محور x و Yaw برای محور z استفاده می‌گردد.

جدول ۲- لیست برترین حسگرها از لحاظ دقت

رتبه	شماره	نام حسگر ستاره	شرکت سازنده	کشور سازنده	نوع خطا	x yaw CrossBoresight Pointing	y pitch CrossBoresight Pointing	z roll Boresight rolling
۱	۲۸	interferometric star tracker	OPC	آمریکا	3σ	0.07	0.07	0.07
۲	۶۸	AST-301	Lockheed Martin		3σ	0.22	0.22	0.62
۳	۵۹	HAST	Ball		3σ	0.54	0.54	0.54
۴	۶۹	ST5000	University of Wisconsin Madison		3σ	0.54	0.54	17
۵	۳۵	HYDRA (4 Heads)	SODERN	فرانسه	3σ	0.6	0.6	0.6
۶	۳۶	HYDRA-M			3σ	0.7	0.7	0.7
۷	۳۷	HYDRA-TC			3σ	0.9	0.9	0.9
۵۳	۲	حسگر ۲	شرکت دولتی	ایران	1σ	15	15	50
۶۱	۱	حسگر ۱	شرکت خصوصی		1σ	25	25	100

در شکل ۵ دقت حسگرها حول محور z مقایسه شده است. همانطور که در این نمودار مشخص می‌باشد، میانگین دقت 3σ ثانیه قوسی می‌باشد که نزدیک ۳ برابر میانگین دقت حول دو محور دیگر است. به طور کلی در حسگرهای ستاره خطای محاسبه موقعیت و وضعیت ستارگان در دوران‌های حول محور اپتیکی بیشتر از دوران‌های دیگر می‌باشد. یکی از دلایل این موضوع، متفاوت بودن جابجایی ستارگان نسبت به مرکز دوران حول محور z بوده و خطا در کناره‌های تصویر به دلیل وجود اعوجاجات اپتیکی تشدید می‌گردد.

نسبت خطا حول محور z نسبت به دو محور دیگر در حسگرهای مختلف از یک تا چند ۱۰ برابر می‌باشد که میانگین این ضریب در این ۷۲ حسگر $5/5$ برابر می‌باشد. به عنوان مثال در جدول ۲ مشاهده می‌شود که حسگر ST5000 [59] دقت خیلی خوبی در pointing دارد ولی دقت rolling آن بیش از ۳۰ برابر این مقدار می‌باشد.

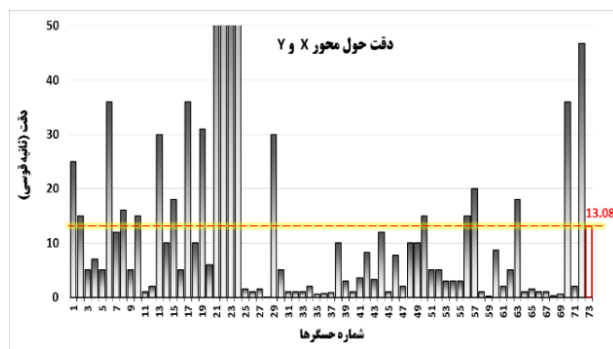
	Star sensor name	Manufacturing Company	Country of Origin
62	HD-1003 (Wide FOV) [49]		
63	CALTRAC [54]	EMS Tech.	Canada
64	ASTRO APS [55] [56]	Jena-Optronik GmbH	Germany
65	ASTRO 10 [57]		
66	ASTRO 15 [58]		
67	AST-201 [59]	Lockheed Martin	USA
68	AST-301 [59]		
69	ST5000 [59]	University of Wisconsin Madison	USA
70	Draper SISC [54]	Draper Laboratory, Inc.	
71	BOKZ-M 2002 [60]	IKI	Russia
72	MAI-SS Space Sextant [61]	Maryland Aerospace, Inc.	Netherlands

در ادامه، ۷۲ حسگر ستاره انتخابی در ۱۲ شاخصه که داده‌های بیشتری از آن‌ها در دسترس بوده، در قالب نمودارها و جداولی مورد مقایسه‌های تحلیلی قرار گرفته‌اند.

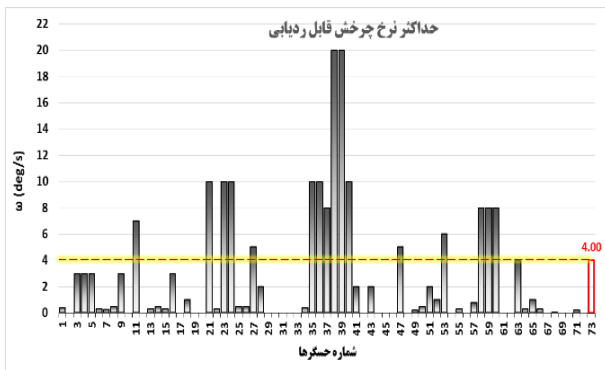
۱- دقت

طبق شکل ۴ میانگین دقت حول محور x و y که با هم برابر هستند در ۷۲ حسگر انتخابی، حدود ۱۳ ثانیه قوسی می‌باشد. برای مقایسه بهتر مقادیر، محدوده نمایش دقت در شکل ۴ تا ۵۰ ثانیه قوسی کاهش یافته و لذا دقت حسگرهای ۲۱ تا ۲۴ که به ترتیب ۷۰، ۱۰۰، ۷۰ و ۱۰۰ ثانیه قوسی می‌باشد در شکل مشخص نمی‌باشد.

طبق جدول ۲ بهترین دقت در این مجموعه در حسگر شماره ۲۸ از شرکت OPC آمریکا [30] با مقدار $0/07$ ثانیه قوسی گزارش شده که رقمی خارق‌العاده می‌باشد. پس از آن حسگرهای شماره ۶۸، ۵۹، ۶۹، ۳۵، ۳۶ و ۳۷ به ترتیب با مقادیر $0/22$ ، $0/54$ ، $0/54$ ، $0/6$ ، $0/7$ و $0/9$ بهترین دقت‌ها را دارا می‌باشند. دقت حسگرهای دیگر برابر و بیشتر از یک ثانیه قوسی می‌باشد.



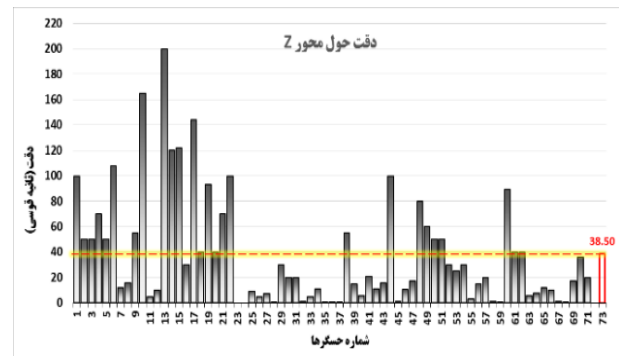
شکل ۴- نمودار دقت حسگر حول محور x و y



شکل ۶- نمودار حداکثر سرعت چرخش قابل ردیابی توسط حسگرها

در جدول ۳، ۱۰ حسگر اول که در بیشترین سرعت‌های چرخش می‌توانند قابلیت خود را حفظ نمایند، قابل مشاهده می‌باشد. حسگرهایی چون SED26 [39] و SED16 [3]، توانایی شناسایی ستارگان تا سرعت بسیار زیاد ۲۰ درجه بر ثانیه را هم دارند؛ لکن دقت آن‌ها کمتر بوده و در رتبه ۲۷ و ۴۸ ام از لحاظ دقت قرار دارند. همچنین میدان دید در این حسگرها جهت ردیابی در سرعت‌های بالاتر افزایش یافته که خود منجر به کاهش دقت می‌گردد. چنین حسگرهایی بیشتر برای بهره‌برداری در موشک‌ها که سرعت چرخش زیادی دارند مناسب می‌باشد. از آن طرف حسگرهایی چون انواع HYDRA [36-38] و حسگر HAST [52] توانسته‌اند با وجود دقت‌هایی زیر یک ثانیه قوسی، سرعت‌های زیادی چون ۸ و ۱۰ درجه بر ثانیه را تأمین نمایند. اگرچه قطعاً این دقت‌ها در این سرعت‌ها قابل حصول نیست ولی دقت‌هایی نزدیک به این محدوده و رنج هم خیلی ارزشمند است. بنابراین این دسته از حسگرها برای ماهواره‌هایی که نیاز به تعیین وضعیت دقیق در شرایط دینامیکی هم دارند خیلی مناسب می‌باشد. در مجموع می‌توان گفت شرکت SODERN فرانسوی در حوزه افزایش سرعت ردیابی در حسگرهای ستاره خیلی خوب کار کرده است. البته گزارش‌هایی از حسگرهای Draper Laboratory [54] در آمریکا نیز وجود دارد که سرعت‌هایی در حد ۴۰ درجه بر ثانیه را با دقت کمتر تأمین می‌نماید و برای موشک‌ها گزینه خیلی خوبی می‌باشد.

یکی از چالش‌های اصلی در حسگرهای داخلی هم همین شرایط دینامیکی می‌باشد. البته باین وجود، حسگر شماره ۱ با سرعت ۰/۴ درجه بر ثانیه در میان ۴۸ حسگر (که سرعت آن‌ها مشخص است) رتبه ۳۷ را دارد و حسگر شماره ۲ [6] هم که اطلاعات نهایی آن در دسترس نمی‌باشد، در تست‌ها سرعت‌های خیلی خوبی را گزارش کرده است؛ لذا با این روند امید به پیشرفت‌های خوبی در این حوزه در داخل کشور وجود دارد.



شکل ۵- نمودار دقت حسگر حول محور Z

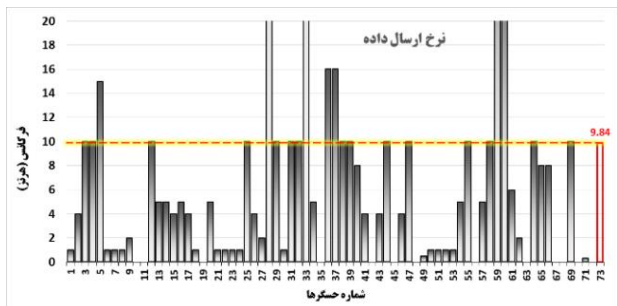
نکته قابل توجه دیگر در این مقایسه‌ها، روش محاسبه این دقت‌ها می‌باشد. همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، منظور از دقت، میزان نوسانات حول مقدار میانگین یا همان انحراف معیار (σ) می‌باشد. برای محاسبه این مقدار آماری ابتدا واریانس (σ^2) یا همان میانگین مربعات اختلاف داده‌ها با میانگین‌شان محاسبه شده و سپس از آن جذر گرفته می‌شود. اگر تعداد داده‌ها زیاد بوده و توزیع نرمال یا گوسی داشته باشند، می‌توان گفت ۶۸/۲ درصد داده‌ها در فاصله یک σ ، ۹۵/۴ درصد در فاصله ۲ σ و ۹۹/۷ درصد در فاصله ۳ σ نسبت به مقدار میانگین می‌باشند. در نتیجه طبق جدول ۲ اگر حسگری دقت خود را به صورت ۳ σ گزارش می‌دهد، منظور آن است که تقریباً خطای کل داده‌ها در این بازه قرار دارد و در ۱۰۰۰ داده احتمال دارد فقط ۳ داده خطای بیشتری داشته باشند. لکن در حالت 1 σ این احتمال بیشتر از ۳۰ درصد خواهد بود.

همچنین لازم به ذکر است که آنچه در نهایت برای تعیین وضعیت یک ماهواره اهمیت بیشتری دارد، میزان صحت داده‌هاست نه فقط دقت. منظور از صحت داده‌ها هم میزان خطای میانگین داده‌ها نسبت به مقدار واقعی و حقیقی حول محورهای یک مختصات دقیق بدنی چون کیوب‌های اپتیکی می‌باشد.

۲- حداکثر نرخ چرخش قابل ردیابی

پس از دقت، می‌توان مهم‌ترین چالش در حسگرهای ستاره را شرایط دینامیکی دانست. در شکل ۶، حداکثر سرعتی که حسگرها در آن توانایی تشخیص موقعیت ستارگان را دارند ارائه شده است. میانگین این مقادیر، سرعت ۴ درجه بر ثانیه می‌باشد. جالب توجه آن است که حسگر شماره ۲۸ [30] که بیشترین دقت را داشت، فقط تا سرعت ۲ درجه بر ثانیه کارکرد دارد. اگرچه اگر در این سرعت هم دقت خوبی در رنج مقدار مشخص شده داشته باشد خیلی عالی می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که رسیدن به دقت‌های بسیار بالا در سرعت‌های بالا بسیار سخت و دشوار است.

این موضوع در شرایط دینامیکی بالا و وجود نورهای مزاحم خیلی سخت تر شده و نیاز به پردازشگرهای بسیار قوی دارد. از آن طرف سخت‌افزارها هم با چالش بزرگ محدودیت توان مصرفی مواجه هستند.



شکل ۸- نمودار نرخ ارسال داده در حسگرهای ستاره

طبق جدول ۴، مشاهده می‌شود حسگرهای اول تا چهارم جدول که مربوط به شرکت‌های آمریکایی می‌باشند، فرکانس‌هایی در بازه ۳۰ تا ۱۰۰ هرتز دارند که در شکل ۸ در محدوده محور عمودی قابل نمایش نیستند. این فرکانس‌ها مقادیر بسیار زیادی برای یک حسگر ستاره محسوب می‌گردد و نیازمند سخت‌افزار و نرم‌افزارهای بسیار قوی می‌باشد. لذا طبق جدول ۴ مشاهده می‌گردد توان مصرفی این حسگرها بالا بوده و در مواردی چون حسگر شماره ۳۳ [34] به ۱۸ وات می‌رسد. این مصرف توان فقط در ماهواره‌های بزرگ قابل تأمین می‌باشد. حسگرهای HYDRA هم که با فرکانس ۱۶ هرتز کار می‌کنند، توان مصرفی و جرم نسبتاً بالایی دارند. ولی حسگر ستاره NST [9] از شرکت Space-TY چینی با مصرف توان بسیار کمی در حد ۰/۶ وات و جرم پایین ۳۰۰ گرم می‌تواند با فرکانس ۱۵ هرتز کار کند که طبق کاتالوگ آن به ۲۰ هرتز هم قابل افزایش است. سخت‌افزار و نرم‌افزار به کار رفته در این حسگر خیلی می‌تواند قابل توجه باشد و زمینه‌ساز پیشرفت‌های بیشتری در صنعت ساخت حسگر ستاره خواهد بود.

جدول ۴- رتبه‌بندی حسگرها براساس فرکانس ارسال داده

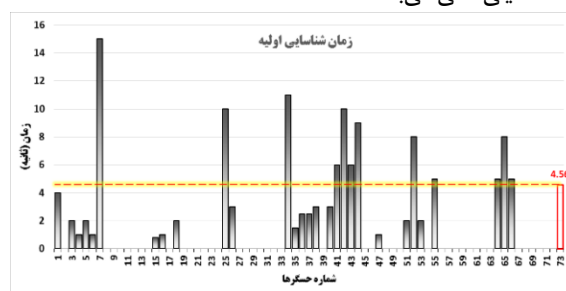
رتبه	شماره	نام حسگر ستاره	شرکت سازنده	کشور سازنده	فرکانس (Hz)	سرعت ردیابی (deg/s)	زمان اکتساب ثانیه	میدان دید درجه	جرم کیلوگرم	توان مصرفی وات
۱	۲۸	interferometric star tracker	OPC	آمریکا	100	2	28.3	2	6	
۲	۲۲	μSTAR Tracker-400M	Space Micro	آمریکا	100	40	11.3	3.3	18	
۳	۵۹	HAST	Ball	آمریکا	40	8				
۴	۶۰	FSC-701 (Flexible Space Camera)	Ball	آمریکا	30	8	31.1	5.83	16	
۵	۳۶	HYDRA-M	SODERN	فرانسه	16	10	2.5	2.75	7	
۶	۲۷	HYDRA-TC	SODERN	فرانسه	16	8	2.5	5.3	8	
۷	۵	NST-4	TY-Space	چین	15	3	19.2	0.29	0.6	
۳۹	۲	حسگر ۲	شرکت دولتی	ایران	4		17.8	0.7	6.5	
۵۳	۱	حسگر ۱	شرکت خصوصی	ایران	1	0.4	4	1.1	1.15	

جدول ۱- برترین حسگرها از لحاظ حداکثر سرعت قابل ردیابی

رتبه	شماره	نام حسگر ستاره	شرکت سازنده	کشور سازنده	سرعت ردیابی (deg/s)	دقت (ثانیه قوسی)		میدان دید (درجه)
						Pointing	rolling	
۱	۳۹	SED26	SODERN	فرانسه	20	3	15	10
۲	۳۸	SED16			20	10	55	10
۳	۳۵	HYDRA (4 Heads)			10	0.6	0.6	10
۴	۳۶	HYDRA-M			10	0.7	0.7	10
۵	۲۰	SED36			10	1	6	8
۶	۲۱	Miniature (MST)	AcroAstro / MIT	آمریکا	10	70	1	70
۷	۲۳	LIST			10	70	1	30.0
۸	۲۴	FAR-MST			10	100	1	25.0
۹	۵۹	HAST	Ball	آمریکا	8	0.54	0.54	40
۱۰	۳۷	HYDRA-TC			8	0.9	0.9	16
۳۷	۱	حسگر ۱	شرکت خصوصی	ایران	0.4	25	1	17.7
۲	۲	حسگر ۲			0.4	15	4	17.8

۳- زمان شناسایی اولیه

همه حسگرها مود جداگانه‌ای به نام LISA برای شناسایی اولیه ندارند و لذا زمان شناسایی اولیه را ارائه نمی‌دهند. در این حسگرها همان فرکانس ارسال داده زمان شناسایی اولیه را نیز مشخص می‌نماید. در شکل ۷، زمان اکتساب حسگرهایی که این شاخصه را اعلام نموده‌اند، ارائه شده است. کمترین مقدار ۰/۸ ثانیه است که مربوط به حسگر VST-41M [20] از شرکت VECTRONIC کشور آلمان (حسگر شماره ۱۵) می‌باشد. بقیه حسگرها از جمله حسگرهای شرکت SODERN فرانسه هم (حسگرهای شماره ۳۴ تا ۴۰ [35-40]) زمان‌هایی بیشتر از یک ثانیه دارند. در میان حسگرهای داخلی هم حسگر شماره ۱، زمان اکتساب ۴ ثانیه را اعلام نموده که از میانگین کل حسگرها (۴/۵۶ ثانیه) کمتر بوده و خیلی قابل تحسین می‌باشد. حسگر شماره ۲ [6] هم‌زمانی را ارائه نموده ولی گزارش داده می‌تواند مانند فرکانس کاری خود که ۴ هرتز است با زمان اولیه ۰/۲۵ ثانیه ستارگان را شناسایی نماید که خیلی عالی می‌باشد.



شکل ۷- نمودار زمان شناسایی اولیه برای حسگرهای ستاره

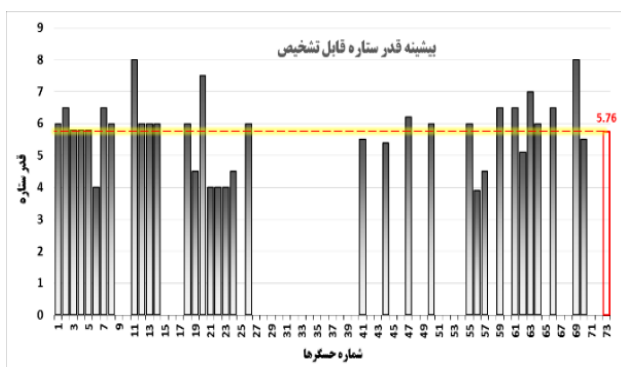
۴- نرخ ارسال داده

سومین شاخصه مهم بعد از دقت و سرعت، فرکانس می‌باشد که جزو چالش‌های سازندگان حسگر ستاره می‌باشد. با پیشرفت سخت‌افزارها و نرم‌افزارها میانگین این شاخصه طبق شکل ۸ به نزدیک عدد زیاد ۱۰ هرتز رسیده است. یعنی حسگر ستاره باید بتواند در ظرف ۱۰۰ میلی‌ثانیه هم عکسی باکیفیت بالا بگیرد و هم با پردازش تصویر زوایا را نسبت به کاتالوگ ستاره استخراج نماید.

۵- بیشینه قدر ستاره قابل تشخیص

حداکثر قدر ستاره‌ای که حسگر می‌تواند تشخیص دهد به مشخصات اپتیکی لنز و حساسه بستگی دارد. هر چه قطر عدسی بزرگ‌تر بوده و حساسیت حساسه بیشتر باشد، ستارگان کم‌نورتری قابل تشخیص هستند. یک چشم سالم در انسان می‌تواند ستارگان تا قدر ۶ را هم به سختی تشخیص دهد. مردمک چشم در شرایط محیط تاریک می‌تواند تا حدود ۸ میلی‌متر باز شود و حساسیت شبکه چشم با مرور زمان در این شرایط بیشتر می‌گردد. تعامل تصویر دو چشم هم کمک می‌کند تا ستارگان خیلی کم‌نور در رنج قدر ۶ هم قابل تشخیص باشد. حسگرهای ستاره هم باتوجه به مشخصات اپتیکی خود قابلیت نسبتاً مشابهی با چشم انسان داشته و طبق شکل ۱۰ تا قدر نزدیک ۶ (قدر ۵/۷۶) را می‌تواند تشخیص دهند. طبعاً با استفاده از لنزهای بزرگ‌تر امکان افزایش این قدر وجود دارد؛ لکن هدف حسگر تشخیص تعداد مشخصی ستاره در میدان دید است که برای الگوریتم شناسایی آن موردنیاز می‌باشد. این تعداد معمولاً حداقل ۴ ستاره می‌باشد و اگر تعداد ستاره‌ها خیلی زیاد شود کار الگوریتم را سخت‌تر می‌نماید نه راحت‌تر.

طبق شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که محدوده قدر قابل تشخیص بین ۴ تا ۸ می‌باشد. معمولاً حسگرهای با قدر بالا دارای میدان دید کمتر و حسگرهای با قدر پایین دارای میدان دید بیشتری هستند تا بتوانند تعداد ستاره مورد نیاز خود را تأمین نمایند.



شکل ۱۰ - نمودار بیشینه قدر ستاره قابل تشخیص توسط حسگرها

۷- جرم

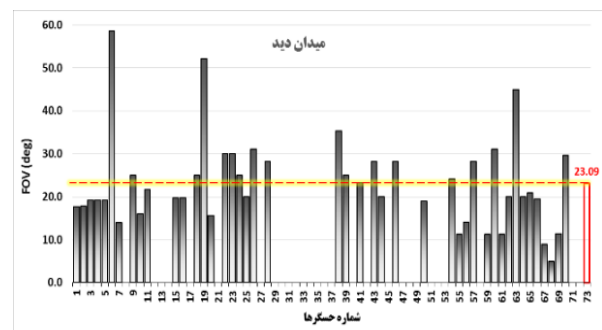
حسگرهای ستاره متناسب با شرایط مأموریتی و سخت‌افزار مورد استفاده بازه جرمی متنوعی را پوشش می‌دهند. طبق شکل ۱۱ این بازه از ۴۲ گرم (برای حسگر شماره ۱۳) تا ۷۲۰۰ گرم (برای حسگر ۴۵) می‌باشد. میانگین تمام جرم‌ها هم حدود ۲ کیلوگرم می‌باشد.

حسگر شماره ۲ [6] که در داخل کشور ساخته شده نیز فرکانس خوبی را تأمین نموده است و رتبه ۳۹ را دارد. البته توان این حسگر نسبت به جرم و دقت آن نسبتاً زیاد بوده و قابل کاهش می‌باشد.

۴- میدان دید

در شکل ۹ میدان دید حسگرهای مختلف قابل مقایسه می‌باشد. این شاخصه به صورت مستقل خیلی جهت ارزیابی حسگرها مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. ولی روی پارامترهای مهمی چون دقت، سرعت ردیابی و زاویه دفع تأثیر دارد. طبعاً هرچه میدان دید بزرگ‌تر شود، هر پیکسل تصویر، زاویه قوسی بیشتری را اشغال کرده و موقعیت ستارگان با دقت کمتری قابل محاسبه خواهد بود. از آن طرف حرکت ستارگان راحت‌تر قابل ردیابی بوده و حسگر در سرعت دورانی بیشتری عملکرد خواهد داشت. اجزای چون خورشید و ماه و زمین هم بیشتر در میدان دید حسگر قرار خواهند گرفت و زوایای دفع افزایش خواهد یافت.

باتوجه به موارد مذکور از آنجاکه در ماهواره دقت مهم‌تر است، حسگرهای ستاره میدان دید کمتری دارند و در موشک که سرعت‌های بالاتر موردنیاز است میدان‌های دید بزرگ‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۹ - نمودار میدان دید برای حسگرهای ستاره

در شکل ۹ میانگین میدان دیدها حدود ۲۳ درجه مشخص شده است و میدان دید اغلب حسگرها در این رنج و کمتر از آن می‌باشد. حسگرهای آمریکایی چون [59]AST-201، [59]AST-301، HAST [52] و [59]ST5000 (به ترتیب شماره‌های ۶۸، ۶۷، ۵۹ و ۶۹) که دقت‌های بسیار بالایی (کمتر از یک ثانیه قوسی) دارند طبق انتظار دارای میدان دیدهای کمی (به ترتیب ۵، ۹، ۱۱/۳ و ۱۱/۴ درجه) هستند. همچنین سرعت ردیابی هم در این حسگرها نسبتاً پایین است؛ به طوری که سرعت قابل ردیابی در حسگر [59]AST-301، فقط ۰/۰۸ درجه بر ثانیه اعلام شده است. از آن طرف حسگری چون HAST با وجود میدان دید نسبتاً کم تا سرعت ۸ درجه بر ثانیه قابلیت ردیابی دارد که قابل توجه می‌باشد.

۶- حجم (ابعاد)

در شکل ۱۲، حجم محیط بر حسگرهای مختلف با واحد سانتیمتر مکعب قابل مشاهده است. برای درک بهتر اعداد می‌توان هر ۱۰۰۰ واحد را معادل یک لیتر در ذهن تصور نمود. طبعاً در مشخصات حسگرها ابعاد ذکر می‌شود نه حجم؛ ولی در اینجا برای مقایسه هم‌زمان سه بعد از مشخصه حجم استفاده شده است.

کمترین حجم یا ابعاد به ترتیب متعلق به سه حسگر زیر می‌باشد:

۱- حسگر ST200 آلمانی (شماره ۱۳ [۱۷]) با ابعاد طول و عرض ۲/۹

سانتیمتر و ارتفاع ۳/۸۱ سانتیمتر

۲- حسگر PST3 چینی (شماره ۳ [۷]) با ابعاد طول و عرض ۳/۳

سانتیمتر و ارتفاع ۹/۴۴ سانتیمتر

۳- حسگر CubeStar آفریقای جنوبی (شماره ۶ [۱۰]) به عرض ۳/۵

طول ۵ و ارتفاع ۶/۴ سانتیمتر

بزرگ‌ترین حسگر در این مجموعه هم حسگر Andromeda

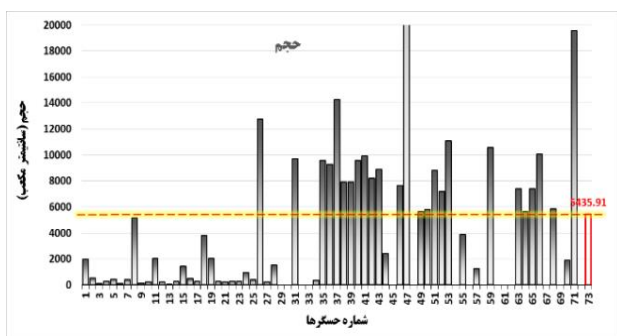
ایتالیایی (شماره ۴۷ [45]) با طول و عرض ۳۲ سانتیمتر و ارتفاع ۵۴

سانتیمتر می‌باشد که حجم محیطی آن ۵۵۲۹۶ سانتیمتر مکعب بوده و

در محدوده نمودار قابل نمایش نبوده است.

حجم میانگین برای حسگرها ۵۴۳۶ سانتیمتر مکعب است که

معادل مکعبی با ضلع حدود ۱۷ سانتیمتر می‌باشد.

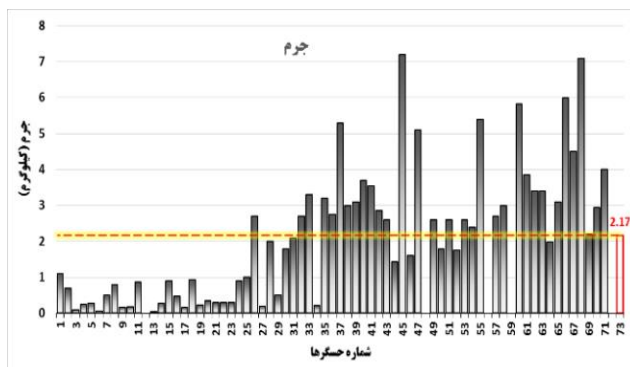


شکل ۱۲- نمودار حجم حسگرهای ستاره

طبعاً تحلیلی که در رابطه با جرم حسگرها ارائه گردید، در رابطه با ابعاد آن‌ها نیز صادق است و طبق جدول ۵، معمولاً حسگرهای دقیق‌تر ابعاد بزرگ‌تری دارند. دو حسگر ایرانی هم با جرم حدود یک کیلوگرم (۷۰۰ و ۱۱۰۰ گرم) و ابعاد ۷×۷×۱۱ و ۱۰×۱۰×۲۰ سانتیمتر رتبه ۲۰ و ۲۶ را در بین حسگرها دارند که شرایط نسبتاً خوبی در این حوزه به حساب می‌آید.

۷- توان

در شکل ۱۳ توان مصرفی در حسگرهای ستاره مختلف قابل مشاهده می‌باشد و در جدول ۶، لیست حسگرهایی که کمتر از یک وات مصرف



شکل ۱۱- نمودار جرم حسگرهای ستاره

طبق جدول ۵ می‌توان گفت معمولاً حسگرهای دقیق‌تر جرم‌های بیشتری دارند؛ چراکه در این حسگرها از لنزها و بافل‌های بزرگتر، پردازنده‌های قوی‌تر و سازه مقاوم‌تر استفاده می‌گردد. در برخی موارد سیستم‌های خنک‌کننده حرارتی هم جهت تنظیم دمای لنزها، حساسه و بردهای الکتریکی به کار می‌رود که باعث افزایش جرم محسوس می‌گردد. مقاومت‌های تشعشعی و مغناطیسی بیشتر هم نیازمند محافظ‌های سخت‌افزاری بیشتر می‌باشد که جرم را بالاتر می‌برد. از آن طرف با گذر زمان و پیشرفت فناوری‌های سخت‌افزاری شاهد کاهش جرم‌ها با حفظ و افزایش عملکرد هستیم.

جدول ۵- برترین حسگرها از لحاظ دقت به همراه مشخصات دیگر

رتبه	شماره	نام حسگر ستاره	شرکت سازنده	کشور سازنده	دقت Pointing	دقت rolling	جرم کیلوگرم	حجم سانتیمتر	توان وات
۱	۲۸	interferometric star tracker	OPC	آمریکا	0.07	0.07	2	1536	6
۲	۶۸	AST-301	Lockheed Martin		0.22	0.62		10575	
۳	۵۹	HAST	Ball		0.54	0.54	7.1	5850	
۴	۶۹	ST5000	Wisconsin Madison		0.54	17	2.2		8
۵	۲۵	HYDRA (4 Heads)	SODERN	فرانسه	0.6	0.6	3.2	9581	9.5
۶	۲۶	HYDRA-M			0.7	0.7	2.75	9283	7
۷	۲۷	HYDRA-TC			0.9	0.9	5.3	14234	8
۸	۲۲	μSTAR Tracker-200H	Space Micro	آمریکا	1	1	2.7		10
۹	۵۸	CT 2020	(Ball)		1	1	3		8
۱۰	۶۷	AST-201	Lockheed Martin		1	1	4.5		16
۱۱	۴۵	HR-STR	Leonardo	ایتالیا	1	1	7.2		
۱۲	۵۳	حسگر ۲	شرکت دولتی	ایران	15	50	0.7	539	6.5
۱۳	۶۱	حسگر ۱	شرکت خصوصی		25	100	1.1	2000	1.15

به‌طور کلی بیشتر، شرایط مأموریتی ماهواره محدودیت‌های جرمی و ابعادی حسگر را مشخص می‌نماید. در یک ماهواره CubeSat با ابعاد 3U (۱۰×۱۰×۳۰ سانتی‌متر) در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری با یک مأموریت ساده، محدودیت جرمی خیلی بیشتری وجود دارد تا در یک تلسکوپ فضایی چند تنی در ارتفاع یک میلیون کیلومتری که نیازمند سیستم تعیین وضعیت بسیار دقیق می‌باشد.

جدول ۶- لیست حسگرها با کمترین مصرف توان

رتبه	شماره	نام حسگر ستاره	شرکت سازنده	کشور سازنده	توان		دقت	
					وات	نانه قوسی	Pointing	rolling
۱	۱۳	ST200	BST	آلمان	0.18	30	200	
۲	۱۷	STELLA	Würzburg University		0.25	36	144	
۳	۶	CubeStar	ESL	آفریقای جنوبی	0.32	36	108	
۴	۱۴	ST400	BST	آلمان	0.37	10	120	
۵	۳	PST3	TY-Space	چین	0.5	5	50	
۶	۹	ST-16RT2	Sinclair	کانادا	0.5	5	55	
۷	۵	NST4	TY-Space	چین	0.6	5	50	
۱۳	۱	حسگر ۱	شرکت خصوصی	ایران	1.15	25	100	
۳۵	۲	حسگر ۲	شرکت دولتی		6.5	15	50	

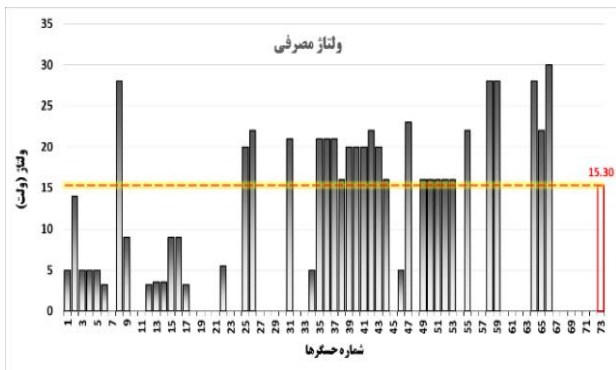
توان دارند، ارائه شده است. طبق این جدول مشاهده می‌گردد که حسگر ST200 آلمانی (شماره ۱۳ [17]) با توان ۰/۱۸ وات کمترین مصرف را به خود اختصاص داده است. همچنین حسگر شماره ۱ از کشور ایران نیز با مصرف توان ۱/۱۵ وات رتبه ۱۳ را دارد که جایگاه بسیار خوبی محسوب می‌گردد.

توان مصرفی یکی از محدودیت‌ها و چالش‌های اساسی برای سازندگان حسگر ستاره محسوب می‌گردد. اجرای الگوریتم‌های پردازش تصویر قوی با فرکانس بالا به وسیله رایانه‌های قوی و بزرگ که محدودیت توان و جرم و حجم ندارند، کار خیلی سختی نمی‌باشد؛ ولی انجام همین کار با مصرف توان خیلی پائین، خیلی پیچیده و دشوار خواهد شد؛ لذا مصرف توان پایین در حسگر داخلی خیلی قابل توجه و قابل تحسین می‌باشد.

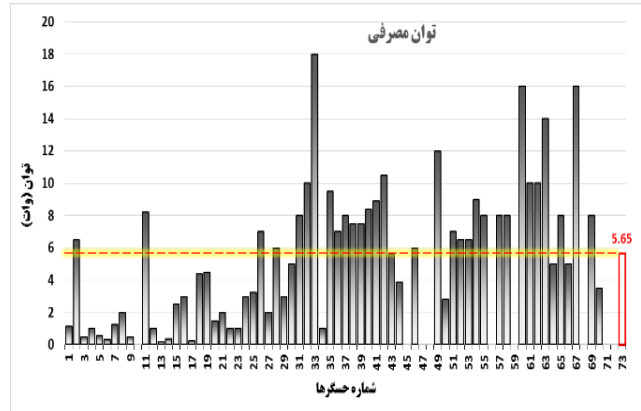
طبعاً کاهش مصرف توان باعث محدودیت‌های بیشتری در نرم‌افزار و سخت‌افزار خواهد شد و طبق جدول ۶ دقت کمتری قابل حصول می‌باشد. لکن با رشد فناوری‌ها این دقت نیز در حال افزایش می‌باشد؛ چنانچه در مواردی چون حسگرهای شرکت TY-Space چینی و Sinclair کانادایی (ردیف ۵ تا ۷ جدول ۶) دقت‌های خوبی با مصرف توان پائین حاصل شده است.

۸- ولتاژ

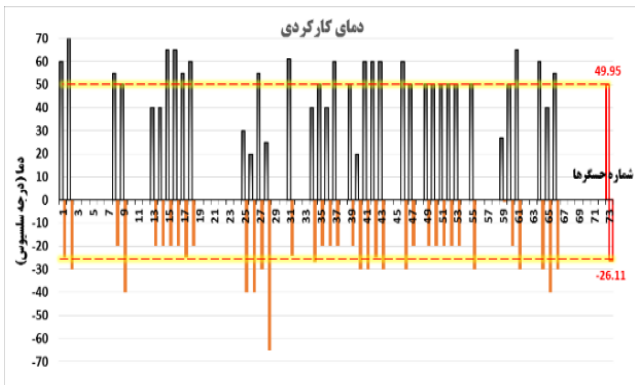
در شکل ۱۴، ولتاژ ورودی حسگرها قابل مقایسه می‌باشد. طبق شکل این مقادیر در بازه ۳/۳ تا ۳۰ ولت با میانگین ۱۵/۳ ولت می‌باشد. ولتاژ ورودی همچون توان مصرفی به سخت‌افزار و نرم‌افزار مورد استفاده وابسته می‌باشد که سازندگان حسگرها با ارتقای تکنولوژی به دنبال کاهش این ولتاژها می‌باشند.



شکل ۱۴- نمودار ولتاژ ورودی در حسگرهای ستاره



شکل ۱۳- نمودار توان مصرفی در حسگرهای ستاره



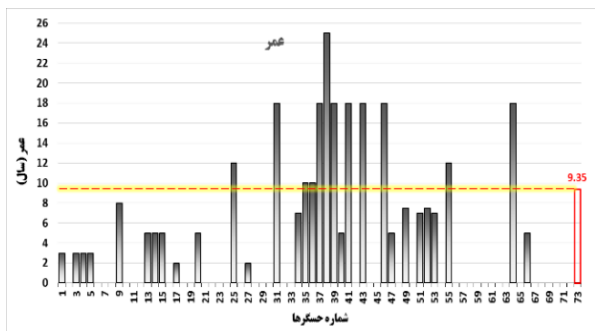
شکل ۱۵- بازه دمای کارکردی برای حسگرهای ستاره

طبق شکل ۱۳، حسگرهایی چون μ STAR Tracker-400M آمریکایی (شماره ۳۳ [34]) مصرف توان بالایی در حد ۱۸ وات دارند. این حسگر دقیق طبق جدول ۴ با فرکانس ۱۰۰ هرتز کار می‌کند که نرخ بسیار بالایی محسوب می‌گردد. همچنین حسگرهای دیگری که توان بالایی دارند اغلب دارای دقت و فرکانس بالایی هستند. لکن در تمام این موارد هم کاهش مصرف توان جزو رویکردهای اساسی شرکت‌های سازنده می‌باشد.

در رابطه با حسگر شماره ۲ ایرانی [6] نیز مهم‌ترین هدف در حال حاضر کاهش مصرف توان می‌باشد.

۹- دما

استفاده از محافظ‌های بیشتر با طراحی سخت‌افزاری مقاوم‌تر مورد نیاز است که باعث افزایش وزن نیز خواهد شد.

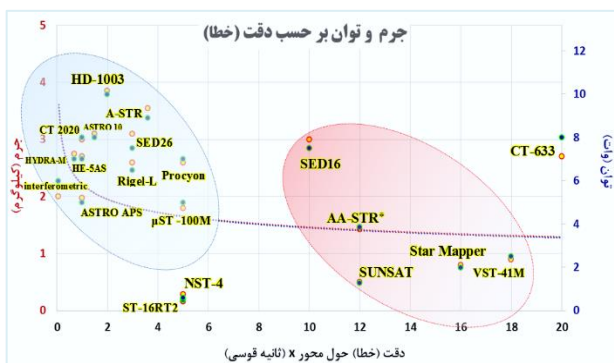


شکل ۱۶- نمودار عمر کارکردی برای حسگرهای ستاره

۴.۱ استخراج روابط (با نمودارهای دو شاخصه‌ای)

در بخش قبلی حسگرهای ستاره در هر شاخصه به صورت مجزا مورد مقایسه قرار گرفته و در مواردی به ارتباط چند شاخصه نیز اشاره گردید. برای درک بهتر ارتباط شاخصه‌ها می‌توان از نمودارهای دو شاخصه‌ای بهره برد. به عنوان مثال در گزارشی که سازمان ناسا در سال ۲۰۱۴ میلادی در رابطه با فناوری ماهواره‌های کوچک [۶۲] انتشار نموده است، در قسمت مربوط به حسگرهای ستاره از این نمودارهای دو شاخصه‌ای بهره گرفته شده است. در این نمونه، مقادیر جرم و توان بر حسب دقت برای چند حسگر ستاره ارائه شده است. در این مقاله نیز طبق شکل ۱۷ مشابه نمودار مذکور [۶۲]، مشاهده می‌شود که با افزایش دقت (که به معنای کاهش میزان خطا با واحد ثانیه قوسی در محور افقی می‌باشد)، جرم و توان حسگرها افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۷، اسامی ۲۱ حسگر ستاره که نسبت توان به جرم آن‌ها تقریباً برابر (و حدود مقدار ۲/۵) بوده است، قابل مشاهده می‌باشد. محور عمودی در سمت چپ، جرم این حسگرها و محور سمت راست، میزان توان مصرفی آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- نمودار جرم و توان بر حسب دقت برای مجموعه‌ای از حسگرها

طبعاً بازه دمایی در یک المان فضایی باید متناسب با شرایط محیطی باشد که در تست‌های محیطی مدنظر قرار می‌گیرد. لکن در حسگرهای ستاره که دارای قسمت اپتیکی و یک حساسه حساس می‌باشند، تغییرات دما می‌تواند عملکرد آن‌ها را کاملاً تحت الشعاع قرار دهد. لذا حفظ عملکرد مناسب و یکسان در شرایط دمایی مختلف خیلی دشوار است و برخی از حسگرهای بسیار دقیق سیستم تنظیم دما هم دارند. طبق شکل ۱۵، اغلب حسگرها کارکرد خود را در محدوده دمایی حدودی ۲۵- تا ۵۰+ درجه، حفظ می‌نمایند. ولی حسگرهایی محدوده‌های کمتری را (مخصوصاً در حد فوقانی) مشخص نموده‌اند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر عملکرد آن‌ها به دما می‌باشد.

به عنوان مثال حسگر HE-5AS دانمارکی (شماره ۲۶ [28]) و حسگر SED36 فرانسوی (شماره ۴۰ [40]) که دقت‌های نشانده‌روی آن‌ها در حد یک ثانیه قوسی است، عملکرد خود را تا دمای ۲۰ درجه تضمین کرده‌اند.

۱۰- عمر

برای مأموریت‌های فضایی مخصوصاً طولانی، یکی از شاخصه‌های مهم، قابلیت اطمینان و عمر اجزاء مهمی چون حسگر ستاره می‌باشد. اگر عمر المان مهمی چون حسگر ستاره کمتر از زمان در نظر گرفته شده برای مأموریت ماهواره باشد، با بروز اختلال در عملکرد این حسگر مأموریت ماهواره هم با مشکل مواجه می‌گردد؛ لذا در انتخاب یک حسگر برای یک پروژه فضایی، حتماً این مشخصه مورد توجه قرار می‌گیرد.

در شکل ۱۶، میزان عمر مشخص شده برای حسگرهای مختلف قابل مشاهده می‌باشد. بیشترین عمر به حسگر SED16 فرانسوی (شماره ۳۸ [3]) اختصاص دارد که ۲۵ سال می‌باشد. ۷ حسگر دارای عمر ۱۸ سال، ۲ حسگر با عمر ۱۲ سال، ۲ حسگر ۱۰ سال و بقیه حسگرها کمتر از ۱۰ سال عمر دارند. میانگین عمر هم حدود همان ۱۰ سال (۹/۳۵ سال) می‌باشد.

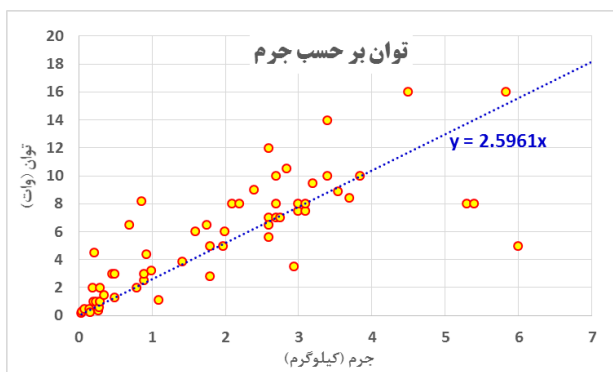
جالب است حسگر خوبی چون OPC از آمریکا [29] که دقت مناسبی در حد ۱/۵ ثانیه قوسی دارد، فقط ۲ سال عمر دارد که کمترین میزان در بین حسگرها محسوب می‌گردد. در نتیجه لزوماً نمیتوان گفت حسگرهای دقیق‌تر عمر بیشتری دارند یا حسگرهای با عمر کمتر دقت کمتری دارند. بیشتر همان مأموریت اهمیت دارد. البته می‌توان تا حدی گفت حسگرهایی که عمر بیشتری دارند، دارای سخت‌افزار و نرم‌افزار قوی و مقاوم‌تری بوده؛ و لذا دارای جرم و توان مصرفی بیشتری هستند. یکی از عوامل مهم در کاهش عمر حسگرها، تشعشعات فضایی می‌باشد که در مدارهای با ارتفاع بالاتر، بیشتر وجود دارد. برای همین در مأموریت‌های فضایی که در مدارهای بالاتر تعریف می‌شوند،

به عنوان مثال طبق این روابط می‌توان گفت اگر بخواهیم دقت حسگر ستاره بهتر از ۱۰ ثانیه قوسی شود، می‌توان انتظار داشت جرم حسگر بیشتر از یک کیلوگرم (۸۹۰ گرم) و توان مصرفی بیشتر از ۳ وات (۲/۹ وات) گردد. حال اگر بتوان با جرم و توان کمتری نیز این دقت را ارضاء نمود، می‌توان ادعا نمود توسعه خوبی نسبت به روند کلی دنیا صورت گرفته و از فناوری ساخت بالاتری بهره برده شده است. این فناوری برتر می‌تواند در حوزه ارتقاء بردهای الکتریکی، حساسه نوری، عایق‌های حرارتی و تشعشعی، جنس مواد و پوشش‌ها و غیره نقش خود را نشان داده باشد.

به عنوان مثال حسگری چون OPC [29] توانسته با جرم ۲۰۰ گرم و توان ۲ وات، به دقت ۱/۵ ثانیه قوسی حول محور x برسد. همچنین حسگر AURIGA [35] با جرم ۲۱۰ گرم و توان یک وات، ۲ ثانیه قوسی دقت دارد و حسگر PST3 [7] با جرم ۹۰ گرم و ۰/۵ وات ادعای دقت ۵ ثانیه قوسی را کرده است. لذا می‌توان گفت چنین حسگرهایی توانسته‌اند پیشرفت خوبی نسبت به دیگر حسگرها داشته باشند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع نمونه‌ها در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ شباهت خوبی دارد. علت این امر آن است که جرم و توان هم طبق شکل ۲۰ رابطه مستقیمی با هم دارند. این ارتباط را می‌توان به صورت رابطه ۳ ارائه نمود.

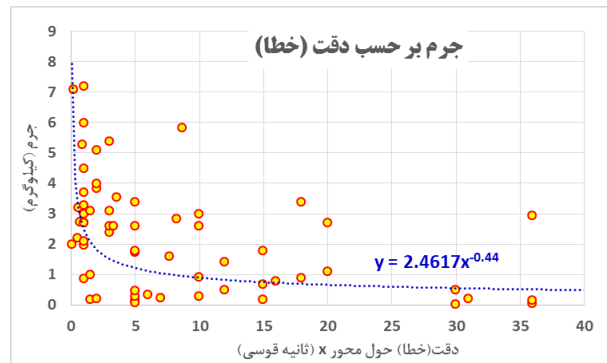
$$P = 2.596 m \quad (۳)$$



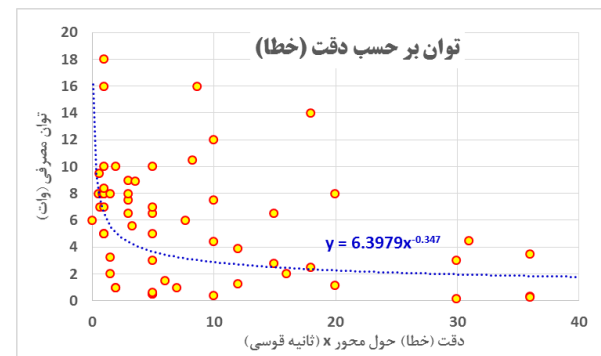
شکل ۲۰- نمودار توان بر حسب جرم برای حسگرهای مختلف

با رابطه ۳ می‌توان حسگرهایی که در یک کلاس وزنی هستند را از لحاظ توانی مقایسه نمود. به عنوان مثال اگر حسگری حدود یک کیلوگرم وزن داشته باشد، طبق این رابطه انتظار می‌رود حدود ۲/۵ وات توان مصرف نماید. حال اگر توان مصرفی آن کمتر باشد، نشان می‌دهد از این لحاظ وضعیت مناسبی نسبت به حسگرهای هم وزن خود دارد. مثلاً حسگر شماره ۱ ایرانی (متعلق به شرکت خصوصی)، ۱/۱ کیلوگرم وزن دارد و انتظار می‌رود طبق رابطه ۳،

در دو نمودار بعدی (شکل ۱۸ و شکل ۱۹)، تغییرات جرم و توان بر حسب دقت، برای کلیه حسگرها به صورت مجزا رسم شده است تا پراکندگی نمونه‌ها بهتر قابل مشاهده باشد.



شکل ۱۸- نمودار جرم بر حسب دقت برای حسگرهای مورد بررسی



شکل ۱۹- نمودار توان مصرفی بر حسب دقت برای حسگرهای مختلف

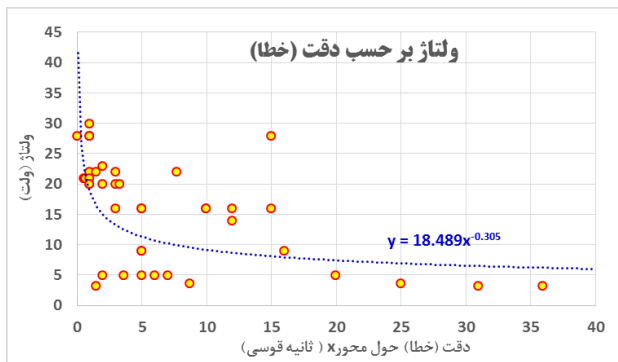
در این دو نمودار سعی شده با برازش یک منحنی نزولی، یک رابطه ریاضی بین شاخصه‌ها (طبق رابطه ۱ و رابطه ۲) استخراج گردد.

$$m = \frac{2.46}{x^{0.44}} \quad (۱)$$

$$P = \frac{6.39}{x^{0.34}} \quad (۲)$$

در رابطه ۱، m نماد جرم با واحد کیلوگرم و x مقدار دقت حسگر حول محور x با واحد ثانیه قوسی را مشخص می‌نماید. در رابطه ۲ هم P، نماد توان الکتریکی با واحد وات است. از آنجاکه معمولاً دقت حول محور y برابر دقت حول محور x و دقت حول محور z رابطه مستقیم و ثابتی با دقت در این دو محور دارد، دقت حول x به عنوان نماینده دقت حسگر در نظر گرفته شده است. طبعاً با توجه به پراکندگی نسبتاً زیاد داده‌ها نسبت به این خطوط برازش داده شده، انتظار نمی‌رود معادلات مذکور رابطه دقیقی بین شاخصه‌ها را بیان نماید؛ لکن به عنوان یک رابطه کلی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

حسگر را به خوبی کاهش دهد و حسگر Procyon می‌تواند در طراحی‌های آتی خود، کوچک‌سازی را دنبال نماید.

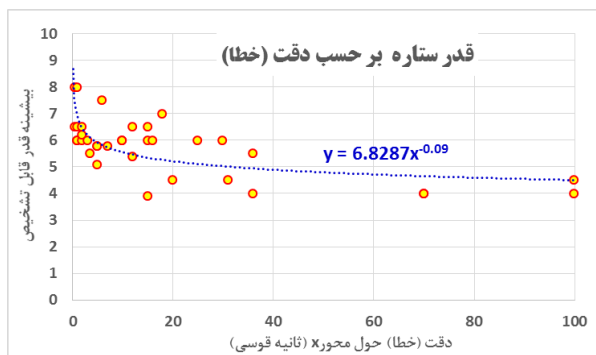


شکل ۲۲- نمودار ولتاژ بر حسب دقت برای حسگرهای مختلف

در رابطه با ولتاژ هم طبق شکل ۲۲، برخی حسگرها توانسته‌اند با ولتاژ ورودی حدود ۵ ولت، دقت‌های خوبی در حد چند ثانیه قوسی را تأمین نمایند. به‌عنوان مثال حسگر KU Leuven با ولتاژ ۳/۳ ولت توانسته دقت ۲ ثانیه قوسی را فراهم نماید. در صورتی که اغلب حسگرها با این رنج دقت، ولتاژهای خیلی بیشتری نیاز دارند.

در نمودارهای قبلی روابط مشخصات فیزیکی و الکتریکی حسگر چون جرم، حجم، توان و ولتاژ با دقت مشاهده شد. در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ رابطه بیشینه قدر ستاره قابل تشخیص و میدان دید به‌عنوان مشخصات اپتیکی حسگر ستاره بر حسب دقت ارائه شده است. در نمودار مربوط به قدر ستاره به خوبی قابل مشاهده است که برای افزایش دقت حسگر باید با استفاده از سیستم اپتیکی قوی‌تر، امکان رویت ستارگان بیشتری را فراهم نمود. برای این نمودار می‌توان طبق رابطه (۵) پنج معادله‌ای را ارائه نمود که با توجه به پراکندگی کمتر نمونه‌ها نسبتاً قابل قبول می‌باشد. در این رابطه M نماد بیشینه قدر قابل تشخیص و x همان دقت حول محور x می‌باشد.

$$M = \frac{6.82}{x^{0.09}} \quad (5)$$



شکل ۲۳- نمودار بیشینه قدر ستاره قابل تشخیص بر حسب دقت

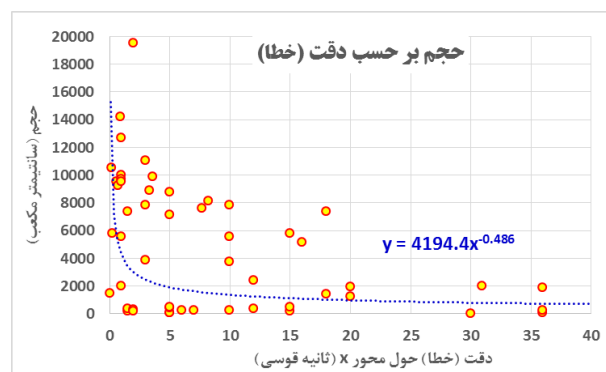
۲/۸ وات مصرف نماید؛ ولی توان مصرفی آن ۱/۱ وات می‌باشد که نشان می‌دهد به خوبی توانسته میزان توان مصرفی را کاهش دهد. از آن طرف حسگر شماره ۲ ایرانی (متعلق به شرکت دولتی) [6] جرم کمتری معادل ۷۰۰ گرم دارد، ولی توان مصرفی آن ۶/۵ وات می‌باشد که انتظار می‌رفت ۱/۸ وات باشد. لذا این حسگر نسبت به حسگرهای هم وزن خود توان نسبتاً زیادی را مصرف می‌نماید و باید به دنبال کاهش آن باشد.

از رابطه ۳ می‌توان برای محاسبه روابط دیگر نیز بهره برد. به عنوان مثال با جایگذاری m از رابطه ۱ در رابطه ۳، توان بر حسب دقت طبق رابطه ۴ بدست می‌آید.

$$P = 2.5961 \times \frac{2.4617}{x^{0.44}} = \frac{6.39}{x^{0.44}} \quad (4)$$

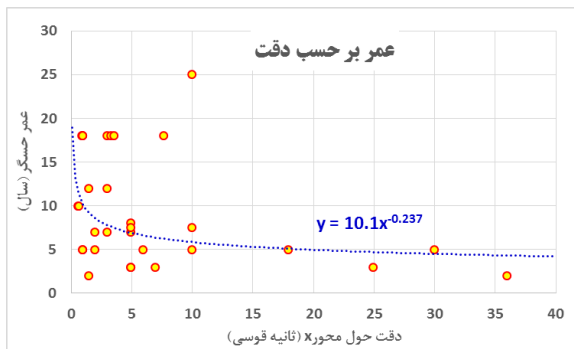
همان‌طور که انتظار می‌رود رابطه ۴ با دقت خوبی مشابه رابطه ۲ می‌باشد. این نمونه مثال عددی ساده‌ای به نظر می‌رسد؛ ولی نشان می‌دهد با این روش ساده می‌توان توسط دو رابطه، معادله مجهول دیگری را بدست آورد. این معادله مجهول ممکن است اهمیت زیادی برای یک طراح داشته باشد، ولی به صورت مستقیم قابل استخراج نباشد.

مشابه جرم و توان، حجم و ولتاژ هم طبق شکل ۲۱ و شکل ۲۲ روابط مشابهی با دقت دارند و با کاهش خطا (افزایش دقت)، افزایش می‌یابند. علت این رفتار مشابه هم مانند نمودارهای قبلی آن است که حجم با جرم و ولتاژ با توان رابطه نسبتاً مستقیمی دارد.



شکل ۲۱- نمودار حجم بر حسب دقت برای حسگرهای مختلف

طبق شکل ۲۱، اگر دقت حسگر حدود ۵ ثانیه قوسی باشد، انتظار می‌رود حجم حسگر حدود ۲۰۰۰ سانتی‌متر مکعب باشد؛ یعنی ابعادی مشابه ۱۰×۱۰×۲۰ سانتی‌متر. حسگری مانند [7] PST3 با دقت ۵ ثانیه قوسی، ابعادی در رنج ۳×۳×۱۰ سانتی‌متر دارد و حسگری چون [48] Procyon (Altair-APS) با همان دقت ۵ ثانیه قوسی، دارای ابعاد ۱۶×۲۱×۲۷ سانتی‌متر می‌باشد. لذا می‌توان گفت حسگر PST3 توانسته با کوچک‌سازی و جانمایی مناسب ابعاد



شکل ۲۶- نمودار عمر حسگر بر حسب دقت برای حسگرهای مختلف

طبق شکل ۲۶، مشاهده می‌شود حسگرهای دقیق‌تر معمولاً عمر بیشتری دارند. چراکه به دلیل بهره‌گیری از تجهیزات سخت‌افزاری پیشرفته و پرهزینه در این حسگرهای خیلی دقیق، سیستم‌های محافظتی بیشتری در مقابل تشعشعات کیهانی در آن‌ها به کار می‌رود تا قابلیت اطمینان و عمر آن‌ها افزایش یابد. بنابراین انتظار می‌رود حسگرهای دقیق‌تر، عمر بیشتری هم داشته باشند که صرف هزینه‌های بالا برای مشتری به صرفه‌تر گردد.

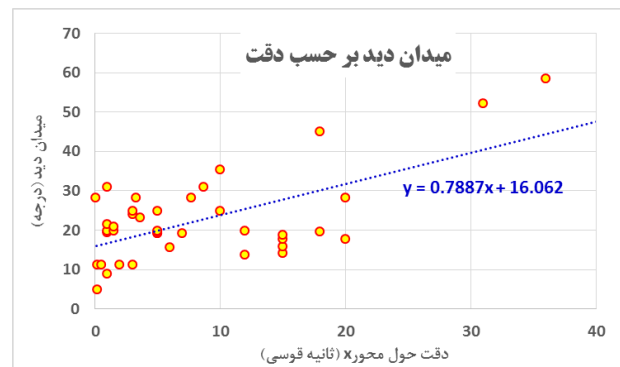
به جز ۱۲ شاخصه‌ای که در بخش قبل بین حسگرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت، جای یک مشخصه مهم خالی است که جزو مشخصات فنی محسوب نمی‌گردد؛ ولی پارامتر تأثیرگذاری در انتخاب حسگر بهینه می‌باشد. این شاخصه همان قیمت و هزینه می‌باشد. از آنجاکه دسترسی به این اطلاعات اغلب نیازمند استعلام از شرکت سازنده می‌باشد، امکان بررسی آن برای حسگرهای زیادی مقدور نخواهد بود. لذا با جستجوهای مکرر و استعلامات مختلف به سختی قیمت حدودی ۱۵ حسگر طبق جدول ۷ بدست آمده است تا در همین حد هم امکان ارزیابی این شاخصه مهم فراهم گردد.

جدول ۷- لیست قیمت برخی از حسگرهای ستاره

ردیف	نام حسگر ستاره	شرکت سازنده	کشور سازنده	قیمت (هزار دلار)
۱	PST-3	TY-Space	چین	30
۲	MAI-SS Space Sextant	Maryland Aerospace	هلند	32.5
۳	ST5000	Wisconsin Madison	آمریکا	50
۴	NST-1	TY-Space	چین	94
۵	PYXIS Tracker	Andrews Space	آمریکا	95
۶	NST-4	TY-Space	چین	100
۷	FAR-MST	AeroAstro / MIT	آمریکا	100
۸	AURIGA	SODERN	فرانسه	100
۹	ST-16RT2 (No Baffle)	Sinclair	کانادا	120
۱۰	ST-16RT2 (Short Baffle)	Sinclair	کانادا	140
۱۱	Procyon*	SSTL	انگلیس	330
۱۲	HE-SAS	TERMA	دانمارک	350
۱۳	Rigel-L	SSTL	انگلیس	430
۱۴	CT-633	Ball	آمریکا	450
۱۵	CALTRAC	EMS Tech.	کانادا	600

طبق رابطه ۵، برای رسیدن به دقت بهتر از یک ثانیه قوسی باید بتوان ستارگان تا قدر ۶/۸ را تشخیص داد.

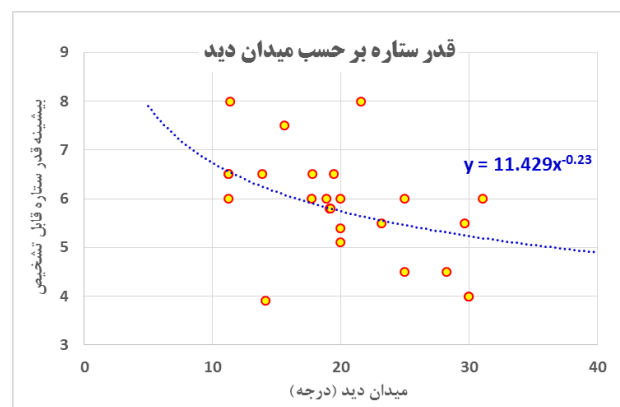
طبق شکل ۲۴ مشاهده می‌شود که میدان دید بر خلاف موارد قبلی با خطا (دقت) رابطه مستقیم صعودی دارد و معمولاً افزایش دقت متناظر با کاهش میدان دید می‌باشد.



شکل ۲۴- نمودار میدان دید بر حسب دقت برای حسگرهای مختلف

همچنین انتظار می‌رود با افزایش میدان دید حساسیت نوری و توان تشخیص حسگر کاهش یافته و ستارگان کم‌نورتری قابل تشخیص باشد که شکل ۲۵ این موضوع را تأیید می‌نماید.

همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، افزایش میدان دید مزایا و معایب خود را دارد. با میدان دید بزرگ‌تر می‌توان در سرعت‌های دورانی بالا نیز وضعیت را محاسبه نمود، همچنین زمان اکتساب برای شناسایی ستارگان و امکان خروج از رود ردیابی خیلی کاهش می‌یابد؛ لذا حسگرها با میدان دید بالا، بیشتر برای موشک‌ها که سرعت‌های دورانی بالایی دارند، مناسب است. از آن طرف افزایش میدان دید باعث می‌گردد، مرکزبایی و محاسبه موقعیت ستارگان با رزولوشن و دقت کمتری صورت پذیرد و در نتیجه دقت حسگر کاهش خواهد یافت.



شکل ۲۵- نمودار بیشینه قدر قابل تشخیص بر حسب میدان دید

یکی دیگر از پارامترهای قابل بررسی، عمر حسگرهای ستاره می‌باشد. در شکل ۲۶، نمودار عمر بر حسب دقت ارائه شده است.

در پایان این بخش لازم به ذکر است که همچنان می‌توان رابطه هر دو شاخصه دیگر حسگرهای ستاره را نیز بررسی نمود، لکن در تمام موارد لزوماً رابطه‌ای منطقی قابل استخراج نیست؛ لذا سعی شد اغلب روابط قابل استناد ارائه گردد.

۵.۱ نتایج و ارزیابی کلی (با نمودارهای راداری)

در بخش قبلی رابطه بین برخی از شاخصه‌ها در حسگرهای ستاره، مورد ارزیابی قرار گرفت. در این قسمت، هدف بررسی هم‌زمان شاخصه‌های بیشتر و مقایسه‌های کلی‌تر می‌باشد تا بتوان حسگرها را به‌صورت جامع‌تر بررسی و مقایسه نمود. برای این منظور از نمودارهای راداری نیز بهره گرفته شده است. این رویکرد می‌تواند انتخاب یک حسگر برای یک مأموریت خاص را راحت‌تر و سریع‌تر میسر نماید.

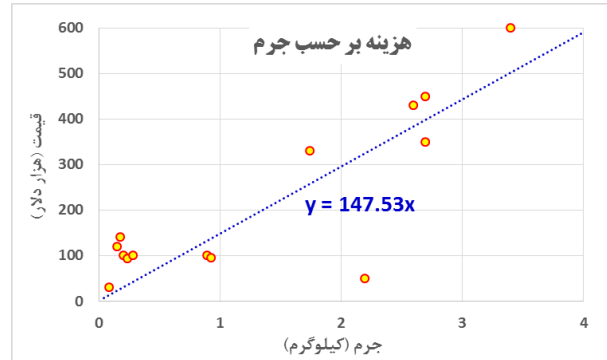
در جدول ۸، بازه تغییرات و مقدار میانگین در ۱۲ شاخصه مورد بررسی ارائه شده است. در هر شاخصه، عددی که معیار عملکرد بهتر حسگر ستاره محسوب می‌شود، با رنگ زمینه پررنگ‌تر مشخص شده است و مقدار آن برترین میزان موجود در بین حسگرها را معین می‌نماید. سازندگان حسگر ستاره همواره در تلاشند، مشخصات حسگر خود را به این مقادیر برتر نزدیک کنند و حتی آن رکورد را تغییر دهند. طبعاً رسیدن به این اعداد در تمام شاخصه‌ها بسیار سخت است و تا کنون هیچ حسگری در تمام زمینه‌ها رکورددار نبوده است.

در ستون آخر جدول ۸، بهترین مقداری که حسگرهای ساخته شده در داخل کشور به آن رسیده‌اند، مشخص شده است. همچنین مقادیری که نسبت به عدد میانگین وضعیت بهتری دارند، به‌صورت پررنگ‌تر نمایش داده شده است. باتوجه به این موارد، می‌توان نتیجه گرفت در شاخصه‌های دقت، سرعت، فرکانس و عمر نیاز بیشتری برای ارتقاء و رشد وجود دارد.

جدول ۸- مقایسه آماری شاخصه‌ها در حسگرهای مختلف

شماره	عنوان شاخصه	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	حسگر ایرانی
۱	دقت pointing	ثانیه قوسی	0.07	100	13	15
	دقت rolling		0.07	200	38.5	50
۲	سرعت قابل ردیابی	درجه بر ثانیه	0.008	20	4	0.4
۳	زمان شناسایی اولیه	ثانیه	0.8	15	4.5	4
۴	فرکانس ارسال داده	هرتز	0.3	100	9.8	4
۵	میدان دید	درجه	5	58.6	23	17.7
۶	بیشینه قدر ستاره	-	3.9	8	5.7	6.5
۷	جرم	کیلوگرم	0.042	7.2	2.17	0.7
۸	حجم	سانتیمتر مکعب	32	55,296	5,436	539
۹	توان	وات	0.18	18	5.6	1.15
۱۰	ولتاژ	ولت	3.3	30	15.3	5
۱۱	حداکثر دمای کارکردی	درجه سلسیوس	20	70	50	70
	حداقل دمای کارکردی		-1	-65	-26	-30
۱۲	عمر	سال	2	25	9.3	3

با استفاده از اطلاعات این حسگرها، نمودار هزینه بر حسب جرم آن‌ها، طبق شکل ۲۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۷- نمودار قیمت حسگرها بر حسب جرم آن‌ها

طبق رابطه ۶، هزینه ارتباط مستقیم و خطی با جرم دارد. چراکه استفاده از سامانه‌های اپتیکی قوی‌تر با سیستم انتقال حرارت فعال و سازه‌های مقاوم‌تر در مقابل تشعشعات، جرم و هزینه را توأمان بالاتر خواهد برد.

در این رابطه، C نماد هزینه برحسب هزار دلار و m نماد جرم بر حسب کیلوگرم می‌باشد.

$$C = 147.53 m \quad (۶)$$

از آنجا که تعداد داده‌های مربوط به قیمت حسگرها کم است، برای استخراج رابطه هزینه با دقت، بهتر است به‌صورت غیرمستقیم از ترکیب رابطه ۶ و رابطه ۱ استفاده نماییم که رابطه ۷ به دست خواهد آمد.

$$C = 147.53 \times \frac{2.46}{x^{0.44}} = \frac{362.92}{x^{0.44}} \quad (۷)$$

همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، طبق رابطه ۷ قیمت با مقدار خطا رابطه معکوس دارد و با افزایش دقت (کاهش مقدار x و خطا)، هزینه هم افزایش خواهد یافت. منتهی افزایش هزینه مخصوصاً برای دقت‌های بالا خیلی تصاعدی و چشمگیر می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان توقع داشت قیمت حسگری با دقت یک ثانیه قوسی حدود ۳۶۳ هزار دلار باشد که قیمت نسبتاً بالایی محسوب می‌گردد. حال اگر دقت ۰/۵ ثانیه قوسی گردد، قیمت حدود ۵۰۰ هزار دلار و اگر ۰/۱ ثانیه قوسی گردد، قیمت حدود یک میلیون دلار محاسبه خواهد شد که بسیار قیمت بالایی محسوب می‌گردد. لذا عامل اصلی در تعیین قیمت را می‌توان دقت حسگر دانست که باید به درستی متناسب با مأموریت ماهواره تعیین گردد؛ وگرنه هزینه‌های اضافی را به پروژه تحمیل می‌نماید. طبعاً در کنار دقت، باید مشخصه‌های مهمی چون سرعت، فرکانس و عمر نیز در نظر گرفته شود تا هزینه انجام شده، آورده بهتری را برای ماهواره به دنبال آورد.

در زیرسیستم تعیین وضعیت ماهواره مهمترین شاخصه‌ها محسوب می‌گردند.

۲- مشخصات اپتیکی: میدان دید و بیشینه قدر ستاره قابل تشخیص، جزو مشخصات قسمت اپتیکی حسگر به حساب می‌آیند. تأثیر این شاخصه‌ها در مشخصات عملکردی چون دقت، بازدهی و غیره بروز خواهد کرد و به صورت مستقل اهمیت کمتری دارند.

۳- مشخصات فیزیکی و الکتریکی: مشخصات فیزیکی چون جرم و حجم و مشخصات الکتریکی چون توان مصرفی و ولتاژ ورودی خیلی وابسته به محدودیت‌های ماهواره یا سامانه بهره‌بردار هستند و برای مدیران پروژه و سیستمی خیلی اهمیت دارند.

۴- مشخصات محیطی: بازه دمایی قابل کارکرد برای حسگر و عمر آن در شرایط محیطی فضا را می‌توان جزو شاخصه‌های مربوط به محیط فضا در نظر گرفت. فراهم نمودن این نیازهای محیطی جزو دغدغه‌های مهم طراحان سیستمی می‌باشد.

پس از محاسبه امتیاز مربوط به هر شاخصه در هر حسگر، می‌توان مجموع نمرات، در هر دسته از شاخصه‌ها را نیز به دست آورد. در جدول ۱۰، ده حسگری که در هر دسته از شاخصه‌ها مجموع امتیاز بیشتری داشته‌اند، ارائه شده است.

جدول ۹- محدوده امتیازدهی در هر شاخصه برای حسگرهای ستاره

امتیازات										واحد	عنوان شاخصه	شماره	
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰				
100	50	30	20	10	5	3	2	1	0.5	ثانیه قوسی	دقت pointing	۱	عملکردی
200	150	100	50	30	20	10	5	1	0.5		دقت rolling		
0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	5	10	20	درجه بر ثانیه	سرعت قابل ردیابی	۲	اپتیکی
15	10	9	8	6	5	4	3	2	1	ثانیه	زمان شناسایی اولیه	۳	
1	2	4	5	8	10	15	20	50	100	هرتز	فرکانس ارسال داده	۴	
60	45	35	30	25	20	18	15	10	5	درجه	میدان دید	۵	
3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	-	بیشینه قدر ستاره	۶	فیزیکی و الکتریکی
7.5	6	5	3.5	3	2	1	0.5	0.3	0.1	کیلوگرم	جرم	۷	
60000	10000	8000	5000	1500	500	300	250	150	50	سانتیمتر مکعب	حجم	۸	محیطی
20	12	9	7	5	3	2	1	0.5	0.3	وات	توان	۹	
30	28	25	22	21	20	16	10	5	4	ولت	ولتاژ		
20	25	27	30	40	50	55	60	65	70	درجه	حداکثر دمای کارکردی	۱۱	
0	-10	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-65	سلسیوس	حداقل دمای کارکردی		۱۲
2	3	5	7	8	10	12	15	20	25	سال	عمر		

برای تشخیص وضعیت هر حسگر میان حسگرهای دیگر می‌توان با امتیازدهی، جایگاه هر شاخصه را در بازه تغییرات آن در میان تمام حسگرها مشخص نمود. در جدول ۹، مرزهای مورد نیاز برای این امتیازدهی مشخص شده است. ستون ۱ (از سمت چپ) بدترین مقدار موجود برای هر شاخصه را معین می‌کند و هیچ مقداری در حسگرها از این اعداد بدتر نخواهد بود. حال اگر کمیتی بین عدد این ستون (بزرگ‌تر مساوی یا کوچک‌تر مساوی) و عدد ستون شماره ۲ (کوچک‌تر یا بزرگ‌تر) باشد، امتیاز ۱ را احصاء خواهد کرد و به همین ترتیب برای ستون‌های دیگر. به عنوان مثال اگر دقت pointing یک حسگر کوچکتر مساوی ۱۰۰ و بزرگ‌تر از ۵۰ ثانیه قوسی باشد امتیاز ۱ را خواهد گرفت و اگر کوچک‌تر مساوی ۰/۵ ثانیه قوسی باشد، امتیاز ۱۰ را احصاء خواهد کرد. با این روش کلیه شاخصه‌های حسگرهای مختلف امتیازدهی شده است. همچنین همانطور که در جدول ۹ مشاهده می‌گردد، ۱۲ شاخصه به ۴ دسته زیر تقسیم شده است.

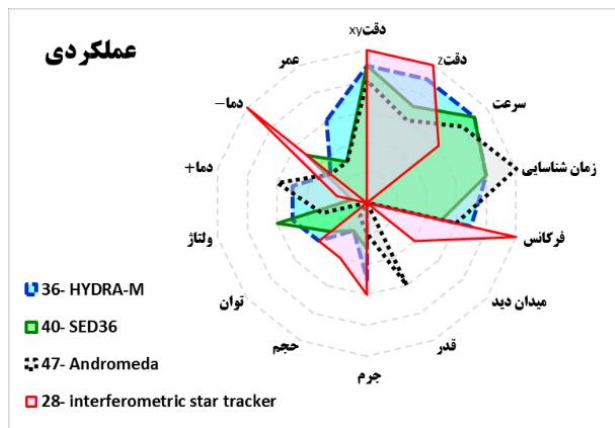
۱- مشخصات عملکردی: این مشخصات چون دقت، سرعت، فرکانس و زمان شناسایی، عملکرد حسگر را مشخص می‌نمایند و

جدول ۱۰- لیست برترین حسگرها در هر دسته از شاخصه‌ها

اپتیکی				عملکردی			
کشور	شرکت	نام	شماره	کشور	شرکت	نام	شماره
آمریکا	Wisconsin Madison	ST5000	69	فرانسه	SODERN	HYDRA-M	36
	BCT	BCT Standard NST	20			HYDRA-TC	37
آفریقای جنوبی	Stellenbosch Uni.	SUNSAT	7			SED36	40
دانمارک	DTU	ASC	11	ایتالیا	Andromeda	Andromeda	47
آمریکا	Ball	HAST	59	آمریکا	OPC	interferometric ST	28
	GoodRich	HD-1003	61	فرانسه	SODERN	HYDRA (4 Heads)	35
ایران	شرکت دولتی	حسگر ۲	2	آمریکا	Ball	HAST	59
آمریکا	Ball	CT-602	55	چین	TY-Space	NST-4	5
ایران	شرکت خصوصی	حسگر ۱	1	آمریکا	Ball	CT 2020	58
آلمان	Jena-Optronik	ASTRO 15	66	چین	TY-Space	PST-3	3

محیطی				فیزیکی و الکتریکی			
کشور	شرکت	نام	شماره	کشور	شرکت	نام	شماره
ایتالیا	Leonardo	SpaceStar	46	آلمان	BST	ST200	13
		AA-STR	43	آفریقای جنوبی	ESL	CubeStar	6
آلمان	Jena-Optronik	ASTRO APS	64	چین	TY-Space	PST-3	3
ایتالیا	Leonardo	A-STR	41	آلمان	Würzburg Uni.	STELLA	17
آمریکا	Space Micro	μST-200M	31	کانادا	Sinclair	ST-16RT2	9
فرانسه	SODERN	HYDRA-TC	37	آلمان	BST	ST400	14
کانادا	Sinclair	ST-16RT2	9	چین	TY-Space	NST-1	4
دانمارک esa	TERMA	T1	25			NST-4	5
آمریکا	Ball	CT-602	55	فرانسه	SODERN	AURIGA	34
فرانسه	SODERN	SED26	39	آمریکا	AeroAstro / MIT	Coarse ST	22

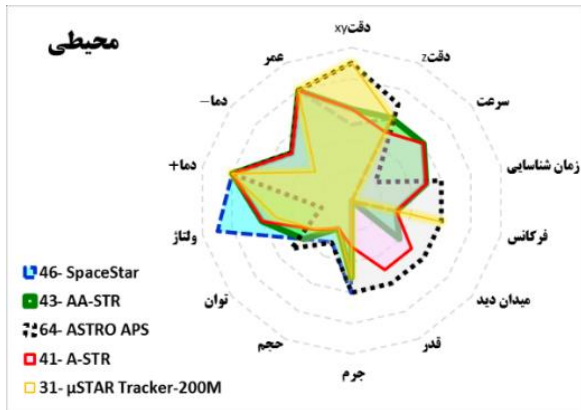
کوچک قابل استفاده نبوده و دارای عمر زیادی برای ماموریت‌های طولانی نیستند.



شکل ۲۸- نمودار توزیع شاخصه‌ها در حسگرهای برتر از لحاظ عملکردی

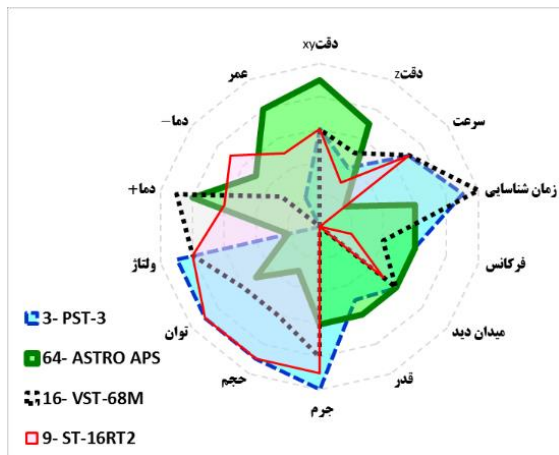
طبعاً این حسگرها بیشتر در دسته مربوط به خود برتری دارند و در دسته‌های دیگر قابلیت کمتری دارند. برای مشاهده بهتر این موضوع می‌توان از نمودارهای راداری بهره برد. در شکل ۲۸ تا شکل ۳۱ نمودار راداری مربوط به ۵ حسگر برتر در هر دسته ارائه شده است.

در شکل ۲۸ برای تشخیص بهتر نمودارها، توزیع مربوط به حسگر HYDRA-TC (شماره ۳۷ [38]) که مشابه توزیع حسگر HYDRA-M [37] می‌باشد، نمایش داده نشده است. در این شکل کاملاً مشهود است که توزیع نمودارها متمایل به شاخصه‌های عملکردی چون دقت حول محور X و Y، دقت حول محور Z، حداکثر سرعت دورانی قابل ردیابی، زمان شناسایی اولیه و فرکانس ارسال داده می‌باشد. لذا این حسگرها از لحاظ عملکردی حسگرهای مناسبی محسوب می‌شوند؛ ولی با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی خود در ماهواره‌های



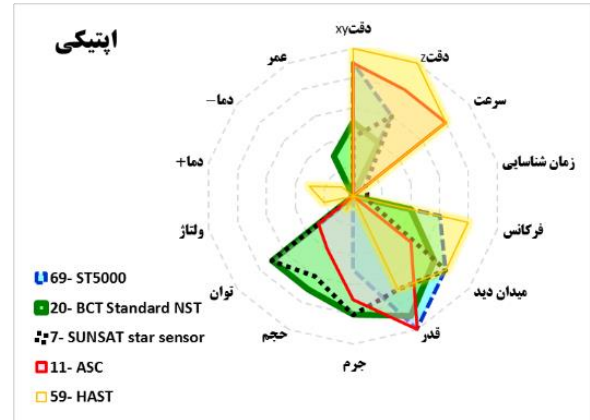
شکل ۳۱- نمودار توزیع شاخصه‌ها در حسگرهای برتر از لحاظ محیطی

در شکل‌های قبل، نمودار مربوط به برترین حسگرها در هر دسته از شاخصه‌ها مشاهده گردید. برای انتخاب یک حسگر که در تمام دسته‌ها وضعیت نسبتاً خوبی داشته باشد، می‌توان مجموع کل امتیازها را معیار قرار داد. با این معیار، شکل ۳۲، حسگرهای با توزیع یکنواخت‌تر را نشان می‌دهد. طبق این شکل، حسگر PST3 [7] (از شرکت TY-Space در چین) بیشترین مجموع امتیازها را به خود اختصاص داده است که البته مشخصات فیزیکی و الکتریکی سهم بیشتری را دارند. لذا این حسگر یکی از بهترین حسگرها برای ماهواره‌های کوچک به حساب می‌آید. حسگرهای NST4 [9] و NST1 [8] از همین شرکت چینی نیز دارای شرایط مشابه بوده و در نمودار نشان داده نشده است. همچنین حسگر VST-68M [21] از آلمان و حسگر ST-16RT2 [13] از شرکت Sinclair کانادایی گزینه‌های مناسبی برای ماهواره کوچک محسوب می‌شوند. لکن حسگر ASTRO APS [55] از شرکت Jena-Optronik در آلمان دارای ابعاد و توان مصرفی بیشتری بوده و در عوض دقت و عمر بیشتری دارد. در نتیجه این حسگر گزینه مناسبی برای ماهواره‌های بزرگتر و مأموریت‌های طولانی‌تر می‌باشد.



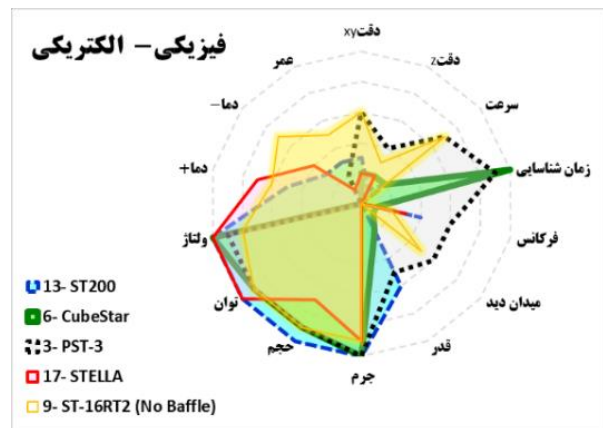
شکل ۳۲- نمودار توزیع شاخصه‌ها در حسگرهای برتر در مجموع امتیازها

در شکل ۲۹، حسگرهایی که دارای میدان دید کمتر و قدرت تشخیص بهتر ستارگان کم‌نورتر می‌باشند، قابل مشاهده می‌باشد. تأثیر این ویژگی‌ها در افزایش دقت حسگرها (مخصوصاً در حسگرهای شماره ۵۹ [52]، ۱۱ [15] و ۶۹ [59]) مشهود می‌باشد. همچنین حسگرهای شماره ۲۰ [14] و ۷ [11] هم توانسته‌اند با جرم و مصرف توان نسبتاً کم ویژگی‌های اپتیکی خود را حفظ نمایند.



شکل ۲۹- نمودار توزیع شاخصه‌ها در حسگرهای برتر از لحاظ اپتیکی

طبق شکل ۳۰، مشخص است حسگرهای انتخابی دارای کمترین جرم‌ها و مصرف‌های توان می‌باشند. لذا این حسگرها بهترین گزینه برای ماهواره کوچک چون CubeSat می‌باشند؛ مخصوصاً حسگرهایی چون PST-3 [7] (که دارای مشخصات عملکردی بهتری هستند).



شکل ۳۰- توزیع شاخصه‌ها در حسگرهای برتر از لحاظ فیزیکی و الکتریکی

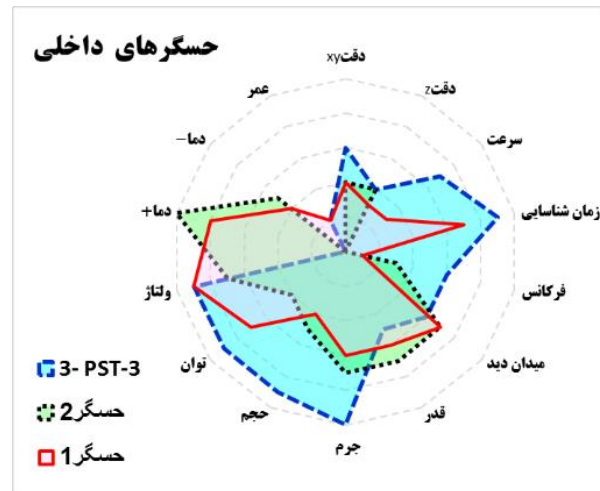
شکل ۳۱ هم مقاوم‌ترین حسگرها از لحاظ شرایط دمایی و طول عمر را مشخص می‌نماید. از آنجا که این شاخصه‌ها نسبتاً مستقل از مشخصات دیگر می‌باشد، مشاهده می‌شود که توزیع به سمت یک دسته خاصی متمایل نشده است. البته طبق شکل می‌توان گفت حسگرهایی که عمر بیشتری دارند، دارای ابعاد و توان مصرفی بیشتری هستند.

مجموع شاخصه‌های عملکردی باشد، می‌توان طبق شکل ۲۸ حسگر شماره ۳۶ [37] را انتخاب نمود. از آن طرف اگر اهمیت محدودیت‌های جرمی و توانی بیشتر باشد، می‌توان طبق جدول ۱۱ و شکل ۳۰، حسگرهایی با شماره ۱۳ [18]، ۶ [10] و ۳ [7] را انتخاب نمود.

جدول ۱۱- لیست برترین حسگرها در هر شاخصه

شماره	عنوان شاخصه	رتبه ۱	رتبه ۲	رتبه ۳	رتبه ۴	رتبه ۵	رتبه ۶	رتبه ۷	رتبه ۸	رتبه ۹	رتبه ۱۰
۱	دقت pointing	۲۸	۵۹	۶۸	۶۹	۳۵	۳۶	۲۷	۳۲	۵۸	۶۷
	دقت rolling	۲۸	۵۹	۳۵	۶۸	۳۶	۳۷	۲۳	۵۸	۶۷	۴۵
۲	سرعت نقل‌رسانی	۳۹	۳۸	۳۵	۳۶	۴۰	۲۱	۲۳	۲۴	۲۷	۳۷
	زمان شناسایی اولیه	۱۵	۴۷	۱۶	۴	۶	۳۵	۵۳	۲	۵	۵۱
۳	فرکانس ارسال داده	۲۸	۳۳	۶۸	۵۹	۶۰	۳۶	۳۷	۵	۳۹	۵۸
	میدان دید	۶۸	۶۷	۶۸	۵۹	۵۵	۶۱	۶۹	۷	۵۶	۱۰
۴	پهنای باند	۱۱	۲۰	۲۰	۱۱	۶۳	۵۹	۷	۲	۶۶	۴۷
	جرم	۱۳	۶	۳	۹	۱۷	۱۰	۲۷	۳۴	۱۹	۴
۵	حجم	۱۳	۲	۶	۹	۱۲	۲۱	۱۰	۲۷	۱۷	۱۴
	توان	۱۳	۱۷	۶	۱۴	۳	۹	۵	۳۴	۴	۲۳
۶	ولتاژ	۱۷	۶	۱۲	۱۳	۱۴	۳	۵	۳۴	۴	۱
	مدانتر دمای کارکردی	۲	۱۵	۱۶	۶۱	۳۱	۱	۴۶	۴۲	۴۱	۳۷
۷	مدانتر دمای کارکردی	۲۸	۹	۶۵	۲۵	۲۶	۲	۶۱	۴۶	۴۲	۴۱
	عمر	۳۸	۴۶	۴۲	۳۹	۴۱	۳۱	۳۷	۶۴	۲۵	۱۲

برای بررسی شرایط حسگرهای داخلی، در شکل ۳۳ نمودار دو حسگر ایرانی به همراه حسگر PST-3 [7] ارائه شده است.



شکل ۳۳- توزیع شاخصه‌ها در حسگرهای ایرانی به همراه حسگر PST-3

در پایان این بخش لازم به ذکر است که در مقاله دیگری [63]، بررسی جامعی روی مقالات و پژوهش‌های انجام شده در حوزه حسگر ستاره صورت پذیرفته است. نتایج مقاله مذکور می‌تواند مکمل خوبی برای نتایج این بخش باشد. طبق نتایج این مقاله [63]، در میان ۳۰۸ مقاله مورد بررسی مربوط به سال‌های اخیر، موضوعات مربوط به ارتقاء الگوریتم‌های داخل حسگر ستاره با ۴۷ مقاله، بیشترین سهم را (در میان ۱۷ موضوع) به خود اختصاص داده است. همچنین در حوزه ارتقاء عملکرد حسگر ستاره در شرایط دینامیکی نیز موضوع الگوریتم فراوانی را در بین موضوعات دیگر (چون ارتقاء سخت‌افزار، محاسبه سرعت زاویه‌ای و ...) داراست. لذا می‌توان گفت چالش‌هایی که حسگر ستاره در شرایط دینامیکی با آن مواجه می‌شود اغلب با ارتقاء و هوشمندسازی الگوریتم‌های پردازش تصویر قابل رفع یا بهبود است؛ اگرچه ارتقاء سخت‌افزار هم، اهمیت خود را دارا می‌باشد ولی رشد آن کندتر از ارتقاء نرم‌افزارها می‌باشد. بهترین راهکار برای ارتقاء شاخصه عملکردی مهمی چون سرعت قابل ردیابی در حسگرها هم همین توسعه نرم‌افزارها می‌باشد.

بر اساس این نتایج می‌توان اظهار داشت در سال‌های اخیر، موضوع الگوریتم‌های شناسایی و پردازش تصویر در حسگرهای ستاره بیشترین سهم را در پژوهش‌های این حوزه به خود اختصاص داده است و نقش آن در ارتقاء عملکرد حسگر ستاره بیشتر و سریع‌تر از توسعه سخت‌افزارها بوده است. چراکه ارتقاء سخت‌افزاری اغلب نیازمند افزایش جرم، حجم، توان مصرفی، هزینه و غیره می‌باشد که در المان‌های فضایی محدودیت‌های زیادی خواهد داشت. توسعه دوربین‌های گوشی‌های تلفن همراه در سال‌های اخیر، از جنبه مذکور خیلی مشابه توسعه حسگرهای ستاره می‌باشد. در موبایل‌ها هم به دلیل محدودیت‌های ابعادی، توانی و

طبق شکل ۳۳ شخص است که بیشترین قسمت‌ها برای رشد حسگرهای داخلی، مشخصات عملکردی چون دقت، سرعت و فرکانس می‌باشد. با توجه به برخی شباهت‌ها، حسگری مانند PST-3 [7] گزینه بسیار خوبی برای راهبرد و هدف اولیه ارتقاء حسگرهای داخلی می‌باشد. برای این هدف‌گذاری می‌توان ارتقاء شاخصه‌هایی چون دقت، سرعت قابل تشخیص، فرکانس ارسال داده و کاهش جرم، ابعاد و توان مصرفی را در دستور کار قرار داد.

در کنار نمودارهای ارائه شده، جدول ۱۱ می‌تواند مکمل خوبی باشد. در این جدول، در هر شاخصه شماره حسگرهایی که ۱۰ رتبه اول را داشته‌اند، مشخص شده است. شماره حسگرهایی که در هر دسته حضور بیشتر و مجموع امتیاز بالاتری دارند، با رنگ زمینه پررنگ‌تر مشخص شده است. این شماره‌ها اغلب در نمودارهای موضوعی شکل ۲۸ تا شکل ۳۱ مشاهده می‌گردد. نکته قابل توجه آن است که این حسگرها لزوماً دارای رتبه‌های بسیار بالا در هر شاخصه نیستند؛ لکن به صورت همزمان در تعداد بیشتری از شاخصه‌ها وجود دارند. به عنوان مثال حسگر شماره ۳۶ [37]، طبق شکل ۲۸ برترین حسگر از لحاظ عملکردی محسوب می‌گردد؛ ولی طبق جدول ۱۱، در شاخصه‌های عملکردی رتبه‌های ۴ تا ۶ را دارد در صورتی که حسگرهایی چون شماره ۲۸ (interferometric ST از شرکت OPC آمریکا [30]) و شماره ۵۹ (HAST از شرکت Ball آمریکا [52]) در تعداد شاخصه‌های کمتر رتبه‌های بهتری را دارند. لذا اگر در انتخاب یک حسگر، یک شاخصه‌ی خاص چون دقت معیار اصلی باشد، می‌توان با استفاده از جدول ۱۱ جدول حسگری چون حسگر شماره ۲۸ [30] را انتخاب نمود و اگر معیار

مشخصات فیزیکی - الکتریکی چون جرم و توان با مشخصات عملکردی چون دقت در مجموعه حسگرها (طبق شکل ۱۸ و شکل ۱۹) معکوس بوده و اغلب تقویت یکی از آن‌ها موجب تضعیف دیگری می‌گردد. لذا راهبرد اصلی طراحان و سازندگان در شرایط کنونی، ارتقاء این دو نوع مشخصه به صورت هم‌زمان می‌باشد و راهکار اصلی در این مسیر همان ارتقاء الگوریتم‌هاست؛ چراکه اثر کاهش مشخصاتی چون جرم و توان مصرفی در افت عملکرد را با تقویت نرم‌افزاری می‌توان جبران نمود. این رویکرد در دوربین‌های تلفن همراه هم که از لحاظ جرم، ابعاد و توان محدودیت زیادی دارند، به خوبی مشاهده می‌گردد که در حال حاضر ارتقاء نرم‌افزارها نقش اصلی را در پیشرفت دوربین‌ها ایفا می‌نمایند تا سخت‌افزارها. اگرچه توسعه فناوری‌ها در حوزه سخت‌افزاری چون قطعات الکتریکی و حساسه‌های اپتیکی نیز، نقش خود را داشته و بستر را برای ارتقاء بیشتر الگوریتم‌ها مهیا می‌نماید.

در پایان پیشنهاد می‌گردد، حسگرهای کوچکتر (چون حسگر شماره ۳ [7]، ۹ [13]، ۱۶ [21]، ۲۷ [29] و ۳۴ [35]) که دستیابی به قابلیت‌های آن‌ها در زمان کمتری امکان‌پذیرست، بیشتر مورد توجه سازندگان داخلی قرار گیرد تا با الهام‌گیری از سخت‌افزار و نرم‌افزار آن‌ها، سرعت ارتقاء افزایش یابد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

مراجع

- [1] Stars Sensors Terminology and Performance Specification, ECSS-E-ST-60-20C, ESA-ESTEC Requirements and Standards Division, Netherlands, 2008.
- [2] "Rigel-L star tracker performance," *SURREY Satellite Technology Limited (SSTL)*, 2014.
- [3] K. Huffman, R. Sedwick, J. Stafford, J. Peverill, and W. Seng, "Designing star trackers to meet micro-satellite requirements," in *SpaceOps 2006 Conference*, 2006, Paper AIAA 2006-5654, <https://doi.org/10.2514/6.2006-5654>.
- [4] X. Qian, H. Yu, and S. Chen, "A global-shutter centroiding measurement cmos image sensor with star region snr improvement for star trackers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 99, pp. 1-1, 2015.
- [5] G. Papotti, "A Star Tracker based Attitude Determination System," Ph.D. dissertation, Institute of Technology Bombay, Indian, 2021.

غیره، دوربین‌ها بیشتر از لحاظ نرم‌افزاری و پردازشی رشد داشته‌اند تا سخت‌افزاری.

با ملاحظه هم‌زمان نتایج مقاله مذکور [63] و نتایج این مقاله، می‌توان گفت راهبرد اصلی طراحان و سازندگان حسگرهای ستاره ارتقاء مشخصات عملکردی و مشخصات فیزیکی-الکتریکی به صورت هم‌زمان می‌باشد و راهکار اصلی در این مسیر ارتقاء الگوریتم‌هاست؛ چراکه اثر کاهش مشخصاتی چون جرم و توان مصرفی در افت عملکرد را با تقویت نرم‌افزاری می‌توان جبران نمود. طبق شکل ۳۲ نیز این رویکرد در حسگرهای برتر قابل مشاهده می‌باشد.

۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از دستاوردهای مهم این مقاله، امکان شناسایی بهترین حسگرهای ستاره بر اساس یک شاخصه یا مجموعه‌ای از مشخصات می‌باشد که با وزن دهی آن‌ها قابل حصول است. به عنوان مثال اگر در مأموریتی دقت تعیین وضعیت یک فضاییمای بزرگ خیلی اهمیت داشته باشد، وزن پارامتر دقت خیلی زیاد می‌شود و حسگری چون شماره ۲۸ (interferometric ST از شرکت OPC آمریکا [30]) قابل انتخاب خواهد بود. از آن طرف اگر در یک ماهواره خیلی کوچک چون CubeSat، محدودیت‌های جرم و توان مصرفی بیشترین اهمیت را داشته باشد، وزن این شاخصه‌ها بالا رفته و حسگری چون شماره ۱۳ (ST200 از شرکت BST آلمان [18] [17]) پیشنهاد می‌گردد. مواردی چون حسگر شماره ۳ (PST-3 از شرکت TY-Space چین [7]) هم گزینه‌های مناسبی برای لحاظ کلیه شاخصه‌ها با وزن‌دهی نسبتاً مشابه هستند.

باتوجه به قابلیت مذکور فراهم شده در این مقاله، طراحان و سازندگان ماهواره، می‌توانند بر اساس الزامات و محدودیت‌های مأموریتی خود، وزن هر شاخصه یا دسته را مشخص نموده، و بهترین حسگر ستاره موجود با این معیار را شناسایی نمایند. همچنین سازندگان خود حسگر ستاره نیز می‌توانند جایگاه کنونی خود را در میان حسگرهای دیگر مشاهده نموده و مسیر پیش‌رو برای رشد و توسعه را ترسیم نمایند. به‌عنوان مثال در کشور ایران که مجموعه‌های مختلفی در حوزه طراحی و ساخت حسگر ستاره وارد شده‌اند، پیشرفت‌های خیلی خوبی صورت‌گرفته که طبق جدول ۸، در شاخصه‌های دقت، سرعت، فرکانس و عمر، نیاز بیشتری برای ارتقاء و رشد وجود دارد؛ لذا پیشنهاد می‌گردد سازندگان داخلی با اولویت بالاتری، ارتقاء مشخصات عملکردی را دنبال نمایند که باتوجه به محدودیت‌های بیشتر در حوزه سخت‌افزار، ارتقاء الگوریتم‌های نرم‌افزاری سریع‌تر قابل حصول خواهد بود. رابطه کلی

- [19] "berlin-space-tech.com," BST, 23 9 2016. [Online]. Available: <https://www.berlin-space-tech.com/portfolio/1913/>. [Accessed 1 5 2023].
- [20] "vectronic-aerospace.com," 31 3 2020. [Online]. Available: <https://www.vectronic-aerospace.com/wp-content/uploads/2020/03/VAS-VST41M-DS5.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [21] "vectronic-aerospace.com," 31 3 2020. [Online]. Available: <https://www.vectronic-aerospace.com/wp-content/uploads/2020/03/VAS-VST68M-DS2.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [22] W. Fischer, O. Balagurin, H. Kayal, and H. Wojtkowiak, *Hardwarenahe Softwarelösungen für Miniaturisierte Sternsensoren*. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2014.
- [23] "spaceflight.com," Andrews Space, 1 7 2014. [Online]. Available: <http://spaceflight.com/wp-content/uploads/2015/05/201407-PYXIS-Tracker-Datasheet.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [24] "eoportal.org," Clementine, 29 5 2012. [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/clementine#stc-star-tracker-camera>. [Accessed 1 5 2023].
- [25] R. Zenick, "Lightweight, Low-Power Coarse Star Tracker," in *17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Massachusetts, 2003.
- [26] K. Anderson, "FAR-MST Phase I SBIR Final Report," *AeroAstro, Inc., Proprietary*, 2005.
- [27] "terma.com," 29 8 2022. [Online]. Available: https://www.terma.com/media/pokirm23/2-pager_t1-star-tracker.pdf. [Accessed 1 5 2023].
- [28] "satsearch.co," terma, 15 10 2019. [Online]. Available: <https://satsearch.co/products/terma-he-5as>. [Accessed 1 5 2023].
- [29] "opci.com," 26 8 2014. [Online]. Available: <https://www.opci.com/wp-content/uploads/2014/08/OPCin14Profiles02.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [30] "opci.com," OPC, 26 8 2014. [Online]. Available: <https://www.opci.com/products/star-tracker/>. [Accessed 1 5 2023].
- [31] "spacemicro.com," 12 6 2021. [Online]. Available: <https://www.spacemicro.com/cts/electro-optics-star/MIST%E2%84%A2%20MINIATURE%20INTEGRATED%20STAR%20TRACKER.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [32] "satcatalog.com," Space Micro, 11 7 2021. [Online]. Available: <https://www.satcatalog.com/component/star-100m/>. [Accessed 1 5 2023].
- [6] "isrc.ac.ir," 7 2 2019. [Online]. Available: <https://isrc.ac.ir/getattachment/88f39d3f-6afa-4f13-8b93-a148d014d9pf>. [Accessed 1 5 2023].
- [7] "satsearch.co," TY-Space Technology Ltd., 1 5 2023. [Online]. Available: <https://satsearch.co/products/oce-technology-pst3-star-tracker>. [Accessed 28 04 2023].
- [8] "cubesatshop.com," TY Space, 30 6 2016. [Online]. Available: <https://www.cubesatshop.com/wp-content/uploads/2016/06/English-Flyer-logo.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [9] "satsearch.co," TY-Space Technology Ltd., 24 10 2022. [Online]. Available: <https://satsearch.co/products/ty-space-nst4s-a2-star-tracker>. [Accessed 1 5 2023].
- [10] A. Erlank, "Development of cubestar: a cubesat-compatible star tracker," M.S. thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2013.
- [11] "eoportal.org," Stellenbosch University, 14 6 2012. [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/sunsat#hri-high-resolution-imager>. [Accessed 1 5 2023].
- [12] "Star Mapper Data Sheet," NewSpace Systems (Pty) Ltd., Somerset West 7130, South Africa, Version: 5c.
- [13] "satsearch.co," Sinclair Interplanetary, 11 6 2021. [Online]. Available: <https://satsearch.co/products/sinclair-interplanetary-second-generation-star-tracker-st-16rt2>. [Accessed 1 5 2023].
- [14] T. Schwarz, "Prototyping of a star tracker for pico-satellites," M.S. thesis, Luleå University of Technology, Würzburg, 2015.
- [15] J. L. Jørgensen *et al.*, "Microasc-a miniature star tracker," in *Small Satellites for Earth Observation, 4th International Symposium of the International Academy of Astronautics*, 2003, pp. 157-162.
- [16] "satcatalog.com," KU Leuven, 1 9 2018. [Online]. Available: <https://www.satcatalog.com/component/ku-leuven-star-tracker/>. [Accessed 1 5 2023].
- [17] T. Segert, S. Engelen, M. Buhl, "Development of the pico star tracker st-200 – design challenges and road ahead," in *25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Berlin Space Technologies GmbH, Berlin, Germany, 2011, Paper SSC11-IX-4.
- [18] T. Segert, S. Engelen, M. Buhl, "The pico star tracker st-200: a new approach in miniaturized star sensor systems," in *the 1st IAA Symposium on University Missions*, Rome, 2011.

- i-SAIRAS2001*, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, 2001.
- [46] R. Mozzillo, "D1. 1_Requirements Specification and Test Plan," ARGO, 2017.
- [47] P. Oosthuizen, S. Fellowes, C. Collingwood, and S. Lalani, A. Cropp, and S. Gleason, "Development and on-orbit results of the SSTL low cost commercial star tracker," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Keystone, Colorado, 2006, Paper AIAA 2006-6045, <https://doi.org/10.2514/6.2006-6045>.
- [48] "Procyon (Altair-APS) Performance," SURREY Satellite Technology Limited (SSTL), Apr-2015.
- [49] L. W. Cassidy, "Miniature star tracker for precise attitude reference in space," in *Space Optics 1994: Space Instrumentation and Spacecraft Optics*, 1994, vol. 2210, pp. 142-149
- [50] C. Kaplan, "Leo satellites: attitude determination and control components; some linear attitude control techniques," M. S. thesis Middle East Technical University, 2006.
- [51] "ball.com," 21 12 2021. [Online]. Available: https://www.ball.com/getattachment/9cf8d772-2ec8-4d54-ba43-53e140fa6083/D3408_CT2020_Updated_20211221.pdf. [Accessed 1 5 2023].
- [52] "satnow.com," ball, 4 9 2022. [Online]. Available: <https://www.satnow.com/products/star-trackers/ball-aerospace/37-1198-hast>. [Accessed 1 5 2023].
- [53] "spacealliance.ro," ball, 25 2 2010. [Online]. Available: <http://www.spacealliance.ro/articles/view.aspx?id=201002250904>. [Accessed 1 5 2023].
- [54] J. Beaton, B. Stewart, k. Culligan, and D. Barker, *Shuttle Guidance Navigation and Control Subsystem Redesign*, Aircraft System Engineering, MITOpenCourseWare, 2005.
- [55] E. Shalom, J. W. Alexander, and R. H. Stanton, "Acquisition and track algorithms for the ASTROS star tracker," *Advances in the Astronautical Sciences*, vol. 57, pp. 375-398, 1985.
- [56] R. H. Stanton, J. W. Alexander, E. W. Dennison, T. A. Glavich, P. M. Salomon, and R. E. Williamson "Astros: A sub-arcsec ccd star tracker," in *28th Annual Technical Symposium, State-of-the-Art Imaging Arrays And Their Applications*, 1984, Vol. 0501, <https://doi.org/10.1117/12.944671>
- [57] "jena-optronik.de," 20 3 2021. [Online]. Available: <https://jena-optronik.de/products/star-sensors/star-sensor-astro-10.html>. [Accessed 1 5 2023].
- [33] "satcatalog.com," Space Micro, 27 7 2021. [Online]. Available: <https://www.satcatalog.com/component/star-200m/>. [Accessed 1 5 2023].
- [34] "State-of-the-Art, Small Spacecraft Technology," NASA, Ames Research Center, Moffett Field, California, 2020.
- [35] "sodern.com," 1 2 2023. [Online]. Available: <https://sodern.com/en/press-release-auriga-star-tracker/>. [Accessed 1 5 2023].
- [36] "sodern.com," 30 11 2021. [Online]. Available: <https://sodern.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydra.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [37] "sodern.com," 30 11 2021. [Online]. Available: <https://sodern.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydra-M.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [38] "sodern.com," 30 11 2021. [Online]. Available: <https://sodern.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydra-TC.pdf>. [Accessed 1 5 2023].
- [39] "sodern.com," 14 12 2021. [Online]. Available: <https://sodern.com/en/sodern-livre-les-derniers-viseurs-detoiles-sed26/>. [Accessed 1 5 2023].
- [40] L. Blarre, J. Ouaknine, L. Oddos-Marcel, and P. E. Martinez, "High accuracy sodern star trackers: recent improvements proposed on sed36 and hydra star trackers," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006, Paper AIAA 2006-6046, <https://doi.org/10.2514/6.2006-6046>
- [41] "satsearch.co," Leonardo Finmeccanica S.p.A, 15 10 2019. [Online]. Available: <https://satsearch.co/products/leonardo-finmeccanica-a-str>. [Accessed 1 5 2023].
- [42] "A-STR AND AA-STR," Leonardo Finmeccanica Selex ES Galileo Avionica, Italy, 2017.
- [43] "esa.int," Leonardo, 18 10 2017. [Online]. Available: https://indico.esa.int/event/182/contributions/1506/attachments/1456/1682/1710_-_Boldrini.pdf. [Accessed 1 5 2023].
- [44] "satcatalog.com," Leonardo Finmeccanica S.p.A, 19 7 2021. [Online]. Available: <https://www.satcatalog.com/component/spacestar/>. [Accessed 1 5 2023].
- [45] A. Bacchetta, S. De Sanctis, M. Montagna, M. T. Ravazzotti, G. Sechi, A. Spazio, "Andromeda, an autonomous system for attitude determination from stars: current development and future trend," in *6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space:*

- [61] "satcatalog.com," Maryland Aerospace, 5 10 2015. [Online]. Available: <https://www.satcatalog.com/component/mai-ss/>. [Accessed 1 5 2023].
- [62] "Small Spacecraft Technology, State of the Art," NASA, Ames Research Center, Moffett Field, California, Tech. Rep. NASA/TP-2014-216648/REV1, 2014.
- [63] M. S. Mahdiyari and M. Nosratollahi, "Literature review on the process of research about star tracker and its performance under dynamic conditions," in *20th International Conference of Iranian Aerospace*, Tehran, Iran, 2022, (in Persian).
- [58] "jena-optronik.de," 6 10 2020. [Online]. Available: https://www.jena-optronik.de/products/star-sensors/star-sensor-astro-15.html?file=tl_files/pdf/Data%20Sheet%20ASTRO%2015.pdf. [Accessed 1 5 2023].
- [59] J. Percival, B. Babler, and R. Bonomo, "The ST5000, an ultra-low-cost star tracker and low-bandwidth digital imager," *University of WISCONSIN Madison*, 2008.
- [60] "spaceflight101.com," Meteor-M #2, 22 11 2018. [Online]. Available: <http://www.spaceflight101live.com/> [Accessed 1 5 2023].