



Design and Analysis of a Domestic Navigation Satellite Constellation for a Regional Coverage

Yaser saffar¹, Sajjad Ghazanfarinia² Masoud khoshshima^{*3}, Shiva Emami⁴

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 135-148
2022

DOI:

10.22034/jssta.2023.332415.1083

Article Info

Received: 2022-3-4

Accepted: 2023-2-5

Keywords

Global navigation satellite
system, Augmentation,
Regional, Orbit, Navigation
accuracy

How to Cite this article

Yaser saffar, Sajjad
Ghazanfarinia, Masoud
khoshshima, Shiva Emami.
"Design and Analysis of a
Domestic Navigation
Satellite Constellation for
a Regional Coverage".
*Journal of Space Science,
Technology and
Applications*, vol 2 (2), p.:
135-148, 2023.

1. Faculty Member, Satellite Research Institute, Tehran, Iran, saffar_yaser@yahoo.com
2. Research Engineer, Satellite Research Institute, Tehran, Iran,
s.ghazanfarinia@isrc.ac.ir
3. Faculty Member, Satellite Research Institute, Tehran, Iran, m.khoshshima@isrc.ac.ir
(Corresponding Author)
4. Research Engineer, Satellite Research Institute, Tehran, Iran,
shivaemami20@yahoo.com

Abstract

In This paper, a domestic regional and independent satellite navigation system, known as "IRANSS" has been designed and analyzed to cover user needs in the Middle East Region. The Space Segment of this constellation is composed of nine satellites in four orbits, in such a way three satellites have been considered in one GEO orbit [1] and two satellites are considered in each of three IGSO orbits [2]. Two main Tracking and Control Ground Stations and twenty wide area reference stations, assigned only for augmentation, form the Ground Segment. The focus of this research is on space segment and specially design a navigation constellation and satellites' system design, and evaluation of the performance of the navigation system in combination with other satellite-based navigation systems, since Augmentation Systems prepare correction signals for a specific Navigation System by ground segment. STK is the main software used to design and analyze the performance of the system by DOP as a reference for Ranging Errors based on Constellation Geometry. All of design parameters are computed in a way to minimize GDOP with four satellites. The parameters of navigation accuracy have been compared with other active GNSS [3] constellations to evaluate error in the designed system. Analysis results express that the geometric accuracy of the designed system is solely 16 meters in 95% of a day in all points of the desired area and would be improved to 14 and 12.5 meters in the case of combination with BeiDou and GPS, respectively.



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۱۴۸-۱۳۵
پاییز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:
10.22034/jssta.2023.332415.1083

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

واژه‌های کلیدی

سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی،
سیستم‌های تقویتی، منطقه‌ای، مدار،
دقت ناوبری

نحوه استناد به این مقاله

یاسر صفار، سجاد غضنفری نیا، مسعود
خوش سیما، شیوا امامی. "طراحی و
تحلیل سامانه ناوبری بومی با هدف
پوشش منطقه‌ای". دوفصلنامه علوم،
فناوری و کاربردهای فضایی، جلد دوم،
شماره دوم، صفحات ۱۴۸-۱۳۵،
۱۴۰۱.

طراحی و تحلیل سامانه ناوبری بومی با هدف پوشش منطقه‌ای

یاسر صفار^۱، سجاد غضنفری نیا^۲، مسعود خوش سیما*^۳، شیوا امامی^۴

۱. هیئت علمی پژوهشکده سامانه های ماهواره، تهران، ایران، saffar_yaser@yahoo.com

۲. پژوهشکده سامانه های ماهواره، تهران، ایران، s.ghazanfarinia@isrc.ac.ir

۳. هیئت علمی پژوهشکده سامانه های ماهواره، تهران، ایران، m.khoshsima@isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

۴. پژوهشکده سامانه های ماهواره، تهران، ایران، shivaemami20@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، یک سامانه ناوبری ماهواره‌ای بومی و مستقل منطقه‌ای، موسوم به "IRANSS" برای پوشش نیازهای کاربر در منطقه خاورمیانه طراحی و تحلیل شده است. بخش فضایی سامانه مذکور شامل یک منظومه با نه ماهواره است که در چهار مدار طراحی و جانمایی شده به صورتی که، سه ماهواره بر روی یک مدار زمین آهنگ (GEO) و دو ماهواره در هر یک از سه مدار IGSO در نظر گرفته شده است. دو ایستگاه اصلی کنترل و ردیابی و بیست ایستگاه مرجع در منطقه، به منظور تقویت با ایستگاه‌های اصلی و فرعی اختصاص داده شده‌اند. از آنجایی که سیستم‌های تقویتی ماهواره‌ای، سیگنال‌های ناوبری تصحیح شده را برای یک منظومه مشخص ناوبری که توسط بخش زمینی محاسبه می‌شود را ارسال می‌نمایند، در این پژوهش، تمرکز بر بخش فضایی و به طور خاص شبیه‌سازی پارامترهای سیستمی و طراحی منظومه ناوبری است. در طراحی این سامانه و محاسبه پارامتر تعدیل دقت (DOP) برای ملاحظات خطاهای رنجینگ و تعیین هندسه منظومه، از شبیه‌سازی‌های محیط STK استفاده شده است. تمام پارامترهای طراحی با چهار ماهواره شاخص و برای رسیدن به حداقل GDOP محاسبه شده‌اند. به منظور ارزیابی عملکرد و تحلیل خطا در این سامانه، پارامترهای مربوط به دقت ناوبری با سایر منظومه‌های فعال GNSS، مقایسه شده‌اند. نتایج تحلیل‌ها بیانگر این است که دقت هندسی سیستم طراحی شده ۱۶ متر در ۹۵ درصد از روز در تمامی نقاط منطقه مورد نظر و در صورت ترکیب با BeiDou و GPS، به ترتیب به ۱۴ و ۱۲.۵ متر بهبود می‌یابد.

۱-مقدمه

هر موقعیتیابی و زمان‌بندی یا به اصطلاح ناوبری، نقش مهمی را در زندگی روزانه انسان‌ها مانند حمل و نقل، صنعت دفاعی و صلح‌آمیز، مدیریت، برنامه‌ریزی و اقتصاد ایفا می‌نماید، به طوری که در حوزه‌های ارتباطات از راه دور، نقشه‌برداری از زمین، اجرای قوانین مربوط به نقشه‌برداری و مالکیت اراضی، واکنش سریع، کشاورزی دقیق، اکتشافات معدن، تحقیقات مالی و علمی، مدیریت سیستم‌های رایانه‌ای، ترافیک هوایی، شبکه‌های انرژی و موارد دیگر استفاده می‌شوند [۱-۲]. سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری می‌توانند در هر زمان، فرایند تعیین آب‌وهوا و موقعیت‌های دقیق، خدمات ناوبری و زمان‌بندی را برای کاربران روی زمین یا فضای نزدیک آن ارائه کرده و به عنوان یک زیرساخت دانش بنیان، علاوه بر گسترش دامنه فعالیت‌های مردم، توسعه اجتماعی، سیاست جهانی، اقتصاد، عرصه نظامی و دفاعی، فناوری و فرهنگ ملل مختلف را تحت تاثیر قرار دهند. هر یک از سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ (GNSS)، از یک منظومه ماهواره‌ای در ترکیب با شبکه ایستگاه‌های زمینی استفاده می‌کنند [۳].

سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی که زمان و موقعیت مکانی اهداف را از فضا مشخص می‌کند، شامل منظومه‌ای از ماهواره‌ها به همراه ایستگاه‌های کنترل زمینی و گیرنده‌ها (کاربران) است. این سامانه از سیستم‌هایی با پوشش جهانی مانند GPS^۲ ایالات متحده،^۳ GLONASS فدراسیون روسیه،^۴ GALILEO اتحادیه اروپا و^۵ BeiDou چین و همچنین سیستم‌هایی با پوشش منطقه‌ای مانند NavIC/IRNSS^۶ هند و QZSS^۷ ژاپن تشکیل شده است [۴].

سیستم‌های ناوبری مبتنی بر ماهواره برای کشف موقعیت گیرنده کاربر، نوعی مثلث‌بندی را توسط محاسبات مربوط به داده‌های چندین ماهواره اعمال می‌کنند. هر ماهواره سیگنال‌های

رمزگذاری شده را در دوره‌های زمانی دقیق پخش می‌کند. گیرنده، اطلاعات سیگنال را به موقعیت، سرعت و زمان تقریبی، تبدیل می‌کند. با استفاده از این داده‌ها، هر گیرنده‌ای که در داخل زمین یا نزدیک به آن قرار دارد، می‌تواند به راحتی موقعیت خاص ماهواره فرستنده را تعیین کرده و فاصله بین ماهواره و گیرنده را (که می‌توان آن را با تأخیر زمان انتقال محاسبه کرد) تعیین کند. هماهنگی بین سیگنال‌های دریافتی (اطلاعات) از چهار یا حتی تعداد بیش‌تری ماهواره اجازه می‌دهد تا گیرنده موقعیت خود را بیابد [۵].

قابلیت‌های ناوبری ماهواره‌ای با چهار عامل ارزیابی می‌شود:

- دقت مربوط به تفاوت ارزیابی شده در موقعیت، سرعت و زمان مناسب گیرنده
- یکپارچگی سیستم به منظور اعلام هشدار در ناهنجاری‌های مربوط به موقعیتیابی
- پیوستگی مربوط به ظرفیت یک سیستم ناوبری برای کار بدون وقفه
- دسترسی مربوط به درصد زمانی سیگنال دقیق، صحت‌سنجی و همچنین الزامات پیوستگی [۶-۷]

در حلت ایده آل، کاربر می‌تواند با بیش از صد ماهواره به سیگنال‌های موقعیتیابی، ناوبری و زمان‌بندی دسترسی داشته باشد [۸]. علاوه بر این موارد، سیستم‌های تقویت ماهواره‌ای مانند سیستم تقویتی منطقه گسترده ایالات متحده (WAAS^۸) سرویس پوششی ناوبری زمین ثابت اروپا (EGNOS^۹)، سیستم اصلاح و نظارت دیفرانسیل روسیه^{۱۰} (SDCM)، سامانه‌های تقویتی ماهواره‌ای مبتنی بر GPS در مدار زمین ثابت هند (GAGAN^{۱۱}) و ماهواره حمل و نقل چند منظوره ژاپنی مانند (MTSAS^{۱۲}) وجود دارد. وقتی همه آنها با فناوری‌های زمینی تأیید شده ترکیب شوند، گرایش به سوی برنامه‌های مدرن را ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال، این فناوری‌ها شامل، ناوبری اینرسی برای افزایش دقت، قابلیت اطمینان و یکپارچگی هستند.

7 Quasi-Zenith Satellite System

8 Wide Area Augmentation System

9 European Geostationary Navigation Overlay Service

10 System of Differential Correction and Monitoring (SDCM)

11 GPS-aided GEO augmented navigation

12 Multi-Functional Transport Satellite Augmentation System

1 Global Navigation Satellite System

2 Global Positioning Systems

3 Global Navigation Satellite System

4 Galileo Satellite Navigation System

5 Beidou Navigation Satellite System (Chinese Satellite Navigation System)

6 Indian Regional Navigation Satellite System

هندسه طراحی ماهواره‌ها، پس از انجام شبیه‌سازی‌ها در محیط STK، تمام مقادیر در شرایط بهترین چهار ماهواره شاخص از نظر حداقل $GDOP^3$ محاسبه می‌شوند. به منظور ارزیابی عملکرد و تحلیل خطا در این سامانه، پارامترهای مربوط به دقت ناوبری با سایر منظومه‌های فعال GNSS، تحلیل و مقایسه شده و در پایان، افزایش دقت هندسی ناوبری با ترکیب با سایر سیستم‌های GNSS منطقه پوشش، تحلیل می‌شود.

۲- طراحی بخش فضایی سیستم IRANSS

در این پژوهش، به‌منظور دستیابی به سیگنال‌های ناوبری منطقه‌ای و تقویت کننده برای پوشش خاورمیانه، یک منظومه ناوبری ماهواره‌ای طراحی شده است. این طرح که $IRANSS^4$ (سامانه ماهواره‌ای ناوبری منطقه‌ای و تقویتی ایران) نام دارد، سیگنال ناوبری منطقه‌ای مستقل را برای کاربران کشورهای خاورمیانه و بخشی از آفریقا فراهم می‌سازد. همچنین این سامانه، باعث تقویت سیگنال‌های ناوبری جهانی دیگر مانند GLONASS، GPS و BeiDou برای منطقه ایران خواهد شد. از این‌رو، $IRANSS$ می‌تواند یک سیستم چند منظومه‌ای باشد که فرایند ناوبری آن کاملاً مستقل است، اما در عین حال این توانایی را دارد که با سایر سیگنال‌های GNSS تقویت شود.

برای دستیابی به طراحی این شبکه، تعداد ماهواره‌ها، پارامترهای مداری، ایستگاه‌های زمینی اصلی و کنترلی، تقویت و همچنین تحلیل خطا و ملاحظات دقت، از گلوگاه‌های فنی و چالش‌های اساسی سیستمی این پژوهش است. همچنین شبیه‌سازی‌ها و پارامترهای مرتبط با دقت ناوبری و مقایسه بین منظومه‌های GNSS مانند GPS و BeiDou، با استفاده از نرم‌افزار STK مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است [15].

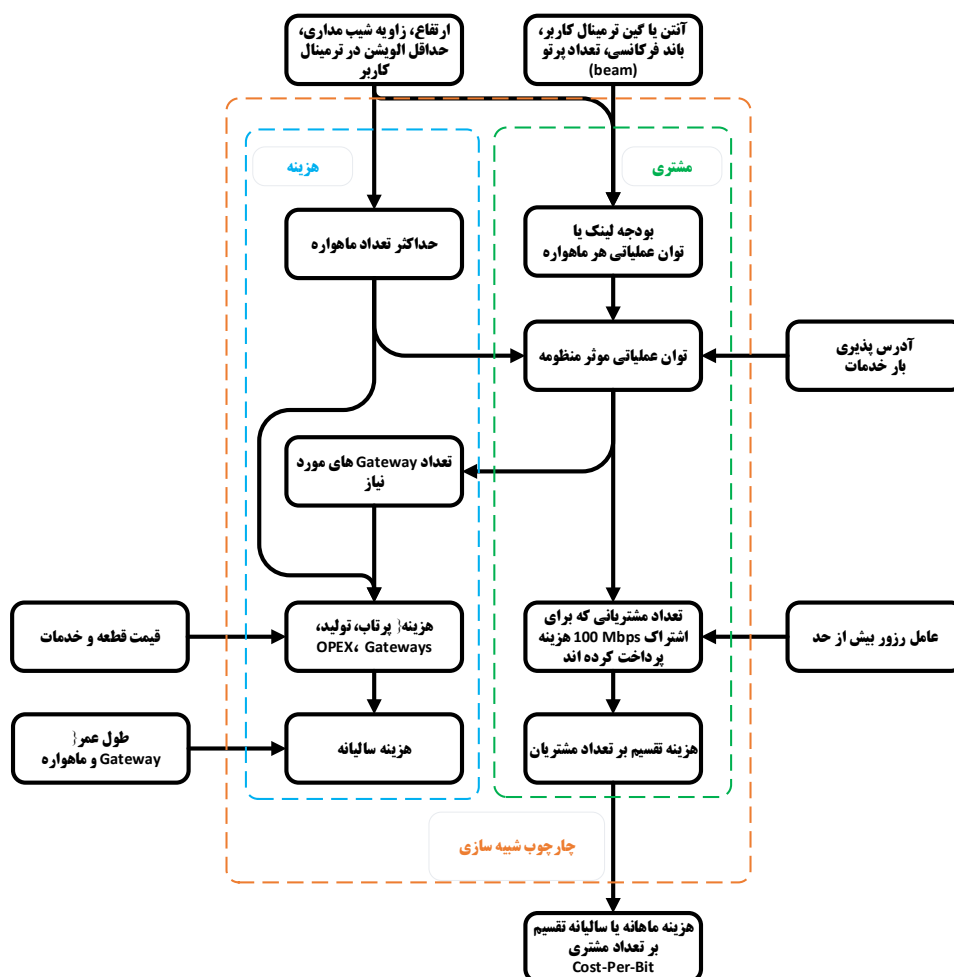
الگوریتم مربوط به طراحی منظومه ماهواره‌ای مورد نظر، به صورت زیر قابل ارائه است:

کاربردهای این سیستم‌ها، سفرهای حیاتی و ایمن از جمله فرود هواپیماهای غیرنظامی، دارای دقت و همچنین درخواست‌های بدون نقص هستند [۹-۱۲]. سیستم‌های تقویتی ماهواره‌ای، به سامانه‌هایی اطلاق می‌شود که سیگنال‌های ناوبری تصحیح شده را برای یک منظومه مشخص ناوبری ارسال می‌نماید. برای کشورهای در حال رشد در سراسر جهان، برنامه‌های GNSS یک روش کارآمد برای دستیابی به توسعه پایدار با صرفه اقتصادی و با تاکید بر حفاظت از محیط زیست را ارائه می‌دهند. اطلاعات ناوبری ماهواره‌ای و موقعیتیابی کنونی در مناطق مختلفی به منظور نقشه‌برداری و ژئودزی، نظارت بر محیط اطراف، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی، آمادگی در برابر سوانح، هوانوردی، دریایی و مسافرت‌های زمینی و مواردی مانند تغییرات آب و هوا و مطالعات علمی یونوسفر استفاده می‌شود. کاربر GNSS می‌تواند تا یک ابزار را برای دریافت سیگنال از چندین سیستم ماهواره‌ای انتخاب کند [۱۳]. این داده‌ها، به‌ویژه در مکان‌های شهری و کوهستانی، دقت بیشتری در اندازه‌گیری زمان یا موقعیت را فراهم می‌کنند. برای استفاده از این نوع دستاوردها، کاربران GNSS باید از آخرین پیشرفت‌ها در مناطق مرتبط با این سامانه بهره‌مند شوند و ظرفیت استفاده از سیگنال آن را ایجاد نمایند [۱۴].

چهارچوب اصلی در این مقاله، طراحی بخش فضایی منظومه ماهواره‌ای ناوبری است که بیش‌تر بر روی طراحی، تجزیه و تحلیل عملکرد این منظومه ناوبری تمرکز خواهد داشت. برای طراحی بخش فضایی، از ظرفیت نقاط مداری کشور ایران استفاده و با تخمین پارامترهای مداری، شبیه‌سازی با نرم‌افزار STK انجام خواهد شد. برای دستیابی به طراحی این شبکه، تعداد ماهواره‌ها، پارامترهای مداری، ایستگاه‌های زمینی اصلی و کنترلی، تقویت و همچنین تحلیل ملاحظات تعدیل دقت (DOP^1) و دقت^۲، از گلوگاه‌های فنی و چالش‌های اساسی سیستمی این پژوهش است. در طراحی این سامانه برای ملاحظات خطاهای رنجینگ و تعیین

3 Geometric Dilution Of Precision
4 Iran's Regional & Augmentation Navigation Satellite System

1 Dilution Of Precision
2 Accuracy



شکل ۱. الگوریتم طراحی منظومه ماهواره‌ای

که بیش‌تر بر روی طراحی و تجزیه و تحلیل عملکرد این منظومه ناوبری تمرکز شده است.

اولین گام برای شروع طراحی، استفاده از ظرفیت نقاط مداری کشور ایران و با بهره‌گیری از تخمین پارامترهای مداری، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار STK انجام شده است. همه ماهواره‌ها در مدارهایی با رد زمینی مشترک قرار دارند. به جز ماهواره IRANSS-G-34 که برای تقویت و ناوبری منطقه‌ای اختصاص داده شده، هشت ماهواره دیگر به ناوبری منطقه‌ای می‌پردازند. IRANSS به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شده که حداقل یک ماهواره از نه ماهواره نزدیک به سمت الرأس^۱ در سراسر ایران در

زیرسامانه فضایی شامل یک منظومه با نه ماهواره است که بر اساس طراحی انجام شده در چهار مدار جانمایی شده است. بر این اساس، سه ماهواره در مدار زمین آهنگ و دو ماهواره در هر سه مدار IGSO عملیاتی خواهند شد. برخی از ایستگاه‌های زمینی در محدوده کشور و برخی در خارج از ایران در نظر گرفته شده‌اند. یازده ایستگاه پایش زمینی، دو ایستگاه اصلی و ایستگاه کنترل ردیابی در منطقه تحت پوشش قرار دارند و بیست ایستگاه مرجع در محدوده وسیع، فقط برای تقویت با ایستگاه‌های اصلی و برقراری لینک در نظر گرفته شده‌اند. هدف اصلی این پژوهش، طراحی بخش فضایی و به‌ویژه منظومه ماهواره‌ای ناوبری است

سه مدار IGSO و یک مدار GEO برای منظومه IRANSS وجود دارد. ماهواره IRANSS IGSO دقیقاً در همان دوره مداری زمین، در نیم‌کره شمالی و هم‌چنین در نیم‌کره جنوبی، در گردش خواهد بود. پارامترهای مداری برای تمام ماهواره‌های IRANSS در جدول (۱) نشان داده شده است.

دقت موقعیت‌یابی IRANSS تابعی از هندسه ماهواره‌های مورد استفاده در محاسبات تعدیل دقت (DOP) است. در طراحی یک منظومه ماهواره‌ای، هرچه هندسه مطلوب‌تر باشد، مقادیر DOP کم‌تر و در نتیجه دقت تخمین موقعیت بالاتر خواهد بود. به منظور ارزیابی DOP، حداقل چهار ماهواره در دید مورد نیاز است. با این حال، اگر ماهواره‌های بیش‌تری در دسترس باشند، از تمام اندازه‌گیری‌های شبه برد^۲ برای محاسبه مکان کاربر استفاده می‌شود. DOP‌ها دقیقاً با خطاهای واقعی در موقعیت تخمینی کاربر مطابقت ندارند، به عنوان مثال، از یک ماهواره به ماهواره دیگر بودجه خطا اغلب به عنوان تابعی از اغتشاشات جوی متفاوت است. اما، اندازه‌گیری عملکرد یک منظومه ماهواره‌ای برای اهداف موقعیت‌یابی بسیار مفید خواهد بود. هر DOP در همه موقعیت‌ها در ایران به مدت ۱ روز محاسبه می‌شود. هر ماهواره IRANSS قبل مشاهده بالاتر از زاویه قطع فراز^۳ پنج درجه در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار STK، تمام مقادیر در شرایط حداکثر چهار ماهواره برتر از نظر حداقل GDOP محاسبه می‌شوند. با وجود اینکه، تنها چهار ماهواره برای رویکرد ناوبری لازم است، اما حضور ماهواره‌های بیش‌تر برای افزایش دقت مفید هستند.

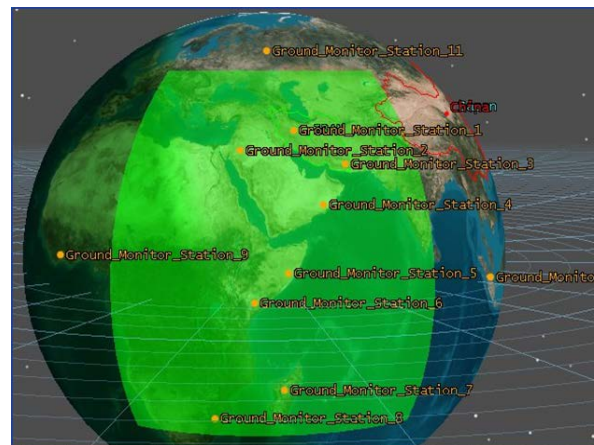
۳- طراحی بخش زمینی IRANSS

سیگنال‌های IRANSS از ماهواره‌ها منتقل شده و توسط ایستگاه‌های مانیتور زمینی^۴ (GMS) مشاهده می‌شوند. این ایستگاه‌ها در زمین گسترش می‌یابند و IRANSS و سایر سیگنال‌های GNSS را رصد می‌کنند. ایستگاه کنترل اصلی^۵ (MCS)، خروجی مشاهدات GMS را جمع‌آوری کرده و مدار و زمان IRANSS را تخمین می‌زند.

دسترس باشد (این ماهواره در زاویه فراز^۱ بیش از ۷۰ درجه قرار خواهد گرفت).

با طراحی منظومه ناوبری ماهواره‌ای ایرانی (منطقه‌ای و تقویتی)، کاربران منطقه خاورمیانه و بخشی از آفریقا، به سیگنال‌های ناوبری دسترسی خواهند داشت. هم‌چنین باعث تقویت سایر سیگنال‌های ناوبری جهانی مانند GPS، GLONASS و BeiDou برای منطقه ایران می‌شود. از این‌رو، IRANSS هم یک سیستم مستقل و هم یک سیستم تقویتی است.

IRANSS، خاورمیانه را به طور کامل و بخشی از آفریقا را پوشش می‌دهد. سطح پوشش از ۳۰- تا ۵۰ درجه در عرض جغرافیایی و از ۱۰ تا ۸۰ درجه در طول جغرافیایی محدود شده است (شکل ۱). ماهواره‌های IRANSS دارای ردهای زمینی است که در شکل (۳) با منطقه پوشش منظومه ماهواره‌ای آن نشان داده شده است. ایستگاه‌های زمینی بیش‌ترین زمان دسترسی به ماهواره‌ها را دارند. ماهواره‌ها دارای مدت زمان مداری ۲۳ ساعت ۵۶ دقیقه هستند. برخی از این مدارها زاویه میل بزرگی دارند، به طوری که هرگز در صفحات استوایی باقی نمی‌مانند اما هم‌چنان با سرعت زمین در حال گردش هستند که این نوع مدار IGSO نامیده می‌شود.



شکل ۲. منطقه تحت پوشش سامانه IRANSS

4 Ground Monitor Stations
5 Master Control Station

1 Elevation Angle
2 Pseudo Range
3 Elevation Cutoff Angle

پژوهش، بازه زمانی کل دوره تحلیل حدود دو هفته در نظر گرفته شده است. توسعه‌گر HPOP^۲ شامل مقادیر گرانث خورشید، ماه و سایر سیارات و همچنین نوع مختصات^۳ و دستگاه مختصاتی ITRF^۴ است. مأموریت اصلی IRANSS پوشش کل منطقه ایران برای به دست آوردن سیگنال‌های ناوبری است.

به عنوان پژوهش مشابه در سطح کشور، می‌توان به پژوهش‌های زردشتی و امامی؛ نوایی و همکاران در این خصوص اشاره کرد [16][17]. در شبیه‌سازی دینامیکی منظومه ماهواره‌های ارتفاع پایین برای پوشش‌دهی منطقه‌ای با در نظر گرفتن کیفیت سرویس‌دهی مطلوب، سناریوهایی توسط نوایی و همکاران پیشنهاد شده است. نتایج آنها ضمن لحاظ پوشش کامل برای منطقه ایران مبتنی بر تعداد صفحات آن، ناظر بر رعایت ملاحظات هزینه پرتاب به صفحات بیش‌تر یا تغییر صفحات مداری است. شایان ذکر است که منظومه پیشنهادی علاوه بر پوشش منطقه ایران، دارای پوششی برای تمامی مناطق در عرض‌های جغرافیایی $25 \pm$ تا $40 \pm$ درجه، است [17].

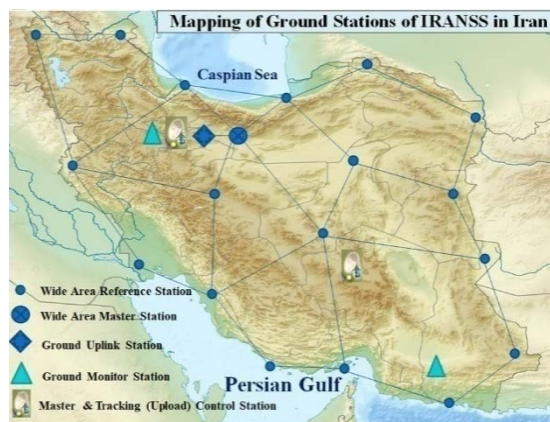
MCS همچنین اطلاعات اضافی را جمع‌آوری کرده، پیام‌های ناوبری را تولید می‌کند و این داده‌ها را با استفاده از ایستگاه کنترل ردیابی در IRANSS بارگذاری می‌کند. ایستگاه کنترل ردیابی^۱ (TCS)، به طور مداوم ماهواره‌ها را رصد کرده و با نظارت MCS برای ارائه خدمات مناسب، همکاری می‌کند.

علاوه بر این، تقریباً یک بار در سال، مدارها توسط TCS برای اطمینان از کنترل ماهواره‌ها که در وضعیت مداری مناسب قرار دارند یا خیر، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در مجموع یازده ایستگاه مانیتور زمینی (GMS) وجود دارد. دو ایستگاه در ایران و ۹ ایستگاه دیگر در خارج از کشور هستند. ایستگاه کنترل اصلی (MCS) وظیفه تولید پیام ناوبری را دارد که با استفاده از ایستگاه TT&C به ماهواره‌ها به صورت Uplink ارسال می‌شود. از دو ایستگاهی که در ایران قرار دارند، اولی MCS اصلی است و دومی به صورت اضافی در مسافت مناسب از فاصله اولی قرار داده شده است. چیدمان ایستگاه‌های داخل کشور ایران، مطابق شکل (۳) است. برای تقویت سایر سیگنال‌های GNSS مانند GPS، GLONASS و BeiDou، هجده ایستگاه مرجع گسترده در محدوده ایران مشخص شده‌اند. این سیستم تقویتی شامل یک ایستگاه اصلی و یک ایستگاه Uplink زمینی است. در این

جدول ۱. پارامترهای مدارهای IRANSS

IRANSS G-110	IRANSS I-47-3	IRANSS I-47-2	IRANSS I-47-1	IRANSS G-34	IRANSS I-26-3	IRANSS I-26-2	IRANSS I-26-1	IRANSS G-345	ماهواره / مشخصات مدار
GEO 110 E	IGEO 47 E	IGEO 47 E	IGEO 47 E	GEO 34 E	IGEO 26 E	IGEO 26 E	IGEO 26 E	GEO 15 W	نوع مدار
۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	۴۲۱۶۴.۲	نیم محور اصلی - (a) کیلومتر
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	خروج از مرکز - (e)
۰	۶۰	۶۰	۶۰	۰	۶۰	۶۰	۶۰	۰	زاویه میل - (i) درجه
۱۱۰	۴۷	۴۷	۴۷	۳۴	۲۶	۲۶	۲۶	۳۴۵	طول گرهِ صعودی - (Ω) درجه
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	آرگومان حضیض - (ω) درجه
۰	۳۳۷	۲۲۱	۱۱۱	۰	۳۱۶	۲۰۰	۹۰	۲۱۰	آنومالی میانگین (M) - درجه

گیرنده ۰ و عدم قطعیت برد ماهواره ۵ متر به طور مداوم است. مقایسه دقت هندسی ناوبری بین GPS، BeiDou، IRANSS ترکیبی از IRANSS و BeiDou و ترکیب GPS و IRANSS برای نقطه‌ای با عرض جغرافیایی ۳۲.۰۸ و طول جغرافیایی ۵۳.۳۳ درجه واقع در ایران در جدول (۳) نشان داده شده است.



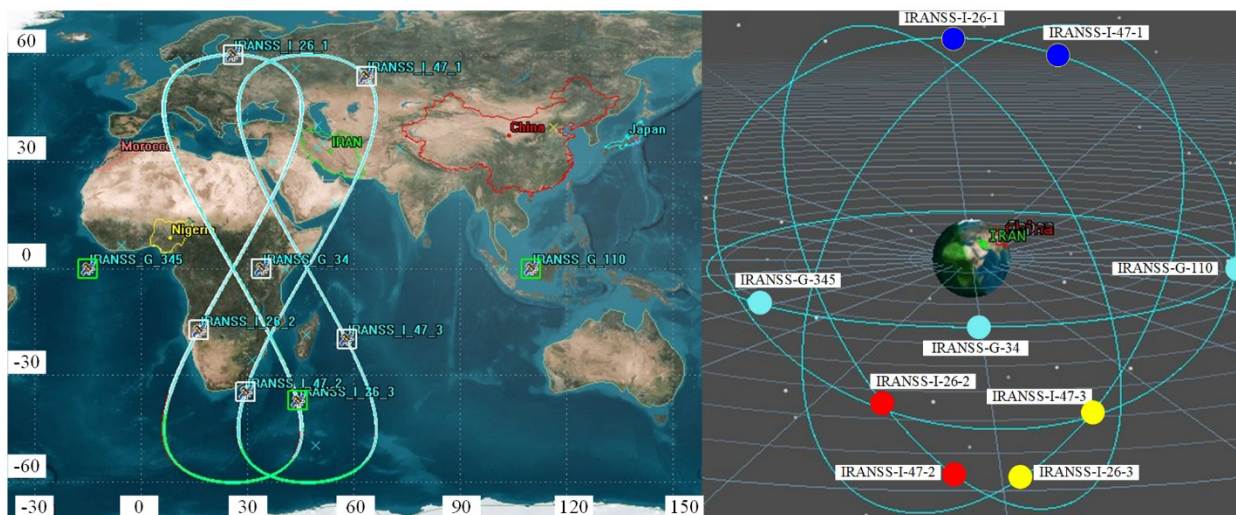
شکل ۳. توزیع ایستگاه‌های IRANSS در ایران

بنابراین، مدارها و موقعیت ماهواره‌ای به گونه‌ای طراحی شده‌اند که کل منطقه از پیش تعریف شده با دقت ناوبری قابل قبول به ماهواره‌ها دسترسی داشته باشد.

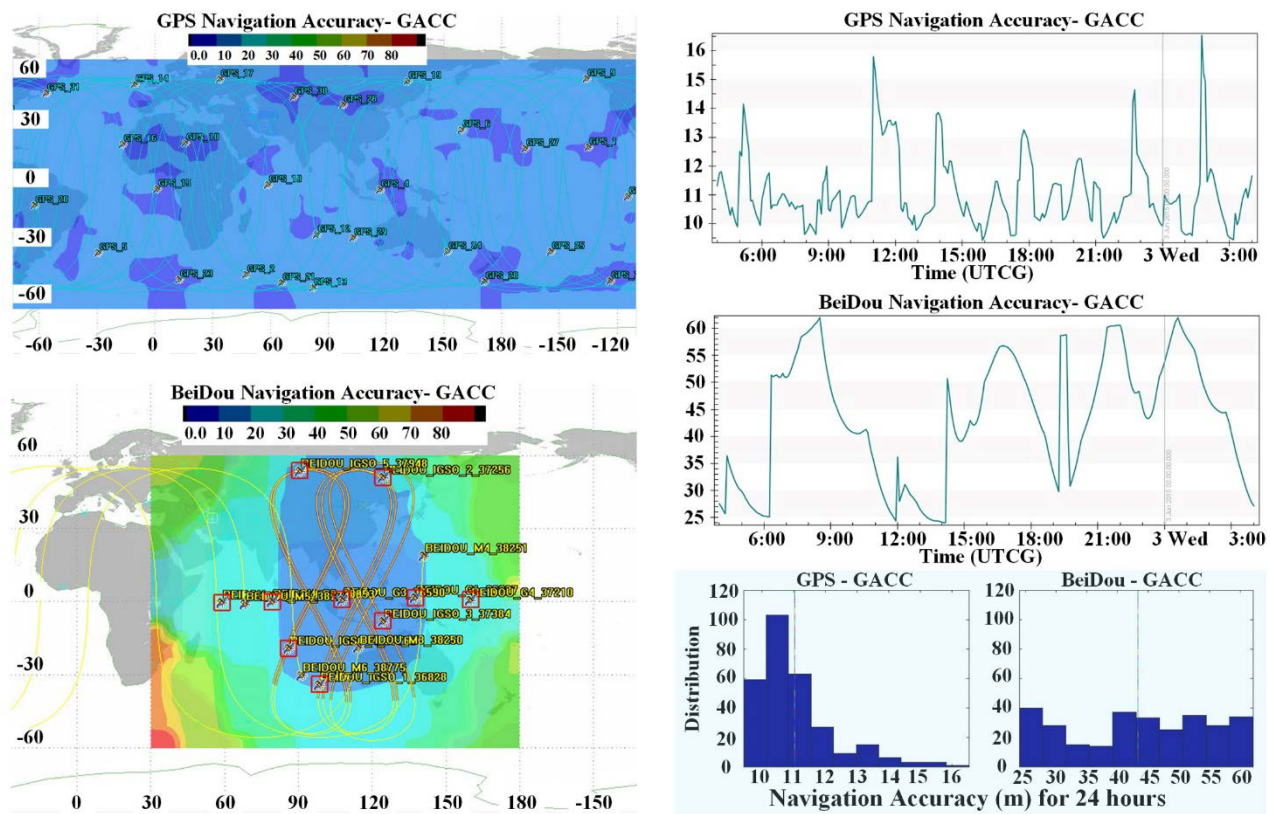
۴- خروجی شبیه‌سازی

در این پژوهش، دقت ناوبری IRANSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در حقیقت، طراحی مدار IRANSS با رویکرد دقت ناوبری انجام می‌شود.

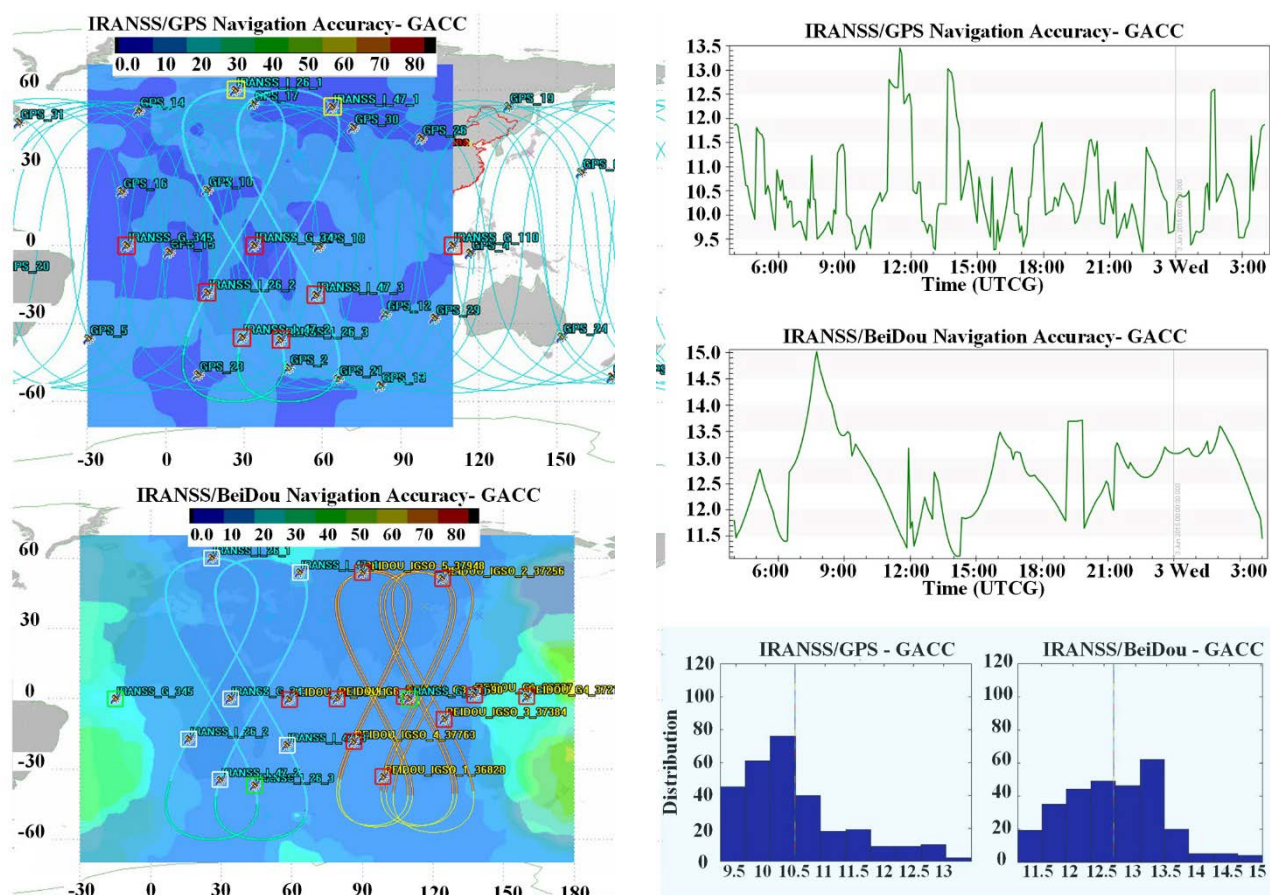
دقت هندسی ناوبری (GACC) شبکه‌های GPS و BeiDou برای نقطه‌ای با عرض جغرافیایی ۳۲.۰۸ و طول جغرافیایی ۵۳.۳۳ درجه در ایران محاسبه و در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین در بخش دیگر مقایسه‌ای بین سیستم IRANSS و BeiDou و GPS انجام شده است، شکل (۵). ترکیب IRANSS با BeiDou به عنوان یک شبکه منطقه‌ای و GPS به عنوان یک سیستم جهانی در شکل (۶) نشان داده شده است. دقت ناوبری برای نقطه‌ای با عرض جغرافیایی ۳۲.۰۸ و طول جغرافیایی ۵۳.۳۳ درجه، واقع در محدوده ایران (تقریباً تمام نقاط ایران)، در تمامی روش‌های موقعیت‌یابی در جدول (۲) ارائه شده است. محاسبات بر اساس بهترین نتایج در GACC (دقت هندسی)، PACC (دقت موقعیت)، HACC (دقت افقی)، VACC (دقت عمودی)، EACC (دقت شرقی) و NACC (دقت شمالی) در بهترین GDOP برای چهار ماهواره در یک دوره یک روزه است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. دقت بر حسب متر بیان می‌شود و فرض بر این است که عدم قطعیت برد



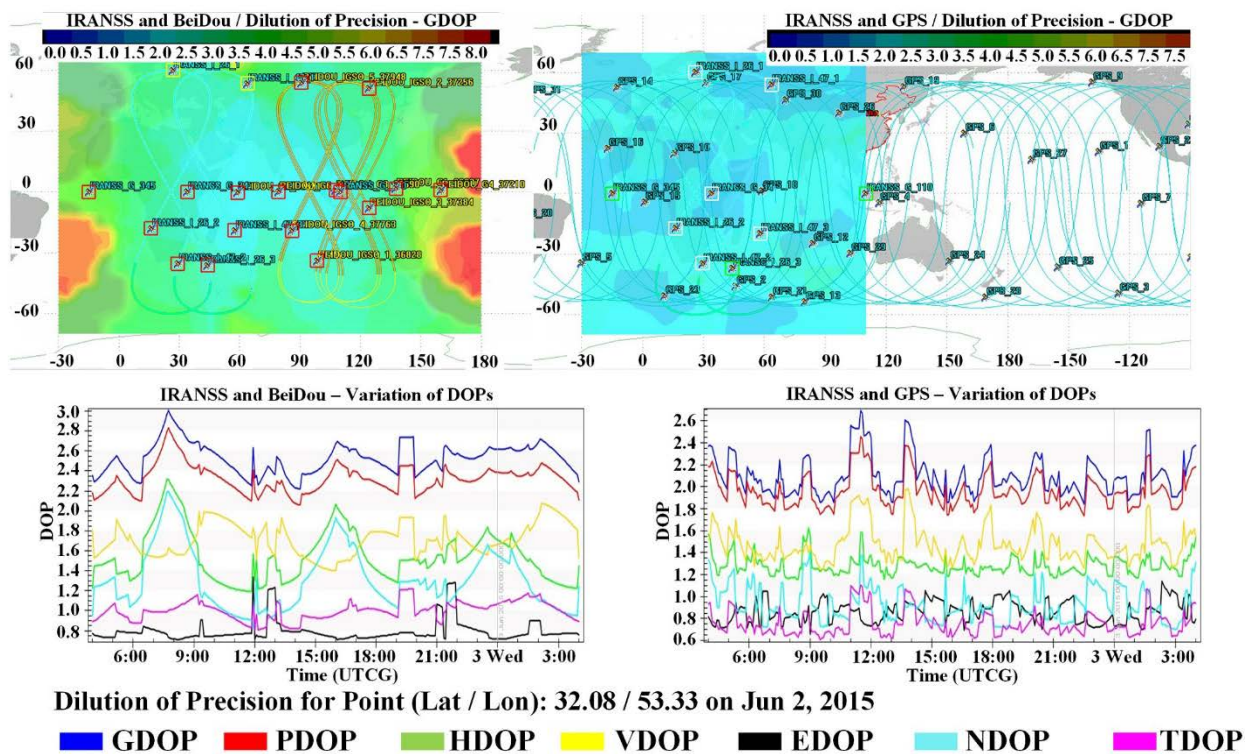
شکل ۴. سیستم ماهواره‌ای ناوبری منطقه‌ای و تقویتی ایران (IRANSS)، بخش فضایی شامل ۹ ماهواره است



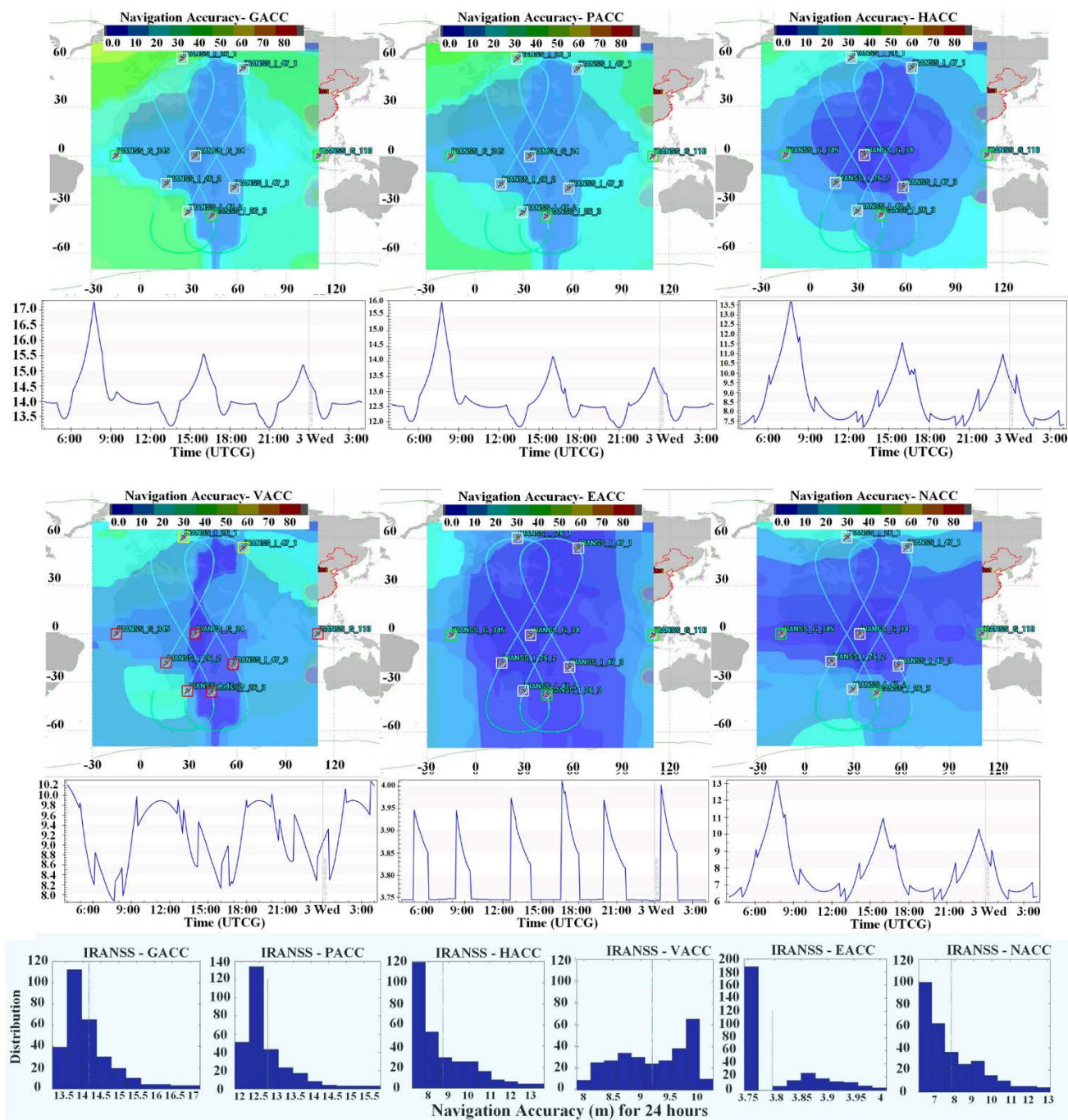
شکل ۵. کانتور پوشش دقت هندسی ناوبری GPS و BeiDou



شکل ۶. کانتور پوشش دقت هندسی ناوبری IRANSS / GPS و IRANSS / BeiDou



شکل ۷. ترکیب IRANSS با BeiDou و IRANSS با GPS. کانتور تغییرات GDOP و نمودار تغییرات DOPها (تمام روش‌های موقعیت یابی)



FOM Value (m) – Navigation Accuracy for Point (Lat / Lon): 32.08 / 53.33 on Jun 2, 2015 (almost same with all points in Iran)

شکل ۸. کانتور پوشش دقت ناوبری IRANSS (تمام روش‌های موقعیت‌یابی)

جدول ۲. توزیع دقت ناوبری برای یک نقطه در ایران

دقت موقعیت یابی			روش موقعیت یابی
95 %	85%	65%	
16.00 m	15.00 m	14.00 m	IRANSS- GACC
14.50 m	13.50 m	12.75 m	IRANSS- PACC
11.50 m	10.50 m	9.00 m	IRANSS- HACC
10.00 m	9.85 m	9.75 m	IRANSS- VACC
3.95 m	3.90 m	3.80 m	IRANSS- EACC
11.00 m	9.50 m	8.00 m	IRANSS- NACC
6.50 m	6.40 m	6.20 m	IRANSS- TACC

جدول ۳. مقایسه دقت هندسی ناوبری برای یک نقطه در ایران

دقت موقعیت یابی (GACC)			منظومه
95%	85%	65%	
16.0 m	15.0 m	14.0 m	IRANSS
60.5 m	57.0 m	50.0 m	BeiDou
14.0 m	12.0 m	11.0 m	GPS
14.0 m	13.5 m	13.0 m	IRANSS/BeiDou
12.5 m	11.5 m	10.5 m	IRANSS/GPS

تعدیل دقت آنها اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که IRANSS با GPS و BeiDou ترکیب می‌شود، DOP ها بهبود می‌یابند. صحت ناوبری IRANSS نیز با ترکیب GPS و BeiDou مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تقریباً برای همه نقاط واقع در ایران به میزان ۹۵٪ در روز، دقت هندسی، موقعیت افقی، عمودی، شرقی، شمالی و زمان دقیق؛ به ترتیب دارای مقادیر ۱۶ متر، ۱۴.۵ متر، ۱۱.۵ متر، ۱۰ متر، ۳.۹۵ متر، ۱۱ متر و ۶.۵ متر هستند. بنابراین، به عنوان یک شاخص، دقت هندسی ناوبری IRANSS در هر نقطه از ایران با حجم خدمات در طی هر بازه ۲۴ ساعته، کمتر از ۱۶ متر (احتمال ۹۵٪) است و وقتی IRANSS با BeiDou به عنوان یک شبکه منطقه‌ای و GPS به عنوان یک سیستم جهانی ترکیب شود، دقت هندسی ناوبری به ترتیب به ۱۴ و ۱۲.۵ متر افزایش می‌یابد. بدیهی است که با ترکیب با سایر سیستم‌های GNSS، منطقه پوشش دقیق افزایش می‌یابد.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [1] European Global Navigation Satellite Systems Agency, "GSA GNSS Market Report", vol. 1, Issue 6, 2019.
- [2] European Global Navigation Satellite Systems Agency, "GSA GNSS Market Report", vol. 1, Issue 2, 2018.
- [3] A. Delépaut, P. Giordano, J. Ventura-Traveset, D. Blonski, M. Schönfeldt, P. Schoonejans, S. Aziz, R. Walker, "Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development", *Advances in Space Research*, Vol.66, Issue 12, 2020.
- [4] J. Bu, X. Zuo, X. Li, J. Chang, Xionghao Zhang, "Evaluation and analysis on positioning performance of BDS/QZSS satellite navigation systems in Asian-Pacific region", *Advances in Space Research*, Vol.63, Issue 7, 2019.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سامانه بومی ناوبری ماهواره‌ای برای پوشش کشورهای خاورمیانه موسوم به IRANSS طراحی شده است. سامانه مذکور شامل بخش فضایی (یک منظومه با نه ماهواره) و بخش زمینی شامل ایستگاه‌های کنترل و مرجع است. این طرح می‌تواند یک سامانه ماهواره‌ای چند منظوره باشد که قادر به ارائه خدمات ارتباطی، پخش و موقعیت‌یابی گیرنده‌های پویا در منطقه باشد. منطقه‌ای بودن سامانه و تقویت سیگنال‌های GNSS، از ویژگی‌های حائز اهمیت آن محسوب می‌شود. منظومه ماهواره‌ای از چهار مدار تشکیل شده است. سه ماهواره در مدار GEO (گره‌های صعودی ۳۴، ۳۴ و ۱۱۰ درجه) و دو ماهواره در هر سه مدار IGSO (گره‌های صعودی ۲۶ و ۴۷ درجه) با زاویه میل ۶۰ درجه، قرار دارند. ماهواره‌ها توسط ایستگاه‌های مانیتور زمینی، ایستگاه‌های کنترل اصلی و ردیابی (بارگیری)، ایستگاه بالارو^۱ و ایستگاه‌های گسترده مرجع و اصلی^۲، که بیش‌ترین زمان دسترسی به ماهواره‌ها را دارند، کنترل می‌شوند. سامانه IRANSS با BeiDou و GPS مقایسه شده و مقادیر

Iranian Regional Navigation Satellite System”, Journal of Aerospace Technology and Management. 13. 10.1590/jatm.v13.1215, 2021.

[۱۶] م. نوایی، ر. الهی‌نیا، س. ی. کریمی مسلم، شبیه‌سازی دینامیکی منظومه ماهواره‌ای ارتفاع پایین به منظور پوشش‌دهی منطقه‌ای، اولین کنفرانس تخصصی شبیه‌سازی پرواز، تهران، <https://civilica.com/doc/78910>. ۱۳۸۸.



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

- [5] G. Giorgi, T.D. Schmidt, C. Trainotti, R. Mata-Calvo, C. Fuchs, M.M. Hoque, J. Berdermann, J. Furthner, C. Günther, T. Schuldt, J. Sanjuan, M. Gohlke, M. Oswald, C. Braxmaier, K. Balidakis, G. Dick, F. Flechtner, M. Ge, S. Glaser, R. König, G. Michalak, M. Murböck, M. Semmling, and H. Schuh, “Advanced technologies for satellite navigation and geodesy,” *Advances in Space Research*, vol.64, Issue 6, 2019.
- [6] Novatel, What are Global Navigation Satellite Systems?, HEXAGON, <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss>, 2019.
- [7] A. Delépaut, P. Giordano, J. Ventura-Traveset, D. Blonski, M. Schönfeldt, P. Schoonejans, S. Aziz, R. Walker, “Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development”, *Advances in Space Research*, vol.66, Issue 12, 2020.
- [8] S. Choy, J. Kuckartz, A.G. Dempster, et al., “GNSS satellite-based augmentation systems for Australia” *GPS Solutions* 21, pp.:835–848, 2017.
- [9] GPS.gov, Augmentation Systems GPS.gov, <https://www.gps.gov/systems/augmentations/>, 2021
- [10] Camacho, Sergio. “Current and Future GNSS and Their Augmentation Systems”, 1-39. 10.1007/978-1-4614-6423-5_25-3, 2016.
- [11] L. Lawal, & C. Chatwin, “A Review of GNSS and Augmentation Systems”. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 5. pp.:1-21, 2019..
- [12] J. Chen, Y. Zhang, J. Wang, , S. Yang, D. Dong, Ji. Wang, W. Qu, & B. Wu. “A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning”, *Advances in Space Research*, vol.55, pp.:125-134, 2015.
- [13] P. Zhang, & R. Tu, & R. Zhang, & Y. Gao, & H. Cai. “Combining GPS, BeiDou, and Galileo Satellite Systems for Time and Frequency Transfer Based on Carrier Phase Observations”. *Remote Sensing*, Vol.10, 324. 10.3390/rs10020324, 2018.
- [14] M. S. El-Saghir, , “Mathematical modelling and design of optimal satellite constellations with multi-fold continuous coverage for position location and navigation”, <http://hdl.handle.net/11375/7619>
- [15] R. Zardashti, & Sh. Emami. “Spatial Geometry Design of a Low Earth Orbit Constellation for