ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

رهیافتی نو در طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای جهت پوشش منطقه‌ای با استفاده از پارامتر تعدیل دقت هندسی

مهدی فکور[1*]، محدثه قربانی[2]، مجید بختیاری[3]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران

3- کارشناس‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1561-14395، mfakoor@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 دی 1395
پذیرش: 20 فروردین 1396
ارائه در سایت: 13 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
پوشش‌دهی منطقه‌ای
منظومه ماهواره‌ای
مدار ارتفاع پایین
چیدمان
پارامتر تعدیل دقت

چکیده

امروزه میزان پوشش‌دهی منطقه‌ای توسط ماهواره‌ها یکی از عوامل مهم در دسترسی به اطلاعات جغرافیایی، ژئوتکنیکی و استراتژیکی محسوب می‌شود. این مهم عموماً توسط یک یا چند ماهواره با موقعیت و ناوبری مشخص محقق می‌شود. در این پژوهش با استفاده از پارامتر تعدیل دقت هندسی[1] تعداد مشخصی ماهواره در منظومه‌ای با الگوی متقارن جهت پوشش منطقه‌ای حداکثر مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر تعدیل دقت هندسی برای یافتن موقعیت کاربر زمینی با استفاده از تعداد مشخصی ماهواره با موقعیت معلوم در منظومه تعریف می‌شود. در این مقاله با فرض دانستن موقعیت ایستگاه‌های زمینی، از معکوس تعریف پارامتر تعدیل دقت هندسی برای یافتن موقعیت مناسب ماهواره‌ها در منظومه جهت رسیدن به پوشش حداکثر استفاده می‌شود. پارامتر تعدیل دقت یک معیار هندسی است که هرچه کمتر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر در تعیین میزان پوشش‌دهی است. در مدل ارائه شده اثر پخی و فشردگی زمین در نظر گرفته شده است. این محاسبات برای نقاط جغرافیایی مشخص و برای مدت یک شبانه روز انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که با بهره‌گیری از مدل جدید در زمانی که پارامتر تعدیل دقت هندسی برای یک ایستگاه زمینی مقدار مناسبی باشد، مناطق اطراف آن نقطه (ایستگاه) با توجه به زاویه دید[2] ماهواره‌ها (حداقل چهارتا) تحت پوشش مناسبی خواهد بود، همچنین نشان داده شده است که با بهره‌گیری سازمان‌یافته از تمام ماهواره‌های حاضر در منظومه ماهواره‌ای می‌توان با اطلاعات دریافتی به بهترین پوشش با کمترین تعداد ماهواره دست یافت.

New Approaches to Cover Regional Satellite System Design Using GDOP

Mahdi Fakoor[1*], Mohadese Ghorbani[1], Majid Bakhtiari[2]

1- Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14395-1561 Tehran, Iran, mfakoor@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 January 2017
Accepted 09 April 2017
Available Online 03 May 2017

Keywords:
Earth coverage
Constellation
LEO orbit
Configuration
GDOP

ABSTRACT

Coverage of ground stations by satellites is a very important factor to access geographic, geotechnical and strategic information. This is generally achieved by one or more satellites with specified position and navigation. In this regard, in the area of low altitude orbits regional or global coverage of the Earth's surface is achieved utilizing various mathematical methods to change the position and arrangement of satellites. In this study, the arrangement of certain number of satellites is performed to reach maximum coverage. It is assumed that the satellite constellation is in the symmetrical Walker pattern. In this regard, taking into account the situation of user and determining the initial position of satellite in system, Geometric Dilution of Precision (GDOP), parameters are calculated utilizing a new model. The innovation in this new presented model is employing GDOP in an inverse manner. GDOP is a geometric standard in which the less related values for it represent more accuracy in determining the amount of coverage. In this study the effects of compression of the earth as well as chamfer are considered. The calculations are presented for specific geographic areas and only for one day. The results show that by taking advantage of the new computing model, the coverage area will dramatically increase. By organized employing of all the satellites in the constellation, with the best received information from satellites, better coverage can be achieved.

[1] GDOP (Geometric Dilution Of Precision)
[2] FOV (Field Of View)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Fakoor, M. Ghorbani, M. Bakhtiari, New Approaches to Cover Regional Satellite System Design Using GDOP, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 193-200, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

امروزه با توجه به کاربرد گسترده ماهواره‌ها در تبادل اطلاعات، لزوم به‌کارگیری انواع ماهواره به ویژه ماهواره‌های مخابراتی احساس می‌شود. از این‌رو در سال‌های اخیر کشورهای متعددی اقدام به طراحی و ساخت انواع ماهواره بر مبنای نیازهای خود کرده‌اند. تا دهه گذشته در مأموریت‌های فضایی از تک ماهواره استفاده می‌شد که محققان درگیر مشکلات آن بودند. سرانجام محققان دریافتند که تک ماهواره‌ها نمی‌توانند اهداف برخی مأموریت‌های فضایی را برآورده کنند. برای حل این مسئله استفاده از چند ماهواره در مدارهای متفاوت برای رسیدن به هدف مأموریت پیشنهاد شد که منظومه ماهواره‌ای نام گرفت. از دهه گذشته مفهوم منظومه ماهواره‌ای به رویکردی نوین برای دست‌یابی به کاربردهای فضایی تبدیل شد. این مفهوم ابتدا برای موقعیت‌یابی[1] و پوشش زمین[2] تعریف شد، ولی به تدریج به ارتباطات در سیستم‌های تلفن و موبایل نیز تبدیل شد[3]. در سال‌های اخیر تحقیقات و مطالعات بسیاری بر مسایل مربوط به منظومه‌های ماهواره‌ای انجام شده است [1]، همچنین طراحی، ساخت و راه‌اندازی ماهواره‌های بزرگ با قابلیت‌های بالا بسیار گران است. در نتیجه تحقیقات به سمت طراحی ماهواره‌های کوچک، ارزان و منظومه‌هایی با کارایی مشابه به‌جای ماهواره‌های بزرگ و گران پیش‌رفت. این منظومه‌ها به دلیل داشتن قابلیت‌هایی مانند انجام مأموریت‌های سنجش از دور و انعطاف‌پذیری در مأموریت‌های طولانی توجه زیادی را به خود جلب کردند. در سال‌های اخیر بیشترین ارتباطات سنجش از دور شامل منظومه‌های ماهواره‌ای، مدارهای کم ارتفاع[4] و ارتفاع متوسط[5] است [2].

در این مقاله سعی بر آن است که با استفاده از منظومه ماهواره‌ای با الگوی متقارن، مقدار پارامتر تعدیل دقت هندسی مناسب برای ایستگاه زمینی مورد نظر به‌دست آید. وقتی چینش ماهواره به صورتی باشد که پارامتر تعدیل دقت هندسی یک نقطه (ایستگاه) مناسب باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مناطق اطراف آن نقطه (ایستگاه) با توجه به FOV[6] ماهواره‌ها (دست‌کم چهارتا) تحت پوشش مناسبی خواهد بود. زاویه دید ماهواره و رد زمینی آن روی سطح زمین در شکل 1 نشان داده شده‌اند. هرچه پارامتر تعدیل دقت هندسی مقدار کمتری داشته باشد، رد زمینی زاویه دید سنسور روی سطح زمین پوشش پیوسته‌تری روی زمین دارد و حتی در برخی مناطق ممکن است رد زمینی ماهواره‌ها رو سطح زمین باهم تداخل کنند که دقت پوشش را بالا می‌برد. هر ماهواره سطحی از روی زمین که در زاویه دید آن قرار دارد را پوشش می‌دهد. با انتخاب ایستگاه‌های زمینی در محدوده این منطقه می‌توان اطلاعات را از ماهواره مورد نظر دریافت کرد؛ بنابراین با انتخاب تعداد ماهواره‌های مناسب می‌توان پوشش یکپارچه از منطقه مورد نظر یا کل زمین داشت.

1-1- مرور مراجع

در بسیاری از تحقیقات در زمینه برنامه‌ریزی و دریافت اطلاعات ماهواره‌ای مسئله تک‌مدار برای یک ماهوار در نظر گرفته شده است. فرانک و همکارانش یک مدل مداری برای مشاهده زمین با لحاظ محدودیت‌ها به طور هم‌زمان ارائه دادند. طرح آن‌ها در حد پیشنهاد باقی ماند و به نتایج عملی نرسید [3].

[1] (NAVSTAR/GPS, Glonass, GNSS)
[2] (DMSP 5D-2, GOES, TIROS-N,FUEGO)
[3] (Iridium, Global star, Teledesic, ICCO/Inmarsat-p, Ellipse, ECO)
[4] LEO
[5] MEO
[6] Field Of View

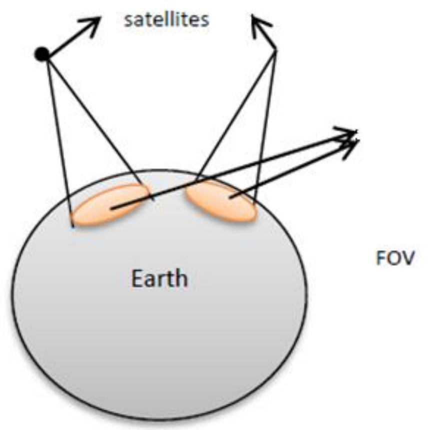

Fig. 1 Ground Track of FOV

شکل 1 رد زمینی زاویه دید

مارکجی ماتوسیان در مطالعات خود به دو جنبه مهم طراحی مدار منظومه و تولید و گسترش منظومه با تجزیه و تحلیل میزان پوشش‌ها پرداخت که سبب صرفه‌جویی در هزینه‌ها برای رسیدن به پوشش‌دهی مناسب شد. الزامات پوشش‌دهی برای منظومه براساس هدف پروژه تعیین می‌شود. منظومه‌های ماهواره‌ای در خارج از فضای کاری نظامی کاربرد بیشتری دارند تا جایی که امروزه بیشترین سهم را در فضا به خود اختصاص داده‌اند [2]. داگلاس پغر و جیسون پاریش در مطالعات خود به طراحی منظومه ماهواره‌ای نظامی با دو رویکرد سنتی و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پرداختند [4]. محققان زیادی در مورد جزئیات طراحی منظومه‌ها جهت بهبود پوشش‌دهی جهانی زمین با یک یا چند ماهواره تلاش کردند [5-9]. نتایج برخی از این تحقیقات برای طراحان مفیدتر از طراحی ارتباطاتی مدرن و سیستم‌های ناوبری است. به ویژه هنگامی که یک مدل خاص را نمی‌توان به دلیل پوشش نامناسب عرض‌های جغرافیایی بالا با محدودیت‌های بودجه ارتباطی برای پایانه‌های کوچک به‌کار برد. تمام مدارهای در نظر گرفته شده یکی از مدارهای ژئو[7]، هئو[8]، مئو یا لئو در مدار دایروی و یا بیضی شکل هستند [11,10]. با توجه به به این واقعیت بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی پوشش‌دهی جهان با درنظر گرفتن عرض جغرافیایی مشخص انجام می‌شود. برخی محققان تحقیقات خود را براساس توسعه پوشش‌دهی پیوسته تنها با یک باند خاص از عرض جغرافیایی انجام می‌دهند [12]. در واقعیت تمام این تحقیقات به پوشش‌دهی هندسی بستگی دارد. هر اتفاق مهمی می‌تواند منظومه ماهواره‌ای را تحت تأثیر قرار دهد. برای نمونه ثبات عملکردی منظومه ماهواره‌ای زمانی که شکست در مأموریت یک ماهواره رخ می‌دهد، یا سرویس‌دهی یک ماهواره با محدودیت‌هایی روبه‌رو می‌شود و یا درنظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی همگی از عوامل تأثیرگذار در عملکرد منظومه ماهواره‌ای است، همچنین باید به این نکته اشاره کرد زمانی که هزینه پرتاب ماهواره‌ها مهم باشد، کم کردن تعداد ماهواره‌ها ضروری است [13]. اکنون منظومه ماهواره‌ای برای پوشش‌دهی سطح زمین با بهینه‌سازی بخش‌های مستقل سیستم یا با آغاز از یک ساختار اولیه و ایجاد تغییرات کوچک بهینه می‌شوند. این کار با استفاده از یک کارپایه انجام شده است که اجزا نسبت به آن تغییر کردند. بالارد، دریم، لنگ، واکر و ورتز از جمله افرادی بودند که با تغییرات کوچک در منظومه‌های ماهواره‌ای برای پوشش مورد نظر در ارتفاعات پایین بهینه‌سازی

[7] GEO
[8] HEO

کردند [16-14]. بیچ و همکارانش سه الگوریتم ماهواره‌ای را طراحی و تست کرده‌اند. 1- واکر: یک منظومه متقارن است که زاویه میل تمام ماهواره‌های آن یکسان است. 2- منظومه قطبی: یک الگوریتم این منظومه نامتقارن است. 3- الگوریتم جستجوی تصادفی تطبیقی. آن‌ها این سه الگوریتم را آزمایش و با یکدیگر مقایسه کردند [17]. باید در نظر داشت هنگامی که مأموریت یک ماهواره از منظومه با شکست مواجه شود در کاربری منظومه اختلال ایجاد می‌شود. کلی و همکارش تلاش کردند تا این خلأ را با استفاده از دیگر ماهواره‌ها متعادل سازند که یک مدل برای چرخه عمر ماهواره در منظومه و مفهوم جایگزینی ماهواره‌ها در این شرایط ارائه دادند. البته بهینه‌سازی و صرفه اقتصادی را نیز در کار خود مورد نظر قرار دادند [18].

طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای برای پوشش منطقه‌ای یا جهانی اهمیت یافت. مطالعات بسیاری برای طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای انجام شده است [20,19,16]. مقالات بسیاری برای پوشش غیرپیوسته برای یک منطقه خاص چاپ شده است [24-21]. هانسون و همکارانش منظومه ماهواره‌ای با مدارهای دایره‌ای با رد زمینی تکرار شونده را برای بهبود پوشش منطقه‌ای ارائه دادند. آن‌ها نقطه گره و آنومالی متوسط هر ماهواره را تعیین و بهترین منظومه ماهواره‌ای را برای پوشش نقطه مورد نظر روی زمین به‌دست آوردند. در ادامه مینگ ما و همکارش بهترین منظومه ماهواره‌ای را با کمترین زاویه میل به دست آوردند [25]. انگیزه به حداقل رساندن هزینه در این روش سبب شد تا عبدالخلیک و همکارش مطالعاتی برای یافتن راه حلی برای آن انجام دهند. آن‌ها در راه حل پیشنهادی خود پوشش‌دهی مناطق مورد نظر بدون مانور ماهواره‌ای را درنظر گرفتند. مزیت این روش زمان کوتاه برای دید از تمام مناطق است، زیرا مانور مداری ماهواره‌ها برای رسیدن به یک موقعیت جهت پوشش نقطه مورد نظر زمان‌بر است. از معایب این طرح می‌توان به این نکته اشاره کرد که برخی مناطق ممکن است پوشش دقیقی داده نشوند؛ بنابراین برای هر مأموریت باید یک تعادل بین دقت پوشش‌دهی مناطق و زمان بازدید درنظر گرفت [26]. کاپلن و همکارانش برای پوشش‌دهی هر نقطه از زمین از یک پارامتر هندسی با حداقل چهار ماهواره استفاده کردند. برای این کار از یک ایستگاه زمینی به عنوان پایگاه اصلی استفاده کردند. برای دقت اندازه‌گیری در موقعیت‌یابی از معیاری به نام پارامتر تعدیل دقت هندسی[1] استفاده کردند. در سال‌های اخیر موضوع ارتباط مخابرات بین ماهواره‌ها نیز مورد نظر قرار گرفته است [27].

2- مسأله و روابط آن

2-1- بیان مسئله

طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای بهینه کلید حل مشکل در انواع کاربردها مانند ناوبری، پوشش منطقه‌ای- جهانی، سنجش از راه دور، مشاهده زمین و... است. تعداد کل ماهواره‌های منظومه به نوع مأموریت، فاکتورهای اقتصادی، پارامترهای طراحی، تعداد ماهواره‌های هر مدار، صفحه مداری و... بستگی دارد. پارامترهای مداری 6 پارامتر اصلی هستند که برای تعریف هر مدار و موقعیت ماهواره در مدار از آن‌ها استفاده می‌شود. این پارامترها عبارت از نیم‌قطر اصلی (a)[2]: این محور برای تعیین اندازه مدار استفاده می‌شود. نیم‌قطر اصلی فاصله بین محور طولی مدار بیضوی‌ای است که ماهواره می‌پیماید. خروج از مرکزیت (e)[3]: خروج از مرکز نسبت فاصله بین دوکانون است. زاویه میل (i): شیب زاویه‌ای است که برای تعیین شیب مدار استفاده می‌شود. نقاط گره[4]: برای تعیین جهت‌گیری زاویه‌ای مدار نسبت به برخی از جهات اصلی استفاده می‌شود. آرگومان حضیض[5] (ω): آرگومان حضیض برای تعیین جهت‌گیری بیضی در صفحه مداری استفاده می‌شود. آنومالی واقعی[6] (TA): آنومالی واقعی برای تعیین محل ماهواره در مدار استفاده می‌شود.

در این پژوهش مقدار پارامتر تعدیل دقت برای حالات مختلفی که ماهواره‌ها در مدار قرار می‌گیرند، محاسبه شده است. با استفاده از تعدادی از ماهواره‌های منظومه که در لحظه نسبت به ایستگاه زمینی در موقعیت مناسبی قرار دارند، بهترین میزان پارامتر تعدیل دقت هندسی به‌دست‌آمده است. در این زمان با توجه به FOV ماهواره‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مناطقی که در شعاع رد زمینی ماهواره‌ها قرار دارند تحت پوشش‌دهی مناسبی قرار گرفته‌اند. برای پیاده‌سازی این مدل جدید از معکوس پارامتر تعدیل هندسی در به‌دست‌آوردن بهترین موقعیت ماهواره‌ها در منظومه برای رسیدن به پوشش حداکثری از سطح زمین استفاده شده است. ابتدا یک منظومه ماهواره‌ای اولیه لئو با 72 ماهواره در ارتفاع 800 کیلومتر از سطح زمین فرض می‌شود، سپس تعداد ماهواره‌ها کم شد تا جایی که بتوان با کمترین تعداد ماهواره به پوشش حداکثری پیوسته از سطح منطقه مورد نظر دست یافت. این پوشش با استفاده از معیار پارامتر تعدیل دقت هندسی برای 5 ایستگاه زمینی شامل شهرهای تهران، تبریز، مشهد، چابهار و ماهشهر تعیین و بررسی می‌شود.

2-2- فرمول‌بندی مسئله

ضریب پارامتر تعدیل دقت هندسی، در ناوبری، تعیین موقعیت و مشخص کردن نرخ خطا در سه بعد[7] و تعدیل دقت زمانی به کار می‌رود. زمان یک فاکتور مهم برای دقت بالای موقعیت است. برای محاسبه این چهار بعد (X,Y و Z و زمان) حداقل چهار ماهواره نیاز است. موقعیت گیرنده از موقعیت ماهواره محاسبه می‌شود و نرخ فاصله و موقعیت گیرنده تخمین زده می‌شود. هندسه خوب نشان‌دهنده پارامتر تعدیل دقت پایین است. مقدار پارامتر تعدیل دقت هندسی یک عدد حقیقی بین صفر تا بی‌نهایت می‌تواند تغییر کند. صفر یعنی این‌که ماهواره‌ها توزیع (پراکندگی) ایده‌آلی برای محاسبه موقعیت کاربر دارند، ولی در واقعیت رسیدن به مقادیر کمتر از یک امکان‌پذیر نیست. اعداد بزرگ‌تر از شش نشان‌دهنده عملکرد ضعیف این مجموعه است.

برای توضیح هندسی این معیار یک هرم مربعی شکل که با اتصال خطوط بین چهار ماهواره و قرار گرفتن گیرنده در نوک هرم در نظر گرفته می‌شود. حجم شکل که با بردارهای یکه از گیرنده به ماهواره تشکیل می‌شود با عکس مقدار پارامتر تعدیل دقت پایین متناسب است. حجم بیشتر هرم نشان‌دهنده پارامتر تعدیل دقت پایین کمتر و برعکس حجم کمتر هرم مقدار بیشتری از این پارامتر را نشان می‌دهد. ضریب بهتری از این پارامتر با استفاده از تعداد ماهواره‌های بیشتر برای تخمین موقعیت به‌دست می‌آید [28].

در این تحقیق با استفاده از پارامتر تعدیل دقت هندسی که یک معیار خطا در سیستم‌های مکان‌یابی مانند GPS است، برای طراحی منظومه ماهواره‌ای و استفاده از این منظومه در کاربردهای مختلف از جمله پوشش سطح زمین استفاده شده است. در این پژوهش از این معیار به صورت معکوس استفاده شده است. یعنی موقعیت ایستگاه زمینی روی سطح زمین ثابت در نظر گرفته شده و براساس آن موقعیت ماهواره‌ها طوری تعیین شده

[1] GDOP
[2] Semi major axes
[3] Eccentricity
[4] Right accension of accending node
[5] Argument of Perigee
[6] True Anomaly
[7] PDOP

که این پارامتر به کمترین مقدار ممکن برسد. در این زمان علاوه‌بر این‌که ایستگاه زمینی در دید ماهواره‌ها قرار دارد، ماهواره‌ها بهترین چینش را نسبت به آن ایستگاه زمینی دارند. در این زمان می‌توان با استفاده از زاویه دید سنسور ماهواره و رد زمینی آن روی سطح زمین بهترین پوشش را از سطح منطقه مورد نظر به مرکز ایستگاه زمینی و شعاع مشخص دست یافت. با داشتن موقعیت اولیه ماهواره‌ها و ایستگاه زمینی اقدام به محاسبه این ضریب برای بازه زمانی مورد نظر می‌شود.

با به‌دست آوردن معیار پارامتر تعدیل دقت هندسی برای ایستگاه‌های مختلف با منظومه ماهواره‌ای مورد نظر می‌توان به این مهم دست یافت که در هر زمان از شبانه روز از کدام یک از ایستگاه‌های زمینی می‌توان پوشش بهتری را از منظومه ماهواره‌ای دریافت کرد. شکل 3 سیستم مختصات اینرسی زمین مرکز را نشان می‌دهد. در t=0 محور x از تقاطع استوا و نصف‌النهار گرینویچ عبور می‌کند. محور z به صورت عمود و محور y از قانون دست راست به‌دست می‌آید. در این شکل موقعیت ایستگاه زمینی و ماهواره شماره 1 نشان داده شده است. فاصله میان ایستگاه و ماهواره نیز با R_1 نشان داده شده است.

برای به‌دست آوردن موقعیت کاربر زمینی (ایستگاه زمینی) نیاز به ضریب فشردگی زمین است که برای محاسبه آن از معادلات (2,1) استفاده می‌شود.

$$G_1 = \frac{1}{\sqrt{1-(2f-f^2)\sin\phi}} + h \qquad (1)$$

$$G_2 = \frac{(1-f)^2}{\sqrt{1-(2f-f^2)\sin\phi}} + h \qquad (2)$$

که در آن f یک ضریب ثابت و ϕ عرض جغرافیایی ایستگاه زمینی مورد محاسبه و h ارتفاع از سطح زمین است. چون ایستگاه‌ها روی سطح زمین قرار

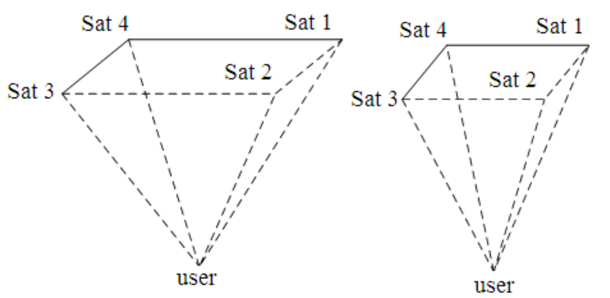

Fig. 2 GDOP with 4 satellites constellation and an user on the earth
شکل 2 تعیین GDOP با چیدمان 4 ماهواره و یک کاربر روی سطح زمین

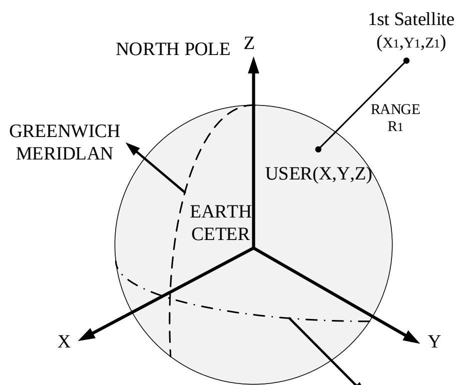

Fig. 3 The relationship between the user and satellites
شکل 3 ارتباط بین ایستگاه زمینی (کاربر) و ماهواره در دستگاه زمین مرکز

دارند؛ بنابراین h=0 است. با استفاده از این ضرایب می‌توان فاصله ایستگاه زمینی تا مرکز زمین را با در نظر گرفتن اثر فشردگی زمین از رابطه (3) محاسبه کرد.

$$R_{\text{user}} = \begin{pmatrix} -G_1\cos\phi\cos\lambda \\ -G_1\cos\phi\sin\lambda \\ -G_1\sin\phi \end{pmatrix} \qquad (3)$$

در آن λ بیانگر طول جغرافیایی ایستگاه زمینی مورد نظر است. برای محاسبه فاصله مرکز زمین تا هر یک از ماهواره‌ها می‌توان از رابطه (4) استفاده کرد.

$$R_s = \left(\frac{h^2}{mu}\right)\left(\frac{1}{1+e*\cos(TA)}\right)(\cos(TA)+\sin(TA)) \qquad (4)$$

در آن h ممنتم زاویه‌ای مدار mu پارامتر گرانش، e خروج از مرکزیت مدار و TA آنومالی حقیقی است. R_1 فاصله بین ایستگاه زمینی و ماهواره که می‌توان آن را از تفریق برداری فاصله‌های ایستگاه و ماهواره از مرکز زمین از رابطه (5) به دست آورد.

$$\begin{aligned} R_1 &= R_s - R_{\text{user}} \\ R_1 &= R_{1x}i + R_{1y}j + R_{1z}k \end{aligned} \qquad (5)$$

این مقدار را می‌توان برای تمامی ماهواره‌ها به دست آورد، ولی تنها ماهواره‌هایی می‌توانند در محاسبه پارامتر تعدیل دقت هندسی کمک کنند که در آن لحظه در دید ایستگاه زمینی قرار داشته باشند. برای این منظور قیدی برای در دسترس بودن ماهواره‌هایی انتخاب می‌شود که فاصله میان ایستگاه و ماهواره کمتر از شعاع کره زمین باشد. تعداد این ماهواره‌ها نباید کمتر از 4 ماهواره باشد. بردارهای ماهواره‌های انتخاب شده در یک ماتریس به نام A قرار داده می‌شوند. این ماتریس جزء اصلی در محاسبه پارامتر تعدیل دقت هندسی است.

مقدار R با اضافه شدن محاسبه زمان انتشار از ماهواره تا گیرنده به دست می‌آید. فاصله ρ_j برای ماهواره j-ام به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود [29].

$$\rho_j = \left|\left|s_j - u\right|\right| + ct_b \qquad j=1,2,3,4 \qquad (6)$$

در آن c سرعت نور و t_b خطای ساعت گیرنده یا بایاس زمان سیستم است. موقعیت کاربر در سه راستا به صورت $(X_u.Y_u.Z_u)$ و زمان خطا با t_b نشان داده می‌شوند. اندازه فاصله به‌دست‌آمده از چهار ماهواره به صورت رابطه (7) است.

$$\rho_j = \sqrt{(X_j+x_u)^2 + (Y_j+y_u)^2 + (Z_j+z_u)^2} + ct_b \qquad (7)$$

در آن $(X_j.Y_j.Z_j)$ نشان‌دهنده موقعیت ماهواره j-ام در سه بعد است. معادله بالا با استفاده از سری تیلور حول نقطه کاربر تقریبی $(\hat{x}_u.\hat{y}_u.\hat{z}_u)$ خطی می‌شود و از مراتب بالاتر صرف نظر می‌شود. با تعریف $\hat{\rho}_j$ در $(\hat{x}_u.\hat{y}_u.\hat{z}_u)$ رابطه (8) را به صورت زیر خواهیم داشت.

$$\rho\Delta_j = \rho_j - \hat{\rho}_j = a_{x_j}\Delta x_u + a_{y_j}\Delta y_u + a_{z_j}\Delta z_u + ct_b \qquad (8)$$

که در آن ضریب $a_{£_j}$ از رابطه (9) به‌دست می‌آید.

$$a_{£_j} = \frac{£_j - \hat{£}_j}{\hat{r}_j} . £ = x.y.z \qquad (9)$$

فاصله $\hat{r}_j$ که در رابطه بالا استفاده شده به صورت رابطه (10) محاسبه می‌شود.

$$r_j = \sqrt{(x_j+\hat{x}_u)^2 + (y_j+\hat{y}_u)^2 + (z_j+\hat{z}_u)^2} \qquad (10)$$

علاوه‌بر عبارت بالا $\Delta £_u$ نیز در رابطه (8) استفاده شده که به صورت رابطه (11) قابل محاسبه است.

$$\Delta £ = £_u - \hat{£}_u . £ = x.y.z \qquad (11)$$

معادلات بالا را می‌توان به صورت رابطه (12) به فرمت ماتریسی نوشت.

$$\rho=\begin{pmatrix}\Delta\rho_1\\ \Delta\rho_2\\ \Delta\rho_3\\ \Delta\rho_4\end{pmatrix}\approx\begin{pmatrix}a_{x_1} & a_{y_1} & a_{z_1} & 1\\ a_{x_2} & a_{y_2} & a_{z_2} & 1\\ a_{x_3} & a_{y_3} & a_{z_3} & 1\\ a_{x_4} & a_{y_4} & a_{z_4} & 1\end{pmatrix}$$

$$\Delta\rho\approx H\Delta x \tag{12}$$

به ماتریس H ماتریس رویت نیز اطلاق می‌شود [4] که در حالت کلی یک ماتریس $n*4$ است که $n\geq 4$ است. خطای فاصله در حالت کلی به صورت تصادفی dx و dp درنظر گرفته می‌شوند. که به صورت تابعی وابسته به صورت رابطه (13) نوشته می‌شود.

$$d\rho=Hdx=e \tag{13}$$

معادله بالا را می‌توان با روش حداقل مربعات خطا ($||e^2||$) حل کرد.

در آن e بردار خطاست که معمولاً به صورت $\mathrm{E}[0]=0$ درنظر گرفته می‌شود. کمینه‌سازی حداقل مربعات خطا را به صورت گوسی در نظر می‌گیرند [5]. برای کاربران نزدیک زمین حل مانند روش گوسی پیش می‌رود [7]. روش حداقل مربعات برای حالت کلی $n\geq 4$ به صورت رابطه (14) است.

$$dx=H^{-}d\rho \tag{14}$$

در آن H^{-} ماتریس معکوس H است و به صورت رابطه (15) تعریف می‌شود.

$$H^{-}=(H^{\mathrm{T}}H)^{-1}H^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

توجه به این نکته ضروری است که روش حداقل مربعات همیشه بهترین روش نیست، اما برای این حالت اگر ماتریس وزنی به عنوان معکوس ماتریس کوواریانس خطای اندازه انتخاب شود، استفاده از این روش بهتر است. تعداد ماهواره کمتر از 4 نمی‌تواند اطلاعات کافی برای یک موقعیت خوب بدهد. در حالت کلی حسگرهای اطلاعاتی دیگری مانند دقت ساعت نیز می‌تواند کمک کند. کوواریانس بردار dx از رابطه (16) به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned}\mathrm{cov}(dx)&=E(dxdx^{T})=E[H^{-}(d\rho d\rho^{T})(H^{-})^{T})]\\&=H^{-}\mathrm{cov}(d\rho)(H^{-})^{T}\end{aligned} \tag{16}$$

هندسه ماهواره کاربر ثابت در نظر گرفته می‌شود. این یک فرض منطقی برای بازه زمانی کوچک است. با فرض این‌که خطای فاصله برای هر کدام از ماهواره‌ها در نظر گرفته می‌شود و به صورت مستقل از اثرات ماهواره‌های دیگر است، ماتریس کوواریانس به صورت رابطه (17) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{cov}(dx)=\sigma_x^2[H^{\mathrm{T}}H]^{-1} \tag{17}$$

کوواریانس خطای زمان و موقعیت توابعی از المان‌های قطری $[H^{\mathrm{T}}H]$ است. این مفهوم پارامتر تعدیل دقت هندسی را در رابطه (18) می‌رساند.

$$\mathrm{GDOP}=\sqrt{\mathrm{trace}(H^{-1}H)} \tag{18}$$

حال یک پارامتر تعیین موقعیت برای رسیدن به بهترین پوشش‌دهی استفاده می‌شود. با محاسبه پارامتر تعدیل دقت هندسی در یک بازه زمانی مشخص (مثلاً 24 ساعت) برای ایستگاه‌های زمینی مختلف با پراکندگی مناسب می‌توان اطلاعات لازم برای به‌دست‌آوردن پوشش منطقه‌ای مناسب را دریافت کرد. با مقایسه نمودار این پارامتر برحسب زمان برای ایستگاه‌های زمینی مختلف می‌توان به این مهم دست یافت که در هر زمان از کدام یک از ایستگاه‌ها اطلاعات بهتری به دست می‌آید. به عبارت دیگر موقعیت ماهواره‌ها نسبت به آن ایستگاه با دقت بیشتری قرار دارند؛ بنابراین پوشش بهتری از منطقه مورد نظر می‌دهند.

3- پارامتر تعدیل دقت هندسی

در نمودارهای زیر معیار پارامتر تعدیل دقت هندسی برحسب زمان برای 86000 ثانیه با گام 10 ثانیه نشان داده شده است. از این نمودارها می‌توان دریافت که در هر زمان استفاده از اطلاعات کدام ایستگاه زمینی به پارامتر تعدیل دقت دقیق‌تر و در نتیجه پوشش بهتری می‌رسد. پوشش دقیق‌تر مستلزم پارامتر تعدیل دقت هندسی کمتر است. برای نمونه برای بازه زمانی 55000-60000 ثانیه استفاده از اطلاعات گرفته شده توسط ایستگاه چابهار پوشش زمینی دقیق‌تری را در اختیار قرار می‌دهد.

شکل‌های 4 و 5 نشان‌دهنده پارامتر تعدیل دقت هندسی و تعداد ماهواره‌های در دید در طول یک شبانه‌روز برای شهر تهران است. با توجه به این نمودارها شهر تهران در بازه زمانی78000-80000 ثانیه بهترین مقدار پارامتر تعدیل دقت هندسی را به ما می‌دهد، یعنی در این زمان بهترین دقت و در نتیجه پوشش دقیق‌تری را می‌توان از اطلاعات این ایستگاه به‌دست آورد. همان‌طور که از نمودارها نیز دریافت می‌شود تنها بیشتر بودن تعداد ماهواره‌های در دید به ما پارامتر تعدیل دقت بهتری نمی‌دهد. نحوه قرار گرفتن موقعیت این ماهواره‌ها نسبت به یکدیگر نیز بسیار مهم است. در برخی از نقاط نمودارها با وجود این‌که تعداد ماهواره‌های بیشتری در دید هستند مقدار پارامتر تعدیل دقت هندسی تقویت نشده است.

در ادامه نمودار پارامتر تعدیل دقت هندسی برای چند ایستگاه زمینی دیگر بررسی می‌شود.

در شکل‌های 6 و 7 مشاهده می‌شود که بهترین نتایج در زمان 4200 ثانیه و 8500 ثانیه به‌دست آمده است.

به همین ترتیب برای ایستگاه مشهد در شکل‌های 8 و 9 در زمان‌های 4100 و 6000- 6200 و 7600 ثانیه به پارامتر تعدیل دقت بسیار خوبی می‌رسد.

به این ترتیب می‌توان به معیاری برای پوشش بهتر رسید مثلاً با توجه به شکل‌های 8 و 10 در زمان 60000 از ایستگاه‌های مشهد و چابهار می‌توان اطلاعات بهتری به دست آورد.

به این ترتیب می‌توان به معیاری برای پوشش بهتر رسید، مثلاً از شکل‌های 11-13 می‌توان دریافت که در زمان 60000 از ایستگاه‌های مشهد و چابهار اطلاعات بهتری به‌دست آورد.

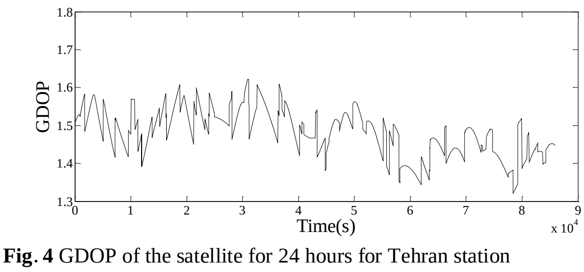

Fig. 4 GDOP of the satellite for 24 hours for Tehran station

شکل 4 نمودار GDOP برحسب زمان برای یک شبانه روز برای ایستگاه تهران

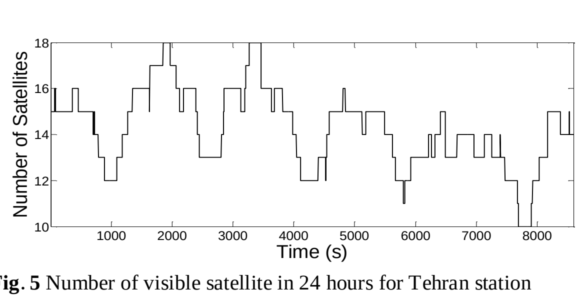

Fig. 5 Number of visible satellite in 24 hours for Tehran station

شکل 5 تعداد ماهواره‌های در دید در طول یک شبانه روز برای ایستگاه تهران

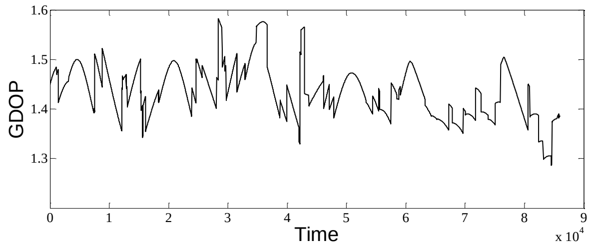

Fig. 6 GDOP of the satellite for 24 hours for Tabriz station

شکل 6 نمودار GDOP برحسب زمان برای یک شبانه روز برای ایستگاه تبریز

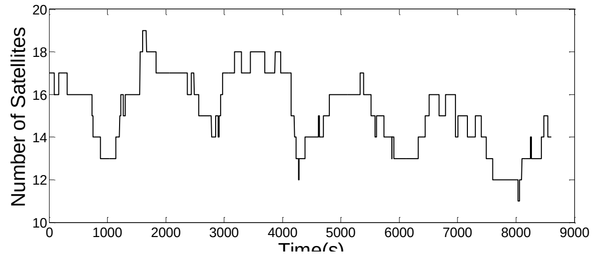

Fig. 7 Number of visible satellite in 24 hours for Tabriz station

شکل 7 تعداد ماهواره‌های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه تبریز

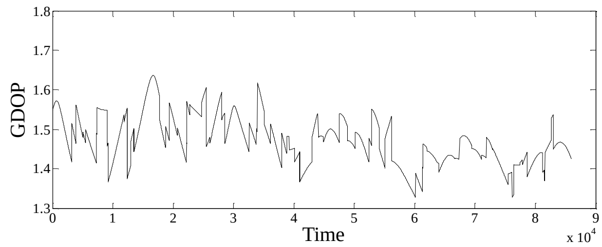

Fig. 8 GDOP of the satellite for 24 hours for Mashhad station

شکل 8 نمودار GDOP برحسب زمان برای یک شبانه روز برای ایستگاه مشهد

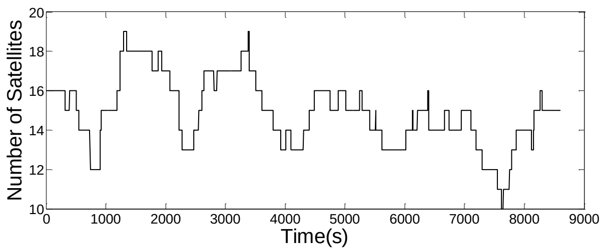

Fig. 9 Number of visible satellite in 24 hours for Mashhad station

شکل 9 تعداد ماهواره‌های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه مشهد

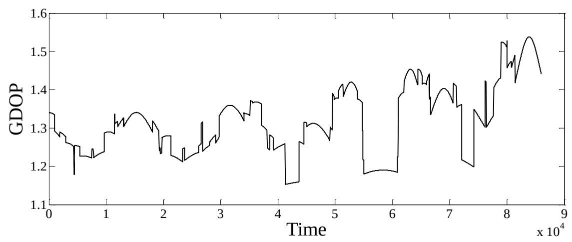

Fig. 10 GDOP of the satellite for 24 hours for Chabahar station

شکل 10 نمودار GDOP برحسب زمان برای یک شبانه روز برای ایستگاه چابهار

با به دست آوردن مقدار GDOP برای هر ایستگاه اطلاعات را تکمیل‌تر می‌کنیم. FOV هر ماهواره برابر 3000 کیلومتر به عبارت دیگر FOV زاویه دید سنسور ماهواره است که رد زمینی آن دایره‌ای با شعاع 3000 کیلومتر

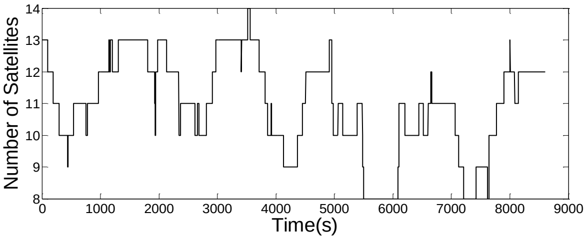

Fig. 11 Number of visible satellite in 24 hours for Chabahar station

شکل 11 تعداد ماهواره‌های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه چابهار

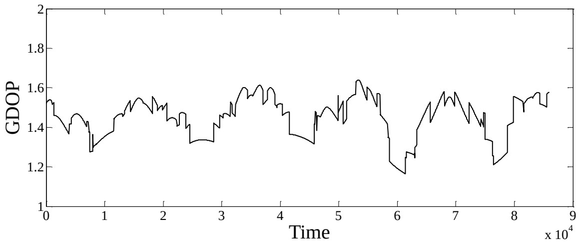

Fig. 12 GDOP of the satellite for 24 hour for Mahshahr station

شکل 12 نمودار GDOP برحسب زمان برای یک شبانه روز برای ایستگاه ماهشهر

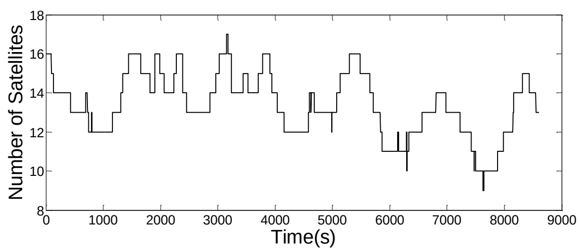

Fig. 13 Number of visible satellite in 24 hour for Mahshahr station

شکل 13 تعداد ماهواره های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه ماهشهر

است. با به‌دست آوردن مقدار GDOP برای هر ایستگاه تا شعاع 3000 کیلومتری آن ایستگاه پوشش داده می‌شود؛ بنابراین با انتخاب یک ایستگاه که اطلاعات بهتری در اختیار ما قرار می‌دهد می‌توان کل کشور ایران را تحت پوشش قرار داد.

تا این‌جا تمامی نمودارها با درنظر گرفتن 72 ماهواره در منظومه ماهواره‌ای به‌دست آمدند، حال در نمودارهای زیر تعداد ماهواره‌هایی که در هر لحظه در دید مختصات جغرافیایی ایستگاه مورد نظر قرار دارند نشان داده شده است. در شکل 14 به بعد در هر مرحله تعداد ماهواره‌های موجود در منظومه کم ماهواره می‌شود تا مرحله‌ای که با کمترین تعداد ماهواره ممکن به پاسخ مناسب دست یابد. این محاسبات برای ایستگاه زمینی شهر تهران انجام شده‌اند.در شکل 14 این محاسبات برای 60 ماهواره انجام شده است. تعدادماهواره برای یک منشومه ماهواره‌ای بسیار زیاد است و از دیدگاه اقتصادی ساخت منظومه با تعداد ماهواره بالا مقرون به صرفه نیست.

در شکل 16 نیز همین روند ادامه یافته است.

همان‌طور که در شکل17 مشاهده می‌شود با منظومه ماهواره‌ای 20تایی در برخی از زمان‌ها تعداد ماهواره‌ها به 4 عدد یعنی حداقل میزان در دسترس برای محاسبه پارامتر تعدیل دقت می‌رسد. برای منظومه‌های کمتر از 20 ماهواره تعداد ماهواره‌های در دید به کمتر از 4 ماهواره می‌رسد که نمی‌توان به محاسبه این پارامتر پرداخت. از دیگر مزایای این روش این است که هرگاه در منظومه حداقل 4 ماهواره در دید داشته باشیم که در موقعیت خوبی نسبت به هم قرار گرفته باشند می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت؛ بنابراین

می‌توان با داشتن کمترین تعداد ماهواره در منظومه به پوشش خوبی دست یافت.

در این نتیجه با توجه به شکل 15 کمترین تعداد ماهواره در دسترس 5 عدد است که شرط حداقل 4 ماهواره را برقرار می‌کند؛ بنابراین می‌توان تعداد ماهواره‌ها را کم کرد. این روند را می‌توان تا برقراری شرط حضور 4 ماهواره ادامه داد.

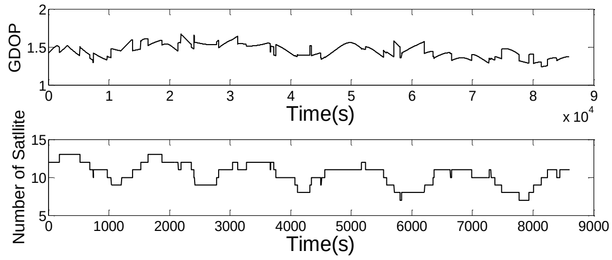

Fig. 14 GDOP and Number of visible satellite in 24 hours for Tehran station with 60 satellites

شکل 14 GDOP و تعداد ماهواره های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه تهران با منظومه شامل 60 ماهواره

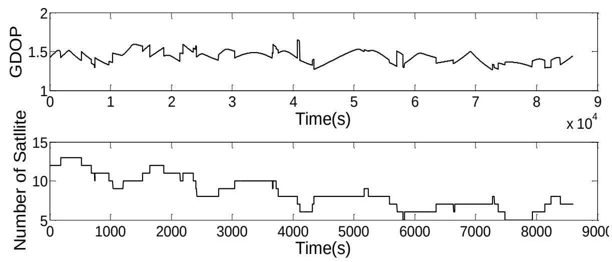

Fig. 15 GDOP and Number of visible satellite in 24 hour for Tehran station with 50 satellites

شکل 15 GDOP و تعداد ماهواره‌های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه تهران با منظومه شامل 50 ماهواره

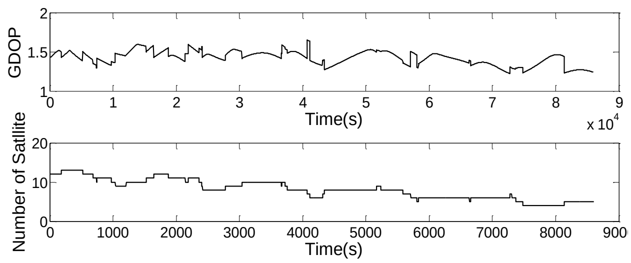

Fig. 16 GDOP and Number of visible satellite in 24 hours for Tehran station with 40 satellites

شکل16 GDOP و تعداد ماهواره‌های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه تهران با منظومه شامل 40 ماهواره

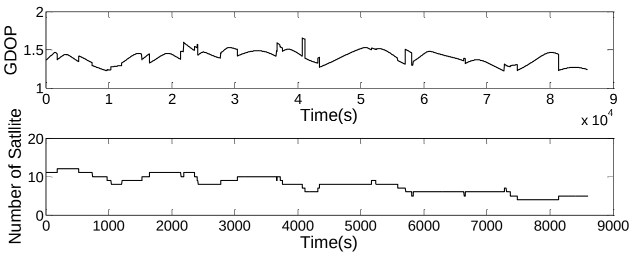

Fig. 17 GDOP and Number of visible satellite in 24 hours for Tehran station with 20 satellites

شکل 17 GDOP و تعداد ماهواره های در دید در طول زمان یک شبانه روز برای ایستگاه تهران با منظومه شامل 20 ماهواره

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر به‌دست آوردن پارامتر تعدیل دقت هندسی به منظور استفاده در پوشش‌دهی منطقه‌ای تلاش شد. نوآوری مورد نظر در این پژوهش استفاده معکوس از کاربرد پارامتر تعدیل دقت هندسی در پوشش منطقه‌ای است. با کمک این پارامتر می‌توان برای هر ایستگاه زمینی میزان دقت پوشش را در زمان‌های مختلف به‌دست آورد. بدین‌ترتیب برای پوشش منطقه‌ای یک مختصات مورد نظر مانند کشور ایران می‌توان به این مهم دست یافت که در هر زمان استفاده از اطلاعات کدام یک از ایستگاه‌ها ما را به نتایج بهتری می‌رساند. از این‌رو زمانی که ماهواره‌ها در موقعیت مناسبی قرار داشته باشند پارامتر تعدیل دقت هندسی به حداقل مقدار خود می‌رسد. با توجه به FOV ماهواره‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مناطق اطراف ایستگاه زمینی تحت پوشش مناسب با بهترین دقت قراردارند. این پوشش‌دهی تا شعاع 3000 کیلومتر از هر ایستگاه به‌دست می‌آید، در هر زمان از تمام ایستگاه‌ها پوشش وجود دارد و می‌توان با استفاده از معیار پارامتر تعدیل دقت هندسی ایستگاه بهتر را در هر زمان تعیین کرد. روش‌های مختلفی برای پوشش‌دهی استفاده می‌شود، ولی در بیشتر این روش‌ها به تعداد زیادی ماهواره در منظومه مورد نیاز است. با این روش با توجه به این‌که سطح پوشش از هر ایستگاه حدود 3000 کیلومتر است، با داشتن حداقل 20 ماهواره می‌توان به پارامتر تعدیل دقت خوب و در نتیجه پوشش مناسب و مورد نظر از کشور ایران داشت.

5- فهرست علائم

a	نیم‌قطر اصلی
c	سرعت نور
e	خروج از مرکزیت
er	خطای فاصله
f	ضریب ثابت فشردگی
G	ضریب فشردگی زمین
H	ماتریس رویت
h	ممنتم زاویه‌ای مدار
i	زاویه میل
l	ارتفاع
mu	پارامتر گرانش
R_s	فاصله مرکز زمین تا ماهواره
R_{user}	فاصله ایستگاه زمینی تا مرکز زمین
t	زمان
t_b	خطای ساعت گیرنده
TA	آنومالی حقیقی
X	طول
Y	عرض
Z	ارتفاع

علایم یونانی

λ	طول جغرافیایی
ρ_j	فاصله ماهواره jام
ϕ	عرض جغرافیایی
ω	آرگومان حضیض

اختصارات

FOV	Field of View
GDOP	Geometrical Dilution of Precision

6- مراجع

[1] M. Fakoor, F. Amozegary, M. Bakhtiari, Modeling of large scale relative motion of two satellites in elliptical orbit, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 187-198, 2017 (in Persian فارسی).

[2] M. G. Matossian, Improved candidate generation and coverage analysis methods for design optimization of symmetric multisatellite constellations, *Acta astronautica*, Vol. 40, No. 2, pp. 561-571, 1997.

[3] J. Frank, A. Jonsson, R. Morris, D. E.Smith, et al, Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites, *Proceedings of The 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation and Space*, Montreal, Canada, Vol.47, pp. 777-780, June 2001.

[4] D. J. Pegher, J. A. Parish, *Optimizing coverage and revisit time in sparse military satellite constellations: A comparison of traditional approaches and genetic algorithms*, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey California, 2004.

[5] J. E. Draim, Three-and four-satellite continuous-coverage constellations, *Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 6, pp. 725-730, 1985.

[6] R. D. Luders, Satellite networks for continuous zonal coverage, *ARS Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 179-184, 1961.

[7] A. H. Ballard, Rosette constellations of earth satellites, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,Vol. 5, No. 1, pp. 656-673, 1980.

[8] L. Rider, Optimized polar orbit constellations for redundant earth coverage, *the Astronautical Sciences*, Vol. 33, pp. 147-161, 1985.

[9] J. G. Walker, Continuous whole-earth coverage by circular-orbit satellite patterns, pp. 177-208, DTIC Document, 1977.

[10] T. J. Lang, Symmetric circular orbit satellite constellations for continuous global coverage, *Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference*, Kalispell, Montana, pp. 1111-1132, 1987.

[11] J. E. Draim, Continuous global N-tuple coverage with (2N+ 2) satellites, *Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 14, pp. 17-23, 1991.

[12] L. Rider, Analytic design of satellite constellations for zonal earth coverage using inclined circular orbits, *the Astronautical Sciences*, Vol. 34, pp. 31-64, 1986.

[13] E. Lansard, E. Frayssinhes, J.-L. Palmade, Global design of satellite constellations: a multi-criteria performance comparison of classical walker patterns and new design patterns, *Acta astronautica*, Vol. 42, pp. 555-564, 1998.

[14] J. Walker, Some circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage, *the British Interplanetary Society*, Vol. 24, pp. 369-384, 1971.

[15] J. G. Walker, Satellite constellations, *the British Interplanetary Society*, Vol. 37, pp. 559-572, 1984.

[16] W. R. Gilks, S. Richardson, D. Spiegelhalter, *Markov chain Monte Carlo in practice*. pp. 145-158, London: CRC press, 1995.

[17] J.G. Walker, *Coverage Predictions and Selection Criteria for Satellite Constellations*, pp. 9-23, United Kingdom, DTIC Document, 1982.

[18] J.G. Walker, *Circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage*, pp. 26-33, United Kingdom, DTIC Document, 1970.

[19] M. P. Ferringer, D. B. Spencer, Satellite constellation design tradeoffs using multiple-objective evolutionary computation, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 43, pp. 1404-1411, 2006.

[20] T. J. Lang, Optimal low Earth orbit constellations for continuous global coverage, *Astrodynamics Conference*, Victoria; Canada, pp. 1199-1216, 1994.

[21] J. E. Draim, A common-period four-satellite continuous global coverage constellation, *Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 10, pp. 492-499, 1987.

[22] T. J. Lang, J. M. Hanson, Orbital constellations which minimize revisit time, *Advances in the Astronautical Sciences*, Vol. 54, pp. 1071-1086, 1987.

[23]P. R. Escobal, Methods of orbit determination, New York: Wiley, pp. 42-127, 1965.

[24] D. Schmitt, Low altitude satellite constellations that minimize worldwide revisit time, *AAS Paper*, pp. 89-379, 1989.

[25] J.M. Hanson, M.J. Evans, R.E. Turner, Designing good partial coverage satellite constellations, *the Astronautical Sciences*, Vol. 40, No. 2, pp. 215-239, 1992.

[26] M. A. Chylla, C. D. Eagle, Efficient computation of satellite visibility periods, *Proceedings of the 2nd AAS/AIAA Meeting*, Colorado, USA, Feb. 24-26, pp. 823-834, 1992.

[27] D. M. Ma, W. C. Hsu, Exact design of partial coverage satellite constellations over oblate earth, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 34, No. 1, pp. 29-35, 1997.

[28] O. Omarabdelkhalik, D. Mortari, Orbit design for ground surveillance using genetic algorithms, *Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29, pp. 1231-1235, 2006.

[29] J. Bao,Y. Tsui, *Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach*, pp. 7-67, New York: John Wiley & Sons, 2005.