

ارزیابی ناوبری تلفیقی DME/DME به عنوان APNT برای ج.ا. ایران

قاسم کاهه*

استادیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

دانشجوی دکترا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

محمد صابری توکلی

چکیده

سازمان جهانی هوانوردی عمومی راه حل‌های جایگزین (APNT) برای مواقعی که سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای از کار می‌افتند، پیشنهاد کرده که ناوبری مبتنی بر DME/DME یکی از آنها است. کارایی این روش در کشورهای مختلف از منظر الزامات APNT مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و در کشور ما نیز این امر ضروری است. در این مقاله، ناوبری هوایی مبتنی بر DME/DME با استفاده از فیلتر کالمن و به عنوان یک گزینه مناسب APNT برای ایران، پیاده سازی شده و کارایی آن بر اساس ایستگاه‌های DME موجود در کشور ارزیابی شده است. دقت و مشخصات سامانه ارائه شده از منظر APNT مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ناوبری هوایی مبتنی بر DME/DME با استفاده از فیلتر کالمن و بر اساس ایستگاه‌های DME موجود، گزینه مناسبی به عنوان APNT برای آسمان ایران بوده، الزامات تعیین شده برای سامانه ناوبری جایگزین را بر اساس مشخصات RNP و RNAV می‌تواند برآورده نماید و پراکنندگی مناسب آنها، پوشش، دسترس پذیری و تمامیت مورد نیاز را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ناوبری هوایی، ناوبری ماهواره‌ای، ناوبری جایگزین، DME، APNT.

Evaluation of DME/DME Integration as APNT for I.R. IRAN

G. Kahe

Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

M. Saberi Tavakkoli

Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

International Civil Aviation Organization (ICAO) has proposed alternative solutions for cases when Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is blocked. Among them, DME/DME has features that make it as a good and cost-effective option. In this paper, DME/DME navigation is implemented based on Extended Kalman Filter (EKF) and its performance and accuracy from the APNT perspective has been investigated in a real aerial route based on current operable DME network in I.R. IRAN. These investigations show that the integrated aerial navigation via DME/DME cover the specified APNT requirements and their proper dispersal provides the required coverage according to RNAV/RNP requirements.

Keywords: Aerial Navigation, Satellite Navigation, Alternative Navigation, DME, APNT.

۱- مقدمه

سامانه‌های جدیدتر و دقیق‌تر GNSS جایگزین شد. سامانه‌ی ناوبری ماهواره‌ای (GNSS) و به خصوص GPS رشد زیادی در زمینه ناوبری هوایی داشته است. با همه مزایایی که دارند، سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای در مقابل تداخلات عمدی رادیویی^۵ و نیز فریب کاری رادیویی^۶ که یک تهدید مهم برای ایمنی هوانوردی است، به شدت آسیب پذیر هستند. بعلاوه با توجه به اینکه این سامانه‌ها تحت کنترل کامل کشورهای مالک هستند، در شرایط حساس و نظامی و در هر زمان و مکانی که بخواهند، می‌توانند کیفیت خدمات ناوبری را کاهش داده یا قطع نمایند. بنابراین ارائه یک راه حل مناسب برای APNT با توجه به زیرساخت موجود در ایران بسیار حیاتی است. در ادامه و در بخش ۲ برنامه APNT و الزامات مربوطه شرح داده می‌شود. سپس در بخش ۳ کارهای مرتبط مرور شده که بر اساس آن روش مناسب برای APNT روی آسمان ج.ا. ایران انتخاب و بررسی شده است. در بخش ۴ و ۵ ناوبری مبتنی بر DME/DME روی آسمان ایران به عنوان یک گزینه مناسب برای APNT مورد ارزیابی قرار گرفته و در انتها نیز نتیجه گیری ارائه شده است.

سامانه‌های ناوبری هوایی در فازهای مختلف پرواز و از لحظه رفتن روی باند و آماده شدن برای پرواز تا برخاستن، هدایت مسیر به سمت مقصد، هدایت به سمت فرودگاه و باند فرود، نشستن هواپیما و سپس هدایت آن به سمت ترمینال، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم جهت یاب رادیویی^۱ VOR یکی از قدیمی ترین سیستم‌های ناوبری رادیویی است که جهت نشان دادن سمت پرواز به سوی یک ایستگاه زمینی و ناوبری بین مسیرها استفاده می‌شود [۱]. TACAN^۲ نیز یک سامانه ناوبری رادیویی شبیه VOR است که در بخش نظامی استفاده می‌شود [۱]. یکی دیگر از سامانه‌های ناوبری هوایی، سامانه‌ی DME^۳ است که فاصله‌ی هواپیما از یک ایستگاه زمینی را بر اساس زمان پرواز سیگنال محاسبه می‌نماید [۱، ۲]. سامانه‌ی ILS یک سامانه‌ی رادیویی برای هدایت هواپیما به سمت باند فرود و نشستن روی باند است. سیستم ناوبری برد بلند LORAN^۴ جزو اولین سامانه‌های ناوبری رادیویی محسوب می‌شود که در خلال جنگ جهانی دوم توسعه داده شد و کاربرد گسترده‌ای در ناوبری هوایی و دریایی پیدا کرد [۱]. به دلیل هزینه‌های بالای نگهداری و دقت متوسط، این سامانه به تدریج با

۲- برنامه APNT و الزامات

تداخل عمدی از طریق امواج رادیویی و فریبکاری از جمله

^۱ VHF Omnidirectional Range

^۲ Tactical Air Navigation

^۳ Distance Measuring Equipment

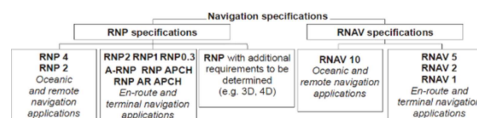
^۴ Long Range Aid to Navigation System

^۵ Jamming

^۶ Spoofing

UAT^۳ به عنوان یک راه حل برای APNT در مقاله [۱۳] مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که فاصله سنجی غیرفعال دقت مورد نظر RNAV-0.3 را فراهم می‌کند. در مقاله [۹] ناوبری مبتنی بر DME/DME به عنوان یک سامانه ناوبری جایگزین روی آسمان اوکراین مورد ارزیابی قرار گرفته است و پوشش و خطاهای موقعیت یابی با استفاده از شبکه DME موجود، محاسبه شده است. ارزیابی‌های این مقاله نشان می‌دهد که دقت ناوبری مبتنی بر DME/DME در ۶۷ درصد آسمان اوکراین کمتر از ۵۰۰ متر است. دقت سامانه DME برای ناوبری هوایی و نیز به عنوان سامانه ناوبری جایگزین در آینده در مقاله‌ی [۱۴] مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که DME دقت‌های تعیین شده در APNT را می‌تواند فراهم نماید. استفاده از شبه ماهواره^۴ به عنوان یک گزینه برای APNT در مقاله [۱۵] ارزیابی شده و پوشش و دقت آن نیز محاسبه شده است. دو روش DME/DME و MLAT^۵، به صورت ترکیبی در مقاله [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. هر چند این دو روش به صورت کاملاً متفاوت عمل می‌کنند، ولی با توجه به این که هر دو از یک باند فرکانسی استفاده می‌کنند، می‌توانند با هم تجمیع شده و از یک آنتن مشترک استفاده نمایند. این روش ترکیبی ناوبری روی آسمان آمریکا ارزیابی شده و پوشش، دقت و الزامات استفاده از این سیستم به دست آمده است. در مقاله [۱۷] چالش‌های استفاده از DME به عنوان یک راه حل جایگزین برای ناوبری ماهواره‌ای تشریح شده است. در مقاله [۱۸] ناوبری DME/DME با استفاده از یک رادیو نرم افزار طراحی و پیاده سازی شده است. الگوریتم موقعیت‌یابی در این مقاله مبتنی بر روش کمترین مربعات^۶ است و فاصله‌سنجی تا ایستگاه‌های DME به صورت ترتیبی و با استفاده از یک فرستنده-گیرنده رادیویی انجام می‌شود. در مقاله [۱۹] فاصله‌سنجی و سپس موقعیت یابی از طریق سیگنال‌های ADS-B و TIS-B شرح داده شده است. در این مقاله یک بستر آزمون برای همگام سازی زمانی، ارزیابی فاصله سنجی و موقعیت یابی پیشنهاد شده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دقت مورد نظر برای APNT را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه DME/DME به عنوان یک راه حل در APNT پیشنهاد شده است، بررسی یک شبکه بهینه از ایستگاه‌های DME در [۱۲] برای پوشش الزامات RNAV/RNP 3.0 و ظرفیت آن برای پوشش حجم بالایی از ترافیک هوایی مورد بررسی قرار گرفته است. دقت فاصله سنجی در DME و مقایسه آن با الزامات تعیین شده در استانداردهای هوانوردی در مقاله [۱۰] انجام شده است. این تحلیل‌ها مبتنی بر داده‌های واقعی است که در پروازهای مختلف جمع آوری شده‌اند. پتانسیل استفاده از DME به عنوان یک راه حل برای APNT نیز در این مقاله بررسی شده است. طراحی، ساخت و ارزیابی یک شبه ماهواره DME در مقاله [۲۰] ارائه شده است و کارایی آن از طریق آزمون‌های هوایی و زمینی نیز اندازه گیری شده است. دسترس پذیری پایین یکی از مشکلات اساسی گزینه‌های زمین پایه برای APNT است

مخاطرات عمده سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای هستند که به عنوان تهدیدهای مهم در ایمنی هوانوردی بوده و باعث شده‌اند تا کشورهای مختلف در کاربردهای حساس به دنبال راه حل‌های جایگزین (APNT) باشند [۳، ۴]. مخاطرات موجود (طبیعی، عمدی و غیرعمدی) در استفاده از سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای [۵] باعث شد تا در کنار سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای، گزینه‌های جایگزین و عمدتاً مبتنی بر سیستم‌های ناوبری موجود مورد توجه قرار بگیرد تا در مواقع اضطراری که خدمات ناوبری در سامانه‌ی ناوبری ماهواره‌ای دچار آسیب می‌شود، ناوبری هوایی از طریق سامانه‌های جایگزین فراهم باشد [۶، ۷]. با توجه به مخاطراتی که برای GNSS وجود دارد، مدیریت فضایی فدرال (FAA^۱) برنامه‌ای را تحت عنوان نسل آتی (NextGen) معرفی کرد که در آن سامانه‌های ناوبری تا سال ۲۰۲۰ باید ویژگی‌هایی را متمایز با ویژگی‌های کنونی داشته باشند، از جمله این که باید قادر به تحمل بار ترافیکی دو برابری نسبت به شرایط کنونی را داشته و همچنین باید بتواند الزامات RNP را پوشش دهد [۸]. یکی دیگر از برنامه‌های NextGen دستیابی به جایگزینی برای GNSS در زمینه ناوبری و زمان است که از آن به عنوان APNT^۲ یاد شده و در آن باید سامانه‌ی مناسبی جهت جایگزینی برای GNSS معرفی شود [۲، ۶، ۷، ۹، ۱۰]. RNP شامل الزامات و مشخصات ناوبری بر مبنای PBN هستند که کارکرد هواپیما را در یک مسیر دقیق پروازی با دقت بالا تضمین نموده و موقعیت یابی دقیق و صحیح هواپیما را نیز ممکن می‌سازد. شکل ۱ الزامات و مشخصات RNP و RNAV را بر اساس کارد آنها دسته بندی کرده که بر اساس آن سازمان جهانی هوانوردی عمومی (ایکائو) سطوح مختلفی برای RNP تعیین نموده است [۸]. RNP بر اساس چهار کمیت دقت، صحت، در دسترس بودن و پیوستگی تعریف می‌شود. به عنوان مثال در RNP 0.3 دقت کمتر از ۰/۳ ناتیکیال مایل مد نظر بوده و بر اساس آن دقت، صحت، در دسترس بودن و تداوم سیستم ناوبری مشخص می‌شود.



شکل ۱ - الزامات ناوبری مشخص شده توسط ICAO [۱۱]

۳- کارهای مرتبط

تحقیقات بسیار گسترده‌ای برای ارزیابی روش‌های مختلف ناوبری به عنوان جایگزین ناوبری ماهواره‌ای (APNT) انجام شده است. در مقاله‌ی [۲] سامانه‌های موجود در ناوبری هوایی مثل DME و VOR برای استفاده به عنوان جایگزین ناوبری ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتیجه این تحقیقات نشان می‌دهد که روش‌های مبتنی بر DME یک راه حل مناسب برای APNT است که توسط FAA نیز پیشنهاد شده است. در مقایسه با دیگر روش‌ها، روش DME/DME به دلیل نیاز به تغییرات کمتر در اویونیک و در نتیجه هزینه پایین‌تر، بیشتر از بقیه‌ی معماری‌ها مورد استقبال خطوط هوایی قرار گرفته است [۱۲]. فاصله سنجی غیرفعال با استفاده از سامانه‌های DME و

³ Universal Access Transceiver

⁴ Pseudolite

⁵ Multilateration

⁶ Least Square

¹ Federal Aviation Administration

² Alternative Positioning, Navigation, and Timing

ایستگاه‌های DME نیز بر اساس شناسه‌ی تخصیص یافته مشخص و معلوم است. فاصله بین هواپیما و ایستگاه DME با استفاده از فرمول (۱) محاسبه می‌شود.

$$d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (1)$$

که $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ موقعیت هواپیما است که باید محاسبه شود و x_i, y_i, z_i موقعیت معلوم ایستگاه DME شماره i است. با توجه به اینکه فاصله بر اساس زمان رفت و برگشت سیگنال اندازه گیری می‌شود، خطای ساعت بین هواپیما و ایستگاه DME حذف می‌شود. با داشتن حداقل سه ایستگاه DME و اندازه گیری فاصله تا آنها، موقعیت مجهول هواپیما به دست می‌آید. برای محاسبه و تخمین دقیق‌تر موقعیت هواپیما، توصیه می‌شود بیش از سه ایستگاه DME برای موقعیت یابی هواپیما استفاده شود. در این صورت و با توجه به اینکه تعداد معادلات از تعداد مجهولات بیشتر می‌شود، از روش‌های بهینه سازی مثل کمترین مربعات برای حل دستگاه معادلات خطی استفاده می‌شود که معمولاً به صورت بازگشتی به سمت جواب همگرا می‌شوند. برای استفاده از این روش‌ها، ابتدا باید دستگاه معادلات خطی سازی شوند. برای خطی سازی، بسط درجه‌ی اول تیلور رابطه (۱) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$d_i = \hat{d}_i - \frac{x_i - \hat{x}}{\hat{d}_i} \Delta x - \frac{y_i - \hat{y}}{\hat{d}_i} \Delta y - \frac{z_i - \hat{z}}{\hat{d}_i} \Delta z \quad (2)$$

که $[\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}]$ موقعیت تقریبی هواپیما و $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]$ خطای تخمین در محاسبه موقعیت است. فرض کنید:

$$\Delta d_i = d_i - \hat{d}_i, a_{x_i} = \frac{x_i - \hat{x}}{\hat{d}_i}, a_{y_i} = \frac{y_i - \hat{y}}{\hat{d}_i}, a_{z_i} = \frac{z_i - \hat{z}}{\hat{d}_i} \quad (3)$$

بنابراین شکل ماتریسی دستگاه معادلات به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta X = H^{-1} \cdot \Delta d, \Delta d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}, \Delta X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} a_{x_1} & a_{y_1} & a_{z_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{x_i} & a_{y_i} & a_{z_i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

اگر فاصله سنجی با بیش از سه ایستگاه DME انجام شود، تخمین موقعیت بر اساس یکی از روش‌های بهینه سازی مثل روش کمترین مربعات به دست می‌آید. در این روش تابع هزینه به صورت رابطه (۵) به گونه‌ای تعریف می‌شود که مربعات خطا کمینه شوند.

$$R_{SE}(\Delta X) = (H \cdot \Delta X - \Delta d)^2 \quad (5)$$

برای پیدا کردن نقطه کمینه، گرادینت تغییرات باید به صورت معادله (۶) محاسبه و برابر صفر شود.

$$\nabla R_{SE}(\Delta X) = 2(\Delta X)^T H^T H - 2(\Delta d)^T H = 0 \quad (6)$$

که در نتیجه معادله (۷) حاصل خواهد شد.

$$\Delta X = (H^T H)^{-1} H^T \Delta d \quad (7)$$

بنابراین الگوریتم کمترین مربعات معمولاً به صورت بازگشتی و به صورت رابطه (۸) طراحی می‌شود که \hat{X}_k تخمین موقعیت در لحظه‌ی k است.

$$\Delta \hat{X}_k = (H_k^T H_k)^{-1} H_k^T \Delta d_k \quad (8)$$

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta \hat{X}_k$$

خطاهای موقعیت یابی به دو دسته تقسیم می‌شوند: خطاهای وابسته به چیدمان هندسی ایستگاه‌های مرجع و خطای اندازه‌گیری فاصله. خطای مربوط به چیدمان هندسی با یک کمیت به نام ریزش

که تمامیت این سامانه‌ها نیز همواره تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مقاله [۲۱] با ترکیب روش‌های مختلف موقعیت یابی سعی کرده است این چالش را تا حدودی برطرف نماید. کارایی روش ارائه شده روی آسمان آلمان از منظر الزامات RNP ارزیابی شده است. در مقاله [۴] سعی شده خطاهای عمدی GNSS به کمک یکی از گزینه‌های APNT که الزامات RNP 3.0 را برآورده نماید، شناسایی شود. روش ارائه شده قادر است خطای عمدی اندازه گیری فاصله تا حدود ۳۰۰ متر را تشخیص دهد. بررسی این مقالات نشان می‌دهد که راه حل پیشنهادی DME/DME برای APNT در بسیار از کشورها مورد استقبال قرار گرفته و با توجه به پراکندگی بسیار خوب ایستگاه‌های DME در ایران [۲۲]، این روش می‌تواند گزینه‌ی بسیار خوبی برای کشور باشد. با توجه به اینکه الزامات APNT برای ناوبری DME/DME در مناطق مختلف، مثل اوکراین [۹]، آمریکا [۱۶] و آلمان [۲۱]، مورد ارزیابی قرار گرفته، بنابراین بررسی دقت و پوشش سامانه ناوبری جایگزین DME/DME روی آسمان ایران ضروری است که این مقاله به این امر پرداخته است. بعلاوه در این مقاله الگوریتم موقعیت یابی DME/DME با استفاده از فیلتر کالمن توسعه داده شده و روی آسمان ایران از نظر پوشش، دقت و الزامات APNT ارزیابی شده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که با توجه به توزیع و پراکندگی مناسب ایستگاه‌های DME، پوشش در کل کشور بسیار خوب است و موقعیت یابی DME/DME به عنوان یک سامانه جایگزین، الزامات RNAV/RNP را می‌تواند برآورده نماید. البته افزایش تعداد ایستگاه‌های DME در مناطقی که تعداد آن‌ها کم است می‌تواند پوشش و دقت را بهبود بخشد.

۴- ناوبری DME/DME

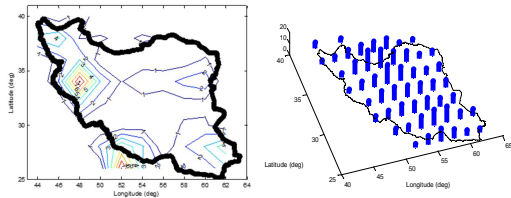
در موقعیت یابی رادیویی، موقعیت مجهول بر اساس موقعیت معلوم ایستگاه‌های مرجع و وضعیت یا فاصله نسبی وسیله نسبت به ایستگاه‌های مرجع و با استفاده از روش‌های مثلثاتی محاسبه می‌شود. در این مقاله الگوریتم تخمین موقعیت با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته و دقت و پوشش آن روی آسمان ایران ارزیابی شده است.

۴-۱- سامانه DME و خطاها

سامانه‌ی DME وسیله‌ای است که فاصله‌ی هواپیما را از یک ایستگاه زمینی بر اساس زمان رفت و برگشت سیگنال اندازه‌گیری می‌کند [۱۷]. از طرف FAA ایستگاه‌های DME نه تنها باید به کار خود ادامه دهند، بلکه توسعه آن‌ها به عنوان یک مرجع برای موقعیت‌یابی تحت عنوان DME/DME نیز در برنامه‌ی این سازمان قرار دارد [۱۴، ۱۷، ۲۰]. سامانه DME/DME در واقع استفاده از اطلاعات حداقل سه ایستگاه DME به طور همزمان، برای محاسبه و استخراج موقعیت پرنده است. بنابراین سامانه DME به دلیل پوشش مناسب در سراسر دنیا، قابل اعتماد بودن و برنامه‌های توسعه برای تبدیل به DME/DME، یکی از گزینه‌های خوب برای مسئله‌ی APNT می‌باشد.

۴-۲- موقعیت یابی مبتنی بر DME/DME

در روش‌های ناوبری رادیویی، موقعیت مجهول بر اساس موقعیت معلوم چند ایستگاه مرجع و سپس وضعیت یا فاصله نسبی نسبت به ایستگاه‌های مرجع سنجیده می‌شود. در روش DME/DME در هر لحظه فاصله هواپیما تا ایستگاه‌های DME محاسبه می‌شود. موقعیت



شکل ۲ - پوشش و HDOP ایستگاه‌های DME در سطح کشور

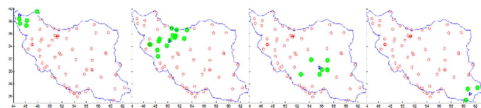
۱-۵- توزیع ایستگاه‌های DME در ایران

برای بررسی پوشش و دقت موقعیت یابی از طریق DME/DME نیاز است تا موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های DME در منطقه ایران را داشته باشیم تا بر اساس آن تعداد ایستگاه‌های در دسترس و همچنین میزان HDOP محاسبه شود. شکل ۲ (راست) نشان می‌دهد که در هر نقطه از کشور ایران چه تعداد ایستگاه DME (در ارتفاع ۱۸ کیلومتری) در دسترس است که با توجه به پوشش خوب آن، در تمامی مناطق کشور می‌توان از ناوبری DME/DME بهره برد. شکل ۲ (چپ) کمیت HDOP روی آسمان کشور را نشان می‌دهد که نواحی غرب و جنوب غرب کشور از HDOP بالاتری نسبت به دیگر نواحی برخوردار هستند و این به دلیل پوشش کم ایستگاه‌های DME در این نواحی است که با مقایسه دو شکل مشخص می‌شود.

۲-۵- موقعیت یابی با DME/DME روی آسمان ایران

در این بخش موقعیت یابی هواپیما با استفاده از پوشش ایستگاه‌های DME موجود در سطح کشور ارزیابی می‌شود. پرواز شبیه‌سازی شده از شمال غرب به سمت جنوب شرق ایران است. مسیر پروازی در شکل ۳ نشان داده شده است. در طول پرواز، موقعیت یابی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های DME انجام می‌شود که در شکل ۴ نتیجه حاصل از این موقعیت یابی دیده می‌شود. نمودار اول شکل ۴ تعداد ایستگاه‌های در میدان دید در هر لحظه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در هیچ زمانی تعداد ایستگاه‌ها کمتر از سه نیست و پوشش مناسب است. در طول پرواز چیدمان ایستگاه‌های در میدان دید نیز مهم است که منجر به عددی برای HDOP می‌شود (نمودار دوم شکل ۴) که به دلیل پوشش مناسب در تمام زمان‌ها کمتر از ۱/۵ است. این میزان HDOP عدد بسیار مناسبی است که نشان می‌دهد موقعیت ایستگاه‌ها برای مسیر پروازی مورد نظر مطلوب می‌باشد. بنابراین تنها عامل برای کاهش دقت موقعیت یابی مربوط به خطای DME می‌شود. نمودار سوم شکل ۴ میزان خطای افقی حاصل از موقعیت یابی از طریق DME/DME را نشان می‌دهد که ملاحظه می‌شود در اکثر مواقع کمتر از ۱ کیلومتر است. این میزان خطا با توجه به اینکه از هیچ سامانه ناوبری دیگری همچون INS و یا GNSS استفاده نمی‌شود برای فاز میانی پرواز، مناسب است.

با توجه به اینکه در بسیاری از مواقع خطای ناوبری کمتر از ۰/۳ ناتیکال مایل است، بنابراین این سیستم یکی از الزامات APNT که دقت ناوبری RNAV-0.3 لازم دارد را به لحاظ پوشش و دقت می‌تواند برآورد



شکل ۳ - مسیر پروازی در چهار زمان مختلف

دقت (DOP^۱) سنجیده می‌شود که به ماتریس H وابسته بوده و برابر

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{trace}\{H_k^T H_k\}^{-1}}$$

است با:

۳-۴- تلفیق DME/DME با فیلتر کالمن توسعه یافته

برای تخمین موقعیت با استفاده از تلفیق DME/DME از طریق فیلتر کالمن، ابتدا باید مدل فرایند یا سیستم و مدل مشاهده یا اندازه گیری مشخص شود. مدل فرایند را یک مدل سرعت-ثابت فرض می‌کنیم. با فرض اینکه بازه زمانی نمونه برداری کوتاه است، فرض سرعت ثابت در بازه‌های زمانی کوتاه برای هواپیما دور از ذهن نیست. با توجه به این فرض، مدل سرعت-ثابت به صورت معادلات (۹) حاصل می‌شود.

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta t \cdot V_k^x, V_{k+1}^x = V_k^x \\ y_{k+1} = y_k + \Delta t \cdot V_k^y, V_{k+1}^y = V_k^y \\ z_{k+1} = z_k + \Delta t \cdot V_k^z, V_{k+1}^z = V_k^z \\ e_{k+1} = e_k + \Delta t \cdot V_k^e, V_{k+1}^e = V_k^e \end{cases} \quad (9)$$

که $[x_k \ y_k \ z_k]$ موقعیت و $[V_k^x \ V_k^y \ V_k^z]$ سرعت هواپیما است. با توجه به مدل سرعت ثابت، مدل فرایند به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$X_{k+1} = F \cdot X_k + W_n, \rightarrow F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

که W_n نویز مدل یا فرایند و F ماتریس انتقال متغیر حالت است. مدل مشاهده نیز بر اساس اندازه گیری فاصله توسط سامانه DME به دست می‌آید که در رابطه (۲) بیان شده است. بنابراین مدل مشاهده یا اندازه گیری را می‌توان به صورت زیر نوشت (نویز اندازه گیری):

$$Z_k = H \cdot X_k + V_n, \rightarrow H = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_1}{d_1} & 0 & \frac{\Delta y_1}{d_1} & 0 & \frac{\Delta z_1}{d_1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\Delta x_n}{d_n} & 0 & \frac{\Delta x_n}{d_n} & 0 & \frac{\Delta x_n}{d_n} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

با به دست آمدن مدل فرایند و مدل اندازه گیری، فیلتر کالمن توسعه یافته EKF، قابل پیاده سازی است که در (۱۲) نشان داده است.

$$\begin{cases} X_k^- = F \cdot X_{k-1}, P_k^- = F \cdot P_{k-1} \cdot F + Q \\ K_k = P_k^- \cdot \frac{H^T}{H P_k^- H^T + R}, P_k = (I - K_k H) P_k^- \\ X_k = X_k^- + K_k (Z_k - H X_k^-) \end{cases} \quad (12)$$

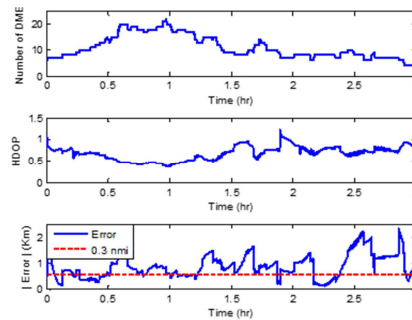
که P_k ماتریس هم وردایی خطای مدل و Q ماتریس هم وردایی خطای اندازه گیری است. همان گونه که در این الگوریتم مشخص است، با فراهم شدن هر اندازه گیری، تخمین بروز رسانی شده و دقیق تر می‌شود.

۵- شبیه‌سازی و ارزیابی

شبیه سازی الگوریتم موقعیت یابی DME/DME بر اساس ایستگاه‌های موجود در کشور انجام شده و در ادامه شرح داده می‌شود.

^۱ Dilution of Precision (DOP)

- Intentional and Unintentional RF Interference, in Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation, California, 2017.
- [5] Carroll J. V., Vulnerability assessment of the US transportation infrastructure that relies on the global positioning system, The Journal of Navigation, vol. 56, no. 2, pp. 185-193, 2003.
- [6] Narins M., Alternative Positioning, Navigation, and Timing Initiative: Assumptions and Requirements, in FAA APNT Public Meeting, 2010.
- [7] Eldredge L., Enge P., Harrison M., Kenagy R., Lo S., Loh R., Lilly R., Narins M. and Niles R., Alternative Positioning, Navigation & Timing (PNT) Study, in International Civil Aviation Organisation Navigation Systems Panel (NSP), Working Group Meetings, Montreal, Canada, 2010.
- [8] Understanding Required Navigation Performance (RNP) and Area Navigation (RNAV) Operations, Universal Avionics Systems Corporation, 2013.
- [9] Ostroumov I. V. and Kuzmenko N. S., Accuracy estimation of alternative positioning in navigation, in 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, 2016.
- [10] Vitan V., Berz G. and Solomina N., Assessment of current DME performance and the potential to support a future APNT solution, in IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015.
- [11] I.C.A.O., PERFORMANCE-BASED NAVIGATION MANUAL, I.C.A.O., 2012.
- [12] Kim E., Investigation of APNT optimized DME/DME network using current state-of-the-art DMEs: Ground station network, accuracy, and capacity, in IEEE/ION PLANS, Kansas, USA, 2012.
- [13] Lo S., Peterson B., Akos D., Narins M., Loh R. and Enge P., Alternative Position Navigation & Timing (APNT) Based on Existing DME and UAT Ground Signals, in Proceedings of the Institute of Navigation GNSS Conf., OR, 2011.
- [14] Lo S., Chen Y., Enge P., Peterson B., Erikson R. and Lilley R., Distance measuring equipment accuracy performance today and for future alternative position navigation and timing (APNT), in Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, TN, 2013.
- [15] Lo S., Pseudolite alternatives for alternate positioning, navigation, and timing (APNT), in FAA White Paper, 2012.
- [16] Kim E., Hybrid APNT architecture using DME/DME and multilateration, in IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC), Williamsburg, VA, 2012.
- [17] Lilley R. and Erikson R., DME/DME for Alternate Position, Navigation, and Timing, in APNT White Paper, 2012.
- [18] Jalloul T., Ajib W., Yeste-Ojeda O. A., Landry R. and Thibeault C., DME/DME navigation using a single low-cost SDR and sequential operation, in IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC), CO, USA, 2014.
- [19] Chen Y. H., Lo S., Akos D., Wong G. and Enge P., A testbed for studying automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) based multilateration range and positioning performance to support alternative position navigation and timing (APNT), in Proceedings of the 26th ION GNSS+ 2013, Nashville, TN, 2013.
- [20] Lo S., Chen Y. H., Enge P., Pelgrum W., Li K., Weida G. and Soelter A., Flight Test of a Pseudo Ranging Signal Compatible with Existing Distance Measuring Equipment (DME) Ground Stations, in Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, California, USA, 2016.
- [21] Osechas O., Nossek E., Belabbas B. and Meurer M., A Modular Approach to Integrity for APNT, in Proceedings of the 29th ION GNSS+, Portland, Oregon, 2016.
- [22] Saberi M. and Kahe G., Evaluation of alternative navigation system for satellite navigation, focusing on the conditions of Iran, in 3rd National Conference on Avionics, Shahid Sattari University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2015.



شکل ۴ - پوشش ایستگاه‌های DME در مسیر پروازی

می‌نماید. در مواقع دیگری که دقت ناوبری کمتر از ۰/۳ ناتیکال مایل است، باید با روش‌هایی دقت را افزایش داد. این روش‌ها می‌تواند بهبود عملکرد الگوریتم محاسباتی، اصلاح مسیر، احداث ایستگاه‌های جدید و یا تلفیق یک سیستم دیگر با DME/DME باشد. به عنوان مثال می‌توان از تلفیق INS و DME/DME استفاده کرد که ناوبری ایترسی و تجهیزات آن در هواپیما معمولاً موجود است. البته همان گونه که در [۱۲] نیز پیشنهاد شده است، می‌توان نسخه‌های جدیدتر DME را که دقت فاصله سنجی بالاتری دارند، به تدریج جایگزین سیستم‌های قدیمی DME نمود تا بتوان الزامات را پوشش داد.

۶- نتیجه‌گیری

بسیاری از کشورهای جهان به خصوص کشورهای پیشرفته روش DME/DME را به عنوان یک گزینه مناسب برای APNT انتخاب کرده‌اند. با توجه به زیرساخت بسیار مناسب و توزیع و پراکندگی بسیار خوب ایستگاه‌های DME در کشور، روش DME/DME برای ج.ا. ایران نیز یک گزینه در دسترس و کم هزینه برای APNT است. در همین راستا ناوبری تلفیقی DME/DME با استفاده از فیلتر غیر خطی کالمن طراحی و توسعه داده شده است. ارزیابی‌های انجام شده بر اساس ایستگاه‌های DME موجود در کشور نشان می‌دهد که این سامانه دقت و دسترس پذیری مناسب بر اساس الزامات RNAV/RNP را می‌تواند فراهم نماید و بنابراین می‌تواند گزینه بسیار خوبی برای APNT در کشور باشد. با توجه به پراکندگی ضعیف ایستگاه‌های DME به خصوص در نقاط مرزی، بهبود توزیع آنها در نقاطی که پوشش ضعیف است، می‌تواند وضعیت را بهبود بخشد. با توجه به اینکه هواپیماها عموماً دارای سامانه INS نیز هستند بنابراین با تلفیق DME/DME با INS می‌توان کارایی سیستم را باز هم بهبود بخشید که این برای کارهای آتی در نظر گرفته شده است. برای افزایش دقت نیز می‌توان ایستگاه‌های DME قدیمی را به تدریج با ایستگاه‌های جدیدتر که دقت بالاتری دارند جایگزین نمود [۱۲].

۷- مراجع

- [1] Wyatt D. and Tooley M., Aircraft Communications and Navigation Systems, 2th ed., London, Taylor & Francis, 2017.
- [2] Lo S., Enge P., Niles F., Loh R., Eldredge L. and Narins M., Preliminary assessment of alternative navigation means for civil aviation, in Proceedings of the ION ITM, 2010.
- [3] Swazek P. F., Hartnett R. J. and Seals K. C., APNT for GNSS Spoof Detection, in Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation, CA, 2017.
- [4] Osechas O., Perea S., Belabbas B. and Meurer M., Use of APNT to Protect GNSS-Based RNP Services from