

موقعیت‌یابی دریایی مستقل از سامانه‌های ماهواره‌ای با استفاده از دو ارتفاع متوالی از خورشید

سعید علیپور گیلده^{۱*}، علی محمدی^۲، احمد ذادق آبادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت دریایی، دانشکده ناوبری و فرماندهی کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

۲- استادیار گروه مدیریت دریایی، دانشکده ناوبری و فرماندهی کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

۳- استاد گروه مدیریت دریایی، دانشکده ناوبری و فرماندهی کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

چکیده

دریانوردی اقیانوسی وابستگی زیادی به تعیین موقعیت واحدهای شناور دارد، از گذشته که ناوبری ماهواره‌ای وجود نداشت تمامی واحدهای شناور که در اقیانوس دریانوردی می‌کردند، با استفاده از اجرام سماوی و خورشید موقعیت خود را محاسبه می‌نمودند. با ظهور ناوبری ماهواره‌ای، تعیین موقعیت با استفاده از اجرام سماوی کم رنگ شده و فقط منحصر به موارد اضطراری که واحد شناور قادر به استفاده از تجهیزات ماهواره‌ای نیست، شده است. از طرفی می‌دانیم یکی از بزرگترین نقطه ضعف‌ها در تعیین موقعیت نجومی در روش تقاطع و سایر روشهای برداری و ترسیمی، وابسته به موقعیت تقریبی یا حداقل به عرض جغرافیایی تقریبی است. در این پژوهش الگوریتم تعیین موقعیت یک ناظر متحرک یا ثابت با اندازه‌گیری دو ارتفاع متوالی از خورشید توسعه داده شده است. از نکات بارز در این الگوریتم این است که برای محاسبه موقعیت، نیازی به موقعیت تقریبی یا اولیه ناظر نیست. از طرفی وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های مشابه، نحوه محاسبه و میزان دقت موقعیت خورشید می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با تعیین زمان‌بندی مناسب بین دو ارتفاع متوالی در حدود ۱۰ الی ۲۰ دقیقه می‌توان بهترین نتیجه از تعیین موقعیت را بدست آورد و دقت این روش در حدود 10^{-1} دقیقه است. در صورت استفاده از روش نظری بکارگرفته شده و افزایش دقت محاسبات مکان خورشید، می‌توان به دقت‌های مطلوبی در ناوبری نجومی رسید، که راهگشای تحقیقات آینده در برداشت ارتفاع خورشید با روش‌های بسیار دقیق (به جز سکستانت) است.

کلیدواژه‌ها: تعیین موقعیت، ناوبری اقیانوسی، خورشید، ارتفاع.

* نویسنده مکاتبه کننده: نوشهر، خیابان شهید کرمی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره).

تلفن: ۰۱۱۵۲۳۵۳۰۹۱

۱- مقدمه

امروزه استفاده از سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ (GNSS) موجب کاهش استفاده از روش سنتی و روابط ریاضی شده است. با این حال در مواردی مانند، فقدان گیرنده جی پی اس (GPS) یا عدم دسترسی به ماهواره‌ها به دلیل وجود شراره‌های خورشیدی، طوفان‌های مغناطیسی یا دلایل دیگر (نظیر ایجاد عمدی اختلال در دسترسی به سیگنال‌های این سامانه) که استفاده از GPS عملاً امکان پذیر نیست، استفاده از ناوبری نجومی اجتناب ناپذیر است. در ناوبری نجومی با استفاده از ارتفاع اجرام سماوی (زاویه بین جرم سماوی و افق) که با استفاده از سکستانت اندازه‌گیری می‌شود، موقعیت واحد شناور محاسبه خواهد شد. بهترین روش در حال حاضر در ناوبری نجومی روش تقاطع است که در این روش یک موقعیت تقریبی با استفاده از ناوبری تخمینی در نظر گرفته می‌شود. سپس ارتفاع جرم سماوی در آن موقعیت تقریبی ابتدا اندازه‌گیری و سپس محاسبه می‌شود. اختلاف این دو ارتفاع اندازه‌گیری و محاسبه شده تحت عنوان تقاطع^۲ نامیده شده و موقعیت صحیح واحد شناور از نقطه تقریبی در جهت سمت جرم سماوی به اندازه اختلاف ارتفاع به دست می‌آید. این روش امروزه همچنان در واحدهای شناور آموزش داده شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای افزایش دقت موقعیت واحد شناور، روش تقاطع برای سه جرم سماوی به صورت هم زمان محاسبه شده و نتیجه آن سه خط مکان می‌باشد، که موقعیت دقیق

واحد شناور از محل برخورد این سه خط مکان تعیین می‌شود. از معایب این روش این است که دقت معمول آن در بهترین شرایط حدود یک مایل است ولی عموماً دریانوردان خطایی در حدود چند مایل را تجربه خواهند کرد [۱]. این روش جدای از اندازه‌گیری ارتفاع حداقل دو جرم سماوی با سکستانت، نیاز به ثبت زمان دقیق توسط یک زمان‌سنج، استفاده از تقویم نجومی دریایی برای پیدا کردن زاویه ساعتی گرینویچ^۳ (GHA) و زاویه میل^۴ (DEC) اجرام مذکور و همچنین دانستن موقعیت فرضی یا تقریبی ناظر دارد. در ناوبری تخمینی موقعیت کشتی در طول مسیر حرکت آن با استفاده از ثبت و بروزرسانی موقعیت براساس سرعت و سمت یا آزیموت مسیر کشتی پیش‌بینی می‌شود. در ناوبری تخمینی، ناظر معمولاً موقعیت دقیق را با ترسیم خطوط موقعیت روی نقشه پیدا می‌کند. روش‌هایی که به طور تاریخی عمدتاً توسط سامنر (۱۸۳۷) و سنت هیلایر (۱۸۷۵) معرفی شده‌اند [۲]. لازم به ذکر است که ناوبری تخمینی و روش‌های ترسیمی مستعد خطا بوده و گاهی برای کاربر تازه کار چالش برانگیز هستند. در مورد محاسبه یک نقطه دقیق با استفاده از روش‌های کاملاً ریاضی (غیر ترسیمی) و تحلیلی، منابع قابل توجهی وجود دارد [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰]. روش تقاطع دو خط مکان نجومی روی کره زمین در مختصات دکارتی از مهم‌ترین روش‌های تحلیلی است [۱۱]. همچنین روش برداری جامعی وجود دارد که تقاطع خطوط مکان نجومی را روی کره زمین به صورت برداری محاسبه می‌کند [۱۲]. برخی از این

^۱Global Navigation Satellite System^۲Global Positioning System^۳Intrecept Method^۴Greenwich Hour Angle^۵Declination

از آن برای حدس اولیه برای ناظر متحرک استفاده نمود و عملاً پیش فرض حدس اولیه برای شروع الگوریتم را نیز حذف کرد [۱۴]. مزایای این روش عبارتند از:

الف) سادگی نسبی ریاضیاتی و حل مستقیم بدون هیچ پیش فرضی، که حتی با یک ماشین حساب غیر قابل برنامه ریزی (حداقل برای حالت ناظر ساکن) هم امکان پذیر است. ب) نیازی به انتخاب اجرام سماوی خاصی نیست و به عنوان مثال هر جرمی که در دو نیم کره شرقی و غربی نسبت به نصف النهار ناظر، قرار داشته باشد در این روش قابل استفاده است.

ج) استفاده از معادله و روابط برای محاسبه موقعیت اجرام سماوی منجر به حذف ضرورت استفاده از تقویم نجومی دریایی در محاسبه موقعیت اجرام می گردد.

د) دقت در محاسبه نقطه نجومی بستگی به خطای سکستانت دارد و روش پیروس (۲۰۱۸) خطایی را به مسئله تحمیل نمی کند. ه) در مورد مسئله انتقال خط مکان، استفاده از روش تکراری نیوتن و ادغام با روش ناظر ساکن نیاز به عرض جغرافیایی تقریبی را حذف کرده و به طور قابل توجهی تعداد دفعات تکرار مورد نیاز را کاهش می دهد، بنابراین بدست آوردن جواب را به راحتی با یک ماشین حساب غیر قابل برنامه ریزی امکان پذیر می سازد.

در این پژوهش با استفاده از روش پیروس (۲۰۱۸)، ناوبری نجومی با اندازه گیری دو خط ارتفاع از خورشید با اختلاف زمانی مشخص انجام می شود [۱۴]. بخش متمایز این پژوهش با روش پیروس (۲۰۱۸) تمرکز بر جنبه دقیق سازی موقعیت محاسبه شده و کاهش خطای آن است. پیروس موقعیت خورشید را بر مبنای روش های ساده که عموماً در تقویم های نجومی دریایی یافت می شوند، به دست آورده بود در صورتی که

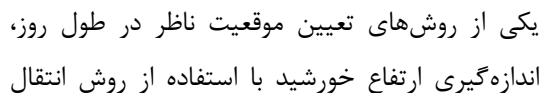
روش ها به موقعیت تقریبی نیاز ندارند، در حالی که برخی دیگر به یک موقعیت تقریبی یا حداقل عرض جغرافیایی تقریبی نیاز دارند. از این عرض جغرافیایی برای انتقال خط مکان استفاده می شود.

هوکستابل (۲۰۰۶) با استفاده از مثلثات کروی، نقطه تقاطع بین دو خط مکان نجومی روی کره زمین را محاسبه کرد [۱۳]. روش نوآورانه او به دلیل استفاده از مثلثات کروی برای دریانوردان ملموس تر بوده و بیشتر مورد توجه قرار گرفت. پیروس (۲۰۱۸) با استفاده از ایده هوکستابل (۲۰۰۶) و دوبه (۱۹۷۹) و همچنین استفاده از یک روش تکراری، موفق به حل مسئله انتقال خطوط مکان نجومی شد [۱۳، ۱۴]. انتقال خطوط مکان نجومی در گذشته فقط با استفاده از روش های ترسیمی مورد استفاده قرار می گرفت و محاسبات ریاضی منحصر به محاسبه خط مکان می پرداختند.

ناوبری نجومی به روش پیروس (۲۰۱۸) به شکل زیر انجام می شود: الف) برای یک ناظر ساکن، به طور مستقیم و به صورت تحلیلی دو نقطه دقیق ممکن را محاسبه می کند (این دو نقطه فاصله زیادی از یکدیگر داشته و افسر ناوبر با استدلال می تواند یکی را حذف کرده و نقطه درست را انتخاب کند). ب) موقعیت یک ناظر متحرک با استفاده از انتقال خط مکان و روش عددی تکراری، بدون نیاز به موقعیت تقریبی حاصل می شود. برای شروع الگوریتم تکرار، این روش به دو حدس اولیه برای عرض جغرافیایی نیاز دارد که البته این حدس های اولیه لازم نیست چندان دقیق باشند و این حدس ها با اطلاعات قبلی که در بین چه عرض هایی دریانوردی صورت گرفته، قابل دستیابی است. ولی پیروس (۲۰۱۸) با استفاده از روش ناظر ساکن عرض جغرافیایی نسبتاً درست ناظر را محاسبه کرده و

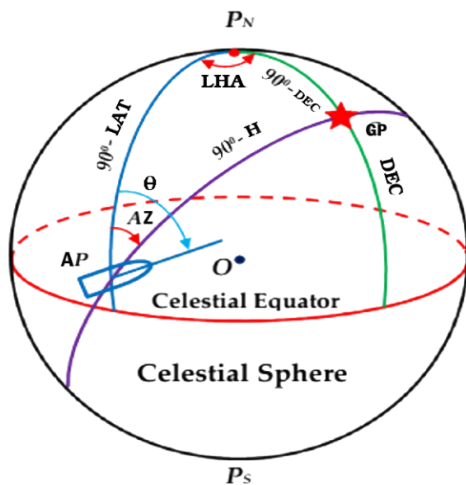
استفاده از روش‌های دقیق‌تر می‌تواند نتایج بهتری را به دنبال داشته باشد. از طرف دیگر اختلاف زمانی بین رصدهای خورشید از دیگر مواردی است که می‌تواند در دقت حل مسئله تاثیرگذار باشد. لذا در این پژوهش از دو روش دقیق میچالسکی (۱۹۸۸) و جین میوس (۱۹۹۸) برای محاسبه موقعیت خورشید در آسمان استفاده شده است [۱۶ و ۱۵]. ضمناً این دو روش دقیق با نتایج حاصل از اپلیکیشن اَستِرکلکیولیتور^۱ از شرکت دی‌بی‌جی‌کلکیولیتور^۲ مقایسه شده است. در بخش بعدی مبانی نظری روش تکراری برای انتقال خط مکان خورشید و در ادامه خطای حاصل از محاسبه موقعیت مکانی مورد بحث قرار می‌گیرد.

در ناوبری نجومی زمین کاملاً کروی فرض می‌شود. برای هر ارتفاعی از یک جرم سماوی، با موقعیت جغرافیایی^۳ ($GP1$)، که توسط زاویه ساعتی نجومی^۴ ($GHA1$) و زاویه میل $Dec1$ تعیین می‌شود، تعداد نامحدودی از موقعیت‌های نجومی وجود دارند که فاصله یکسانی از $GP1$ دارند. مرکز این دایره روی $GP1$ است و شعاع آن (در اصطلاح مثلثات کروی) برابر با فاصله سمت الراس جرم Z (که $Z1=90^{\circ}-H1$ و ارتفاع جرم سماوی شماره یک) است. هر ناظر در طول محیط این دایره، بدون توجه به موقعیت خود در دایره، این ارتفاع ثابت را اندازه‌گیری خواهد کرد. این دایره خط مکان نجومی با ارتفاع یکسان است. در شکل (۱) ابتدا ناظر ما در موقعیت $Pos1$ روی سطح زمین، یک جرم سماوی



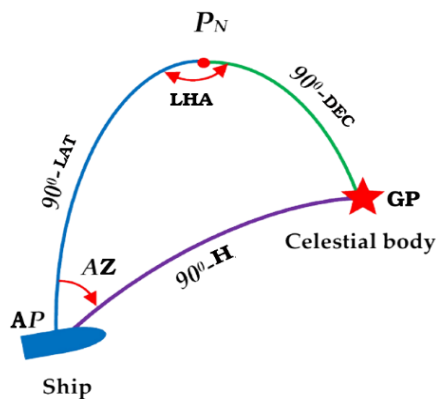
Geographic Position

که به ترتیب عبارتند از زاویه ساعتی محلی^۴ (LHA)، زاویه آزیموت جرم سماوی (AZ) و زاویه بین ناظر و قطب با محوریت جرم سماوی است. این مثلث همراه با اجزای آن شامل اضلاع و زاویه به صورت مستقل در شکل (۳) نشان داده شده است. در این پژوهش زاویه آزیموت، زاویه بین نصف النهار عبوری از قطب و نصف النهار ناظر در جهت عقربه های ساعت است.



شکل ۲: روابط بین موقعیت واحد شناور و جرم سماوی در

مثلث نجومی [۱۷]



شکل ۳: مثلث کروی برای بدست آوردن موقعیت

کشتی [۱۷]

خط مکان می باشد. در این روش در زمان جهانی^۱ (UTC1) ارتفاع خورشید اندازه گیری می شود و سپس ارتفاع دیگری از خورشید با اختلاف زمانی ΔT که $UTC2 = UTC1 + \Delta T$ می باشد دایره مکان در زمان UTC1 را به اندازه مسافت پیموده شده توسط ناظر در جهت حرکت یا آزیموت مسیر شناور انتقال داد. در نتیجه دو خط مکان در زمان UTC2 حاصل می شود که یکی مستقیماً اندازه گیری شده و دیگری از زمان UTC1 انتقال داده شده است. محل تقاطع این دو دایره با یکدیگر موقعیت ناظر را تعیین می کند. در این پژوهش با استفاده از روش انتقال خط مکان خورشید در طول روز موقعیت واحد شناور محاسبه می شود. در ادامه روابط مورد استفاده برای انتقال خط مکان روی کره زمین بحث می شود.

۳- روش تحقیق

برای حل موقعیت روی کره زمین از مثلث کروی و روابط ریاضی حاکم بر مثلث کروی استفاده می شود. این مثلث به گونه ای است که یک گوشه آن قطب شمال (PN) گوشه دیگر نقطه فرض^۲ (AP) که نقطه انتخابی شناور بوده و گوشه سوم محل قرار گرفتن جرم سماوی (GP) است. این مثلث در شکل (۲) آورده شده است. اجزای این مثلث از سه ضلع تشکیل شده است که عبارتست از متمم عرض جغرافیایی (ضلع APPN در شکل (۲))، متمم ارتفاع جرم سماوی (ضلع APGP) و متمم DEC برابر (ضلع PNGP) و همچنین سه زاویه

^۱Universal Time Coordinated

^۲ Pole North

^۳Assumed Position

^۴Local Hour Angle

LHA ناظر از رابطه (۱) یا (۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه (۱)} \quad GHA + Lon \leq 180^\circ \quad \text{سپس} \quad LHA = GHA + Lon$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad GHA + Lon > 180^\circ \quad \text{سپس} \quad LHA = GHA + Lon - 360^\circ$$

هنگامی که زاویه ساعتی محلی بین نصف‌النهار عبوری از جرم و ناظر کمتر از 180° شود یعنی اینکه جرم در غرب ناظر و هنگامی که این زاویه بیشتر از 180° شود یعنی جرم در شرق ناظر قرار گرفته است. لذا زمانی که جرم در شرق ناظر قرار می‌گیرد (رابطه (۲))، مقدار زاویه ساعتی از 360° کم می‌شود. همچنین قراردادهای زیر اعمال می‌شوند:

الف) طول جغرافیایی شرقی: مثبت، ب) طول جغرافیایی غربی: منفی، ج) عرض جغرافیایی شمالی: مثبت، د) عرض جغرافیایی جنوبی: منفی، ه) زاویه نصف‌النهار شرقی: منفی، و) زاویه نصف‌النهار غربی: مثبت، ز) میل شمالی: مثبت، ی) میل جنوبی: منفی.

قانون کسینوس‌ها یکی از مهمترین روابط حاکم در مثلث کروی است که کسینوس یک ضلع به صورت رابطه (۳) برحسب اضلاع دیگر بیان می‌شود.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \cos(a) = \cos(b)\cos(c) + \sin(b)\sin(c)\cos(A)$$

در رابطه (۳) اضلاع مثلث کروی a, b, c و $a = 90^\circ - H1$ می‌شود:

رابطه (۴) $\sin H1 = \cos(90 - Lat1) \cos(90 - Dec1) + \sin(90 - Lat1) \sin(90 - Dec1) \cos(LHA1)$

رابطه (۵) $\sin H2 = \cos(90 - Lat2) \cos(90 - Dec2) + \sin(90 - Lat2) \sin(90 - Dec2) \cos(LHA2)$

رابطه (۶) $\sin H1 = \sin Lat1 \sin Dec1 + \cos Lat1 \cos Dec1 \cos(GHA1 + Lon1)$

رابطه (۷) $\sin H2 = \sin Lat2 \sin Dec2 + \cos Lat2 \cos Dec2 \cos(GHA2 + Lon2)$

رابطه (۸) $Lon2 = S. a \cos\left(\frac{\sin H2 - \sin Lat2 \sin Dec2}{\cos Lat2 \cos Dec2}\right) - GHA2$

که زاویه ساعتی محلی بین نصف‌النهار عبوری از جرم و ناظر کمتر از 180° شود یعنی اینکه جرم در غرب ناظر و هنگامی که این زاویه بیشتر از 180° شود یعنی جرم در شرق ناظر قرار گرفته است. لذا زمانی که جرم در شرق ناظر قرار می‌گیرد (رابطه (۲))، مقدار زاویه ساعتی از 360° کم می‌شود. همچنین قراردادهای زیر اعمال می‌شوند:

الف) طول جغرافیایی شرقی: مثبت، ب) طول جغرافیایی غربی: منفی، ج) عرض جغرافیایی شمالی: مثبت، د) عرض جغرافیایی جنوبی: منفی، ه) زاویه نصف‌النهار شرقی: منفی، و) زاویه نصف‌النهار غربی: مثبت، ز) میل شمالی: مثبت، ی) میل جنوبی: منفی.

قانون کسینوس‌ها یکی از مهمترین روابط حاکم در مثلث کروی است که کسینوس یک ضلع به صورت رابطه (۳) برحسب اضلاع دیگر بیان می‌شود.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \cos(a) = \cos(b)\cos(c) + \sin(b)\sin(c)\cos(A)$$

در رابطه (۳) اضلاع مثلث کروی a, b, c و $a = 90^\circ - H1$

با فرض ثابت بودن V و θ در بازه زمانی $UTC1$ تا $UTC2$ ، انتگرال رابطه (۱۲) را می توان به صورت تحلیلی، طبق رابطه (۱۳) حل نمود [۵].
اگر $|Lat2| < 90 - \frac{19}{12}V(UTC2 - UTC1)$ باشد، خطای ناشی از تقریب کم تر از $0.1'$ است، [۱۴]. کسر رابطه (۶) از رابطه (۷) منجر به رابطه (۱۴) خواهد شد:

$$Lat1 = Lat2 - \Delta Lat \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\Delta Lat = \frac{V \cos \theta (UTC2 - UTC1)}{60} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$Lon1 = Lon2 - \Delta Lon \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\Delta Lon = \frac{1}{60} \int_{UTC1}^{UTC2} \frac{V \sin \theta dt}{\cos LAT} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\Delta Lon = \frac{V \sin \theta (UTC2 - UTC1)}{60 \cos Lat2} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sin Lat1 \sin Dec1 - \sin Lat2 \sin Dec2 + \cos Lat1 \cos Dec1 \cos(GHA1 + Lon1) - \cos Lat2 \cos Dec2 \cos(GHA2 + Lon2) - \sin H1 + \sin H2 = 0 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

رابطه (۸) محاسبه کرد. الگوریتم و فلوچارت روش در ضمیمه نشان داده شده است.

برای محاسبه رابطه (۱۶) به دو مقدار اولیه X_0 و X_1 نزدیک به ریشه نیاز است. این حدس اولیه عدم نیاز به یک موقعیت فرضی (یا به طور دقیق تر فقط عرض جغرافیایی) را به خطر نمی اندازد، زیرا:

الف) در روش نیوتن، انتخاب مقادیر اولیه معقول و بسیار دور از ریشه حقیقی صحت نتیجه را تحت تاثیر قرار نمی دهد و فقط تنها تعداد تکرار در محاسبات افزایش می یابد.

ب) می توان با استفاده از روش تقاطع بین خطوط مکان و با در نظر گرفتن ناظر به صورت ثابت، اولین مقدار اولیه را بدون استفاده از ناوبری تخمینی پیدا کرد

در صورتی که جرم در شرق نصف النهار ناظر رصد شود مقدار S برابر است با -1 و در غیر این صورت $+1$ خواهد بود (مربوط به استدلال روابط (۱) و (۲) که زاویه ساعتی کوچکتر یا بزرگتر از 180° می شود). همچنین روابط (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) را برای حرکت واحد شناور داریم.

با جایگذاری $Lon2$ از رابطه (۸)، $Lat1$ از روابط (۹) و (۱۰) و $Lon1$ از روابط (۱۱) و (۱۲)، عبارت رابطه (۱۴) تابعی از F بر مبنای $Lat2$ برابر رابطه (۱۵) حاصل می گردد:

$$F(Lat2) = 0 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

ما می توانیم با استفاده از تکرار روش نیوتن، ریشه عددی ($X = Lat2$) را طبق رابطه (۱۶) بیابیم:

$$x_n = x_{n-1} - F(x_{n-1}) \frac{x_{n-1} - x_{n-2}}{F(x_{n-1}) - F(x_{n-2})}$$

وقتی که $|x_n - x_{n-1}|$ کم تر از 0.0001° شود محاسبات پایان می یابد. سپس می توان $Lon2$ را از

موقعیت است. روش‌های موقعیت‌یابی در اقیانوس که دارای خطای زیادی می‌باشند، مورد استقبال قرار نگرفته و رها می‌شوند. از اینرو ابتدا در این پژوهش مثال حل شده در مقاله پیروس (۲۰۱۸) با حالت‌های گوناگون برای کاهش خطا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۱۴]. سپس برای انجام آزمایش واقعی طرحواره عددی از یک خودرو در یک مسیر جاده ای (اتوبان همت) برابر سناریوی طرح‌ریزی شده استفاده می‌گردد. بدین منظور در تاریخ ۲۷ ماه می ۲۰۲۳، ابتداء در ساعت ۰۶:۴۴:۴۷/۶ به وقت گرینویچ در ورودی اتوبان همت با اپلیکیشن آسترکلکیولیتور متعلق به شرکت دی بی‌جی کلکیولیتور، موقعیت جغرافیایی ناظر (موقعیت جغرافیایی برای راستی آزمایشی ثبت شده است که این اپلیکیشن نیز موقعیت را از ردیاب ماهواره‌ای گوشی دریافت می‌کند) ثبت می‌گردد. این اپلیکیشن که برای مقاصد ناوبری نجومی در دریا نوشته شده است از الگوریتم جین میوس (۱۹۹۸) برای محاسبه موقعیت خورشید در فضا استفاده می‌کند [۱۶]، لذا این اپلیکیشن دارای دقت مناسبی در محاسبات است و تنها نقطه ضعف آن در داده‌های خروجی با دو رقم اعشار است.

نکته بسیار مهم برای استفاده از این اپلیکیشن این است که دو جزء بسیار مهم برای انجام این آزمایش یعنی موقعیت و زمان را با دقت مطلوب محاسبه و سپس با استفاده از زمان و موقعیت دریافتی از طریق دستگاه موبایل، موقعیت خورشید در فضا را بدست آورده و در اختیار کاربر قرار می‌دهد. بنابراین ترکیب اپلیکیشن و سنسورهای موبایل وسیله‌ای مناسب برای آزمایش عملی این طرحواره می‌باشد.

و سپس دومین مقدار اولیه را می‌توان در نزدیکی اولی انتخاب نمود.

همچنین تعیین S در رابطه (۸) به یک موقعیت فرضی نیاز ندارد زیرا:

(الف) یک ناوبر به احتمال زیاد موقعیت نسبی نصف‌النهار خودش را نسبت به شرق و غرب خورشید می‌داند.

(ب) حتی اگر چنین نباشد، این را می‌توان به روش‌های مختلفی استنتاج کرد (برای مثال، با مشاهده عبور خورشید از نصف‌النهار ناظر).

(ج) اگر ناوبر، S را در رابطه (۸) اشتباه انتخاب کند، روش یا همگرا نخواهد شد یا یک موقعیت اشتباه آشکار حاصل می‌شود که تشخیص اشتباه بودن آن به سادگی امکان پذیر است. سپس می‌تواند روش را با S صحیح تکرار کند. با این حال، ناظر باید از اجرام سماوی نزدیک به نصف‌النهار محلی‌اش (زاویه محلی ساعتی جرم نزدیک به صفر) اجتناب کند، زیرا این امر ممکن است به یک راه حل نادرست یا بدون راه حل منجر شود [۸].

۴- داده‌ها و مورد مطالعاتی

در این پژوهش به دلیل اهمیت ناوبری نجومی در دریانوردی اقیانوسی، موقعیت‌یابی واحدهای شناور در طول روز مطالعه شده است. در این روش با استفاده از دو ارتفاع اندازه‌گیری شده متوالی از خورشید می‌توان موقعیت ناظر را تعیین نمود. مبنای این روش انتقال خط مکان و محاسبه نقطه تقاطع آن با خط مکان دوم است. این الگوریتم اولین بار در پژوهش پیروس (۲۰۱۸) معرفی شده است، ولی مورد تجزیه و تحلیل خطا قرار نگرفته است [۱۴]. خطای ناشی از موقعیت‌یابی از مهمترین نکات مورد نظر در محاسبه

سرعت ۲۰ گره و آزیموت مسیر 225° در ساعت ۱۸:۰۰:۰۰ در موقعیت 45° شمالی و 045° غربی، ارتفاع خورشید را (زاویه ساعتی نجومی خورشید برابر با 090° و $53'$ ، میل خورشید برابر با 19° و $45/5'$) 44° و $36/6'$ اندازه گیری می کند، سپس در ساعت ۱۸:۳۰:۰۰ خورشید را در غرب نصف النهار خود با ارتفاع $S=+1$ ، زاویه ساعتی نجومی خورشید برابر با 098° و $23'$ و میل خورشید برابر با 19° و $45/8'$ 39° و $38'$ رصد می نماید. با استفاده از روابط بیان شده ما تخمین می زنیم در زمان مشاهده دوم، کشتی باید در موقعیت 44° و $52/9'$ شمالی و 045° و $10'$ غربی باشد. با بکارگیری روش پیروس (۲۰۱۸)، به حل مجدد مثال ارائه شده می پردازیم. با تعیین مقادیر اولیه $Lat2_0=45^\circ N$ و $Lat2_1=46^\circ N$ و $S=+1$ ، نتایج حاصل در جدول (۱) گزارش شده است.

در نهایت تعیین موقعیت برای ناظر ثابت با استفاده از طرحواره معرفی شده، مورد مطالعه قرار می گیرد. در این حالت ناظر ثابت دو ارتفاع از خورشید در فاصله زمانی کمتر از یک ساعت را اندازه گیری کرده و در نهایت موقعیت را محاسبه می کند. این حالت برای مواردی که ناظر ثابت است و حرکتی ندارد مناسب می باشد.

۵- بحث و نتایج

بمنظور آزمایش طرحواره مورد استفاده به بیان مثال حل شده در مقاله پیروس (۲۰۱۸) می پردازیم [۱۴]. در این مثال یک واحد شناور به فاصله نیم ساعت دو ارتفاع متوالی از خورشید را در بعدازظهر رصد نموده و موقعیت واحد شناور محاسبه می شود، مثال مذکور به شرح ذیل می باشد.

مثال (۱): در تاریخ ۱۸ ماه می ۲۰۱۶ یک شناور با

جدول ۱: محاسبه طول و عرض جغرافیایی شناور به همراه میل و زاویه ساعتی گرینویچ خورشید توسط برنامه نوشته شده

روش	Dec1	Dec2	GHA1	GHA2	Lat2	Long2
پیروس (۲۰۱۸)	$19^\circ 45.5' N$	$19^\circ 45.8' N$	$90^\circ 53.0'$	$98^\circ 23.0'$	$44^\circ 53' N$	$045^\circ 9.9' W$
میچالسکی (۱۹۸۸)	$19^\circ 45.62' N$	$19^\circ 45.88' N$	$90^\circ 53.02'$	$98^\circ 23.01'$	$44^\circ 53.04' N$	$045^\circ 9.8' W$
جین میوس (۱۹۹۸)	$19^\circ 45.46' N$	$19^\circ 45.73' N$	$90^\circ 53.20'$	$98^\circ 23.18'$	$44^\circ 52.9' N$	$045^\circ 10.13' W$

غربی می باشد. از اینرو مقدار خطای موقعیت محاسبه شده توسط روش پیروس (۲۰۱۸)، $0.1'$ در طول و عرض جغرافیایی است که در انطباق کامل با پژوهش مذکور است. بنابراین این طرحواره توسعه یافته در قالب این پژوهش از صحت لازم برخوردار است.

در این مقاله از دو الگوریتم بسیار دقیق میچالسکی (۱۹۸۸) و جین میوس (۱۹۹۸) جهت تعیین موقعیت

مطابق جدول (۱)، طرحواره حل عددی بعد از ۳ بار تکرار همگرا شده و نقطه $Lat2$ (عرض جغرافیایی در ساعت ۱۸:۳۰:۰۰) محاسبه شده است. با استفاده از $Lat2$ می توان $Long2$ (طول جغرافیایی در ساعت ۱۸:۳۰:۰۰) را نیز بدست آورد.

نقطه واقعی واحد شناور در مثال (۱) در ساعت ۱۸:۳۰:۰۰، 44° و $52/9'$ شمالی و 045° و $10'$

شمالی و $10^{\circ}45'$ غربی)، به ترتیب اختلافی برابر 0.19 و 0.13 میل را نشان می‌دهد.

حال نتایج حاصل از آزمایش مجدد طرحواره را در سناریوی طرحریزی شده جاده‌ای مورد بررسی قرار می‌دهیم. در جدول (۲) اطلاعات مختصات خورشید (زاویه GHA و Dec) از این اپلیکیشن برای نقاط شرق به غرب اتوبان همت با اختلاف تقریبی ۱۰ دقیقه زمانی از یکدیگر، نشان داده شده است. هرچند این اپلیکیشن مقدار مختصات خورشید در مکان‌های مورد آزمایش در جدول (۲) را در اختیار کاربر قرار می‌دهد ولی در این پژوهش از دو الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) و جین میوس (۱۹۹۸) برای محاسبه موقعیت خورشید استفاده شده است و از این اپلیکیشن تنها زمان رصد، ارتفاع خورشید و موقعیت ناظر اخذ گردیده است. هدف از بکارگیری این بسته نرم افزاری فقط دریافت خروجی سنسورهای تلفن همراه بوده است.

خورشید در فضا (محاسبه GHA و Dec) استفاده شده است [۱۵ و ۱۶]. نکته قابل توجه در الگوریتم بکار رفته در مقاله پیروس (۲۰۱۸)، موقعیت خورشید و کمیت-های GHA و Dec است که نقش بسیار مهمی در افزایش دقت محاسبات و در نتیجه در صحت موقعیت‌شناور دارند، مورد بحث قرار نگرفته است [۱۴].

حل مثال (۱) با استفاده از الگوریتم محاسبه دقیق خورشید یعنی الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) و جین میوس (۱۹۹۸) نیز در جدول (۱) گزارش شده است. بر این اساس GHA و Dec خورشید در روش میچالسکی (۱۹۸۸) به ترتیب اختلافی در حدود $0.12'$ و $0.2'$ و در روش جین میوس (۱۹۹۸) به ترتیب اختلافی در حدود $0.4'$ و $0.2'$ با مقادیر بکار رفته در پیروس (۲۰۱۸) دارند. مقدار خطای موقعیت محاسبه شده با استفاده از دو الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) و جین میوس (۱۹۹۸) با موقعیت مورد انتظار 44° و $52.9'$

جدول ۲: اطلاعات موقعیت خورشید برگرفته از نرم افزار اینترنتی آسترکلیکولیتور

نقطه	زاویه ساعتی محلی خورشید (LHA)	میل خورشید (DEC)	ارتفاع خورشید (H)	طول و عرض جغرافیایی GPS	زمان UTC
۱	$LHA=333^{\circ}24.3'$	$Dec=21^{\circ}15.9'N$	$H=62^{\circ}38.6'$	$35^{\circ}45.3'N.051^{\circ}29.4'E$	$UTC:06:44:47.3$
۲	$LHA=335^{\circ}53.4'$	$Dec=21^{\circ}15.9'N$	$H=64^{\circ}27.0'$	$35^{\circ}45.4'N.051^{\circ}28.3'E$	$UTC:06:54:48.2$
۳	$LHA=338^{\circ}12.9'$	$Dec=21^{\circ}16.0'N$	$H=66^{\circ}05.4'$	$35^{\circ}45.4'N.051^{\circ}27.5'E$	$UTC:07:04:9.6$
۴	$LHA=340^{\circ}40.0'$	$Dec=21^{\circ}16.1'N$	$H=67^{\circ}45.3'$	$35^{\circ}45.0'N.051^{\circ}23.9'E$	$UTC:07:14:12.1$
۵	$LHA=342^{\circ}59.5'$	$Dec=21^{\circ}16.1'N$	$H=69^{\circ}15.0'$	$35^{\circ}45.2'N.051^{\circ}18.6'E$	$UTC:07:23:51.4$
۶	$LHA=345^{\circ}24.6'$	$Dec=21^{\circ}16.2'N$	$H=70^{\circ}43.4'$	$35^{\circ}43.7'N.051^{\circ}15.2'E$	$UTC:07:33:45.4$
۷	$LHA=347^{\circ}44.1'$	$Dec=21^{\circ}16.3'N$	$H=72^{\circ}01.7'$	$35^{\circ}41.7'N.051^{\circ}12.4'E$	$UTC:07:43:14.7$
۸	$LHA=352^{\circ}11.8'$	$Dec=21^{\circ}16.4'N$	$H=74^{\circ}01.3'$	$35^{\circ}43.3'N.051^{\circ}10.7'E$	$UTC:08:01:12.6$

محاسبه بدین ترتیب است که با حرکت از نقطه مبدأ به مقصد، مختصات جغرافیایی نقطه مقصد توسط طرحواره عددی مورد محاسبه قرار می گیرد و با مقدار واقعی آن مقایسه می شود.

در جدول (۳) محاسبات طرحواره عددی برای زمان و نقاط اندازه گیری شده در این آزمایش آورده شده است. در هر ردیف، ۲ نقطه مبدأ و مقصد برای محاسبه نیاز است که در ستون مسیر درج گردیده است. نحوه

جدول ۳: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش جین میوس (۱۹۹۸)

ردیف	مسیر	اختلاف زمانی بین مبدأ و مقصد (دقیقه)	عرض نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	طول نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه مقصد (دقیقه)	خطای طول نقطه مقصد (دقیقه)	فاصله بین نقطه مقصد و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.015000'	35.754581°	51.468615 °	0.125122'	0.183110'	0.194390'
۲	۲ به ۳	9.356667'	35.753827°	51.454778°	0.170361'	0.213298'	0.243032'
۳	۳ به ۴	10.041667'	35.744537°	51.392774°	0.327777'	0.333586'	0.243032'
۴	۴ به ۵	9.655000'	35.755637°	51.311178°	0.138239'	0.070651'	0.149759'
۵	۵ به ۶	9.900000'	35.722599°	51.246283°	0.344052'	0.423049'	0.486459'
۶	۶ به ۷	9.488333'	35.691734°	51.202628°	0.195965'	0.242349'	0.277931'
۷	۷ به ۸	17.965000'	35.724651°	51.183445°	0.179041'	0.306678'	0.306874'

می باشد. در جدول (۴) طول و عرض جغرافیایی نقاط جدول (۲) با استفاده از الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) مانند جدول (۳) آورده شده است، که برای مسیر ۵ به ۶ بیشترین خطا با مقدار ۰/۶۱۷۵۵۷ و کمترین خطا مربوط به مسیر ۴ به ۵ با مقدار ۰/۰۱۸۶۹۹ می باشد.

برای مثال با حرکت از مسیر ۱ به ۲ برابر جدول (۳) که اختلاف زمانی بین این دو نقطه در حدود ۱۰' می باشد، طول و عرض جغرافیایی محاسبه شده توسط الگوریتم جین میوس (۱۹۹۸) برای این مسیر به ترتیب ۵۱/۴۶۸۶۱۵° و ۳۵/۷۵۴۵۸۱° و خطای طرحواره برای محاسبه طول و عرض جغرافیایی برابر ۰/۱۸۳۱۱۰' و ۰/۱۲۵۱۲۲' و در نتیجه فاصله نقطه محاسبه شده توسط طرحواره با نقطه واقعی حدود ۰/۱۹۴۳۹۰' می باشد. برای مابقی موارد نیز به همین ترتیب مسیرهای دو به دو به صورت متوالی (برای مثال ۲ به ۳، ۳ به ۴، ۴ به ۵، ۵ به ۶ و ۷ به ۸) آورده شده است. گفتنی است حداقل خطای فاصله بین نقطه واقعی و نقطه محاسبه شده برای مسیر ۴ به ۵ برابر ۰/۱۴۹۷۵۹' و حداکثر خطا برای مسیر ۵ به ۶ با اختلاف ۰/۴۸۶۴۵۹'

جدول ۴: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش میچالسکی (۱۹۸۸)

ردیف	مسیر	اختلاف زمانی بین مبدا و مقصد (دقیقه)	عرض نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	طول نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه مقصد (دقیقه)	خطای طول نقطه مقصد (دقیقه)	فاصله بین نقطه مقصد و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.015000'	35.752768°	51.468015°	0.233916'	0.219079'	0.294009'
۲	۲ به ۳	9.356667'	35.751889°	51.454097°	0.286653'	0.254169'	0.353389'
۳	۳ به ۴	10.041667'	35.742496°	51.392016°	0.450234'	0.379013'	0.545652'
۴	۴ به ۵	9.655000'	35.753491°	51.310331°	0.009463'	0.019855'	0.018699'
۵	۵ به ۶	9.900000'	35.720355°	51.245337°	0.478700'	0.479776'	0.617557'
۶	۶ به ۷	9.488333'	35.689361°	51.201526°	0.338354'	0.308410'	0.421263'
۷	۷ به ۸	17.965000'	35.72204°	51.182236°	0.032219'	0.234150'	0.192938'

اختلاف زمانی بین نقاط در جدول (۲)، در حدود ۱۰' است. برای محاسبه نقش اختلاف زمانی و دقت طرحواره لازم است آزمایش دیگری با اختلاف زمانی از ۱۰' الی تقریباً ۸۰' برابر جدول (۵) انجام گردد. از اینرو جدول (۵) از همان نقاط جدول (۲) حاصل شده است، با این تفاوت که برای ایجاد اختلاف زمانی متفاوت، نقطه اول با نقاط بعدی (برای مثال ۱ به ۲، ۱ به ۳،.....، ۱ به ۸) برای هر مسیر مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۵: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش جین میوس (۱۹۹۸)

ردیف	مسیر	اختلاف زمانی بین مبدا و مقصد (دقیقه)	عرض نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	طول نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه مقصد (دقیقه)	خطای طول نقطه مقصد (دقیقه)	فاصله بین نقطه مقصد و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.015000'	35.754581°	51.468615°	0.125122'	0.183110'	0.194390'
۲	۲ به ۳	19.371667'	35.754185°	51.455047°	0.148929'	0.197166'	0.218736'
۳	۳ به ۴	29.413333'	35.746320°	51.394335°	0.220800'	0.239922'	0.294593'
۴	۴ به ۵	39.068333'	35.751597°	51.307044°	0.104181'	0.177339'	0.177789'
۵	۵ به ۶	48.968333'	35.725430°	51.249728°	0.174222'	0.216333'	0.247545'
۶	۶ به ۷	58.456667'	35.692042°	51.203080°	0.177500'	0.215181'	0.249260'
۷	۷ به ۸	76.421667'	35.721672°	51.176351°	0.000299'	0.118939'	0.096628'

بین نقطه واقعی و نقطه محاسبه شده برای مسیر ۱ به ۸ برابر $۰/۰۹۶۶۲۸'$ و حداکثر خطا برای مسیر ۱ به ۴ با اختلاف $۰/۲۹۴۵۹۳'$ می باشد.

همینطور در جدول (۶) طول و عرض جغرافیایی نقاط جدول (۲) با استفاده از الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) مانند جدول (۵) آورده شده است، که برای مسیر ۱ به ۴ بیشترین خطا با مقدار $۰/۴۰۷۲۱۳'$ و کمترین خطا مربوط به مسیر ۱ به ۸ با مقدار $۰/۱۹۵۹۶۶'$ می باشد.

در جدول (۵) با حرکت از مسیر ۱ به ۳ برابر نقاط جدول (۲)، طول و عرض جغرافیایی محاسبه شده توسط الگوریتم جین میوس (۱۹۹۸) برای این مسیر به ترتیب $۵۱/۴۵۵۰۴۷^\circ$ و $۳۵/۷۵۴۱۸۵^\circ$ و خطای طرحواره برای محاسبه طول و عرض جغرافیایی برابر $۰/۱۹۷۱۶۶'$ و $۰/۱۴۸۹۲۹'$ و در نتیجه فاصله نقطه محاسبه شده توسط طرحواره با نقطه واقعی حدود $۰/۲۱۸۷۳۶'$ می باشد. گفتنی است حداقل خطای فاصله

جدول ۶: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش میچالسکی (۱۹۸۸)

ردیف	مسیر	اختلاف زمانی بین مبدا و مقصد (دقیقه)	عرض نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	طول نقطه مقصد محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه مقصد (دقیقه)	خطای طول نقطه مقصد (دقیقه)	فاصله بین نقطه مقصد و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	$10.015000'$	35.752768°	51.468015°	$0.233916'$	$0.219079'$	$0.294009'$
۲	۱ به ۳	$19.371667'$	35.752306°	51.454411°	$0.261661'$	$0.235357'$	$0.324173'$
۳	۱ به ۴	$29.413333'$	35.744376°	51.393663°	$0.337439'$	$0.280249'$	$0.407213'$
۴	۱ به ۵	$39.068333'$	35.749587°	51.306337°	$0.224754'$	$0.219759'$	$0.287112'$
۵	۱ به ۶	$48.968333'$	35.723350°	51.248982°	$0.299022'$	$0.261061'$	$0.366759'$
۶	۱ به ۷	$58.456667'$	35.689879°	51.202290°	$0.307239'$	$0.262628'$	$0.374273'$
۷	۱ به ۸	$76.421667'$	35.719367°	51.175481°	$0.137987'$	$0.171163'$	$0.195966'$

محاسبه موقعیت ناظر به کار برد. با توجه به اینکه ناظر ثابت است، انتظار می رود طول و عرض نقطه محاسبه شده توسط دو الگوریتم همان موقعیت اولیه یعنی ۲۷° و $۱۰/۵'$ شمالی و $۱۲/۹'$ و $۰/۵۶^\circ$ شرقی را نشان دهد.

در ادامه با استفاده از طرحواره معرفی شده، به بررسی نتایج خطای تعیین موقعیت برای ناظر ثابت خواهیم پرداخت. برای این منظور فرض می شود ناظری در تاریخ ۰۳ ماه آگوست ۲۰۲۳ در موقعیت ۲۷° و $۱۰/۵'$ شمالی و $۰/۵۶^\circ$ و $۱۲/۹'$ شرقی، ثابت است. در جدول (۷) اطلاعات استخراج شده از اپلیکیشن آسترکلکیولیتور آورده شده است که با فرض قرار داشتن خورشید در غرب نصف النهار ناظر ($S=+1$) می توان دو الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) و جین میوس (۱۹۹۸) را برای

جدول ۷: اطلاعات موقعیت خورشید برگرفته از اپلیکیشن آستر کلکیولیتور

نقطه	زاویه ساعتی محلی خورشید (LHA)	میل خورشید (DEC)	ارتفاع خورشید (H)	طول و عرض جغرافیایی GPS	زمان UTC
۱	LHA=006°06.2'	Dec=17°31.6'N	H=78°49.7'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:08:45:48.0
۲	LHA=008°46.2'	Dec=17°31.5'N	H=77°24.2'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:08:56:28.2
۳	LHA=011°38.4'	Dec=17°31.4'N	H=75°33.5'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:09:07:56.8
۴	LHA=014°34.3'	Dec=17°31.3'N	H=73°26.7'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:09:19:40.4
۵	LHA=017°35.7'	Dec=17°31.1'N	H=71°06.7'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:09:31:45.8
۶	LHA=020°22.1'	Dec=17°31.0'N	H=68°52.3'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:09:42:51.6
۷	LHA=023°34.8'	Dec=17°30.9'N	H=66°12.2'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:09:55:42.4
۸	LHA=031°04.3'	Dec=17°30.6'N	H=59°46.6'	27°10.5'N.056°12.9'E	UTC:10:25:40.2

در جدول (۸) محاسبات طرحواره عددی در تعیین موقعیت ناظر برای زمان و نقاط جدول (۷) آورده شده است. طول و عرض جغرافیایی محاسبه شده توسط الگوریتم جین میوس (۱۹۹۸) برای زمان ۱ به ۲ به ترتیب $۵۶/۲۱۹۹۷۰^{\circ}$ و $۲۷/۱۷۱۴۳۶^{\circ}$ و همچنین فاصله نقطه محاسبه شده توسط طرحواره با نقطه اولیه حدود $۰/۳۴۰۹۸۸'$ می باشد. کمترین فاصله نقطه محاسبه شده مربوط به زمان ۳ به ۴ (با اختلاف زمانی $۱۱/۷۲۶۶۶۷'$) و بیشترین فاصله نقطه محاسبه شده مربوط به زمان ۷ به ۸ (با اختلاف زمانی $۲۹/۹۶۳۳۳۳'$) به ترتیب برابر با $۰/۰۹۱۵۵۳'$ و $۰/۶۱۸۹۴۱'$ می باشد.

جدول ۸: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش جین میوس (۱۹۹۸)

ردیف	زمان	اختلاف زمانی (دقیقه)	عرض نقطه محاسبه شده (درجه)	طول نقطه محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه محاسبه شده (دقیقه)	خطای طول نقطه محاسبه شده (دقیقه)	فاصله بین نقطه اولیه و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.670000'	27.171436°	56.219970°	0.213848'	0.298215'	0.340988'
۲	۲ به ۳	11.476667'	27.181208°	56.207690°	0.372455'	0.438583'	0.539759'
۳	۳ به ۴	11.726667'	27.175166°	56.213296°	0.009946'	0.102235'	0.091553'
۴	۴ به ۵	12.090000'	27.177341°	56.211729°	0.140472'	0.196242'	0.224227'
۵	۵ به ۶	11.096667'	27.171708°	56.214966°	0.197499'	0.002040'	0.197640'
۶	۶ به ۷	12.846667'	27.172716°	56.214487°	0.137050'	0.030798'	0.139856'
۷	۷ به ۸	29.963333'	27.164934°	56.217498°	0.603983'	0.149864'	0.618941'

همینطور در جدول (۹) طول و عرض جغرافیایی نقاط
جدول (۷) با استفاده از الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸)
مانند جدول (۸) آورده شده است که برای زمان ۷ به ۸
بیشترین فاصله نقطه محاسبه شده با مقدار ۰٫۶۸۹۶۸۳' و
کمترین فاصله نقطه محاسبه شده مربوط به زمان ۳
به ۴ با مقدار ۰٫۲۲۵۶۹۴' می باشد.

جدول ۹: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش میچالسکی (۱۹۸۸)

ردیف	زمان	اختلاف زمانی (دقیقه)	عرض نقطه محاسبه شده (درجه)	طول نقطه محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه محاسبه شده (دقیقه)	خطای طول نقطه محاسبه شده (دقیقه)	فاصله بین نقطه اولیه و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.670000'	27.169260°	56.218161°	0.344400'	0.189660'	0.383770'
۲	۲ به ۳	11.476667'	27.179094°	56.205803°	0.245626'	0.551826'	0.549296'
۳	۳ به ۴	11.726667'	27.173137°	56.211330°	0.111801'	0.220185'	0.225694'
۴	۴ به ۵	12.090000'	27.175416°	56.209688°	0.024984'	0.318704'	0.284814'
۵	۵ به ۶	11.096667'	27.169901°	56.212858°	0.305937'	0.128542'	0.326831'
۶	۶ به ۷	12.846667'	27.171042°	56.212315°	0.237488'	0.161108'	0.277573'
۷	۷ به ۸	29.963333'	27.163515°	56.215228°	0.689111'	0.013651'	0.689683'

اختلاف زمانی ما بین نقاط در جدول های (۸) و (۹)، در
حدود ۱۰' است. برای محاسبه نقش اختلاف زمانی و
دقت طرحواره، لازم است آزمایش دیگری با اختلاف
زمانی از ۱۰' الی تقریباً ۱۰۰' برابر جدول های (۱۰) و
(۱۱) انجام گردد.

جدول ۱۰: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش جین میوس (۱۹۹۸)

ردیف	زمان	اختلاف زمانی (دقیقه)	عرض نقطه محاسبه شده (درجه)	طول نقطه محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه محاسبه شده (دقیقه)	خطای طول نقطه محاسبه شده (دقیقه)	فاصله بین نقطه اولیه و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.670000'	27.171436°	56.219970°	0.213848'	0.298215'	0.340988'
۲	۱ به ۳	22.146667'	27.174999°	56.213450°	0.000033'	0.092981'	0.082773'
۳	۱ به ۴	33.873333'	27.175030°	56.213394°	0.001828'	0.096389'	0.085826'
۴	۱ به ۵	45.963333'	27.175298°	56.213382°	0.017878'	0.125778'	0.113389'
۵	۱ به ۶	57.060000'	27.175037°	56.213643°	0.002192'	0.097056'	0.086429'
۶	۱ به ۷	69.906667'	27.174894°	56.213643°	0.006356'	0.081404'	0.072745'
۷	۱ به ۸	99.870000'	27.173976°	56.215323°	0.061418'	0.019389'	0.063838'

در جدول (۱۰) برای زمان ۱ به ۳ برابر زمان‌های جدول (۷)، طول و عرض جغرافیایی محاسبه شده توسط الگوریتم جین میوس (۱۹۹۸) به ترتیب $56^{\circ}21'34.50''$ و $27^{\circ}17'49.99''$ و در نتیجه فاصله نقطه محاسبه شده توسط طرحواره با نقطه اولیه حدود $0.82773'$ می‌باشد. کمترین فاصله نقطه محاسبه شده مربوط به زمان ۱ به ۸ برابر با $0.63838'$ و بیشترین فاصله نقطه محاسبه شده مربوط به زمان ۱ به ۲ برابر با $0.340988'$ است.

همین‌طور در جدول (۱۱) طول و عرض جغرافیایی زمان‌های جدول (۷) با استفاده از الگوریتم میچالسکی (۱۹۸۸) مانند جدول (۱۰) آورده شده است، که برای زمان ۱ به ۲ بیشترین خطا با مقدار $0.383770'$ و کمترین خطا مربوط به زمان ۱ به ۸ با مقدار $0.205636'$ می‌باشد.

با استفاده از الگوریتم‌های ارائه شده در کتاب جین میوس (۱۹۹۸)، میچالسکی (۱۹۸۸) و نرم افزار آسترکلکیولیتور (جهت استخراج موقعیت خورشید)

برای راستی آزمایی و ارزیابی صحت خروجی‌ها چندین مرتبه ورودی‌های مورد نیاز برای تعیین موقعیت خورشید با کتاب‌های تقویم نجومی چاپ دانشگاه امام خمینی (ره) نوشهر، تقویم نجومی انگلستان و نرم افزار ذکر شده مقایسه گردید. اشکالات موجود مشخص و پس از بررسی‌های و تصحیحات لازم در برنامه‌های نوشته شده بازخورد مجدد گرفته شد. سپس با وارد نمودن زمان و روز میلادی و همچنین ارتفاع خورشید به برنامه نوشته شده به زبان متلب (یعنی بکارگیری روابط مثلثاتی و روش نیوتن)، محل تلاقی دو خط مکان روی کره زمین را که نشان‌دهنده موقعیت واقعی ناظر است، بدون نیاز به اینترنت می‌توان تعیین نمود.

جدول ۱۱: محاسبه طول و عرض جغرافیایی ناظر با روش میچالسکی (۱۹۸۸)

ردیف	زمان	اختلاف زمانی (دقیقه)	عرض نقطه محاسبه شده (درجه)	طول نقطه محاسبه شده (درجه)	خطای عرض نقطه محاسبه شده (دقیقه)	خطای طول نقطه محاسبه شده (دقیقه)	فاصله بین نقطه اولیه و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
۱	۱ به ۲	10.670000'	27.169260°	56.218161°	0.344400'	0.189660'	0.383770'
۲	۱ به ۳	22.146667'	27.172846°	56.211600°	0.129229'	0.204024'	0.222960'
۳	۱ به ۴	33.873333'	27.172900°	56.211500°	0.125979'	0.209975'	0.225462'
۴	۱ به ۵	45.963333'	27.173192°	56.210967°	0.108503'	0.241976'	0.241229'
۵	۱ به ۶	57.060000'	27.172952°	56.211406°	0.122882'	0.215646'	0.227978'
۶	۱ به ۷	69.906667'	27.172835°	56.211621°	0.129918'	0.202763'	0.222448'
۷	۱ به ۸	99.870000'	27.171976°	56.213193°	0.181436'	0.108449'	0.205632'

متحرک) و همچنین در زمانی که ناظر ثابت است (به ترتیب با مقدار ۰/۲۰۴۹۴۶' و ۰/۱۲۰۸۵۵'، نسبت به سایر روش های ذکر شده معقول می باشد.

نتایج جدول های (۱۲) و (۱۳) نشان می دهد، بکارگیری از روش جین میوس (۱۹۹۸) با اختلاف زمانی متفاوت در راستای محاسبه میانگین خطای فاصله بین نقطه مقصد تا نقطه محاسبه شده در تست جاده ای (ناظر

جدول ۱۲: میانگین خطای فاصله بین نقطه مقصد تا نقطه محاسبه شده در آزمایش تست جاده ای

روش	میانگین خطای فاصله بین نقطه مقصد تا نقطه محاسبه شده (دقیقه)
جین میوس (۱۹۹۸) با اختلاف زمانی مساوی در حدود ۱۰ دقیقه (جدول (۳))	۰/۲۷۱۶۳۹'
میچالسکی (۱۹۸۸) با اختلاف زمانی مساوی در حدود ۱۰ دقیقه (جدول (۴))	۰/۳۴۹۰۷۲'
جین میوس (۱۹۹۸) با اختلاف زمانی متفاوت (جدول (۵))	۰/۲۰۴۹۴۶'
میچالسکی (۱۹۸۸) با اختلاف زمانی متفاوت (جدول (۶))	۰/۳۲۱۳۵۷'

جدول ۱۳: میانگین خطای فاصله بین نقطه اولیه تا نقطه محاسبه شده توسط ناظر ثابت

روش	میانگین خطای فاصله بین نقطه اولیه و نقطه محاسبه شده (دقیقه)
جین میوس (۱۹۹۸) با اختلاف زمانی مساوی در حدود ۱۰ دقیقه (جدول ۸)	۰٫۳۰۷۵۶۶'
میچالسکی (۱۹۸۸) با اختلاف زمانی مساوی در حدود ۱۰ دقیقه (جدول ۹)	۰٫۳۹۱۰۹۴'
جین میوس (۱۹۹۸) با اختلاف زمانی متفاوت (جدول ۱۰)	۰٫۱۲۰۸۵۵'
میچالسکی (۱۹۸۸) با اختلاف زمانی متفاوت (جدول ۱۱)	۰٫۲۴۷۰۶۸'

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش موقعیت خورشید در فضا و نقش آن در میزان دقت تعیین نقطه جغرافیایی ناظر مورد بحث قرار گرفته است. استفاده از ناوبری نجومی در طول روز با اندازه‌گیری ارتفاع خورشید مرسوم بوده و به عنوان یکی از مهمترین گزینه‌های ناوبری در اقیانوس مطرح است. ولی دریانوردان در بهترین شرایط می‌توانند دقت یک مایل را تجربه کنند. منابع خطا می‌تواند ناشی از خطای سکستانت (ابزار اندازه‌گیری ارتفاع خورشید) و موقعیت خورشید در تقویم نجومی دریایی و همچنین نحوه محاسبات باشد. این پژوهش به صورت نظری صورت گرفته و لذا سکستانت و خطای آن وجود ندارد. در واقع در این پژوهش محقق به دنبال آن است که در صورت حذف همه خطاها به جز خطای موقعیت خورشید، چقدر می‌توان دقت ناوبری نجومی را افزایش داد. آیا این روش ناوبری از لحاظ نظری می‌تواند خطایی در مرتبه 10^{-1} یا 10^{-2} دقیقه داشته باشد. در صورتی که روش نظری بکارگرفته شده خطایی در مرتبه 10^{-1} یا 10^{-2} دقیقه داشته باشد، با افزایش دقت

محاسبات مکان خورشید، می‌توان به دقت‌های مطلوبی در ناوبری نجومی رسید که راهگشای تحقیقات آینده در برداشت ارتفاع خورشید با روش‌های بسیار دقیق و عدم استفاده از سکستانت است. در این پژوهش برای کاهش خطا از روش تکراری نیوتن برای حل معادله مکان استفاده شده است. در این روش تکراری می‌توان خطای مکان را به عنوان شرط همگرایی انتخاب کرده و تا دقت مطلوب، محاسبات را ادامه داد. از طرفی در این پژوهش محققان قادر بودند تا با استفاده از موقعیت ماهواره‌ای، ارتفاع خورشید را با استفاده از روابط تا چند رقم اعشار محاسبه کنند، ولی به جهت واقعی‌تر شدن نتایج، کلیه داده‌های مورد استفاده برای آزمایش عددی از نرم افزار آسترکلیوولیتور استخراج شد، که این نرم افزار حداکثر تا یک رقم اعشار می‌تواند مقادیر عددی را در اختیار محقق قرار دهد تا شرایط با تقویم نجوم دریایی قابل مقایسه باشد. نتایج نشان داد در صورت استفاده از روابط دقیق برای موقعیت خورشید می‌توان با دقت دهم دقیقه در ارتفاع

دقیقی را بدست آورد. محققان امیدوارند که انجام این پژوهش راهگشای محققان دیگر برای توسعه روش های اندازه گیری ارتفاع خورشید باشند تا بوسیله آن بتوان موقعیت واحدهای شناور در دریا را بدون نیاز به سیگنال های ماهواره ای با دقت هایی از مرتبه 10^{-1} دقیقه محاسبه نمود.

خورشید به دقت هایی از مرتبه 10^{-1} دقیقه برای تعیین موقعیت رسید.

براساس نتایج حاصل از این پژوهش در صورت توسعه راهکار عملی برای اندازه گیری ارتفاع خورشید با ابزارهای دیگری به جز سکستانت (که دارای خطایی از مرتبه دقیقه است)، می توان موقعیت مکانی بسیار

مراجع

- [1] R. Malkin, "Understanding the accuracy of astro navigation", *Journal of Navigation*, vol. 67(1), pp. 63-81, 2014.
- [2] H. Umland, "A short guide to celestial navigation", 2015.
- [3] M. A'HEARN, and G. Rossano, "Two body fixes by calculator", *Navigation*, vol. 24(1), pp. 59-66, 1977.
- [4] G. Bennett, "General conventions and solutions-their use in celestial navigation", *Journal of the Institute of Navigation*, vol. 26(4), pp. 275-280, 1979.
- [5] C. Daub, "A completely programmable method of celestial navigation", *Journal of the Institute of Navigation*, vol. 26(1), pp. 59-62, 1979.
- [6] S. W. Gery, "The direct fix of latitude and longitude from two observed altitudes", *Navigation*, vol. 44(1), pp. 15-24, 1997.
- [7] T. Kjer, "Unambiguous two body fix methods derived from crystallographic Principles", *Navigation*, vol. 28(1), pp. 52-54, 1981.
- [8] S. Kotlaric, "K- 12 Method By Calculator: A Single Program For All Celestial Fixes, Directly or By Position Lines", *Navigation*, vol. 28(1), pp. 44-51, 1981.
- [9] T. R. Metcalf, and F. T. Metcalf, "On the overdetermined celestial fix", *Navigation*, vol. 38(1), pp. 79-89, 1991.
- [10] R. Ogilvie, "A new method of celestial navigation", *Navigation*, vol. 24(1), pp. 67-71, 1977.
- [11] J. A. Van Allen, "An analytical solution of the two star sight problem of celestial navigation", *Navigation*, vol. 28(1), pp. 40-43, 1981.
- [12] A. R. Gonzalez, "Vector solution for the intersection of two circles of equal altitude", *Journal of Navigation*, vol. 61(2), pp. 355-365, 2008.
- [13] G. Huxtable, "Calculating the intersections of two circles on a sphere", 2006.
- [14] F. Pierros, "Stand-alone celestial navigation positioning method", *Journal of Navigation*, vol. 71(6), pp. 1344-1362, 2018.
- [15] J. J. Michalsky, "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position", *Solar energy*, vol. 40(3), pp. 227-235, 1988.
- [16] Jean. Meeus, "Astronomical algorithm second edition", 1989.
- [17] Van Suong. Nguyen, "A Theoretical Approach of Astronomical Ship Positioning Using a Single Celestial Body and Secant Technique", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent System* vol. 20(1), pp. 1-7, 2020.



Maritime positioning independent of satellite systems using two successive elevations of the Sun

Saeed Alipourgildeh ^{1*}, Ali Mohammadi ², Ahmad Zadehabadi ³

1- Master's student in Maritime Management, Faculty of Navigation and Ship Command, Imam Khomeini University of Maritime Sciences Nowshahr.

2- Assistant Professor of Marine Management Department, Faculty of Navigation and Ship Command, Imam Khomeini University of Marine Sciences Nowshahr.

3- Professor of Maritime Management Department, Faculty of Navigation and Ship Command, Imam Khomeini University of Maritime Sciences (RA) Nowshahr.

Abstract

Ocean navigation relies heavily on the determination of the position of the floating units. In the past, as there was no satellite navigation system, all the floating units in the ocean calculated their position using celestial bodies and the Sun. With the advent of the satellite navigation system, astronomical positioning using celestial bodies has faded and is only limited to the emergency cases where the floating units are unable to use the satellite equipment. On the other hand, we know that one of the biggest weaknesses in determining the astronomical position in the intersection method and the other vector and drawing methods is related to the approximate position or at least the approximate latitude. In this research, the algorithm for determining the position of a moving or stationary observer by measuring two consecutive heights from the Sun has been developed. One of the prominent points in this algorithm is that it does not need the approximate or initial position of the observer to calculate the position. On the other hand, the difference between this research and the other similar researches is how we calculate the Sun position and how accurate our calculation is. The results of this study show that the best results of positioning can be obtained by measuring two consecutive altitudes of the Sun in about 10 to 20 minutes, and the accuracy of this method is about 10-1 minutes. If the applied theoretical method is used and the accuracy of the calculations of the Sun location is increased, it is possible to achieve the optimal accuracy in the astronomical navigation, which paves the way for future research in obtaining the height of the Sun with very accurate methods (except for the sextant).

Key words : Positioning, Ocean navigation, Sun, Elevation .