

کالیبراسیون قطب نمای جریان سنج دریایی با استفاده از تعیین موقعیت کینماتیک نسبی

وحید رضاعلی^۱، علیرضا آزموده اردلان^۲، ناصر عبدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروگرافی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۱

چکیده

تعیین دقیق پارامترهای سرعت و جهت جریان‌های دریایی از مسائل مهمی است که در مطالعات دریایی مورد توجه قرار می‌گیرد که بدین منظور می‌بایست از جریان‌سنج‌های دقیق و کالیبره استفاده شود. پارامتر جهت یا همان هدینگ حاصل از جریان‌سنج‌های دریایی که بوسیله قطب نمای نصب شده بر روی آنها تعیین می‌شود، همانند پارامتر سرعت می‌بایست به طور صحیح مورد بررسی قرار گرفته و خطای آن محاسبه شود. در این مقاله از گیرنده‌های GNSS برای کالیبراسیون قطب نمای یک جریان‌سنج دریایی استفاده شده است. روش بکار گرفته شده بدین صورت است که جریان‌سنج به بویه ای که روی آن دو گیرنده GNSS نصب است، متصل شده و درون دریاچه‌ای در جهت‌های مشخص کشیده می‌شود. در این روش دو گیرنده GNSS نصب شده بر روی بویه نسب به یک ایستگاه مرجع از طریق مشاهدات فاز حامل تعیین موقعیت شده و با تعریف یک سیستم مختصات تراز محلی و مبدا قرار دادن ایستگاه مرجع، از دوران خط مبنای ایجاد شده بین دو گیرنده نسبت به این ایستگاه، زاویه هدینگ به طور دقیق محاسبه می‌شود. برای بررسی دقت زاویه هدینگ محاسبه شده، معیارهایی همچون هندسه‌ی ماهواره‌ها، حل ابهام فاز و خطای چندگانگی مسیر در موقعیت‌یابی کینماتیک مورد بررسی قرار گرفته است. زاویه هدینگ محاسباتی بویه با انحراف معیار ۴۸/۲۷۶۰ ثانیه تعیین و با هدینگ حاصل از جریان‌سنج مقایسه شد و متوسط اختلاف میان هدینگ حاصل از GNSS و هدینگ ثبت شده‌ی قطب نمای جریان‌سنج "۲۶'۴۶" تعیین و معادله کالیبراسیونی برای قطب نمای مغناطیسی جریان‌سنج دریایی ارائه شد.

کلیدواژه‌ها: زاویه هدینگ، GNSS، کینماتیک نسبی، جریان‌سنج دریایی، کالیبراسیون جریان‌سنج

۱- مقدمه

کسب اطلاعات صحیح از پارامترهای جریان‌های دریایی (سرعت و جهت جریان) مستلزم بکارگیری جریان‌سنج‌هایی دقیق و کالیبره می‌باشد. جریان‌سنج‌های دریایی انواع گوناگونی را شامل می‌شوند که با توجه اهداف و دقت‌های مورد نیاز در مطالعات و پروژه‌های دریایی به کار گرفته می‌شوند. در این میان جریان‌سنج‌های پروانه‌ای^۱ و جریان‌سنج‌های صوتی (ADCP)^۲ در داخل کشور متداولتر می‌باشند. جریان‌سنج پروانه‌ای با قرارگیری در خلاف جهت جریان در داخل آب، از طریق شمارش تعداد دور در ثانیه توسط چرخش پروانه‌ی خود میزان سرعت جریان آب و از طریق قطب‌نمای مغناطیسی نصب شده بر روی خود، جهت جریان را نسبت به شمال مغناطیسی تعیین می‌کند. اما برای اطمینان از صحت عملکرد یک جریان‌سنج دریایی می‌بایست کالیبراسیون این دستگاه‌ها در آزمایشگاه‌های مربوطه صورت پذیرد. اما در آزمایشگاه‌های کالیبراسیون به‌طور معمول سنسور سرعت‌یابی جریان‌سنج‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و به‌طور خاص سنسورهای جهت‌یابی جریان‌سنج‌ها مورد ارزیابی و آزمایش قرار نمی‌گیرند بدین منظور نیاز است روشی مطمئن برای ارزیابی سنسور جهت‌یابی جریان‌سنج ارائه شود تا بتوان میزان خطای پارامتر هدینگ حاصل از جریان‌سنج را تعیین کرد.

برای بررسی عملکرد جهت‌یابی جریان‌سنج‌های دریایی می‌بایست هدینگ حاصل از جریان‌سنج را با هدینگ حاصل از سیستمی دیگر مقایسه کرد. در این مقاله برای بررسی خطای هدینگ حاصل از یک جریان‌سنج دریایی (نوع پروانه‌ای)، از گیرنده‌های GNSS^۳ و محاسبه‌ی هدینگ بوسیله‌ی آنها

استفاده شده است. روش مورد نظر بدین صورت است که جریان‌سنج به بویه‌ای مجهز به دو گیرنده‌ی GNSS متصل شده و درون آب دریاچه‌ای در جهت‌های مشخص کشیده می‌شود و هدینگ حاصل از جریان‌سنج با هدینگ دقیق محاسبه شده از GNSS مقایسه می‌شود. در این روش دو گیرنده به عنوان متحرک^۴ بر روی بویه‌ی شناور بر روی آب، نسبت به گیرنده‌های ثابت و مستقر در خارج از آب تعیین موقعیت می‌شوند و از دوران خط مبنای ایجاد شده بین دو گیرنده، نسبت به ایستگاه مرجع، جهت بررسی دقیق هدینگ استفاده می‌شود. روش ارائه شده در این مقاله به منظور بررسی عملکرد جریان‌سنج دریایی از نوع پروانه‌ای، روشی ابتکاری بوده و طبق تحقیقات صورت گرفته، تا بحال برای بررسی میدانی عملکرد این جریان‌سنج مورد استفاده قرار نگرفته است. اما استفاده از روش تعیین پارامترهای دوران بوسیله‌ی آنتن‌های GNSS به‌طور بررسی و کالیبراسیون قطب‌نماهای بکارگرفته شده در محیط‌های دریایی روشی شناخته شده می‌باشد. در [۱، ۲، ۳ و ۴] برای تعیین خطای هدینگ حاصل از قطب‌نمای ژیرسکوپی که تاثیر بسزایی در تعیین پارامترهای جریان‌های دریایی از طریق جریان‌سنج‌های صوتی دارد، از گیرنده‌های GNSS نصب شده بر روی شناور و تعیین پارامتر هدینگ بدین روش، استفاده شده است. در [۵] برای کالیبراسیون سنسور جهت‌یابی مغناطیسی از دو گیرنده GNSS ارزان قیمت و تعیین پارامتر هدینگ بوسیله‌ی آنها و مقایسه با هدینگ حاصل از سنسور مورد نظر استفاده شده است. در [۶] از طریق تعیین پارامترهای دوران با استفاده از تعیین موقعیت کینماتیک آنی گیرنده‌های GNSS برای کالیبراسیون یک قطب‌نمای مغناطیسی استفاده شده است.

¹ Impeller current meter² Acoustic Doppler Current Profiler³ Global Navigation Satellite System⁴ Rover



شکل ۲: گیرنده‌ی مستقر در خارج از دریاچه به عنوان ایستگاه مرجع



شکل ۳: برداشت داده‌های میدانی

جریان‌سنج دریایی مورد استفاده در این تحقیق جریان‌سنجی از نوع پروانه‌ای مدل ۳۰۸ متعلق به شرکت وال پورت^۱ بوده که سنسور جهت‌یابی آن از نوع قطب نمای مغناطیسی^۲ با میزان دقت ± 0.25 درجه، داده‌های هدینگ جریان را در هر ۵ ثانیه ثبت می‌کند. گیرنده‌های بکار گرفته شده در این عملیات، گیرنده‌های دو فرکانسه لایکا مدل ۱۲۰۰ بوده و با فاصله نمونه‌برداری یک ثانیه و زاویه قطع^۳ ۱۰ درجه، داده‌های موقعیت را در فاصله زمانی

^۱ Valeport

^۲ Flux gate compass

^۳ Cut off angle

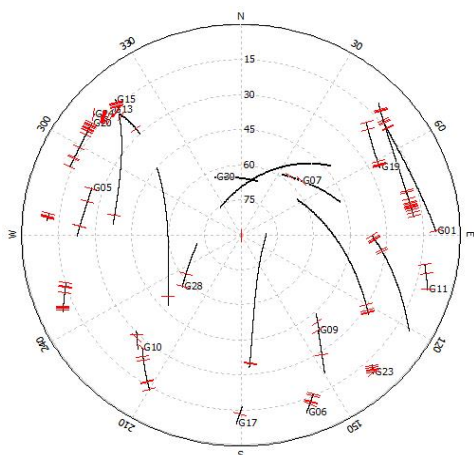
۲- عملیات میدانی و برداشت داده‌ها

به منظور آزمایش روش مورد نظر بویه‌ای طراحی شد که بر روی آن دو آنتن GNSS به فاصله‌ی ۰/۶۸۸ متر نصب و جریان‌سنج به قسمت زیرین آن و موازی با خط مبنای میان دو گیرنده، متصل شد (شکل (۱)). برای به آب اندازی بویه و پیاده‌سازی روش مورد نظر، دریاچه‌ی شهدای خلیج فارس تهران (چیتگر) انتخاب شد. در خارج از دریاچه محلی برای استقرار گیرنده‌ی GNSS دیگری جهت ایستگاه مرجع تعیین شد (شکل (۲)). بویه بعد از نصب و جاسازی گیرنده‌های GNSS به درون آب انداخته و بوسیله‌ی طنابی از طریق قایقی بر روی آب دریاچه در جهت‌هایی مشخص، کشیده شد.

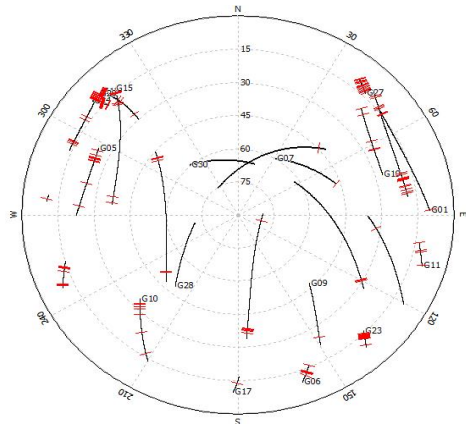


شکل ۱: بویه به همراه گیرنده‌های GNSS و جریان‌سنج

معیارهای DOP^۲ می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. در شکل‌های (۵و۶) صورت فلکی^۳ حاصل از ماهواره‌های ردیابی شده به همراه جهش‌های فاز که از طریق ترکیب فاز دو فرکانسه شناسایی شده‌اند، برای دو گیرنده‌ی متحرک مشاهده می‌شوند [۸].



شکل ۵: صورت فلکی گیرنده عقب به همراه نمایش جهش‌های فاز (خطوط قرمز رنگ)

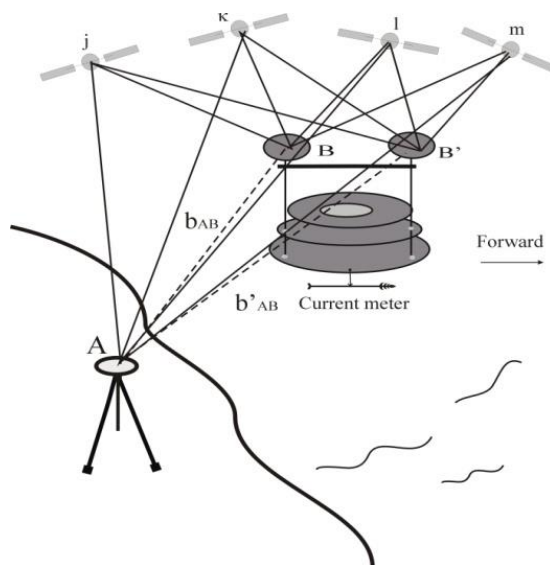


شکل ۶: صورت فلکی گیرنده جلو به همراه نمایش جهش‌های فاز (خطوط قرمز رنگ)

تقریباً ۱/۵ ساعت برداشت کردند. مطابق شکل (۳) گیرنده‌ی نصب شده در جلوی مسیر حرکت، به‌عنوان گیرنده‌ی جلو و گیرنده‌ی دیگر به عنوان گیرنده‌ی عقب در نظر گرفته شده است.

۳- پردازش داده‌های GNSS

برای پردازش داده‌ها نرم افزار برنیز^۱ مورد استفاده قرار گرفت [۷]؛ بدین صورت که ابتدا موقعیت ایستگاه مرجع به روش تعیین موقعیت نقطه‌ای با مشاهدات فاز حامل مشخص و سپس موقعیت دو گیرنده‌ی دیگر به روش کینماتیک نسبی و با استفاده از معادلات تفاضلی دوگانه‌ی مشاهدات فاز حامل، نسبت به ایستگاه مرجع تعیین شدند. (شکل (۴))



شکل ۴: اساس تعیین موقعیت کینماتیک نسبی برای بویه شناور بر روی آب (که A به‌عنوان ایستگاه مرجع و B و B' به‌عنوان ایستگاه‌های متحرک می‌باشند که هدف در تعیین موقعیت کینماتیک نسبی تعیین دو بردار خط مبنا b_{AB} و b'_{AB} می‌باشد).

برای بررسی دقت و صحت حاصل از موقعیت‌یابی نقاط، تعداد ماهواره‌های ردیابی شده برای حل موقعیت

^۲ Dilution of precision

^۳ Sky plot

^۱ Bernese 5.0 software

به طور صحیح حل شده و در تمام زمان ثابت باشند [۸].

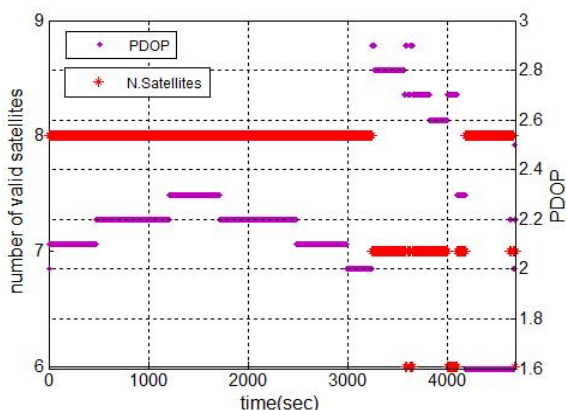
به محض آن که مقدار ابهام به صورت عدد صحیح معلوم شود گفته می‌شود که ابهام رفع شده یا و تثبیت گردیده است. به‌طور کلی تعیین و تثبیت ابهام، حل خط مبنا را استحکام می‌بخشد [۱۱].

استفاده از تفاضل‌های دوگانه به جای تفاضل‌های یگانه، برای پردازش فاز حامل مهم می‌باشد. دلیل آن این است که در مورد تفاضل‌های یگانه، یک پارامتر مجهول اضافه برای دریافت ساعت گیرنده، که مانع جداسازی مؤثر ابهام‌های فاز از دریافت ساعت می‌گردد، باید در نظر گرفته شود. در مورد تفاضل‌های دوگانه، که جملات ساعت حذف شده‌اند، مجزا کردن ابهام‌ها امکان‌پذیر است [۸].

جنبه‌ی دیگر رفع ابهام، هندسه‌ی ماهواره می‌باشد که می‌توان از دو منظر به آن نگاه کرد. منظر اول، افزایش شمار ماهواره‌های مورد ردیابی در هر لحظه، عموماً به مقدار DOP بهتری منتج می‌شود. از این رو استفاده از تمام گیرنده‌های در معرض دید با توانایی ردیابی تمام ماهواره‌های قابل رؤیت ترجیح داده می‌شود، زیرا ماهواره‌های اضافی به کارآیی و قابلیت اطمینان رفع ابهام کمک می‌کنند. منظر دوم در مورد هندسه، طول زمان مورد نیاز برای رفع ابهام‌ها می‌باشد. محتوای اطلاعات فاز حامل تابعی از زمان است که مستقیماً با حرکت ماهواره همبسته است [۸].

خطای چندگانگی مسیر نیز عامل حساس و مهمی در رفع ابهام است. از آنجا که خطای چندگانگی مسیر وابسته به ایستگاه است، حتی برای خطوط مبنای کوتاه می‌تواند قابل ملاحظه باشد.

رفع ابهام شامل سه گام اصلی است: تعریف فضای جستجو ابهام، انتخاب ابهام‌های داوطلب و تعیین اعتبار ابهام‌ها. در بین روش‌های تعیین ابهام،



شکل ۷: تعداد ماهواره‌های قابل قبول برای حل موقعیت به همراه PDOP

۳-۱- خطای چندگانگی مسیر^۱

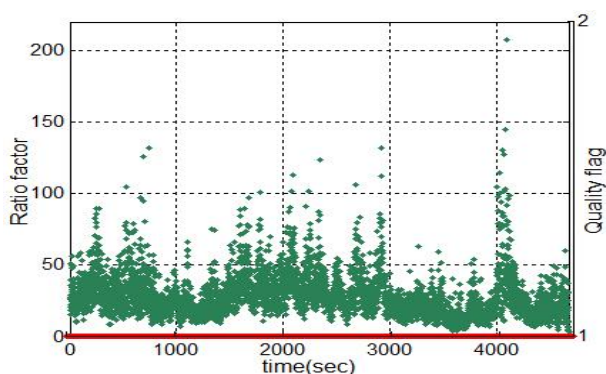
یکی از تاثیرگذارترین خطاهای مشاهدات GNSS برای اهداف تعیین پارامترهای دوران به خصوص در محیط‌های آبی، خطای چندگانگی مسیر می‌باشد [۹، ۱۰]. با انتخاب فازهای حامل و فاقد خطای یونسفر و تشکیل تفاضل‌های متناظر آن‌ها، تمام اثرات همچون خطاهای تروپوسفر، خطاهای ساعت و اثرات نسبیته، به استثناء چندگانگی مسیر حذف می‌شوند [۸]. اثر خطای چندگانگی مسیر بر روی فازهای حامل در این تحقیق مطابق نمودار شکل‌های (۱۰ و ۱۱) برآورد شده است که با توجه به نتایج آن می‌توان متوجه شد که خوشبختانه شرایط به گونه‌ای بوده است که خطای چندگانگی مسیر تاثیر زیادی را بر دقت نهایی نتایج نداشته است.

۳-۲- حل ابهام فاز

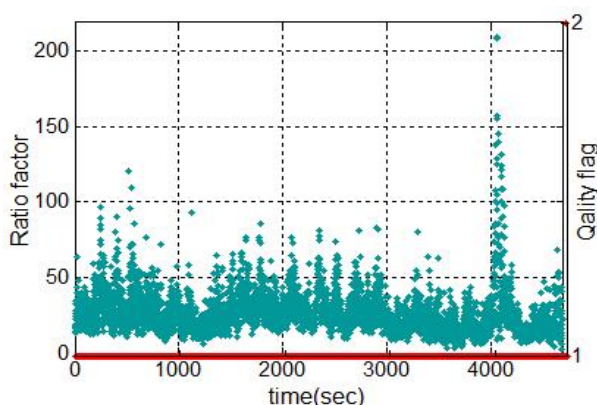
برای رسیدن به حداکثر دقت ممکن برای تعیین پارامترهای دوران، حل صحیح ابهام فاز برای اندازه‌گیری‌های فاز حامل می‌باشد. اندازه‌گیری‌های فاز حامل می‌توانند دقتی در حد میلی متر را داشته باشند به شرطی که ابهام

^۱ Multipath Error

بیان شده است؛ انتخاب این حد آستانه بستگی به تعداد مشاهدات در دسترس و انتخاب یک نرخ شکست دارد. در این مقاله حد آستانه‌ای ثابت با مقدار ۳ مطابق با [۱۶] انتخاب شد. در نمودار شکل‌های (۸ و ۹) میزان آزمون نسبت به همراه نقاط با ابهام حل شده (fixed=1) و حل نشده (float=2) برای دو گیرنده‌ی نصب شده روی بویه، آورده شده است.



شکل ۸: مقدار آزمون نسبت (نقاط سبز) و نقاط با وضعیت حل ابهام (نقاط قرمز) در کل اپک‌های زمانی برای گیرنده عقب.



شکل ۹: مقدار آزمون نسبت (نقاط آبی) و نقاط با وضعیت حل ابهام (نقاط قرمز) در کل اپک‌های زمانی برای گیرنده جلو.

روش LAMBDA^۱ از لحاظ تئوری و عملی در صدر قرار دارد و روش معمول مورد استفاده در اکثر نرم‌افزارهای پردازش داده‌های GNSS می‌باشد. در این روش هدف اصلی، به دست آوردن ابهام‌های عدد صحیحی است که محتمل‌ترین اندازه باشند [۸، ۱۳ و ۱۴]. با نشان دادن بردار ابهام‌های شناور با آن‌ها با \hat{N} و بردارهای ابهام عدد صحیح متناظر با آن‌ها با N ، تفاضل بین دو بردار را می‌توان به عنوان باقیمانده‌های ابهام در نظر گرفت. در نتیجه مینیمم کردن این باقیمانده‌ها، با اصول مینیمم کردن مجموع وزندار باقیمانده‌ها، صورت می‌پذیرد. با اقتباس از [۱۳] می‌توان نوشت:

رابطه (۱)

$$\chi^2(N) = (\hat{N} - N)^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N} - N) = \text{minimum}$$

که در آن $Q_{\hat{N}}$ کوریانس ابهام‌های شناور تعدیل شده است. حل این مسئله تحت عنوان برآورد کمترین مربعات عدد صحیح ابهام‌ها نامیده می‌شود.

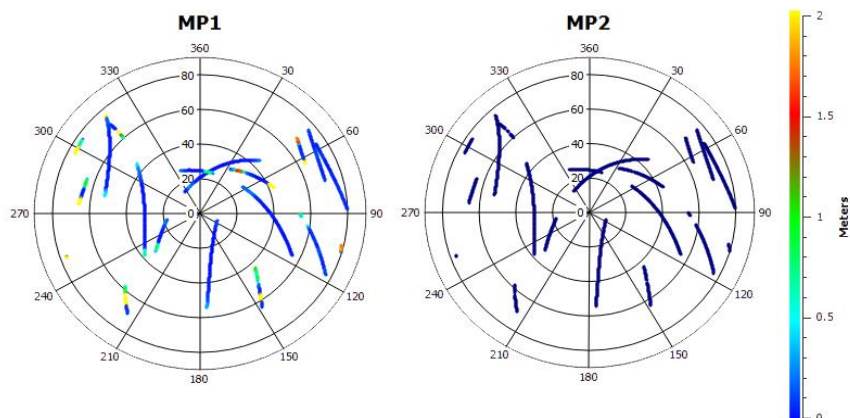
حال برای اعتبارسنجی ابهام‌های تعیین شده می‌بایست روشی را به کار بست که میزان موفقیت ابهام را تعیین کند. یکی از تست‌هایی که در این زمینه به کار گرفته می‌شود تحت عنوان آزمون نسبت نامبرده می‌شود [۱۲ و ۱۳]. فاکتور نسبت R عبارتست از: نسبت مجموع وزندار مجذور باقیمانده‌ها با دومین جواب بهینه $\chi^2(N)$ به اولین جواب بهینه $\chi^2(N)$.

$$R = \frac{(\hat{N}_2 - N)^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N}_2 - N)}{(\hat{N} - N)^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N} - N)} > R_{thres} \quad \text{رابطه (۲)}$$

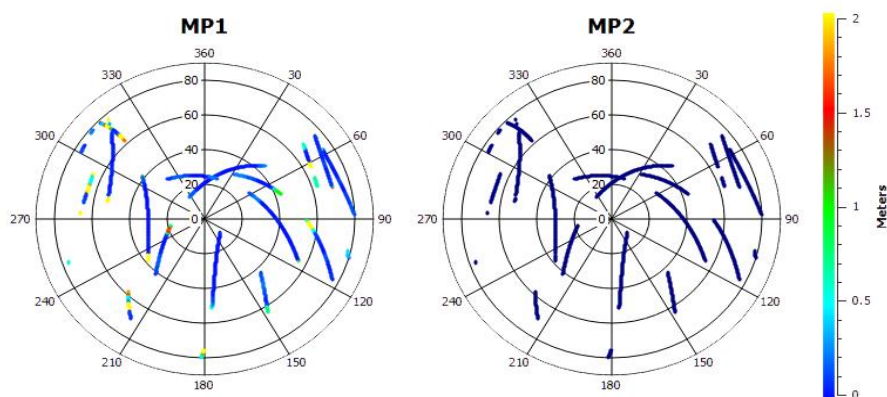
در این رابطه R_{thres} حد آستانه‌ای برای این نسبت می‌باشد که مطابق آنچه در [۱۳] نشان داده شده است، از لحاظ تئوری اساسی برای تعیین این حد آستانه وجود ندارد اما در [۱۵] دیدگاهی متفاوت

^۱ Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment

^۲ Ratio test



شکل ۱۰: صورت فلکی گیرنده عقب به همراه خطای چندگانگی مسیر برآورد شده از هر ماهواره برای فرکانس‌های L1 و L2



شکل ۱۱: صورت فلکی گیرنده جلو به همراه خطای چندگانگی مسیر برآورد شده از هر ماهواره برای فرکانس‌های L1 و L2.

کامل می‌کند) است. پارامترهای دوران می‌توانند از طریق ماتریس دورانی استخراج شوند. همچنین، سیستم مختصات و ماتریس دوران می‌توانند به عنوان دو المان اساسی در تعریف و تعیین وضعیت یک سکوی متحرک بیان شوند [۱۸ و ۱۹].

۴-۱- سیستم مختصات تراز محلی و جسم مرجع
 سیستم مختصات تراز محلی (LL) به عنوان یک سیستم مختصات مرجع به منظور اندازه‌گیری پارامترهای دوران یک سکوی متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبدا این سیستم مختصات بوسیله‌ی مرکز فاز آنتن اصلی در یک GNSS تعریف می‌شود. محور U عمود به بیضوی مرجع و به سمت خارج، محور N به سمت شمال ژئودتیک و محور E

۴- تعیین پارامترهای دوران بوسیله‌ی آنتن‌های GNSS

دوران یک سکوی متحرک عبارتست از توجیه سیستم جسم مرجع^۱ آن نسبت به یک سیستم مرجع محلی^۲ که آن نیز مرتبط با یک سیستم مرجع جهانی (سیستم مختصات زمینی قراردادی (CT^۳) که یک سیستم زمینی چسب است که با زمین دوران می‌کند، محور Z^{CT} آن همان محور چرخش زمین، صفحه‌ی XZ^{CT} شامل متوسط نصف النهار و محور Y^{CT} یک سیستم دست راستی را

¹ Body frame

² Local reference

³ Conventional Terrestrial System

رابطه (۶)

$$r^{LL} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda\sin\varphi & -\sin\lambda\sin\varphi & \cos\varphi \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \cdot (r^{CT} - r^{CT_0})$$

می توان معادله (۶) را نیز بدین صورت نوشت:

$$r^{LL} = R_{CT}^{LL} \cdot (r^{CT} - r^{CT_0}) = R_{CT}^{LL} \cdot \Delta r^{CT} \quad (۷)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

رابطه (۸)

$$R_{CT}^{LL} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda\sin\varphi & -\sin\lambda\sin\varphi & \cos\varphi \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

بوسیله‌ی یک سیستم با دو یا چند آنتن GNSS، دوران مختصات جسم مرجع آنتن‌های GNSS نسبت به یک سیستم مختصات تراز محلی به طور دقیق در هر اپک مشاهداتی قابل محاسبه می باشد.

برای توصیف ارتباط میان سیستم مختصات جسم مرجع و تراز محلی، پارامترهای دوران سکوی متحرک در نظر گرفته می شود. یک بردار خط مبنا r از سیستم مختصات تراز محلی به سیستم مختصات جسم مرجع از طریق فرمول‌های جبر مقدماتی، انتقال پیدا می کند. از آنجاییکه سیستم مختصات تراز محلی و جسم مرجع در مبدا و مقیاسی همانند سهیم می باشند، ارتباط میان آنها برابر است با:

$$r^{BF} = R_{LL}^{BF} \cdot r^{LL} \quad (۹)$$

که بردار خط مبنا بیان شده در سیستم جسم مرجع، R_{LL}^{BF} ماتریس دوران برای انتقال بردار خط مبنا از سیستم مختصات LL به سیستم مختصات BF و r^{LL} بردار خط مبنا بیان شده در سیستم مختصات تراز محلی می باشد. ماتریس دوران R_{LL}^{BF} تحت عنوان زوایای اوپلر (هدینگ، پیچ و رول) توصیف می شود. روش معمول برای انتقال

یک سیستم دست راستی را با امتداد به شرق تکمیل می کند [۸۱۷].

بردار خط مبنا از یک آنتن اصلی به یک آنتن ثانویه بوسیله‌ی GNSS در سیستم WGS84 تعیین می شود. برای استفاده از این خط مبنا به منظور تعیین پارامترهای دوران، لازم است که به سیستم تراز محلی انتقال داده شود. مبدا سیستم تراز محلی در جایی است که آنتن اصلی قرار دارد که موقعیت آن (φ, λ, h) معمولاً بوسیله‌ی اندازه‌گیری‌های شبه فاصله یا فاز حامل در مد تعیین موقعیت نقطه‌ای تعیین می شود. انتقال یک بردار خط مبنا r از یک سیستم مختصات LL به یک CT از طریق روابط زیر صورت می پذیرد:

$$r^{CT} = R_{LL}^{CT} \cdot r^{LL} + r^{CT_0} \quad (۳)$$

که r^{CT} بیانگر بردار خط مبنا در سیستم مختصات CT، R_{LL}^{CT} ماتریس دوران برای انتقال بردار خط مبنا از LL به CT، r^{LL} بیانگر بردار خط مبنا در سیستم مختصات LL و r^{CT_0} مبدا سیستم مختصات LL که صفر نشان دهنده‌ی این است که در سیستم مختصات CT قرار دارد. ماتریس دوران R_{LL}^{CT} برابر است با:

$$R_{LL}^{CT} = R_3 \left(-\lambda - \frac{\pi}{2} \right) \cdot R_1 \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \quad (۴)$$

که R_1 ماتریس دوران حول محور X و R_3 ماتریس دوران حول محور Z می باشند. از بسط معادله‌ی بالا خواهیم داشت:

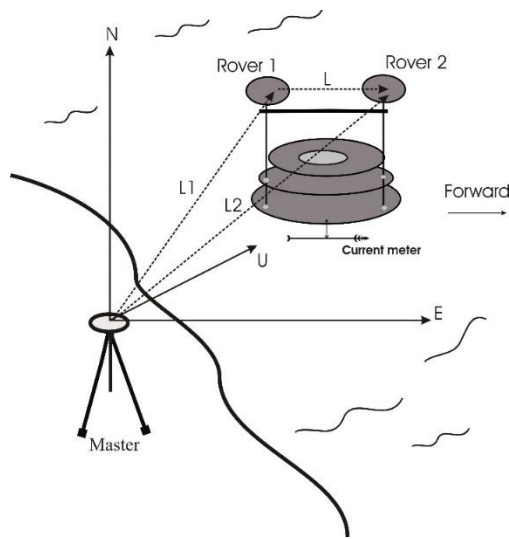
رابطه (۵)

$$R_{LL}^{CT} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & -\cos\lambda\sin\varphi & \cos\lambda\cos\varphi \\ \cos\lambda & -\sin\lambda\sin\varphi & \sin\lambda\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

همچنین ماتریس دوران برای انتقال یک بردار خط مبنا r از سیستم CT به سیستم LL بوسیله‌ی ترانهاد کردن ماتریس R_{LL}^{CT} می تواند انجام شود.

که ψ و θ و ϕ به ترتیب زاویه هدینگ، پیچ و رول جسم متحرک می‌باشند. با استفاده خاصیت ارتوگونالی ماتریس دوران $R_{312}(\psi, \theta, \phi)$ که در معادله‌ی (۱۰) نشان داده شد، معادله زیر برای محاسبه‌ی زوایای هدینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\psi = \arctan \frac{\Delta E}{\Delta N} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$



شکل ۱۲: اساس سیستم مختصات تراز محلی

که ΔE ، ΔN و ΔU به ترتیب سه مولفه‌ی بردار خط مبنا میان دو آنتن GNSS در شمال، شرق و قائم در سیستم مختصات تراز محلی می‌باشند. بازه‌ی زاویه‌ی هدینگ از ۰ تا ۳۶۰ درجه تغییر می‌کند [۱۷ و ۱۸].

۴-۲- دقت پارامترهای دوران

دقت زوایای هدینگ که از طریق معادلات به صورت مستقیم محاسبه شد، بر اساس قانون انتشار خطاها و با دیفرانسیل‌گیری از معادلات آنها، مطابق روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

با توجه به اینکه: $(\Delta E, \Delta N, \Delta U) = (e_2, n_2, u_2)$ و (e_1, n_1, u_1) خطای موقعیت نقاط می‌باشند، خطا در مولفه‌ی هدینگ که بوسیله‌ی دیفرانسیل‌گیری از معادله‌ی (۱۵) بدست آمده به صورت زیر بیان می‌شود:

از سیستم مختصات تراز محلی به سیستم مختصات جسم مرجع ابتدا با یک دوران حول محور z^{BF} با زاویه‌ی هدینگ (yaw)، سپس حول محور x^{BF} با زاویه پیچ و در نهایت حول محور y^{BF} با زاویه رول، مطابق با معادلات زیر صورت می‌گیرد:

$$\text{رابطه (۱۰)}$$

$$R_{LL}^{BF} = R_2(\phi)R_1(\theta)R_3(\psi) = R_{312}(\psi, \theta, \phi)$$

$$R_2(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$R_3(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در یک سیستم با چند آنتن GNSS مختصات نقاط بوسیله‌ی تعیین موقعیت نسبی برای هر اپک در سیستم مختصات تراز محلی با مبدا در نظر گرفتن یکی از آنتن‌ها (آنتن اصلی) تعیین می‌شود. از طرف دیگر مختصات جسم مرجع آنتن‌ها نیز می‌تواند به طور دقیق محاسبه شود و فرض می‌شود در طول حرکت نیز مختصات آنها ثابت می‌باشد [۱۷ و ۱۸]. اما در این قسمت روشی شرح داده می‌شود که پارامترهای دوران مستقیماً با استفاده از مختصات تراز محلی آنتن‌ها و بدون نیاز به مختصات جسم مرجع آنتن‌ها محاسبه می‌شود. همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، ایستگاه ثابت به عنوان آنتن اصلی و در واقع مبدا سیستم مختصات تراز محلی می‌باشد و دو خط مبنای L_1 و L_2 در سیستم تراز محلی تعیین می‌شوند. برآیند این دو بردار یعنی بردار L برداری است در سیستم مختصات جسم مرجع که نسبت به آنتن اصلی در سیستم مختصات تراز محلی با ماتریس دوران زیر، دوران می‌کند:

$$L^{BF} = R_{312}(\psi, \theta, \phi) \cdot L^{LL} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sigma_{\psi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{\Delta E^2 + \Delta N^2}\right)^2 (\sigma_{e1}^2 + \sigma_{e2}^2) + \left(\frac{\Delta E}{\Delta E^2 + \Delta N^2}\right)^2 (\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2)} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که در این رابطه θ زاویه پیچ بویه بوده و به صورت $\theta = \arctan \frac{\Delta U}{\sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}}$ تعریف می‌شود. با صرف نظر کردن از همبستگی میان مولفه‌های مختصات، انحراف معیار پارامتر هدینگ برابر است با:

حال با توجه به داشتن یک خط مبنا میان دو آنتن GNSS با طول L ، مختصات تراز محلی آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \cos \theta \sin \psi \\ L \cos \theta \cos \psi \\ L \sin \theta \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

رابطه (۱۸)

$$\sigma_{\psi} = \sqrt{\left(\frac{L \cos \theta \cos \psi}{L^2 \cos^2 \theta \sin^2 \psi + L^2 \cos^2 \theta \cos^2 \psi}\right)^2 (\sigma_{e1}^2 + \sigma_{e2}^2) + \left(\frac{L \cos \theta \sin \psi}{L^2 \cos^2 \theta \sin^2 \psi + L^2 \cos^2 \theta \cos^2 \psi}\right)^2 (\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2)}$$

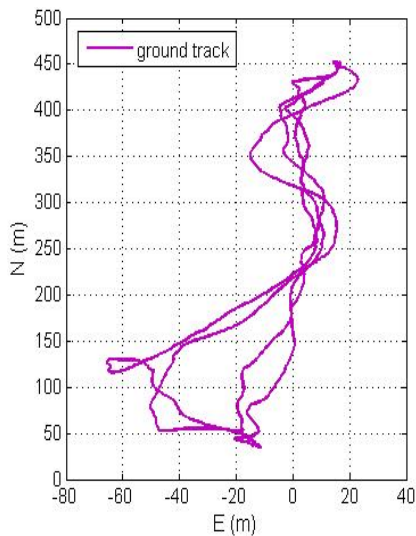
$$\sigma_{\psi} = \frac{\sqrt{\cos^2 \theta (\sigma_{e1}^2 + \sigma_{e2}^2) + \sin^2 \theta (\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2)}}{L \cos \theta} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

بر روی بویه و میزان محاسبه شده‌ی آن از طریق داده‌های موقعیت می‌باشد.

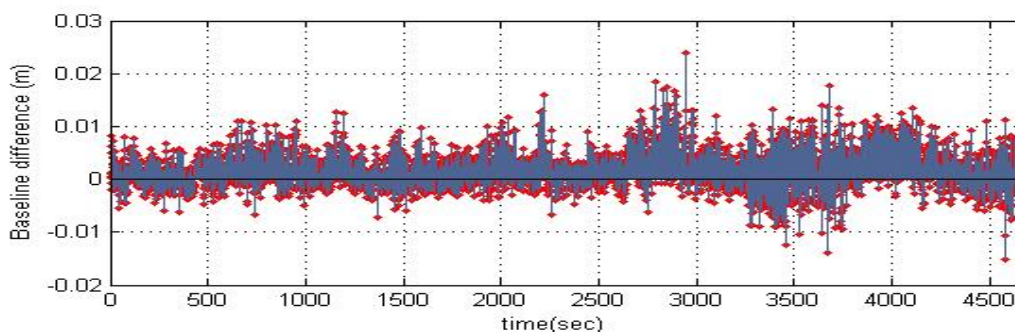
همانطور که واضح است، زمانی که دقت تعیین موقعیت σ_{max} ثابت باشد، دقت تعیین زوایای هدینگ با نسب معکوس خط مبنا L رابطه‌ی مستقیم دارد. هندسه‌ی ماهواره‌های ردیابی شده و نحوه‌ی پیکربندی آنتن‌های GNSS در مسائل مربوط به تعیین پارامترهای دوران یک سکوی متحرک بر روی دقت حاصل شده تاثیر زیادی دارد [۱۸ و ۱۹].

۵- نتایج عددی

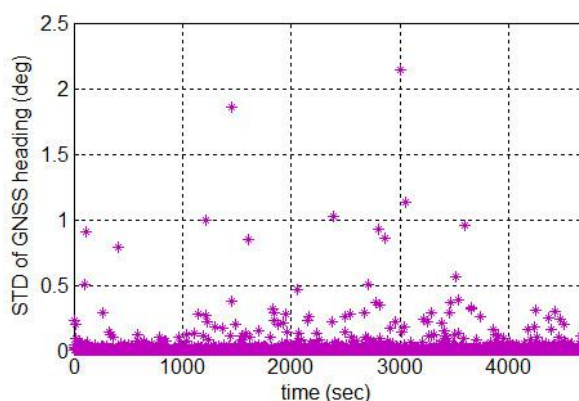
با استفاده از داده‌های موقعیت مکانی بویه بر روی آب که طی مدت زمانی مشخص و در مسیرهای رفت و برگشتی بر روی آب دریاچه کشیده شد، هدینگ بویه با دقت مناسبی محاسبه شد. در شکل (۱۳) مسیر طی شده‌ی بویه بر روی آب مشاهده می‌شود همچنین نمودار شکل (۱۴) نشان دهنده‌ی اختلاف طول خط واصل میان دو آنتن نصب شده



شکل ۱۳: مسیر طی شده‌ی بویه بر روی آب



شکل ۱۴: خطای خط مبنا L (متر)



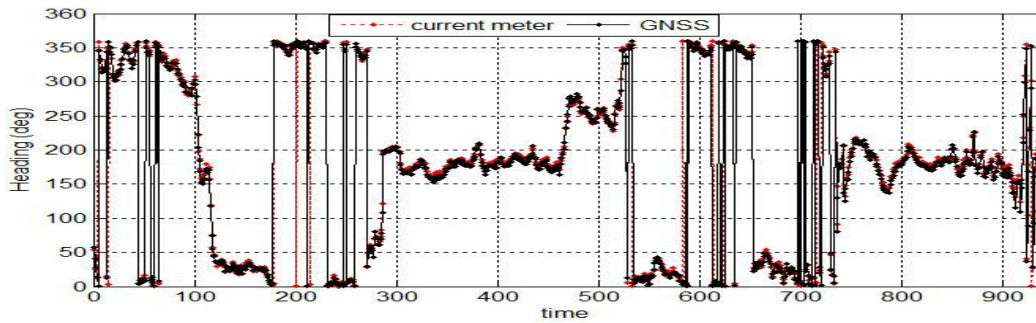
شکل ۱۵: انحراف معیار زاویه هدینگ بویه در کل زمان برداشت داده

جدول ۱: پارامترهای محاسباتی بویه

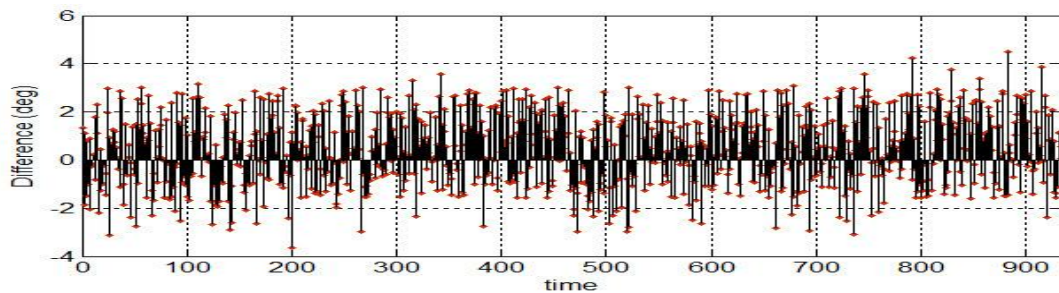
مقادیر	پارامتر محاسباتی
۰/۰۰۱۸ متر	متوسط خطای خط مبنا (L)
۰/۰۰۳۳ متر	RMSE خطای خط مبنا (L)
۰ تا ۳۶۰ درجه	رنج زاویه هدینگ اندازه‌گیری شده
۴۸/۲۷۶۰ ثانیه	انحراف معیار مولفه هدینگ

مورد استفاده قرار گرفت. همچنین با توجه به جدایی شمال مغناطیسی و شمال ژئودتیک، تصحیح انحراف مغناطیسی با در نظر گرفتن موقعیت مکانی محدوده‌ی آزمایش از طریق [۲۰] محاسبه و به داده‌های مورد نظر اعمال شد. نمودار شکل (۱۶) هدینگ حاصل از محاسبات داده‌های GNSS و هدینگ ثبت شده‌ی جریان‌سنج را در زمان انجام آزمایش و با فاصله‌ی نمونه‌برداری پنج ثانیه نشان می‌دهد و اختلاف میان دو هدینگ در شکل (۱۷) به نمایش در آمده است.

برای مقایسه دقیق هدینگ حاصل از دو سیستم GNSS و جریان‌سنج، قبل از شروع آزمایش هر دو سیستم هم‌زمان شدند. عملکرد جریان‌سنج مورد استفاده بدین صورت است که با قرارگیری در مقابل جریان آب، در کمینه‌ی نرخ نمونه‌برداری خود یعنی پنج ثانیه، متوسط سرعت جریان آب را در این زمان به عنوان پارامتر سرعت و در ثانیه پنجم جهت جریان آب را بوسیله‌ی قطب‌نمای خود نسبت به شمال مغناطیسی ثبت می‌کند و برای مقایسه‌ی هدینگ حاصل از GNSS با هدینگ حاصل از جریان‌سنج نیز هدینگ بویه در هر پنج ثانیه یکبار



شکل ۱۶: زاویه هدینگ بویه و جریان سنج



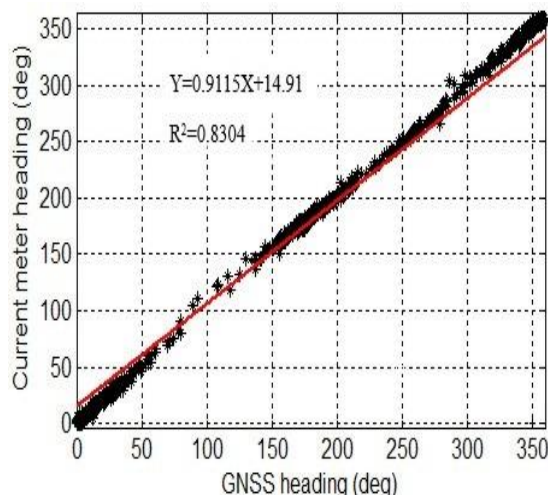
شکل ۱۷: اختلاف میان هدینگ حاصل از GNSS و هدینگ جریان سنج (درجه)

تحت تاثیر قرار گیرد، اختلاف محسوسی نبوده و می توان با توجه به معادله ی کالیبراسیون، هدینگ جریان سنج را اصلاح کرد. در نمودار شکل (۱۸) با مرجع قرار دادن هدینگ حاصل از GNSS و مقایسه ی آن با هدینگ جریان سنج، خط مستقیمی به داده ها فیت و معادله خطی مطابق آن آورده شده است.

در جدول (۲) پارامترهای آماری مربوط به مقایسه ی هدینگ حاصل از GNSS و هدینگ جریان سنج آورده شده است. مشاهده می شود که متوسط اختلاف میان هدینگ دو سیستم ۲۶' ۴۶" می باشد و با توجه به این مورد که ساختار سنسور جهت یابی جریان سنج دریایی می تواند طی عوامل محیطی

جدول ۲: مقایسه ی هدینگ جریان سنج با هدینگ GNSS

مقادیر	پارامتر محاسباتی
۲۶' ۴۶"	متوسط اختلاف
۴۰' ۲۸' ۳۵"	ماکزیمم اختلاف
۶"	مینیمم اختلاف
۱۰' ۲۹' ۲"	انحراف معیار
۱۰' ۳۲' ۵۶"	جذر خطای مربعی متوسط



شکل ۱۸: مقایسه‌ی هدینگ جریان سنج با هدینگ بویه

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله کنترل میدانی قطب‌نمای یک جریان‌سنج دریایی با استفاده از گیرنده‌های GNSS مورد بررسی قرار گرفت. زاویه هدینگ بویه به عنوان مرجعی برای بررسی هدینگ حاصل از جریان‌سنج، بوسیله‌ی دو گیرنده‌ی GNSS نصب شده بر روی آن و به روش کینماتیک نسبی محاسبه شد. زاویه هدینگ بویه از طریق روش مستقیم و بدون نیاز به مختصات جسم مرجع آن‌تن‌ها و با داشتن مختصات آن‌تن‌ها در سیستم مختصات تراز محلی با دقت مناسبی محاسبه و بعد از اعمال تصحیحات (انحراف مغناطیسی) با هدینگ ثبت شده‌ی قطب‌نمای مغناطیسی جریان‌سنج دریایی مقایسه شد. میزان اختلافات مشاهده شده میان دو هدینگ بیانگر آنست که قطب‌نمای جریان‌سنج دارای اشکال نبوده و سالم می‌باشد. در این مقاله روشی ابتکاری برای بررسی میدانی قطب‌نمای جریان‌سنج دریایی ارائه شد که می‌توان از این روش برای کالیبراسیون جریان‌سنج‌های دیگر و همچنین سنسورهایی که برای تعیین هدینگ در محیط‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند استفاده کرد. برای مرتبط کردن جریان‌سنج با سیستم GNSS در این مقاله شناور ساده‌ای با توجه

به امکانات موجود ساخته شد که می‌توان شناوری بهتر و اصولی‌تری را طراحی و ساخت و همچنین شرایط آزمایش را به گونه‌ای پیشبرد که در مدل‌ها و شرایط مختلفی آزمایش را تکرار کرد تا به بهترین شیوه برای کالیبراسیون جریان‌سنج‌ها بوسیله‌ی GNSS رسید. در این مقاله از گیرنده‌های GNSS برای بررسی قطب‌نمای جریان‌سنج استفاده شد که می‌توان با داشتن سنسورهای جهت‌یاب دیگری و مرتبط کردن آنها باهم، نتایج دقیق‌تری نیز کسب کرد.

روش مورد نظر می‌تواند سنسور سرعت‌سنجی دستگاه جریان‌سنج را به طور دقیق مورد بررسی قرار دهد و بدین گونه دو پارامتر سرعت و هدینگ حاصل از جریان‌سنج در یک شرایط واقعی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج آزمایش مذکور نشان‌دهنده‌ی موفقیت‌آمیز بودن این روش برای بررسی و کالیبراسیون جریان‌سنج‌های دریایی از نوع پروانه‌ای می‌باشد که پیشتر در آزمایشگاه‌های کالیبراسیون کالیبراسیون به شیوه‌ی رایج بررسی و معادله‌ی کالیبراسیون برای آنها ارائه می‌شد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از سازمان نقشه‌برداری کشور به جهت فراهم آوردن امکانات این تحقیق تشکر و

عزیزانی که در عملیات‌های میدانی و پردازش‌ها یاری کردند، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.

قدردانی می‌کنم. همچنین از جناب دکتر علی سلطانیپور مدیر آبنگاری، آقای محمد رضا بیات کارشناس بخش آبنگاری سازمان نقشه‌برداری و تمامی دوستان و

مراجع

- [1] Gwyn Griffiths, "Using 3Df GPS heading for improving underway ADCP data." American meteorological society, Vol.11, 1135-1143, 1994.
- [2] Raymond pollard, Jane read, "A method for calibrating shipmounted acoustic Doppler profilers and the limitation of gyro compasses" Journal of atmospheric and ocean technology, Vol. 6, NO. 6, 1989.
- [3] SIMÓN RUIZ, JORDI FONT, GWYN GRIFFITHS, ARTURO CASTELLÓN, "Estimation of heading gyrocompass error using a GPS 3DF system: Impact on ADCP measurements", SCI. MAR., 66 (4): 347-354, 2002.
- [4] CLIFFORD L. TRUMP, GEORGE O. MARMORINO, "Calibrating a Gyrocompass Using ADCP and DGPS Data.", JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY VOLUME 14, 1997.
- [5] Patrick Henkel, philipp berthold, jane jean kiam, "Calibration of magnetic field sensors with tow mass-market GNSS receivers." IEEE WPNC, 2014.
- [6] J. Crassidis, K. L. Lai and R. Haman, "Real-time attitude-independent three axis magnetometer calibration." J. of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 28. NO. 1, pp. 115-120, 2005.
- [7] Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meindl, "User manual of the Bernese GPS Software Version 5.0", Astronomical Institute, University of Bern, 2007.
- [8] Hofman-Wellenhof, Lichtenegger, Wasle, GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and more, Springer, Verlag Wien, 2008.
- [9] K. Yedukondalu, A. D. Sarma, and V. Satya Srinivas, "ESTIMATION AND MITIGATION OF GPS MULTIPATH INTERFERENCE USING ADAPTIVE FILTERING", Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 21, 133, 2011
- [10] J.K. Ray. M.E. Cannon, "Characterization of GPS Carrier Phase Multipath" Presented at ION NTM-99, San Diego, January 25-27, 1999
- [11] Gabriele Giorgi and Peter J. G. Teunissen, "GNSS Carrier Phase-Based Attitude Determination", Recent Advances in Aircraft Technology, 2012.
- [12] P. J. Buis, "GNSS Kinematic Relative Positioning for Spacecraft: Data Analysis of a Dynamic Testbed." Delft University of Technology, the Netherlands, 2008.
- [13] Teunissen, P.J.G., Verhagen, S, "On the Foundation of the Popular Ratio Test for GNSS Ambiguity Resolution" ION GNSS2004, Long Beach, CA, US, 2004.
- [14] Gabriele Giorgi, Peter J. G. Teunissen, "Carrier Phase GNSS Attitude Determination with the Multivariate Constrained LAMBDA Method", IEEEAC Paper, 2010.
- [15] Teunissen, P.J.G.: Verhagen, S, "On GNSS Ambiguity Acceptance Tests", International Global Navigation Satellite Systems Symposium, The University of New South, 2007.
- [16] Wei, M.: Schwarz, K.P, "Fast Ambiguity Resolution using an Integer Nonlinear Programming Method" ION GPS1995, Palm Springs CA, US, 1995.

- [17] Gang Lu, "Development of a GPS Multi-Antenn System for Attitude Determination" PhD Thesis, DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING CALGARY, ALBERT, 1995.
- [18] JiunHan Keong, "Determining Heading and Pitch Using a Single Difference GPS/GLONASS approach" master of science Thesis. CALGARY, ALBERTA, 1999.
- [19] M.vinnins, L.D. Gillop, "GPS heading determination using short antenna baselines", Defense research establishment Ottawa, technical note 98-001, 1997.
- [20] <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>

..



Marine current meter compass calibration Using relative kinematic positioning

Vahid Rezaali^{*1}, Alireza Azmoode Ardalan², Naser Abdi³

- 1- M.Sc student of hydrography in School of Surveying and Geospatial Eng., Faculty of Engineering, University of Tehran
2- Professor in School of Surveying and Geospatial Eng., Faculty of Engineering, University of Tehran
3- PhD student of geodesy in School of Surveying and Geospatial Eng., Faculty of Engineering, University of Tehran

Abstract

Highly accurate parameters for velocity and direction of marine current are of utmost importance in marine studies. To achieve this, accurate and calibrated current meters should be used. The direction parameters or “heading” resulted from marine current meter is measured by the aid of a compass mounted on the device. This, as well as the velocity parameter should be properly evaluated and margin of error calculated. In this paper GNSS receivers have been utilized to calibrate the compass on a marine current meter. In this method, two GNSS receivers have been installed on a buoy and then connected to a current meter. The buoy then has been pulled on a lake in a specified direction. In this method two GNSS receivers mounted on buoy using carrier phase observations have been positioned relative to a reference station and by defining a local level coordinate with the reference station as the origin, from rotation the baseline created between the two receivers to this station, heading angle has been calculated. To verify the accuracy of the calculated heading angle, criterion such as satellite geometry, solving phase ambiguity and multipath error in kinematic positioning is evaluated. Heading angles of the buoy was determined with a standard deviation 48.2760" and were compared with the headings of current meter that mean difference between heading from compass current meter and GNSS heading 26'46" is determined and calibration equation is presented for current meter compass.

Key words: heading angle, GNSS, relative kinematic, marine current meter, current meter calibration