

کنترل میدانی وضعیت سنج‌های مورد استفاده در هیدروگرافی

علیرضا آزموده اردلان^{۱*}، فرهنگ احمدی گیوی^۲، محمد هادی رضوانی^۳

^۱استاد گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
(قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری در مقابله با سوانح طبیعی)
ardalan@ut.ac.ir

^۲دانشیار گروه فیزیک فضا - موسسه ژئوفیزیک - دانشگاه تهران
ahmadig@ut.ac.ir

^۳کارشناس ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
(قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری در مقابله با سوانح طبیعی)
mhrezvani@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۲، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۳)

چکیده

یکی از موضوعات حائز اهمیت در هیدروگرافی، تعیین پارامترهای وضعیت شناور، رول، پیچ و هدینگ؛ می‌باشد. بطور معمول با نصب سنجنده تعیین وضعیت بر روی شناور، پارامترهای دورانی آن اندازه‌گیری می‌شوند. از طرفی، با توجه به استانداردهای بین‌المللی هیدروگرافی، مشاهدات وضعیت سنج‌ها می‌باید از صحت مشخصی برخوردار باشد. از سوی دیگر، با استفاده از مشاهدات فاز حامل GPS می‌توان با صحت بالاتری نسبت به سنجنده‌های یاد شده به تعیین پارامترهای وضعیت سکوی متحرک پرداخت. بر این اساس یکی از روش‌های کنترل میدانی وضعیت سنج‌ها، استفاده از گیرنده‌های GPS می‌باشد. در این مقاله، با استقرار چهار گیرنده GPS با آنتن‌های چوکرینگ در چهار گوشه یک فریم مربعی به ابعاد ۱۵ متر بر روی شناور ۲۷ متری سازمان جغرافیایی، و انجام آزمایش دریایی در سرعت‌های ۵ knots الی ۱۲ knots؛ سنجنده تعیین وضعیت شناور یاد شده مورد ارزیابی میدانی قرار گرفت. نتایج عددی نشان می‌دهد که میانگین برآورد دقت زاویای پیچ، رول و هدینگ با استفاده از گیرنده‌های GPS به ترتیب "۲۸"، "۲۸" و "۱۷" است. از طرفی صحت تعیین پارامترهای دورانی پیچ، رول و هدینگ سنجنده تعیین وضعیت مورد مطالعه به ترتیب "۷' ۳۲/۵۲"، "۷' ۴۳/۳۲" و "۳۲' ۳۶/۲۴" می‌باشد. همچنین، ضریب تصحیح بدست آمده برای پارامترهای دورانی پیچ، رول و هدینگ این وضعیت سنج به ترتیب برابر "۷' ۲۴/۶۰"، "۵۱/۱۲" و "۱۷' ۴۸/۸۴" می‌باشد. بطور کلی، نتایج حاصل از این آزمایش میدانی دلالت بر کارایی روش ارائه شده در این پژوهش دارد.

واژگان کلیدی: کنترل میدانی، وضعیت سنج، مشاهدات GNSS، رول، پیچ، هدینگ، هیدروگرافی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

با توجه به استانداردهای بین‌المللی هیدروگرافی، بمنظور تصحیح خطاهای ناشی از حرکات دورانی شناور بر روی عمق و موقعیت‌های ثبت شده، پارامترهای وضعیت بایستی اندازه‌گیری شود [۶]. پارامترهای وضعیت یک سکوی متحرک دوران حول محورهای سیستم مختصات متصل به آن (BF) بوده که رول، پیچ و هدینگ نامیده می‌شود. در واقع، پارامترهای وضعیت سکوی متحرک همان پارامترهای دورانی بین سیستم مختصات BF و سیستم مختصات تراز محلی (LL) است [۲]. بطور معمول یکی از روش‌های رایج تعیین پارامترهای دورانی شناور، استفاده از وضعیت‌سنج‌ها می‌باشد. تاریخچه بکارگیری وضعیت‌سنج‌ها در هیدروگرافی به اواسط سال ۱۹۹۰ میلادی در حذف خطاهای دورانی شناور از روی داده‌های عمق‌یابی سیستم‌های سونار مولتی‌بیم و تک‌بیم باز می‌گردد [۶]. با توجه به صحت مورد نیاز داده‌های دورانی مطابق با استانداردهای متناظر، و نظر به شرایط سخت محیط دریا و کاهش صحت وضعیت‌سنج‌ها؛ کنترل کیفیت و ارزیابی صحت اطلاعات سنجنده‌های یاد شده امری ضروری است [۷]. از طرفی، یکی از روش‌های مناسب جهت تعیین پارامترهای وضعیت شناور استفاده از مشاهدات گیرنده‌های GPS می‌باشد [۳]. بگونه‌ای که با استقرار چندین گیرنده GPS بر روی شناور، و در صورت افزایش فواصل بین آنتن‌ها می‌توان پارامترهای دورانی را با صحت بالاتری نسبت به وضعیت‌سنج‌ها تعیین نمود [۴]. بطور کلی در مسئله تعیین پارامترهای وضعیت با استفاده از مشاهدات GPS، سیستم مختصات BF و LL مطرح شده، و برآورد پارامترهای مذکور با استفاده از روش‌های مستقیم و کمترین مربعات انجام می‌پذیرد [۱۰]. در روش مستقیم، بمنظور تعیین پارامترهای دورانی تنها مختصات آنتن‌ها در LL کافی بوده؛ حال آن‌که در روش کمترین مربعات، مختصات آنتن‌ها در LL و BF مورد نیازند [۱۱]. هدف اصلی پژوهش حاضر ارائه روشی جدید بمنظور کنترل میدانی وضعیت‌سنج‌های مورد استفاده در هیدروگرافی و ارزیابی قابلیت‌های آن از طریق پیاده‌سازی میدانی بر روی شناور هیدروگرافی سازمان جغرافیایی می‌باشد. لذا برای نیل به این هدف، در بخش بعدی نحوه تعیین پارامترهای وضعیت سکوی متحرک با استفاده از

GPS ارائه خواهد شد. در بخش سوم جزئیات آزمایش میدانی صورت گرفته در آب‌های ساحلی جزیره کیش، و در بخش چهارم پردازش داده‌های جمع‌آوری شده و نتایج حاصل از آن بیان می‌گردد. در خاتمه، به نتیجه‌گیری از پژوهش میدانی صورت گرفته و پیشنهادات بمنظور انجام تحقیقات آتی خواهیم پرداخت.

۲- تعیین پارامترهای وضعیت شناور با استفاده از گیرنده‌های GPS

در ابتدا سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی GPS با هدف دسترسی آسان به اطلاعاتی همچون مختصات و سرعت راه اندازی گردیدند [۱۲]. در راستای گسترش روزافزون بکارگیری GPS کاربردهای مختلفی برای آن ارائه گردید [۵]. نتایج حاصل از تحقیقات میدانی مختلف نشان می‌دهد که سیستم‌های تعیین موقعیت قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای وضعیت یک سکوی متحرک را نیز دارا می‌باشد [۱]. از طرفی در دو دهه اخیر، با توجه به اهمیت داده‌های وضعیت در هیدروگرافی، بکارگیری سیستم‌های تعیین موقعیت در اندازه‌گیری پارامترهای توجیه شناور رشد چشمگیری داشته است. پارامترهای دورانی شناور با تعریف سیستم مختصات‌های متصل به شناور (BF) و تراز محلی (LL) و از طریق روابط انتقال بین آن‌ها تعیین می‌گردد. سیستم مختصات BF با استفاده از صفحه متشکل از سه آنتن GPS ایجاد می‌گردد. با توجه به شکل ۱، امتداد آنتن ۱ به آنتن ۲ بعنوان محور y سیستم مختصات BF، محور x به سمت راست واقع در صفحه متشکل از آنتن‌های ۱، ۲، و ۳؛ و محور z بگونه‌ای انتخاب می‌گردد که این سیستم مختصات دست راستی شود. از طرفی، سیستم مختصات LL با انتخاب محور y به سمت شمال ژئودتیک، محور x به سمت شرق ژئودتیک، و محور z به سمت خارج و در امتداد نرمال بیضوی تعریف می‌گردد. شکل ۲ نحوه تعریف سیستم مختصات LL و ارتباط آن با سیستم مختصات WGS84 را نشان می‌دهد.

۲-۱- تعیین مقادیر اولیه پارامترهای دورانی شناور

جهت محاسبه پارامترهای وضعیت می‌باید موقعیت نقاط در سیستم مختصات‌های LL و BF اندازه‌گیری گردد. از طرفی، با استفاده از گیرنده‌های تعیین موقعیت در هر لحظه موقعیت آنتن‌ها در سیستم مختصات WGS84 تعیین می‌شود. با فرض این‌که یکی از آنتن‌ها مبدأ سیستم LL باشد، مختصات ترانز محلی تبدیل نمود سیستم WGS84 به مختصات ترانز محلی تبدیل نمود (Lu, 1995). بمنظور تعیین مقادیر اولیه پارامترهای وضعیت، تنها موقعیت آنتن‌ها در سیستم مختصات LL لازم و کافی می‌باشد. با فرض آن‌که وضعیت نصب آنتن‌های موقعیت مطابق شکل ۱ باشد، و در نظر گرفتن آنتن ۱ بعنوان مبدأ سیستم مختصات ترانز محلی، می‌توان بیان نمود:

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{R}(h, p, r) \mathbf{u}_i \quad (3)$$

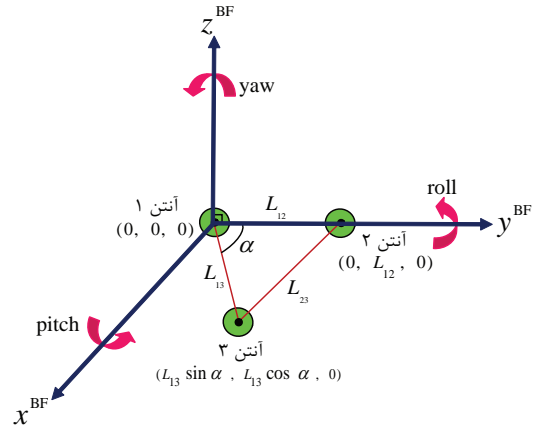
همچنین با فرض آن‌که موقعیت آنتن‌های ۲ و ۳ در سیستم مختصات BF، $\mathbf{b}_2 = (0, L_{12}, 0)^T$ و $\mathbf{b}_3 = (L_{13} \sin(\alpha), L_{13} \cos(\alpha), 0)^T$ ، و موقعیت متناظر این نقاط در سیستم مختصات LL، $\mathbf{u}_2 = (x_2, y_2, z_2)^T$ و $\mathbf{u}_3 = (x_3, y_3, z_3)^T$ باشد؛ بر اساس خاصیت تعامد ماتریس دوران و جایگذاری مختصات آنتن ۲ در رابطه (۳)، معادلات ذیل جهت محاسبه مقادیر اولیه پارامترهای دورانی هدینگ و پیچ حاصل می‌گردد:

$$h = -\tan^{-1}(x_2 / y_2) \quad (4)$$

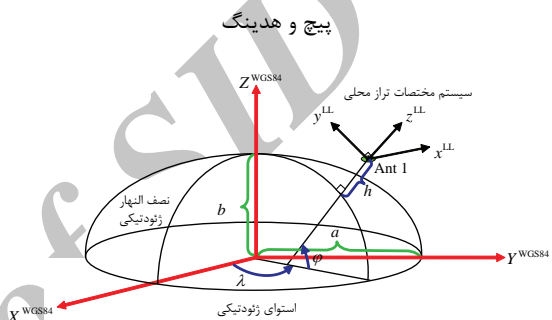
$$p = -\tan^{-1}(z_2 / \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) \quad (5)$$

پس از محاسبه مقادیر اولیه پارامترهای دورانی یاد شده، بردار موقعیت آنتن ۳ در سیستم مختصات LL، با دوران حول محور z به اندازه هدینگ h و دوران حول محور x به اندازه پیچ p به بردار (x_3'', y_3'', z_3'') تبدیل می‌گردد.

سرانجام، با دوران بردار موقعیت حاصل حول محور y به اندازه r بردار موقعیت متناظر در سیستم مختصات BF حاصل می‌شود:



شکل ۱- نمایش شماتیک سیستم مختصات BF تعریف شده توسط آنتن‌های GPS نصب شده بر روی شناور، به همراه دوران‌های رول،



شکل ۲- نحوه ارتباط بین سیستم‌های مختصات WGS84 و ترانز محلی (LL)

بر این اساس، با استفاده از ماتریس دوران شامل دوران حول محورهای x و y ، موقعیت یک نقطه از سیستم مختصات LL به سیستم مختصات BF انتقال می‌یابد [۱۳]:

$$\begin{pmatrix} x^{BF} \\ y^{BF} \\ z^{BF} \end{pmatrix} = \mathbf{R}(h, p, r) \begin{pmatrix} x^{LL} \\ y^{LL} \\ z^{LL} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{R}(h, p, r) = \mathbf{R}_2(r) \mathbf{R}_1(p) \mathbf{R}_3(h) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} c(r)c(h) - s(r)s(p)s(h) & c(r)s(h) + s(r)s(p)c(h) & -s(r)c(p) \\ -c(p)s(h) & c(p)c(h) & s(p) \\ s(r)c(h) + c(r)s(p)s(h) & s(r)s(h) - c(r)s(p)c(h) & c(r)c(p) \end{bmatrix}$$

در روابط فوق $\mathbf{R}(h, p, r)$ ماتریس متعامدی است که مختصات ترانز محلی $(x^{LL}, y^{LL}, z^{LL})^T$ را به مختصات متناظر در BF $(x^{BF}, y^{BF}, z^{BF})^T$ تبدیل می‌نماید. دوران حول محور x با پیچ p ، دوران حول محور y با رول r ، و دوران حول محور z با هدینگ h نمایش داده شده است. همچنین C و S بترتیب توابع کسینوس و سینوس می‌باشد.

معادله (۹)، یک مدل سرشکنی کمترین مربعات ضمنی بمنظور تعیین پارامترهای مجهول (h, p, r) می-باشد [۸]. با خطی سازی معادله (۹) حول پارامترهای مجهول (h, p, r) و مشاهدات (مختصات آنتن‌ها در BF و LL) می‌توان نوشت:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_n \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \delta + \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{B}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_3 & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & \cdots & \mathbf{B}_n \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}} \mathbf{v} + \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{w}_2 \\ \mathbf{w}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_n \end{pmatrix}}_{\mathbf{w}} = \mathbf{0} \quad (10)$$

یا:

$$\mathbf{A}\delta + \mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad (11)$$

به طوری که:

$$\mathbf{A}_i \Big|_{h^0, r^0, p^0} = \left(\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial h} \mathbf{I}_i \quad \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial p} \mathbf{I}_i \quad \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial r} \mathbf{I}_i \right)_{3 \times 3} \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_i = (\mathbf{R} \Big|_{h^0, r^0, p^0} - \mathbf{I}_{3 \times 3})_{3 \times 6} \quad (13)$$

$$\mathbf{w}_i = (\mathbf{R} \Big|_{h^0, r^0, p^0} \mathbf{I}_i - \mathbf{b}_i)_{3 \times 1} \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{1_i} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_{b_i} \end{pmatrix}_{6 \times 6} \quad (15)$$

$$\delta = (\delta h, \delta r, \delta p)_{3 \times 1}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{v} = (\delta \mathbf{l}_2, \delta \mathbf{b}_2, \delta \mathbf{l}_3, \delta \mathbf{b}_3, \dots, \delta \mathbf{l}_n, \delta \mathbf{b}_n)^T \quad (17)$$

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} \mathbf{C}_2^{-1} & \mathbf{0}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{C}_3^{-1} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 6} & \vdots & \mathbf{C}_n^{-1} \end{pmatrix} \quad (18)$$

در روش کمترین مربعات جهت برآورد تصحیحات پارامترهای مجهول $(\delta \hat{h}, \delta \hat{r}, \delta \hat{p})$ داریم:

$$\hat{\delta} = -\mathbf{N}^{-1} \mathbf{u} = -(\mathbf{A}^T (\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{w} \quad (19)$$

همچنین برای برآورد پارامترهای مجهول:

$$(\hat{h}, \hat{r}, \hat{p})^T = (h^0, r^0, p^0)^T + (\delta \hat{h}, \delta \hat{r}, \delta \hat{p})^T \quad (20)$$

و در خاتمه برای برآورد ماتریس وریانس-

کوواریانس مجهولات خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix} L_{13} s(\alpha) \\ L_{13} c(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c(r) & 0 & -s(r) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(r) & 0 & c(r) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_3'' \\ y_3'' \\ z_3'' \end{pmatrix} \quad (6)$$

که از سطر سوم معادله (۶)، پارامتر دورانی رول بدست می‌آید:

$$r = -\tan^{-1}(z_3''/x_3'') \quad (7)$$

مقادیر حاصل از این روش بعنوان مقادیر اولیه در برآورد کمترین مربعات پارامترهای وضعیت شناور مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۲-۲- برآورد کمترین مربعات پارامترهای دوران شناور

همان طور که بیان گردید، با در نظر گرفتن مبدا سیستم مختصات محلی در آنتن ۱، مختصات بدست آمده هر آنتن از سیستم مختصات ژئوسنتریک WGS84 به سیستم مختصات LL تبدیل می‌گردد. از طرفی مختصات هر آنتن در سیستم BF تنها یکبار و به کمک روش‌های نقشه‌برداری تعیین می‌گردد. بر این اساس، با داشتن موقعیت هر آنتن در سیستم مختصات LL و سیستم مختصات BF و با توجه به روابط (۱) و (۲) و همچنین سرشکنی کمترین مربعات می‌توان برآورد بهینه‌ای از پارامترهای دوران (h, p, r) را بدست آورد.

با فرض اینکه مختصات آنتن i ام در سیستم مختصات LL و متناظر آن در سیستم مختصات BF با $\mathbf{b}_i = (x_i^{\text{BF}}, y_i^{\text{BF}}, z_i^{\text{BF}})^T$ و $\mathbf{l}_i = (x_i^{\text{LL}}, y_i^{\text{LL}}, z_i^{\text{LL}})^T$ نشان داده شود، و با توجه به رابطه (۱) داریم:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{b}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n \end{pmatrix} = \mathbf{R}(h, p, r) \begin{pmatrix} \mathbf{l}_2 \\ \mathbf{l}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{l}_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

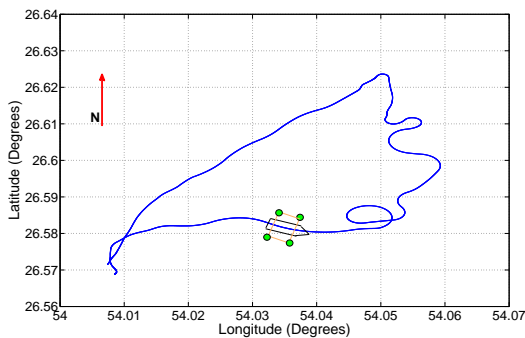
و یا بصورت ماتریسی:

$$\mathbf{b} = \mathbf{R}\mathbf{l} \quad (9)$$

جدول ۱- موقعیت آنتن گیرنده‌های GPS در سیستم مختصات BF

| آنتن‌های GPS | x (متر) | y (متر) | z (متر) |
|--------------|---------|---------|---------|
| آنتن ۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ |
| آنتن ۲ | ۰/۱۹۹۳ | ۱۴/۳۸۷۵ | -۰/۰۰۲۴ |
| آنتن ۳ | ۱۵/۰۵۱۹ | ۰/۱۴۸۳ | -۰/۱۰۷۵ |
| آنتن ۴ | ۱۴/۸۹۷۱ | ۱۴/۲۵۳۸ | ۰/۸۶۹۹ |

پس از تعیین مختصات BF، ۲۰ دقیقه دیگر شناور در اسکله متوقف تا از طریق مشاهدات جمع‌آوری شده در آن مدت، رفع ابهام فاز حاصل گردد. سپس شناور از اسکله خارج و در مسیر از قبل طراحی شده (شکل ۴) با سرعت-های ۵knots الی ۱۲knots به حرکت در آمده تا داده‌های ارزیابی میدانی سنجیده تعیین وضعیت جمع‌آوری گردد. در هنگام اجرای آزمایش میدانی، ۷ الی ۱۵ ماهواره مشاهده، و مقادیر PDOP بین ۰/۸۴ الی ۱/۷۹ بودند.



شکل ۴- مسیر حرکت شناور در حین اجرای آزمایش میدانی در آب‌های ساحلی جزیره کیش

۴- پردازش داده‌ها و نتایج حاصل از آن

پس از اجرای آزمایش میدانی، با انجام پس-پردازش مشاهدات تفاضلی دوگانه فاز حامل، موقعیت نسبی آنتن-های گیرنده تعیین موقعیت نصب شده بر روی شناور در سیستم مختصات WGS84 تعیین گردید. سپس با در نظر گرفتن مبدا سیستم LL در مرکز آنتن ۱، موقعیت-های حاصل از سیستم مختصات WGS84 به سیستم مختصات LL انتقال یافت. پس از آن، با بکارگیری مدل کمترین مربعات ارائه شده، پارامترهای دورانی شناور به همراه دقت آن در هر اپوک مشاهداتی GPS برآورد گردید. در شکل ۵، هدینگ محاسباتی با استفاده از مدل کمترین مربعات، به همراه داده‌های مشاهداتی توسط وضعیت-سنج یاد شده، در هنگام اجرای آزمایش ارزیابی نشان داده شده است. در این شکل بمنظور تمایز و وضوح بیشتر، هدینگ

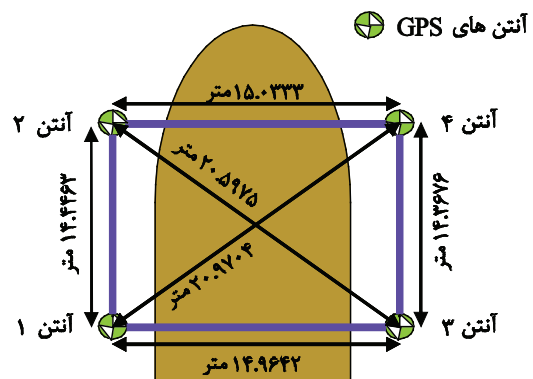
$$C_{\delta} = \sigma_0^2 (A^T (B P^{-1} B^T)^{-1} A)^{-1} \quad (21)$$

در روابط فوق (h^0, r^0, p^0) مقادیر اولیه بدست آمده پارامترهای دورانی می‌باشد که در فرآیند خطی سازی معادله (۹) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- آزمایش میدانی

آزمایش میدانی مورد نیاز این تحقیق با استفاده از شناور ۲۷ متری سازمان جغرافیایی با توجه به وضعیت-سنج نصب شده بر روی آن (با دقت اسمی ۳' برای رول و پیچ، و ۶' برای هدینگ) و در آب‌های ساحلی جزیره کیش صورت پذیرفت. در ابتدای آزمایش، فریم مربعی شکل به ابعاد ۱۵ متر به شناور متصل، و آنتن‌های چوکرینگ (بمنظور کاهش خطاهای چند مسیری و جهش فاز) در چهار گوشه آن نصب گردید. شکل ۳ نحوه قرارگیری آنتن گیرنده‌های تعیین موقعیت بر روی این شناور هیدروگرافی را نشان می‌دهد.

پیش از اجرای آزمایش میدانی، همزمانی ساعت گیرنده تعیین موقعیت با ساعت کامپیوتر جمع‌آوری کننده داده-های وضعیت-سنج انجام، و نرخ نمونه‌برداری مشاهدات گیرنده‌های تعیین موقعیت ۱ ثانیه، و سنجیده تعیین وضعیت ۰/۰۳ ثانیه تنظیم گردید. سپس با بکارگیری روش‌های نقشه برداری در هنگام استقرار شناور در اسکله، موقعیت آنتن گیرنده‌های GPS در سیستم مختصات BF با دقت ۵ میلی متر تعیین گردید. در جدول ۱، موقعیت آنتن گیرنده‌های GPS در سیستم مختصات BF آورده شده است.



شکل ۳- نحوه استقرار آنتن گیرنده‌های GPS بر روی شناور

زوایای دوران کاملاً مشهود است. در جدول ۲، اطلاعات آماری دقت برآورد شده پارامترهای دورانی شناور حاصل از مدل کمترین مربعات آورده شده است. با توجه به جدول ۲، میانگین انحراف معیار برآورد شده پیچ، رول و هدینگ توسط روش کمترین مربعات به ترتیب "۲۸"، "۲۸" و "۱۷" می باشد.

جدول ۲- اطلاعات آماری انحراف معیار برآورد شده پارامترهای دورانی شناور در آزمایش میدانی توسط روش کمترین مربعات

| پیچ | رول | هدینگ | پارامترهای آماری |
|-------|--------|-------|------------------|
| ۲۸" | ۲۸" | ۱۷" | میانگین |
| ۲/۱۸" | ۲/۵۵" | ۱/۶۷" | انحراف معیار |
| ۱۸" | ۱۸" | ۱۲" | کمینه |
| ۵۹" | ۱' ۱۵" | ۲۲" | بیشینه |

در جدول ۳ اطلاعات آماری اختلاف پارامترهای دورانی محاسباتی و مشاهداتی شناور در هنگام اجرای آزمایش میدانی آورده شده است. با توجه به جدول ۳، جذر خطای مربعی متوسط پیچ، رول و هدینگ سنجنده تعیین وضعیت بعنوان معیار صحت آن به ترتیب "۷' ۳۲/۵۲"، "۷' ۴۳/۳۲" و "۳۲' ۳۶/۲۴" است. از طرفی میانگین پیچ، رول و هدینگ وضعیت سنج بعنوان ضریب تصحیح "۷' ۲۴/۶۰"، "۵۱/۱۲" و "۱۷' ۴۸/۸۴" می باشد.

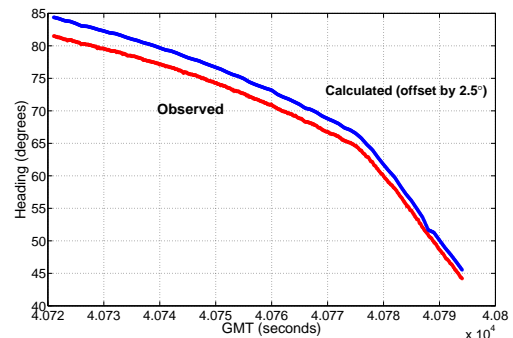
جدول ۳- اطلاعات آماری اختلاف پارامترهای دورانی محاسباتی و مشاهداتی شناور در حین اجرای آزمایش

| پیچ | رول | هدینگ | پارامترهای آماری |
|------------|-------------|------------|------------------|
| ۷' ۲۴/۶۰" | ۵۱/۱۲" | ۱۷' ۴۸/۸۴" | میانگین |
| ۱' ۲۵/۳۲" | ۷' ۴۰/۴۴" | ۲۷' ۱۹/۸۰" | انحراف معیار |
| ۱' ۳۷/۸۹" | -۲۰' ۴۱/۳۲" | ۴۸' ۴۲/۴۱" | کمینه |
| ۱۰' ۵۱/۴۹" | ۲۳' ۲۵/۱۲" | ۱۳' ۵۵/۹۳" | بیشینه |

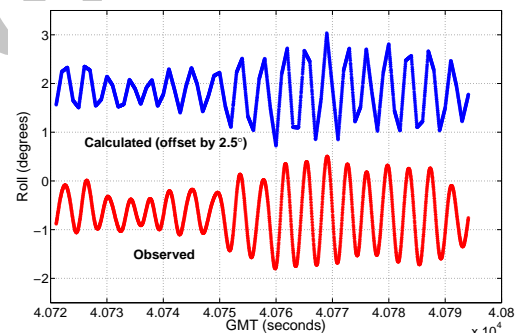
۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله با استقرار چهار گیرنده GPS بفواصل ۱۵ متر از یکدیگر بر روی یک شناور هیدروگرافی، و استفاده از مدل کمترین مربعات، پارامترهای دورانی شناور به همراه دقت آن برآورد گردید. با توجه به این که در روش کمترین مربعات با بهره گیری از مختصات تمامی گیرنده-های GPS در تعیین پارامترهای دورانی استفاده می گردد، برآوردهای حاصل کمتر تحت تأثیر خطاهای رخ داده شده در یک گیرنده قرار می گیرد.

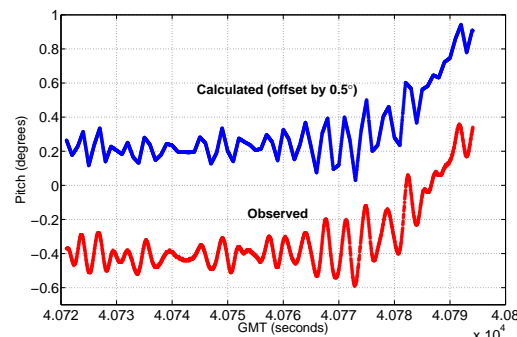
محاسباتی با آفست $2/5^\circ$ ترسیم گردیده است. در شکل-های ۶ و ۷، داده های رول و پیچ مشاهداتی توسط وضعیت سنج نصب شده بر روی شناور مورد مطالعه، و مقادیر متناظر برآورد شده توسط مدل کمترین مربعات در هنگام اجرای آزمایش نشان داده شده است. بطور مشابه، در این شکل ها نیز به منظور وضوح بیشتر، رول و پیچ محاسباتی با آفست های $2/5^\circ$ و $0/5^\circ$ نمایان گردیده است.



شکل ۵- هدینگ محاسباتی (منحنی آبی) و مشاهداتی (منحنی قرمز) شناور در هنگام اجرای آزمایش میدانی



شکل ۶- رول محاسباتی (منحنی آبی) و مشاهداتی (منحنی قرمز) شناور در حین اجرای آزمایش میدانی



شکل ۷- پیچ محاسباتی (منحنی آبی) و مشاهداتی (منحنی قرمز) شناور در هنگام اجرای آزمایش میدانی

همان طور که در شکل های ۵، ۶، و ۷ دیده می شود، همبستگی منحنی های محاسباتی و مشاهداتی هر یک از

استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش، بطور پریودیک و منظم صحت وضعیت سنج‌های مورد استفاده در هیدروگرافی مورد ارزیابی میدانی قرار گرفته و در صورت لزوم با تعیین پارامتر تصحیح، کالیبراسیون میدانی آن صورت پذیرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری سازمان جغرافیایی در انجام عملیات میدانی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود موجب بهبود کیفیت مقاله گشته‌اند صمیمانه تشکر می‌شود.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در طی اجرای آزمایش ارزیابی میدانی، میانگین دقت برآورد پیچ، رول و هدینگ توسط روش کمترین مربعات به ترتیب "۲۸، ۲۸" و "۱۷" می‌باشد. لازم به ذکر است که این مقادیر از دقت مشاهدات وضعیت‌سنج نصب شده بر روی شناور مد نظر به مراتب بالاتر بوده، که در نتیجه موجب دلالت بر کارایی روش ارائه شده در این پژوهش دارد. از طرفی صحت تعیین پارامترهای دورانی پیچ، رول و هدینگ سنجنده تعیین وضعیت به ترتیب "۷' ۳۲/۵۲"، "۷' ۴۳/۳۲" و "۷' ۳۶/۲۴" است. حال آنکه ضریب کالیبراسیون پیچ، رول و هدینگ وضعیت‌سنج مطالعاتی به ترتیب برابر "۷' ۲۴/۶۰"، "۷' ۵۱/۱۲" و "۷' ۴۸/۸۴-۱" می‌باشد. در خاتمه پیشنهاد می‌گردد که با

مراجع

- [1] Cohen CE (1992) Attitude determination Using GPS, Ph.D. Dissertation, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, California, the US.
- [2] Eling C, Zeimet P, Kuhlmann H (2012) Development of an instantaneous GNSS/MEMS attitude determination system, GPS Solut, Volume 17, Issue 1, pp 129-138.
- [3] García JG, Mercader PI, Muravchik CH (2005) Use of GPS carrier phase double differences, Latin American Applied Research, Volume 35, Issue 2, pp 115-120.
- [4] Hu C, Guo M (2009) 3-D attitude determination and accuracy analysis based on multi-GPS receivers, Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University, Volume 37, Issue 8, pp 1100-1103.
- [5] Hwang D-H, Oh SH, Lee SJ, Park C, Rizos C (2005) Design of a low-cost attitude determination GPS/INS integrated navigation system, GPS Solut, Volume 9, Issue 4, pp 294-311.
- [6] IHO (2005) Manual on Hydrography, Publication M-13, 1st Edition, Published by the International Hydrographic Bureau, Monaco.
- [7] IMCA (2007) Guidelines for: The Use of Multibeam Echosounders for Offshore Surveys, International Marine Contractors Association Publication, Scotland.
- [8] Krakiwsky EJ (Ed.) (1987) Papers for the CISM Adjustment and Analysis Seminars, The Canadian Institute of Surveying and Mapping, Ottawa.
- [9] Lu G (1995) Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination, PhD Thesis, university of Calgary, Canada.
- [10] Lu G, Cannon ME, LaChapelle G, Kielland P (1994) Attitude determination using dedicated and nondedicated multiantenna GPS sensors, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Volume 30, Issue 4, pp 1053-1059.
- [11] Park C, Teunissen PJG (2009) Integer least squares with quadratic equality constraints and its application to GNSS attitude determination systems, International Journal of Control, Automation and Systems, Volume 7, Issue 4, Pages 566-576.
- [12] Tenn H-K, Jan S-S, Hsiao F-B (2009) Pitch and roll attitude estimation of a small-scaled helicopter using single antenna GPS with gyroscopes, GPS Solut, Volume 13, Issue 3, pp 209-220.
- [13] Wertz JR (Ed.) (1978) Spacecraft Attitude Determination and Control, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.