نشربه علمی بژوہشی مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸ Vol.7, No.3, Autumn 2019 ۵۵–۶۲ مقاله پژوهشی

این مقاله در دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی بهعنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ میرسد.

بررسی توانایی تصاویر سنجنده مادیس در تخمین تأخیر تروپوسفری در تعیین موقعیت مطلق دقیق

سعید حاجی آقاجانی'، یزدان عامریان'*

- دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدین طوسی
 - ۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

چکیدہ

تأخیر امواج به دلیل گذر از لایه تروپوسفر همواره بهعنوان عاملی تاثیرگذار در سیستم تعیین موقعیت جهانی مطرح میباشد. در این پژوهش ضمن بررسی روش ردیابی اشعه سهبعدی به منظور محاسبه تأخیر ناشی از لایه تروپوسفر، توانایی تصاویر سنجنده مادیس که یک ابزار مطرح و پرکاربرد در محاسبات جوی میباشد، در پیادهسازی این الگوریتم و محاسبه تأخیر تروپوسفری در راستای تعیین موقعیت مطلق دقیق، مورد سیستم قرار گرفته است. بدین منظور با انتخاب منطقهای در مرکز اروپا و دریافت تصویری از این سنجنده مادیس که یک ابزار مطرح و مستبخش قرار گرفته است. بدین منظور با انتخاب منطقهای در مرکز اروپا و دریافت تصویری از این سنجنده در آن منطقه در تاریخ منطقه و دریافت تصویری از این سنجنده در آن منطقه در تاریخ منطقه و معانس کار گرفته است. بدین منظور با انتخاب منطقهای در مرکز اروپا و دریافت تصویری از این سنجنده در آن منطقه در تاریخ منطقه و همچنین اطلاعات هواشناسی کارآیی این مشاهدات گردید. علاوه بر این به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده، از مشاهدات رادیوسوند موجود در روش ردیابی اشعه سه بررسی کارآیی این مشاهدات گردید. علاوه بر این به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده، از مشاهدات رادیوسوند موجود در روش ردیابی اشعه سه بعدی در محل مربوط به یک ایستگاه سیستم تعیین موقعیت جهانی واقع در کشور ازیده، با بکارگیری هر سه نوع منطقه و همچنین اطلاعات هواشناسی تأخیر بدست آمده از تصویر ماهوارهای با دو مشاهده دیگر ۲٫۹۸ و کمینه آن صفر سانتیمتر بود. داده ها پیادهسازی شد. بیشینه اختلاف بین تأخیر بدست آمده از تصویر ماهوارهای با به مرار ۱ و جذر میانگین مربعات اختلاف بین مشاهده شد. در ادامه تعیین موقعیت مطلق دقیق با استغاده از دامهانی بیزه معونین میزان جذر میانگین مربعات اختلاف بین مشرع میزان جزر میازی برایز و جنر میانگین مربعات اختلاف بین و دادههای یعن مرای را ۲٫۹۸ سانتیمتر مشاهده شد. در ادامه تعیین موقعیت مطلق دقیق با ستفاده از نرمافزار برنیز و ممچنین میزان جذر میانگین مربعات اختلاف بین مشاهده شد. در ادامه تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از نرمافزار برنیز و با بهره گیری از تأدیرهای محاسه شده از دادههای مختطه حور گرفت و با مختصات دقیق ایستگاه مقایسه گردید. دقت موقعیت بدست آمده با بهرحیحای تروپوسفری سرماورای ی بار ۲٫۹۹ ساین در دو موقعیت بدست آمده با تصحیحان تروپوسفری را را را با درم و و مرفری

واژههای کلیدی: تأخیر تروپوسفری، تعیین موقعیت مطلق دقیق، مادیس، دادههای هواشناسی، رادیوسوند، ردیابی اشعه سهبعدی

* نویسنده مکاتبه کننده: : تهران- خیابان ولیعصر- تقاطع میرداماد غربی- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک تلفن: ۸۸۸۷۷۰۷۱ (داخلی: ۳۰۲)

Email: amerian@kntu.ac.ir

سال هفتم ● شماره سوم ● پاییز ۱۳۹۸

۱– مقدمه

در تکنیکهای تعیین موقعیت ماهوارهای، تأخیر ناشی از لایه تروپوسفر همچنان بهعنوان عاملی تاثیرگذار در نتايج حاصل مطرح مى باشد. مؤلفه خشک تأخير تروپوسفری، متأثر از دما و فشار و مؤلفه تر آن، علاوه بر وابستگی به دما و فشار، تابعی از میزان رطوبت در طول مسیر سیگنال ارسالی از ماهواره میباشد. تغییرات زمانی و مکانی شاخصهای هواشناسی چه در سطح و چه در لایههای بالایی جو باعث می شود که این خطا به سادگی قابل محاسبه نباشد. متداول ترین راه حل این مسأله استفاده از توابع نگاشت می باشد که توسط محققین گوناگون طیف وسیعی از این توابع پیشنهاد شده است. اما در سالهای اخیر روش ردیابی اشعه^۱ بهعنوان راهحلى متفاوت بهمنظور محاسبه تأخير تروپوسفری مطرح شده است. در این روش مسیر اشعه بین گیرنده و فرستنده تعیین می شود و مبنای این برآورد، شاخصهای هواشناسی مانند درجه حرارت، فشار و فشار بخار آب می باشند. قدمت مفهوم ردیابی اشعه به چند دهه میرسد. تایر در سال ۱۹۶۷ با استفاده از یک مدل هندسی ساده و ترکیب آن با قانون اسنل، مدل سادهای به لحاظ محاسباتی بدست آورد که روش ردیابی اشعه دو بعدی نامیده می شود [۱]. هابیگر و همکاران در سال ۲۰۰۸ ایده استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی بر مبنای معادلات آیکونال^۲ بهمنظور محاسبه تأخیر تروپوسفری را ارائه دادند [۲]. همچنین هابیگر در سال ۲۰۱۰ و نفیسی و همکاران در سال ۲۰۱۲ برای اولین بار از دادههای رادیوسوند و مدلهای عددی هواشناسی بهمنظور انجام رديابي اشعه استفاده نمودند [٢و٣]. هافمایستر در سال ۲۰۱۶ یکی از مهمترین و جامعترین منابع را در تئوری روشهای ردیابی اشعه ارائه نمود[۴]. همچنین حاجی آقاجانی و عامریان در

سال ۲۰۱۷ از روش ردیابی اشعه سهبعدی بهمنظور افزایش دقت روش توموگرافی تروپوسفر استفاده نمودند[۵]. از آنجایی که دقت این روش وابستگی مستقیم به دقت و قدرت تفکیک زمانی و مکانی شاخصهای هواشناسی دارد، در این پژوهش بحث استفاده از تصاویر سنجنده مادیس^۳ (MODIS) که ابزاری مطرح و پرکاربرد در راستای تخمین شاخصهای جوی میباشد مطرح شده است.

در این پژوهش ابتدا روشهای مختلف محاسبه تأخیر تروپوسفری را از نظر خواهیم گذراند. در ادامه با استفاده از روش ردیابی اشعه سهبعدی به محاسبه تأخیر تروپوسفری با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس و مشاهدات رادیوسوند و دادههای ERA-Interim پرداخته خواهد شد. سپس با استفاده از تأخیرهای بدست آمده و با بکارگیری مشاهدات ایستگاه GPS واقع در محل، عملیات تعیین موقعیت مطلق دقیق صورت گرفته و در نهایت نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

۲- تأخیر تروپوسفری و روشهای محاسبه آن میزان تأخیر انتشار سیگنال در عبور از لایه تروپوسفر طبق رابطه (۱) برابر با اختلاف بین طول مسیر واقعی و طول مسیر هندسی می باشد که در شکل(۱) نشان داده

شده است [۶].
$$d_{trop} = \int_{ray} nds - \int_{vac} ds$$
 (۱) رابطه (۱)

با در نظر گرفتن G بهعنوان مسیر هندسی موج الکترومغناطیس و اعمال آن، رابطه تأخیر به صورت رابطه (۲) خواهد بود [۵]:

$$d_{trop} = \int_{noy} (n-1) ds = 10^{-6} \int N_{trop} ds$$
 (۲) رابطه (۲)

³ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

¹Ray tracing ²Eikonal equations

در رابطه اخیر N_{trop} انکسار پذیری^۱ نامیده می شود. انکسارپذیری را میتوان طبق رابطه (۳) به دو مؤلفه خشک N_d^{trop} و تر N_w^{trop} تقسیم کرد [۵]:

 $N^{trop} = N_{d}^{trop} + N_{w}^{trop}$ (۳) مؤلفه خشک انکسارپذیری ناشی از بخش هیدرواستاتیک⁷ جو و مؤلفه تر آن ناشی از بخش غیر هیدرواستاتیک⁷ جو میباشد. به این ترتیب، تأخیر تروپوسفری از دو تأخیر خشک و تأخیر تر تشکیل می شود که حدود ۹۰ درصد تأخیر تروپوسفری ناشی از بخش خشک میباشد [۶].

در حال حاضر از سه روش عمده برای مدل سازی تروپوسفر جهت تصحيح اين تأخير استفاده مي شود. مدلهای پیشبینی جهانی، تخمین تأخیر تروپوسفری به عنوان مجهول و روش رديابي اشعه از جمله روشهای مورد استفاده میباشند. در این بخش به جزئیاتی در مورد سه روش عمده ذکر شده در برآورد خطای مورد بحث پرداخته شده است. تحقیقات بسیاری در زمینه تولید مدلهای ترویوسفری برای محاسبه انکسار پذیری (N) در طول مسیر سیگنال صورت گرفته است که از مهمترین آنها میتوان به مدل هاپفیلد در سال ۱۹۶۹ و مدل سستامینن در سال ۱۹۷۳ اشاره کرد. تفاوت عمده مدلهای پیش بینی جهانی در پروفیل انکساریذیری، نحوه نگاشت تأخیر عمودی محاسبه شده در راستای زاویه ارتفاعی ماهواره است. مدل سستامینن یکی از رایجترین و اجراییترین مدلهای پیشبینی میباشد. این مدل بر گرفته از قانون گازها بوده و مدلی استاندارد است. این مدل برای تخمین تأخیر تروپوسفری در زوایای ارتفاعی بزرگتر از ۱۰ درجه معتبر میباشد. سستامینن در سال ۱۹۳۷ $\left(d_{w}^{z}\right)$ میلادی دو مؤلفه خشک $\left(d_{h}^{z}\right)$ و تر

¹Refractivity

تروپوسفری را در راستای قائم ایستگاه، با روابط (۴ و ۵) ارائه کرد [۶]:

$$d_{h}^{z} = \frac{0.002277 P_{c}}{\left(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028 H_{c}\right)}$$
(*)

$$d_w^z = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s$$
 (۵) (۵)

در روابط فوق $P_{
m s}$ فشار جو در ایستگاه برحسب میلیبار، T_s فشار بخار آب برحسب میلی بار، e_s دما در ایستگاه بر حسب کلوین و ϕ عرض جغرافیایی ایستگاه میباشد. مجموع دو تأخیر بدست آمده میزان تأخیر تروپوسفری را در راستای قائم به دست میدهند. روش دیگر محاسبه خطای تأخیر تروپوسفری، معرفی کامل خطای ترویوسفری به عنوان مجهول در معادلات مشاهدات و برآورد آن همراه با سایر مجهولات (مانند موقعیت نقاط شبکه) است. از آنجایی که تأخیر تروپوسفری کمیتی وابسته به شاخصهای جوی است و این شاخصها کمیتهایی وابسته به زمان و مکاناند، تأخیر ترویوسفری نیز تابعی از زمان و مکان است [۷]. اما جدیدترین راه حل برای محاسبه تأخیر تروپوسفری، روش ردیابی اشعه میباشد که بطور کلی به روشهای دوبعدی و سهبعدی تقسیم می شود. در روش دوبعدی مسیر اشعه صرفاً در یک صفحه با آزیموت ثابت در نظر گرفته شده ولی در روش سهبعدی این امکان برای اشعه در نظر گرفته می شود که در سه جهت آزادی عمل داشته باشد. روش سهبعدی با واقعیت مسأله تروپوسفر تطابق بیشتری دارد [۱ و ۲].

²Hydrostati ³Non-hydrostatic

سال هفتم 🛛 شماره سوم 🖷 پاییز ۱۳۹۸



شکل۱: شکست مسیر موج ارسالی به دلیل عبور از لایه هایی با ضریب شکست متفاوت [۶]

(ابطه (۱۱) خواهد شد که در آن r مسیر سهبعدی اشعه و برابر فاصله شعاعی از مرکز زمین، θ متمم عرض جغرافیایی و Λ طول جغرافیایی است. با انجام مشتقات در سیستم مختصات کروی به فرم زیر خواهد رسید (۱۲]: $du = ds \implies a = 1$ (۱۰) $du = ds \implies a = 1$ (۱۰) $du = ds \implies a = 1$ (۱۰) $du = ds \implies a = 1$ $(1 + 6, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})^2 - n(r, \theta, \lambda)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2)^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2)^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2)^2$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2) = (L_r, \theta, \lambda)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda^2)$ $H(r, \theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda)$ $H(r, \theta, L_\lambda) = (L_r^2, L_\lambda)$ $H(r, \theta, L_\lambda) = (L_r^$

$$\frac{dr}{ds} = \frac{1}{B}L_r \tag{11}$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{B} \frac{L_{\theta}}{r^2}$$
 (۱۳) رابطه

$$\frac{d\lambda}{ds} = \frac{1}{B} \frac{L_{\lambda}}{r^2 \sin^2 \theta}$$
(۱۴) رابطه

$$\frac{dL_r}{ds} = \frac{\partial n(r,\theta,\lambda)}{\partial r} + \frac{1}{Br} \left(\frac{L_{\theta}^2}{r^2} + \frac{L_{\lambda}^2}{r^2 \sin^2 \theta} \right) \qquad (1\Delta)$$

$$\frac{dL_{\theta}}{ds} = \frac{cn(r,\theta,\lambda)}{\partial\theta} + \frac{1}{B}\left(\frac{L_{\lambda}}{r^{2}\sin^{3}\theta}\right)$$
(18)

با توجه به آنچه گفته شد ردیابی اشعه به دو صورت کلی دوبعدی و سهبعدی قابل انجام است. در ردیابی اشعه دوبعدی مسیر اشعه صرفاً در یک صفحه با آزیموت مشخص در نظر گرفته میشود[۱]. در روش و استفاده از روابط مثلثاتی مسیر اشعه در بین هر لایه مشخص شده و در نهایت تأخیر بدست میآید. بطور کلی روش ردیابی اشعه یک روش تکراری است. به بیان دیگر با یکبار انجام ردیابی اشعه از پایین ترین لایه تا بالاترین لایه تروپوسفر نمی توان به جواب مورد نظر دست یافت.

روش ردیابی اشعه سهبعدی بر پایه معادلات آیکنال اشعه در سیستم مختصات مورد نظر است که فرم همیلتونی معادلات آیکنال به صورت روابط (۶، ۷، ۸ و ۹) میباشد [۲]:

$$H(r, \nabla L) \equiv \frac{1}{a} \left\{ \left(\nabla L \cdot \nabla L \right)^{\frac{a}{2}} - n(r)^{a} \right\} = 0 \qquad (\ref{eq:product})$$

$$dr \qquad \partial H$$

$$\frac{du_i}{du} = \frac{\partial \Pi}{\partial \nabla L_i}$$
 (Y) رابطه (Y)

$$\frac{d\nabla L_i}{du} = -\frac{\partial H}{\partial r_i} \tag{(A)}$$
رابطه (۸)

$$\frac{dL_i}{du} = \nabla L_i \cdot \frac{\partial H}{\partial \nabla L_i} \tag{9}$$

با در نظر گرفتن مقادیر رابطه (۱۰)، فرم همیلتونی معادلات آیکونال در سیستم مختصات کروی به صورت بررسی توانایی تصاویر سنجنده مادیس در تخمین تأخیر... سعید حاجیآقاجانی، یزدان عامریان

روابط می ایست بصورت همزمان حل شوند. در

شکل(۳) نمایی کلی از روش ردیابی اشعه سهبعدی

ملاحظه می شود [۵و۲].

 $\frac{dL_{\theta}}{ds} = \frac{\partial n(r,\theta,\lambda)}{\partial \theta} + \frac{1}{B} \left(\frac{L_{\lambda}^{2}}{r^{2} \sin^{3} \theta} \right)$ (19) رابطه (

$$\frac{dL_{\lambda}}{ds} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial \lambda}$$
(۱۷) رابطه

$$B = (L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_{\theta}^2 + \frac{L_{\lambda}^2}{r^2\sin^2\theta})^{\frac{1}{2}} = n(r,\theta,\lambda) \quad (\lambda)$$



شکل۲: ردیابی اشعه سه بعدی[۲]

$$T_{v} = \frac{T.P}{P - (1 - \frac{M_{v}}{M_{d}})e}$$
(۲۰) رابطه (۲۰)

$$e_{\text{int}} = e_i \exp(\frac{h_{\text{int}} - h_i}{C})$$
 (۲۱) رابطه

$$C = e_i \exp(\frac{h_{i+1} - h_i}{\log(\frac{e_i + 1}{e_i})})$$
(۲۲) رابطه

در این روابط P_{int} فشار در لایه میانی، P_i فشار در لایه زیرین، h_{int} ارتفاع در لایه میانی، g_m شتاب ثقل متوسط، T_v دمای مجازی، e فشار بخار آب، M_v وزن مولکولی هوای مرطوب و M_d وزن مولکولی هوای مرطوب میباشند. به منظور انجام ردیابی اشعه فاصله ارتفاعی لایه ها مطابق جدول(۱) درنظر گرفته می شوند [۹]: با توجه به اینکه بیشترین میزان تأخیر تروپوسفر مربوط به لایههای نزدیک به زمین میباشد، بایستی فواصل ارتفاعی بین لایهها در مجاورت زمین کمتر و تعداد لایهها بیشتر درنظر گرفته شود و همین طور که به لایههای بالاتر تروپوسفر نزدیک میشویم فاصله لایهها بیشتر شود. بنابراین در حالت استفاده از داده-های موجود در سطوح فشاری مختلف، شاخصهای لایهها میبایست درونیابی شوند. برای دما یک درونیابی خطی خواهیم داشت ولی برای فشار و فشار بخارآب با توجه به اینکه نسبت به افزایش ارتفاع یک نرخ تقریبا نمایی وجود دارد، میتوان از روابط (۱۹) تا نرخ تقریبا نمایی وجود دارد، میتوان از روابط (۱۹) تا

$$P_{\text{int}} = P_i \exp(-\frac{(h_{\text{int}} - h_i)g_m}{R_d T_v})$$
 (۱۹)

سال هفتم شماره سوم پاییز ۱۳۹۸

ارتفاع (کیلومتر)	فاصله ارتفاعي بين لايهها		
	(متر)		
۰ تا ۲	١٠		
۲ تا ۶	۲۰		
۶ تا ۱۶	۵۰		
۱۶ تا ۳۶	١		
۳۶ تا ۷۶	۵۰۰		

جدول۱: فاصله ارتفاعی لایهها به منظور انجام درونیابی ارتفاعی[۹]

با انجام ردیابی اشعه و بهدست آوردن مختصات اشعه در هر لایه میبایست برای این نقاط شکست پذیری محاسبه شود که برای این کار احتیاج به یک درونیابی افقی با استفاده از نقاط گرید داریم تا با استفاده از آن شکست پذیری را برای نقطه مورد نظر بدست آوریم. درونیابی پیشنهادی با استفاده از مطالعات انجام شده قبلی روش درونیابی اسپلاین توصیه شده است [۳].

۳ – منطقه مورد مطالعه و دادهها

همان طور که در قسمت مقدمه ذکر شد به منظور انجام پردازش های این پژوهش علاوه بر تصاویر سنجنده مادیس نیازمند استفاده از مشاهدات رادیوسوند و داده-های هواشناسی ERA-Interim نیز میباشیم. به همین علت میبایست زمانی را برای استخراج مشاهدات در نظر بگیریم که هر دو نوع داده از لحاظ کیفیت و کمیت در بهترین شرایط ممکن قرار داشته باشند. با توجه به وسعت تصاویر ماهوارهای، نیازمند انتخاب منطقهای وسعت تصاویر ماهوارهای، نیازمند انتخاب منطقهای باشد که بتواند تا حد امکان منطقه مربوط به تصویر را پوشش دهد. به همین علت منطقه ای در مرکز قاره اروپا انتخاب شد که موقعیت آن در شکل (۳) قابل مشاهده است. با توجه به تعداد مشاهدات رادیوسوند در روزهای است. با توجه به تعداد مشاهدات رادیوسوند در روزهای مختلف و همچنین کمینه بودن پیکسلهای ابری،



شکل۳: محدوده در نظر گرفته شده به منظور برش تصاویر ماهوارهای. دایرههای قرمز نماد ایستگاههای رادیوسوند و مربع سبز نشاندهنده موقعیت ایستگاه GPS میباشند.

سنجنده مادیس که متعلق به ایالات متحده است، بر روی دو ماهواره TERRA و AQUA نصب شده است که دو بار در روز مشاهدات خود را از لایههای جو زمین

ارائه میدهد. این سنجنده ۳۶ باند طیفی در محدوده ۲٫۴ تا ۱۴٫۴ میکرون دارد. قدرت تفکیک مکانی دو باند اول این سنجنده ۲۵۰ متر، ۵ باند بعدی۵۰۰ متر و بررسی توانایی تصاویر سنجنده مادیس در تخمین تأخیر... سعید حاجیآقاجانی، یزدان عامریان

شاخصها در لایههای مختلف جو است [۱۰].جدول(۲) حاوی اطلاعات مربوط به تصویر مورد استفاده در این پژوهش می باشد. سایر باندهای آن۱۰۰۰متر است. معمولاً چهار باند ۲ و ۱۷و ۱۸و ۱۹ آن برای پهنهبندی بخارآب مورد استفاده قرار میگیرد. تصویر مورد استفاده در این پژوهش محصول سطح ۲ جوی میباشند. این سنجنده جزو پرکاربردترین منابع سنجش از دور برای استخراج

مورد استفاده	تصوير	مربوط به	اطلاعات	حدول۲:
--------------	-------	----------	---------	--------

تعداد باند عبوري	تعداد باند جذبي	قدرت تفکیک مکانی (متر)	تاريخ	ماهواره
٣	٣	۲۵.	۲۰۰۸/۰۸/۰۱	AQUA

مشاهدات مورد استفاده دیگر در این مقاله دادههای رادیوسوند می باشد. رادیوسوندها مجموعهای از سنسورها و ابزارهایی است که توسط یک بالن برای اندازه گیری شاخصهای جوی به لایههای بالایی جو فرستاده می شوند. اندازه گیری فشار و درجه حرارت با فاصله زمانی دو ثانیه انجام می شود ولی به دلیل فاصله زمانی دو ثانیه انجام می شود ولی به دلیل مشکلاتی، تنها اندازه گیری های برخی سطوح و به شکل نامنظم ذخیره می شوند. داده های رادیوسوند معمولاً در قالب فرمت FSL ارائه می شوند. این اطلاعات عبارتند از فشار، ارتفاع، دما، نقطه شبنم و سرعت باد که در بهترین حالت با قدرت تفکیک زمانی ۱۲ ساعت ارائه می شوند [۱۱].

علاوه بر مشاهدات رادیوسوند در این مقاله از دادههای باز تحلیل شده^۱ *ERA-Interim* به منظور کشف مشاهدات در تصاویر ماهوارهای استفاده خواهیم کرد. این دادهها ناشی از آخرین آنالیز دوباره جو است که از سال ۱۹۸۹ آغاز شد و تاکنون ادامه دارد. این دادهها مجموعهای از شاخصهای هواشناسی از ژانویه ۱۹۸۹ تاکنون را دربردارد. فاصله مکانی آنها از ۱٬۰ درجه تا تاکنون را دربردارد. فاصله مکانی آنها از ۱٬۰ درجه تا جمله رطوبت نسبی، دما، فشار را در فرمتهایی مانند *PACDF* در اختیار کاربران قرار می دهند. این دادهها از عرض جغرافیایی ۸۹٬۴۲۵ تا ۸۹٬۴۲۵– درجه و از طول

جغرافیایی ۰ تا ۳۵۹٬۲۵ درجه را شامل می شوند. قدرت تفکیک زمانی آن ها ۶ ساعت است و اطلاعات را در ۳۷ لایه فشاری و در ساعات ۶ صبح، ۱۲ ظهر، ۶ بعداز ظهر و ۱۲ شب دربردارند [۵].

همچنین مشاهدات مربوط به یک ایستگاه سیستم تعیین موقعیت جهانی^۲ (GPS) در کشور اتریش نیز به منظور پیادهسازی روش ردیابی اشعه و عملیات تعیین موقعیت مطلق دقیق در تاریخ ۲۰۰۸/۰۸/۰۱ فراهم آورده شد که موقعیت آن در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۴- پردازش

تصاویر سنجنده مادیس با فرمت hdf. در اختیار هستند زیرا این فرمت جزو فرمتهای اصلی و استانداردهای سازمان فضایی اروپا میباشد. برای پردازش تصاویر از نرمافزار ENVI استفاده میشود ولی قبل از آن می-بایست تصویر مورد نظر بهعنوان یک فایل خارجی از نوع AQUA و از سنجنده مادیس خوانده شود. اگر پس کنیم دادههای بخارآب بصورت اعدادی بین ۰ تا ۱۲۸ خوانده میشوند که معنای خاصی نمیدهد به همین دلیل از یک نرمافزار واسط به نام HDFLook استفاده شد که محیط آن در شکل (۴) ملاحظه میشود. در بااستفاده از این نرمافزار طیفهای مختلف تصویر در

¹ Reanalyses

² Global Positioning System

سطوح مختلف را جداسازی کرده و مقادیر محاسبه شده با فرمت ENVI ذخیره و به نرم افزار ENVI وارد شدند. پس از وارد کردن نتایج به نرمافزار ENVI میتوان طیفهای مختلف موردنظر را مشاهده نمود.

تصویر بخارآب سطحی در شکل (۵) قابل مشاهده میباشد.



شكل۴: محيط نرمافزار HDFLook



شکل۵: تصویر بخار آب در نرمافزار *ENVI* پس از جداسازی

یکی از مشکلات همیشگی موجود در تصاویر سنجندههای هواشناسی وجود پیکسلهای ابری میباشد که قبل از هرگونه استفاده از تصاویر میبایست رفع شوند. بدین منظور ابتدا پیکسلهای ابری مشخص شدند و سپس به کمک نرمافزار RTACI مقدار بخارآب نقاط ابری به کمک روشی که بر اساس میانگین وزندار و براساس پروفیل قائم و افقی مشاهدات عمل مینماید تخمین زده شد. نقاطی که در مرحله درونیابی غیرقابل اظهارنظر تشخیص داده شدند به کلی کنار گذاشته شدند. فرمت واسط این نرمافزار ENVIStandard و یا

ERMAPPER میباشد. در شکل(۶) تصویر بخارآب قبل و بعد از مقداردهی مشاهده میشود.

پس از انجام این مراحل در مختصات مربوط به ایستگاه GPS تمامی مشاهدات بر اساس اصول درونیابی ذکر شده در بخش ۲ مقداردهی شدند. در شکل(۷) مقایسه بین دما و فشار بخارآب بهدست آمده از دادههای مختلف، نشان داده شده است. شاخصهای آماری مربوط به دو شاخص دما و فشار بخارآب در جدول (۳) آورده شده است. در شکل (۸) نمودار مربوط به اختلاف بین نتایج مشاهده می شود.

بررسی توانایی تصاویر سنجنده مادیس در تخمین تأخیر...

سعید حاجی آقاجانی، یزدان عامریان



شکل۶: تصویر بخار آب قبل از مقداردهی و بعد از مقداردهی



شکل۷: دما و بخار آب محاسبه شده در سطوح فشاری

كمينه	بيشينه	شاخص	نوع داده
۲۰۳٬۰۸	TAD,9T	دما (كلوين)	راديوسوند
•,••	٨٠,١٢	فشار بخارآب (میلیبار)	راديوسوند
۱۹۵,۹۲	۲۸۵,۹۱	دما (كلوين)	ERA-Interim
•,••	٨٠,٢٧	فشار بخارآب (میلیبار)	ERA-Interim
۲۰۵٬۱۴	۲۹۳,۲۶	دما (كلوين)	MODIS
• / • •	۸۰,۱۵	فشار بخارآب (میلیبار)	MODIS

جدول۳: شاخصهای آماری مربوط به دو شاخص دما و فشار بخار آب

نشریه علمی پژوهشی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم • شماره سوم • پاییز ۱۳۹۸



شکل۸: نمودار مربوط به اختلاف بین شاخصهای فشار بخار آب و دما

در نهایت بااستفاده از روش ذکر شده در بخش (۲)، تأخیر ناشی از لایه تروپوسفر با استفاده از روش ردیابی اشعه سهبعدی و در آزیموتهای متفاوت از صفر تا ۳۶۰ درجه باتوجه به زاویه تابش امواج محاسبه شد که نتایج

آن در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. شاخصهای آماری نتایج در جدول (۴) مشاهده می شود. اختلاف بین نتایج و شاخصهای آماری مربوط به آن در جدول (۵) و شکل (۹) مشاهده می شود.

جدول۴: شاخصهای آماری مربوط به تأخیر کلی حاصل از روش ردیابی اشعه با استفاده از سه منبع داده

انحراف معیار تأخیر کلی بدست آمدہ (متر)	کمینه تأخیر کلی بدست آمده (متر)	بیشینه تأخیر کلی بدست آمده (متر)	مشاهدات
•,• ٢٣	20/82	$T\Delta_{I}VA$	راديوسوند
۰,۰۳۹	$r \Delta_{i} \Delta Y$	t 0,/Vt	ERA-Interim
۰,•۵۳	۲۵/۴۱	۲۵,۶۸	MODIS

سعید حاجی آقاجانی، یزدان عامریان

جذر میانگین مربعات اختلاف تأخیر بدست آمده از دو داده (میلیمتر)	کمینه اختلاف تأخیر بدست آمده از دو داده (میلیمتر)	بیشینه اختلاف تأخیر بدست آمده از دو داده (میلیمتر)	مشاهدات
١,١١	•,•)	۲,۷۱	راديوسوند - MODIS
۰٫٨٩	• / • •	۲٬۹۸	MODIS - ERA- Interim

جدول۵: شاخصهای آماری مربوط به اختلاف بین تأخیر بدست آمده از دادهها



شکل۹: اختلاف بین تأخیر کلی بدست آمده از روش ردیابی اشعه سه بعدی برای سه نوع مشاهده

به منظور مقایسه و بررسی نتایج دادههای مختلف در تعیین موقعیت مطلق دقیق، ابتدا تأخیر مربوط به لایه تروپوسفر مجهول فرض شده و به همراه موقعیت ایستگاه GPS، با استفاده از نرمافزار برنیز^۱ تعیین گردید. موقعیت بدست آمده در این حالت به عنوان موقعیت دقیق ایستگاه در نظر گرفته شد. در ادامه موقعیت دقیق ایستگاه در نظر گرفته شد. در ادامه اسعه با استفاده از تصاویر سنجنده، مشاهدات اشعه با استفاده از تصاویر سنجنده، مشاهدات رادیوسوند و دادههای هواشناسی ERA-Interim به فایل مشاهدات GPS اعمال شد و تعیین موقعیت در این سه حالت نیز انجام گرفت. اختلاف بین موقعیت دو این سه موقعیتهای بدست آمده از این سه حالت در شکل(۱۰) قابل مشاهده می باشد.

نتایج نشاندهنده اهمیت تأخیر لایه تروپوسفر در محاسبات تعیین موقعیت میباشد. اختلاف بین مختصات دقیق و مختصات حاصل از اعمال تصحیحات تروپوسفری به روش ردیابی اشعه با دادههای رادیوسوند برابر ۲۳۷۲،متر، با دادههای هواشناسی ERA-Interim برابر با ۲۹۳،متر، با دادههای هواشناسی محیحات بهدست آمده از سنجنده مادیس برابر با ۲۸۱، متر مشاهده شد. باتوجه به دقت موقعیت ایستگاه که برابر ۱۶ میلیمتر میباشد، اختلاف بین نتایج بهدست آمده با بکارگیری سنجنده مادیس نسبت به سایر روشها، از لحاظ آماری معنادار میباشد.

¹ Bernese

۵۳

سال هفتم 🛛 شماره سوم 🖷 پاییز ۱۳۹۸



شکل۱۰: اختلاف بین موقعیت بهدست آمده در روشهای مختلف با موقعیت محاسبه شده در حالت مجهول فرض کردن خطای تروپوسفر در نرمافزار (ستون قرمز: اختلاف در موقعیت سهبعدی، ستون سبز: اختلاف موقعیت مسطحاتی و ستون آبی: اختلاف در موقعیت ارتفاعی)

۵- بحث و نتیجهگیری

هدف این پژوهش بررسی کارآیی سنجنده مادیس در محاسبه تأخير ناشی از لايه تروپوسفر و در كنار آن بکارگیری روش ردیابی اشعه سهبعدی بود. بهمنظور سنجش اعتبار نتايج، از مشاهدات راديوسوند و همچنین دادههای ERA-Interim استفاده شد. برای انجام پردازشها با توجه به تعداد مشاهدات و تطابق زمانی و مکانی آنها، بخشی از مرکز قاره اروپا انتخاب شد و یک تصویر سنجنده مادیس در منطقه مورد نظر که کیفیت مناسبی از لحاظ تعداد مشاهدات رادیوسوند در آن وجود داشت، انتخاب شد. علاوه بر آن به منظور پیادهسازی روش ردیابی اشعه نیاز به مشاهدات یک ایستگاه GPS در منطقه مورد نظر بود، که یک ایستگاه در منطقه انتخاب گردید. پس از تهیه دادهها، نیاز به آمادهسازی تصویر ماهوارهای بود که این امر با استفاده از نرمافزار HDFLook صورت پذیرفت و ادامه یردازشها در نرمافزار ENVI انجام گرفت. سپس با کمک نرمافزار RTACI و براساس میانگین گیری وزندار، مقدار بخارآب در پیکسلهای ابری تعیین شد. در ادامه کار بهمنظور انجام مقایسه بین شاخصهای سه نوع مشاهده موجود، مقادیر مشاهدات را در محل ایستگاه GPS موجود درونیابی کرده و نتایج برای ۳۷ لایه فشارى مقايسه شدند. بيشينه اختلاف دماى مشاهدات بهدست آمده از سنجنده با دادههای دیگر در حدود ۱۷

درجه کلوین و بیشینه اختلاف در فشار بخارآب در حدود ۱۰ میلیبار مشاهده شد. پس از این مرحله به سراغ پیادهسازی روش ردیابی اشعه رفتیم و نتایج را بررسي نموديم. بيشينه اختلاف بين تأخير بهدست آمده از تصویر ماهوارهای با دو مشاهده دیگر ۲/۹۸ سانتیمتر و کمینه آن صفر بود. همچنین میزان جذر ميانگين مربعات اختلاف بين مشاهدات راديوسوند و تصویر ماهوارهای برابر ۱٬۱۱ و برای جذر میانگین مربعات اختلاف بین دادههای ERA-Interim و تصویر ماهوارهای برابر ۰٬۸۹ سانتیمتر بود. به منظور بررسی دقيق تر كارايي سنجنده، عمليات تعيين موقعيت مطلق دقیق با کمک نرمافزار Bernese ابتدا با مجهول در نظرگرفتن تأخیر تروپوسفری و سپس با کمک تصحیحات محاسبه شده از هر سه نوع داده صورت گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده این مهم بود که باتوجه به دقت تعيين موقعيت مطلق، اختلاف بين موقعيت بدست آمده از طریق سنجنده مادیس با سایر روشها از لحاظ آماری معنادار میباشد. در نهایت میتوان نتیجه گرفت که اگرچه سنجنده مادیس یک سنجنده قوی در مطالعات جوی و سنجش از دور میباشد ولی تصحیح تروپوسفری حاصل از آن از دقت کمتری نسبت به تصحیح تروپسفری حاصل از رادیوسوند و -ERA Interim در تعیین موقعیت مطلق دقیق برخوردار است.

بررسی توانایی تصاویر سنجنده مادیس در تخمین تأخیر...

سعید حاجی آقاجانی، یزدان عامریان

- [1] G.D. Thayer, "A rapid and accurate ray tracing algorithm for a horizontally stratified atmosphere", Radio Science, Vol. 1, No. 2, 1967.
- [2] T. Hobiger, R. Ichikawa, Y. Koyama and T. Kondo, "Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models", Journal of Geophysical Research 113, 2008.
- [3] V. Nafisi, M. Madzak, J. Böhm, A.A. Ardalan, and H. Schuh, H., "Ray-traced tropospheric delays in analysis", Radio Science 47, 2012.
- [4] A. Hofmeister, "Determination of path delays in the atmosphere for geodetic VLBI by means of ray-tracing" PhD thesis, Department of Geodesy and Geoinformation, TU Wien, 2016.
- [5] S. Haji-Aghajany and Y. Amerian, "Three dimensional ray tracing technique for tropospheric water vapor tomography using GPS measurements", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 164, 81-88, 2017.
- [6] J. Saastamoinen, "Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction", Bulletin Geodesique, 105, pp.279-298, 106, pp. 383-397, 107, pp. 113-134, Printed in three parts, 1973.
- [7] J. Böhm and H. Schuh, "Vienna Mapping Functions", Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Leipzig, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, pp. 131 – 143, 2003.
- [8] J.M. Wallace, and P.V. Hobbs, " Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92)", Academic press, 2006.
- [9] C. Rocken, S. Sokolovskiy, J.M. Johnson and D. Hunt, "Improved mapping of tropospheric delays", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18(7), 1205-1213, 2001.
- [10] P. Albert, "Remote sensing of atmospheric water vapour for numerical weather prediction", PhD thesis of Ferei University of Berlin, 2004.

[11]http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding. html.



Journal of Geospatial Information Technology Vol.7, No.3, Autumn 2019

Research Paper

Investigation of MODIS mission capability in tropospheric delay estimation for precise point positioning

Saeid Haji-Aghajany¹, Yazdan Amerian^{2*}

1- PhD student of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran 2- Assistant professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Tropospheric delay is always considered as one of the factors limiting the accuracy of GPS. In this paper, the three-dimensional ray tracing technique is proposed to calculate the tropospheric delay. The ability of the MODIS mission to calculate the tropospheric delay is also examined. For this purpose, an area in central Europe was selected and a MODIS acquisition on 2008/08/01 was studied. In addition, the radiosonde observations as well as ERA-Interim meteorological data were used to evaluate the obtained results. After applying corrections to the MODIS acquisition, the three-dimensional ray tracing method was implemented at the location of a GPS station using all three types of data to extract the tropospheric delay. The RMS of difference between the results of MODIS and results of radisonde and ERA-Interim data was 1.11 and 0.89 cm respectively. Then, precise point positioning was done using the Bernese software and tropospheric correction from MODIS, radisonde and ERA-Interim data and compared with precise coordinate of station. The accuracy of position with MODIS tropospheric correction is less than ones corrected with radisonde and ERA-Interim tropospheric data. The results show the low efficiency of MODIS data for tropospheric correction of GPS observations compare to radisonde and ERA-Interim data.

Key words: Tropospheric Delay, Precise Point Positioning, MODIS, Meteorological Data, Radiosonde, Three Dimensional Ray Tracing

Correspondence Address: Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Mirdamad Cross, Vali_Asr St., Tehran, Iran Tel: +98(21)88877071 (Ext: 302) Email: amerian@kntu.ac.ir