نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸

Vol.7, No.3, Autumn 2019

۴۳-۵۵

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 حاجی‌آقاجانی[۱]، یزدان عامریان[۲*]

۱- دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی

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

چکیده

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 سنجش قرار گرفته است. بدین منظور با انتخاب منطقه‌ای در مرکز اروپا و دریافت تصویری از این سنجنده در آن منطقه در تاریخ ۲۰۰۸/۰۸/۰۱ اقدام به بررسی کارآیی این مشاهدات گردید. علاوه بر این به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده، از مشاهدات رادیوسوند موجود در منطقه و همچنین اطلاعات هواشناسی *ERA-Interim* استفاده شده است. پس از اعمال تصحیحات بر تصویر و مقداردهی به پیکسل‌های ابری، روش ردیابی اشعه سه‌بعدی در محل مربوط به یک ایستگاه سیستم تعیین موقعیت جهانی واقع در کشور اتریش، با بکارگیری هر سه نوع داده‌ها پیاده‌سازی شد. بیشینه اختلاف بین تأخیر بدست آمده از تصویر ماهواره‌ای با دو مشاهده دیگر ۲٫۹۸ و کمینه آن صفر سانتیمتر بود. همچنین میزان جذر میانگین مربعات اختلاف بین مشاهدات رادیوسوند و تصویر ماهواره‌ای برابر ۱٫۱۱ و جذر میانگین مربعات اختلاف بین داده‌های *ERA-Interim* و تصویر ماهواره‌ای برابر ۰٫۸۹ سانتیمتر مشاهده شد. در ادامه تعیین موقعیت مطلق دقیق با استفاده از نرم‌افزار برنیز و با بهره‌گیری از تأخیرهای محاسبه شده از داده‌های مختلف صورت گرفت و با مختصات دقیق ایستگاه مقایسه گردید. دقت موقعیت بدست آمده با تصحیحات تروپوسفری سنجنده مادیس کمتر از دقت موقعیت بدست آمده با تصحیحات تروپسفری رادیوسوند و *ERA-Interim* است که بیانگر کارایی کمتر سنجده مادیس در تصحیح تروپوسفری مشاهدات سیستم تعیین جهانی در تعیین موقعیت مطلق دقیق نسبت به رادیوسوند و *ERA-Interim* است.

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

۱- مقدمه

در تکنیک‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای، تأخیر ناشی از لایه تروپوسفر همچنان به‌عنوان عاملی تاثیرگذار در نتایج حاصل مطرح می‌باشد. مؤلفه خشک تأخیر 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 می‌شود که این خطا به سادگی قابل محاسبه نباشد. متداول‌ترین راه‌حل این مسأله استفاده از توابع نگاشت می‌باشد که توسط محققین گوناگون طیف وسیعی از این توابع پیشنهاد شده است. اما در سال‌های اخیر روش ردیابی اشعه[1] به‌عنوان راه‌حلی متفاوت به‌منظور محاسبه تأخیر تروپوسفری مطرح شده است. در این روش مسیر اشعه بین گیرنده و فرستنده تعیین می‌شود و مبنای این برآورد، شاخص‌های هواشناسی مانند درجه حرارت، فشار و فشار بخار آب می‌باشند. 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 می‌شود[۱]. هابیگر و همکاران در سال ۲۰۰۸ ایده استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی بر مبنای معادلات آیکونال[2] 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 ردیابی اشعه استفاده نمودند[۲و۳]. 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[3] *(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 می‌باشد که در شکل(۱) نشان داده شده است [۶].

$$d_{trop} = \int_{ray} nds - \int_{vac} ds \qquad \text{رابطه (۱)}$$

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

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

[1] *Ray tracing*
[2] *Eikonal equations*
[3] *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

در رابطه اخیر N_{trop} انکسار پذیری[1] نامیده می‌شود. انکسارپذیری را می‌توان طبق رابطه (۳) به دو مؤلفه خشک N_d^{trop} و تر N_w^{trop} تقسیم کرد [۵]:

رابطه (۳) $$N^{trop} = N_d^{trop} + N_w^{trop}$$

مؤلفه خشک انکسارپذیری ناشی از بخش هیدرواستاتیک[2] جوّ و مؤلفه تر آن ناشی از بخش غیر هیدرواستاتیک[3] جوّ می‌باشد. به این ترتیب، تأخیر تروپوسفری از دو تأخیر خشک و تأخیر تر تشکیل می‌شود که حدود ۹۰ درصد تأخیر تروپوسفری ناشی از بخش خشک می‌باشد [۶].

در حال حاضر از سه روش عمده برای مدل سازی تروپوسفر جهت تصحیح این تأخیر استفاده می‌شود. مدل‌های پیش‌بینی جهانی، تخمین تأخیر تروپوسفری به عنوان مجهول و روش ردیابی 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 تروپوسفری 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 انکسارپذیری، نحوه نگاشت تأخیر عمودی محاسبه شده در راستای زاویه ارتفاعی ماهواره است. مدل سستامینن یکی از رایج‌ترین و اجرایی‌ترین مدل‌های پیش‌بینی می‌باشد. این مدل برگرفته 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 میلادی دو مؤلفه خشک $\left(d_h^z\right)$ و تر $\left(d_w^z\right)$ تروپوسفری را در راستای قائم ایستگاه، با روابط (۴ و ۵) ارائه کرد [۶]:

رابطه (۴) $$d_h^z = \frac{0.002277 P_s}{\left(1 - 0.0026\cos 2\varphi - 0.00000028 H_s\right)}$$

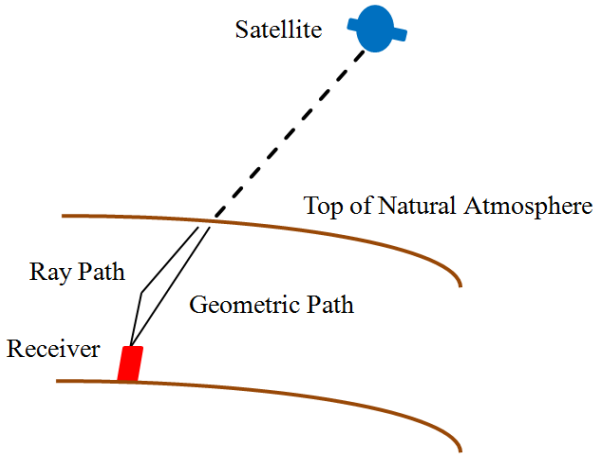
رابطه (۵) $$d_w^z = 0.002277\left(\frac{1255}{T_s} + 0.05\right)e_s$$

در روابط فوق P_s فشار جو در ایستگاه برحسب میلی‌بار، e_s فشار بخار آب برحسب میلی بار، T_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 تروپوسفری 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 تروپوسفری 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 می‌شود. 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 می‌شود که در سه جهت آزادی عمل داشته باشد. روش سه‌بعدی با واقعیت مسأله تروپوسفر تطابق بیشتری دارد [۱ و ۲].

[1] *Refractivity*
[2] *Hydrostati*
[3] *Non-hydrostatic*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]



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

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 دوبعدی با در نظرگرفتن یک سیستم مختصات محلی 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 پایین‌ترین لایه تا بالاترین لایه تروپوسفر نمی‌توان 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]:

رابطه (۶) $$H(r,\nabla L)\equiv\frac{1}{a}\left\{(\nabla L.\nabla L)^{\frac{a}{2}}-n(r)^{a}\right\}=0$$

رابطه (۷) $$\frac{dr_i}{du}=\frac{\partial H}{\partial \nabla L_i}$$

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

رابطه (۹) $$\frac{dL_i}{du}=\nabla L_i.\frac{\partial H}{\partial \nabla L_i}$$

با در نظر گرفتن مقادیر رابطه (۱۰)، فرم همیلتونی معادلات آیکونال در سیستم مختصات کروی به صورت رابطه (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 [۲]:

رابطه (۱۰) $$du=ds \quad\Rightarrow\quad a=1$$

رابطه(۱۱)
$$H(r,\theta,\lambda,L_r,L_\theta,L_\lambda)\equiv(L_r^2+\frac{1}{r^2}L_\theta^2+\frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})^{\frac{1}{2}}-n(r,\theta,\lambda)$$

در این رابطه n پارامتر ضریب شکست است که تابعی از سه مولفه مختصات کروی است و $L_r=\frac{\partial L}{\partial r}$ و $L_\theta=\frac{\partial L}{\partial \theta}$ و $L_\lambda=\frac{\partial L}{\partial \lambda}$ می‌باشد. با استفاده از روابط ذکر شده و مشتق‌گیری از فرم همیلتونی به روابط زیر خواهیم رسید [۲ و ۵]:

رابطه(۱۲) $$\frac{dr}{ds}=\frac{1}{B}L_r$$

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

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

رابطه(۱۵) $$\frac{dL_r}{ds}=\frac{\partial n(r,\theta,\lambda)}{\partial r}+\frac{1}{Br}(\frac{L_\theta^2}{r^2}+\frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^2\theta})$$

رابطه(۱۶) $$\frac{dL_\theta}{ds}=\frac{\partial n(r,\theta,\lambda)}{\partial \theta}+\frac{1}{B}(\frac{L_\lambda^2}{r^2\sin^3\theta})$$

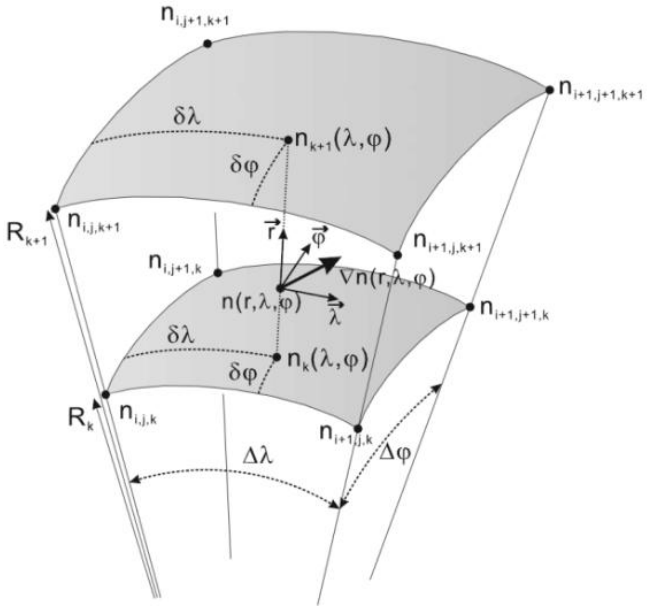
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

$$\frac{dL_\theta}{ds} = \frac{\partial n(r,\theta,\lambda)}{\partial \theta} + \frac{1}{B}\left(\frac{L_\lambda^2}{r^2 \sin^3 \theta}\right) \quad \text{رابطه(۱۶)}$$

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

$$B = \left(L_r^2 + \frac{1}{r^2}L_\theta^2 + \frac{L_\lambda^2}{r^2 \sin^2 \theta}\right)^{\frac{1}{2}} = n(r,\theta,\lambda) \quad \text{رابطه(۱۸)}$$

روابط می‌بایست بصورت همزمان حل شوند. در شکل(۳) نمایی کلی از روش ردیابی اشعه سه‌بعدی ملاحظه می‌شود [۵و۲].



شکل۲: ردیابی اشعه سه بعدی[۲]

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 همین‌طور که به لایه‌های بالاتر تروپوسفر نزدیک می‌شویم فاصله لایه‌ها بیشتر شود. بنابراین در حالت استفاده از داده-های موجود در سطوح فشاری مختلف، شاخص‌های هواشناسی اعم از فشار و فشار بخارآب و دما در این 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 (۲۲) بدین منظور استفاده نمود [۸]:

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

$$T_v = \frac{T.P}{P - (1 - \frac{M_v}{M_d})e} \quad \text{رابطه(۲۰)}$$

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

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

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. به‌منظور انجام ردیابی اشعه فاصله ارتفاعی لایه‌ها مطابق جدول(۱) درنظر گرفته می‌شوند[۹]:

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

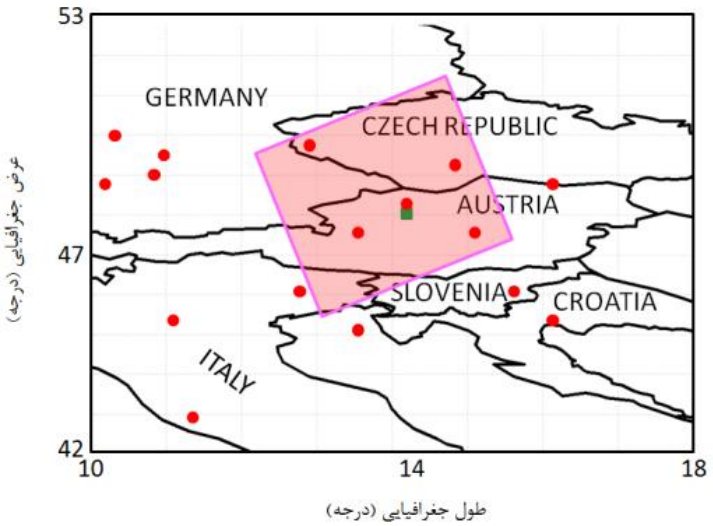
جدول۱: فاصله ارتفاعی لایه‌ها به منظور انجام درونیابی ارتفاعی[۹]

فاصله ارتفاعی بین لایه‌ها (متر)	ارتفاع (کیلومتر)
۱۰	۰ تا ۲
۲۰	۲ تا ۶
۵۰	۶ تا ۱۶
۱۰۰	۱۶ تا ۳۶
۵۰۰	۳۶ تا ۷۶

با انجام ردیابی اشعه و به‌دست آوردن مختصات اشعه در هر لایه می‌بایست برای این نقاط شکست‌پذیری محاسبه شود که برای این‌کار احتیاج به یک درونیابی افقی با استفاده از نقاط گرید داریم تا با استفاده از آن شکست‌پذیری 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

همان‌طور که در قسمت مقدمه ذکر شد به‌منظور انجام پردازش‌های این پژوهش علاوه بر تصاویر سنجنده مادیس نیازمند استفاده از مشاهدات رادیوسوند و داده‌های 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 هستیم که تعداد ایستگاه‌های رادیوسوند آن به تعدادی باشد که بتواند تا حد امکان منطقه مربوط به تصویر را پوشش دهد. به همین علت منطقه‌ای در مرکز قاره اروپا انتخاب شد که موقعیت آن در شکل (۳) قابل مشاهده است. با توجه به تعداد مشاهدات رادیوسوند در روزهای مختلف و همچنین کمینه بودن پیکسل‌های ابری، تصویر ماهواره‌ای روز ۲۰۰۸/۰۸/۰۱ انتخاب شد.



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 ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرون دارد. قدرت تفکیک مکانی دو باند اول این سنجنده ۲۵۰ متر، ۵ باند بعدی۵۰۰ متر و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

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 شاخص‌ها در لایه‌های مختلف جو است [۱۰].جدول(۲) حاوی اطلاعات مربوط به تصویر مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد.

جدول۲: اطلاعات مربوط به تصویر مورد استفاده

ماهواره	تاریخ	قدرت تفکیک مکانی (متر)	تعداد باند جذبی	تعداد باند عبوری
AQUA	۲۰۰۸/۰۸/۰۱	۲۵۰	۳	۳

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

علاوه بر مشاهدات رادیوسوند در این مقاله از داده‌های باز تحلیل شده *ERA-Interim*[1] 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 ۰/۱ درجه تا ۳ درجه متغیّر است. همچنین حدود ۳۰۰ شاخص از جمله رطوبت نسبی، دما، فشار را در فرمت‌هایی مانند *NetCDF* در اختیار کاربران قرار می‌دهند. این داده‌ها از عرض جغرافیایی ۸۹/۴۲۵ تا ۸۹/۴۲۵- درجه و از طول جغرافیایی ۰ تا ۳۵۹/۲۵ درجه را شامل می‌شوند. قدرت تفکیک زمانی آن‌ها ۶ ساعت است و اطلاعات را در ۳۷ لایه فشاری و در ساعات ۶ صبح، ۱۲ ظهر، ۶ بعدازظهر و ۱۲ شب دربردارند [۵].

همچنین مشاهدات مربوط به یک ایستگاه سیستم تعیین موقعیت جهانی[2] *(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 می‌بایست تصویر مورد نظر به‌عنوان یک فایل خارجی از نوع *AQUA* و از سنجنده مادیس خوانده شود. اگر پس از انجام این روند بطور مستقیم تصویر را وارد نرم‌افزار 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. بااستفاده از این نرم‌افزار طیف‌های مختلف تصویر در

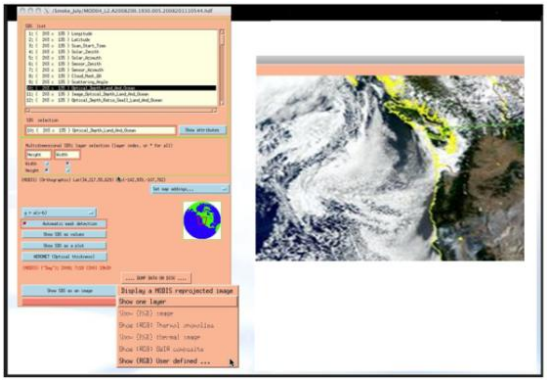
[1] *Reanalyses*

[2] *Global Positioning System*

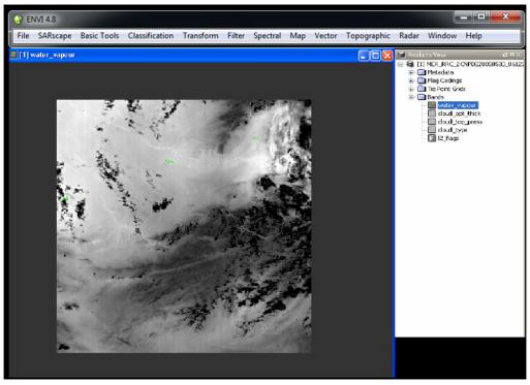
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

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.



شکل۴: محیط نرم‌افزار *HDFLook*



شکل۵: تصویر بخارآب در نرم‌افزار *ENVI* پس از جداسازی

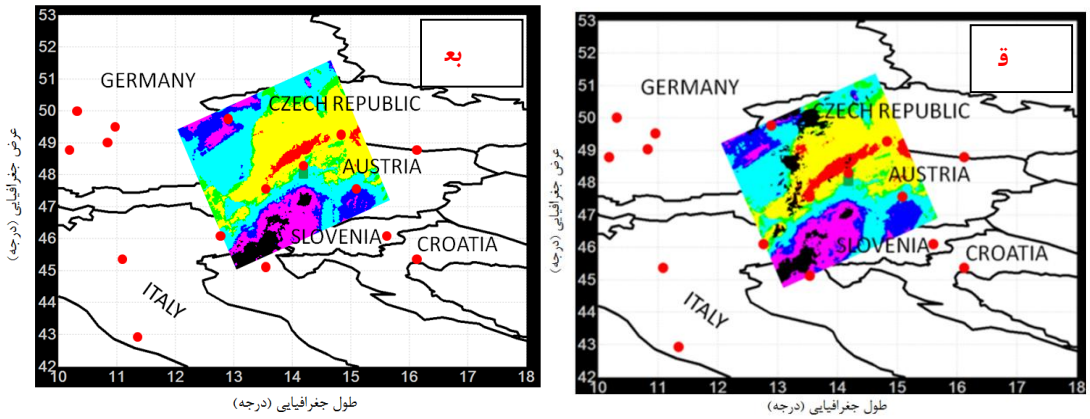
یکی از مشکلات همیشگی موجود در تصاویر سنجنده‌های هواشناسی وجود پیکسل‌های ابری می‌باشد که قبل از هرگونه استفاده از تصاویر می‌بایست رفع شوند. بدین منظور ابتدا پیکسل‌های ابری مشخص شدند و سپس به کمک نرم‌افزار *RTACI* مقدار بخارآب نقاط ابری به کمک روشی که بر اساس میانگین وزندار و براساس پروفیل قائم و افقی 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 می‌شود.

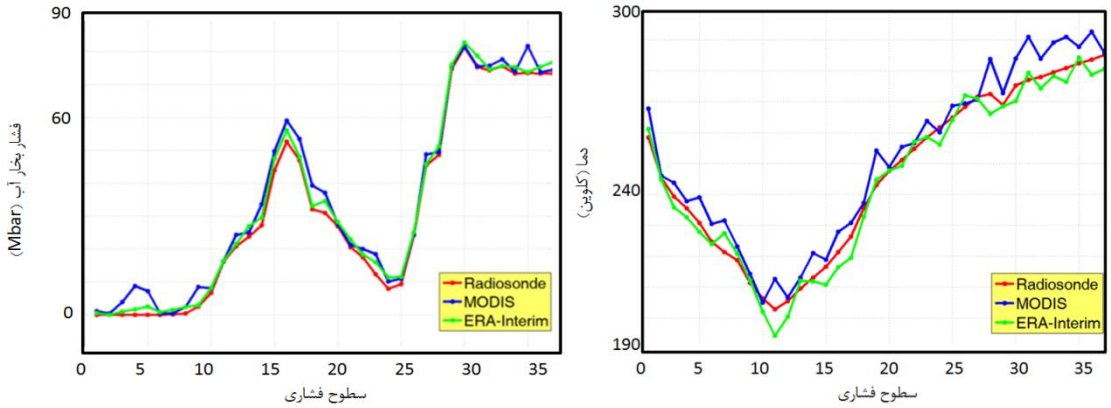
تصویر بخارآب سطحی در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]



شکل۶: تصویر بخارآب قبل از مقداردهی و بعد از مقداردهی

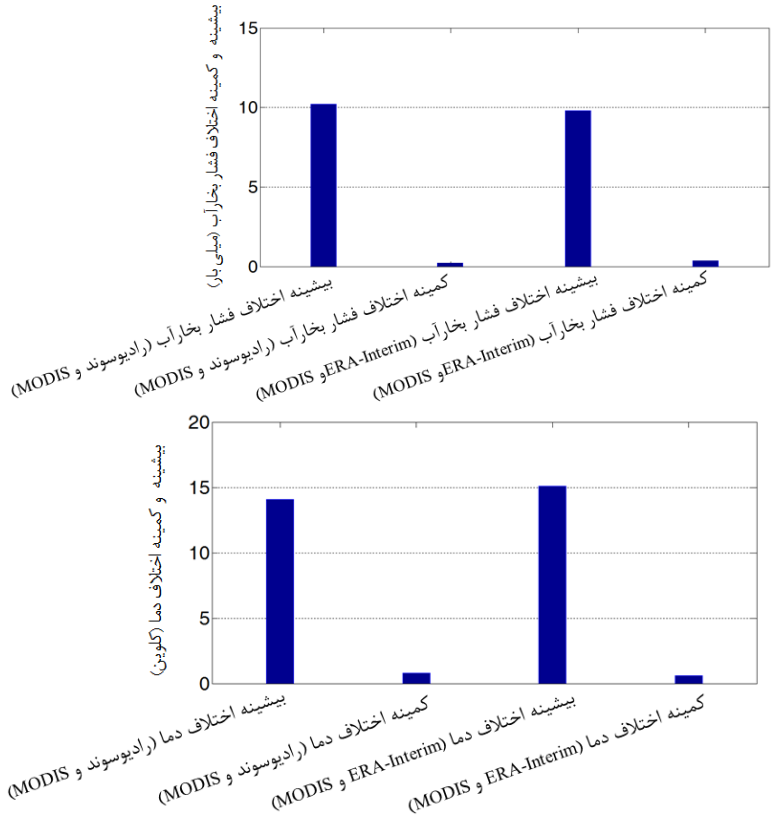


شکل۷: دما و بخارآب محاسبه شده در سطوح فشاری

جدول۳: شاخص‌های آماری مربوط به دو شاخص دما و فشار بخارآب

نوع داده	شاخص	بیشینه	کمینه
رادیوسوند	دما (کلوین)	۲۸۵٫۹۲	۲۰۳٫۰۸
رادیوسوند	فشار بخارآب (میلی‌بار)	۸۰٫۱۲	۰٫۰۰
ERA-Interim	دما (کلوین)	۲۸۵٫۹۱	۱۹۵٫۹۲
ERA-Interim	فشار بخارآب (میلی‌بار)	۸۰٫۲۷	۰٫۰۰
MODIS	دما (کلوین)	۲۹۳٫۲۶	۲۰۵٫۱۴
MODIS	فشار بخارآب (میلی‌بار)	۸۰٫۱۵	۰٫۰۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]



شکل۸: نمودار مربوط به اختلاف بین شاخص‌های فشار بخارآب 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 می‌شود. اختلاف بین نتایج و شاخص‌های آماری مربوط به آن در جدول (۵) و شکل (۹) مشاهده می‌شود.

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

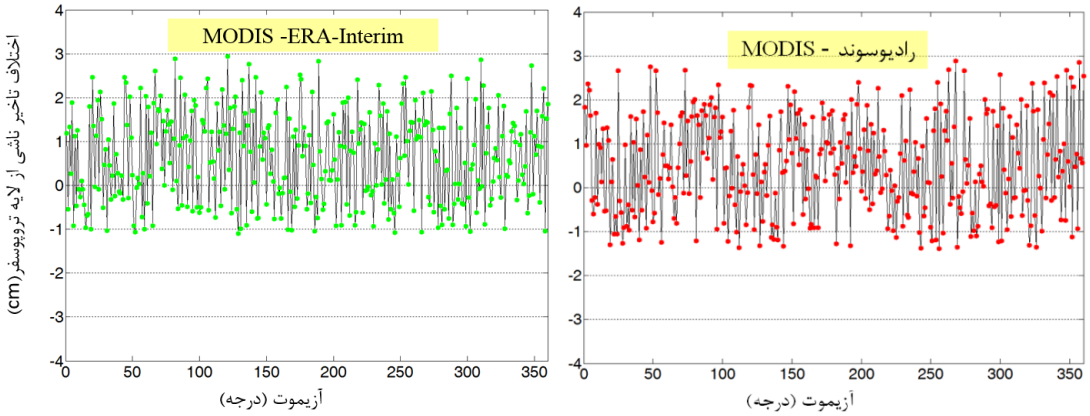
مشاهدات	بیشینه تأخیر کلی بدست آمده (متر)	کمینه تأخیر کلی بدست آمده (متر)	انحراف معیار تأخیر کلی بدست آمده (متر)
رادیوسوند	۲۵٫۷۸	۲۵٫۶۲	۰٫۰۲۳
ERA-Interim	۲۵٫۷۳	۲۵٫۵۷	۰٫۰۳۹
MODIS	۲۵٫۶۸	۲۵٫۴۱	۰٫۰۵۳

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

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

مشاهدات	بیشینه اختلاف تأخیر بدست آمده از دو داده (میلیمتر)	کمینه اختلاف تأخیر بدست آمده از دو داده (میلیمتر)	جذر میانگین مربعات اختلاف تأخیر بدست آمده از دو داده (میلیمتر)
رادیوسوند - *MODIS*	۲٫۷۱	۰٫۰۱	۱٫۱۱
MODIS - ERA-Interim	۲٫۹۸	۰٫۰۰	۰٫۸۹



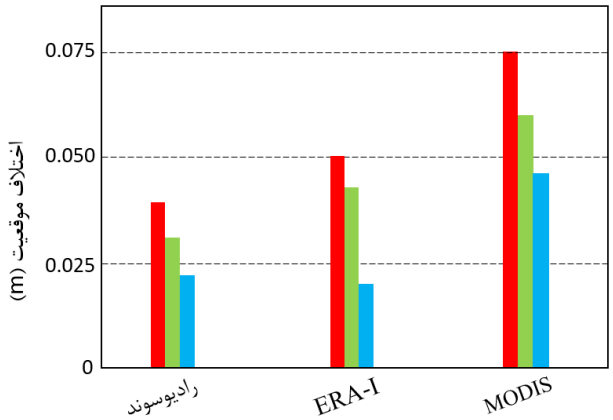
شکل۹: اختلاف بین تأخیر کلی بدست آمده از روش ردیابی اشعه سه بعدی برای سه نوع مشاهده

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[1] تعیین گردید. موقعیت بدست آمده در این حالت به عنوان موقعیت دقیق ایستگاه در نظر گرفته شد. در ادامه تصحیحات تروپوسفری به‌دست آمده از روش ردیابی 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 دقیق و موقعیت‌های بدست آمده از این سه حالت در شکل(۱۰) قابل مشاهده می‌باشد.

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 ۰٫۰۳۷۲متر، با داده‌های هواشناسی *ERA-Interim* برابر با ۰٫۰۴۹۳ متر و با بکارگیری تصحیحات به‌دست آمده از سنجنده مادیس برابر با ۰٫۰۷۸۱ 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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]



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 تأخیر ناشی از لایه تروپوسفر و در کنار آن بکارگیری روش ردیابی اشعه سه‌بعدی بود. به‌منظور سنجش اعتبار نتایج، از مشاهدات رادیوسوند 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 پردازش‌ها در نرم‌افزار *ENVI* انجام گرفت. سپس با کمک نرم‌افزار *RTACI* و براساس میانگین‌گیری 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 فشاری مقایسه شدند. بیشینه اختلاف دمای 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 بررسی نمودیم. بیشینه اختلاف بین تأخیر به‌دست آمده از تصویر ماهواره‌ای با دو مشاهده دیگر ۲/۹۸ سانتیمتر و کمینه آن صفر بود. همچنین میزان جذر میانگین مربعات اختلاف بین مشاهدات رادیوسوند 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 دقیق‌تر کارایی سنجنده، عملیات تعیین موقعیت 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 نشان‌دهنده این مهم بود که باتوجه به دقت تعیین موقعیت مطلق، اختلاف بین موقعیت 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

مراجع

[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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

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 –Aghajany [1], 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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.43]