

برآورد تأخیر تروپوسفری با استفاده از ردیابی اشعه مقید براساس پارامترهای هواشناسی سطحی و مدل‌های هواشناسی عددی

حسن رحیمی^{۱*}، وهاب نفیسی^۲، جمال عسگری^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه اصفهان

survey_eng_65@yahoo.com

^۲استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه اصفهان

{nafisi, jamal.asgari}@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۱، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۲)

چکیده

در سال‌های اخیر روش ردیابی اشعه به عنوان راه‌حلی کارا برای تعیین تأخیر تروپوسفری مطرح شده است. ورودی‌های این روش پارامترهای هواشناسی خواهند بود که از منابع مختلفی می‌توانند استخراج شوند که از جمله می‌توان به مدل‌های هواشناسی عددی و داده‌های رادیوسوندها اشاره کرد. همچنین بطور موردی در بعضی ایستگاه‌ها ممکن است برخی پارامترها بطور مستقیم در سطح ایستگاه مشاهده شده باشند. در این مقاله ردیابی اشعه به منظور تعیین تأخیر تروپوسفری با استفاده‌ی تلفیقی از مدل‌های هواشناسی عددی، داده‌های سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های VLBI و همچنین داده‌های رادیوسوند انجام شده است. دو روش پیشنهاد شده، بر اساس دو رویکرد مختلف منطقه‌ای و یا ناحیه‌ای، سعی در بهبود دقت مدل‌های هواشناسی عددی دارند. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی تفاوت در مقادیر دست آمده برای تأخیر تروپوسفری نسبت به زمانی است که بدون قید و فقط با استفاده از مدل‌های عددی برآوردها انجام می‌شود. بخش عمده‌ی تفاوتها ناشی از مولفه‌ی غیرهیدروستاتیک تأخیر است. مقایسه با نتایج یک برنامه‌ی مقایسه که در نیمه‌ی اول سال ۲۰۱۰ میلادی تحت نظر کارگروه WG4.3.3 انجمن بین‌المللی ژئودزی (IAG) ترتیب داده شد، تایید کننده‌ی همخوانی نتایج است که این همخوانی بر حسب ضریب شیب مشخص تر است.

واژگان کلیدی: ردیابی اشعه، VLBI، مشاهدات رادیوسوند، مدل‌های هواشناسی عددی، تأخیر تروپوسفری.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از ردیابی اشعه^۱ به عنوان روشی برای برآورد تأخیر تروپوسفری مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر بهبود قابل ملاحظه‌ی مدل‌های هواشناسی عددی^۲ از نظر دقت و همچنین قدرت تفکیک زمانی و مکانی، باعث شده است که این مدل‌ها به عنوان ورودی‌های حل مسئله در این روش بطور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گیرند. بطور کلی در این روش مسیر اشعه در محیط تروپوسفر بطور مستقیم و با استفاده از معادلات مناسب، مشخص شده و به دنبال آن تأخیر ناشی از این محیط تعیین خواهد شد. الگوریتم‌های مختلفی برای این روش در سال‌های اخیر مطرح شده است که در هر کدام از مفروضات متفاوتی برای جزئیات مسئله استفاده شده است. کارایی ردیابی اشعه در تکنیک‌های مختلف ژئودزی فضایی مورد بررسی قرار گرفته است. از این روش در پردازش مشاهدات VLBI^۳ استفاده شده است که نتایج نشان دهنده‌ی بهبود تکرارپذیری خطوط مبنای^۴، زمان جهانی^۵ و همچنین برآورد طول روز^۶ نسبت به زمانی است که از توابع نگاشت به منظور مدل‌سازی تروپوسفر استفاده می‌شود [۱]. همچنین این روش در پردازش مشاهدات GPS [۲] و تصحیحات تروپوسفری لازم بر روی داده‌های SAR مورد بررسی قرار گرفته و کارایی آن نشان داده شده است [۳]. برای موارد دیگری از کاربردهای روش ردیابی اشعه با تفاوت‌هایی در الگوریتم‌های مورد استفاده می‌توان به [۴، ۵ و ۶] ارجاع داد.

به دلیل آنکه پارامترهای هواشناسی^۷ (فشار، درجه حرارت و رطوبت) ورودی‌های اصلی این روش هستند، چگونگی استفاده از آن‌ها و همچنین دقت‌های آن‌ها بطور مستقیم در دقت نهایی تأثیرگذار خواهند بود. از آنجایی که بیشترین تأخیرها در لایه‌های تروپوسفری نزدیک به زمین اتفاق می‌افتد، لزوم داشتن داده‌های دقیق در این نواحی بیشتر احساس می‌شود. بدین منظور در این مقاله

سعی شده است تا با ترکیب داده‌های سطحی ایستگاه‌های VLBI و داده‌های سطحی ایستگاه‌های رادیوسوند^۸ اطراف ایستگاه موردنظر با داده‌های عددی هواشناسی دقت این روش بیشتر شود.

۲- روش ردیابی اشعه

۲-۱- الگوریتم مورد استفاده

روش ردیابی اشعه به عنوان یکی از روش‌های برآورد تأخیر تروپوسفری، بطور کلی به روش‌های دو بعدی و سه بعدی تقسیم می‌شود. در روش دو بعدی مسیر اشعه صرفاً در یک صفحه با آزیموت ثابت در نظر گرفته می‌شود [۷] ولی در روش سه بعدی این امکان برای اشعه در نظر گرفته می‌شود که در سه جهت آزادی عمل داشته باشد ([۱]، [۸]). روش‌های سه بعدی با واقعیت مسئله‌ی تروپوسفر تطابق بیشتری دارند ولی از طرف دیگر به دلیل حجم بالای محاسبات، سرعت برآورد نتایج به شدت کاهش می‌یابد. در یک تحقیق نشان داده شده است که این کاهش سرعت محاسبات نسبت به روش‌های دوبعدی می‌تواند تا حدود ۱۰ برابر هم برسد [۱]. الگوریتم و روابط مورد استفاده در این مقاله براساس یک روش دوبعدی است. برای نمونه‌ای از یک الگوریتم دوبعدی میتوان به [۷] ارجاع داد. به علاوه در [۱] نیز روابط برای روش ردیابی اشعه سه بعدی ارائه شده است. این روش بر اساس حل یک دستگاه از معادلات دیفرانسیل است. بطور کلی در هر روش ردیابی اشعه، محاسبات از پایین‌ترین تا بالاترین لایه‌ی در نظر گرفته شده برای تروپوسفر با استفاده از این روابط و با تکرار انجام خواهد شد. ورودی مسئله شکست-پذیری (یا ضریب شکست) است که از پارامترهای اتمسفری قابل محاسبه است.

۲-۲- منابع داده

برای دسترسی به پارامترهای هواشناسی مورد نیاز (شامل فشار، فشار بخار آب و درجه حرارت) در امتداد مسیر مورد نظر در تروپوسفر، منابع داده‌ی مختلفی وجود دارند. مدل‌های هواشناسی عددی که توسط موسسات مختلفی

^۱ Ray-tracing

^۲ Numerical Weather Models (NWMs)

^۳ Very Long Baseline Interferometry

^۴ Baselines repeatability

^۵ Universal Time (UT)

^۶ Length of Day (LoD)

^۷ Meteorological parameters

^۸ Radiosonde

$$P_{int} = P_i * \exp\left(-\frac{(h-h_i)g_m}{R_d T_v}\right) \quad (1)$$

فشار در لایه میانی (P_{int}) با استفاده از فشار در لایه پایینی (P_i) در این رابطه h ارتفاع لایه میانی و h_i ارتفاع لایه پایینی می‌باشد، همچنین g_m ثقل متوسط T_v دمای مجازی که از رابطه ۲ بدست می‌آید [۱۱].

$$T_v = \frac{T_i \cdot P_i}{P_i - \left(1 - \frac{M_v}{M_d}\right) e_i} \quad (2)$$

در این رابطه T_i و e_i دما و فشار بخار آب در لایه پایینی و M_d و M_v وزن مولکولی هوای تر و خشک هستند.

فشاربخار آب در لایه میانی (e_{int}) با استفاده از فشاربخار آب در لایه پایینی (e_i)، و C از رابطه ۴ بدست می‌آید [۷].

$$e_{int} = e_i * \exp\left(\frac{h_{int} - h_i}{C}\right) \quad (3)$$

$$C = e_i * \exp\left(\frac{h_{i+1} - h_i}{\log\left(\frac{e_{i+1}}{e_i}\right)}\right) \quad (4)$$

در این روابط اندیس i و $i+1$ مربوط به لایه بالایی و پایینی لایه مورد نظر است. برای مشخص شدن تعداد لایه‌های ارتفاعی باید به این نکته توجه داشت که تعداد کم این لایه‌ها می‌تواند بر روی دقت نهایی تاثیر گذاشته و آنرا کاهش دهد و تعداد بیش از حد زیاد نیز بر کاهش سرعت مشاهدات موثر است. پیشنهاد ارائه شده توسط روکن^۲ و همکاران که با در نظر گرفتن لایه‌هایی فشرده‌تر در بخش‌های پایینی تروپوسفر است نتیجه‌ای بهینه به دنبال خواهد داشت [۱۳].

همچنین لازمست که برای محاسبه شکست پذیری برای نقطه مورد نظر با استفاده از نقاط شبکه‌ی داده‌های ECMWF از یک درون‌یابی افقی استفاده شود. درون‌یابی

تولید می‌شوند، این پارامترها را در امتداد قائم و در یک شبکه گردبندی شده با قدرت تفکیک‌های مختلف، در اختیار کاربر قرار می‌دهند. یکی از این مدل‌ها تحت عنوان مدل^۱ ECMWF در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. رادیوسوندها نیز از جمله منابعی هستند که در ایستگاه‌هایی پراکنده در کشورهای مختلف مشاهدات را در اپک‌های زمانی مشخص انجام می‌دهند. داده‌ها برخلاف مدل‌های عددی به رایگان در اختیار کاربر قرار می‌گیرد [۹].

منبع دیگری که در برخی موارد و بخصوص برای جبران کمبود داده‌ها در ارتفاعی بالاتر از حد مشاهدات رادیوسوند و یا مدل‌های هواشناسی عددی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اتمسفر استاندارد است که مدل‌های مختلفی تاکنون برای این منظور توسعه یافته است که بطور عمده مبتنی بر شرایطی متوسط و ایده‌آل برای اتمسفر هستند. در این تحقیق از مدل USSA76 برای جبران کمبود داده‌ها هر جا که لازم بوده استفاده شده است [۱۰].

۲-۳- درون‌یابی قائم و افقی پارامترهای هواشناسی

در تمام روش‌های انجام ردیابی اشعه ابتدا با استفاده از داده‌های موجود یک درون‌یابی قائم برای پارامترهای فشار و فشار بخار آب و دما انجام می‌شود [۱]. دلیل این امر کافی نبودن رزولوشن ارتفاعی این پارامترها (استخراج شده از منابع داده‌ی توضیح داده شده در بالا) برای انجام محاسبات است. برای فشار و فشار بخار آب طبق روابط ۱ تا ۴ و برای دما بصورت خطی درون‌یابی انجام می‌شود تا پارامتر شکست‌پذیری در لایه‌هایی فشرده‌تر بدست آیند. لایه‌ها از ارتفاع ایستگاه تا ارتفاع ۷۶ کیلومتری ادامه دارند و به منظور محاسبه پارامتر شکست‌پذیری در ارتفاعات بالاتر از ۵۰ کیلومتر به دلیل در دسترس نبودن داده‌های هواشناسی، از مدل‌های اتمسفر استاندارد برای فشار و دما استفاده می‌شود [۱۱].

^۱ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

^۲ Rocken

پیشنهادی بر اساس مطالعات انجام شده قبلی اسپلین است [۱].

۲-۴- سایر جزئیات

برای اجرای یک روش ردیابی اشعه جزئیات و عناصر دیگری نیز باید در نظر گرفته شود که می‌تواند بر روی نتایج نهایی موثر باشند، که از جمله می‌توان به مقدار در نظر گرفته شده برای شعاع زمین، مقدار شتاب ثقل (در تبدیل سیستم‌های ژئودتیک و هواشناسی)، قدرت تفکیک افقی، قدرت تفکیک زمانی، نوع مدل هواشناسی عددی و ثابت‌های شکست‌پذیری اشاره کرد. تاثیر هرکدام از این پارامترها بر روی تأخیر مایل کلی برآورد شده بطور مطلق، در حالت‌های بحرانی و برای زوایای ارتفاعی پایین، می‌تواند تا چند سانتیمتر هم برسد. ([۱۲، ۱]).

۳- طرح مسئله

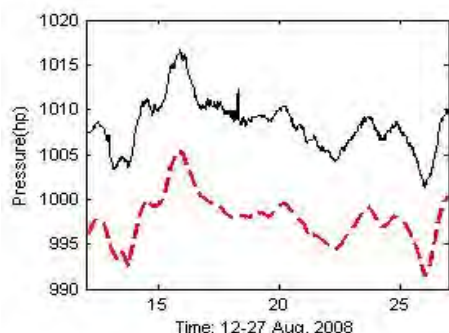
در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های هواشناسی عددی در شاخه‌های مختلف ژئودزی و از جمله برآورد تأخیر تروپوسفری گسترش پیدا کرده است. علیرغم قابلیت بالای این مدل‌ها و تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای که در کیفیت و سهولت انجام محاسبات داشته‌اند، در استفاده از آنها لازمست که جانب احتیاط نیز رعایت شود و برخی ملاحظات در نظر گرفته شود. گرچه مطالعات قبلی نشان دهنده‌ی کارایی این مدل‌ها در محث تأخیر تروپوسفری است ولی با توجه به برخی شواهد می‌توان انتظار داشت که با استفاده از قیود و یا داده‌هایی مستقل از این مدل‌ها، نتایج حاصل نیز تغییر کنند. قبل از ورود به بحث لازم به ذکرست که در بررسی‌های انجام شده در این تحقیق از داده‌های ایستگاه‌های VLBI (شامل مدل‌های هواشناسی عددی و همچنین داده‌های سطحی که بطور مستقیم در این ایستگاه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند) استفاده شده است. در شکل ۱ موقعیت ۱۱ ایستگاه VLBI درگیر در دوره‌ی مشاهداتی موسوم به CONT08 نشان داده شده است. این دوره‌ی مشاهداتی ۱۵ روزه که در اوت ۲۰۰۸ میلادی انجام شده است، به عنوان منبعی بسیار ارزشمند تاکنون در بسیاری از مطالعات، مورد استفاده قرار گرفته است. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی این دوره‌ی مشاهداتی و

همچنین دوره‌های مشاهداتی قبلی می‌توان به سایت مربوط رجوع کرد [۱۴].

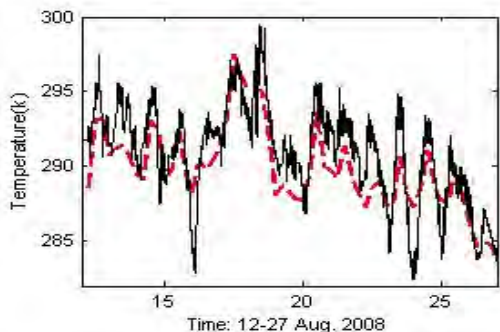


شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های VLBI در دوره‌ی مشاهداتی موسوم به CONT08

در شکل‌های ۲ الی ۵ اختلاف پارامترهای فشار و درجه حرارت استخراج شده از مدل و اندازه‌گیری شده بطور مستقیم در ایستگاه برای دو ایستگاه نمونه‌ی Svetloe (واقع در روسیه) و Wettzell (واقع در آلمان)، برای این دوره‌ی پانزده روزه نشان داده شده است.



شکل ۲- اختلاف فشار در ایستگاه Svetloe، از دو منبع داده (نمودار مشکی: داده‌های ایستگاه، نمودار قرمز: داده‌های مدل)، بر حسب هکتوپاسکال - ۱۲ الی ۲۷ اوت ۲۰۰۸.

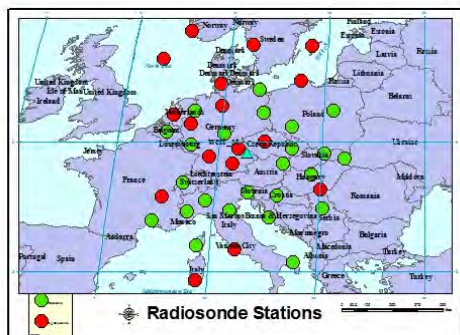


شکل ۳- اختلاف دما در ایستگاه Svetloe، از دو منبع داده (نمودار مشکی: داده‌های ایستگاه، نمودار قرمز: داده‌های مدل)، بر حسب کلونین - ۱۲ الی ۲۷ اوت ۲۰۰۸.

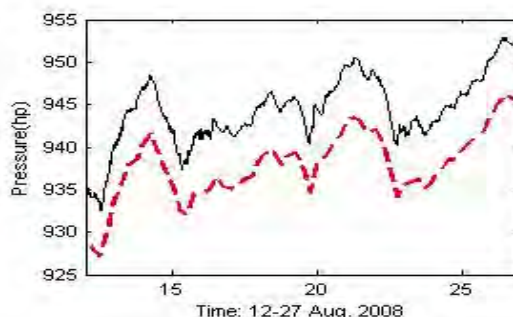
ECMWF و داده‌های ایستگاه‌های رادیوسوند موجود در منطقه و همچنین اندازه‌گیری فشار و درجه حرارت در ایستگاه مورد نظر است. این اندازه‌گیری‌های مستقیم در هر ایستگاه از فایل‌های مشاهدات VLBI قابل استخراج هستند. در این مقاله دو روش ناحیه‌ای و منطقه‌ای برای اعمال قید به ردیابی اشعه پیشنهاد گردیده و نتایج هر کدام نشان داده شده است، توضیح آنکه در این مقاله برای مقایسه دو روش مقید و بدون قید، از روش ردیابی اشعه‌ی دو بعدی استفاده شده است.

۴-۱- داده‌ها و ارزیابی اولیه‌ی داده‌ها

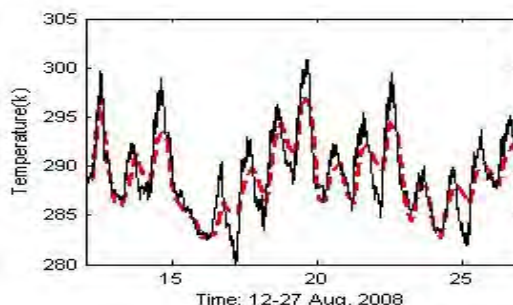
همانطور که گفته شد داده‌های مورد استفاده عبارتند از داده‌های مدل هواشناسی عددی ECMWF، داده‌های ایستگاه‌های رادیوسوند موجود در منطقه و اندازه‌گیری مستقیم فشار و درجه حرارت در ایستگاه مورد نظر. ایستگاه نمونه در این تحقیق ایستگاه WETTZEL انتخاب شده و بازه‌ی زمانی ۱۲ تا ۱۸ اوت ۲۰۰۸ در نظر گرفته شده است. به غیر از این زمان، تاریخ ۱ ژانویه ۲۰۰۸ نیز برای انجام یک ارزیابی و مقایسه با نتایج سایر الگوریتم‌های ردیابی اشعه مورد استفاده قرار گرفته است که در بخش مناسب درباره‌ی آن توضیح داده خواهد شد. همچنین برای گرفتن نتایج در شرایط جوی متفاوت از ایستگاه MEDICINA که یک ایستگاه با رطوبت بیشتر نسبت به ایستگاه WETTZEL می‌باشد استفاده گردید. محدوده‌ی انتخابی ناحیه‌ای است به وسعت $20^{\circ} * 20^{\circ}$ است (شعاع ۱۰ درجه اطراف ایستگاه نمونه‌ی موردنظر) ایستگاه‌های رادیوسوند در این ناحیه شناسایی شده (شکل ۶) و داده‌های سطحی مربوط به فشار، دما و فشار بخار آب آن‌ها استخراج شدند.



شکل ۶- موقعیت ایستگاه‌های رادیوسوند اطراف ایستگاه Wetzell (سبز: ایستگاه‌های پذیرفته‌شده، قرمز: ایستگاه‌های رد شده)



شکل ۴- اختلاف فشار در ایستگاه Wetzell، از دو منبع داده (نمودار مشکی: داده‌های ایستگاه، نمودار قرمز: داده‌های مدل)، بر حسب هکتوپاسکال - ۱۲ الی ۲۷ اوت ۲۰۰۸.



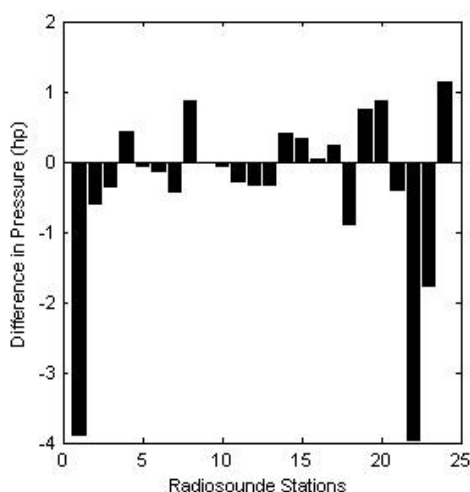
شکل ۵- اختلاف دما در ایستگاه Wetzell، از دو منبع داده (نمودار مشکی: داده‌های ایستگاه، نمودار قرمز: داده‌های مدل)، بر حسب کلوین - ۱۲ الی ۲۷ اوت ۲۰۰۸.

شکل‌های فوق نشان دهنده‌ی اختلافی بین این دو گروه است، گرچه که از نظر رفتار کلی مشابهت بین آنها وجود دارد. باید به این نکته توجه داشت که این اختلاف‌ها مربوط به لایه‌ی سطحی (در ارتفاع ایستگاه موردنظر) بوده و لایه‌های نزدیک به زمین تاثیر بیشتری در برآورد تاخیر خواهند داشت. می‌توان نشان داد که کمتر از یک درصد از تاخیر کلی در ارتفاع بیش از ۵۰ کیلومتر اتفاق می‌افتد. با توجه به این اختلافات است که ایده‌ی اولیه‌ی استفاده از روشی مقید شکل گرفته است. بنابراین در این مقاله راه-های مختلف درگیر شدن دیتاهای سطحی رادیوسوند و همچنین دیتای سطحی ایستگاه موردنظر با داده‌های استاندارد هواشناسی بررسی شده است تا با استفاده از این دیتاها به عنوان یک قید در ردیابی اشعه دقت آن افزایش یابد.

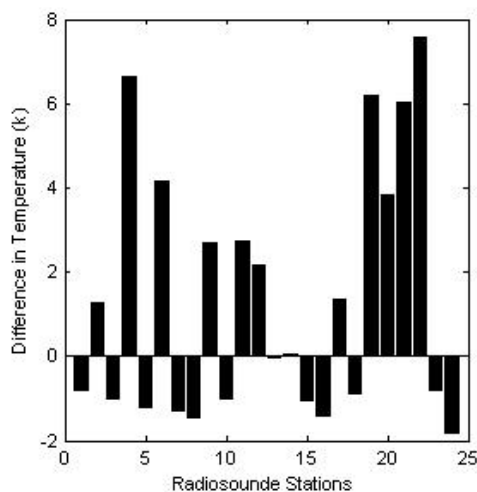
۴- ایده‌ی ردیابی اشعه‌ی مقید

ایده‌ی اصلی برای ردیابی اشعه‌ی مقید (که پیشنهادی این مقاله است)، ترکیب داده‌های مدل هواشناسی عددی

ایستگاه	Zsr	Zsg	Zr	Zg
15	2.295	2.296	2.303	2.303
16	2.275	2.275	2.283	2.283
17	2.300	2.300	2.307	2.309
18	2.302	2.300	2.308	2.308
19	2.304	2.306	2.311	2.315
20	2.300	2.302	2.305	2.312
21	2.225	2.224	2.231	2.233
22	2.329	2.32	2.329	2.33
23	2.317	2.313	2.319	2.321
24	2.299	2.302	2.305	2.31



شکل ۷- اختلاف فشار ایستگاه‌های رادیوسوند با داده‌های ECMWF متناظر این ایستگاه‌ها. ۱ ژانویه ۲۰۰۸ میلادی.



شکل ۸- اختلاف دما ایستگاه‌های رادیوسوند با داده‌های ECMWF متناظر این ایستگاه‌ها - ۱ ژانویه ۲۰۰۸ میلادی.

برای اینکه ایستگاه‌های دارای دقت پایین و یا ایستگاه‌های دارای دیتاهای معیوب از گردونه‌ی محاسبات و فرایند پردازش خارج شوند بررسی‌هایی انجام شد از جمله اینکه تاخیر هیدروستاتیک بدست آمده از انجام ردیابی اشعه برای هر ایستگاه در راستای قائم با تاخیر هیدروستاتیک زینتی مدل ساستامینن مقایسه شدند که فرم معادله آن در رابطه ۷ آورده شده است [۱۵]. با توجه به اینکه مدل ساستامینن، تاخیر را تا ۵ میلیمتر می‌تواند مدل‌سازی نماید [۱۵] از این رو با انتخاب سطح اطمینان ۲۵ ایستگاه‌هایی که اختلاف تاخیر زینتی هیدروستاتیک آن‌ها با رابطه ۷ بیشتر از ۱ سانتیمتر بودند حذف گردیدند.

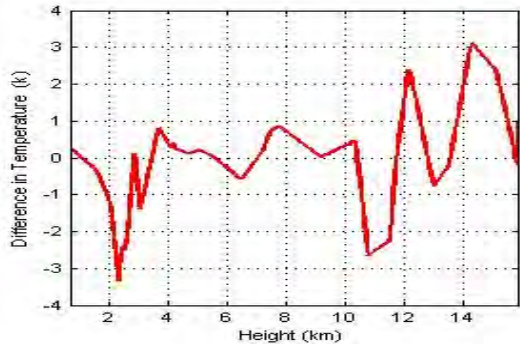
$$d_h^z = \frac{.002277P_s}{(1-.0026 \cos(2\Phi)-.00028H_s)} \quad (7)$$

در این رابطه P_s فشار سطحی ایستگاه و H_s ارتفاع ایستگاه از سطح دریا بر حسب کیلومتر و Φ عرض جغرافیایی ایستگاه می‌باشد. در جدول ۱ مقادیر محاسبه شده برای ایستگاه‌هایی که در این ارزیابی قبول شده‌اند ارائه شده است. شکل‌های ۷ الی ۹ اختلاف داده‌های رادیوسوند اطراف ایستگاه Wetzell با داده‌های مدل هواشناسی عددی متناظر این نقاط را نشان می‌دهد.

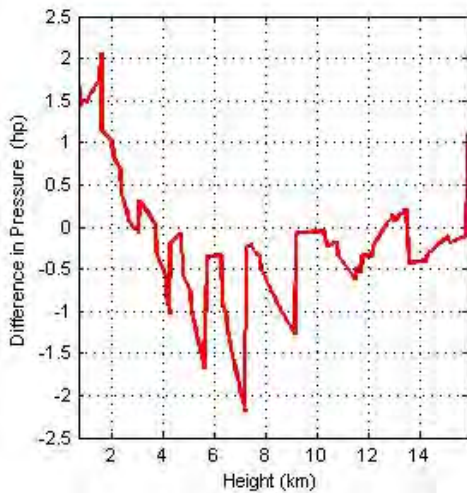
جدول ۱ - نتایج تاخیر زینتی هیدروستاتیک با استفاده از ردیابی اشعه و مدل ساستامینن
 Zsr: از مدل ساستامینن با استفاده از فشار از داده‌های رادیوسوند،
 Zsg: از مدل ساستامینن با استفاده از فشار از داده‌های مدل عددی،
 Zr: از مدل ردیابی اشعه با استفاده از فشار از داده‌های رادیوسوند،
 Zg: از ردیابی اشعه با استفاده از فشار از داده‌های مدل عددی

ایستگاه	Zsr	Zsg	Zr	Zg
1	2.312	2.303	2.314	2.313
2	2.204	2.203	2.206	2.211
3	2.314	2.313	2.32	2.321
4	2.323	2.324	2.332	2.333
5	2.33	2.33	2.338	2.338
6	2.339	2.339	2.347	2.348
7	2.301	2.300	2.307	2.309
8	2.212	2.214	2.221	2.223
9	2.235	2.235	2.244	2.243
10	2.279	2.279	2.284	2.287
11	2.274	2.273	2.281	2.281
12	2.138	2.137	2.144	2.145
13	2.303	2.302	2.312	2.31
14	2.299	2.299	2.308	2.307

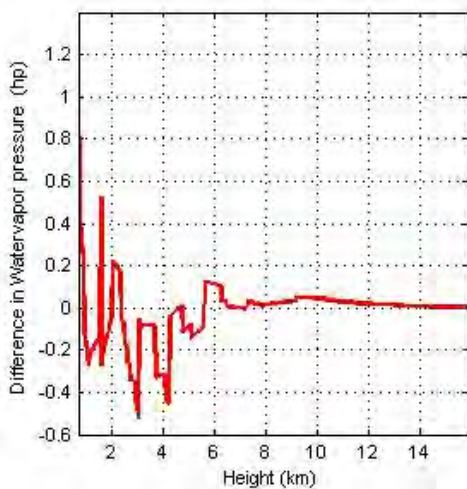
شکل ۱۱ تا ۱۳ اختلاف دما و فشار و فشار بخار آب برای اولین ایستگاه از ۲۴ ایستگاه رادیوسوند را نسبت به داده‌های استاندارد هواشناسی از ارتفاع ایستگاه تا بالاترین لایه ارتفاعی ایستگاه رادیوسوند نشان می‌دهد



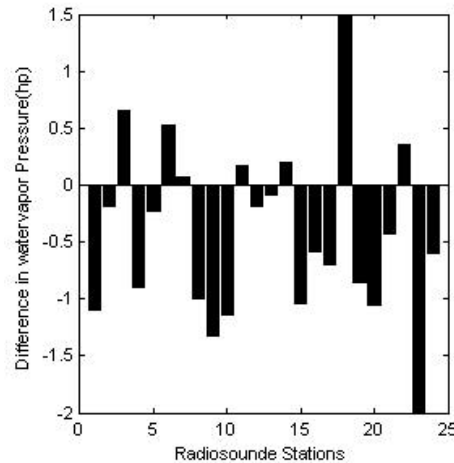
شکل ۱۱- اختلاف دما بین داده‌های رادیوسوند و داده‌های ECMWF - ۱ ژانویه ۲۰۰۸.



شکل ۱۲- اختلاف فشار بین داده‌های رادیوسوند و داده‌های ECMWF - ۱ ژانویه ۲۰۰۸.



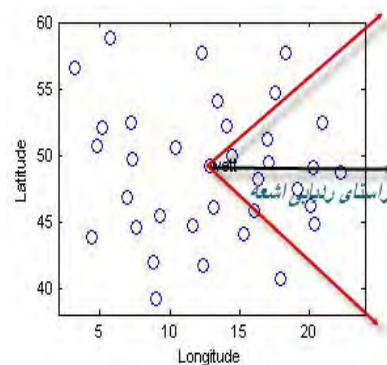
شکل ۱۳- اختلاف فشار بخار آب بین داده‌های رادیوسوند و داده‌های ECMWF - ۱ ژانویه ۲۰۰۸.



شکل ۹- اختلاف فشاربخار آب ایستگاه‌های رادیوسوند با داده‌های ECMWF متناظر این ایستگاه‌ها. ۱ ژانویه ۲۰۰۸ میلادی.

۴-۲- ردیابی اشعه‌ی مقید ناحیه‌ای

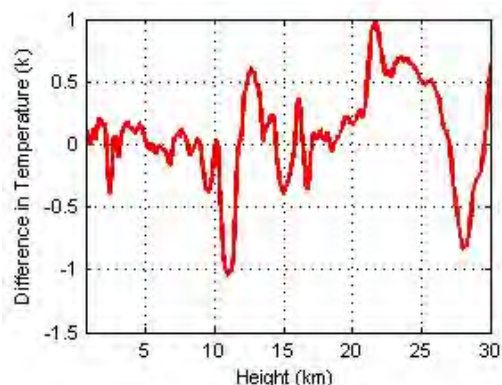
در این حالت ابتدا با توجه به امتداد مورد نظر برای ردیابی اشعه از ایستگاه‌های رادیوسوند واقع در این محدوده جهت بدست آوردن تصحیحات و اعمال قید استفاده شد، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و شرایط موجود اعم از تعداد و پراکندگی ایستگاه‌های رادیوسوند محدوده ۴۵ درجه ایه این امتداد به عنوان محدوده مناسب در نظر گرفته شد و سپس ایستگاه‌های واقع در این محدوده شناسایی شده (شکل ۱۰) و اختلاف داده‌های رادیوسوند با داده‌های ECMWF در سطوح متناظر ارتفاعی بدست آمدند (شکل ۱۱) سپس از این اختلاف‌ها در سطوح یکسان ارتفاعی میانگین‌گیری شده تا در هر ناحیه ردیابی اشعه یک تصحیح به تعداد کل لایه‌های ارتفاعی اعمال شود تا در انجام ردیابی اشعه در هر ارتفاعی تصحیح مربوطه مورد استفاده قرار گیرد.



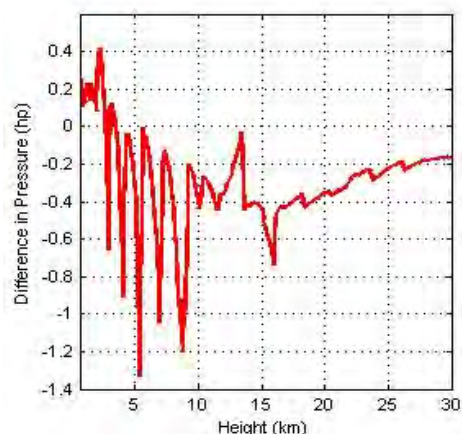
شکل ۱۰- محدوده‌ی در نظر گرفته شده در اطراف امتداد ردیابی اشعه (برای مثال آزیموت ۹۰ درجه) و ایستگاه‌های واقع در این محدوده

۳-۴- ردیابی اشعه مقید منطقه‌ای

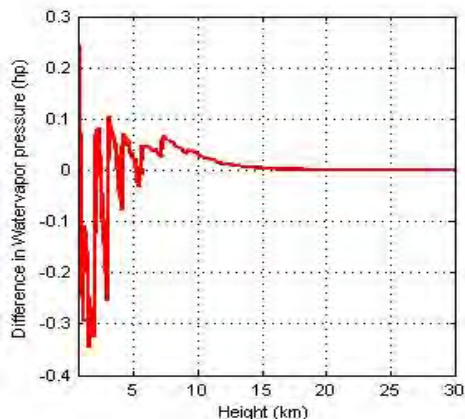
در این حالت بجای در نظر گرفتن یک ناحیه‌ی خاص در هر امتداد ردیابی اشعه از روی همه اختلاف‌های بدست آمده از تمام ایستگاه‌های رادیوسوند در همه لایه‌ها برای همه امتدادها یک تصحیح بدست آمد که در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ برای دما، فشار و فشار بخار آب آورده شده است.



شکل ۱۴- میانگین بدست آمده از ۲۴ ایستگاه برای دما از اولین لایه تا لایه پایانی-۱ ژانویه ۲۰۰۸.



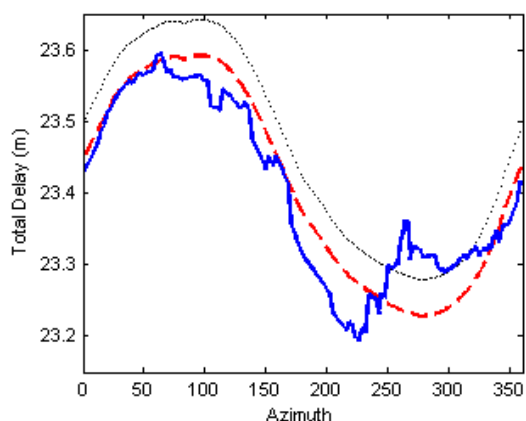
شکل ۱۵- میانگین بدست آمده از ۲۴ ایستگاه برای فشار از اولین لایه تا لایه پایانی-۱ ژانویه ۲۰۰۸.



شکل ۱۶- میانگین بدست آمده از ۲۴ ایستگاه برای فشار بخار آب از اولین لایه تا لایه پایانی-۱ ژانویه ۲۰۰۸.

۵- محاسبات و نتایج

نتایج حاصل از انجام ردیابی اشعه در سه حالت (بدون قید و با اعمال قید) و برای سه تاریخ مختلف برای ایستگاه WETTZEL در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ آورده شده است. همچنین در شکل ۲۰ نتایج برای ایستگاه MEDICINA آورده شده است. در این شکل‌ها مقدار زاویه‌ی ارتفاعی ۵ درجه در نظر گرفته شده است تا اختلافات در بحرانی ترین حالت برآورد شوند. اگرچه این مقدار زاویه ارتفاعی در مشاهدات GPS ممکن است خیلی متداول نباشد ولی در پردازش‌های VLBI به دلیل شرایط خاص این روش و خطوط مبنای بلند، بسیار معمول است. در جدول ۲ آماره‌های اختلاف بین تاخیرهای کلی بدست آمده از دو روش پیشنهاد شده در این مقاله با روش ردیابی اشعه‌ی معمولی (یعنی فقط با استفاده از مدل هواشناسی عددی و بدون اعمال قید) ارائه شده‌اند. اختلاف نتایج در روش منطقه‌ای کمتر از روش ناحیه‌ای است و به علاوه اختلافات نوسان کمتری هم دارند. در جدول ۳ نیز آماره-های تاخیرهای کلی با استفاده از هر سه روش محاسبه شده برای همین تاریخ و برای آزمایش‌های صفر تا ۳۶۰ درجه خلاصه شده‌اند. دامنه‌ی تغییرات بر حسب آزمایش‌ها در دو حالت مقید منطقه‌ای و بدون قید بسیار نزدیک به هم هستند (حدود ۲ میلی‌متر اختلاف) در حالیکه در برای مقید ناحیه‌ای این اختلاف در حد چند سانتیمتر است.



شکل ۱۷- نمودار تاخیر کلی بدست آمده از انجام ردیابی اشعه برای ایستگاه wetz در سه حالت مختلف برای تاریخ ۱۲ اوت ۲۰۰۸ میلادی. (مشکی نقطه‌چین: روش معمولی، قرمز خط‌چین: مقید منطقه‌ای، آبی توپر: مقید ناحیه‌ای)

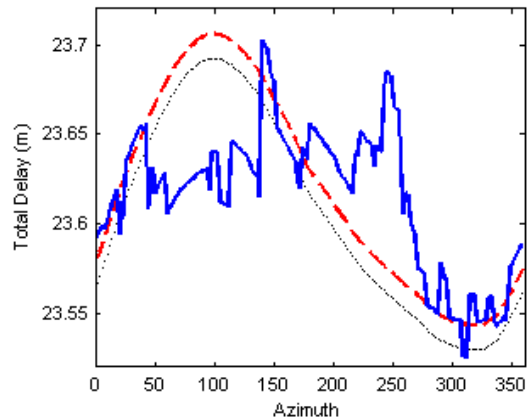
جدول ۲ - آماره‌های اختلاف بین دو روش پیشنهادی با روش ردیابی اشعه بدون قید- ۱۲ اوت ۲۰۰۸.

نوع قید	ایستگاه	min	Max	Mean	Std
منطقه‌ای	wett	0.051	0.051	0.051	0.000
	medi	0.061	0.062	0.062	0.000
ناحیه‌ای	wett	0.002	0.128	0.059	0.047
	medi	0.000	0.123	0.051	0.032

جدول ۳ - آماره‌های تاخیر کلی بدست آمده از دو روش پیشنهادی و روش ردیابی اشعه بدون قید. ۱۲ اوت ۲۰۰۸.

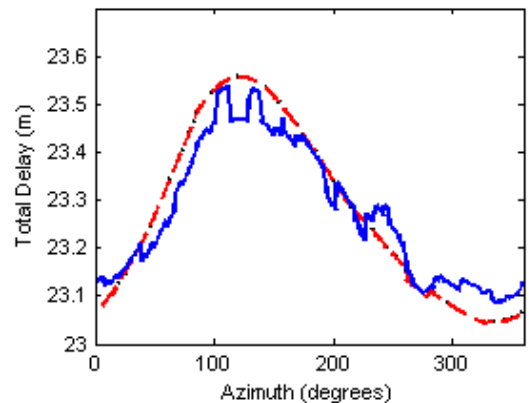
نوع ردیابی اشعه	ایستگاه	min	Max	Mean
بدون قید	wett	23.278	23.642	23.461
	medi	25.082	25.129	25.105
منطقه‌ای	wett	23.227	23.592	23.410
	medi	25.020	25.067	25.043
ناحیه‌ای	wett	23.195	23.595	23.401
	medi	24.966	25.146	25.054

با توجه به نتایج بدست آمده از این سه نمودار و نمودارهای دیگر می‌توان نتیجه گرفت که قید اعمال شده نمودار تاخیر کلی را بسته به آزمون می‌تواند تا چند سانتیمتر جابجا کند. برای بررسی دقیق‌تر، تاخیر کلی به دو مولفه‌ی هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک تجزیه شده و اختلاف‌ها برای این دو بطور مجزا محاسبه شده است. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمودار تاخیر هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک برای حالت منطقه‌ای و شکل‌های ۲۳ و ۲۴ برای حالت ناحیه‌ای را برای تاریخ ۱۲ اوت ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای تاخیر هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک این نکته روشن می‌شود که عمده‌ی این اختلاف‌ها ناشی از مولفه‌ی غیرهیدروستاتیک است بطوریکه اختلاف تحمیل شده از این مولفه بین ۳ تا ۴ برابر اختلاف بدست آمده از بخش هیدروستاتیک تاخیر است، علیرغم اینکه بطور مطلق بخش غیرهیدروستاتیک بسیار کوچکتر از بخش هیدروستاتیک خواهد بود. این نکته تأکیدی است مجدد بر این که بخش مرطوب تروپوسفر بسیار متغیر بوده و پیش‌بینی و مدل کردن آن نامعینی‌های بزرگی خواهد داشت.

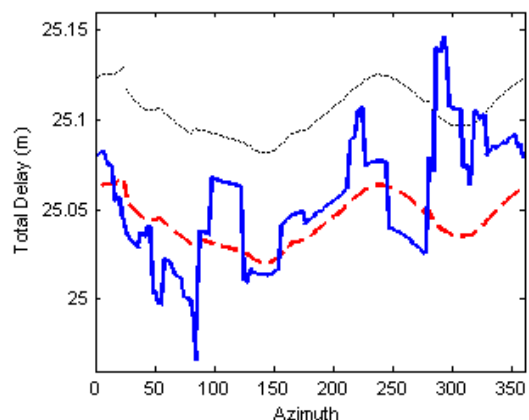


شکل ۱۸- نمودار تاخیر کلی بدست آمده از انجام ردیابی اشعه برای ایستگاه wett در سه حالت مختلف برای تاریخ ۱۳ اوت ۲۰۰۸ میلادی.

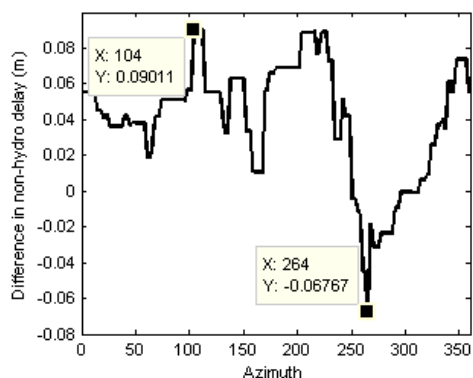
(مشکی نقطه‌چین: روش معمولی، قرمز خط‌چین: مقید منطقه‌ای، آبی توپر: مقید ناحیه‌ای)



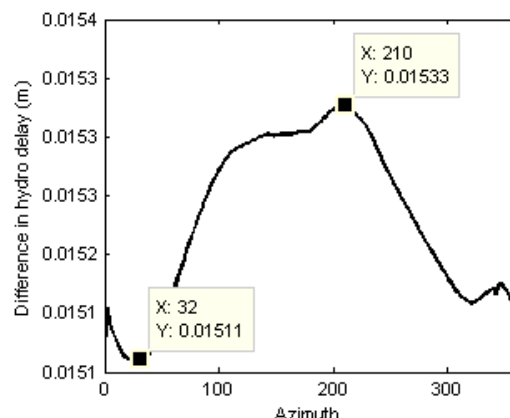
شکل ۱۹- نمودار تاخیر کلی بدست آمده از انجام ردیابی اشعه برای ایستگاه wett در سه حالت مختلف برای تاریخ ۱۴ اوت ۲۰۰۸ میلادی. (مشکی نقطه‌چین: روش معمولی، قرمز خط‌چین: مقید منطقه‌ای، آبی توپر: مقید ناحیه‌ای)



شکل ۲۰- نمودار تاخیر کلی بدست آمده از انجام ردیابی اشعه برای ایستگاه medi در سه حالت مختلف برای تاریخ ۱۲ اوت ۲۰۰۸ میلادی (مشکی نقطه‌چین: روش معمولی، قرمز خط-چین: مقید منطقه‌ای، آبی توپر: مقید ناحیه‌ای)

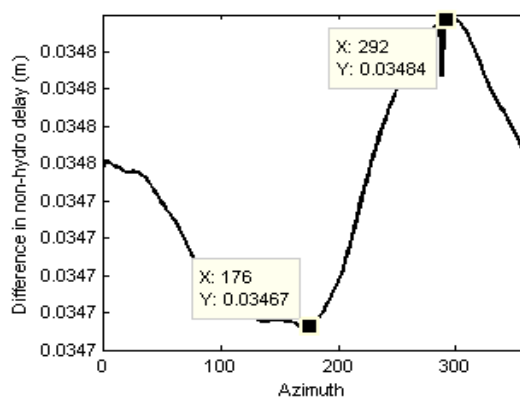


شکل ۲۴- اختلاف تأخیر غیرهیدروستاتیک برآورد شده از روش ردیابی اشعه مقید ناحیه‌ای و روش بدون قید. ۱۲ اوت ۲۰۰۸ میلادی.

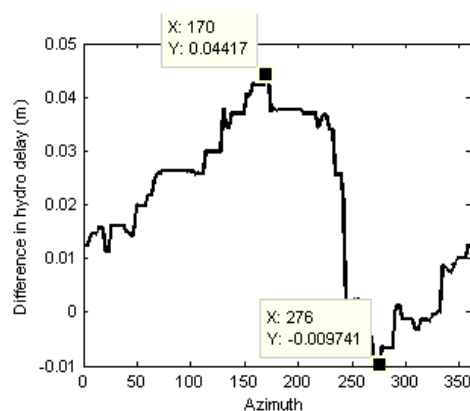


شکل ۲۱- اختلاف تأخیر هیدروستاتیک برآورد شده از روش ردیابی اشعه مقید منطقه‌ای و روش بدون قید. ۱۲ اوت ۲۰۰۸ میلادی.

به عنوان بخش دیگری از نتایج می‌توان به مقایسه‌ی نتایج حاصل از هر سه روش ردیابی اشعه با نتایج حاصل از الگوریتم‌های دیگر ارائه شده توسط برخی از محققین است. این مقایسه می‌تواند نقش اعتبارسنجی دو روش پیشنهادی در این مقاله را داشته باشد. در نیمه‌ی اول سال ۲۰۱۰ میلادی برنامه‌ی مقایسه‌ای بین پنج گروه مختلف متخصص در زمینه‌ی ردیابی اشعه، تحت نظر کارگروه WG4.3.3 انجمن بین‌المللی ژئودزی (IAG) ترتیب داده شد [۱۲]. برای این منظور دو مجموعه داده برای دو تاریخ و دو ایستگاه نمونه‌ی مختلف در اختیار گروه‌های شرکت کننده قرار گرفت. یکی از این داده‌ها مربوط است به ایستگاه Wetzell ولی برای تاریخ اول ژانویه ۲۰۰۸. در تحقیق حاضر با توجه به روش توضیح داده شده، برای این تاریخ نیز محاسبات تکرار شده است. نتایج بدست آمده در کنار نتایج سایر گروه‌های شرکت کننده در این مقایسه قرار گرفته‌اند که در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نمایش داده شده است. در شکل ۲۵ مقدار تأخیرهای کلی بصورت مطلق و در شکل ۲۶ ضرایب شیب نشان داده شده‌اند. توضیح آنکه منظور از ضریب شیب (شکل ۲۶) عبارتست از نسبت تأخیر مایل به تأخیر زینتی، ضرب شده در یک مقدار متوسط اسمی برای تأخیر زینتی (برای این ایستگاه مقدار اسمی برابر ۲/۲ متر در نظر گرفته شده است). به این ترتیب نتایج به نوعی نرمالیزه می‌شوند و مقایسه‌ی بهتر جنبه‌های دیگری از نتایج امکان‌پذیر می‌شود.



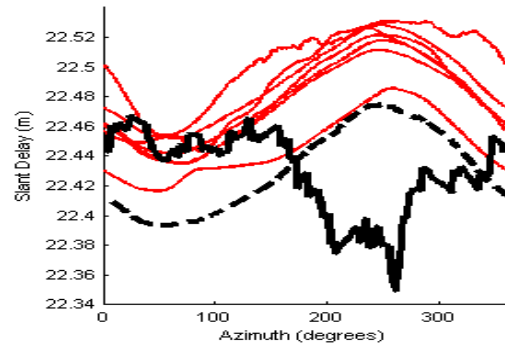
شکل ۲۲- اختلاف تأخیر غیر هیدروستاتیک برآورد شده از روش ردیابی اشعه مقید منطقه‌ای و روش بدون قید. ۱۲ اوت ۲۰۰۸ میلادی.



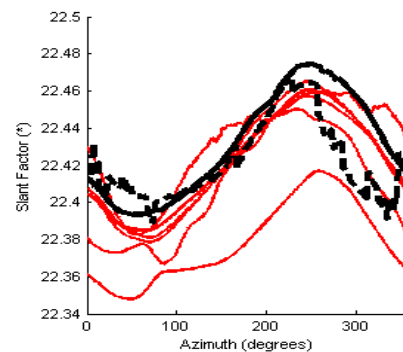
شکل ۲۳- اختلاف تأخیر هیدروستاتیک برآورد شده از روش ردیابی اشعه مقید ناحیه‌ای و بدون قید. ۱۲ اوت ۲۰۰۸ میلادی.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله برای استفاده‌ی بهتر از داده‌های در دسترس هواشناسی در تعیین تاخیر تروپوسفری، روشهایی پیشنهاد شده است. شالوده‌ی این روش‌ها بر اساس مدل‌های هواشناسی عددی است که کارایی آنها ثابت شده است ولی با توجه به داده‌های محلی در دسترس می‌توان قیودی را برای افزایش دقت به مسئله وارد کرد. دو قید پیشنهاد شده است که بصورت منطقه‌ای و یا ناحیه‌ای با مسئله برخورد می‌کنند. در این دو روش استفاده از داده‌های رادیوسوند و یا اندازه‌گیری‌های مستقیم در ایستگاه مورد نظر به عنوان موارد تکمیلی در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها نشان دهنده‌ی این است که در روش مقید منطقه‌ای رفتار نتایج تطابق بهتری با برآوردهایی که بطور مستقل و توسط الگوریتم‌هایی متفاوت انجام شده‌اند، خواهد داشت. در صورتیکه از ضرایب شیب استفاده شود نتایج با سایر نتایج هماهنگی بیشتری پیدا خواهد کرد. نقطه‌ی ضعف روش‌های پیشنهادی در تعداد و پراکندگی ایستگاه‌هایی است که در آنها داده‌های مستقیم اندازه‌گیری شده وجود دارد. به عنوان مثال ایستگاه‌های رادیوسوند اولاً به طور نامنظم توزیع شده‌اند و ثانیاً گاه با ایستگاه مورد نظر فاصله‌ی زیادی دارند. طبیعی است که این مسئله می‌تواند بر روی نتایج تاثیرگذار باشد. این مورد برای برخی کشورها از جمله ایران در شرایط حاضر میتواند بحرانی تر و مشکل سازتر باشد. با توجه به نتایج که نشان دهنده‌ی این است که بخش زیادی از اختلاف‌ها در برآوردهای انجام شده به دلیل رطوبت موجود در تروپوسفر است، اگر به طریقی بتوان مشاهدات غنی‌تری از این پارامتر بدست آورد، قطعاً در برآوردها بهبود بیشتری را می‌توان انتظار داشت. از طرف دیگر اگرچه بر اساس نتایج یک برنامه‌ی مقایسه‌ی مستقل، نتایج حاصل از این تحقیق نیز اعتبارسنجی شده‌اند، ولی اعتبارسنجی بر اساس تاثیر روی نتایج نهایی (تکرارپذیری خطوط مبنا و یا موقعیت نقاط و یا سایر خروجی‌های تکنیک‌های ژئودزی فضایی) می‌تواند مکمل خوبی برای این مسئله باشد.



شکل ۲۵- تاخیرهای کلی برآورد شده - قرمز: برآوردهای انجام شده توسط گروه‌های شرکت کننده در برنامه‌ی مقایسه، مشکی خطچین: ردیابی اشعه مقید منطقه‌ای، مشکی توپر: ردیابی اشعه مقید ناحیه‌ای.



شکل ۲۶- ضرایب شیب برآورد شده - قرمز: برآوردهای انجام شده توسط گروه‌های شرکت کننده در برنامه‌ی مقایسه، مشکی خطچین: ردیابی اشعه مقید ناحیه‌ای، مشکی توپر: ردیابی اشعه مقید منطقه - ای. (* ضرایب شیب در مقدار اسمی ۲/۲ متر ضرب شده‌اند)

همانطور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود روش مقید منطقه‌ای از نظر رفتار مشابهت زیادی با سایر برآوردها دارد، در حالیکه در روش مقید ناحیه‌ای گرچه در آزمایش‌های تا حدود ۱۸۰ درجه با سایر برآوردها تطابق بهتری وجود دارد اما به مرور فاصله‌اش زیاد شده تا اینکه در آزمایش‌های حدود ۲۷۰ درجه اختلاف زیادی پیدا می‌شود. به علاوه رفتار نمودار نیز کاملاً متفاوت می‌شود. شکل ۲۵ نشان دهنده‌ی تطابق بسیار خوب تاخیرهای کلی نرمالیزه‌ی برآورد شده براساس ایده‌ی ارائه شده در این تحقیق، با سایر برآوردهاست. اهمیت این مورد زمانی بهتر مشخص می‌شود که به این نکته اشاره شود که در حال حاضر در بسیاری از الگوریتم‌های پردازش داده‌های VLBI استفاده از ضرایب شیب اهمیت بیشتری از مقادیر مطلق تاخیر کلی است.

سیاسگزاری

مدل هواشناسی عددی ECMWF و همچنین مشاهدات و داده‌های VLBI تشکر و قدردانی می‌شود.

از پروفسور یوهانس بوهم از دانشگاه صنعتی وین، گروه ژئودزی پیشرفته به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های

مراجع

- [1] Nafisi, V., M. Madzak, J. Böhm, A. A. Ardalan, and H. Schuh (2012), "Ray-traced tropospheric delays in VLBI analysis." *Radio Science*. Vol 47, RS2020, doi:10.1029/2011RS004918.
- [2] Hobiger T., S. Shimada, S. Shimizu, R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo (2010), "Improving GPS positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Vol. 72, No. 2-3, pp. 262–270, doi:10.1016/j.jastp.2009.11.018.
- [3] Hobiger, T., Y. Kinoshita, S. Shimizu, R. Ichikawa, M. Furuya, T. Kondo, and Y. Koyama (2010), "On the importance of accurately ray-traced troposphere corrections for interferometric SAR data." *Journal of Geodesy*. Vol. 84, No. 9, pp. 537–546, doi:10.1007/s00190-010-0393-3.
- [4] Hobiger, T., R. Ichikawa, T. Takasu, Y. Koyama, and T. Kondo (2008), "Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning." *Earth, Planets and Space*. Vol. 60, No. 5, pp. e1–e4.
- [5] Wijaya, D.D. (2010), "Atmospheric correction formulae for space geodetic techniques." PhD thesis, Graz University of Technology, Institute of Engineering Geodesy and Measurements Systems, Shaker Verlag, 163 pp.
- [6] Pany, T.K. (2002), "Development and application of tropospheric GPS slant delay models based on numerical weather prediction models and turbulence theory." PhD thesis, Institute of Engineering Geodesy and Measurements Systems, Graz University of Technology, pp. 190.
- [7] Böhm, J. and H. Schuh (2003), "Vienna Mapping Functions", *Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*. Leipzig, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, 131 – 143
- [8] Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo (2008), "Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models", *Journal of Geophysics Research*. 113, D20302, doi:10.1029/2008JD010503.
- [9] <http://www.esrl.noaa.gov/raobs/>
- [10] OFCM (2007), "Rawinsonde and pibal observations", *Federal Meteorological Handbook No. 3*, Office of the Federal Coordinator for Meteorology, USA, FCM-H3-1997.
- [11] Wallace, J.M., and P.V. Hobbs (2006), "Atmospheric science: An introductory survey (2nd ed.)." Academic Press, 483 pp.
- [12] Nafisi, V., L. Urquhart, M. C. Santos, F. G. Nievinski, J. Böhm, D. D. Wijaya, H. Schuh, A. A. Ardalan, T. Hobiger, R. Ichikawa, F. Zus, J. Wickert, P. Gegout (2012), "Comparison of ray-tracing packages for troposphere delays." *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 2, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2160952, http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5979156.
- [13] Rocken C., S. Sokolovskiy, J.M. Johnson, and D. Hunt (2001), "Improved Mapping of Tropospheric Delays", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 18, 1205 – 1213.
- [14] <http://ivs.nict.go.jp/mirror/program/cont08>
- [15] Mendes, V.B. (1999), "Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques." PhD thesis, University of New Brunswick, Technical Report 199, 349 pp.