

ارزیابی توابع نگاشت با استفاده از ردیابی اشعه سه بعدی

حمید اکبری^۱

وهاب نفیسی^۲

جمال عسگری^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۳/۲۷

چکیده

تروپوسفر لایه‌ای از اتمسفر است که از گازهای خشک و بخار آب تشکیل شده است که باعث تأخیر در زمان انتشار امواج الکترومغناطیس و در نتیجه خطا در تعیین موقعیت دقیق می‌شود. این تأثیر به طور خاص برای تکنیک‌های ژئودزی فضایی بسیار بحرانی تلقی می‌شود. برای مدل سازی این خطا روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله مطرح‌ترین آنها می‌توان به روش‌های ردیابی اشعه سه بعدی و استفاده از توابع نگاشت اشاره کرد. ردیابی اشعه سه بعدی، روشی مستقیم برای این برآورد تلقی می‌شود. در این مقاله مقایسه‌هایی بین این روش و روش استفاده از توابع نگاشت که بطور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند، انجام شده است.

بر اساس این تحقیق مشخص می‌شود که در شرایط مختلف و برای رسیدن به دقت‌های مورد نظر از کدام روش استفاده شود و اولویت با کدام روش است. در این مقایسه از توابع نگاشت VMF و GMF استفاده شده است که در تکنیک‌های ژئودزی فضایی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور داده‌های سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱ ایستگاه‌های VLBI مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ایستگاهی که بیشترین رطوبت را دارد (KOKEE) در همه بازه‌های دقت، نیاز به ردیابی اشعه دارد و از توابع نگاشت نمی‌توان استفاده کرد. همچنین برای رسیدن به دقت کمتر از ۱۰ میلیمتر در ارتفاع ایستگاه بایستی تقریباً در تمام زوایای ارتفاعی ردیابی اشعه استفاده شود و یا برای رسیدن به دقت کمتر از ۲۰ میلیمتر در ارتفاع ایستگاه بایستی تقریباً در زوایای ارتفاعی ۰ الی ۳۵ درجه ردیابی اشعه استفاده شود، و برای بقیه زوایا می‌توان از توابع نگاشت استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ردیابی اشعه، شکست پذیری، مدل‌های عددی هواشناسی، توابع نگاشت، مدل‌سازی اتمسفر

۱- کارشناس ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان hamid.akbari66@yahoo.com

۲- استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول) nafisi@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان jamal.asgari@gmail.com

۱- مقدمه

تروپوسفر لایه‌ای از اتمسفر است که از گازهای خشک و بخار آب تشکیل شده است و باعث تأخیر در زمان انتشار امواج الکترومغناطیس می‌شود. (Haselgrove, 1985)؛ (Davis et al., 1985)؛ (Kravtsov, 2005). همواره ژئودزین‌ها تأخیر تروپوسفری را به عنوان یک پارامتر مزاحم در تعیین موقعیت دقیق تلقی می‌کنند و بدین لحاظ در صدد حذف و کاهش آن هستند. امروزه می‌توان مقدار بخار آب معلق و بارش‌زای (PWV^۱) تروپوسفر را از طریق انتشار سیگنال‌های GPS^۲ هنگام عبور از جو زمین بدست آورد، زیرا تأخیر (خطا) تروپوسفری تابعی از فشار، دما و رطوبت جو است.

ارتفاع تروپوسفر از سطح زمین ۵۰ تا ۱۲۰ کیلومتر در منابع مختلف ذکر شده است. این لایه برای فرکانس‌هایی با بزرگی ۳۰ GHz از نظر الکتریکی محیطی خنثی و غیر پخش کننده^۳ است. بنابراین انتشار سیگنال GPS در تروپوسفر مستقل از فرکانس است و تأخیر تروپوسفری برای هر دو سیگنال GPS یکسان است. لذا تأخیر تروپوسفری را با استفاده از گیرنده‌های دو فرکانسه نمی‌توان تصحیح کرد. تأخیر تروپوسفری به دو مؤلفه هیدرواستاتیکی و غیر-هیدرواستاتیکی تفکیک می‌شود. مؤلفه هیدرواستاتیکی تقریباً ۹۰ درصد و تا ارتفاع تقریبی ۲ کیلومتر و مؤلفه غیر هیدرواستاتیکی حدود ۱۰ درصد و تا ارتفاع تقریبی ۸ کیلومتر کل خطای ناشی از انکسار تروپوسفری را تشکیل می‌دهند.

در یک محیط ناهمگن زمان طی مسیر موج از فرستنده تا گیرنده بیشتر از حالتی است که موج در خلأ طی می‌کند (Kravtsov, 2005). تأخیر تروپوسفر باعث اثر گذاری روی صحت و تکرار پذیری مختصات ایستگاه‌های GPS می‌شود. محیط غیر پخش کننده تروپوسفر باعث شده است حتی با مشاهده چند فرکانس نیز مشکلی حل نشود، و بنابراین مدلی با پارامترهای خارجی بایستی ایجاد شود تا این خطا

تصحیح شود. به طور کلاسیک تصحیح این خطا از دو مؤلفه تشکیل شده است: تأخیر زینتی و توابع نگاشت. توابع نگاشت برای تصویر کردن تأخیر زینتی در راستای زاویه ارتفاعی مورد نظر استفاده می‌شود. تأخیر زینتی نیز به دو قسمت تر و خشک تقسیم شده که بخش خشک آن از روابط مختلفی قابل محاسبه است و روش Saastamoinen متداول‌ترین روش می‌باشد (Saastamoinen, 1972). در رابطه با توسعه توابع نگاشت تاکنون فعالیت‌های مختلفی انجام شده است. یک نمونه از این توابع نگاشت که چندین سال است استفاده می‌شود تابع نگاشت VMF1^۴ است که با استفاده از مدل عددی هواشناسی ECMWF^۵ تهیه شده است (Böhm And Schuh, 2003). دیگر توابع نگاشت که امروزه استفاده می‌شود عبارت است از NMF^۶ و GMF^۷ و IMF^۸.

اما در سال‌های اخیر روش ردیابی اشعه نیز به عنوان راه حلی متفاوت نسبت به توابع نگاشت مطرح شده است. ردیابی اشعه تأخیرهای مایل را برای هر زاویه ارتفاعی محاسبه می‌کند، در این روش مسیر اشعه بین گیرنده و فرستنده بطور مستقیم تعیین می‌شود و مبنای این برآورد، مدل‌های عددی هواشناسی است که اطلاعات مناسبی از پارامترهای هواشناسی مثل درجه حرارت، فشار، فشار بخار آب و ژئوپتانسیل را فراهم می‌کنند. این پارامترها در نهایت ضریب شکست (یا شکست‌پذیری) (E. K. Smith and Weintraub, 1953) را نتیجه می‌دهند که معیار مناسبی برای توصیف محیط تروپوسفر خواهد بود.

در این مقاله دو تابع نگاشت، در مکان‌ها و شرایط مختلف آب و هوایی و با بررسی رطوبت ایستگاه‌ها و با معیار ردیابی اشعه سه بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند و سعی می‌شود که انتخاب‌ها و پیشنهادهایی برای استفاده از توابع نگاشت ارائه شود. یعنی از توابعی استفاده شود که سرعت بالاتر و نیاز به داده‌های کمتر و دقت بالاتری داشته

^۴- Vienna Mapping Function1

^۵- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

^۶- Niell Mapping Function

^۷- Global Mapping Function

^۸- Isobaric Mapping Function

^۱- Precipitation Water of vapor

^۲- Global Positioning System

^۳- Non dispersive

هویگر و همکاران نیز روشی سریع را بررسی کردند (Böhm, and H. Schuh, 2003). در سال ۲۰۱۲ نیز ارزیابی بین توابع نگاشت انجام شد که نتایجی در برداشت، از جمله هنگام استفاده از چهار ضریب در بیان ریاضی Marini بهبود کمتری حاصل شد، و تابع نگاشت VMF1 تطبیق بهتری داشت، تابع نگاشت GMF و مدل تجربی GPT2 برای مدل کردن تغییرات مایل ناتوان بودند. وابستگی به عرض جغرافیایی با انتخاب شعاع گوس نیز کمتر شد.

علاوه بر GPS سایر تکنیک‌های ژئودزی فضایی نیز از برآوردهای انجام شده توسط ردیابی اشعه می‌تواند استفاده کنند. نفیسی و همکاران نیز علاوه بر بررسی برخی عناصر (شعاع زمین، رزولوشن مکانی، مدل‌های عددی هواشناسی مختلف، تعداد سطوح فشار و...) یک روش ردیابی اشعه و تأثیر آن بر روی نتایج، نتایج حاصل را در پردازش مشاهدات VLBI مورد استفاده قرار داده‌اند و بهبود حاصل را برحسب تکرارپذیری طول خطوط مبنا و همچنین زمان جهانی برآورد شده مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل نشان‌دهنده بهبود نتایج نسبت به زمانی است که در پردازش‌ها از توابع نگاشت استفاده می‌شود. (Nafisi et al., 2012)

۲- ردیابی اشعه

امروزه ردیابی اشعه در بسیاری از علوم که با انتشار امواج سروکار دارند مورد استفاده دارد. کاربرد اصلی این روش در ژئودزی تعیین تأخیر کلی تروپوسفر در طول مسیر یک سیگنال از فرستنده تا گیرنده است. علاوه بر این اخیراً در بررسی یونسفر نیز کاربردهایی پیدا کرده است. از روش تقریب اپتیک هندسی (Born and Wolf, 1999) می‌توان برای به دست آوردن معادله آیکونال^۱ استفاده کرد، معادله آیکونال برای ایجاد یک سیستم ردیابی اشعه و برای تعیین مسیر اشعه و طول مسیر اپتیکی آن استفاده می‌شود.

برای دستیابی به ردیابی اشعه از ضریب شکست هوای مرطوب می‌توان استفاده کرد. بدین ترتیب که برای یک

باشد، همچنین از چه توابعی استفاده شود بهتر است، زیرا در روش‌های ردیابی اشعه سه بعدی به دلیل حل معادلات دیفرانسیلی جزئی از داده‌های عددی با حجم زیاد استفاده شده و مقدار محاسبات نیز بسیار زیاد خواهد بود و لذا این روش‌ها، روش‌های زمان‌بری هستند.

در چند سال گذشته استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی طرفدارانی پیدا کرده است. KARAT روشی سریع با دقت و محاسبات با سرعت بالا است که از مدل استفاده کرده است (Hobiger et al., 2008). با استفاده از ردیابی اشعه و داده‌های رادیوسوند برای بهبود توابع نگاشت برای مدل کردن تأخیر تروپوسفری و تصحیح آن در ژئودزی فضایی و در VLBI و GPS تحقیقاتی انجام شد که تابع نگاشت NMF ایجاد شد (Niell, 2000). به دنبال آن انجام ردیابی اشعه با استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی (NWMS^۱) انجام شد که حاصل آن تابع نگاشت VMF است که با استفاده از مدل عددی هواشناسی ECMWF بدست آمده است (Böhm, and H. Schuh, 2003). در این تحقیق چگونگی محاسبه خود توابع نگاشت اهمیتی نداشته و از ردیابی اشعه سه بعدی به عنوان معیاری برای ارزیابی آنها استفاده می‌شود.

در طول چند سال گذشته استفاده از روش ردیابی اشعه به عنوان روش مستقیم و مستقل برای تصحیح خطای تروپوسفری استفاده شده است. در نیمه اول سال ۲۰۱۰ زیر نظر کارگروه ژئودزی ۴۳۳ برای مقایسه روش‌ها و نرم افزارهای ردیابی اشعه کمپینی تشکیل شد. کمپین مقایسه جهت ارزیابی و مقایسه تأخیرات تروپوسفر از نرم‌افزار ردیابی اشعه مختلف ۵ گروه (GFZ, HORIZON, KARAT, UNB, VIE) تشکیل داد. با پیشرفت مدل‌های عددی هواشناسی می‌توان چشم‌انداز خوبی را برای مدل کردن تأخیر تروپوسفر و تأخیرات مایل و فاکتورهای مایل انتظار داشت. با تفاوت بین نرم افزارها و مدل‌های مختلف نتایج متفاوت است که بررسی‌های بیشتری را می‌طلبد (Urquhart, Nievinski, Santos, 2013).

^۲- Ikonal

^۱- Numerical Weather Models

بخش اول این معادله به دلیل تغییر در سرعت سیر موج و بخش دوم (تأخیر هندسی) به دلیل منحنی شدن مسیر موج بوجود می‌آیند.

با ترکیب یکسری معادلات به نام ماکسول (Fleisch, 2010)، و ایجاد معادله آیکونال می‌توان این روند را ادامه داد.

برای حل این سیستم ۶ معادله بایستی همزمان حل شوند، خروجی این بخش مختصات نقاط در طول مسیر اشعه است، که در نهایت می‌توان مسیر اشعه را به صورت واقعی بدست آورد. برای جزئیات بیشتر این معادلات می‌توان به رفرنس‌های معرفی شده مراجعه کرد (Cerveny et al, 2001), (Alkhalifah and Fomel, 2001), (Thayer, 1967), (Kravtsov and Orlov, 1990), (Cerveny, 2005), (Wijaya, 2010) (Wheelon, 2001).

در ادامه، به مدل‌های عددی هواشناسی و بعد از آن محاسبه شکست‌پذیری توسط این داده‌ها نیاز داریم. ورودی اصلی سیستم ردیابی اشعه، مجموعه داده‌های عددی هواشناسی است که به صورت شبکه بندی شده ارائه می‌شوند. برای بدست آوردن پارامترهای هواشناسی در نقطه‌ای مورد نظر، از درون‌یابی افقی نیز می‌توان استفاده کرد که روش‌های مختلفی برای آن وجود دارد (Hobiger et al, 2010), (Hobiger et al, 2008).

شعاع انحنای زمین هم در محاسبه تأخیر مایل نقش مهمی دارد. به طور مثال اگر زمین را کره فرض کنیم، می‌توان خطاها را در تأخیر مایل، فقط وابسته به عرض جغرافیایی دانست (Nafisi et al, 2012).

برای انجام محاسبات مربوط به ردیابی اشعه، مدل‌های عددی هواشناسی بر اساس ارتفاع ژئوپتانسیل ارائه می‌شوند و خیلی قابل استفاده نیستند، بنابراین باید به ارتفاع از بیضوی و یا ارتفاع ارتومتریک تبدیل شوند. برای بدست آوردن این ارتفاع‌ها روابطی وجود دارد (Hobiger et al, 2008).

پس از تبدیل ارتفاعی، بایستی درون‌یابی پارامترهای هواشناسی (فشار کلی، دما و فشار بخار آب) انجام شود. تغییرات فشار کلی و فشار بخار آب به صورت غیر خطی هستند و باید به صورت لگاریتمی درون‌یابی شوند، ولی در مورد دما، یک درون‌یابی خطی ساده می‌توان انجام داد

محیط، ضریب شکست n برابر است با نسبت سرعت یک موج الکترومغناطیس در خلاء به سرعت انتشار در این محیط:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

که در این رابطه c سرعت موج در خلاء و v سرعت موج در این محیط است.

به علت کوچک بودن آن از پارامتر دیگری، به اسم شکست‌پذیری (N) استفاده می‌کنیم. برای بدست آوردن N می‌توان نوشت:

$$N = N_h N_{nh} \quad (2)$$

که N_h و N_{nh} نمایانگر بخش هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک است.

هدف از ردیابی اشعه بدست آوردن تأخیر کلی است. این تأخیر عبارت است از اختلاف بین مسیر انتشار یک موج در محیط واقعی (تروپوسفر) و خلاء، که می‌توان گفت مسیر اشعه بین گیرنده و فرستنده در یک خط مستقیم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S = \int_V ds \quad (3)$$

به عبارت دیگر به علت تغییرات در ضریب شکست تروپوسفر مسیر، دیگر مستقیم نخواهد بود و دچار شکست می‌شود، که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L = \int_T n(r, \theta, \lambda, t) ds \quad (4)$$

r فاصله شعاعی، θ عرض جغرافیایی ($0 \leq \theta \leq \pi$)، و λ طول جغرافیایی ($0 \leq \lambda \leq \pi$) می‌باشد. می‌توان با تغییراتی در روابط به جای ضریب شکست با شکست‌پذیری، تأخیر تروپوسفر را با واحد متر به صورت زیر بیان نمود:

$$\Delta\tau = 10^{-6} \int_T N(r, \theta, \lambda, t) ds + \left(\int_T ds - S \right) \quad (5)$$

ندارد که این به دلیل شرایط این بخش و متغیر بودن رطوبت است. جزء دوم در رابطه ۶ تابعی است وابسته به زاویه ارتفاعی که تابع نگاشت نام دارد که معروفترین آن عبارت است از:

$$mf(e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin e + \frac{a}{\sin e + \frac{b}{c}}} \quad (۸)$$

در این روابط a و b و c ضرایبی هستند که باید تعیین شوند و تفاوت در نحوه تعیین آنها باعث تعریف توابع نگاشت مختلف می‌شود. این ضرایب به دو بخش هیدرواستاتیک (a_h) و غیر هیدرواستاتیک (a_w) تقسیم می‌شود (بخش خشک و تر تروپوسفر و با اندیس‌های h (خشک) و w (تر) از هم جدا می‌شوند).

در این مقاله مقایسه بر روی دو تابع نگاشت انجام شده است که در ادامه هر یک به طور مختصر توضیح داده می‌شوند.

۳-۱- تابع نگاشت Vienna

در سال ۲۰۰۰ نیل اولین فردی بود که پیشنهاد داد از مدل‌های عددی هواشناسی که در بازه‌های ۶ ساعته وجود دارد برای تعیین توابع نگاشت استفاده شود و بر این اساس تابع نگاشت IMF^۱ را تعریف کرد. مشخصه این تابع نگاشت برطرف کردن برخی نقاط ضعف تابع نگاشت IMF است. با استفاده از ردیابی اشعه یک بعدی در زاویه ارتفاعی اولیه ۳/۳ درجه تأخیرهای زینتی به همراه تأخیرهای مایل برای این دو مؤلفه بدست می‌آیند که از ترکیب این دو مجموعه توابع نگاشت هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک حاصل می‌شوند. مشابه IMF برای ضرایب b و c از یکسری توابع تجربی استفاده شده است.

از آنجایی که این سه ضریب به هم وابسته هستند، خطاهای کوچک در b و c خطای بزرگ در a را باعث

(Wallace and Hobbs 2006).

از طرف دیگر مدل‌های عددی هواشناسی فقط تا ارتفاع‌های محدود، داده‌ها را در اختیار ما قرار می‌دهند در حالی که در بیشتر موارد بالاتر از این محدوده همچنان تروپوسفر محسوب شده و بنابراین لازم است که داده‌ها برای محاسبات وجود داشته باشند. برای این منظور نیاز به برون‌یابی و یا استفاده از مدل‌های اتمسفر خواهد بود.

برای اجرای ردیابی اشعه علاوه بر برون‌یابی و مدل‌های استاندارد، بیشترین ارتفاعی که می‌توان تروپوسفر را تعریف کرد، در نتایج مورد نظر مؤثر است (Rocken, 2001).

مدل‌های عددی هواشناسی هر ۳ یا ۶ ساعت داده در اختیار کاربر قرار می‌دهند، در حالی که لازم است که در زمان مشاهدات تأخیر کلی محاسبه شود. از این رو به درون‌یابی زمانی نیاز داریم.

۳-۲ توابع نگاشت

در ژئودزی ماهواره‌ای تأخیر تروپوسفری در زاویه ارتفاعی خاص با استفاده از تابع نگاشت محاسبه می‌شود. در این روش تأخیر در راستای زینت از طریق یک تابع در راستای مورد نظر (با زاویه ارتفاعی مشخص) تصویر می‌شود:

$$\Delta z = \Delta z^z . mf(e) \quad (۹)$$

که در این رابطه Δz^z تأخیر در جهت زینت است که معمولاً با استفاده از پارامترهای جوئی اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه محاسبه می‌شود. یک نمونه معروف از این روابط برای بخش هیدرواستاتیک، رابطه (Saastamoinen) است:

$$\Delta z_h^z = (0.00022768 \pm 5 * 10^{-7}) \cdot \frac{P_0}{g(\phi, H)} (m) \quad (۷)$$

P_0 فشار کلی با واحد پاسکال و g هم شتاب ثقل است. برای بخش غیر هیدرواستاتیک روابط با دقت مناسب وجود

^۱- Isometric Mapping Function

می‌کند، نتایج با اعمال این تئوری در بخش نتایج ارائه شده است (Niell et al, 2001). برای این کار از مشاهدات داده‌های هواشناسی شامل فشار هوا، فشار بخار آب، دما و... و تبدیل آنها به ضریب شکست اتمسفر در لایه‌های مختلف اتمسفر و محاسبات تأخیرهای زینتی و در هر زاویه ارتفاعی مورد نظر در این یازده ایستگاه VLBI در سطح کره زمین استفاده شده است:



نگاره ۱: موقعیت ایستگاه‌های فعال در CONT08

۱۲ الی ۲۶ آگوست ۲۰۰۸ مدت زمانی است که از این ایستگاه‌ها و اختلاف‌های سه روش مذکور استفاده شده است. محاسبات با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شده است. در گام اول تأخیر تروپوسفر با تابع نگاشت جهانی GMF محاسبه شد. در این برنامه تاریخ ژولین، عرض ژئودتیک (واحد رادیان)، طول جغرافیایی (واحد رادیان) و ارتفاع (واحد متر) یازده ایستگاه مذکور، و همچنین زاویه زینتی (واحد رادیان) که بایستی تأخیر را در آن محاسبه شود، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. خروجی در این برنامه شامل ضرایب تابع نگاشت جهانی هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک است، که تأخیر در راستای زاویه زینتی و یا زاویه ارتفاعی مورد نظر را نتیجه می‌دهد. برای محاسبه این تابع نگاشت از اطلاعات CONT08 استفاده شده است. این دوره مشاهداتی توسط سرویس بین‌المللی (VLBI IVS) در تابستان ۲۰۰۸ برنامه‌ریزی و مشاهدات در یازده ایستگاه

می‌شود. به همین دلیل ضرایب b و c بهبود داده شده‌اند و در نتیجه a مجدداً باید محاسبه شود. با این توسعه تابع نگاشت $VMF1^1$ تعریف شد که برای زوایای ارتفاعی بالای ۳ درجه می‌توان استفاده کرد. مقادیر ضریب a بصورت یک سری زمانی گسسته با رزولوشن ۶ ساعت در مقیاس جهانی و یا در سایت‌های مشخص محاسبه شده است. اگر بخواهیم از شبکه جهانی استفاده شود تصحیح ارتفاعی را باید اعمال کنیم (Niell, 1996).

۲-۳- تابع نگاشت جهانی (GMF)

این تابع بر اساس مدل‌های عددی هواشناسی بدست آمده است. ضرایب آن از بسط پارامترهای $VMF1$ به هارمونیک‌های کروی بدست می‌آید. مقادیر این ضرایب با مختصات ایستگاه مورد نظر و روز سال تعیین می‌شوند. پارامترهای a , b و c برای عناصر هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک متفاوت هستند. برای تعیین این ضرایب در تابع نگاشت جهانی بایستی یک شبکه جهانی ۱۵ درجه در ۱۵ درجه طراحی شود، و مقادیر به صورت میانگین‌گیری ماهیانه از عناصری همچون دما و رطوبت با استفاده از داده‌هایی که از قبل موجود بوده است و به مدت ۴۰ سال آنالیز شده، تعیین شوند. با استفاده از یکسری معادلات تجربی b و c از $VMF1$ و پارامتر a نیز با یک ردیابی اشعه ساده در زاویه ۳/۳ درجه بدست می‌آیند. (Boehm et al., 2006)

۴- روند مقایسه نتایج حاصل از ردیابی اشعه و توابع نگاشت

هدف این مقاله مقایسه تأخیر تروپوسفر با استفاده از توابع نگاشت VMF و GMF با ردیابی اشعه سه بعدی می‌باشد، از آنجایی که خطا در تأخیر هیدرواستاتیک زینتی و یا توابع نگاشت در ارتفاع ایستگاه اثر دارد، با استفاده از قانون کلی که یک پنجم تأخیر در تروپوسفر باعث خطا در ارتفاع ایستگاه می‌شود، به عنوان مثال اگر تأخیر تروپوسفر ۵ میلی‌متر باشد، ۱ میلی‌متر در ارتفاع ایستگاه خطا ایجاد

¹- Vienna Mapping Function 1

شایان ذکر است که اطلاعات در محدوده ۹۰- الی ۹۰ درجه عرض جغرافیایی و به فواصل دو درجه و طول جغرافیایی در محدوده ۰ الی ۳۶۰ درجه و به فواصل دو و نیم درجه ارائه می‌شوند. این اطلاعات در هر شش ساعت وجود دارند ولی بدیهی است که مشاهدات لزوماً در این ساعات انجام نمی‌شود و بنابراین بایستی درون یابی انجام شود. با همین استدلال درونیابی مکانی نیز با توجه به موقعیت ایستگاه‌ها باید انجام شود. با داشتن این اطلاعات تابع نگاشت VMF هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک و در نهایت تأخیر کلی حاصل می‌شود. برای هر یازده ایستگاه این دو تابع نگاشت در مدت زمان گفته شده محاسبه و اختلاف‌های آنها با ردیابی اشعه سه بعدی بدست آمده است. نتایج در نمودارهایی که اختلاف‌های تأخیر دو تابع نگاشت VMF و GMF با ردیابی اشعه سه بعدی نسبت به زاویه ارتفاعی است، نشان داده شده و محاسبات این اختلاف‌ها در این ۱۱ ایستگاه، در سال ۲۰۱۱ و برای دوره مشاهداتی CONT11 نیز انجام شده است.

در نمودارها اختلافات ردیابی اشعه سه بعدی با دو تابع نگاشت VMF و GMF نسبت به زاویه ارتفاعی بررسی شده است. برای این منظور مشاهدات برای زاویه ارتفاعی در بازه‌های ۵ درجه‌ای و در هر بازه نیز میانگین اختلافات ردیابی اشعه سه بعدی با دو تابع نگاشت، محاسبه شده است. در نمایش نمودارها برای بهتر نشان دادن رفتار مشاهدات اختلافات به صورت قدر مطلق ارائه شده است. در ادامه به عنوان نمونه از نمودارهای ۱۱ ایستگاه، یک ایستگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

در این دو نمودار محور افقی زاویه ارتفاعی و محور قائم اختلاف ردیابی اشعه با دو تابع نگاشت است. نقاطی که به رنگ قرمز هستند نشان دهنده اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت VMF و نقاطی که به رنگ آبی هستند نشان دهنده اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت GMF می‌باشد. در این نمودار ۳۴ نقطه نمایش داده شده که ۱۷ نقطه مربوط به اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی

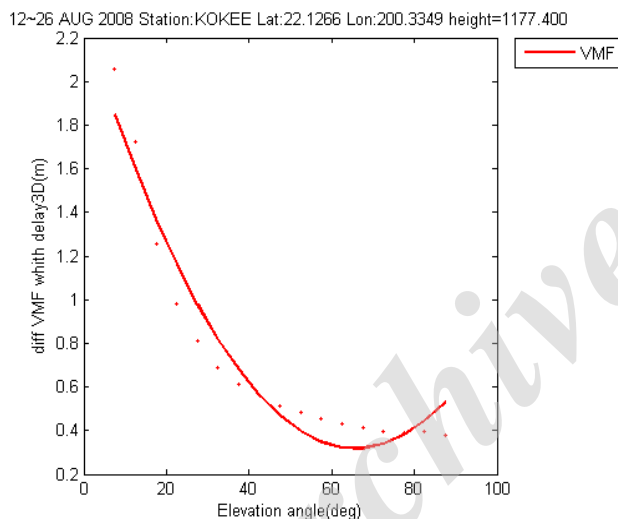
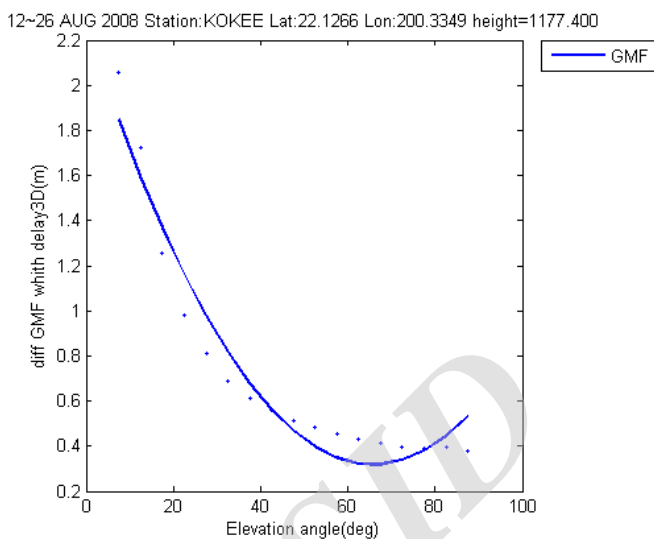
انجام شده است. این اطلاعات شامل فشار، دما، و تأخیر سه بعدی، زاویه ارتفاعی و همچنین آزیموت می‌باشد. با استفاده از موقعیت ایستگاه‌ها و تاریخ ژولین و همچنین زاویه ارتفاعی برای تاریخ مذکور، این تابع نگاشت برای ۱۱ ایستگاه محاسبه شده است. داده‌های موجود در این اطلاعات در ساعات و ثانیه‌های مختلفی مشاهده شده است. در ادامه پس از محاسبه دو ضریب تابع نگاشت هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک برای تابع نگاشت جهانی برای همین ۱۱ ایستگاه و در مدت زمان مشابه تابع نگاشت VMF نیز محاسبه شد. برای محاسبه این تابع نگاشت به اطلاعات بیشتری از اطلاعات ورودی تابع نگاشت GMF نیاز است. ورودی‌های تابع VMF عبارت است از: ضریب هیدرواستاتیک (a_h) و ضریب غیر هیدرواستاتیک (a_w) (این دو ضریب همان ضریب a است ولی به دو بخش خشک و تر مجزا شده است، زیرا روش محاسباتی آنها با هم فرق دارد)، تاریخ ژولین، عرض ژئودتیک (واحد رادیان)، طول جغرافیایی (واحد رادیان)، ارتفاع (واحد رادیان) و زاویه زینتی (واحد رادیان). خروجی در این برنامه نیز شامل ضرایب تابع نگاشت VMF هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک است.

برای وارد کردن ورودی‌ها تمام اطلاعات قابل دسترسی هستند ولی ضریب هیدرواستاتیک (a_h) و غیر هیدرواستاتیک (a_w) را بایستی از داده‌های عددی هواشناسی بدست آورد برای این قسمت از سایت (<http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/>) استفاده و اطلاعات مورد نیاز استخراج شد. اطلاعات در این سایت برای هر روز ۴ مجموعه در ساعات ۰ الی ۲۴ یعنی هر ۶ ساعت وجود دارد. این اطلاعات شامل عرض و طول جغرافیایی، ضریب هیدرواستاتیک (a_h) و ضریب غیر هیدرواستاتیک (a_w)، تأخیر زینتی هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک (zwd^1, zhd^1) می‌باشد، این دو تأخیر همان تأخیر تروپوسفر در راستای زینت و در دو بخش خشک و تر (هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک) تعریف می‌شود.

¹-Zenith hydrostatic delay

²- Zenith wet delay

نگاره ۲: ایستگاه KOKEE در بازه زمانی ۱۲ الی ۲۶ آگوست سال ۲۰۰۸ میلادی، اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با توابع نگاشت GMF نسبت به زاویه ارتفاعی



نگاره ۳: ایستگاه KOKEE در بازه زمانی ۱۲ الی ۲۶ آگوست سال ۲۰۰۸ میلادی، اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با توابع نگاشت VMF نسبت به زاویه ارتفاعی

۱۲/۵ یعنی میانگین دو عدد ۱۰ و ۱۵ درجه می باشد. به همین ترتیب مؤلفه افقی با عددهای ۱۷/۵ و ۲۲/۵ و ... و مؤلفه قائم با میانگین اختلافات ردیابی اشعه سه بعدی در همان بازه با دو تابع نگاشت نشان داده شده است.

برای فهم بهتر و مشخص شدن رفتار مشاهدات انجام شده دو منحنی درجه ۲ به رنگ های قرمز و آبی که به ترتیب منحنی های برازش داده شده به اختلافات ردیابی اشعه با تابع نگاشت VMF و GMF هستند رسم شده است. در این نمودار، همان طور که مشخص است این اختلافات با ردیابی اشعه سه بعدی در حدود ۲ متر است، و می توان گفت اختلاف بالایی است، که در ادامه با بررسی مقدار رطوبت

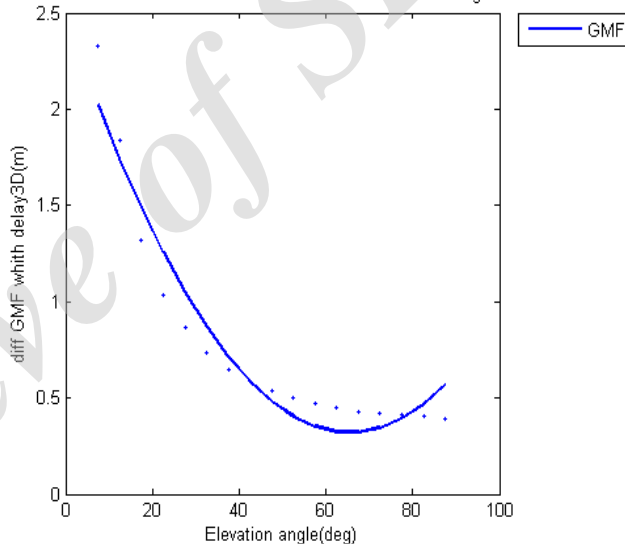
با تابع نگاشت VMF و ۱۷ نقطه دیگر مربوط به اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت GMF است. هر کدام از این ۳۴ نقطه میانگین اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با دو تابع نگاشت مذکور در بازه معینی است. به طور مثال در بازه اول یعنی ۵ الی ۱۰ درجه زاویه ارتفاعی ۵۷ مشاهده وجود دارد و میانگین اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت VMF، ۲/۰۵۷- متر و میانگین اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت GMF، ۲/۰۵۹- متر می باشد، که به عنوان مؤلفه قائم نمایش داده شده و همچنین عدد ۷/۵ به عنوان مؤلفه افقی که میانگین ۵ و ۱۰ درجه یا همان بازه اول در نمودار آمده است. در بازه دوم نیز مؤلفه افقی عدد

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)
 ارزیابی توابع نگاشت با استفاده از ... / ۱۵

ندارند، بلکه یک پنجم آن برابر با ایجاد خطا در ارتفاع ایستگاه‌های مورد استفاده است. برای یافتن نتایج، ابتدا ۳ بازه دقت که عبارتند از: ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر، برای بدست آمدن ارتفاع ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت. سپس مشخص شده است که در هر کدام از این بازه‌های دقت، در کدام زوایای ارتفاعی نیاز به ردیابی اشعه سه بعدی دارد، و در کدام زوایای ارتفاعی می‌توان از توابع نگاشت به جای ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد. طبق جدول شماره ۱ برای سال ۲۰۰۸ نتایج بدین صورت است:

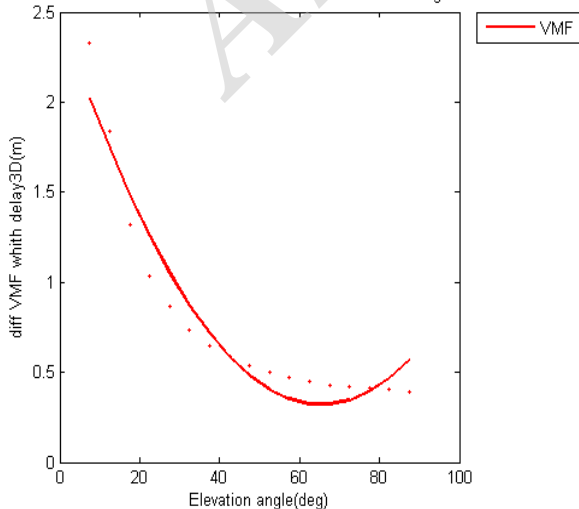
این ایستگاه می‌توان نتایج را بدست آورد. همچنین با زیاد شدن زاویه ارتفاعی، به طور مثال در بازه ۸۵ الی ۹۰ درجه زاویه ارتفاعی با فراوانی مشاهده ۱۹ این اختلافات به حدود ۴۰ سانتی متر می‌رسد، که می‌توان به این نتیجه رسید که با زیاد شدن زاویه ارتفاعی این اختلافات کاهش پیدا می‌کند. در ادامه به عنوان نمونه مشاهدات ایستگاه KOKEE در سال ۲۰۱۱ را در نمودار مربوطه (نگاره ۴) مشاهده می‌کنیم: پس از بررسی نمودارها نتایج بدست می‌آید. در ابتدا بایستی یک پنجم این اختلافات را تحلیل و بررسی کرد، چرا که این اختلافات مستقیماً در ارتفاع ایستگاه تأثیر

15~29 SEP 2011 Station:KOKEE Lat:22.1266 Lon:200.3349 height=1177.400



نگاره ۴: ایستگاه KOKEE در بازه زمانی ۱۵ الی ۲۹ سپتامبر سال ۲۰۱۱ میلادی، اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با توابع نگاشت GMF نسبت به زاویه ارتفاعی

15~29 SEP 2011 Station:KOKEE Lat:22.1266 Lon:200.3349 height=1177.400



نگاره ۵: ایستگاه KOKEE در بازه زمانی ۱۵ الی ۲۹ سپتامبر سال ۲۰۱۱ میلادی، اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با توابع نگاشت VMF نسبت به زاویه ارتفاعی

دقت ارتفاعی کمتر از ۱۰ میلی متر بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد. همچنین برای بدست آوردن دقت ارتفاعی کمتر از ۳۰ میلی متر بایستی تا زوایای ارتفاعی تقریباً ۲۲ درجه از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد. برای سال ۲۰۱۱ نیز جدول مشابهی محاسبه شده است (جدول شماره ۲).

جدول ۲: زوایایی که نیاز به ردیابی اشعه دارند، بر اساس

دقت ارتفاعی (سال ۲۰۱۱)

نام ایستگاه	mm 10>	mm 20>	mm 30>
HARTRAO	50>
KOKEE	0<	0<	0<
MEDICINA	NON	NON	NON
NYALES20	30>
ONSALA60	0<	35>	25>
TIGOCONC	0<	35>	20>
TSUKUB32	0<	40>	25>
WESTFORD	0<	40>	35>
WETTZELL	50>
ZELENCHK	0<	35>	10>
SVETLOE	NON	NON	NON

طبق جدول ۲، چند ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. در ایستگاه HARTRAO برای بدست آوردن دقت ارتفاعی کمتر از ۱۰ میلی متر بایستی در زوایای ارتفاعی کمتر از ۵۰ درجه و برای دقت ارتفاعی کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی متر نیازی به ردیابی اشعه سه بعدی نیست و می توان از توابع نگاشت استفاده کرد. همچنین در ایستگاه KOKEE که دارای بیشترین رطوبت نیز می باشد در هر سه بازه دقت بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد، و امکان استفاده از توابع نگاشت وجود ندارد. در ایستگاه ZELENCHK برای بازه های دقت کمتر از ۱۰ میلی متر بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۲۰ میلی متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۱۵ درجه از ردیابی اشعه استفاده کرد، و برای بازه های دقت کمتر از ۱۰ میلی متر بایستی در زوایای ارتفاعی کمتر از ۳۰ میلی متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۲۰ میلی متر ارتفاعی استفاده کرد، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۳۰ میلی متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۳۵

جدول ۱: زوایایی که نیاز به ردیابی اشعه دارند، بر اساس

دقت ارتفاعی (سال ۲۰۰۸)

نام ایستگاه	mm 10>	mm 20>	mm 30>
HARTRAO	0<	30>	...
KOKEE	0<	0<	0<
MEDICINA	0<	0<	0<
NYALES20	0<	45>	30>
ONSALA60	35>	5>	10>
TIGOCONC	0<	55>	35>
TSUKUB32	0<	45>	30>
WESTFORD	0<	40>	25>
WETTZELL	0<	30>	...
ZELENCHK	0<	0<	45>
SVETLOE	15>	10>	...

طبق جدول ۱، به عنوان نمونه می توان گفت، در ایستگاه HARTRAO برای بدست آوردن دقت ارتفاعی کمتر از ۱۰ میلی متر بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی و برای دقت ارتفاعی کمتر از ۲۰ میلی متر فقط در زوایای ارتفاعی کمتر از ۳۰ درجه از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد. همچنین در ایستگاه KOKEE که دارای بیشترین رطوبت نیز می باشد در هر سه بازه دقت بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد، و امکان استفاده از توابع نگاشت وجود ندارد. در ایستگاه ZELENCHK برای بازه های دقت کمتر از ۱۰ و ۲۰ میلی متر بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی از ردیابی اشعه استفاده کرد، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۳۰ میلی متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۴۵ درجه می باشد. در ایستگاه SVETLOE برای بازه های دقت کمتر از ۱۰ میلی متر بایستی در زوایای ارتفاعی کمتر از ۱۵ درجه از ردیابی اشعه استفاده کرد، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۲۰ میلی متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۱۰ درجه، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۳۰ میلی متر ارتفاعی نیاز به ردیابی اشعه نیست و می توان از توابع نگاشت استفاده کرد. به طور کلی می توان فهمید که تقریباً برای بدست آوردن

طبق جدول ۳، برای سال ۲۰۰۸ در ایستگاه ONSALA60 برای بدست آوردن دقت ارتفاعی در تمامی بازه‌ها بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. همچنین در ایستگاه TIGOCONC در بازه کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر دقت بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. در ایستگاه ZELENCHK برای بازه‌های دقت کمتر از ۳۰ میلی‌متر بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. در ایستگاه SVETLOE برای هر سه بازه دقت بایستی از تابع نگاشت VMF استفاده کرد. در ایستگاه HARTRAO نیز برای بازه دقت کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. به طور کلی می‌توان فهمید که تقریباً تابع نگاشت GMF نتایج بهتری را بدست آورده است.

جدول ۴: اولویت استفاده از توابع نگاشت، بر اساس دقت ارتفاعی (سال ۲۰۱۱)

نام ایستگاه	mm 10>	mm 20>	mm 30>
HARTRAO	GMF	GMF	GMF
KOKEE	Ray Tracing	Ray Tracing	Ray Tracing
MEDICINA	NON	NON	NON
NYALES20	VMF	VMF	VMF
ONSALA60	Ray Tracing	GMF	GMF
TIGOCONC	Ray Tracing	VMF	VMF
TSUKUB32	Ray Tracing	VMF	VMF
WESTFORD	Ray Tracing	VMF	VMF
WETTZELL	GMF	GMF	GMF
ZELENCHK	Ray Tracing	VMF	VMF
SVETLOE	NON	NON	NON

طبق جدول ۴، برای سال ۲۰۱۱ در ایستگاه ONSALA60 برای بدست آوردن دقت ارتفاعی در بازه کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر، بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. همچنین در ایستگاه TIGOCONC در بازه کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر دقت بایستی از تابع نگاشت VMF استفاده کرد. در ایستگاه ZELENCHK برای بازه‌های دقت کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بایستی از تابع نگاشت VMF استفاده کرد.

درجه، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۳۰ میلی‌متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۱۰ درجه می‌باشد. در ایستگاه TSUKUB32 برای بازه‌های دقت کمتر از ۱۰ میلی‌متر بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی از ردیابی اشعه استفاده کرد، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۲۰ میلی‌متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۴۰ درجه، و برای دست یابی به دقت کمتر از ۳۰ میلی‌متر ارتفاعی فقط نیاز به ردیابی اشعه در زوایای کمتر از ۳۵ درجه است. به طور کلی می‌توان فهمید که تقریباً برای بدست آوردن دقت ارتفاعی کمتر از ۱۰ میلی‌متر بایستی در تمامی زوایای ارتفاعی به غیر از چند ایستگاه، از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد. همچنین برای بدست آوردن دقت ارتفاعی کمتر از ۳۰ میلی‌متر تا زوایای ارتفاعی تقریباً ۲۰ درجه از ردیابی اشعه سه بعدی استفاده کرد. پس از مشخص شدن این مرحله که در چه زوایای ارتفاعی بایستی از توابع نگاشت استفاده کرد، می‌بایست معلوم شود که از کدام تابع نگاشت استفاده کرد، تا نتایج قابل قبولی بدست آید. برای این منظور محاسباتی انجام شده است که در دو جدول ۳ و ۴ برای دو سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱ ارائه شده است.

جدول ۳: اولویت استفاده از توابع نگاشت، بر اساس دقت ارتفاعی (سال ۲۰۰۸)

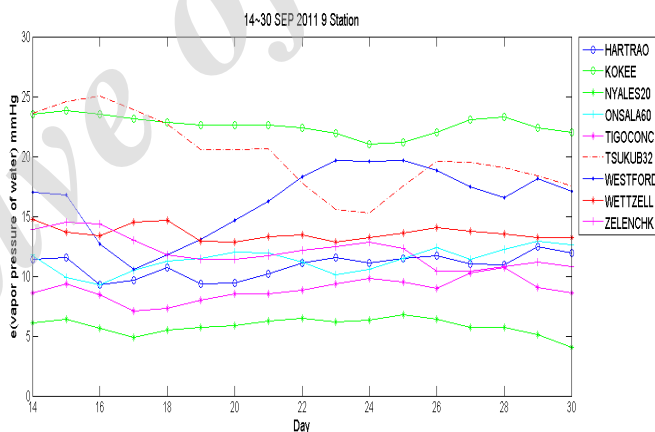
نام ایستگاه	mm 10>	mm 20>	mm 30>
HARTRAO	Ray Tracing	GMF	GMF
KOKEE	Ray Tracing	Ray Tracing	Ray Tracing
MEDICINA	Ray Tracing	Ray Tracing	Ray Tracing
NYALES20	Ray Tracing	GMF	GMF
ONSALA60	GMF	GMF	GMF
TIGOCONC	Ray Tracing	GMF	GMF
TSUKUB32	Ray Tracing	GMF	GMF
WESTFORD	Ray Tracing	GMF	GMF
WETTZELL	Ray Tracing	GMF	GMF
ZELENCHK	Ray Tracing	Ray Tracing	GMF
SVETLOE	VMF	VMF	VMF

در ایستگاه NYALES20 برای هر سه بازه دقت بایستی از تابع نگاشت VMF استفاده کرد. در ایستگاه HARTRAO نیز برای هر سه بازه دقت بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. همچنین در ایستگاه WETTZELL نیز برای هر سه بازه دقت بایستی از تابع نگاشت GMF استفاده کرد. در ایستگاه WESTFORD برای بازه‌های دقت کمتر از ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بایستی از تابع نگاشت VMF استفاده کرد. به طور کلی می‌توان فهمید که تقریباً تابع نگاشت VMF نتایج بهتری را بدست آورده است.

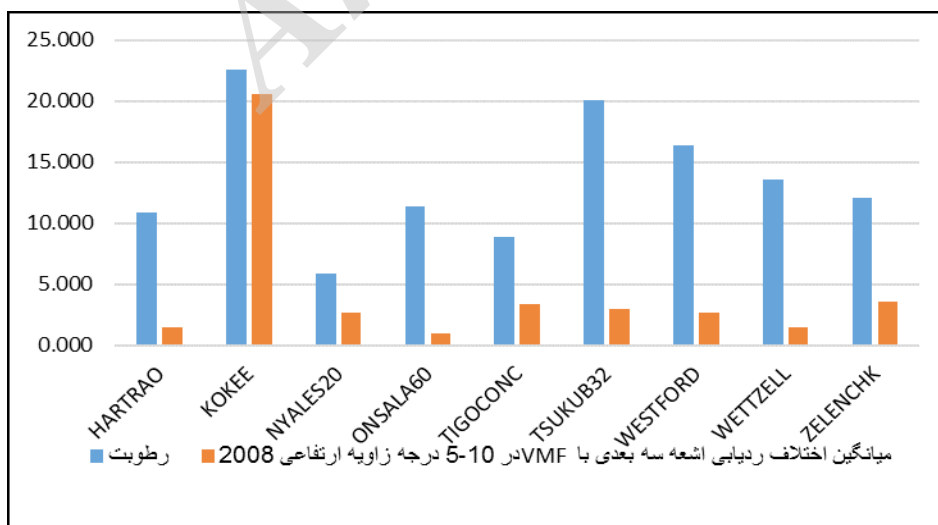
با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان با داشتن میزان رطوبت هر ایستگاه رفتار مشاهدات را بهتر مورد بررسی قرار داد. برای این کار در بازه زمانی ۱۴ الی ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۱ میزان رطوبت محاسبه شده، و به صورت یک نمودار

نشان داده شده است. در نمودار مربوطه (نگاره ۶) مشخص است که ایستگاه KOKEE بیشترین رطوبت یعنی در حدود ۲۳ الی ۲۴ میلی‌متر جیوه، و در مقابل ایستگاه NYALES20 دارای کمترین رطوبت یعنی در حدود ۶ میلی‌متر جیوه است. ایستگاه TSUKUB32 نیز رطوبت بالایی دارد. بقیه ایستگاه‌ها تقریباً فواصل کمتری نسبت به هم دارند.

با توجه به اینکه رطوبت، نقش مهمی در این نتایج دارد، ۴ نمودار دیگر در ادامه ترسیم شده است. با تحلیل این نمودارها و نمودارهای نشان داده شده می‌توان نتایج بهتری گرفت. در نمودار شماره ۱ میانگین اختلافات ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت VMF در بازه ۵ الی ۱۰ درجه زاویه ارتفاعی، که بیشترین اختلافات را در این بازه داریم، و

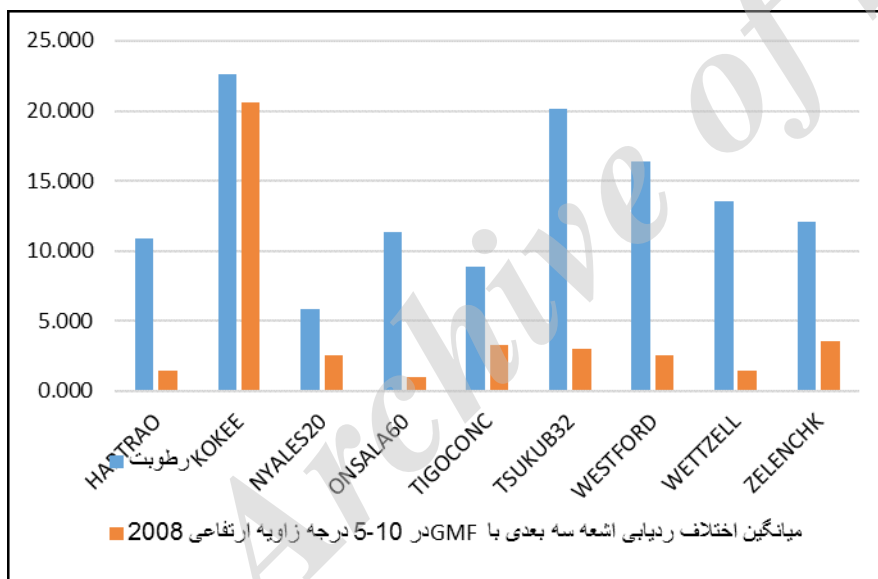
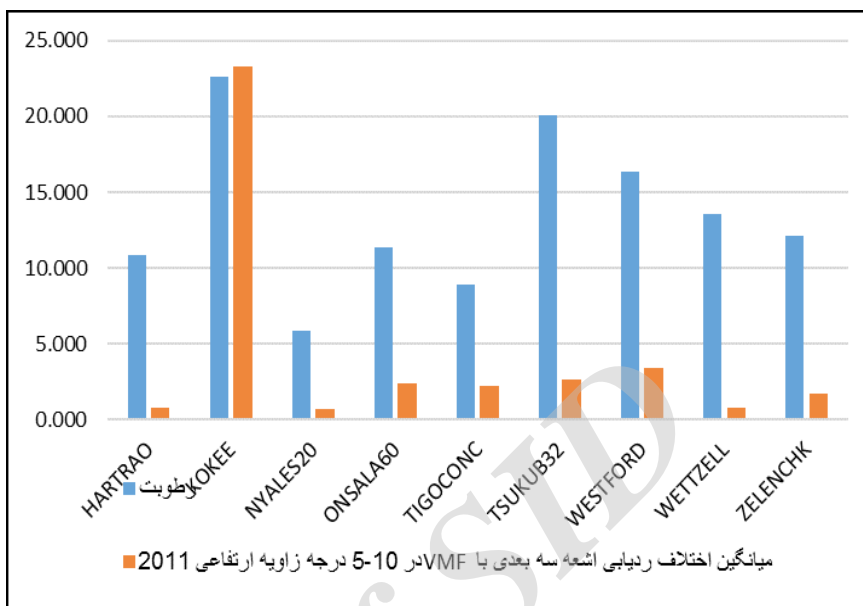


نگاره ۶: نمایش میزان رطوبت ایستگاه‌های مورد استفاده



نمودار ۱: میانگین اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی در بازه ۵ الی ۱۰ درجه زاویه ارتفاعی (۱۰ برابر شده) با تابع نگاشت VMF در سال ۲۰۰۸ نسبت به میزان رطوبت

نمودار ۲: میانگین اختلاف ردیابی
 اشعه سه بعدی در بازه ۵ الی ۱۰
 درجه زاویه ارتفاعی (۱۰ برابر شده)
 با تابع نگاشت VMF در سال ۲۰۱۱
 نسبت به میزان رطوبت



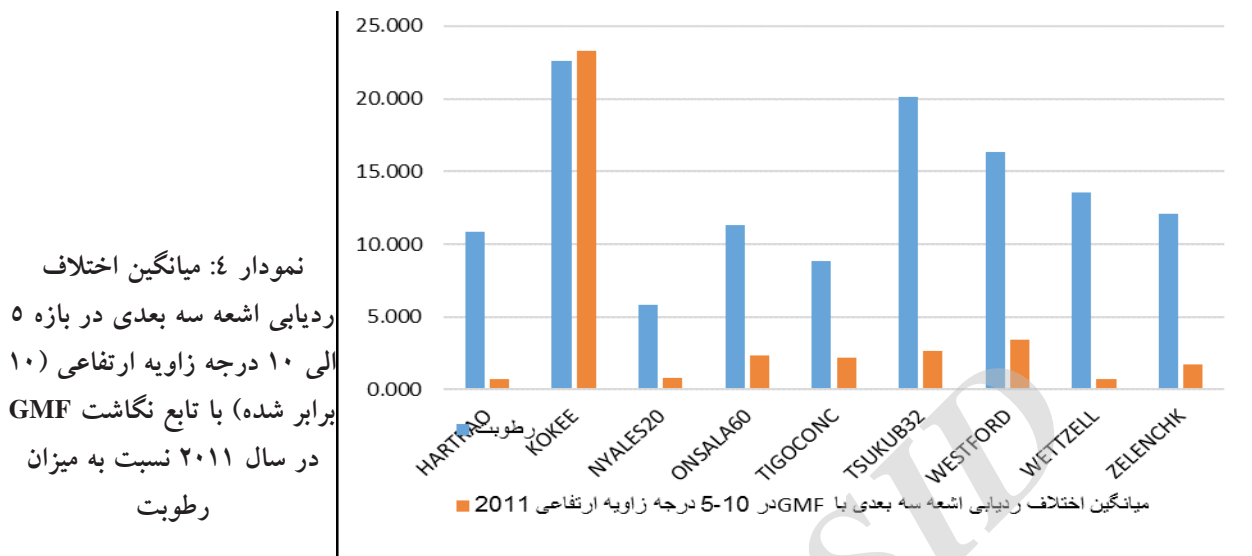
نمودار ۳: میانگین اختلاف ردیابی
 اشعه سه بعدی در بازه ۵ الی ۱۰
 درجه زاویه ارتفاعی (۱۰ برابر شده)
 با تابع نگاشت GMF در سال ۲۰۰۸
 نسبت به میزان رطوبت

نمایش بهتر، در این نمودار نیز اختلافات ۱۰ برابر شده است. در این نمودار، مانند نمودار قبلی می‌توان فهمید ایستگاه KOKEE که دارای بیشترین اختلافات است، دارای بیشترین رطوبت نیز می‌باشد. و ایستگاه‌هایی مانند NYALES20 و TIGOCONC که اختلافات کمتری دارند، دارای رطوبت کمتری نیز می‌باشند.

دو نمودار بعدی، (نمودارهای شماره ۳ و ۴) میانگین اختلافات ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت GMF در بازه ۵ الی ۱۰ درجه زاویه ارتفاعی و در سال ۲۰۱۱ و

در سال ۲۰۰۸ با میزان رطوبت سنجیده و برای نمایش بهتر اختلافات ۱۰ برابر شده است. در این نمودار می‌توان فهمید ایستگاه KOKEE که دارای بیشترین اختلافات است، دارای بیشترین رطوبت نیز می‌باشد. و ایستگاه‌هایی مانند NYALES20 که اختلافات کمتری دارند، دارای رطوبت کمتری نیز می‌باشند.

در نمودار شماره ۲ میانگین اختلافات ردیابی اشعه سه بعدی با تابع نگاشت VMF در بازه ۵ الی ۱۰ درجه زاویه ارتفاعی و در سال ۲۰۱۱ با میزان رطوبت سنجیده و برای



۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله مقایسه‌ای انجام شده است بین نتایج حاصل از ردیابی اشعه به عنوان یک روش برآورد مستقیم تأخیر تروپوسفری، با دو تابع نگاشت مطرح که بطور معمول در محاسبات ژئودزی فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نقطه ضعف این توابع نگاشت فرض تقارن آزیموتی برای اتمسفر است که صحیح نیست و برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر باید به طریقی این کمبود جبران شود. رفتار مشاهدات انجام شده نسبت به تغییرات زاویه آزیموتی نامنظم است، بدین جهت که در بعضی ایستگاه‌ها در زاویه‌های آزیموتی میانی کمترین اختلاف ردیابی اشعه سه بعدی با توابع نگاشت را دارد، و در بعضی دیگر بیشترین اختلاف را داراست. شاید با مشاهدات بیشتر در ایستگاه‌های مختلف بتوان به نتایج بهتری رسید. بررسی نتایج بدست آمده از دو دوره مشاهداتی VLBI در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱، نشان می‌دهد که تلفیقی از ردیابی اشعه و توابع نگاشت می‌تواند به نتیجه‌ای بهینه منتهی شود. باید به این نکته توجه داشت که روش ردیابی اشعه نسبت به روش استفاده از توابع نگاشت زمان بیشتری برای محاسبه نیاز دارد. این تحقیق با در نظر گرفتن ایستگاه‌های بیشتر و متراکم‌تر، شرایط آب و هوایی متنوع‌تر و توزیع روزهای مشاهداتی در فصول مختلف سال نتایج کامل‌تری ارائه دهد. همچنین توابع نگاشت متنوع‌تری می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند.

۲۰۰۸ با میزان رطوبت سنجیده شده است، که نتایج مشابهی را نشان می‌دهد:

با توجه به نمودارها و اشکال بدست آمده می‌توان نتایج را به صورت زیر جمع بندی کرد:

- ایستگاهی که طبق نمودار رطوبت، دارای بیشترین رطوبت است (KOKEE) در همه بازه‌های دقت نیاز به ردیابی اشعه دارد و از توابع نگاشت نمی‌توان استفاده کرد.
- برای رسیدن به دقت بهتر از 10mm در ارتفاع ایستگاه بایستی تقریباً در تمام زوایای ارتفاعی ردیابی اشعه استفاده شود.
- برای رسیدن به دقت بهتر از 20mm در ارتفاع ایستگاه بایستی تقریباً در زوایای ارتفاعی ۰ الی ۳۵ درجه ردیابی اشعه استفاده شود، و برای بقیه زوایا می‌توان از توابع نگاشت استفاده کرد.
- برای رسیدن به دقت بهتر از 30mm در ارتفاع ایستگاه بایستی تقریباً در زوایای ارتفاعی ۰ الی ۲۶ درجه ردیابی اشعه استفاده شود، و برای بقیه زوایا می‌توان از توابع نگاشت استفاده کرد.
- در زوایایی که نیاز به ردیابی اشعه نیست و از توابع نگاشت استفاده می‌شود می‌توان گفت که در سال ۲۰۰۸ مجموعاً تابع نگاشت GMF دقتی بهتر از VMF را بدست آورده، و این در حالی است که در سال ۲۰۱۱، تابع نگاشت VMF بهتر از GMF بوده است.

positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*

12- Hobiger ,T., Ichikawa , R., Koyama, Y., and Kondo ,T., "Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, p. D20302, 2008, DOI: 10.1029/2008JD010503.

13- Hobiger ,T., Ichikawa , R., Koyama, Y., and Kondo ,T., "Computation of troposphere slant delays on a GPU," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 10, pp. 3313–3318, Oct. 2009, DOI: 10.1109/TGRS.2009.2022168.

14- Hobiger ,T., Ichikawa , R., Koyama, Y., and Kondo ,T., "Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, p. D20302, 2008, DOI: 10.1029/2008JD010503.

15- Haselgrove ,J., "Ray theory and a new method of ray tracing, physics in the ionosphere," in *Proc. Phys. Soc.*, London, U.K., 1955, pp. 355–364.

16- Kleijer, F. (2004), Tropospheric modeling and filtering for precise GPS leveling, PhD thesis, 262 pp., TU Delft, Delft, Netherlands. [Available at http://enterprise.lir.tudelft.nl/publications/files/ae_kleijer_20040413.pdf].

17- Kravtsov, Y. A., and Y. I. Orlov (1990), *Geometrical Optics of Inhomogeneous Media*, Springer, Berlin.

18- Kravtsov ,Y. A., *Geometrical Optics in Engineering Physics*. Harrow, U.K.: Alpha Science, 2005, p. 355.

19- MacMillan, D. S., and C. Ma (1994), Evaluation of very long baseline interferometry atmospheric modeling improvements, *J. Geophys. Res.*

20- Mendes,V. B., "Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques," Ph.D. dissertation, Dept. Geodesy Geomatics Eng., Univ. New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, 1999, Tech. Rep. 199, pp. 349.

21- Nafisi, V., M. Madzak, J. Böhm, A. A. Ardalan, and H. Schuh (2012), Ray-traced tropospheric delays in VLB analysis, *Radio Sci.*, 47, RS2020, doi:10.1029/2011RS004918.

22- Niell, A. E., A. J. Coster, F. S. Solheim, V. B.

منابع و مأخذ

1- Alkhalifah, T., and S. Fomel (2001), Implementing the fast marching Eikonal solver: Spherical versus Cartesian coordinates, *Geophys. Prospect.*, 49,165–178, doi:10.1046/j.1365-2478.2001.00245.x

2- Böhm, J., B. Werl, and H. Schuh (2006a), Tropospheric mapping function for GPS and very long baseline interferometry from European Center for Medium-range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.

3- Böhm, J., and H. Schuh (2003), Vienna mapping functions, in *Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, pp. 131–143, Verlag des Bundesamtes für Kartogr. und Geod., Frankfurt, Germany

4- Born ,M. and Wolf ,E., *Principles of Optics*, 7th ed. New York: Cambridge Univ. Press, 1999, p. 952.

5- Cerveny ,V., *Seismic Ray Theory*. New York: Cambridge Univ. Press, 2005, p. 713.

6- Cerveny, V., L. Klimes, and I. Psencik (1988), Complete seismic-ray tracing in three-dimensional structures, in *Seismological Algorithms*, edited by D. J. Doornbos, pp. 89–168, Academic, San Diego, Calif.

7- COESA, U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office NOAA-S/T 76-1562, U.S. Committee Extension Standard Atmosphere (COESA), Nat. Ocean. Atmos. Admin., Nat. Aeronautics Space Admin., U.S. Air Force, Washington, DC, p. 227, Oct. 1976. [Online]

8- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length," *Radio Sci.*, vol. 20, no. 6, pp. 1593–1607, 1985.

9- Fleisch, D. (2010), *A Student's Guide to Maxwell's Equations*, 134 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.

10- Haselgrove ,J., "Ray theory and a new method of ray tracing, physics in the ionosphere," in *Proc. Phys. Soc.*, London, U.K., 1955, pp. 355–364.

11- Hobiger, T., S. Shimada, S. Shimizu, R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo (2010), Improving GPS

Sci., 1(2), 249–252.

33- Urquhart, L. (2011), Assessment of tropospheric slant factor models: Comparison with three dimensional ray-tracing and impact on geodetic positioning, MScE thesis, 190 pp., Dep. of Geod. and Geomatics Eng., Univ. of N. B., Fredericton, N. B., Canada. [Available at <http://gge.unb.ca/Pubs/TR275.pdf>].

34- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs (2006), Atmospheric Science: An Introductory Survey, 2nd ed., 483 pp., Academic, San Diego, Calif.

35- Wheelon, A. D., Electromagnetic Scintillation: Geometrical Optics. New York: Cambridge Univ. Press, 2001, p. 455.

36- Wheelon, A. D. (2001), Electromagnetic Scintillation, vol. 1, Geometrical Optics, 455 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.

37- Wijaya, D. D. (2010), Atmospheric correction formulae for space geodetic techniques, PhD thesis, 163 pp., Inst. of Eng., Geod. and Measur. Syst., Graz Univ. of Technol., Graz, Austria.

Mendes, P. C. Toor, R. B. Langley, and C. A. Upham (2001), Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI, J. Atmos. Oceanic Technol., 18, 830–850.

23- Niell, A. E. (2000), “Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS”, Earth Planets Space, 52, 699–702.

24- Niell AE (1996) Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. J Geophys Res 101:3227–3246. doi:10.1029/95JB03048

25- Nilsson, T. (2008), Measuring and modeling variations in the distribution of atmospheric water vapour using GPS, PhD thesis, Dep. of Radio and Space Sci., Chalmers Univ. of Technol., Gothenburg, Sweden.

26- Nievinski, F. G., “Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS,” M.Sc.E. thesis, Dept. Geodesy Geomatics Eng., Univ. New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, 2009, Tech. Rep. 262, pp. 232.

27- Pany, T. K., “Development and application of tropospheric GPS slant delay models based on numerical weather prediction models and turbulence theory,” Ph.D. dissertation, Inst. Eng. Geodesy Meas. Syst., Graz Univ. Technol., Graz, Austria, 2002, pp. 190.

28- Rocken, C., Sokolovskiy, S., Johnson, M., and Hunt, D., “Improved mapping of tropospheric delays,” J. Atmos. Ocean. Technol., vol. 18, no. 7, pp. 1205–1213, Jul. 2001.

29- Saastamoinen, J., “Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites,” in The Use of Artificial Satellites for Geodesy, vol. 15, Geophysical Monograph Series, S.W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, Eds. Washington, DC: AGU, 1972, pp. 247–251.

30- Smith and S, E. K.. Weintraub, “The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies,” J. Res. Natl. Bur. Stand., vol. 50, pp. 39–41, 1953.

31- Thayer, G. (1974), An improved equation for the refractive index of air, Radio Sci., 9(10), 803–807, doi:10.1029/RS009i010p00803.

32- Thayer, G. D. (1967), A rapid and accurate ray tracing algorithm for a horizontally stratified atmosphere, Radio