

مدل‌سازی توموگرافیک بخار آب و انکسارپذیری تر با استفاده از امواج GPS

زهره اداوی^{*}، مسعود مشهدی حسینعلی^۲

۱- دانشجوی دکتری ژئودزی- دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ وصول مقاله: ۹۴/۰۲/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۰۶/۰۷

چکیده

امروزه یکی از مهم‌ترین کاربردهای سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS مدل‌سازی توموگرافی پارامترهای موثر در هواشناسی می‌باشد چرا که می‌توان با کمترین هزینه و بالاترین رزولوشن مکانی و زمانی شبکه‌هایی محلی برای پایش دائمی آب و هوا ایجاد نمود و علاوه بر آن دقت تعیین موقعیت را نیز افزایش داد. کشور ایران یکی از کشورهایی است که علی‌رغم دارا بودن ایستگاه‌های دائمی GPS فاقد هرگونه مدل محلی توموگرافی است. این در حالی است که تراکم مکانی ایستگاه‌های رادیوسوند این کشور کم است. علاوه بر آن مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوای موجود برای این کشور به دلیل عدم دخالت داده‌های این کشور در مدل‌های جهانی عددی پیش‌بینی آب و هوا مدلی با قابلیت اطمینان کم می‌باشند. در روش توموگرافی با استفاده از تکنیک معکوس‌سازی و از طریق آنالیز اثر لایه‌ی تروپوسفر بر روی سیگنال‌های ماهواره‌های GPS به مدل‌سازی چهاربعدی پارامترهای موردنظر پرداخته می‌شود. مسئله‌ی مذکور دارای جوابی غیر یکتا و ناپایدار است. جهت دستیابی به جوابی یکتا از مجموعه‌ای از قیود افقی و قائم استفاده می‌گردد. در این مقاله از طریق مدل‌های عددی پیش‌بینی وضعیت آب و هوا (NWPM) این قیود به عنوان مقادیر اولیه به مسئله اضافه شده‌اند. همچنین جهت دستیابی به جوابی پایدار از روش بازسازی جبری همزمان (SART) استفاده شده است. در پایان نیز نتایج به دست آمده از این روش با پروفیل‌های رادیوسوندی در ۵ اپک زمانی مقایسه شد. این نتایج نشان‌دهنده‌ی مدل‌سازی مناسب چگالی بخار آب و انکسارپذیری تر با استفاده از روش پیشنهادی در قسمت شمال غربی ایران می‌باشد.

واژگان کلیدی: توموگرافی، چگالی بخار آب، انکسارپذیری تر، روش پایدارسازی تکراری

*. Email: zohre_adavi@mail.kntu.ac.ir

قدمه

امروزه استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات آب و هوایی و اقلیم‌شناسی گسترش یافته است. این امر به جهت جاروب شدن لایه‌های مختلف جو و به طور خاص لایه‌ی تروپوسفر، توسط سیگنال‌های این سیستم تعیین موقعیت می‌باشد. در واقع لایه‌ی تروپوسفر حاوی قسمت عمده‌ی بخار آب اتمسفری می‌باشد که پارامتری کلیدی در پدیده‌های هواشناسی همچون باران و برف است. بنابراین اطلاع از ساختار مکانی و رفتار زمانی بخار آب در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی و کاربردهای هواشناسی، همانند پیش‌بینی آب و هوا، کاهش مخاطرات طبیعی و مدیریت منابع آب ضروری است (Bender and Raabe, 2007, Brenot et al., 2014, Hoyle, 2005, Lutz, 2008, Troller, 2004). همچنین بشر به طور مستقیم با این بخش از اتمسفر در تماس می‌باشد و بنابراین این بخش تأثیر بسزایی را در فرآیند زندگی‌اش می‌گذارد. علاوه بر این دینامیک تروپوسفر یکی از موضوعات مورد علاقه هواشناسان است (Hoyle, 2005). به همین علت فرآیندهای بزرگ مقیاس و همچنین کوچک مقیاس نظیر کشش به علت امواج گرانشی و حرکت بخار آب و بادهای در این لایه بایستی به خوبی مدل‌سازی شوند تا هواشناسان قادر به انجام پیش‌بینی‌های کوتاه مدت و بلندمدت با دقتی مناسب باشند (Hoyle, 2005).

اندازه‌گیری بخار آب اتمسفری با استفاده از گیرنده‌های زمینی GPS در مقایسه با سیستم‌های سنتی مشاهده بخار آب مانند رادیوسوند و راديوتر، دارای مزایایی است که از جمله آن می‌توان به رزولوشن بالای زمانی و مکانی و همچنین هزینه کم ابزار و وسایل مورد استفاده این سیستم اشاره نمود (Bai, 2004). به علاوه گیرنده‌های GPS قابل حمل و مقرون به صرفه می‌باشند و می‌توانند برآورد پیوسته‌ای از آب قابل بارش (PWV) و میزان بخار آب اتمسفر در یک راستای مشخص (IWV) را با رزولوشن

زمانی بالاتر از رادیوسوند فراهم نمایند (Bai, 2004). همچنین باران و برف بر روی آن‌ها بی‌تأثیر است. در نتیجه GPS می‌تواند یک منبع مهم از مشاهدات PWV و IWV برای مدل‌های پیش‌بینی وضعیت آب و هوا (NWP) باشد (Kuo et al., 1998 Yang et al., 1999).

با توجه به این نکات، مشاهداتی نظیر تأخیر تر مایل تروپوسفر (SWD) و مقدار بخار آب قابل بارش در مسیر میان ماهواره و گیرنده (SWV) می‌توانند جهت مطالعه‌ی ساختار سه‌بعدی نامتجانس تروپوسفر با استفاده از روش توموگرافی بکار گرفته شوند (Champollion et al., 2005). در این تکنیک لایه تروپوسفر به تعدادی المان حجمی^۱ تقسیم شده و از این طریق ساختار مکانی و رفتار زمانی این بخش از اتمسفر بازسازی می‌گردد. مقادیر مجهول در هر یک از این وکسل‌ها با استفاده از اشعه‌های عبوری از آن‌ها محاسبه می‌گردد. با توجه به چینه‌ی هندسی ماهواره‌ها و گیرنده‌های دائمی GPS در طی بازه‌ی زمانی موردنظر، تعدادی از این وکسل‌ها خالی می‌ماند. در حالی که سیگنال‌های زیادی از تعدادی دیگر عبور می‌کند. به همین علت مسئله توموگرافی تروپوسفر برای برخی از وکسل‌ها فرو معین^۲، برای برخی معین^۳ و برای برخی دیگر فرامعین است. بنابراین به صورت کلی سیستم معادلات مشاهدات در روش توموگرافی معین-مخلوط است (Menke, 2012). در نتیجه فرآیند معکوس‌سازی ممکن است با مشکل سینگولاریتی^۴ مواجه شود، چرا که برخی از وکسل‌ها فاقد اطلاعاتی جهت بازسازی می‌باشند. جهت برطرف نمودن این مشکل تاکنون روش‌های گوناگونی اتخاذ شده است. در سال ۲۰۰۰ هیراهارا مجموعه‌ای از قیود افقی و قائم را به دستگاه معادلات افزود. فرلس و همکارانش ۲۰۰۰ مدل توموگرافی را با استفاده از روش فیلترینگ کالمن فرموله کرده و سپس آن را حل نمودند. نیلسن و گرادینسکی در سال ۲۰۰۶ جواب مسئله را به صورت مستقیم از معادلات مشاهدات فاز GPS استخراج نمودند. در سال ۲۰۱۱ تکنیک بازسازی جبری (ART^۵) توسط بندر

1. Voxel
3. Over-determined
5. Algebraic Reconstruction Techniques

2. Under-determined
4. Singular

را می‌پیمایند. مطابق شکل (۱) مسیر مستقیم W_0 مسیری است که سیگنال GPS در غیاب اتمسفر می‌پیماید و مسیر منحنی شکل W مسیر طی شده در حضور اتمسفر می‌باشد. در این مقاله، به جای کمیت‌های W_0 و W به ترتیب از کمیت‌های S_0 و S استفاده می‌گردد.

با توجه به این نکته که تروپوسفر یک محیط غیر پاشنده^۱ برای امواج رادیویی با فرکانس بیشتر از ۱۵ گیگاهرتز است، بنابراین انکسارپذیری^۲ در تروپوسفر مستقل از فرکانس بوده و در نتیجه تمامی سیگنال‌های GPS به صورت یکسان دچار تأخیر می‌گردند. این تأخیر تابعی از ضریب شکست در تروپوسفر است (Kaplan, 1996) (Seeber, 1993). از آنجایی که ضریب انکسار از نظر عددی بسیار کوچک می‌باشد، در محاسبات مربوط به تأخیر تروپوسفری، انکسارپذیری را جایگزین آن می‌کنند. این پارامتر به صورت $(n(s)-1) \cdot 10^{-6}$ تعریف می‌شود. بنابراین، تأخیر تروپوسفری به صورت زیر به دست می‌آید (Mendes, 1999; Bevs et al., 1992):

$$STD = 10^{-6} \int_S N ds \quad (1)$$

انکسارپذیری یک کمیت بدون واحد است و با توجه به تعریف انکسارپذیری شامل ترم 10^{-6} می‌باشد. بنابراین واحد آن می‌تواند ppm یا $mm km^{-1}$ در نظر گرفته شود. این پارامتر در تروپوسفر به دو بخش خشک (N_h) و تر (N_w) تقسیم می‌گردد (Smith and Weintraub, 1953). ترم N_h به گازهای موجود در هوا مرتبط بوده و انکسارپذیری خشک نامیده می‌شود. ترم N_w ، انکسار ناشی از بخار آب موجود در جو زمین بوده و آن را انکسارپذیری تر می‌نامند. با توجه به این موضوع می‌توان معادله (۱) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$STD = 10^{-6} \int_S N_h ds + 10^{-6} \int_S N_w ds \quad (2)$$

$$STD = STD_h + STD_w \quad (3)$$

و همکاری‌های جهت بازسازی به روش توموگرافی مورد استفاده قرار گرفت. رهم و بزی نیز در سال ۲۰۱۱ قیودی را که از طریق آنالیز جریان باد داده‌های رادیوسوند و مدل COAMPS^۱ بدست آمده بود را جهت یکتا نمودن جواب حاصل به دستگاه معادلات افزودند (Rohm and Bosy, 2011). همچنین، در سال ۲۰۱۴ ادای و حسینعلی از مفهوم ایستگاه‌ها مجازی (VRS^۲) جهت مقید نمودن مسئله استفاده نمودند (Adavi and Mashhadi Hossainali, 2014). علاوه بر آن، منابع مشاهداتی مستقلی همچون مشاهدات رادیوآکولتیشن و رادیوسوند را نیز می‌توان جهت حل مشکل کمبود مرتبه مسئله و یکتا نمودن جواب حاصل به دستگاه معادلات مشاهدات افزود (Bender et al., 2011) (Foelsche and Kirchengast, 2001, Xia et al., 2013).

در این تحقیق ضمن آنکه به بازسازی توموگرافیک پارامترهای چگالی بخار آب و انکسارپذیری تر در قسمت شمال غربی ایران طی بازه‌ی زمانی روزهای ۳۰۰ تا ۳۰۴ سال ۲۰۱۱ پرداخته شده است، از روش پایدارسازی SART جهت دست یافتن به جوابی پایدار برای مسئله‌ی توموگرافی استفاده شده است.

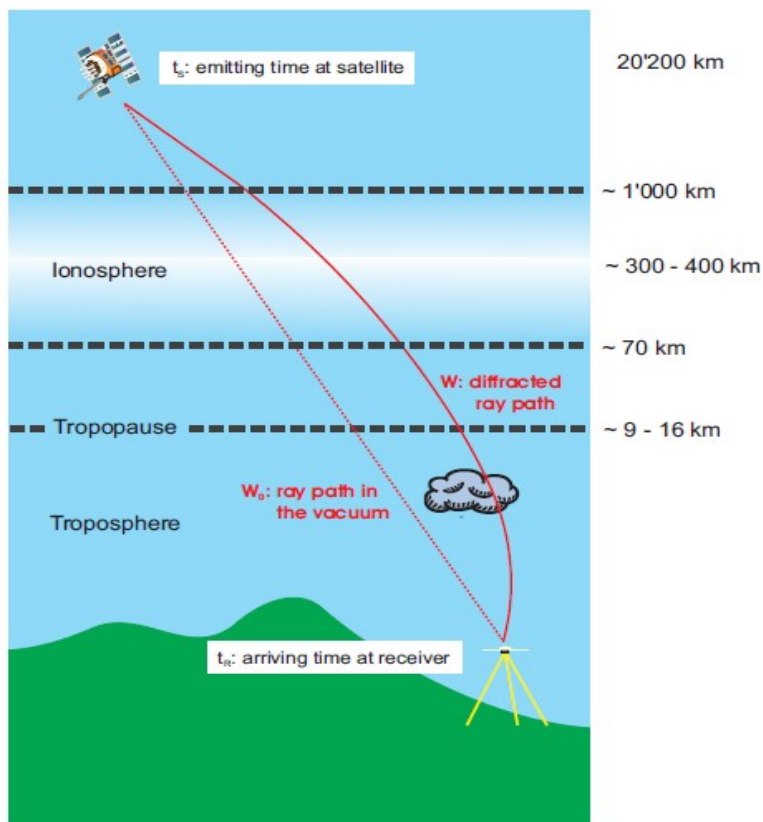
همچنین جهت مقید نمودن مسئله از خروجی‌های مدل NWPM استفاده شده است. در ادامه مدل‌سازی چگالی بخار آب و انکسارپذیری تر به روش توموگرافی توضیح داده می‌شود. سپس در بخش سوم روش پایدارسازی SART به عنوان روشی که به پایداری جواب می‌انجامد توضیح داده خواهد شد. در بخش چهارم نگاهی اجمالی بر روی منطقه مطالعاتی، بازه‌ی زمانی و مدل توموگرافیک طراحی شده برای منطقه مورد نظر خواهیم داشت. در نهایت نیز پارامترهای حاصل از روش توموگرافی با استفاده از پروفیل‌های رادیوسوندی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی توموگرافیک چگالی بخار آب و انکسارپذیری تر امواج GPS به هنگام عبور از تروپوسفر دچار شکست شده و به جای طی یک مسیر مستقیم، مسیری منحنی شکل

1. Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System
3. Non-dispersive

2. Virtual Reference Station
4. Refractivity



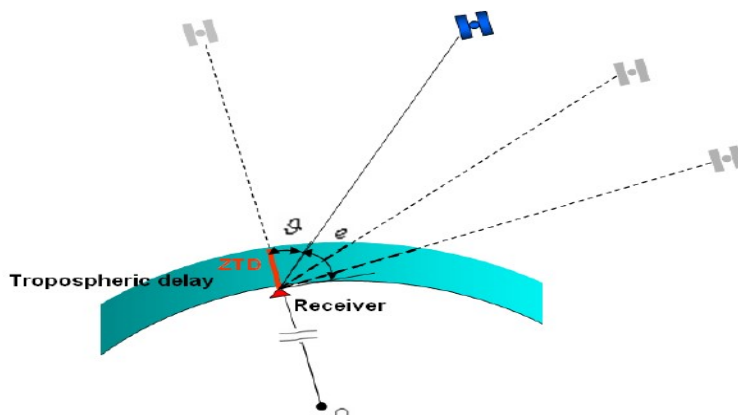
شکل 1- شکست امواج GPS به هنگام عبور از اتمسفر (Troller, 2004)

ارتفاعی میان گیرنده و ماهواره می‌باشند (شکل (۲) را ملاحظه نمایند). در این مقاله از تابع نگاشت GMF جهت نگاشت تأخیر تر در راستای زینتی به راستای مایل استفاده شده است (Böhm et al., 2006b).

رابطه (۳) را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت (Bevis et al., 1992, Bevis et al., 1994):

$$STD = m_d(elt)ZHD + m_w(elt)ZWD \quad (4)$$

در معادله (۴)، ZWD و ZHD به ترتیب تأخیر خشک و تأخیر تر تروپوسفر در راستای زینت و m_d و m_w نیز به ترتیب توابع نگاشت خشک و تر می‌باشند که تابعی از زاویه



شکل 2- تصویر نمودن تأخیر تروپوسفری از راستای زینتی به راستای مایل در یک زاویه‌ی ارتفاعی مشخص (Tao, 2008) (e)

$$SWV = \Pi(T_m).SWD \quad (۹)$$

در روابط فوق، Π ضریب تبدیل بوده و کمیته بدون واحد است که با استفاده از فرمول محاسبه می‌گردد (Bevis et al., 1992):

$$\Pi = [10^{-6} (k_3/T_m + k_2') R_v \rho]^{-1} \quad (۱۰)$$

در این رابطه R_v ثابت ویژه گاز برای بخار آب و برابر $461.45 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ، k_3 و k_2' ثابت‌های انکسارپذیری اتمسفر و به ترتیب برابر با $3.7 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ mbar}^{-1}$ و 17 K mbar^{-1} می‌باشند. همچنین، T_m میانگین وزن‌دار دمای اتمسفر بوده و تابعی از دما و فشار بخار آب در راستای پروفیل‌های قائم است. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Davis et al., 1985):

$$T_m = \frac{\int (e_v/T) dz}{\int (e_v/T^2) dz} \quad (۱۱)$$

که در آن e_v فشار بخار آب بر حسب میلی بار و T دما بر حسب درجه کلونین است.

به صورت تجربی مقدار ضریب تبدیل Π برابر با 0.15 است (Bevis et al., 1994). مقدار واقعی این کمیت بر مبنای مکان، عرض جغرافیایی، فصل و آب و هوا منطقه مورد مطالعه میان 0.12 و 0.18 متغیر است (Jadea et al., 2005). دستیابی به بهترین برآورد برای IWB و PWV از طریق ZWD در صورتی امکان‌پذیر است که ضریب Π به صورت محلی به دست آورده شود. این امر در صورتی میسر است که T_m بر اساس منطقه و فصل مورد بررسی محاسبه گردد. در این مقاله، از مدل محلی T_m ارائه شده برای کشور ایران که به صورت زیر تعریف می‌گردد استفاده شده است (Sadeghi et al., 2014):

$$T_m = 75.39 + 0.7103 T_0 \quad (۱۲)$$

با توجه به توضیحات فوق، رابطه‌ی (۱۳) معادله‌ای را که جهت بازسازی توموگرافیک چگالی بخار آب (ρ_w) مورد استفاده قرار می‌گیرد نشان می‌دهد (Braun, 2004):

$$SWV = \frac{1}{\rho} \int \rho_w ds \quad (۱۳)$$

برای انجام محاسبات لازم است تا معادلات (۶) و (۱۳) به فرم گسسته بازنویسی گردند (Bender et al., 2013 (Flores, 1999, Troller, 2004). چرا که در مدل‌سازی

بخش خشک تأخیر تروپوسفری تابع پارامترهای دما و فشار است و به همین جهت می‌توان آن را با استفاده از مشاهدات سطحی هواشناسی به صورت دقیقی مدل‌سازی نمود (Davis et al., 1985). مدل‌هایی نظیر (Saastamoinen and Hopfield) به شرط دارا بودن مشاهدات سطحی هواشناسی دقیق، قادر به محاسبه‌ی ZHD با دقت‌های بهتر از چند میلیمتر می‌باشند (Bevis et al., 1992). در این مقاله جهت محاسبه‌ی ZHD از مدل ساستاموینن استفاده شده است، که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد (Saastamoinen, 1973):

$$ZHD = \frac{0.002277 P_s}{(1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00000028 H)}$$

که در آن P_s فشار سطحی ایستگاه در واحد میلی بار و ϕ و H نیز به ترتیب عرض جغرافیایی و ارتفاع ژئودتیک نقطه در واحد متر می‌باشند. جهت محاسبه‌ی تأخیر کلی تروپوسفر در راستای زینتی می‌توان از نرم‌افزارهای دقیق پردازش داده‌های GNSS همچون برنیز استفاده نمود (Dach et al., 2007). سپس تأخیر خشک تروپوسفری در راستای زینت را از تأخیر کلی تروپوسفری در این راستای کسر نموده و در نهایت با ضرب تابع نگاهت تر در تأخیر تر تروپوسفری در راستای زینت، تأخیر مایل تر تروپوسفری را که در واقع ورودی مدل توموگرافیک بازسازی انکسارپذیری تر می‌باشد محاسبه نمود. بنابراین معادله‌ای که جهت محاسبه‌ی انکسارپذیری تر (N_w) به روش توموگرافی وجود دارد به صورت زیر است:

$$SWD = 10^{-6} \int N_w ds \quad (۶)$$

همچنین، رابطه‌ی میان پارامترها PWV و IWV به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$IWV = \rho . PWV \quad (۷)$$

که در این رابطه ρ چگالی آب مایع و برابر با 1000 kg m^{-3} است. همچنین رابطه‌ی زیر میان تأخیر تر تروپوسفری و آب قابل بارش وجود دارد:

$$PWV = \Pi(T_m).ZWD \quad (۸)$$

همچنین رابطه‌ای مشابه با رابطه‌ی فوق، میان پارامترها SWD و SWV نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Delta s_{11} & \Delta s_{12} & \Delta s_{13} & \Delta s_{14} & \dots & \Delta s_{1m} \\ \Delta s_{21} & \Delta s_{22} & \Delta s_{23} & \Delta s_{24} & \dots & \Delta s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta s_{n1} & \Delta s_{n2} & \Delta s_{n3} & \Delta s_{n4} & \dots & \Delta s_{nm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

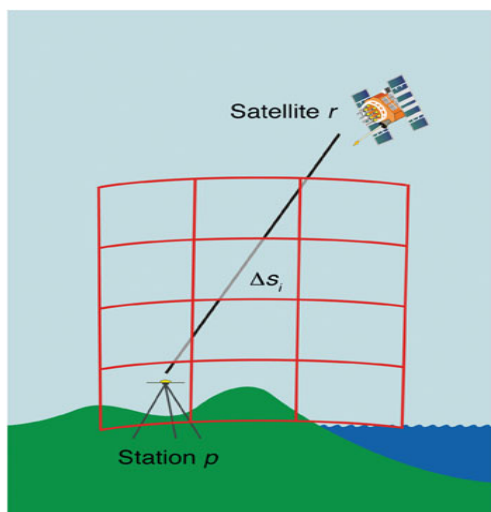
این ماتریس می‌تواند از طریق بکار بردن ردیابی اشعه ایجاد گردد. برای این منظور مطابق با شکل (۳)، فواصل موجود در هر وکسل به صورت تحلیلی از معادلات تقاطع خط و صفحه در مدل توموگرافی محاسبه می‌گردد (Rohm and Bosy, 2009). در این حالت با تشکیل معادله‌ی خط میان گیرنده و ماهواره و تشکیل معادلات صفحه هر وکسل در راستای شمالی- جنوبی و شرقی- غربی، محل تقاطع هر اشعه با وکسل مورد نظر به دست می‌آید.

توموگرافیک با المان‌های حجمی، مدل تروپوسفر به صورت یک گرید متشکل از مجموعه‌ای از المان‌های حجمی است که در هر یک از این المان‌ها مجهول مورد نظر ثابت فرض می‌شود. بنابراین فرم گسسته شده معادلات مذکور را می‌توان به صورت ماتریسی زیر نوشت:

$$\mathbf{SWV} = \mathbf{A} \mathbf{p}_w \quad (14)$$

$$\mathbf{SWD} = \mathbf{A} \mathbf{N}_w \quad (15)$$

در معادلات فوق \mathbf{SWV} و \mathbf{SWD} بردار مشاهدات و \mathbf{N}_w و \mathbf{p}_w نیز به ترتیب بردارهای مجهولات چگالی بخار آب و انکسار پذیری تر می‌باشند. همچنین \mathbf{A} ماتریس طراحی مسئله و شامل طول‌های Δs_i (طول اشعه i در وکسل j) بوده و بسیاری از آن‌ها صفر می‌باشند. ماتریس مذکور به صورت زیر تعریف می‌گردد:



شکل 3- ردیابی اشعه در مدل توموگرافی برای تشکیل ماتریس طراحی (Troller, 2004)

پایدارسازی تکراری می‌باشد. این روش توسعه یافته روش تکراری کازمارز است.

روش کازمارز^۱ از جمله روش‌های کلاسیک بازگشتی است. اساس این روش یک ایده هندسی بسیار ساده و جالب جهت کشف مجهولات است، به نحوی که محور اصلی گردش به دور جواب تنها همان سطرهای معادلات باشد. شکل (۴) مثال ساده‌ای از این روش را برای زمانی که تنها دو دستگاه معادله در اختیار باشد، نشان می‌دهد (Aster et al., 2003).

روش بازسازی جبری همزمان (SART)

در توموگرافی تروپوسفر به روش ردیابی اشعه که در آن ماتریس ضرایب دارای بیش از هزاران سطر و ستون می‌باشد، استفاده از روش‌های پایدارسازی مستقیم مستلزم زمان محاسبات بیشتر و حافظه زیاد جهت نگهداری اطلاعات بوده و بنابراین از کارایی محاسباتی لازم برخوردار نمی‌باشند. در این حالت از "روش‌های پایدارسازی تکراری" جهت حل دستگاه معادلات بدووضع توموگرافی استفاده می‌شود. روش SART^۱ یکی از انواع روش‌های

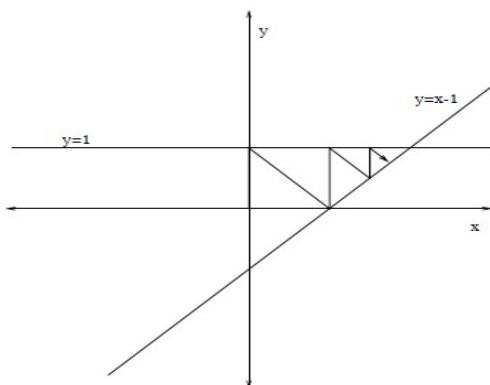
1. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique

2. Kaczmarz

میلیمتر گزارش شده است. با این وجود به دلیل فقدان اطلاعات هواشناسی و ضعف سیستم‌های اخذ داده، مدل‌های عددی پیش‌بینی وضعیت آب و هوا داده‌گوازی نمی‌گردند. در نتیجه پیش‌بینی وضعیت آب و هوا با دقت‌های بالا امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای مثال، تعداد ایستگاه‌های رادیوسوند که برای پیش‌بینی وضعیت آب و هوا و تغییرات اقلیمی استفاده می‌گردند، تنها ۱۴ عدد با پوششی نامتراکم در کشور ایران است که به صورت منظم نیز پرتاب نمی‌گردند. با استفاده از روش توموگرافی، این مدل‌ها می‌توانند بهبود پیدا کنند. بنابراین ایستگاه‌های دائمی GPS با استفاده از مدل‌های توموگرافی می‌توانند برای تأسیس یک سیستم پایش دائمی وضعیت آب و هوا در هر قسمتی از کشور به کار روند.

با توجه به کوهپایه‌ای بودن شمال غربی ایران، وجود شبکه‌ی نسبتاً متراکم از ایستگاه‌های دائمی GPS و همچنین دسترسی به داده‌های هواشناسی قابل قبول، این بخش از کشور به عنوان منطقه‌ی مطالعاتی انتخاب شد. در شکل (۵) این منطقه به همراه پوشش ایستگاه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

مطابق با شکل (۵) در این مقاله، از سه گروه مختلف داده استفاده شده است. دسته‌ی اول فایل‌های مشاهداتی ایستگاه‌های دائمی GPS می‌باشند. دسته‌ی دوم مشاهدات هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک بوده و دسته‌ی سوم نیز مشاهدات تنها ایستگاه رادیوسوندی واقع در شمال غربی ایران است. بازه‌ی زمانی مورد مطالعه در این مقاله روزهای ۳۰۰ تا ۳۰۴ سال ۲۰۱۱ است.



شکل 4- الگوریتم کازمارز در یک سیستم دو معادله‌ای (Aster et al., 2003)

مطابق با شکل فوق، ابتدا از صفحه مختصات یک نقطه دلخواه را به عنوان مقدار اولیه مجهول در نظر می‌گیریم، این مقدار اولیه را بر روی یکی از خطوط دستگاه معادله تصویر می‌کنیم. نقطه تصویر به فصل مشترک خطوط نزدیک‌تر شده است. اگر این عمل را تکرار نماییم نقاط تصویر شده‌ی بعدی به جواب نزدیک‌تر می‌شوند. در انتها نیز حد دنباله‌ی نقاط تصویر شده به جواب مسئله میل می‌کند (Aster et al., 2003).

روش پایدارسازی SART اصلاح شده‌ی روش کازمارز و یا روش ART است (این روش نیز بر پایه روش کازمارز می‌باشد) و به صورت زیر تعریف می‌گردد (Andersen and Kak, 1984; Andersen, 1989):

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \lambda \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x}) \quad (17)$$

که در آن، \mathbf{x} بردار مجهولات، λ پارامتر پایدارسازی و \mathbf{b} بردار مشاهدات می‌باشند. همچنین اگر \mathbf{A} یک ماتریس $m \times n$ باشد، داریم:

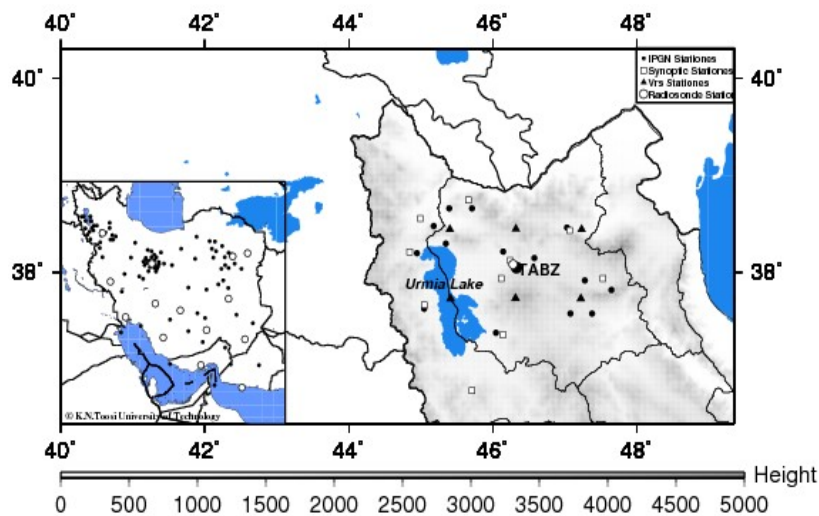
$$\mathbf{A}_{i,+} = \sum_{j=1}^N A_{i,j} \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{+,j} = \sum_{i=1}^M A_{i,j} \quad (19)$$

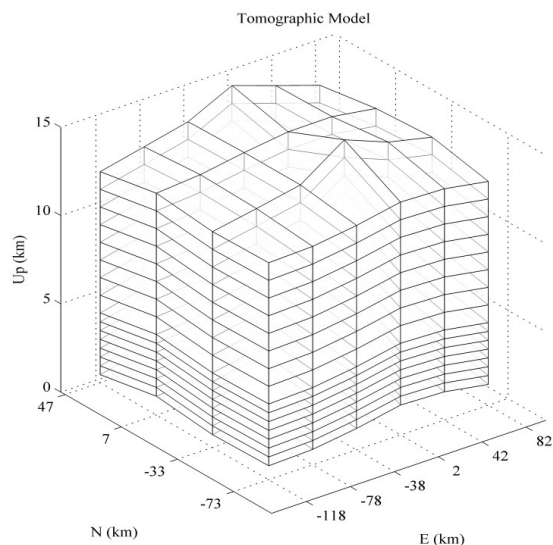
که در رابطه‌ی (۱۷) \mathbf{V} و \mathbf{W} ماتریس‌هایی قطری می‌باشند که عناصر روی قطر اصلی آن‌ها به ترتیب برابر با عناصر $\mathbf{A}_{i,+}$ و $\mathbf{A}_{+,j}$ می‌باشد (Yan, 2010). جهت محاسبه پارامتر پایدارسازی در رابطه‌ی (۱۷) روش‌های گوناگونی وجود دارد که در اینجا از روش اصلاح‌شده‌ی Ψ_2 استفاده شده است (Elfving et al., 2010).

منطقه مطالعاتی، بازه‌ی زمانی مورد مطالعه و مدل توموگرافی طراحی شده

ایران کشور پهناوری است که به علت دارا بودن اقلیم‌های گوناگون و همچنین پدیده‌های آب و هوایی متفاوت نظیر بارش‌های شدید در قسمت‌های شمالی و گردبادهای بزرگ در قسمت جنوبی نیازمند پایش دائمی آب و هوا می‌باشد. تنوع اقلیمی در ایران به اندازه‌ای است که برای مثال میزان متوسط بارندگی سالیانه در برخی از شهرهای جنوبی ایران از چهل میلیمتر تجاوز نمی‌کند. درحالی‌که میزان بارش در نواحی غربی ایران بیش از ۶۰۰



شکل ۵- توزیع ایستگاه‌های مورد استفاده در محدوده‌ی مطالعاتی واقع در شمال غربی ایران



شکل ۶- مدل توموگرافی طراحی شده در منطقه مطالعاتی

GPS و رادیوسوند در این تحقیق در لایه‌ی اول مدل طراحی شده، نشان داده شده است. برای اطمینان از کارایی مدل توموگرافی طراحی شده، بایستی در انتها دقت و صحت نتایج حاصل محاسبه گردد. عمدتاً از ریشه‌ی مربع خطای میانگین ($RMSE$ ^۱)، بایاس و انحراف معیار (std ^۲) برای آنالیز نتایج استفاده می‌گردد. (Rohm and Bosy, 2009; Shangguan et al., 2013)

شکل (۶) مدل توموگرافی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این مدل دارای رزولوشن افقی ۴۰ کیلومتر، رزولوشن زمانی ۱ ساعته و رزولوشن ارتفاعی ۵۰۰ متر تا ارتفاع حدود ۴ کیلومتری و ۱ کیلومتر تا ارتفاع حدود ۱۰ کیلومتر از سطح زمین است (Adavi and Mashhadi Hossainali, 2014). بنابراین مدل توموگرافی دارای ۱۲۰ اُپک می‌باشد. همچنین در شکل (۷) توزیع ایستگاه‌های

1. Standard deviation

2. Root Mean Square error

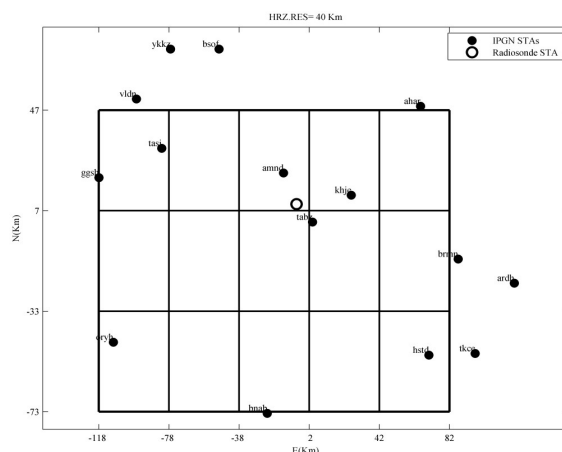
در این معادلات، par^i کمیت مدل‌سازی شده در وکسل i^{th} مدل توموگرافی و obs^i مقدار محاسبه شده از پروفیل رادیوسوند است. همچنین N تعداد وکسل‌های مورد بررسی در این آنالیز می‌باشد.

این کمیت‌های آماری با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند (Guerova, 2003):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (par^i - obs^i)^2} \quad (20)$$

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (par^i - obs^i) \quad (21)$$

$$std = \sqrt{RMSE^2 - bias^2} \quad (22)$$



شکل 7- توزیع ایستگاه‌های GPS و رادیوسوند در لایه اول مدل توموگرافی

شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب نتایج حاصل از بازسازی توموگرافیک انکسارپذیری تر و چگالی بخار آب را نشان می‌دهند. علاوه بر آن، نتایج حاصل از این مقایسه، با استفاده از کمیت‌های آماری $RMSE$ ، $Bias$ و std ، در جداول (۱) و (۲) نیز آورده شده است.

با توجه به نتایج حاصل در این جداول، پروفیل‌های بازسازی شده تطابق قابل قبولی را با پروفیل‌های حاصل از مشاهدات رادیوسوند دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل توموگرافی کارایی لازم را جهت پایش تغییرات آب و هوا و افزایش دقت تعیین موقعیت با استفاده از ایستگاه‌های دائمی GPS دارد.

نتایج عددی

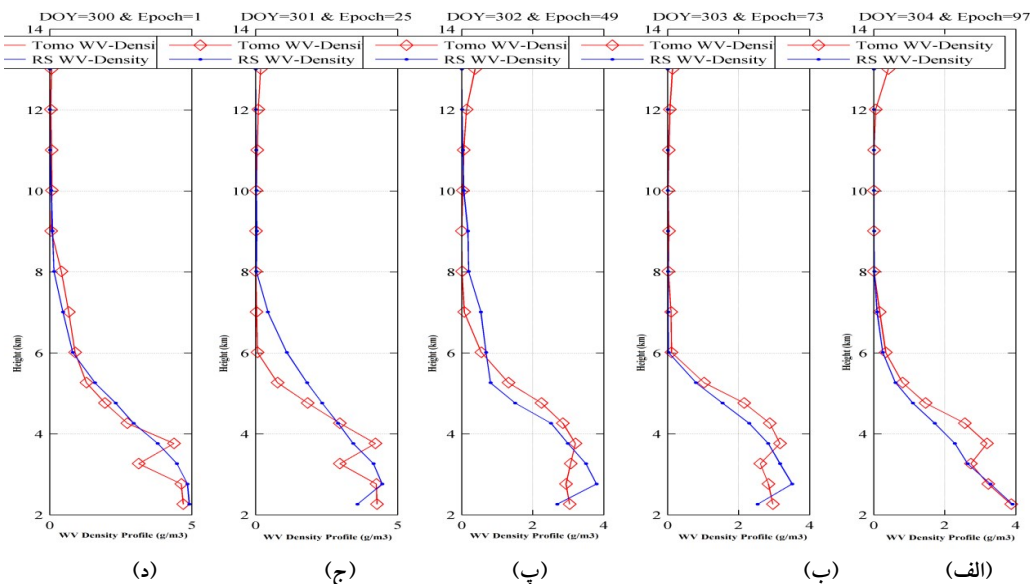
جهت بررسی صحت مدل‌سازی صورت گرفته به روش توموگرافی، پروفیل‌های چگالی بخار آب و انکسارپذیری تر حاصل از روش توموگرافی با پروفیل‌های رادیوسوندی مقایسه شده است. برای این منظور، با توجه به شکل (۶) وکسل شامل ایستگاه رادیوسوند و وکسل‌های بالای آن، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجایی که تبریز تنها ایستگاه رادیوسوندی موجود در منطقه مطالعاتی است امکان بررسی کارایی مدل بازسازی شده در سایر قسمت‌ها وجود ندارد. البته با توجه به عدم تغییر مدل در کل منطقه مطالعاتی، صحت پروفیل حاصل از این بخش می‌تواند نشان‌دهنده صحت نتایج مدل در سایر قسمت‌ها نیز باشد.

جدول 1- std ، $RMSE$ و $bias$ برای چگالی بخار آب در پنج اپک ۱، ۲۵، ۴۹، ۷۳ و ۹۷

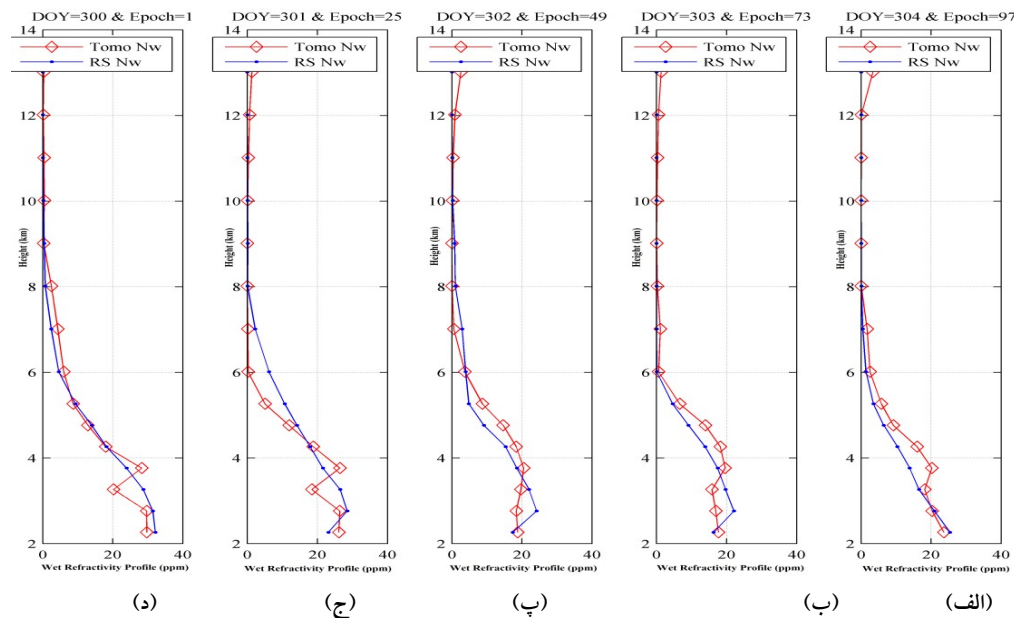
DOY (Day Of Year)	RMSE (g/m3)	Std (g/m3)	Bias (g/m3)
300	-0.0951	0.4089	0.4198
301	-0.1609	0.5647	0.5872
302	0.0252	0.4036	0.4044
303	0.1013	0.3380	0.3528
304	0.1928	0.2980	0.3549

جدول 2- RMSE و std برای انکسارپذیری تر در پنج اپک ۱، ۲۵، ۴۹، ۷۳ و ۹۷

DOY (Day Of Year)	RMSE (ppm)	Std (ppm)	Bias(ppm)
300	-0.2918	2.7008	2.7165
301	-1.0168	3.3300	3.4818
302	0.4661	2.7090	2.7489
303	0.6576	2.4653	2.5515
304	1.4645	2.1906	2.6350



شکل 8- مقایسه میان پروفیل‌های چگالی بخار آب حاصل از مشاهدات رادیوسوندی و روش توموگرافی در ساعت UTC:۰۰:۰۰ برای (الف) اپک ۹۷، (ب) اپک ۷۳، (پ) اپک ۴۹، (ج) اپک ۲۵ و (د) اپک ۱



شکل 9- مقایسه میان پروفیل‌های انکسارپذیری تر حاصل از مشاهدات رادیوسوندی و روش توموگرافی در ساعت UTC:۰۰:۰۰ برای (الف) اپک ۹۷، (ب) اپک ۷۳، (پ) اپک ۴۹، (ج) اپک ۲۵ و (د) اپک ۱

- Water Vapor Tomography. Deutsches GeoForschungs Zentrum, 2013 GFZ, Postdam, Germany.
8. BENDER, M. & RAABE, A. 2007. Preconditions to ground based GPS water vapour tomography. *Annales Geophysicae*, 25(8), 1727-1734.
 9. BEVIS, M., BUSINGER, S. & CHISWELL, S. 1994. GPS meteorology: mapping zenith wet delays on to precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 379-386.
 10. BEVIS, M., BUSINGER, S., HERRING, T., ROCKEN, C., R. A., A. & WARE, R. H. 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the
 11. Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 97 (D14), 15787-15801.
 12. BÖHM, J., NIELL, A., TREGONING, P. & SCHUH, H. 2006b. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33.
 13. BRAUN, J. J. 2004. Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System. Ph. D., University of Colorado.
 14. BRENOT, H., WALPERSDORF, A., REVERDY, M., VAN BAELEN, J., DUCROCQ, V., CHAMPOLLION, C., MASSON, F., DOERFLINGER, E., COLLARD, P. & GIROUX, P. 2014. A GPS network for tropospheric tomography in the framework of the Mediterranean hydrometeorological observatory Cévennes-Vivarais (southeastern France). *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 553-578.
 15. CHAMPOLLION, C., MASSON, F., BOUIN, M. N., WALPERSDORF, A., DOERFLINGER, E., BOCK, O. & VAN BAELEN, J. 2005. GPS water vapour tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experiment. *Atmospheric Research*, 74, 253-274.
 16. DACH, R., HUGENTOBLER, U., FRIDEZ, P. & MEINDL, M. 2007. Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern.
 17. DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO, I. I., ROGERS, E. E. & ELGERED, G. 1985. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on
 18. estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593-1607.
 19. ELFVING, T., NIKAZAD, T. & HANSEN, P. C. 2010. SEMI-CONVERGENCE AND RELAXATION PARAMETERS FOR A CLASS OF SIRT ALGORITHMS.

نتیجه‌گیری و بحث

روش توموگرافی تروپوسفر، تکنیک نسبتاً جدیدی جهت بازسازی پارامترهای مرتبط با وضعیت آب و هوا می‌باشد. این روش با انجام آنالیزی معکوس بر روی سیگنال‌های عبوری از اتمسفر زمین قادر به مدل‌سازی ساختار مکانی و رفتار زمانی پارامترهایی همچون چگالی بخار آب و انکسارپذیری تراست. در این تحقیق، بازسازی چهاربعدی بخار آب و انکسارپذیری‌تر در قسمت شمال غربی ایران با استفاده از امواج GPS صورت گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده کارایی مناسب روش توموگرافی جهت بازسازی پارامترهای مورد مطالعه می‌باشد. همچنین، با استفاده از این روش می‌توان به تعیین پروفیل‌ها و سری‌های زمانی آب قابل بارش نیز پرداخت. علاوه بر آن، با داده‌گذاری خروجی‌های حاصل از این تکنیک در مدل‌های عددی پیش‌بینی وضعیت آب و هوا می‌توان دقت این مدل‌ها را افزایش داد.

منابع

1. ADAVI, Z. & MASHHADI HOSSAINALI, M. 2014. 4D-Tomographic Reconstruction of the Tropospheric Wet Refractivity Using the Concept of Virtual Reference Station, Case Study: North West of Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 125.
2. ANDERSEN, A. 1989. Algebraic reconstruction in CT from limited views. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 8, 50-55.
3. ANDERSEN, A. & KAK, A. 1984. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): A new implementation of the ART algorithm. *Ultrason. Imaging*, 6, 81-94.
4. ASTER, R., BORCHERS, B. & THURBER, C. 2003. *Parameter Estimation and Inverse Problems*, Elsevier Academic Press.
5. BAI, Z. 2004. Near-Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapour. Ph.D., Queensland University of Technology.
6. BENDER, M., DICK, G., GE, M., DENG, Z., WICKERT, J., KAHLE, H.-G., RAABE, A. & TETZLAFF, G. 2011. Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Advanced in Space Research*, 47, 1704-1720.
7. BENDER, M., DICK, G., HEISE, S., ZUS, F., DENG, Z., SHANGGUAN, M., RAMATSCHI, M. & WICKERT, J. GNSS

32. NILSSON, T. & GRADINARSKY, L. 2006. Water vapor tomography using GPS phase observations: simulation results. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 44, 2927–2941.
33. ROHM, W. & BOSY, J. 2009. Local tomography troposphere model over mountains area. *Atmospheric Research*, 93(4), 777-78. 3.
34. ROHM, W. & BOSY, J. 2011. The verification of GNSS tropospheric tomography model in a mountainous area. *Advanced in Space Research*, 47, 1721-1730.
35. SAASTAMOINEN, J. 1973. Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II: refraction corrections in satellite geodesy. *Bull. Geod*, 107, 13-34.
36. SADEGHI, E., MASHHADI-HOSSAINALI, M. & ETEMADFARD, H. 2014. Determining precipitable water in the atmosphere of Iran based on GPS zenith tropospheric delays. *Annals of geophysics* 57.
37. SEEBER, G. 1993. *Satellite Geodesy*, de Gruyter, Berlin.
38. SHANGGUAN, M., BENDER, M., RAMATSCHI, M., DICK, G., WICKERT, J., RAABE, A. & GALES, R. 2013. GPS tomography: validation of reconstructed 3-D humidity fields with radiosonde profiles. *Annales Geophysicae*, 31, 1491-1505.
39. SMITH, E. K. & WEINTRAUB, S. 1953. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. in *Proc. IRE* 41.
40. TROLLER, M. 2004. GPS based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere. Ph.D., ETH Zurich.
41. XIA, P., CAI, C. & LIU, Z. 2013. GNSS troposphere tomography based on two-step reconstructions using GPS observations and COSMIC profiles. *Annales Geophysicae*, 31, 1805-1815.
42. YAN, M. 2010. Convergence Analysis of SART by Bregman Iteration and Dual Gradient Descent. Department of Mathematics, University of California, Los Angeles, CA 90095.
43. YANG, X., SASS, B., ELGERED, G., JOHANSSON, J. M. & EMARDSON, T. R. 1999. A comparison of precipitable water vapor estimates by an NWP simulation and GPS observations. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 941-956.
- Electronic Transactions on Numerical Analysis, 37, 321-336.
20. FLORES, A. 1999. Atmospheric Tomography Using Satellite Radio Signals. Ph. D., Politècnica de Catalunya, Barcelona.
21. FLORES, A., RUFFINI, G. & RIUS, A. 2000. 4D Tropospheric Tomography using GPS Slant Wet Delays. *Annales Geophysicae*, 18(2), 223-234.
22. FOELSCHE, U. & KIRCHENGAST, G. 2001. Tropospheric water vapor imaging by combination of ground-based and space born GNSS sounding data. *Journal of Geophysical Research*, 106(D21), 27221-27231.
23. GUEROVA, G. 2003. Application of GPS derived water vapour for Numerical Weather Prediction in Switzerland. Ph.D., University of Bern.
24. HIRAHARA, K. 2000. Local GPS tropospheric tomography. *Earth Planets Space*, 52(11), 935-939.
25. HOYLE, V. A. 2005. Data Assimilation for 4-D Wet Refractivity Modelling in a Regional GPS Network. Master of Science, Calgary, Alberta, Canada.
26. JADEA, S., VIJAYANA, M. S. M., GAURA, V. K., PRABHUB, P. T. & SAHUC, S. C. 2005. Estimates of precipitable water vapour from GPS data over the Indian subcontinent. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 623-635.
27. KAPLAN, E. 1996. *Understanding GPS: principles and applications*, Artech House Publishers, Boston, London.
28. KUO, Y. H., ZOU, X. & HUANG, W. 1998. The impact of Global Positioning System data on the prediction of an extratropical cyclone: an observing system experiment. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 27, 439-470.
29. LUTZ, S. M. 2008. High-resolution GPS tomography in view of hydrological hazard assessment. Ph. D., ETH Zurich.
30. MENDES, V. B. 1999. MODELING THE NEUTRAL-ATMOSPHERIC PROPAGATION DELAY IN RADIOMETRIC SPACE TECHNIQUES. Ph. D., University of New Brunswick.
31. MENKE, W. 2012. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory* MATLAB Edition. 3rd ed.: Academic Press is an imprint of Elsevier.