

مقایسه دقت توابع نگاشت جوی مختلف با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های دائم GPS در ایران

امین گیو^۱، یحیی جمور^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد ژئودزی - گروه مهندسی عمران - ژئودزی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
giv.a.eng@gmail.com

^۲ دانشیار آموزشکده نقشه برداری - سازمان نقشه برداری کشور
djamour@ncc.org.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۵، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۵)

چکیده

یکی از منابع خطاهای موجود در مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS)، تأخیر تروپوسفری می‌باشد. معمولاً برآورد میزان تأخیر تروپوسفری و مؤلفه‌های آن، در دو راستای انتشار سیگنال از ماهواره تا گیرنده (راستای مایل) و راستای قائم، متداول می‌باشد که جهت تبدیل این تأخیر از راستای مایل به قائم و یا عکس آن از توابعی تحت عنوان توابع نگاشت جوی استفاده می‌گردد. از آنجائیکه تاکنون توابع نگاشت مختلفی توسط دانشمندان ارائه گردیده در این تحقیق سعی شده که با استفاده از داده‌های ایستگاه دائم GPS تبریز که برای ۳ روز با شرایط آب و هوایی مختلف از سال ۲۰۱۲ انتخاب گردیده اند، دقت توابع نگاشت Niell و B&E، Chao، Davis و Niell را برای برآورد تأخیر تروپوسفری تحت شرایط آب و هوایی مختلف، زوایای زینتی 1° تا 55° و همچنین برآورد مختصات ایستگاه، برای منطقه مورد مطالعه ارزیابی و مقایسه نمائیم. نتایج حاصل از مقایسات انجام شده حاکی از این است که بطور کلی توابع نگاشت مورد نظر دقت تقریباً یکسانی برای برآورد تأخیر تروپوسفری راستای قائم و مایل (خصوصاً تحت زوایای زینتی کمتر از 30°) دارند، اما در بررسی جزئیات بیشتر، تابع نگاشت Niell با کمترین مقدار انحراف معیار، عملکرد مناسب‌تری را نسبت به دیگر توابع در برآورد تأخیر تروپوسفری قائم و تأخیر مایل تحت زوایای زینتی 30° تا 55° ارائه می‌دهد. در زمینه‌ی محاسبه مختصات ایستگاه دائم GPS تبریز به روش تعیین موقعیت دقیق (PPP)، تحت شرایط یکسان در حالیکه مدل سستامینن به عنوان مدل ثابت برآورد تأخیر تروپوسفر انتخاب گردید، تنها با تغییر توابع نگاشت در پروسه محاسبات و پردازش، نتایج حاصل از مؤلفه‌های مختصاتی بدست آمده با استفاده از تابع نگاشت Niell کمترین اختلاف را نسبت به مؤلفه‌های مختصاتی ثابت ایستگاه نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: ایستگاه‌های دائم GPS، تأخیر تروپوسفری مایل، توابع نگاشت جوی، تأخیر تروپوسفری قائم

۱- مقدمه

یکی از منابع خطاهای موجود در مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی^۱، تأخیر تروپوسفری می‌باشد. این تأخیر زمانی رخ می‌دهد که امواج الکترومغناطیسی با عبور از لایه تروپوسفر دچار انکسار گردیده و از مسیر هندسی انتشار سیگنال منحرف می‌شوند [۷]. علیرغم اینکه خطای تروپوسفری برای مقاصد ژئودزی و تعیین موقعیت دقیق به عنوان یک پارامتر مزاحم (نویز) تلقی می‌گردد و همواره در پی کاهش یا حذف آن هستند اما از طرفی نیز دانشمندان در اوایل دهه ۱۹۹۰ تکنیکی را گسترش دادند تا از خطای تروپوسفر موجود در سیگنال‌های GPS برای تعیین بخار آب بارش زای اتمسفر استفاده شود که این تکنیک بعدها با نام GPS Meteorology یا به اختصار GPS-Met رواج یافت [۱]. از راه‌های متداول برآورد این خطا، استفاده از مدل‌های جهانی تأخیر تروپوسفر (مانند: سستامین و هاپفیلد)، برآورد آن به عنوان کمیت مجهول در حین پردازش داده‌ها و بکارگیری روش‌های تفاضلی می‌باشد [۹]. برآورد میزان تأخیر تروپوسفری و مؤلفه‌های آن معمولاً در دو راستای انتشار سیگنال از ماهواره تا گیرنده (راستای مایل) و راستای قائم، متداول می‌باشد که از مورد اول برای مقاصد ژئودزی و از مورد دوم در زمینه های کاربردی GPS-Met استفاده می‌شود [۹]. جهت تبدیل این تأخیر از راستای مایل به قائم و یا عکس آن، از توابعی تحت عنوان توابع نگاشت جوی استفاده می‌گردد. توابع نگاشت جوی در واقع توابعی هستند که طبق روابط ریاضی مشخص، با لحاظ نمودن یکسری ثوابت، پارامترهای جوی (فشار، دما، رطوبت)، ارتفاع ایستگاه و زاویه زینتی^۲ بین ماهواره تا گیرنده، قادر خواهند بود تأخیر تروپوسفری در راستای مایل انتشار سیگنال^۳ را به تصویر آن در راستای قائم^۴ تبدیل نمایند و یا عکس این عمل را انجام دهند [۱۱].

همانطور که گفتیم از آنجائیکه پارامترهای مؤثر در انتخاب توابع نگاشت جوی شامل: ارتفاع و مکان ایستگاه، شرایط آب و هوایی و زاویه زینتی ماهواره ها نسبت به گیرنده می باشد، در این تحقیق سعی شده که با استفاده

از داده‌های ایستگاه دائم GPS تبریز که برای ۳ روز با شرایط آب و هوایی مختلف از سال ۲۰۱۲ انتخاب گردیده اند، دقت توابع نگاشت Niell و B&E, Chao, Davis را برای برآورد تأخیر تروپوسفری تحت شرایط آب و هوایی مختلف، زوایای زینتی^{۱۰} تا ۵۵° و همچنین صحت و دقت محاسبه مختصات ایستگاه، مورد ارزیابی و مقایسه قرار دهیم. در واقع هدف از انجام این مقایسه عبارتست از:

- الف) بررسی دقت هر یک از توابع جوی منتخب در برآورد تأخیر تروپوسفری تحت شرایط آب و هوایی خاص و زوایای زینتی مختلف، برای منطقه مورد مطالعه
 ب) ارزیابی تأثیر بکارگیری توابع نگاشت جوی مختلف در زمینه دقت و صحت برآورد مختصات ایستگاه تبریز تحت شرایط آب و هوایی متغییر
 ج) انتخاب تابع نگاشتی که بطور کلی بتواند عملکرد مناسبتری را برای منطقه مورد مطالعه ارائه دهد.

طی سالهای اخیر در داخل و خارج از کشور، تلاش زیادی جهت آشکار نمودن اهمیت محاسبه تأخیر تروپوسفر با استفاده از مدل‌ها و روش‌های مختلف، برای کاربردهای ژئودزی و هواشناسی، در یکی از راستاهای مایل یا قائم، انجام شده است که از جمله می‌توان به B.Langley و همکاران سال ۱۹۹۷ (کشور کانادا)، T.Schuler سال ۲۰۰۱ (کشور آلمان)، S.A.Younes و همکارش A.G.Elmezayen سال ۲۰۱۲ (کشور مصر)، جمور و همکاران (۱۳۸۵)، عسگری و همکاران (۱۳۹۳) و جهان تاب (۱۳۹۳) اشاره نمود [۱۱]، [۱۰]، [۷]، [۱]، [۲] و [۳]. انتخاب تابع نگاشت جوی مناسب برای یک منطقه مورد مطالعه، جهت تبدیل تأخیر برآورد شده نیز مسئله مهمی است که در پژوهش‌های انجام شده خارج از کشور به مراتب بیشتر و در داخل کشور کمتر به آن پرداخته شده است و بنابراین لزوم انجام این پژوهش محسوب می‌گردد.

شایان ذکر است جهت انجام محاسبات و پردازش‌های اولیه روی داده‌های ایستگاه دائم GPS تبریز، محاسبه میزان تأخیر تروپوسفری در راستای قائم برای فواصل زمانی مختلف و همچنین اعمال فایل اصلاح شده تأخیر تروپوسفری جهت محاسبه مختصات ایستگاه از نرم افزار Bernese (ورژن ۵) استفاده گردیده و از نرم افزار برنامه نویسی Matlab (ورژن ۲۰۰۸) نیز جهت نمایش کلیه نمودارها و نتایج، برنامه نویسی برای روابط توابع نگاشت جوی خصوصاً در بخش ارائه نتایج محاسبه تأخیر

^۱ Global Positioning System (GPS)

^۲ Zenith Angle

^۳ Slant Tropospheric Delay

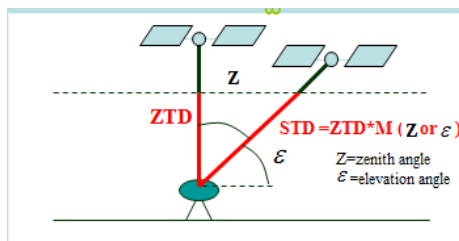
^۴ Zenith Tropospheric Delay

مختصات ایستگاه نیز مورد استفاده قرار گرفته و جزئیات آن در ادامه توضیح داده خواهد شد [۱۰]:

$$\delta S_{A[Trop]}^i = \delta S_{A[HYD,symm]}^i + \delta S_{A[HYD,Asymm]}^i + \delta S_{A[wet,symm]}^i + \delta S_{A[wet,Asymm]}^i \quad (1)$$

$\delta S_{A[Trop]}^i$: تأخیر تروپوسفری کل بین ایستگاه A و ماهواره i
 $\delta S_{A[HYD,symm]}^i$ و $\delta S_{A[HYD,Asymm]}^i$: تأخیر تروپوسفری بخش هیدرواستاتیکی تحت زاویه آزیموت متقارن و نامتقارن
 $\delta S_{A[wet,symm]}^i$ و $\delta S_{A[wet,Asymm]}^i$: تأخیر تروپوسفری بخش غیر هیدرواستاتیکی تحت زاویه آزیموت متقارن و نامتقارن
 رابطه (۱) علاوه بر اینکه تأخیر تروپوسفری کل را به دو مؤلفه خشک و تر تفکیک می کند، آنرا برای دو بخش آزیموتی متقارن و نامتقارن نیز در قالب مدل های گرادینت افقی لحاظ می کند که به نوعی بیانگر تأثیر مؤلفه افقی تأخیر تروپوسفر در مسیر انتشار سیگنال می باشد. از آنجائیکه بحث بررسی دقت مدل های گرادینت افقی خارج از حوصله این مقاله می باشد در اینجا تنها به ذکر روابط مربوطه بسنده نموده ایم، علیرغم اینکه در حصول نتایج نیز از مدل گرادینت افقی TILTING به عنوان یک مدل ثابت و متداول در نرم افزار Bernese استفاده شده است [۱۳]. رابطه (۱) می تواند با لحاظ نمودن جزئیات بیشتر بصورت رابطه (۲) بیان گردد [۱۰]:

$$\begin{aligned} \delta S_{A[Trop]}^i &= m(\epsilon_A^i)_{[HYD]} \cdot ZHD_A \\ &+ m(\epsilon_A^i)_{[AZI,HYD]} \cdot (G_{A[N,HYD]} \cdot \cos \alpha_A^i \\ &+ G_{A[E,HYD]} \cdot \sin \alpha_A^i) + m(\epsilon_A^i)_{[wet]} \cdot ZWD_A \\ &+ m(\epsilon_A^i)_{[AZI,wet]} \cdot (G_{A[N,wet]} \cdot \cos \alpha_A^i \\ &+ G_{A[E,wet]} \cdot \sin \alpha_A^i) \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۱- تبدیل تأخیر تروپوسفر از راستای قائم به راستای مایل با استفاده از توابع نگاشت تحت زاویه زینیتی Z یا زاویه ارتفاعی ε

در رابطه (۲) ترم اول و ترم سوم تنها بیانگر میزان تأخیر تروپوسفری بخش خشک و تر در راستای قائم و فرض پارامترهای تروپوسفری تحت آزیموت متقارن

تروپوسفری تحت زوایای زینیتی ۱° تا ۵۵° و محاسبه مختصات ایستگاه کمک گرفته شده است.

۲- بکارگیری توابع نگاشت جوی مختلف در کنار روشهای برآورد تأخیر تروپوسفری

با توجه به آنچه در مقدمه گفته شد، دو نکته ای که می بایست به آن توجه ویژه ای داشته باشیم این است که: الف) دقت و صحت برآورد تأخیر تروپوسفری، به عنوان کمیتی که با اندازه گیری و محاسبات تجربی بدست می آید، همواره وابسته به دقت و صحت مدل برآورد، تابع نگاشت جوی و مدل گرادینت افقی می باشد ب) اگرچه برای برآورد تأخیر تروپوسفری در یکی از راستاهای مایل یا قائم، در قالب یک رابطه، مدل (یا روش) برآورد و تابع نگاشت (به عنوان ضریب) در کنار هم قرار می گیرند اما دقت و صحت هر یک متفاوت است. لذا انتخاب یک مدل (یا روش) دقیق در کنار یک تابع نگاشت مناسب و سازگار برای منطقه مورد مطالعه بسیار مهم است. مدل یا روش-هایی که در این تحقیق، به منظور برآورد تأخیر تروپوسفری و استفاده از آن در ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار گرفته شامل بخش (۱-۲) و (۲-۲) می شود.

۲-۱- برآورد تأخیر تروپوسفری با استفاده از مدل های تجربی محلی و جهانی (مانند: Ifadis, Hopfield, Saastamoinen و ...):

در این روش تأخیر تروپوسفری کل برای راستای قائم، در قالب یک مدل استاندارد و به تفکیک بخش خشک (ZHD) و تر (ZWD)، با استفاده از مقادیر پارامترهای هواشناسی (فشار، دما، رطوبت) و یکسری ثوابت تجربی، قابل برآورد می باشد. تأخیر خشک که تقریباً ۸۸٪ تأخیر تروپوسفری کل در راستای قائم می باشد بر اساس قانون تعادل هیدرواستاتیکی بدست می آید و تابعی از فشار سطح است [۲]. تأخیر تر با نسبت ۱۲٪ از مقدار تأخیر کل وابسته به دما و رطوبت است که باید بصورت محلی برآورد گردد [۲]. رابطه (۱) می تواند بیانگر تأخیر تروپوسفری کل در راستای انتشار سیگنال باشد که در نتایج برآورد

۱ Zenith Hydrostatic Delay

۲ Zenith Wet Delay

$$ZHD = 10^{-6} K_1 \frac{R_d}{g_m} p_0 = \frac{0.022275 \left[\frac{m^2}{s^2 \cdot hPa} \right] \cdot P_0}{9.784 \cdot (1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot h)} \quad (7)$$

$$ZWD = 10^{-6} K_1 \frac{R_d}{g_m} \left[P_0 \left(\frac{K_3}{K_1 \left(\lambda + 1 - \beta \cdot \frac{R_d}{g_m} \right) T_0} + \frac{K_2}{K_1 (\lambda + 1)} \right) \times e_0 \right] = 0.002277(1 + D) \times \left(P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) \cdot e_0 - \beta \times \tan^2(z^*) \right) + \delta_R \quad (8)$$

$$D = 0.0026 \cdot \cos 2\varphi + 0.00028 \left[\frac{1}{k_m} \right] \times h_0$$

در روابط (7) و (8) شرح پارامترهای مورد استفاده عبارتست از:

- Z^* : زاویه‌ی زینتی واقعی در محل آنتن گیرنده
- D: تصحیح جاذبه
- T_0 : دمای سطح (در محل آنتن) بر حسب کلونین
- P_0 : فشار سطح در محل آنتن بر حسب میلی بار
- e_0 : فشار نسبی بخار آب بر حسب میلی بار
- β : تصحیح دما وابسته به ارتفاع
- δ_R : تصحیح وابستگی به ارتفاع یا اختلاف ارتفاع.
- h_0 : ارتفاع بیضوی در محل
- φ = عرض جغرافیایی محل

مقادیر پارامترهای فوق و ثوابت محلی روابط (7) و (8) در جدول (1) آمده است:

جدول 1- ثابت‌های استفاده شده در مدل سستامین [6]

K_1	$77.624 \text{ k mbar}^{-1}$
K_2	$16.418 \text{ k mbr}^{-1}$
K_3	$371900 \text{ k}^2 \text{ mbr}^{-1}$
R_d	$287.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ k}^{-1}$
g_m	$9.784 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
β	0.0062 k m^{-1}
λ	3

می‌باشد، که در کنار تابع نگاشت m تحت زاویه‌ی ارتفاعی (ϵ)، بین ماهواره i و ایستگاه گیرنده A بکار گرفته شده است و ترم دوم و چهارم بیانگر میزان تأخیر تروپوسفری در قالب مدل گرادینت افقی، با فرض آزیموت نامتقارن در جهت محور x و y می‌باشد.

در مسائل عملی برای مؤلفه‌های هیدرواستاتیکی و غیر هیدرو استاتیکی بخش نامتقارن ثابت شده با فرض روابط (3) و (4) می‌توان از رابطه (5) بدون کاهش دقت استفاده نمود [10]:

$$m(\epsilon_A^i)_{[AZI]} \approx m(\epsilon_A^i)_{[AZI, HYD]} \approx m(\epsilon_A^i)_{[AZI, WET]} \quad (3)$$

$$G_{A[N]} = G_{A[N, HYD]} + G_{A[N, wet]} \quad (4)$$

$$G_{A[E]} = G_{A[E, HYD]} + G_{A[E, wet]} \quad (5)$$

$$\delta S_{A[Trop]}^i = m(\epsilon_A^i)_{[HYD]} \cdot ZHD_A + m(\epsilon_A^i)_{[wet]} \cdot ZWD_A + m(\epsilon_A^i)_{[AZI]} \cdot (G_{A[N]} \cdot \cos \alpha_A^i + G_{A[E]} \cdot \sin \alpha_A^i) \quad (6)$$

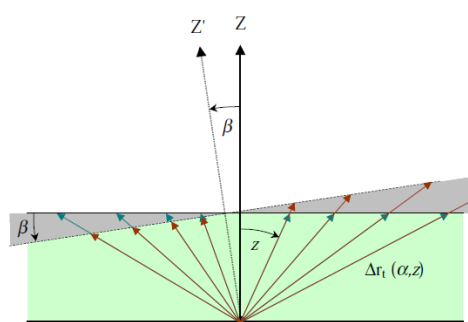
$m(\epsilon_A^i)$: تابع نگاشت جوی تحت زاویه ارتفاعی بین ماهواره i و گیرنده A

ZHD : تأخیر تروپوسفری مؤلفه‌ی خشک در راستای قائم

ZWD : تأخیر تروپوسفری مؤلفه‌ی تر در راستای قائم

$G_{A[N, \dots]}$: گرادینت افقی در راستای محور y ها برای بخش هیدرواستاتیک یا غیرهیدرواستاتیکی

$G_{A[E, \dots]}$: گرادینت افقی در راستای محور x ها برای بخش هیدرواستاتیک یا غیر هیدرو استاتیکی



شکل 2- تیلت تأخیر تروپوسفری قائم تحت زاویه β

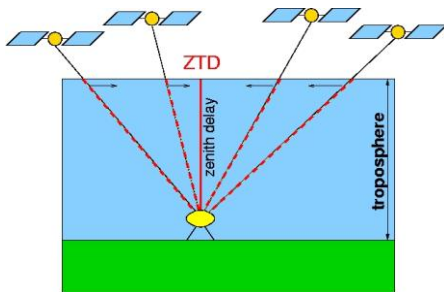
در رابطه (6) مقادیر ZHD و ZWD مطابق روابط (7) و (8) می‌تواند توسط مدل استاندارد جهانی سستامین محاسبه گردد [7]:

ساعت گیرنده و ابهام فاز) به روش سرشکنی با استفاده از نرم افزار Bernese محاسبه می‌گردد [۱۲]. لازم به ذکر است در این روش می بایست پیش از بکارگیری مشاهدات در فرآیند سرشکنی، تصحیحاتی را از قبیل: جایجایی مرکز فاز آنتن ماهواره و گیرنده، جذر و مد زمین صلب، بارگذاری ناشی از جزر و مد اقیانوسی، حرکات صفحات تکتونیکی، بایاس تفاضلی کد، اثر نسبیت و خمیدگی فاز لحاظ نمود. روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب بیانگر ماتریس مجهولات و سطر اول ماتریس ضرایب (بقیه سطرها تا n بصورت مشابه افزایش می یابد) در روند پردازش داده ها می باشند:

$$X = [x_i, y_i, z_i, ZTD_i, N_i^p, c\delta t_{r_i}] \quad (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} -(x_i^p - x_i) / \rho_1 & -(y_i^p - y_i) / \rho_1 & -(z_i^p - z_i) / \rho_1 & 0 & \dots & 0 & M(Z, P, T, e) \end{bmatrix} \quad (15)$$

در ماتریس ضرائب همانطور که دیده می شود $M(Z, P, T, e)$ تابع نگاشت می باشد که رابطه هریک از توابع نگاشت جوی منتخب جایگزین آن قرار گرفته و نهایتاً تعداد ۶ مجهول برای هر اپک، و با فرض n مشاهده فاز و n مشاهده کد در هر اپک، 2n معادله خواهیم داشت.



شکل ۳- تبدیل تأخیر تروپوسفری از راستای انتشار سیگنال (راستای مایل) به راستای قائم با استفاده از توابع نگاشت جهت کاربردهای GPS-Met

در این پژوهش از این روش در بخش برآورد تأخیر تروپوسفری قائم برای سه روز با شرایط آب و هوایی کاملاً متفاوت و تحت زوایای زینتی مختلف به کمک نرم افزار Bernese V5 و کدنویسی در نرم افزار متلب استفاده گردیده است.

۳- توابع نگاشت جوی مورد استفاده

تابع نگاشت جوی از نظر ریاضی، نسبت فاصله ماهواره تا گیرنده در راستای انتشار سیگنال (تحت زوایای زینتی

۲-۲- برآورد تأخیر تروپوسفری به عنوان کمیت مجهول با استفاده از پردازش و سرشکنی معادله مشاهدات GPS (روش PPP)^۱

این روش بر مبنای استفاده از داده های تنها یک ایستگاه GPS (معمولاً طی ۲۴ ساعت)، در کنار اطلاعات دقیق مداری و ساعت ماهواره می باشد. از مزایای مهم آن می توان به مواردی از قبیل: عدم وابستگی نتایج محاسبه شده به سایر نقاط و ارائه مختصات در چارچوب ITRF اشاره نمود و البته از معایب آن نیز مشکلاتی است که در محاسبه ابهام فاز غیر صحیح و اثر تروپوسفر وجود دارد که نهایتاً منجر به عدم حصول دقت (در مقایسه با روش نسبی) می شود. در روش تعیین موقعیت دقیق، تأخیر تروپوسفری به عنوان خطا وارد معادله مشاهدات GPS می شود، سنجح های شبه فاصله کد و فاز با در نظر گرفتن این خطا عبارتند از:

$$p = \rho + d\rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon(p_{mult}) + \varepsilon(p_{rx}) \quad (9)$$

$$\varphi = \rho + d\rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda N + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon(\Phi_{mult}) + \varepsilon(\Phi_{rx}) \quad (10)$$

پس از حذف خطای یونسفری، خطای ساعت ماهواره، خطای مداری و خطای چند مسیری به روش های متداول (استفاده از گیرنده های دوفرکانسه CHOKE RING و زاویه قطع مناسب، بکارگیری معادلات عاری از یونسفر، استفاده از اطلاعات دقیق مداری و ساعت ماهواره)، معادله مشاهدات شبه فاصله و فاز موج حامل روش تعیین موقعیت دقیق عبارتست از:

$$p = \rho + c(\delta t_r) + d_{trop} + \varepsilon_p \quad (11)$$

$$\Phi = \rho + c(\delta t_r) + d_{trop} + \lambda N + \varepsilon_p \quad (12)$$

در روابط فوق خطای تروپوسفر در راستای مایل عبارتست از:

$$d_{trop} = STD = ZTD \times M(Z, P, T, e) \quad (13)$$

بنابراین در این روش خطای تروپوسفر در کنار پارامترهای مجهول باقیمانده دیگر (از قبیل: مختصات گیرنده، خطای

^۱ Precise point positioning

$$\begin{aligned} a_{ht} &= 2.53 \times 10^{-5} km \\ b_{ht} &= 5.49 \times 10^{-3} km \\ c_{ht} &= 1.14 \times 10^{-3} km \end{aligned}$$

رابطه ریاضی بخش تر [۳]:

$$m_{Wet}(\varepsilon) = \left[\frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_{wet}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{wet}}{\sin \varepsilon + c_{wet}}}} \right] \quad (18)$$

۳-۲- تابع نگاشت Davis

رابطه ریاضی این تابع توسط Davis برای هر دو بخش خشک و تر بطور یکسان ارائه گردید و تنها تفاوت در محاسبه ضرایب برای این دو بخش می‌باشد [۵].

$$m_{hydro}(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\tan \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}}} \quad (19)$$

لازم به ذکر است ضرایب هر دو تابع Niell و Davis که شامل a ، b و c می‌شود به ترتیب از طریق اندازه‌گیری پارامترهای جوی و جداول استاندارد قابل محاسبه می‌باشد [۱۰].

۳-۳- تابع نگاشت Chao

فرم ریاضی تابع نگاشت Chao برای هر دو بخش تر و خشک یکسان می‌باشد و تنها تفاوت برای این دو بخش در مقادیر ثوابت می‌باشد.
تابع بخش خشک [۱۰]:

$$m_{hydro}(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0.00143}{\tan \varepsilon + 0.0035}} \quad (20)$$

تابع بخش تر [۱۰]:

$$m_{hydro}(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0.00035}{\tan \varepsilon + 0.017}} \quad (21)$$

۳-۴- تابع نگاشت B&E

رابطه ریاضی تابع نگاشت B&E نیز برای هر دو بخش خشک و تر بطور یکسان ارائه گردیده و تنها پارامتر ورودی متغیر در آن زاویه ارتفاعی بین ماهواره و گیرنده می‌باشد [۸].

$$m(\varepsilon) = \frac{1.001}{\sqrt{0.001^2 + 0.002 + \sin^2 \varepsilon}} \quad (22)$$

مختلف) به همان فاصله در راستای قائم می‌باشد، رابطه (۱۶) بیانگر این نسبت است [۱۰]:

$$M(Z, P, T, \dots) = \frac{\delta S_{[NEU]}}{\delta SZ_{[NEU]}} = \frac{\delta S_{[NEU]}}{ZTD} \quad (16)$$

ZTD: تأخیر تروپوسفری در راستای قائم

$\delta S_{A[NEU]}^i$: تأخیر کلی جو خنثی (تروپوسفر) در مسیر مایل از ماهواره تا گیرنده

همانطور که در رابطه (۱۶) دیده می‌شود توابع نگاشت علاوه بر زاویه زینتی بین ماهواره و گیرنده تابعی از پارامترهای فشار، دما و رطوبت نیز می‌باشند.

از گذشته تاکنون توابع نگاشت مختلفی از سوی محققینی که در این زمینه فعالیت داشته‌اند ارائه گردیده است. همانطور که در مقدمه نیز اشاره گردید در این تحقیق از بین توابع موجود، عملکرد توابع نگاشت Davis، Chao، B&E و Niell را نسبت به برآورد تأخیر تروپوسفری، تحت شرایط آب و هوایی مختلف، زوایای زینتی 1° تا 55° و همچنین برآورد مختصات ایستگاه، مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده‌ایم. دلیل انتخاب این توابع ویژگی‌ها (مثل: سازگاری با شرایط مشابه آب و هوایی منطقه، ارائه نتایج مطلوب تحت زوایای زینتی نزدیک به افق و ... و عملکرد مناسبی است که هر یک از آنها در مطالعات پیشین از خود ارائه داده اند.

روابط ریاضی این ۴ تابع به تفکیک بخش خشک و تر تروپوسفری در ادامه ارائه گردیده است:

۳-۱- تابع نگاشت Niell

رابطه ریاضی بخش خشک [۳]:

$$m_{hydro}(\varepsilon) = \left[\frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{hydro}}{1 + \frac{b_{hydro}}{1 + c_{hydro}}}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_{hydro}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{hydro}}{\sin \varepsilon + c_{hydro}}}} \right] + \left[\frac{1}{\sin \varepsilon} - \frac{1}{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}} \right] \times \frac{H}{1000} \quad (17)$$

۴- داده ها و روش های مورد استفاده در حصول نتایج

داده های اصلی این تحقیق شامل فایل های مشاهداتی (observation)، ناوبری (Navigation) و هواشناسی (Meteorology) میباشد که برای ۳ روز از سال ۲۰۱۲ با شرایط آب و هوایی مختلف (آفتابی پاییزی، بارانی تابستانی و برفی زمستانی) مورد استفاده قرار گرفته اند.

جدول ۲- مقادیر میانگین پارامترهای جوی در سه روز با شرایط آب و هوایی مختلف

تاریخ میلادی روزهای استفاده از داده ها	میانگین فشار (هکتوپاسکال)	میانگین دما (سانتیگراد)	میانگین رطوبت نسبی (درصد)
30 July	860.8	24	66.3
30 October	869.85	18.5	43.13
07 January	864.8	1.375	61.5

علاوه بر داده های اصلی ایستگاه، فایل های مداری دقیق، ساعت ماهواره و پارامترهای توجیه زمین از سایت IGS و اطلاعات هواشناسی ۳ روز مشخص شده در جدول نیز از اداره کل و مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی استان آذربایجان شرقی اخذ گردیده اند.

۴-۱- برآورد تأخیر تروپوسفری در راستای قائم و تحت زوایای زینتی ۱° تا ۵۵°

برای این بخش از نتایج، همانطور که پیش تر توضیح داده شد، تأخیر تروپوسفری با لحاظ نمودن هر یک از توابع نگاشت جوی منتخب، در راستای قائم، برای روزهای مشخص شده در جدول شماره ۲، محاسبه گردید.

مقادیر بدست آمده برای هر تابع نگاشت، طی ۲۴ ساعت، با نمایش فواصل زمانی یک ساعته، در قالب نمودارهای اشکال (۵) الی (۷) قابل مشاهده می باشد.

به منظور مقایسه ی دقت (میزان تمرکز داده ها حول مقدار میانگین) هر یک از توابع نگاشت جوی، از کل مقادیر برآورد شده ZTD در هر روز میانگین گیری نموده و آنرا با نماد \overline{ZTD} در رابطه (۲۳) نمایش داده ایم، سپس حاصل اختلاف مقدار محاسبه شده توسط هر تابع نگاشت از مقدار میانگین به عنوان خطای ظاهری (V_i) محسوب گردیده و در نهایت مقدار انحراف معیار نیز مطابق رابطه (۲۴) محاسبه شده است:

$$V_i = ZTD_i - \overline{ZTD} \quad (23)$$

$$\delta_{std} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2}}{n-1} \quad (24)$$

نمودارهای ارائه شده و نتایج این بخش می تواند بیانگر تأثیر انتخاب توابع نگاشت مختلف، تحت شرایط آب و هوایی متغییر، در برآورد تأخیر تروپوسفری قائم برای منطقه مورد مطالعه باشد.

با توجه به نزدیک بودن کلیه مقادیر، از بین نمودارهای اشکال (۸) الی (۱۱) نمودار تابعی که نزدیکترین مقادیر را نسبت به میانگین برآورد شده داشته باشد یا به عبارت دیگر کمترین مقدار انحراف معیار را در هر روز به خود اختصاص دهد به نحو دقیق تری توانسته تأخیر تروپوسفری را تصویر کند.

از آنجائیکه یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در انتخاب توابع نگاشت جوی، زاویه زینتی بین گیرنده و ماهواره می باشد لذا توابع منتخب در ارزیابی دیگری تحت شرایط آب و هوایی و زوایای زینتی متغییر بین ۱° تا ۵۵°، مورد آزمایش قرار گرفتند. برای این منظور ابتدا فایل های RINEX برای هر روز پردازش شده و آزیموت و زاویه زینتی مربوط به ماهواره های هر اپک استخراج و برای هر تابع نگاشت با کدنویسی در نرم افزار MATLAB منظور گردیدند.

میانگین مقادیر تأخیر تروپوسفری مایل برای هر ۴ تابع نگاشت جوی در هر روز، تحت هر یک از زوایای زینتی بین محدوده مذکور، محاسبه شده و اختلاف مقادیر هر تابع نسبت به مقدار میانگین در نمودارهای اشکال (۱۲) الی (۱۴) نشان داده شده است.

۴-۲- نتایج حاصل از برآورد مختصات ایستگاه دائم GPS

همانطور که در مقدمه و بخش ۲ اشاره گردید انتخاب مدل و روش مناسب برآورد در کنار تابع نگاشت جوی و مدل گرادایانت افقی، با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و زوایای زینتی متغییر، تأثیر بسزایی در محاسبه تأخیر تروپوسفری دارد. محاسبه هرچه دقیق تر و صحیح تر این تأخیر موجب رسیدن به دقت و صحت مطلوب در تعیین مختصات ایستگاه و کاربردهای آن در ژئودزی می گردد.

از آنجائیکه پیش تر از مدل جهانی سستامینن برای منطقه مورد مطالعه استفاده گردیده و طبق ادعای محققین نتایج مطلوبی را در برآورد بخش هیدرواستاتیکی تأخیر تروپوسفری به دنبال داشته است [۳]، لذا در این پژوهش تصمیم گرفته شد با استفاده از مدل مذکور ابتدا تأخیر تروپوسفری در راستای قائم برآورد گردد و سپس با لحاظ نمودن توابع نگاشت مورد نظر، تأخیر در راستای انتشار سیگنال محاسبه شود. در نهایت نیز

جدول ۳- موقعیت جغرافیایی دقیق و مشخصات ایستگاه دائمی GPS تبریز

نام ایستگاه	تبریز
ارتفاع از سطح دریا	۱۵۱۲.۱۲۰۱ متر
طول جغرافیایی	46°20'35.73586"
عرض جغرافیایی	38°03'20.34758"
کد	TABZ
قاچ	۳۸
نوع گیرنده	ASHTECH UZ-12
نوع آنتن	ASH7019-45-B-M

۵- نتیجه‌گیری

به منظور برآورد تأخیر تروپوسفری قائم، تحت شرایط آب و هوایی متغیر در منطقه مورد مطالعه، انتخاب تابع نگاشت Niell با کمترین مقدار انحراف معیار، نسبت به دیگر توابع، از لحاظ دقت مناسب تر به نظر می‌رسد. در برآورد تأخیر تروپوسفری مایل، با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی متغیر در کنار تغییرات زاویه زینتی در می‌یابیم که توابع نگاشت انتخاب شده برای زوایای کمتر از ۳۰° عملکرد تقریباً مشابهی دارند، این در حالی است که برای زوایای زینتی بین ۳۰° تا ۵۵° و روزهای برفی و بارانی نمودارهای تابع نگاشت Niell و Davis با کمترین مقدار شیب یا همان اختلاف از مقدار میانگین گزینه بهتری می‌باشند.

نهایتاً در زمینه برآورد مختصات ایستگاه نیز مؤلفه‌های مختصاتی بدست آمده از تابع نگاشت Niell کمترین مقادیر اختلاف از مختصات ثابت ایستگاه را برای هر ۳ روز داشته‌اند، که البته عامل مقدار اختلاف موجود را می‌توان به سه مورد احتمالی ذیل نسبت داد: ۱. عدم توانایی مدل سستامینن در محاسبه دقیق بخش غیر هیدرواستاتیکی تروپوسفر ۲. شرایط آب و هوایی تقریباً نامطلوب برای مشاهدات طی سه روز منتخب ۳. ناسازگاری احتمالی مدل گرادیانت افقی ثابت با توابع نگاشت انتخاب شده

شایان ذکر است پس از تابع نگاشت Niell، تابع Davis عملکرد بهتری را نسبت به دیگر توابع در برآورد پارامترهای مذکور از خود ارائه می‌دهد که از جمله دلایل آن می‌توان به نحوه برآورد ثوابت این دو تابع اشاره نمود، بطوریکه جهت محاسبه ثوابت هر ۲ تابع از مقادیر پارامترهای هواشناسی نیز استفاده می‌گردد.

فایل اصلاح شده به روند پردازش داده‌ها اضافه شده و عملکرد مدل و توابع نامبرده، تحت شرایط یکسان، برای بحث محاسبه مختصات ایستگاه مورد ارزیابی قرار گیرد.

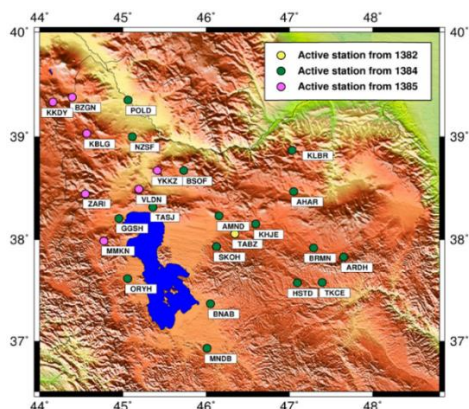
در جداول ۴ الی ۱۲ مؤلفه‌های مختصاتی Z, Y, X ایستگاه که طبق توضیحات فوق با بکارگیری هریک از توابع نگاشت جوی برای سه روز با شرایط آب و هوایی متغیر محاسبه گردیده‌اند، مشاهده می‌گردد. محتوی ستونهای اول و دوم این جداول به ترتیب شامل بیشترین و کمترین اختلاف مؤلفه مختصاتی محاسبه شده در طول یک روز، نسبت به مؤلفه مختصاتی ثابت ایستگاه می‌باشد. در ستون سوم مؤلفه مختصاتی ثابت ایستگاه به عنوان مقدار واقعی (صحیح و بدون خطا) در نظر گرفته شده و پس از تعیین مقدار خطای واقعی طبق رابطه (۲۵):

$$e_{t_i} = x_i - \hat{x} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) پارامتر \hat{x} مؤلفه مختصاتی ثابت ایستگاه و x_i مؤلفه مختصاتی محاسبه شده می‌باشد، انحراف معیار واقعی طبق رابطه (۲۶) محاسبه گردیده است که بعبارتی بیانگر میزان صحت مؤلفه‌های محاسبه شده می‌باشد:

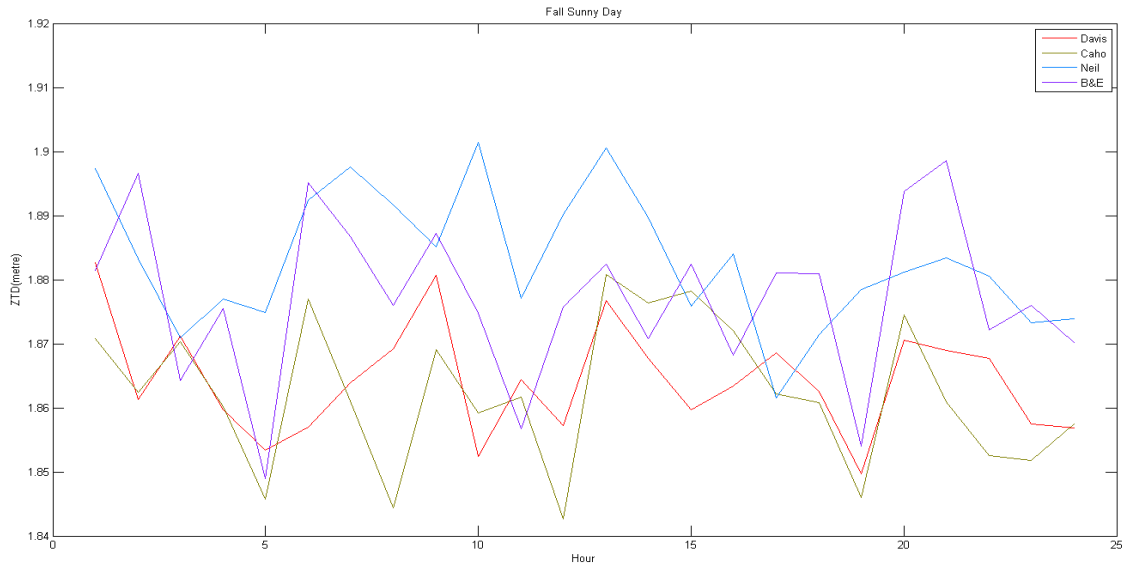
$$\delta_{tr} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n V_{t_i}}}{n-1} \quad (26)$$

در ستون آخر جداول نیز میانگین مقادیر محاسبه شده برای هر مؤلفه در هر روز به عنوان معیار لحاظ گردیده و پس از محاسبه خطای ظاهری، مقدار خطای انحراف معیار استاندارد تعیین شده که می‌تواند بیانگر دقت (تمرکز داده‌ها حول مقدار میانگین) نتایج بدست آمده باشد، مشاهده می‌گردد.

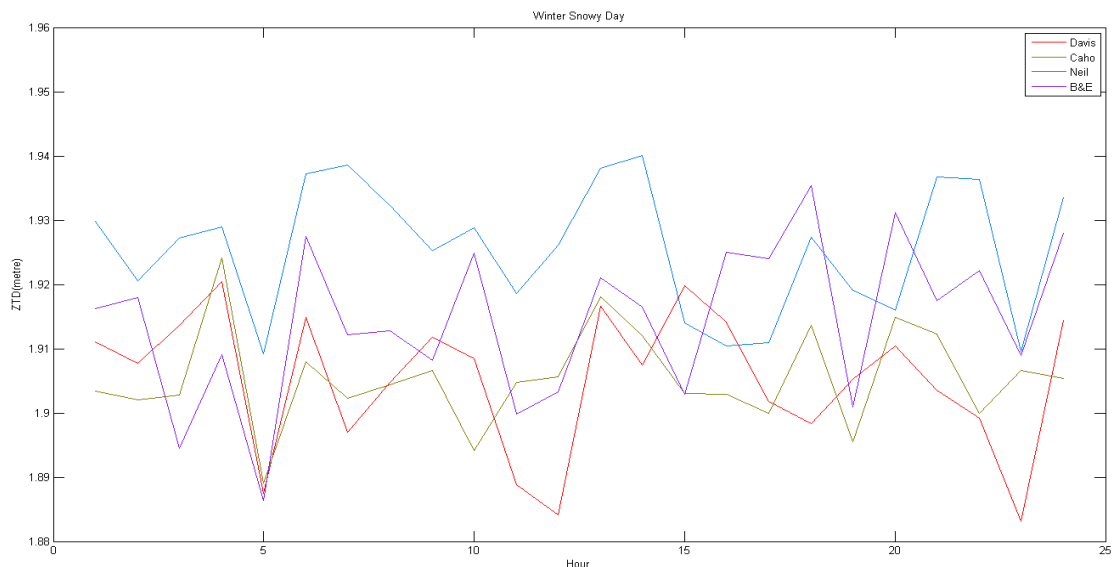


شکل ۴- پراکندگی و قدمت ایستگاه‌های GPS در شمال غرب

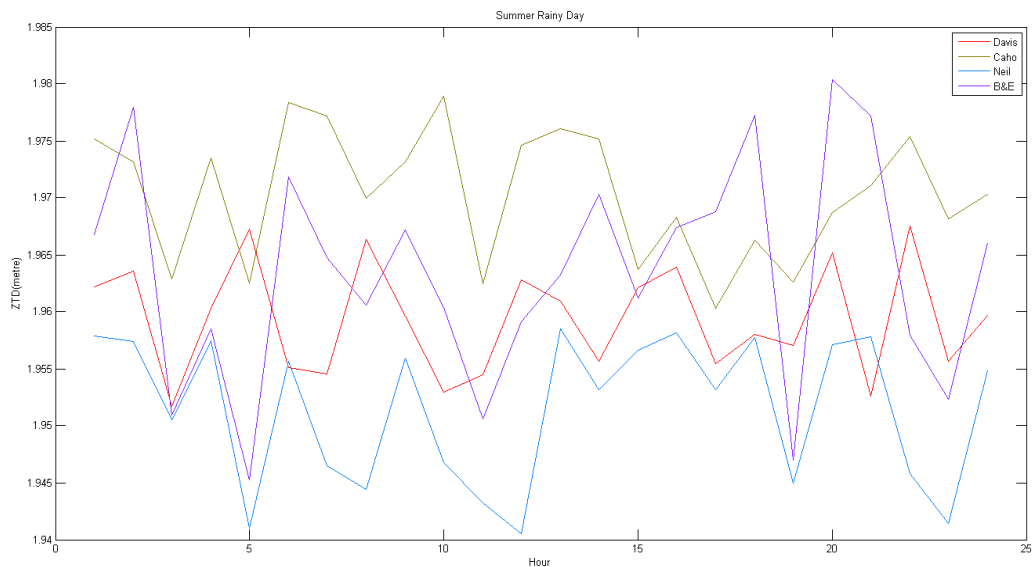
کشور [۳]



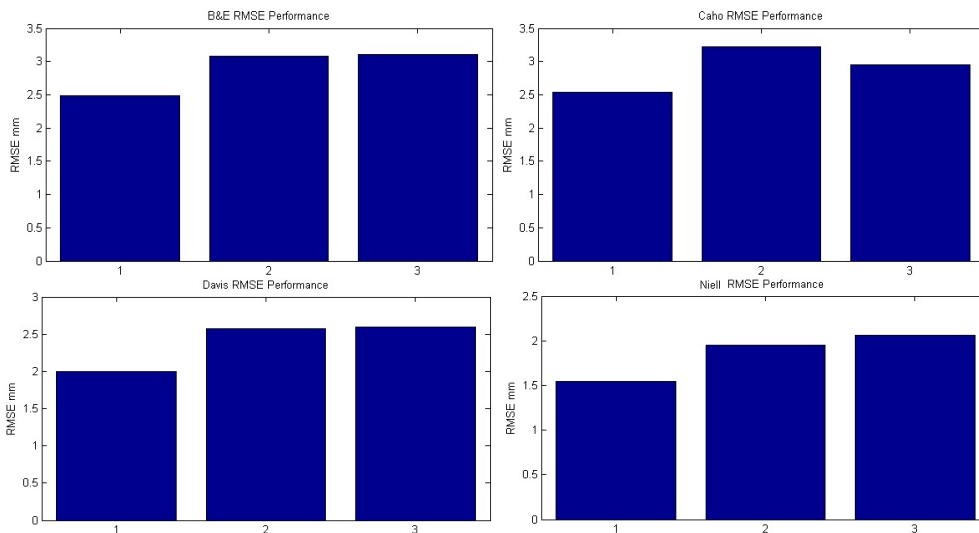
شکل ۵- نمودار برآورد تأخیر تروپوسفری در راستای قائم (نمایش فواصل زمانی ۱ ساعته)، روز آفتابی پاییزی



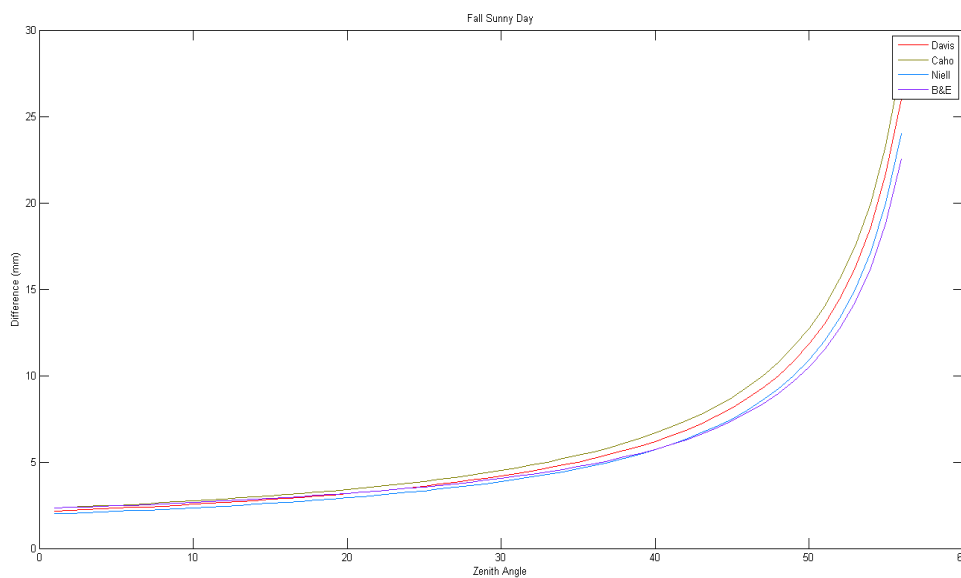
شکل ۶- نمودار برآورد تأخیر تروپوسفری در راستای قائم (نمایش فواصل زمانی ۱ ساعته)، روز برفی زمستانی



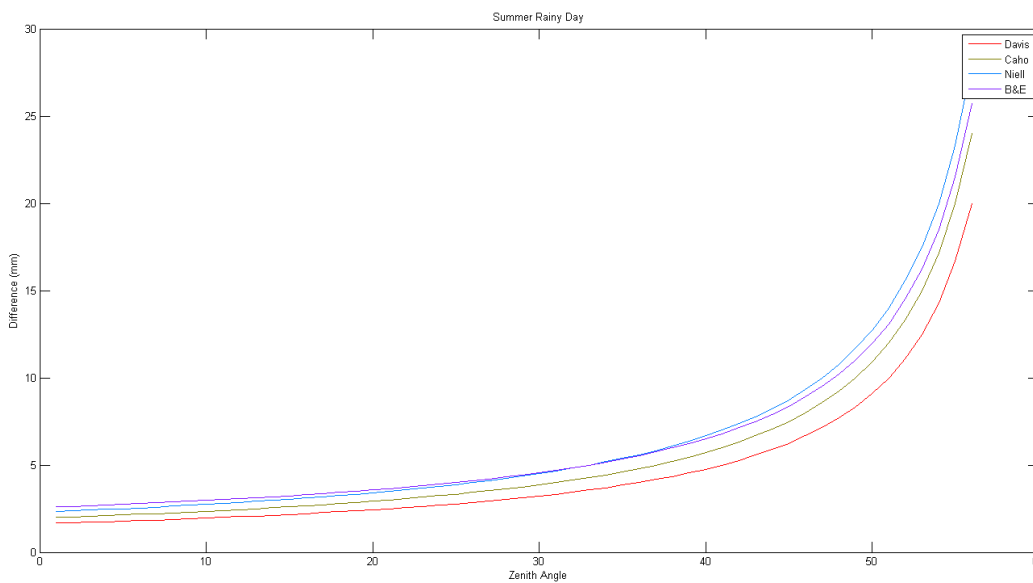
شکل ۷- نمودار برآورد تأخیر تروپوسفری در راستای قائم (نمایش فواصل زمانی ۱ ساعته)، روز بارانی تابستانی



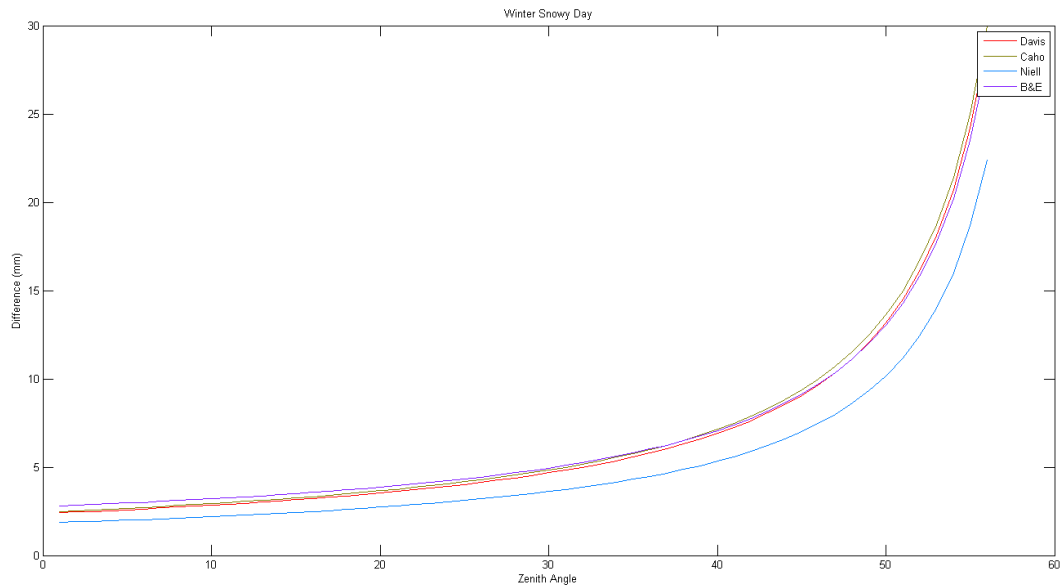
شکل ۸، ۹، ۱۰، ۱۱- نمودارهای انحراف معیار هر ۴ تابع نگاشت مختلف نسبت به روز بارانی تابستانی، برفی زمستان، آفتابی پاییزی



شکل ۱۲- نمودار مقایسه رفتار توابع نگاشت مختلف در برآورد تأخیر تروپوسفری مایل، تحت زوایای ۱° تا ۵۵° در روز آفتابی پاییزی



شکل ۱۳- نمودار مقایسه رفتار توابع نگاشت مختلف در برآورد تأخیر تروپوسفری مایل، تحت زوایای ۱° تا ۵۵° در روز بارانی تابستانی



شکل ۱۴- نمودار مقایسه رفتار توابع نگاشت مختلف در برآورد تأخیر تروپوسفری مایل، تحت زوایای 10° تا 55° در روز برفی زمستانی

جدول ۴- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه X در روز بارانی تابستانی (بر حسب متر)

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از X ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از X ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد (دقت)
Niell	۰,۳۵۶	۰,۲۸۸	۰,۳۳۵	۰,۰۲۵
Davis	۰,۳۸۲	۰,۲۹	۰,۳۴۹	۰,۰۲۸
Chao	۰,۳۹۴	۰,۳۲۰	۰,۳۷۵	۰,۰۲۱
B&E	۰,۴۳۱	۰,۳۳۹	۰,۴۱۱	۰,۰۳۲

جدول ۵- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه Y در روز بارانی تابستانی (بر حسب متر)

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از Y ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از Y ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد (دقت)
Niell	۰,۴۳۲	۰,۲۳۱	۰,۳۶۱	۰,۰۶۵
Davis	۰,۴۸۱	۰,۲۷۵	۰,۴۰۵	۰,۰۷۹
Chao	۰,۵۵۵	۰,۴۲۰	۰,۵۱۸	۰,۰۳۶
B&E	۰,۴۳۹	۰,۳۴۰	۰,۳۹۷	۰,۰۳۰

جدول ۶- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه Z در روز بارانی تابستانی (بر حسب متر)

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از Z ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از Z ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد (دقت)
Niell	۰,۹۳۲	۰,۶۸۵	۰,۸۲۹	۰,۰۸۹
Davis	۰,۹۳	۰,۶۶۲	۰,۸۴۲	۰,۱
Chao	۱,۲۵۲	۰,۹۰۱	۱,۱۲۴	۰,۱۶۴
B&E	۰,۹۵۵	۰,۸۰۱	۰,۹۲	۰,۰۶۰

جدول ۷- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه X در روز برفی زمستانی (بر حسب متر)

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از X ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از X ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد (دقت)
Niell	۰,۳۶۷	۰,۲۸۱	۰,۳۳۵	۰,۰۲۵
Davis	۰,۳۸۵	۰,۲۷۱	۰,۳۴۴	۰,۰۳۲
Chao	۰,۳۸۶	۰,۲۹۹	۰,۳۴۴	۰,۰۲۷
B&E	۰,۳۹۹	۰,۲۹۸	۰,۳۶۳	۰,۰۳۳

جدول ۸- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه Y در روز برفی زمستانی (بر حسب متر)

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از Y ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از Y ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد (دقت)
Niell	۰,۴۴۴	۰,۳۱۳	۰,۴۰۹	۰,۰۳۵
Davis	۰,۵۲۶	۰,۳۴۹	۰,۴۸۴	۰,۰۵۷
Chao	۰,۵۶۲	۰,۴۲۲	۰,۵۲۰	۰,۰۴۶
B&E	۰,۵۳۵	۰,۳۸۳	۰,۴۹۴	۰,۰۵۵

جدول ۹- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه Z در روز برفی زمستانی (بر حسب متر)

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از Z ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از Z ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد(دقت)
Niell	۰٫۹۵۷	۰٫۷۶۹	۰٫۹۲۱	۰٫۰۶۲
Davis	۱٫۱۶۶	۰٫۷۲۳	۱٫۰۱۰	۰٫۱۵۳
Chao	۱٫۱۰۳	۰٫۹۰۴	۱٫۰۲۷	۰٫۰۶۳
B&E	۱٫۲۲	۰٫۹۸۱	۱٫۱۳۹	۰٫۰۸۴

جدول ۱۰- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه X در روز آفتابی پاییزی

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از X ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از X ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد(دقت)
Niell	۰٫۳۵۳	۰٫۲۶۵	۰٫۳۴۲	۰٫۰۲۴
Davis	۰٫۳۶۱	۰٫۲۵۲	۰٫۳۰۴	۰٫۴۰
Chao	۰٫۳۷۳	۰٫۲۹۸	۰٫۳۴۵	۰٫۰۲۰
B&E	۰٫۴۲۵	۰٫۳۵۱	۰٫۴۰۸	۰٫۰۲۳

جدول ۱۱- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه Y در روز آفتابی پاییزی

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از Y ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از Y ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد(دقت)
Niell	۰٫۳۳۳	۰٫۲۴۹	۰٫۲۹۷	۰٫۰۳۰
Davis	۰٫۳۷۵	۰٫۲۸۹	۰٫۳۳۸	۰٫۰۲۷
Chao	۰٫۴۴	۰٫۳۰۶	۰٫۳۸۹	۰٫۰۴۹
B&E	۰٫۴۱۴	۰٫۳۶۶	۰٫۴۰۱	۰٫۰۱۴

جدول ۱۲- ارزیابی مختصات برآورد شده ایستگاه دائم GPS تبریز بوسیله توابع نگاشت مختلف نسبت به مؤلفه Z در روز آفتابی پاییزی

تابع نگاشت	ماکزیمم اختلاف از Z ثابت ایستگاه	مینیمم اختلاف از Z ثابت ایستگاه	انحراف معیار واقعی (صحت)	انحراف معیار استاندارد(دقت)
Niell	۰٫۸۵۵	۰٫۶۱۵	۰٫۷۵۴	۰٫۰۸۲
Davis	۰٫۷۸۲	۰٫۶۶۶	۰٫۷۶۴	۰٫۰۳۵
Chao	۰٫۸۴۵	۰٫۶۴۳	۰٫۷۸۳	۰٫۰۶۷
B&E	۰٫۷۶۳	۰٫۷۱۱	۰٫۷۷۰	۰٫۰۱۶

مراجع

- [۱] جمور، یحیی و همکاران. تعیین مقدار بخار آب موجود در اتمسفر با استفاده از تخمین تأخیر تروپوسفری سیگنال های GPS در شبکه ژئودینامیک سراسری ایران IJGN، همایش ژئوماتیک، ۱۳۸۶.
- [۲] عسگری، جمال و همکاران. استفاده از مدل های عددی هواشناسی و روش ردیابی اشعه برای بهبود تعیین موقعیت مطلق دقیق، نشریه علمی- پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، دوره چهارم، شماره ۲، آبان ماه ۱۳۹۳.
- [۳] جهان‌تاب، ع. ارزیابی تغییرات بخار آب موجود در جو به کمک داده‌های ایستگاه‌های دائم GPS (مطالعه موردی: سیل سال ۱۳۹۱ منطقه ارسباران). پایان نامه کارشناسی ارشد گروه نقشه‌برداری - ژئودزی. دانشگاه آزاد اهر. ۱۳۹۳.
- [4] CHAO, C. C.(1972), A Model for Tropospheric Calibration from Daily Surface and Radiosonde Balloon Measurements, Technical Memorandum 391-350, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA
- [5] DAVIS, J. L., T. A. HERRING, I. I. SHAPIRO, A. E. E. ROGERS, and G. ELGERED(1985), Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length, Radio Science, Vol. 20, No. 6, pp. 1593-1607, Nov.-Dec.
- [6] SAASTAMOINEN, J(1972). , Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites, in: HENRIKSEN, The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, pp. 247-251, AGU, Washington, D.C.
- [7] Younes, S.A, Elmezayen, A. G,(2012), A comprehensive comparison of atmospheric mapping functions for GPS measurements in Egypt, Journal of Geodetic Science, 216-223 DOI: 10.2478/v10156-011 Bernese GPS software version 5.0

- [8] Herring, T.A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, in Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, eds. J.C. De Munck and T.A. Th. Spoelstra, Netherland Geodetic Commission Publications in Geodesy, 36, pp. 157-164,1992
- [9] Schuler, T, On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation, STUDIENGANG GEODASY AND GEOINFORMATION UNIVERSITY DER BUNDESWEHR MÜNCHEN, 2001
- [10] Mendes, V.B & Langley, R.B, Effect OF Tropospheric Mapping Functions on Space Geodetic Data,1994
- [11] Hobiger, T & Ichikawa, R, Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning, Earth Planets Space, 60, e1-e4, 2008
- [12] Dach,r , Bernese GPS software version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern, January 2007