استفاده از GPS و تأخیر تروپوسفریکتر جهت برآورد بخار آب موجود در اتمسفر
مطالعه موردی: برآورد بخار آب موجود در اتمسفر در ایستگاه دائمی GPS سازمان نقشهبرداری کشور

علیرضا آزموده اردلان   دانشیارگروه مهندسی نقشهبرداری، دانشکدة فنی، دانشگاه تهران

بیژن شورچه   کارشناس ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشهبرداری، دانشکدة فنی، دانشگاه تهران

چکیده

مشاهدات GPS در چهار ایستگاه دائمی PERM (واقع در ایران)، BAHR (واقع در بحرین)، KIT3 (واقع در قزاقستان)، NSSP (واقع در ارمنستان) در طی روزهای ۲۲ و ۲۳ دسامبر ۲۰۰۰ (DOY: 357-358) مورد استفاده و تأخیر کلی در راستای قائم برای این ایستگاهها به دست آمده است. به کمک مشاهدات فشار و دما جمعآوری شده در ایستگاه مهرآباد مربوط به سازمان هواشناسی کشور و تأخیر کلی به دست آمده برای ایستگاه PERM بخار آب معلق در اتمسفر برای این ایستگاه برآورد شده است. جهت کنترل نتایج حاصله تأخیر کلی در راستای قائم برآورد شده در مطالعه موردی برای ایستگاه KIT3 با تأخیری که توسط IGS برای این ایستگاه محاسبه نموده است، مقایسه گردیده است. نتایج حاصل بیانگر امکان برآورد دقیق بخار به کمک GPS میباشد. در این مقاله اصول تئوری و نتایج حاصل از مطالعات موردی ارائه خواهند شد.

کلمات کلیدی: بخار آب، انکسار جوی، GPS، ایستگاه دائمی، رادیو سوند، رادیومتر.

Computation of the Water Vapor of the Atmosphere by GPS Case study: Computation of the Water Vapor at the Permanent GPS Station of the National Cartographic Center of Iran

A. A. Ardalan and B. Shoorcheh

Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran

Abstract

In this paper application of GPS observation for determination of water vapor of the Earth's atmosphere has been studied based on 4 permanent GPS stations, namely, PERM (in Iran), BAHR (in Bahrain), KIT3 (in Kazakhstan), and NSSP (in Armenia). The obtainable accuracy of the water vapor by GPS has been investigated by comparison of the computed Zenith Total Delay (ZTD) in this study at the KIT3 station by that computed by International GPS Service (IGS). The results of the comparison ensuring the success of atmospheric water vapor determination by GPS and as such the presented methodology can be readily applied at all existing permanent GPS station of the country and those that would be established in future. Since so far there has been no permanent station for the observation of the water vapor in Iran, the results of this study provides the possibility of using the permanent GPS stations, in addition to their geodynamic and positioning missions for the meteorological applications.

Key words: Water vapor, Atmospheric refraction, GPS, Permanent station, Radiosonde, Radiometers.

۱- مقدمه

تعیین بخار آب موجود در جو از دو جنبه حائز اهمیت است: ۱- پیشبینی کوتاه مدت آب و هوا (مثلاً پیشبینی ۲۴ ساعت آینده). توضیح آنکه بخار آب و تراکم آن در مکان و زمان متغیر بوده و تأثیر مستقیم بر تغییر دما و آب و هوا از خود بر جای میگذارد. ۲- بررسی تغییرات دراز مدت بخار آب که میتواند حتی موجب تغییرات در ساختار اقلیمی یک منطقه گردد [۱].

روش مستقیم برای اندازهگیری بخار آب مبتنی بر استفاده از دستگاههای رادیوسوند(۱) و بخارسنج رادیومتری(۲) میباشد. این وسائل بسیار گران و پرهزینه بوده و به علاوه امکان پوشش کامل اطلاعاتی در ۲۴ ساعت شبانه روز را فراهم نمیآورند. در سال ۱۹۹۲ بیوایز(۳) [۲] استفاده از GPS را به عنوان ابزاری در جهت تعیین بخار آب موجود در هوا پیشنهاد نمود. روش پیشنهادی بیوایز، توسط محقق دیگری بنام روکن(۴) در سال ۱۹۹۳مورد مطالعه قرار گرفت [۳] و ایشان از طریق مشاهدات GPS، بخار آب موجود در جو را محاسبه کرد و با نتایج بخارسنجهای رادیومتری مقایسه نمود و بدین ترتیب قابلیت بکارگیری پیشنهاد بیوایز به صورت تجربی به اثبات رسید.

اساس استفاده از امواج GPS برای برآورد بخار آب موجود در جو، بر مبنای تأثیرپذیری سیگنالهای این وسیله در عبور از لایههای مختلف جو است. این تأثیرپذیری یا به عبارتی علمی انکسار (یا شکست) در امر تعیین موقعیت، خطا محسوب شده و همواره تلاش در جهت حذف و یا کاهش آن صورت میگیرد. از طرفی دیگر اگر موقعیت گیرندة GPS به دقت معلوم باشد، از مشاهدات GPS میتوان به عنوان ابزاری در جهت تعیین اثرات جوی و مدلسازی آنها بهره جست.

سیگنالهای ماهوارههای GPS با توجه به ارتفاع ماهواره (۲۰۰۰۰ کیلومتری بالای سطح زمین) از لایههای مختلف تروپوسفر و یونسفر عبور میکنند. یونسفر برای سیگنالهای GPS (فرکانس موج L_1 و فرکانس موج L_2) دیسپرسیو(۵) بوده و لذا با ترکیب سیگنالهای رسیده از دو موج L_1 و L_2 از نظر تئوری میتوان انکسار ناشی از این محیط (یونسفر) را به طور کامل حذف نمود. در عمل با توجه به خطاهای اندازهگیری همواره مقداری اثر ناشی از یونسفر بر نتایج حاصل به کمک دو موج حامل L_1 و L_2 باقی خواهد ماند که در بسیاری از کاربردها قابل چشم پوشی است. تروپوسفر نسبت به فرکانس امواج GPS خنثی بوده و لذا امکان حذف آن با اندازهگیری بر روی دو فرکانس میسر نمیباشد. این موضوع هرچندکه در تعیین موقعیت به عنوان یک عامل بازدارنده و مزاحم رخ مینماید از دیدگاه هواشناسی میتواند رخ دادی مثبت و با اهمیت باشد. چراکه در صورت آگاهی کامل از موقعیت گیرنده میتوان کلیة خطاهای به وجود آمده بر اثر تروپوسفر را به فشار، دما و رطوبت این لایه نسبت داده و با مدلسازی مناسب از تأخیرات (انکسارات) ناشی از تروپوسفر به به پارامترهای جوی رسید. در این میان ایستگاههای دائمی GPS میتوانند بهترین ابزار در جهت هواشناسی باشند. چراکه از یک سو اندازهگیریهای طولانی مدت باعث دستیابی به مختصات دقیق این ایستگاهها گردیده و از طرفی دیگر پیوستگی اندازهگیریها در این ایستگاهها امکان مطالعه پیوسته تغییرات اثرات جوی را فراهم میآورد.

با این مقدمه به بخش بعد و ارائه تئوری تعیین بخار آب موجود در جو از طریق سیگنالهای GPS خواهیم رفت.

۲- نحوه تعیین بخار آب از طریق سیگنالهاي GPS

در اينجا فرض میکنیم که کلیه عوامل ایجاد کننده خطا در اندازهگيري موقعیت با GPS حذف شده باشد و تنها اثر انکسار تروپوسفري باقي مانده است. اثر انکسار یا تأخیر حاصل از عبور امواج GPS از این لایه یا به عبارتی d_{trop} را میتوان به صورتهای ذیل نوشت [۴].

$$d_{trop} = \int_{path} (n-1)ds \qquad (۱)$$

$$d_{trop} = 10^{-6} \int_{path} N ds \qquad (۲)$$

1- Radiosonde
2- Water Vapor Radiometers
3- Bevise
4- Rocken
5- Dispersive

در روابـط ۱ و ۲، n و N بـه ترتيب ضــريب انكسار[1] و قابــليت انكسار[2] هستند كه با يكديگر بدين صورت در ارتباط ميباشند.

$$N = 10^6(n - 1) \qquad (۳)$$

ساستاموينن[3] [۵] تأخير تروپوسفري را به دو بخش تـر و خشـک و متناظر با آن قابليت انكسار "تَر" N_W و قابليت انكسار "خشک" N_D تقسيم ميكند. تأخير تَر تابعي از بخار آب و تأخير خشک تابعي از گازهاي خشک اتمسفر است. تأخير خشک با استفاده از مشــاهدات فشار و دما مشاهده شده در سطح زمين قابـل مدلسازي ميباشد. ولي تأخير تر به خاطر متغير بودن بــخار آب در مكان و زمان با استفاده از مشاهدات انجام گرفته در سـطح زمين قابل برآورد نميباشد. بر قابليت انكسار تر و خشک رابطــة ذيل حاكم ميباشد[۷]:

$$N = N_D + N_W = 77.6(\frac{P}{T}) + 3.73 \times 10^5(\frac{e_W}{T^2}) \qquad (۴)$$

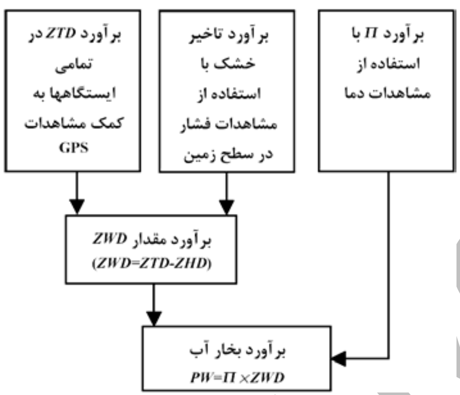
در رابطه ۴، e فشـار بخار آب بر حسب ميلي بار، T دمـاي مطلق برحسب درجه كلوين و P فشار برحسب ميلي بار ميباشد. با جايگزيني ۴ در ۲، داريم:

$$\begin{aligned} d_{trop} &= d_D + d_W \\ &= 10^{-6}\int_s (77.6(\frac{P}{T}) + 3.73 \times 10^5(\frac{e_W}{T^2}))ds \end{aligned} \qquad (۵)$$

در رابطــة ۵ دو بخش انتگرال مربـوط به تأخير خشک d_D و تأخير تر d_W (SWD[4]) ميباشند، بنابراين ميتوان نوشت:

$$\begin{aligned} d_W &= SWD_i^m \\ &= 10^{-6}\int_{ANTi}^{GPSm} N_W ds \\ &= 10^{-6}\int_{ANTi}^{GPSm} 3.73 \times 10^5(\frac{e_W}{T^2})ds \end{aligned} \qquad (۶)$$

در انتگرال ۶، GPSm نشاندهنده ماهوارة mام و ANTi نشان دهنده گيرنده نام است. برآورد بخار آب موجود در جو به كمک GPS بـه دو صـورت (۱) مطلق و (۲) نسبي امكانپذير است [۷]. در روش مطلق لازم اسـت حداقل يكي از ايستگاهها مرجع، در فاصله بيش تر از ۵۰۰ كيلومتر از ساير ايستگاههاي به كـار رفتـه در محاسبات واقع باشد. در اين صورت تأخير تر با اندازهگيـري فشـار و دما از طريق GPS ميسر ميباشد. روش نسبـي نيازمنـد يـک ايسـتگاه مرجع مجهز بـه GPS، دماسـنج، فشـارسنج و رطوبتسنج راديومتري و ايستگاه ديگر مجهز به وسايل اندازهگيري دما و فشار ميباشد. در اين روش محدوديت طول مبنا وجود ندارد. مراحل اصلي برآورد بخار آب موجود در جو به كمک GPS در روش مطلق در شكل (۱) آورده شده است.



شكل ۱- مراحل اصلي برآورد بخار آب موجود در جو به كمک GPS. در نمودار فوق ZTD[5] تأخير كلي در راستاي قائم، ZHD[6] تأخير خشک در راستاي قائم، ZWD[7] و □ ضريب تبديل تأخيـر تر به بخار آب ميباشد.

مشاهدات فاز موج حامل L_1 و L_2 به صورت ذيل قابل نمايش ميباشند [۸]:

$$\begin{aligned} L_1 &= r + C(dt - dT) + l_1 N_1 + d_{orb} + d_{trop} \\ &- K_2 I + d_{mult/L_1} + e(L_1) + e(pcv_{L_1}) \end{aligned} \qquad (۷)$$

1- Refractive Index
2- Refractivity
3- Saastamoinen
4- Slant Wet Delay (SWD)

5- Zenith Total Delay (ZTD)
6- Zenith Hydrostatic Delay (ZHD)
7- Zenith Wet Delay (ZWD)

$$L_2 = r + C(dt - dT) + \lambda_2 N_2 + d_{orb} + d_{trop} - K_1 I + d_{mult/L_2} + \varepsilon(L_2) + \varepsilon(pcv_{L_2}) \qquad (۸)$$

در روابط فوق r فاصله هندسي بين گيرنده و ماهواره، C سرعت نور در خلا، dt خطاي ساعت گيرنده، dT خطاي ساعت ماهواره، λ طول موج، N عدد ابهام فاز، d_{orb} خطاي مداري ماهوارههاي GPS، d_{trop} خطاي تروپوسفري، K ضريب مربوط به خطاي يونسفري، d_{mult} خطاي چند مسيري شدن امواج(1)، e خطاي نويز گيرنده، e_{pcv} خطاي مربوط به نوسانات مركز فاز آنتن گيرنده GPS و I عددي ثابت ميباشند. جدول (۱) دربرگيرنده خطاهاي مختلف در اندازهگيري موقعيت با GPS و نحوه كاهش و حذف آنها ميباشد. ارتباط K_j با دو فركانس موج L1 و L2 به صورت $K_j = f_j^2 / (f_1^2 - f_2^2)$ ميباشد.

جدول ۱- خطاهای مختلف اندازهگیری موقعیت با GPS و نحوه کاهش یا حذف آنها

نوع خطا	روش حذف و یا کاهش
خطای ساعت گیرنده و ماهواره $(dt\,,\,dT)$	روش تفاضلی دو گانه
خطاهای مداری d_{orb}	اطلاعات مداری دقیق(2)
خطاهای یونسفریک d_{ion}	موج عاری از اثر یونسفر (L_3)
خطای چند مسیری شدن سیگنال d_{mult}	آنتن Choke-ring و انتخاب زاویه ارتفاعی ۱۵ به بالا
خطاهای آنتن گیرنده $\varepsilon(pcv)$	فایلهای کالیبراسیون آنتن گیرنده

بعد از حذف و یا کاهش خطاها مطابق جدول (۱) معادلات ۷ و ۸ را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$L_1 = r + \lambda_1 N_1 + d_{trop} + e_{L1} \qquad (۹)$$

$$L_2 = r + \lambda_2 N_2 + d_{trop} + e_{L2} \qquad (۱۰)$$

1- Multipath
2- Precise Orbit

تركيب خطي دو معادله فوق به صورت ذيل كه اصطلاحاً به تركيب خطي L_3 معروف است [۹] موجب حذف اثر خطاي يونسفر ميگردد.

$$L_3 = \frac{1}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}(f_{L_1}^2 L_1 - f_{L_2}^2 L_2) = r + \lambda_{L_3} N_{L_3} + d_{trop} + e_{L_1,L_2} \qquad (۱۱)$$

حال اگر طول دارای خطاهاي مداري، ساعت ماهواره، ساعت گيرنده، يونسفر، چند مسيري شدن و مركز فاز آنتن را به صورت ذيل به Δ نمايش دهيم:

$$\Delta_i = r + C(dt - dT) + \lambda_i N_i + d_{orb} - K_j I + d_{mult/L_i} + \varepsilon(L_i) + \varepsilon(pcv_{L_i})$$
$$\forall i = \{1,2\} \text{ and } j = \begin{cases} 1 & \text{if } i = 2 \\ 2 & \text{if } i = 1 \end{cases} \qquad (۱۲)$$

خطای تروپوسفر را میتوان به صورت ذيل به دست آورد:

$$d_{trop} = L_i - \Delta_i \qquad (۱۳)$$

اين تأخير مربوط به امتداد يک ماهواره و گيرنده است. اگر اين تأخير را با استفاده از تابع تصوير $M(e)$ به امتداد قائم (امتداد شاغولي محل قرارگيري آنتن) تصوير نموده [۱۰] و با همين كميت در مورد گيرنده و ماهوارههاي ديگر ميانگينگيري كنيم به برآوردي از تأخير كلي در راستاي قائم (ZTD) خواهيم رسيد. حال اگر تأخير كلي در راستاي قائم را در رابطة (۱۱) قرار دهيم خواهيم داشت:

$$L_3 = r + \lambda_3 N_3 + M(e) ZTD + e_{L_1,L_2} \qquad (۱۴)$$

اگر معادله مشاهده تفاضلي دو گانه را معيار مشاهده قرار دهيم خواهيم داشت:

$$\nabla\Delta L_{AB}^{ij} = L_B^{ij} - L_A^{ij} = \left(L_B^j - L_B^i\right) - \left(L_A^j - L_A^i\right) \qquad (۱۵)$$

$$\begin{aligned}\nabla \mathrm{D}\, L_{AB}^{ij} = &\{\left(r_B^j + M(e)_B^j ZTD_B \right) \\ &-\left(r_B^i + M(e)_B^i ZTD_B \right)\} \\ &-\{\left(r_A^j + M(e)_A^j ZTD_A \right) \\ &-\left(r_A^i + M(e)_A^i ZTD_A \right)\} \\ &+I_3 \nabla \mathrm{D}\, N_{AB}^{ij} + e \end{aligned} \qquad (۱۶)$$

$$\begin{aligned}\nabla \mathrm{D}\, L_{AB}^{ij} = &\nabla \mathrm{D}\, r_{AB}^{ij} + I_3 \nabla \mathrm{D}\, N_{AB}^{ij} \\ &+\left(M(e)^i - M(e)^j \right)_A ZTD_A \\ &+\left(M(e)^j - M(e)^i \right)_B ZTD_B + e \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

رابطـه ۱۷ می‌توانـد جهت برآورد تأخیر کلی در راستای قائم (ZTD) به کار رود. تأخیر خشک از طریق مشاهدات فشار در سطح زمین قابل برآورد است. برآورد تأخیر خشک براساس مدل ساستـامینـن بـه فـرم ذیل بوده که دارای دقت میلی متری است [۵]:

$$ZHD = \frac{0.002277 P_S}{(1 - 0.0026\cos(2f) - 0.0000028 H_S)} \qquad (۱۸)$$

کمیت ISW[1] معیاري است که از آن براي سنجش بخار آب استفاده میشود. اگر r_W چگالي بخار آب باشد ISW در طول مسیر امواج GPS از ماهواره تا گیرنده به صورت ذیل قابل تعریف است [۹]:

$$ISW_i^m = \int_{ANTi}^{GPSm} r_W ds \qquad (۱۹)$$

با استفاده از قانون گازهاي ایدهال و به کار بردن ثابت گازها براي بخار آب $R_V = 461.5 j / KgK$ خواهیم داشت:

$$ISW_i^m = \frac{1}{R_V} \int_{ANTi}^{GPSm} \frac{e_W}{T} ds \qquad (۲۰)$$

از تقسیم ISW بر چگالي آب، کمیتی به دست میآید که از جنس طول است و "اسلنت واتر" SW[2] نامیده می‌شود.

1- Intergrated Slant Water Vapor
2- Slant Water

$$SW_i^m = \frac{ISW_i^m}{r} \qquad (۲۱)$$

نسبت SW به SWD را با P نمایش می‌دهیم. رابطهٔ P با تغییرات دما به صورت ذیل است [۹]:

$$\begin{aligned}\mathrm{P} &= \frac{SW_i^m}{SWD_i^m} \\ &= \frac{\dfrac{1}{r R_V} \displaystyle\int_{ANTi}^{GPSm} \frac{e_W}{T} ds}{10^{-6} K \displaystyle\int_{ANTi}^{GPSm} \frac{e_W}{T^2} ds} \\ &= \frac{10^6}{r R_V K} \int_{ANTi}^{GPSm} T ds = \frac{10^6}{r R_V K} T_m \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

در رابطـه ۲۲ T_m دمــای متــوسط اتمسفر می‌باشد و با استفاده از مشاهدات دما در سطح زمین به صورت ذیل قابل محاسبه است:

$$T_m = 70.2 + 0.72 T_s \qquad (۲۳)$$

با توجه بـه رابطـه (۲۲) و با داشتن مقدار تأخیر تر تروپوسفري و پارامتر P بخار آب به صورت ذیل قابل برآورد است:

$$PW = \mathrm{P} \times ZWD \qquad (۲۴)$$

PW [3] بخار آب معلق در اتمسفر می‌باشد.

۳- مطالعه موردي: اندازهگیري بخار آب برای ایستگاه دائمي سازمان نقشه برداري

بـراي بــررسـي عــددي روابط و فرمولهاي ذکر شده اقدام بـه برآورد بخار آب موجود در جو در ایستگاه دائمي GPS سـازمــان نقشــهبـرداري بــه نــام PERM از روش مطلق بـــه کمک ایستگاههای دائمی BAHR واقع در بحرین، KIT3 واقع در قزاقستان، NSSP واقع در ارمنستان گردیــد. مشــاهدات مربوط به ایستگاههاي BAHR، KIT3، NSSP از

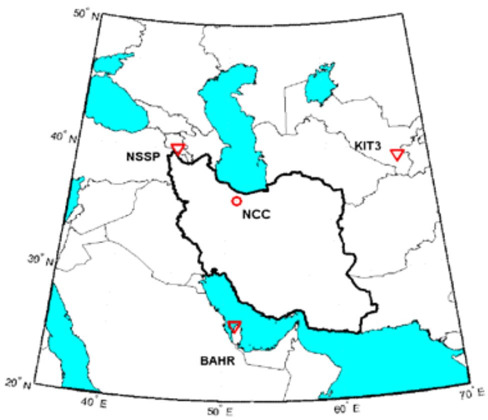
3- Precipitable Water (PW)

طریــق ســایـت اینترنتي ftp://ftp.unibe.ch/ موسـوم بـه CODE[1] تأمین گردید. مشاهدات ایستگاه PERM نیز از طریق سازمان نقشهبرداری در اختیار قرار گرفت. جدول (۲) نشان دهنده دادههاي مورد استفاده و مرجع آنها است.

جدول ۲- دادههاي مورد استفاده در مطالعه موردي و مرجع آنها

مرجع	دادههای مورد استفاده
CODE	فایل Rinex مشاهدات ایستگاههای BAHR, KIT3, NSSP
CODE	پارامترهای مداری دقیق ماهواره
IERS[2]	اطلاعات موقعیت محور دوران زمین
CODE	مختصات دقیق ماهواره
سازمان نقشهبرداری	فایل Rinex مشاهدات ایستگاه PERM
سازمان هواشناسی	فایل هواشناسی

اطلاعات مورد استفاده مربوط به روزهاي ۲۲ و ۲۳ ماه دسامبر سال ۲۰۰۰ میباشد که با نرمافزار برنیز 4.2[3] مورد پردازش قرار گرفت. شکل (۲) نشان دهنده موقعیت ایستگاههاي مورد استفاده است.



شکل ۲- موقعیت ایستگاههاي مورد استفاده در مطالعه موردي

فواصل بـرآورد شـده این ایستگاهها در جـدول (۳) آورده شـده است.

1- Center of Orbit Determination in Europe (CODE)
2- International Earth Rotation Service (IERS)
3- Bernese 4.2

جدول ۳- طولهاي برآورد شده بین ایستگاههاي دائمي GPS مورد استفاده در مطالعه موردي

طول مبنا	فاصلة طول مبنا (برحسب کیلومتر)
BAHR-PERM	۱۰۵۲
KIT3-PERM	۱۴۲۴
NSSP-PERM	۷۸۲

مختصات برآورد شده ایستگاه دائمي سازمان نقشهبرداري در جدول (۴) ذکر گردیده است.

جدول ۴- مختصات حاصل از پردازش براي ایستگاه دائمي سازمان نقشهبرداري (PERM) در سیستم مختصات ITRF-97

نام ایستگاه	X (متر)	Y (متر)	Z (متر)
PERM	۳۲۴۰۴۹۹/۴۸۸	۴۰۴۹۷۴۰/۳۷۰	۳۷۰۱۶۶۳/۰۲۵

کمیتهاي ZTD، ZHD، ZWD و PW در فـواصل زماني یک ساعتــه براي ایستگاه دائمي PERM به همراه میانگین روزانه آنـها با فرض ثابت بودن بخار آب در این فاصله زماني در جـدول (۵) ارائه شده است.

شکل (۳) نمایش دهنده نتایج کمیـت ZTD در دو روز ۲۲ و ۲۳ دسامبر ۲۰۰۰ و شکل (۴) نمـایش دهنـده ZHD در همـان فاصلــة زمانـی اسـت. نمایـش اطلاعات ZWD و PW در شــکل (۵ و ۶) مشخـص شـده است. از آنجائـیکه در ایـستگاه PERM امکان بررسی ارزیابی نتـایج وجـود نداشـت، اقـدام بـه محاسـبة تـاخیر کلـی در راسـتای قائـم ZTD در ایستگاه KIT3 و مقایسة آن بـا محاسبات انجام شده توسط IGS گردید. شـکل (۷) نـشان دهندة نتایج این مقایسه میباشد. همـانطور کـه در ایـن شـکل ملاحظه مـیگـردد توافـق بـسیار خوبـــی بـین نتـایج مـا بـا محاسبـات IGS وجــود دارد. با توجه بــه فلوچـارت شـکل (۱)، بخار آب از مقایسة تأخیر کلی ZTD بـا تـأخیر خـشک ZHD بـه دسـت مـیآیـد. از آنجائـیکـه، همـانطـور کـه در بخـش ۲ در مــورد فرمــول (۱۸) ذکــر گردیـد، این فرمـول دارای دقـت در حــــد میلـیمتــر بـراســاس مطالعــات ساستامینـــن [۵] میبـاشـد. بنابرایـن توافق خوب ZTD محاسبه شـده تـوسط ما و IGS متظمن دقـت بـــالا در بـرآورد بخـار آب موجـود در جـو

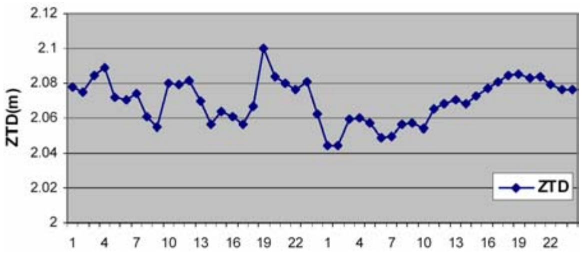
می‌باشد. خلاصة اطلاعـات آمـاری مقایسـة نـشان داده شـده در شکل (۷) در جدول (۶) مندرج است.

جدول ۵- برآورد کمیتهاي ZTD ، ZHD ، ZWD و PW براي فواصل زماني يک ساعته براي ايستگاه دائمي PERM

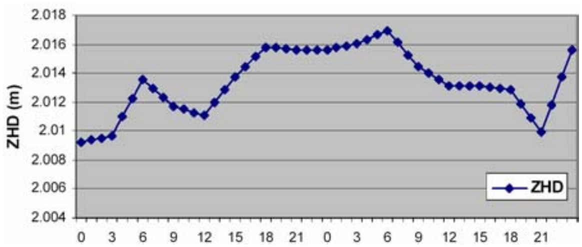
زمان برحسب UTC	ZTD	ZHD	ZWD	PW
۱	۲/۰۷۷۷	۲/۰۰۹۲	۰/۰۶۸۵	۰/۰۱۱۰
۲	۲/۰۷۵۱	۲/۰۰۹۴	۰/۰۶۵۷	۰/۰۱۰۵
۳	۲/۰۸۴۷	۲/۰۰۹۵	۰/۰۷۵۲	۰/۰۱۲۰
۴	۲/۰۸۹۱	۲/۰۰۹۷	۰/۰۷۹۴	۰/۰۱۲۷
۵	۲/۰۷۱۶	۲/۰۱۱۰	۰/۰۶۰۷	۰/۰۰۹۷
۶	۲/۰۷۰۷	۲/۰۱۲۳	۰/۰۵۸۴	۰/۰۰۹۴
۷	۲/۰۷۴۱	۲/۰۱۳۶	۰/۰۶۰۵	۰/۰۰۹۷
۸	۲/۰۶۰۶	۲/۰۱۲۹	۰/۰۴۷۷	۰/۰۰۷۶
۹	۲/۰۵۴۵	۲/۰۱۲۳	۰/۰۴۲۲	۰/۰۰۶۷
۱۰	۲/۰۸۰۳	۲/۰۱۱۷	۰/۰۶۸۶	۰/۰۱۱۰
۱۱	۲/۰۷۹۱	۲/۰۱۱۵	۰/۰۶۷۶	۰/۰۱۰۸
۱۲	۲/۰۸۱۳	۲/۰۱۱۳	۰/۰۷۰۱	۰/۰۱۱۲
۱۳	۲/۰۶۹۵	۲/۰۱۱۰	۰/۰۵۸۴	۰/۰۰۹۳
۱۴	۲/۰۵۶۵	۲/۰۱۲۰	۰/۰۴۴۶	۰/۰۰۷۱
۱۵	۲/۰۶۳۷	۲/۰۱۲۹	۰/۰۵۰۸	۰/۰۰۸۱
۱۶	۲/۰۶۰۹	۲/۰۱۳۸	۰/۰۴۷۱	۰/۰۰۷۵
۱۷	۲/۰۵۶۰	۲/۰۱۴۵	۰/۰۴۱۶	۰/۰۰۶۷
۱۸	۲/۰۶۷۰	۲/۰۱۵۱	۰/۰۵۱۸	۰/۰۰۸۳
۱۹	۲/۱۰۰۳	۲/۰۱۵۸	۰/۰۸۴۵	۰/۰۱۳۵
۲۰	۲/۰۸۳۹	۲/۰۱۵۸	۰/۰۶۸۱	۰/۰۱۰۹
۲۱	۲/۰۷۹۸	۲/۰۱۵۷	۰/۰۶۴۱	۰/۰۱۰۳
۲۲	۲/۰۷۶۲	۲/۰۱۵۶	۰/۰۶۰۶	۰/۰۰۹۷
۲۳	۲/۰۸۰۴	۲/۰۱۵۶	۰/۰۶۴۸	۰/۰۱۰۴
۲۴	۲/۰۶۱۹	۲/۰۱۵۶	۰/۰۴۶۳	۰/۰۰۷۴

جدول ۶- خلاصة اطلاعات آماری مقایسة نشان داده شده در شکل ۷

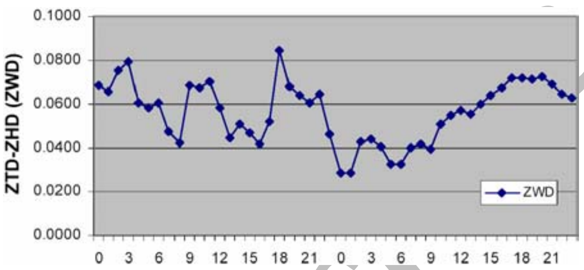
ایستگاه	اختلاف میانگین	RMS	ضریب همبستگی
KIT3	-۰/۰۰۶	۰/۰۱۰	۰/۸۹



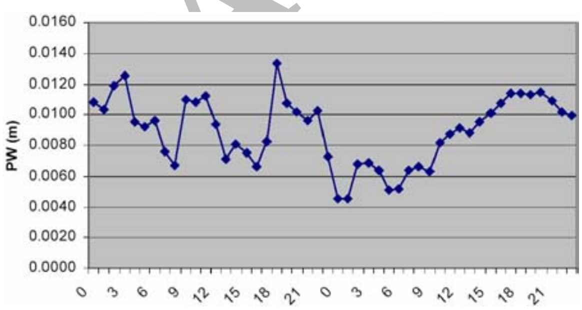
شکل ۳- تغییرات ZTD در فاصله زماني ۴۸ ساعته در روزهای ۲۲ و۲۳ دسامبر سال ۲۰۰۰ (محور افقی زمان به ساعت)



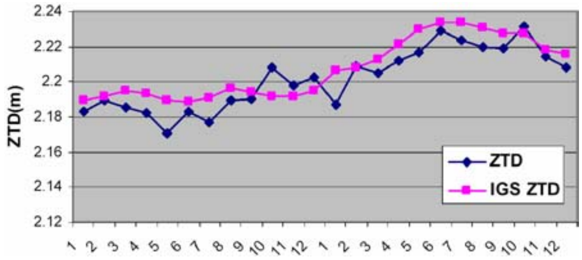
شکل ۴- تغییرات ZHD در فاصله زماني ۴۸ ساعته در روزهای ۲۲ و۲۳ دسامبر سال ۲۰۰۰ (محور افقی زمان به ساعت)



شکل ۵: تغییرات ZWD در فاصله زماني ۴۸ ساعته در روزهای ۲۲ و۲۳ دسامبر سال ۲۰۰۰ (محور افقی زمان به ساعت)



شکل ۶- تغییرات PW در فاصله زماني ۴۸ ساعته در روزهای ۲۲ و۲۳ دسامبر سال ۲۰۰۰ (محور افقی زمان به ساعت)



شکل ۷- نمودار تغییرات IGS ZTD و ZTD برآورد شده براي ایستگاه KIT3 در روزهای ۲۲ و۲۳ دسامبر سال ۲۰۰۰ (محور افقی زمان به ساعت)

۴- نتیجه گیري

در این مقاله امکان برآورد بخار آب با استفاده از GPS مورد بـررسي قرار گرفت. با توجه به نتایج جدول (۶) و شکل (۷) مشخص است که به کمک GPS می‌توان بخار آب موجود در جو را با دقت بالا برآورد نمود. بنابراین نظر به وجود و توسعة ایستگاههای دائمی GPS در کشور برای اهداف ژئودینامیک، پتانسیل بالائی برای تأمین اطلاعات بخار آب، که از نظر هواشناسی دارای اهمیت بالائی می‌باشـند، فراهم آمــده است. از امتیازات عمدة تعیین بخار آب بـه وسیلة GPS در مقایسة با سیستمهاي Radiosonde و Water vapor radiometer پیوسته بودن آنها است که به خاطر پیوستگی مشاهدات ایستگاههای دائمی پدید می‌آید. امید است این تحقیق بتواند راهگشای استفاده از ایستگاههای GPS به منظور برآورد بخار آب در کشور گردد. در خاتمه فلوچارت شکل (۸) جهت راهنمایی بکارگیری روابط ذکر شده جهت برآورد بخار آب ارائه می‌گردد.

شکل ۸- فلوچارت بکارگیري روابط ذکر شده در مقاله جهت برآورد بخار آب با استفاده از مشاهدات ایستگاهاي دائمي GPS

مراجع

[1] Rocken, C., T.V Hove and R. Ware (1997), Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor, Geophysical Research Letters, Vol. 24, No. 24, pp. 3221-3224
[2] Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T.A Herring, R.A Anthes, C. Rocken and R. Ware (1992), GPS meteorology: sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. D14, pp. 15787-15801
[3] Rocken, C., R. Ware, T.V Hove, F. Solheim, C. Alber and J. Johnson (1993), sensing atmospheric water vapor with global positioning system, Geophysical Research Letters, Vol. 20, No. 23, pp. 2631-2634
[4] Hofman-wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins (1994)," Global Positioning System: Theory and Practice". Springer-verlag, win New York, USA.
[5] Saastamoinen, J. (1973), Contribution of the theory of atmospheric refraction, Bulletin of Geodesique, No. 105, pp. 279-298, No. 106, pp. 383-397, No. 107, pp. 13-34
[6] Boccolari, M, S. Fazlagic, L. Lomboroso, P. Frontero, S. Pugnaghi, R. Santangelo, S. Corradini, S. Teggi (2001), perceptible water estimation in comparison between zenith total delay (ZTD) by radiosounding data and by GPS data, Geophysical observatory, DSI, university of Modena and Raggio milia, Italy
[7] Rothacher. M. and L. Mervart (1996). Documentation of the Bernese GPS analysis software (version 4.2). Astronomical Institute, university of Berne, Berne, Switzerland.
[8] Braun, J., C. Rocken, R. Ware, (2000), Validation of line-of-sight water vapor measurement with GPS, GPS Research Group, university corporation for atmospheric research, Boulder, Co.
[9] Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken and R. H. Ware (1994), GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water, J. Appl. Meteorol., 33, 379-386
[10] Kauba, J., P. Heroux, (2000), GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products, Geodetic Survey Division, Natural Research Canada