

# برآورد و تحلیل میزان بخار آب بارش‌زا با استفاده از داده‌های GPS و ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای (مطالعه‌ی موردی: ایران)

سیامک حیدری وارسته<sup>۱</sup>، روح‌الله عمادی<sup>۲\*</sup>، یحیی جمور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئودزی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب  
s.varaste.eng@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب  
sr\_emadi@azad.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست - دانشگاه شهید بهشتی  
y\_djamour@sbu.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۹، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۹)

## چکیده

تعیین بخار آب موجود در جو نقش به‌سزایی در پیش‌بینی شرایط آب و هوایی و مطالعات بارش دارد. به همین دلیل مطالعه‌ی تاخیر تروپوسفری مخصوصاً مولفه‌ی تر که ناشی از وجود بخار آب در جو می‌باشد از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این مقاله مقدار بخار آب توسط داده‌های رادیومتر ماهواره‌ی ارتفاع‌سنجی و داده‌های GPS برآورد شد، که نتایج حاصل از GPS مبنای قرار داده شد و نتایج حاصل از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای با آن مقایسه شد. برای این منظور مشاهدات عبورهای ۱۶ و ۱۳۳ ماهواره‌ی جیسون-۳ با دوره‌ی زمانی ۱۰ روزه در سال ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفت. بعد از پردازش مشاهدات ماهواره‌ی ارتفاع‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار BRAT 3.3، مقدار میانگین بخار آب بارش‌زا در این روش برای شهرهای تنکابن، ارومیه و بندرعباس به ترتیب ۴۵، ۴۴ و ۳۰ میلی‌متر بدست آمد. در روش GPS، با بهره‌گیری از الگوریتم تعیین موقعیت مطلق نقطه‌ای دقیق (PPP) تاخیر تروپوسفری کل در راستای قائم (ZTD) بدست آمد و سپس تاخیر هیدرواستاتیک (ZHD) از تاخیر کلی کسر و در نهایت با اعمال ضریب تبدیل ذریبط به تاخیر غیرهیدرواستاتیک (ZWD)، مقدار بخار آب بارش‌زا برآورد شد. با پردازش مشاهدات GPS سه ایستگاه دائمی تنکابن، ارومیه و بندرعباس در سال ۲۰۱۸ متناظر با مشاهدات عبورهای ۱۶ و ۱۳۳ ماهواره‌ی جیسون-۳ با فاصله‌ی زمانی ۱۰ روزه و با استفاده از نرم‌افزار Bernese 5.2، مقدار میانگین بخار آب بارش‌زا به ترتیب ۴۷، ۴۵ و ۳۱ میلی‌متر برآورد شد. در نهایت مقدار RMS و انحراف معیار حاصل از دو روش به ترتیب ۱ تا ۱٫۵ میلی‌متر و ۵ تا ۵٫۵ میلی‌متر برآورد شد. نزدیکی نتایج بدست آمده از دو روش مذکور، نشان‌دهنده‌ی توافق و سازگاری بسیار بالا بین این دو روش با ضریب همبستگی حدود ۰/۹۸ و قابلیت ترکیب آنها برای مطالعات اقلیمی و آب و هوایی است.

**واژگان کلیدی:** بخار آب بارش‌زا، تروپوسفر، GPS، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، ماهواره‌ی جیسون

## ۱- مقدمه

بخار آب یکی از اصلی ترین گازهای گلخانه ای است که در جو توزیع یکنواختی ندارد. بیشترین مقدار بخار آب از سطح زمین تا ارتفاع ۱۰ الی ۱۵ کیلومتری قرار دارد. بخار آب تابع زمان، مکان و ارتفاع است و نقش مهمی در تشکیل ابر و بارش ایفا می کند به همین دلیل نیازمند پایش تغییرات بلند مدت می باشد [۱]. روش های اندازه گیری بخار آب را می توان به سه دسته تقسیم بندی کرد: (۱) رادیوسوند<sup>۱</sup>، (۲) بخار سنج رادیویی<sup>۲</sup> و (۳) GPS<sup>۳</sup>. در روش اول پارامترهای آب و هوایی از جمله فشار، دما و رطوبت توسط دستگاه رادیوسوند اندازه گیری می شوند. رادیوسوند توسط یک بالن به داخل جو فرستاده می شود تا پارامترهای مذکور را در مسیر حرکت خود اندازه گیری کند. این روش بسیار پرهزینه بوده و از طرفی امکان پوشش کامل داده ها را در ۲۴ ساعت شبانه روز فراهم نمی آورد [۲]. در روش دوم تاخیر تر تروپوسفری در امتداد مسیر انتشار سیگنال مطابق با اطلاعات یکپارچه شده ی بخار آب محاسبه می شود. بخار سنج رادیویی، تابش پس زمینه ی ماکروویو تولید شده توسط جو را اندازه گیری می کند و معمولاً در دو فرکانس و با استفاده از الگوریتم تبدیل، این مشاهدات به خط دید بخار آب انتقال داده میشوند [۳]. در روش سوم، تاخیر تر تروپوسفری موجود در سیگنال های GPS از طریق سرشکنی و اعمال ضریب تبدیل مقدار بخار آب محاسبه می شود. این روش به تکنیک هواشناسی با جی ان اس اس معروف است [۴].

سیگنال های GPS هنگامی که از جو عبور می کنند، دچار تاخیر اتمسفری می شوند. تاخیر اتمسفری شامل تاخیر یونسفری و تروپوسفری می باشد. تاخیر یونسفری مربوط به لایه یونسفر از جو است که در ارتفاع ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر بالای سطح زمین قرار دارد. از آنجا که یونسفر برای سیگنال های GPS یک محیط پاشنده و یونیزه است، بنابراین سیگنال های GPS هنگام عبور از آن دچار تاخیر یا تقدم می شوند. خطای یونسفری بستگی به محتوای الکترون کلی<sup>۴</sup> موجود در مسیر عبور سیگنال

دارد. بنابراین در گیرنده های دو فرکانسه با استفاده از دو فرکانس L1 و L2 و به کارگیری ترکیب خطی عاری از یونسفر می توان این خطا را حذف نمود [۵]. اما تاخیر تروپوسفری مربوط به لایه تروپوسفر از جو است که از سطح زمین تا ارتفاع حداکثر ۵۰ کیلومتری را شامل می شود. از آنجایی که محیط تروپوسفر یک محیط غیرپاشنده<sup>۵</sup> برای سیگنال های GPS می باشد، بنابراین با استفاده از ترکیب مشاهدات گیرنده های دو فرکانسه قابل حذف نیست [۶]. تاخیر تروپوسفری به دو مولفه ی خشک و تر تقسیم بندی می شود. سهم مولفه ی خشک حدود ۹۰٪ و سهم مولفه ی تر حدود ۱۰٪ می باشد. مولفه ی خشک ناشی از فشار هوا و مولفه ی تر ناشی از وجود بخار آب است. مولفه ی خشک به دلیل وابستگی به تغییرات فشار هوا، با اندازه گیری دقیق دما و فشار سطحی به راحتی مدلسازی می شود که در راستای قائم حدود ۲،۵ متر می باشد. در حالی که مولفه ی تر به توزیع بخار آب وابسته است و در راستای قائم حدود ۳۰ سانتی متر می باشد [۷]. مونیکا کامپانلی<sup>۶</sup> و همکارانش، بخار آب بارش را با استفاده از GPS و رادیومتر ماهواره ی Sun-Sky در شهرهای رم و والنسیا برای سال های ۲۰۱۰-۲۰۱۱-۲۰۱۴ با دقت ۶ میلی متر برای رم و ۱۳ میلی متر برای والنسیا برآورد کردند [۸]. کاستر<sup>۷</sup> و همکارانش بخار آب را برای سال ۱۹۹۵ با استفاده از ترکیب داده های GPS، رادیومتر و رادیوسوند برآورد کرده و دریافتند که وجود اختلاف سیستماتیک در تعیین بخار آب بارش را به کمک GPS، ناشی از زاویه ی ارتفاعی است و به نوع گیرنده و آنتن بستگی ندارد [۹]. جی هیون<sup>۸</sup> و همکارانش با استفاده از سه روش GPS، رادیوسوند و بخارسنج رادیویی، بخار آب را برای کشور کره جنوبی در سال ۲۰۰۹ برآورد کرده و با مقایسه نتایج متوجه شدند که دقت برآورد GPS و رادیومتر بالاتر از رادیوسوند است [۱۰]. سامیسکی<sup>۹</sup> و همکارانش بخار آب را در سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ برای کشور یونان با استفاده از روش طیف سنجی خورشیدی اندازه گیری کرده و با مقایسه با نتایج حاصل از داده های رادیومتر ماهواره ی جیسون متوجه شدند که دقت

<sup>۵</sup> Non Dispersive

<sup>۶</sup> Monica Campanelli

<sup>۷</sup> Coster

<sup>۸</sup> Jihyun

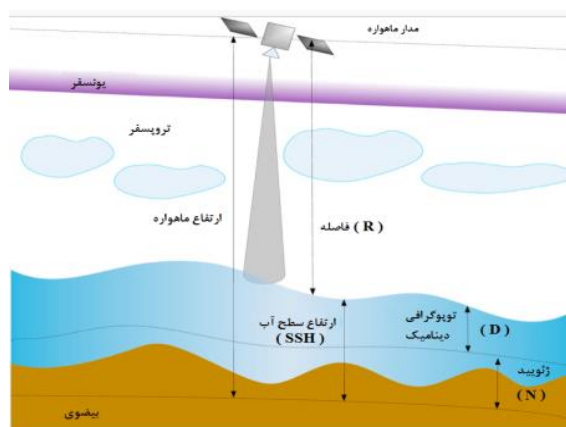
<sup>۹</sup> Somieski

<sup>۱</sup> Radiosonde

<sup>۲</sup> Radiometer

<sup>۳</sup> Global Positioning System

<sup>۴</sup> Total Electro Content



شکل (۱) اصول پایه ی ارتفاع سنجی [۲۸]

با اندازه گیری زمان رفت و برگشت پالس و با داشتن ارتفاع ماهواره از بیضوی مرجع ارتفاع سطح دریا از بیضوی مرجع (SSH) با استفاده از معادله ی زیر محاسبه می شود [۱۶]:

$$SSH = N + D + e \quad (2)$$

که در آن  $N$ : ارتفاع ژئوئید<sup>۵</sup> از بیضوی مرجع،

$D$ : توپوگرافی دینامیک اقیانوس با دریا، و

$e$ : میزان خطا است.

اندازه گیری های ارتفاع سنجی دارای خطا است و تصحیحاتی از قبیل تصحیحات ژئوفیزیکی- اتمسفری و نیز دستگاهی در اندازه گیری های ارتفاع سنجی باید اعمال شوند [۱۶]. ماهواره های جیسون محصول مشترک اتحادیه ی اروپا و کشور آمریکا است که اولین آن در دسامبر سال ۲۰۰۱ در مدار قرار گرفت. مهم ترین ماموریت این ماهواره اندازه گیری تغییرات سطح دریا و اقیانوس ها است. [۱۷] راديو متر سه فرکانسه ی ماهواره ی جیسون- ۳ یک راديو متر میکروویو پیشرفته (AMR)<sup>۶</sup> است که شامل سه کانال مجزا با فرکانس های ۱۸,۷، ۲۳,۸ و ۳۴ گیگا هرتز می باشد. کانال اصلی راديو متر دارای فرکانس ۲۳,۸ گیگا هرتز می باشد که بخار آب با غلظت و تراکم بالا را اندازه گیری می کند. علاوه بر این کانال ۳۴ و ۱۸,۷ گیگاهرتز که حساسیت کمتری نسبت به بخار آب دارند، اثر ابرهای باران زا و تشعشعات اضافی ناشی از باد در سطح اقیانوس را کاهش می دهند. این راديو متر بر اساس

راديو متر ماهواره ی جیسون از راديو متر زمینی بهتر است [۱۱]. در سال ۲۰۱۸ کین ژانگ<sup>۱</sup> و همکارانش بخار آب اتمسفر را با استفاده از روش GPS، راديو سوند، نوسانگر راديویی، راديو متر ماهواره ای و مدل های عددی پیش بینی آب و هوا<sup>۲</sup>، محاسبه و نتایج را با هم مقایسه کردند. این گروه متوجه شدند که نتایج حاصل از مدل های عددی پیش بینی آب و هوا دقت بالاتری نسبت به سایر روش ها دارد [۱۲]. در ایران نیز در سال ۱۳۸۵ موسوی و همکارانش با استفاده از داده های شبکه ی سراسری ژئودینامیک ایران، بخار آب برای این منطقه به مدت یک هفته محاسبه و برآورد کردند [۱۳]. همچنین در سال ۱۳۹۲ شورچه بخار آب را برای ایستگاه GPS سازمان نقشه برداری کشور در سال ۲۰۰۵ با دقتی در حد ۱,۸۶ میلیمتر محاسبه کرد [۱۴]. شریفی و همکاران بخار آب را برای ایستگاه GPS سازمان نقشه برداری کشور برای پنج روز از سال ۲۰۱۵ با استفاده از محصولات مداری مختلف اندازه گیری کردند. این گروه دریافتند که دقت برآورد بخار آب با استفاده از داده های مداری نهایی بهتر از برآورد این پارامتر با استفاده از داده های مداری سریع و خیلی سریع است [۱۵].

## ۲- برآورد بخار آب با استفاده از ارتفاع سنجی ماهواره ای

رادار ارتفاع سنجی<sup>۳</sup> قادر است با ارسال سیگنال به سطح زمین و اندازه گیری زمان رفت و برگشت سیگنال پس از برخورد با سطح آب ارتفاع را اندازه گیری کند. با ارسال پالس از رادار ارتفاع سنج به سمت دریا و برخورد پالس با سطح ناهموار آب بخشی از سیگنال های ارسالی به ارتفاع سنج باز می گردد و توسط آنتن ارتفاع سنج دریافت می شود. مدت زمان رفت و برگشت پالس توسط ساعت ارتفاع سنج ثبت می شود (شکل ۱). بنابراین با داشتن سرعت نور (c) و زمان رفت و برگشت پالس (t) فاصله ی ماهواره تا سطح آب (R) قابل اندازه گیری است:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

<sup>۴</sup> Sea Surface Height

<sup>۵</sup> Geoid

<sup>۶</sup> Advance Microwave Radiometer

<sup>۱</sup> Qin Zhang

<sup>۲</sup> Numerical Weather Prediction

<sup>۳</sup> Radar Altimetry

تبدیل (II)، که مقدار آن حدود ۰,۱۵ است، استفاده می شود [۲۰].

تاخیر مولفه ی خشک طبق رابطه ی زیر محاسبه می شود [۲۱]:

$$ZHD = \frac{0.0022768 \times P_0}{1 - 0.00266 \times \cos(2\varphi) - 0.00028 \times H} \quad (6)$$

در این رابطه که مربوط به مدل تجربی ساستاموینن می باشد،

$P_0$ : فشار سطحی، بر حسب میلی بار

$\varphi$ : عرض جغرافیایی نقطه ی مشاهداتی بر حسب درجه

$H$ : ارتفاع اورتو متریک نقطه ی مشاهداتی بر حسب متر می باشد.

در نهایت طبق رابطه ی زیر تاخیر مولفه ی تر  $ZWD$  بدست می آید:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (7)$$

مقدار بخار آب بارش زا (PWV) در راستای قائم نیز از تاخیر تروپوسفری تر در راستای زینیتی (ZWD) بدست می آید. بدیهی است که هر خطایی در مدلسازی تاخیر مولفه ی خشک، باعث ایجاد خطا در محاسبه ی مولفه ی تر و در نتیجه مقدار PWV می شود [۲۲]. مولفه ی تر در راستای زینیتی طبق رابطه ی زیر به PWV تبدیل می شود:

$$PWV = \Pi (T_m) \times ZWD \quad (8)$$

در این رابطه  $\Pi$  کمیتی بدون واحد است که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود [۲۳]:

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_{RV} \left[ \left( \frac{K_3}{T_m} \right) + K'_2 \right]} \quad (9)$$

در رابطه ی فوق  $\rho$  چگالی آب مایع، بر حسب  $kg/m^3$ ،  $RV$  ثابت ویژه ی گاز برای بخار آب و برابر  $K_3$  ثوابت انکسارپذیری  $K'_2, 461.45 J K^{-1} K^{-1}$  و به ترتیب برابر با  $3.7 \times 10^5 K^2 mbar^{-1}$  و  $17 K mbar^{-1}$  می باشند.

الگوریتم انتگرال گیری میلی متری از موج به صورت چرخشی و یکپارچه طراحی شده است. سه دیود اضافی برای کنترل نویز دما به منظور کالیبراسیون در تمامی کانال ها تعبیه شده است. در صورت استفاده از این دیودها دیگر نیازی به بوق هشدار کالیبراسیون هوای سرد نمی باشد. هم چنین در این رادیومتر یک رفلکتور به ابعاد یک متر به منظور اندازه گیری تاخیر تر در فاصله ی ۱۵-۲۰ کیلومتری از ساحل تعبیه شده است. [۱۸] روابط اندازه گیری تاخیر به صورت زیر می باشد:

$$PD = 10^{-6} \int_0^S N(z) dz \quad (3)$$

$$N = 1763 \times \frac{\rho_v}{T} \quad (4)$$

$$PD_v = 1.763 \times 10^{-3} \int_0^S \left( \frac{\rho_v}{T} \right) dz \quad (5)$$

$N$ : ضریب شکست

$\rho_v$ : چگالی بخار آب بر حسب گرم بر متر مکعب:

$T$ : دما بر حسب کلوین

از آنجایی که ۹۵٪ بخار آب اتمسفر در قسمت پایینی تروپوسفر قرار دارد، بنابراین میانگین دما معمولاً بین ۲۹۰-۲۷۰ کلوین می باشد. [۱۹]

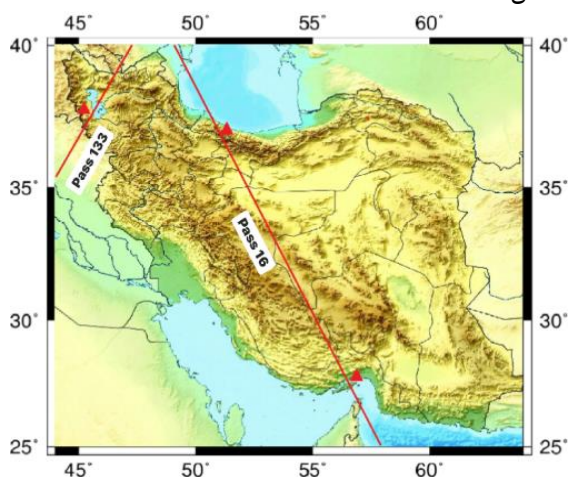
### - برآورد بخار آب با استفاده از GPS

در پردازش سیگنال های GPS، با حذف و یا کاهش تمامی منابع خطاها به غیر از تاخیر تروپوسفری، می توان مقدار بخار آب را در ایستگاه GPS مورد نظر محاسبه نمود. در زمان اندازه گیری فاصله ی بین ماهواره و گیرنده، تاخیر تروپوسفری باعث می شود که فاصله ی مذکور بیشتر از مقدار واقعی برآورد شود. لذا با معلوم بودن مختصات ماهواره و گیرنده می توان تاخیر تروپوسفری کل را در راستای مایل STD<sup>۱</sup> محاسبه و با استفاده از توابع نگاشت آن را به راستای زینیتی ZTD<sup>۲</sup> تصویر نمود. برای حذف سهم مولفه ی خشک از تاخیر کل، از فشار سطحی و برای تبدیل مولفه ی تر به بخار آب از ضریب

<sup>۳</sup> Zenith Wet Delay  
<sup>۴</sup> Precipitable Water Vapor

<sup>۱</sup> Slant Total Delay  
<sup>۲</sup> Zenith Total Delay

استفاده شده است. برای مقایسه ی نتایج عددی حاصل از برآورد بخار آب به کمک ارتفاع سنجی ماهواره ای، از داده های ۲۴ ساعته ایستگاه های دائمی GPS در شهرهای تنکابن، ارومیه و بندرعباس در سال ۲۰۱۸ (یک سال) با فاصله ی زمانی ۱۰ روزه و نرخ ۳۰ ثانیه استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۲- موقعیت ایستگاه های GPS و عبورهای ماهواره ی ارتفاع سنجی

دلیل انتخاب ایستگاه های GPS در سه شهر مذکور، نزدیکی به خطوط عبوری ماهواره های ارتفاع سنجی و شرایط اقلیمی متفاوت آن ها است.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه های GPS

ایستگاه	Latitude	Longitude	Ell. Height
تنکابن	36°47'	50°55'	-20.66 m
ارومیه	37°37'	45°3'	1356.16 m
بندرعباس	27°12'	56°19'	5.34 m

در پردازش داده های GPS توسط نرم افزار Bernese 5.2، زاویه ی ارتفاعی ۱۵ درجه، حل ابهام فاز به روش QIF و ترکیب خطی عاری از یونسفر (L3) برای حذف اثر یونسفر در نظر گرفته شد. برای تصویر تاخیر تروپوسفری در راستای زینتی از تابع تصویر نیل [۲۶] و برای تولید پارامتر های تروپوسفر فاصله ی زمانی یک ساعت انتخاب شد. خروجی پردازش با روش PPP<sup>۱</sup> شامل مختصات ایستگاه ها، تاخیر تروپوسفری و خطای ساعت گیرنده می-باشد. (شکل ۳)

$T_m$ : میانگین وزن دار دمای اتمسفر بوده و تابعی از دما و فشار بخار آب در راستای پروفیل های قائم است که طبق رابطه (۱۰) محاسبه می شود [۲۴]

$$T_m = \frac{\int (P_v/T) dz}{\int (P_v/T^2) dz} \quad (10)$$

در این رابطه  $P_v$  فشار جزئی بخار آب بر حسب میلی بار و  $T$  دما بر حسب کلون است. بویس به طور تجربی  $T_m$  را به صورت تابع خطی از دمای سطح  $T_s$  بیان کرد [۲۴]:

$$T_m = 70.2 + 0.72 \times T_s \quad (11)$$

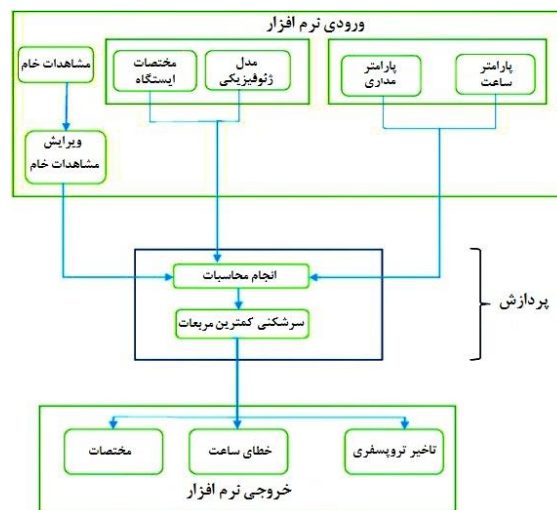
این رابطه بر اساس آنالیز ۸۷۱۸ پروفیل رادیوسوند در ۱۳ ایستگاه به مدت ۲ سال در کشور ایالات متحده بیان شده است و برای نواحی با عرض جغرافیایی ۲۷-۶۵ درجه ی شمالی برقرار است. (Bevis et al)

به دلیل عدم دسترسی به پارامترهای هواشناسی در ایستگاه های GPS، برای تعیین  $T_m$  از میانگین دما استفاده شده است. بنا به گزارش سازمان هواشناسی کشور، میانگین دمای سالانه در شهرهای تنکابن و ارومیه ۱۶ درجه ی سانتی گراد (۲۸۹ درجه ی کلون) و در شهر بندرعباس ۲۶ درجه ی سانتی گراد (۲۹۹ درجه ی کلون) گزارش شده است [۲۵]. طبق رابطه ی (۸) مقدار  $T_m$  برای شهرهای تنکابن و ارومیه، ۲۷۸،۲۸ درجه ی کلون و برای شهر بندرعباس، ۲۸۵،۴۸ درجه ی کلون محاسبه شده است. با جایگذاری این مقادیر در رابطه ی (۶)، مقدار  $\Pi$  برای شهرهای تنکابن و ارومیه ۰،۱۶ و برای شهر بندرعباس ۰،۱۷ تعیین شد.

#### ۴- داده ها و منطقه ی مورد مطالعه

از آنجا که دوره تناوب عبور ماهواره های ارتفاع سنجی ۱۰ روزه است، بنابراین مقایسه مقدار بخار آب محاسبه شده به کمک ماهواره ی ارتفاع سنجی و GPS، هر ده روز یکبار امکان پذیر است. به منظور بر آورد بخار آب موجود در جو از داده های عبورهای شماره ی ۱۶ و ۱۳۳ ماهواره ی ارتفاع سنجی جیسون-۳ (با فاصله ی زمانی ۱۰ روزه) استفاده شد (شکل ۲). این داده ها از سایت <ftp://avisoftp.cnes.fr> قابل دریافت هستند. برای پردازش داده های ماهواره ی ارتفاع سنجی از نرم افزار BRAT 3.3

<sup>۱</sup> Precise Point Positioning

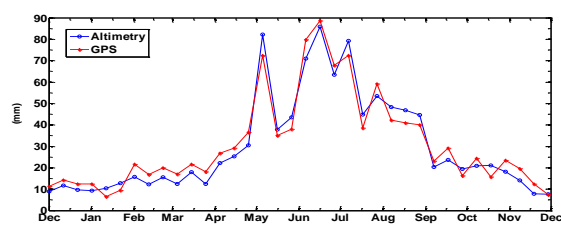


شکل ۳- دیاگرام پردازش مشاهدات GPS با نرم افزار برنیز [۲۷]

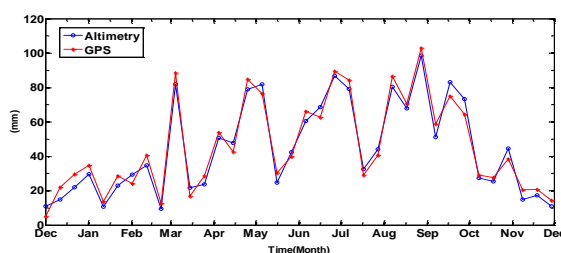
## ۵- نتایج عددی

براساس آنچه در قسمت های پیشین ارائه شد، بخار آب بارش زا در سال ۲۰۱۸ با فاصله ی زمانی ۱۰ روزه برای سه شهر تنکابن، ارومیه و بندر عباس با روش ارتفاعسنجی ماهواره ای جیسون-۳ و سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS برآورد شد. طبق نمودار (۱)، هر دو روش ارتفاعسنجی ماهواره ای جیسون-۳ و سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS نشان دهنده بیشترین مقدار بخار آب بارش زا در شهر تنکابن مربوط به تیر ماه و مرداد ماه (Jun-Jul) و کمترین مقدار بخار آب بارش زا مربوط به دی ماه و بهمن ماه (Dec-Jan) می باشد. هم چنین طبق جدول (۱) و نمودار(۴)، متوسط اختلاف نتایج حاصل از هر دو روش در ایستگاه تنکابن حدود ۱/۱ میلی متر می باشد. با توجه به نمودار (۲)، هر دو روش ارتفاعسنجی ماهواره ای جیسون-۳ و سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS بیانگر بیشترین مقدار بخار آب بارش زا در شهر ارومیه در شهریور ماه (Aug) و کمترین مقدار آن در دی ماه (Dec) می باشد. طبق جدول (۲) و نمودار (۵)، متوسط اختلاف نتایج حاصل از هر دو روش در این ایستگاه حدود ۱/۴ میلی متر می باشد. نمودار (۳) بیانگر این است که براساس هر دو روش ارتفاعسنجی ماهواره ای جیسون-۳ و سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS، بیشترین مقدار بخار آب بارش زا در شهر بندرعباس مربوط به مهر ماه (Oct) و کمترین مقدار آن مربوط به دی ماه (Dec) می باشد. همچنین طبق جدول (۳) و نمودار (۶)، متوسط اختلاف نتایج حاصل از هر دو روش

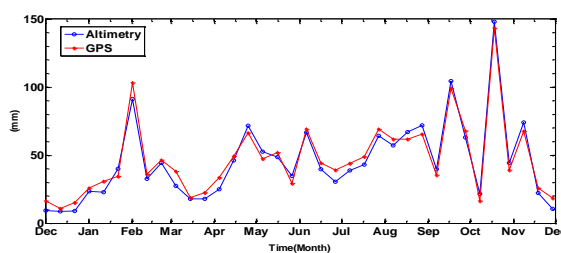
در این ایستگاه حدود ۱/۷ میلی متر می باشد. مطابق جدول های ۱ تا ۳ مقدار میانگین بخار آب بارش زا برای شهرهای تنکابن، ارومیه و بندرعباس به ترتیب ۳۰، ۴۴،۵ و ۴۵،۳ میلی متر می باشد. این درحالی است که نتایج حاصل از روش GPS و متناظر با روش ارتفاعسنجی ماهواره ای به ترتیب ۳۱،۱، ۴۵،۹ و ۴۷ میلی متر می باشد. همچنین بیشترین مقدار بخار آب بارش زا حاصل از روش GPS مربوط به شهر بندر عباس (۱۴۳،۳ میلی متر) و کمترین مقدار آن مربوط به شهر ارومیه (۵،۱ میلی متر) می باشد. همانطورکه نمودار های ۱ تا ۳ نشان می دهند، نتایج هر دو روش با دقت خیلی خوبی بر یکدیگر منطبق و سازگار هستند.



نمودار ۱- بخار آب بارش زا در شهر تنکابن (mm)



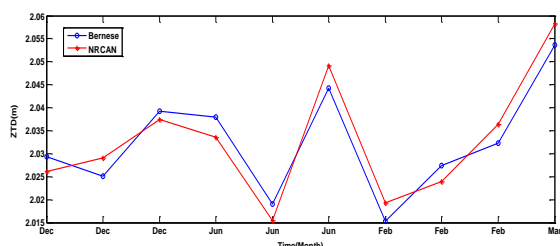
نمودار ۲- بخار آب بارش زا در شهر ارومیه (mm)



نمودار ۳- بخار آب بارش زا در شهر بندرعباس (mm)

جدول ۲- نتایج آماری برآورد بخار آب بارش زا در شهر تنکابن

تنکابن	GPS (mm)	Altimetry (mm)	اختلاف دو روش (mm)
Max	۸۸/۶۸۰۰	۸۵/۹۰۵۰	۸/۹۵۵۰
Mean	۳۱/۱۴۴۱	۳۰/۰۲۶۱	۱/۱۱۸۱
Min	۶/۴۸۰۰	۷/۶۹۱۳	-۹/۵۹۲۵



نمودار ۷- تاخیر ترویسفری اندازه گیری شده با استفاده از نرم افزار Bernese و سرویس تعیین موقعیت دقیق NRCAN

### ۱-۵- مقایسه و تحلیل آماری دو روش

از آنجا که دو روش ارتفاع سنجی ماهواره ای و GPS کاملا مستقل از یکدیگر هستند، بنابراین نتایج هر یک برای اعتبار سنجی نتایج دیگری می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. تحلیل آماری طبق روابط زیر انجام شده است: [۲۴]

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S(i) - R(i)) \quad (12)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((S(i) - R(i)) - Bias)^2} \quad (13)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((S(i) - R(i)) - Bias)^2} \quad (14)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S(i) - R(i))^2} \quad (15)$$

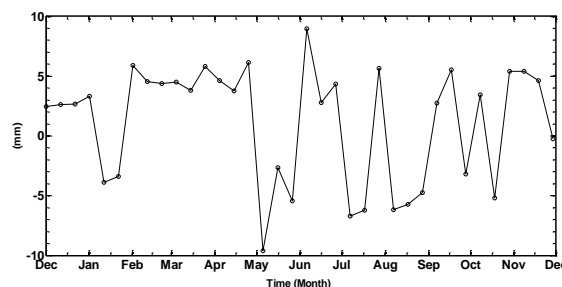
در روابط فوق S و R مقدار اندازه گیری شده در حالی که R مقدار مبنا می باشد. در این مقاله نتایج حاصل از GPS به عنوان مبنا قرار گرفته شده است و نتایج حاصل از ارتفاع سنجی راداری، با آن مقایسه می شود. دقت برآورد بخار آب با استفاده از GPS در حد ۱٫۵ میلیمتر است. [۲۹] این در حالی است که دقت اندازه گیری بخار آب به کمک ارتفاع سنجی ماهواره ای جیسون-۳ در حد ۳ سانتی متر می باشد. [۱۸] به منظور بررسی و نمایش میزان توافق و انطباق بین دو روش برآورد بخار آب بارش زا، نتایج حاصل از آنها در این تحقیق برای برآورد کمیت های آماری خطای جذر میانگین مربعات (RMS) انحراف معیار (STD) و ضریب همبستگی (CORR) مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۵ نمایش داده شده اند. ضرایب

جدول ۳- نتایج آماری برآورد بخار آب بارش زا در شهر ارومیه

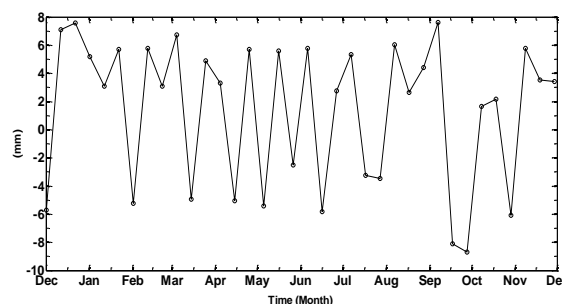
ارومیه	GPS (mm)	Altimetry (mm)	اختلاف دو روش (mm)
Max	۱۰۳/۰۵۰۰	۹۸/۶۲۵۰	۷/۶۰۵۰
Mean	۴۵/۹۵۴۶	۴۴/۵۵۰۰	۱/۴۰۴۶
Min	۵/۱۳۰۰	۹/۵۷۰۰	-۸/۶۸۵۰

جدول ۴- نتایج آماری برآورد بخار آب بارش زا در شهر بندرعباس

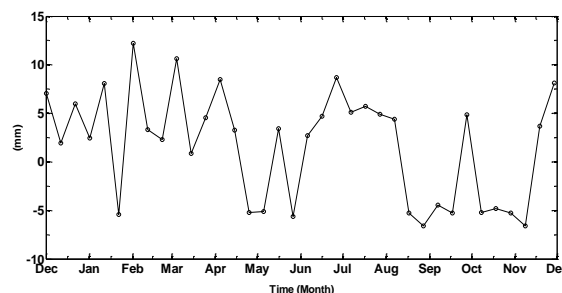
بندر عباس	GPS (mm)	Altimetry (mm)	اختلاف دو روش (mm)
Max	۱۴۳/۳۱۰۰	۱۴۸/۱۲۵۰	۱۲/۱۹۸۰
Mean	۴۷/۰۷۰۸	۴۵/۳۳۲۸	۱/۷۳۸۱
Min	۱۰/۸۱۵۰	۸/۸۸۰۰	-۹/۵۹۲۹



نمودار ۴- اختلاف نتایج حاصل از دو روش برای شهر تنکابن (mm)



نمودار ۵- اختلاف نتایج حاصل از دو روش برای شهر ارومیه (mm)



نمودار ۶- اختلاف نتایج حاصل از دو روش برای شهر بندرعباس (mm)

به منظور کسب اطمینان از صحت تاخیر ترویسفری اندازه گیری شده، نتایج حاصل از نرم افزار برنیز برای ۱۰ روز با نتایج محاسبه شده توسط سرویس تعیین موقعیت دقیق منابع طبیعی کانادا NRCAN<sup>۱</sup> مقایسه شد.



همبستگی بدست آمده بیانگر همبستگی زیاد بین برآورد بخار آب بارش زای حاصل از ارتفاع سنجی ماهواره ای و نتایج حاصل از GPS دارد. با توجه به جدول ۵، بخار آب بارش زا با همبستگی حدود ۰/۹۸ و RMS برابر با ۱ تا ۱،۵ میلی متر و انحراف معیار حدود ۵ تا ۵،۵ میلی متر با استفاده از هر دو روش برآورد شده است.

جدول ۵- مقایسه ی آماری برآورد بخار آب حاصل از دو روش GPS و ارتفاع سنجی ماهواره ای

شهر	RMS (mm)	STD (mm)	CORR
تنکابن	۱/۰۴۵۶	۴/۸۹۹۰	۰/۹۷۷۳
ارومیه	۱/۴۴۳۴	۵/۱۴۷۹	۰/۹۸۱۹
بندرعباس	۱/۴۹۴۷	۵/۶۳۳۳	۰/۹۸۲۳

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهاد

از آنجا که بخار آب بارش زا در دریاها و اقیانوس ها و مناطق ساحلی آنها دارای بیشترین مقدار می باشد و دو سوم کره ی زمین را نیز آب فرا گرفته است، بنابراین استفاده از روش رادیوسوند به دلیل فقدان داده در دریا و اقیانوس امکان پذیر نمی باشد. از طرفی استفاده از روش GPS نیز به تنهایی بدلیل تعداد بسیار کم ایستگاه ها در

این مناطق، عملا امکان پذیر نیست. از این رو در این تحقیق از دو روش ارتفاع سنجی ماهواره ای و برخی ایستگاه های ساحلی نزدیک به خطوط عبوری ماهواره ای جیسون-۳ برای برآورد بخار آب بارش زا استفاده شده است. نتایج حاصل از هر دو روش ارتفاع سنجی ماهواره ای جیسون-۳ و سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS بیانگر سازگاری بسیار بالا بین آنها با ضریب همبستگی حدود ۰/۹۸ است. البته بدلیل بالا بودن دوره تناوب این ماهواره ها، با بهره گیری از مشاهدات یک ماهواره نمی توان بخار آب را با قدرت تفکیک زمانی مناسب برآورد نمود. بنابراین پیشنهاد می شود از مشاهدات چند ماهواره ی ارتفاع سنجی مختلف استفاده شود.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و سپاس گذاری خود را از کارشناسان مرکز محاسبات ژئودزی و ژئودینامیک سازمان نقشه برداری کشور که در تهیه ی داده های ایستگاه های دائمی GPS ما را یاری نمودند اعلام می دارند.

## مراجع

- [1] Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware, "GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water", J. Appl. Meteorol., 33, 379-386, 1994
- [2] Jihong. Z, Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network, UCGE Reports Number 20132, 1999.
- [3] Onsala Space Observatory , Chalmers University of Technology, "Microwave Radiometer", 1998. <http://www.oso.chalmers.se/geo/radio.html> Onsala Space Observatory , Chalmers University of Technology, "Global Positioning System", 1998.
- [4] Seeber. G , Satellite Geodesy , 2nd completely revised and extended edition, 2003
- [5] Kaplan, E., Understanding GPS principles and applications, Artech House, Norwood, Mass., USA, 1996
- [6] Saastamoinen, J. (1972), Atmospheric Correction for Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites: Geophysical Monograph, 15, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 247-252.
- [7] Dodson A.H., P.J. Shardlow, L.C.M. Hubbard, G. Elegered, and P.O.J. Jarlemark , "Wet Tropospheric effects on precise relative GPS height determination", Journal of Geodesy, No. 70, No. 4, pp. 188-202, 1996.
- [8] Monica Campanelli, Alessandra Mascitelli, Paolo Sanò, Henri Diémoz, Victor Estellés, Stefano Federico, Anna Maria Iannarelli, Francesca Fratarcangeli, Augusto Mazzoni, Eugenio Realini, Mattia Crespi, Olivier Bock, Jose A. Martínez-Lozano, and Stefano Dietrich: "Precipitable water vapour content from ESR/SKYNET sun-skyradiometers: validation against GNSS/GPS and AERONET over three different sites in Europe". Atmos. Meas. Tech., 11, 81-94, 2018
- [9] A. J. Coster , A.E. Niell , F.S. Solheim, V.B. Mendes, P.C. Toor, K. P. Buchmann, C. A. Upham: "Measurements of Precipitable Water Vapor by GPS, Radiosondes, and a Microwave Water Vapor Radiometer". Presented at ION-GPS Article, Kansas City, Kansas, September 17 - 20, 1996



- [10] JihyunHa,Kwan-Dong Park,Kihoon Kim and Yeon-Hee Kim: "Comparison of Atmospheric Water Vapor Profiles Obtained by GPS, MWR, and Radiosonde". *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 46(3), 233-241, 2010
- [11] A. Somieski, B. Buerki, A. Geiger,1 H.-G. Kahle, E. C. Pavlis, H. Becker-Ross, S. Florek, and M. Okrus: "Tropospheric water vapor from solar spectrometry and comparison with Jason microwave radiometer measurements". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, d09104, doi:10.1029/2005jd005767, 2006
- [12] Qin Zhang, JunhuaYe ,Shuangcheng Zhang, and Fei Han "Precipitable Water Vapor Retrieval and Analysis by Multiple Data Sources: Ground-Based GNSS, Radio Occultation, Radio-sonde, Microwave Satellite, and NWP Reanalysis Data". *Journal of Sensors Volume 2018*, Article ID 3428303, 13 pages
- [13] Z.Mousavi,F.Khorami,H.Nankali,Y.Jamour."Determining the amount of water vapor in the atmosphere using the tropospheric delay estimation of GPS signals in the national geodynamic network of Iran(IPGN)".*Geomatics Conference 2007*, Tehran,Iran National Cartographic Center.
- [14] B.Shoorcheh,"Precipitable Water Vapor Estimation Using GPS Observations for National Cartographic Center Permanent Station for year 2005". M.Sc Thesis.University of Tehran.School of Surveying and Geospetial Engineering.
- [15] M.A.Sharifi, "Capability of IGS orbital service products for meteorological applications of GPS system". *Journal of Geomatics Science And Technology*,2018.
- [16] Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L.L, and Callahan P.S. (2001). *Satellite Altimetry and Earth Sciences*.Chapter 1 of *A Handbook of Techniques and Applications*; edited by Fu L. L. and Cazenave A. International Geophysics Series, Vol. 69 , AcademicPress, NY, USA.
- [17] Radar Altimetry Tutorial and Toolbox 7.1.10.1.2JMR:Jason Microwave Radiometer.
- [18] Jason-3 Products Handbook.17 September 2018.
- [19] M.A.Janssen,Christopher Ruf."TOPEX/Poseidon microwave radiometer (TMR).Wet troposphere range correction algorithm and pre-launch error budget".*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.February 1995.
- [20] Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C., Rocken, R.A. Anthes and R.H. Ware, GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research*, 97, D14, 15787, 1992.
- [21] Tao, W. "Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapor System Development and Evaluation." Ph.D. dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada. 2008
- [22] Paul Tregoning, Reinout Boers, Denis O'Brien, Martin Hendy:" Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Observations" ,*J.Geophys . Res.*, 103, 28,701-28, 7109,1998
- [23] Askne, J., and H. Nordius: Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data, *Radio Sci.*, 22, 379-386, 1987.
- [24] Fangzhao Zhang,Jean-Pierre Barriot,Guochang Xu,Ta-Kang Yeh."Metrology Assessment of the Accuracy of Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Data Acquisition in Tropical Areas:The Tahiti Case"remote sensing.15 May 2018.
- [25] www.irimo.ir
- [26] Neill, A.E., Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, No. B2, pp. 3227-3246,1996
- [27] Ashraf El-Kutb Mousa , N.Aboualy, M.Sharaf, H.Zahra, M.Darrag."Tropospheric wet delay estimation using GNSS"NRIAG Jouanal of Astronomy and Geophysics.February 2016.
- [28] X,Sui, and R, Zhang:"Sea Surface Height Measuring Using InSARAltimeter",*Geodesy and Geodynamics*,8,278-284.2017.
- [29] Paul Tregoning,Reinout Boers, Denis O'Brien, Martin Hendy."Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observation".*Journal of Geophysical Research: Atmospheres / Volume 103,Issue D22*.