

# مقایسه میزان کارآیی داده‌های هواشناسی رادیوسوند و ERA-Interim جهت تصحیح تروپوسفری در تعیین موقعیت مطلق دقیق با بکارگیری روش ردیابی اشعه سه بعدی

سعید حاجی آقاجانی<sup>۱</sup>، یزدان عامریان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

s\_h\_aghajany@mail.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

amerian@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۵، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۶)

## چکیده

تعیین موقعیت دقیق نقاط در تمام شرایط آب و هوایی همواره از مهمترین اهداف سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی بوده است. شکست امواج ارسالی از ماهواره‌ها بدلیل عبور از لایه‌های مختلف جو بویژه پایین‌ترین لایه آن که تروپوسفر نام دارد، زمینه‌ساز بروز یکی از مهمترین انواع خطاهای موجود در تعیین موقعیت می‌باشد. در این مقاله به مقایسه تاثیر داده‌های هواشناسی ERA-Interim و داده‌های رادیوسوند در افزایش دقت تعیین موقعیت مطلق نقاط با اعمال تصحیحات مربوط به اثرات این لایه بر داده‌ها پرداخته شده است. بدین منظور با بکارگیری روش ردیابی اشعه سه بعدی و انتخاب دو ایستگاه بندرعباس و بیرجند و آماده‌سازی داده‌های مذکور در این مناطق، تصحیحات تروپوسفری با هر دو نوع داده هواشناسی فوق برای سه تاریخ متفاوت محاسبه گردید. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Bernese موقعیت دو ایستگاه بندرعباس و بیرجند یکبار با مجهول در نظر گرفتن تاخیر مربوط به لایه تروپوسفر، و بار دیگر با صرفنظر از آن تعیین گردید. در ادامه تصحیحات تروپوسفری بدست آمده از روش ردیابی اشعه با استفاده از مشاهدات رادیوسوند و داده‌های هواشناسی ERA-Interim بر فایل مشاهدات GPS اعمال گردید و تعیین موقعیت در این دو حالت نیز انجام گرفت. نتایج بدست آمده علاوه بر نشان دادن اهمیت خطای تروپوسفری در محاسبات تعیین موقعیت مطلق، بیانگر آن است که موقعیت بدست آمده با استفاده از تصحیحات رادیوسوند در ایستگاه بندرعباس ۰/۰۱۶۲ متر دقیق‌تر از موقعیت بدست آمده با استفاده از تصحیحات داده‌های هواشناسی می‌باشد. در عین حال در ایستگاه بیرجند باتوجه به دقت تعیین موقعیت، نتایج دو نوع داده تفاوت چندانی ندارند. این موضوع را می‌توان به تغییرات کم بخار آب و سایر شاخص‌های جوی در راستاهای ارتفاعی و مسطحاتی در ایستگاه بیرجند در مقایسه با ایستگاه بندرعباس نسبت داد.

**واژگان کلیدی:** تاخیر تروپوسفری، تعیین موقعیت مطلق، داده‌های هواشناسی، رادیوسوند، ردیابی اشعه

## ۱- مقدمه

با توجه به افزایش روز افزون استفاده از تکنیک‌های ژئودزی ماهواره‌ای و نیاز به تعیین موقعیت با دقت هرچه بالاتر، استفاده از روش‌هایی که به افزایش دقت موقعیت برآورد شده می‌انجامد، ضروری است. در تعیین موقعیت با GPS<sup>۱</sup> انحراف ایجاد شده در سیگنال‌های ارسالی از ماهواره در اثر عبور از لایه تروپوسفر یکی از منابع عمده خطا محسوب می‌شود. مؤلفه خشک تأخیر تروپوسفری متأثر از دما و فشار و مؤلفه تر آن علاوه بر وابستگی به دما و فشار تابعی از میزان رطوبت در طول مسیر سیگنال ارسالی از ماهواره می‌باشد. تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های هواشناسی چه در سطح و چه در لایه‌های بالایی جو باعث می‌شود که این خطا به سادگی قابل محاسبه نباشد [۱].

در سال‌های اخیر روش ردیابی اشعه<sup>۲</sup> به عنوان راه حلی متفاوت به منظور محاسبه تأخیر تروپوسفری مطرح گردیده است. این روش بر مبنای تعیین مسیر اشعه بین گیرنده و فرستنده می‌باشد. مبنای این برآورد، شاخص‌های هواشناسی مانند دما، فشار، فشار بخار آب می‌باشند. این شاخص‌ها در نهایت ضریب شکست را نتیجه می‌دهند که معیار مناسبی برای توصیف محیط تروپوسفر خواهد بود. قدمت مفهوم ردیابی اشعه به چند دهه می‌رسد. بخشی از مدلسازی‌ها در مباحث مربوط به زلزله‌شناسی انجام شده است که به دلیل برخی شباهت‌ها قابل استفاده در مطالعات جوی می‌باشد. در مدل‌های اولیه با توجه به داده‌های در دسترس و همچنین ابزارهای محاسباتی، ساده‌سازی‌های متعددی در نظر گرفته شده است که گاه باعث کاهش دقت نتایج می‌گردد. تایلر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۷ با استفاده از یک مدل هندسی ساده و ترکیب آن با قانون اسنل مدل ساده‌ای به لحاظ محاسباتی بدست آورد که روش ردیابی اشعه دو بعدی نامیده می‌شود [۱]. هابیگر<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ ایده استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی بر مبنای معادلات آیکونال را ارائه داد [۲]. و هابیگر در سال ۲۰۱۰ و نفیسی<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ برای اولین بار از داده‌های رادیوسوند و مدل‌های

عددی هواشناسی به منظور انجام ردیابی اشعه استفاده نمودند [۳ و ۲]. همچنین هافمایستر<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۶ یکی از مهمترین و جامع‌ترین منابع را در تئوری روش‌های ردیابی اشعه ارائه نمود [۴].

در این مقاله با استفاده از روش ردیابی اشعه سه بعدی به مقایسه تأثیر داده‌های رادیوسوند و مدل‌های هواشناسی در محاسبه تأخیر تروپوسفری و در پی آن مقایسه تأثیر این مشاهدات در افزایش دقت تعیین موقعیت مطلق پرداخته خواهد شد.

## ۲- اهمیت تأخیر تروپوسفری در دقت تعیین موقعیت

سرعت سیگنال‌های منتشر شده با نزدیک شدن به سطح زمین به دلیل عبور از لایه‌های مختلف جو، کاهش پیدا می‌کند. با در اختیار داشتن زمان انتشار موج الکترومغناطیس بین دو نقطه اختیاری (dt) و با اعمال سرعت نور در خلأ (c) انتگرال زیر را در طول مسیر سیگنال خواهیم داشت [۵]:

$$\delta \int_{ray} c dt = 0 \quad (1)$$

از طرف دیگر بین المان دیفرانسیلی طول ds در امتداد مسیر انتشار موجی با سرعت v و سرعت انتشار نور در خلأ رابطه زیر برقرار است [۵]:

$$cdt = c \frac{ds}{v} = nds \quad (2)$$

همچنین، ضریب شکست تابعی از طول مسیر طی شده است  $n = n(s)$ . پس برای طول مسیر موج خواهیم داشت:

$$L = \int_{ray} nds \quad (3)$$

همانطور که گفته شد مسیر انتشار اشعه در نزدیکی سطح زمین به لایه‌های جو نفوذ می‌کند، در نتیجه جهت آن تغییر کرده و یک مسیر منحنی شکل را به سمت زمین طی می‌کند. بنابراین مسیر طی شده بزرگ‌تر از

<sup>۱</sup> Global Positioning System

<sup>۲</sup> Ray Tracing

<sup>۳</sup> Thayer

<sup>۴</sup> Hobiger

<sup>۵</sup> Nafisi

<sup>۶</sup> Hofmeister

$$d_{trop} = \int_{ray} (n-1)ds = 10^{-6} \int_{ray} N_{trop} ds \quad (7)$$

در رابطه اخیر  $N_{trop}$  شکست پذیری<sup>۳</sup> نامیده می شود. شکست پذیری را می توان به دو مؤلفه خشک  $N_d^{trop}$  و تر  $N_w^{trop}$  تقسیم کرد [۵]:

$$N^{trop} = N_d^{trop} + N_w^{trop} \quad (8)$$

مؤلفه خشک شکست پذیری ناشی از بخش هیدرواستاتیک<sup>۴</sup> جو و مؤلفه تر آن ناشی از بخش غیر هیدرواستاتیک<sup>۵</sup> جو می باشد. به همین ترتیب، تأخیر تروپوسفری از دو بخش تشکیل می شود. حدود ۹۰ درصد تأخیر تروپوسفری ناشی از بخش هیدرواستاتیک است و میزان تأثیر آن در حدود ۲/۲۵ متر تا ۲/۳۵ متر در راستای قائم است. تأخیر غیر هیدرواستاتیک تروپوسفر مقدار کمتری داشته و میزان آن حدوداً بین صفر تا ۰/۴ متر می باشد تأخیر هیدرواستاتیک به طور عمده به فشار جو وابسته است به همین دلیل با گذر زمان به کندی تغییر می کند ولی از آنجا که تأخیر غیر هیدرواستاتیک تروپوسفری به بخار آب وابسته است و این شاخص از نظر زمانی و مکانی تغییرات سریع تری را دارد، این مؤلفه تأخیر، تغییرات سریع تری را نسبت به زمان و مکان از خود نشان می دهد [۵].

### ۳- روش های محاسبه تأخیر تروپوسفری

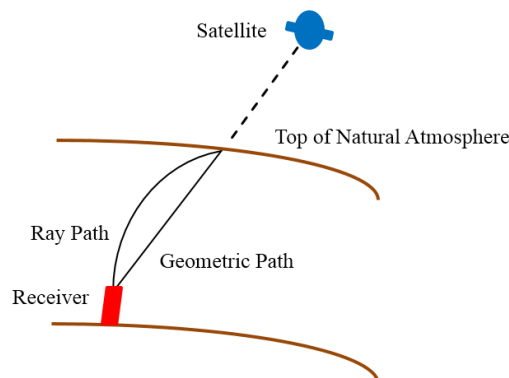
در حال حاضر از سه روش عمده برای مدل سازی تروپوسفر جهت تصحیح این تأخیر استفاده می شود. مدل-های پیش بینی جهانی، تخمین تأخیر تروپوسفری به عنوان مجهول و روش ردیابی اشعه از جمله روش های مورد استفاده می باشند. در این بخش به جزئیاتی در مورد سه روش فوق در برآورد خطای مورد بحث پرداخته شده است.

#### ۳-۱- مدل های پیش بینی جهانی<sup>۶</sup> با استفاده از توابع نگاشت

تحقیقات بسیاری در زمینه تولید مدل های تروپوسفری برای محاسبه شکست پذیری در طول مسیر سیگنال صورت

مسیر مستقیم یا به عبارت دیگر مسیر هندسی<sup>۱</sup>  $G$  آن است که با انتگرال زیر تعریف می شود (شکل ۱) [۵]:

$$G = \int_{vac} ds \quad (4)$$



شکل ۱- شکست مسیر موج ارسالی به دلیل عبور از لایه هایی با ضریب شکست متفاوت [۵]

این انتگرال در فضای خلأ گرفته شده است. میزان تأخیر انتشار در عبور از لایه تروپوسفر برابر است با اختلاف موجود بین طول مسیر واقعی و طول مسیر هندسی:

$$d_{trop} = \int_{ray} nds - \int_{vac} ds \quad (5)$$

رابطه (۴) نشان دهنده مسیر هندسی موج می باشد که با اعمال آن در رابطه (۵)، رابطه تأخیر تروپوسفری به شکل زیر تبدیل می شود [۵].

$$d_{trop} = \int_{ray} (n-1)ds + \left[ \int_{ray} ds - \int_{vac} ds \right] \quad (6)$$

ترم اول معادله اخیر، طول اضافی پیموده شده به دلیل تأخیری است که موج ارسالی آن را تجربه کرده است. ترم دوم تأخیر هندسی<sup>۲</sup> نامیده می شود که ناشی از اختلاف مسیر طی شده در خلأ و محیط واقعی در لایه تروپوسفر است. بدلیل آنکه ترم اول خود به تنهایی هم شامل تغییرات مربوط به ضریب شکست و هم شامل اثرات مربوط به انحنای اشعه است در اغلب موارد ترم اول به عنوان تأخیر تروپوسفری در نظر گرفته شده و ترم دوم نادیده گرفته می شود [۵]. به این ترتیب منظور از تأخیر تروپوسفری ترم اول از رابطه (۷) است. به عبارت دیگر:

<sup>۳</sup> Refractivity

<sup>۴</sup> Hydrostatic

<sup>۵</sup> Non-hydrostatic

<sup>۶</sup> Global prediction models

<sup>۱</sup> Geometric path

<sup>۲</sup> Geometric delay

گرفته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل هاپفیلد<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۹ و مدل سستامینن<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۳ اشاره کرد. شکست‌پذیری رفتاری وابسته به ارتفاع دارد به همین علت آن را می‌توان به صورت تابعی از ارتفاع نوشت که به آن پروفیل شکست‌پذیری گفته می‌شود. تفاوت عمده مدل‌های پیش‌بینی جهانی در پروفیل شکست‌پذیری، نحوه نگاشت تأخیر عمودی محاسبه شده در راستای زاویه ارتفاعی ماهواره است. بدین منظور توابع نگاشت متعددی توسط محققین مطرح گردیده است از جمله آن‌ها می‌توان به توابع IMF<sup>۳</sup>، NMF<sup>۴</sup> و GMF<sup>۵</sup> اشاره کرد. توابع نگاشت با استفاده از مفروضاتی همچون نادیده گرفتن تغییر افقی مولفه شکست‌پذیری و همچنین تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای هواشناسی و فقط وابستگی تأخیر به زاویه ارتفاعی، مدل‌هایی تعیین می‌شود. حسن استفاده از این مدل‌ها دسترسی سریع به تأخیر در زاویه ارتفاعی مورد نظر است. از معایب آن می‌توان به تقریبی بودن آن و همچنین وابسته نبودن آن به آزمایشات و همچنین شرایط مکانی و آب‌وهوایی اشاره کرد. تحقیقات اولیه برای توصیف رفتار وابسته به ارتفاع شکست‌پذیری (پروفیل شکست)، توسط هاپفیلد در سال ۱۹۶۹ صورت گرفت. در این مطالعات شاخص‌های ورودی، داده‌های هواشناسی سطحی نزدیک محل مشاهده است. این مدل دارای الگوریتمی به فرم زیر می‌باشد [۶]:

$$d_{trop} = \frac{K_d}{\sin(E^2 + 6.25)^{\frac{1}{2}}} + \frac{K_w}{\sin(E^2 + 2.25)^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

$$K_d = 155.2 \times 10^{-7} \frac{P}{T} H_d$$

$$K_w = 155.2 \times 10^{-7} \frac{4810e}{T^2} H_w$$

در رابطه بالا  $K_d$  و  $K_w$  به ترتیب توصیف‌کننده مجموعه اثرات مؤلفه هیدروستاتیک تأخیر تروپوسفری و مؤلفه غیر هیدروستاتیک تأخیر تروپوسفری در راستای قائم می‌باشند.  $E$  زاویه ارتفاعی ماهواره در واحد درجه و  $T$  دمای سطحی بر حسب کلون می‌باشد. شاخص  $H_w$  ارتفاع هم‌ارز تر<sup>۶</sup> و  $H_d$  ارتفاع هم‌ارز خشک<sup>۷</sup> می‌باشند. بالاتر از این دو ارتفاع به ترتیب تأخیرهای

هیدروستاتیک و غیر هیدروستاتیک تروپوسفر تقریباً صفر می‌گردند. این دو شاخص در واحد متر توسط هاپفیلد با روابط زیر تعریف شده‌است [۶]:

$$H_d = 40136 + 148.72(T - 273.16) \quad H_w = 11000m \quad (10)$$

مدل سستامینن یکی از رایج‌ترین و اجرایی‌ترین مدل‌های پیش‌بینی می‌باشد. این مدل برگرفته از قانون گازها بوده و مدلی استاندارد است. سستامینن در سال ۱۹۳۷ میلادی دو مؤلفه هیدروستاتیک ( $d_h^z$ ) و غیر هیدروستاتیک ( $d_w^z$ ) تأخیر تروپوسفری را در راستای قائم ایستگاه، با روابط زیر ارائه کرد [۶]:

$$d_h^z = \frac{0.002277 P_s}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028 H_s)} \quad (11)$$

$$d_w^z = 0.002277 \left( \frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s$$

در این رابطه  $H_s$  ارتفاع ایستگاه،  $P_s$  فشار جو در ایستگاه بر حسب میلی بار،  $e_s$  فشار بخار آب بر حسب میلی بار،  $T_s$  دما در ایستگاه بر حسب کلون و  $\varphi$  عرض جغرافیایی ایستگاه می‌باشد. مجموع دو تأخیر بدست آمده میزان تأخیر تروپوسفری را در راستای قائم به دست می‌دهند. با داشتن زاویه ارتفاعی ماهواره، این مقدار را می‌توان با استفاده از توابع نگاشت به تأخیر در راستای ماهواره تبدیل کرد.

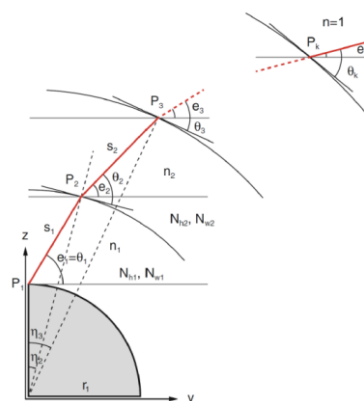
### ۳-۲- معرفی خطای تروپوسفر به عنوان مجهول

روش دیگر محاسبه تأخیر تروپوسفری، معرفی کامل آن به عنوان مجهول در معادلات مشاهدات و برآورد آن همراه با سایر مجهولات (مانند موقعیت نقاط شبکه) است. بدین منظور با در نظر گرفتن ترکیب عاری از یونسفر بین مشاهدات و اطمینان از حذف خطای مربوط به لایه یونسفر بوسیله این ترکیب، خطای باقیمانده ناشی از جو را به لایه تروپوسفر نسبت داده و خطای مربوط به لایه تروپوسفر در راستای قائم را در کنار موقعیت مطلق ایستگاه به عنوان مجهول مسئله در نظر گرفته و برآورد می‌نماییم. این روش دقیق‌ترین راه به منظور محاسبه میزان تأخیر کلی ناشی از لایه تروپوسفر در طول مسیر موج می‌باشد [۷].

<sup>۱</sup> Hopfield  
<sup>۲</sup> Saastamoinen  
<sup>۳</sup> Isobaric Mapping Function  
<sup>۴</sup> Neill Mapping Function  
<sup>۵</sup> Global Mapping Functions  
<sup>۶</sup> Wet equivalent height  
<sup>۷</sup> Dry equivalent height

### ۳-۳- ردیابی اشعه

روش ردیابی اشعه به عنوان یکی از روش‌های برآورد تاخیر تروپوسفری، بطور کلی به روش‌های دو بعدی و سه بعدی تقسیم می‌شود. در روش دوبعدی مسیر اشعه صرفاً در یک صفحه با آزمون ثابت در نظر گرفته شده ولی در روش سه بعدی این امکان برای اشعه در نظر گرفته می‌شود که در سه جهت آزادی عمل داشته باشد [۱]. روش‌های سه بعدی با واقعیت مسئله تروپوسفر تطابق بیشتری دارند [۲]. در این روش با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات محلی و استفاده از روابط مثلثاتی مسیر اشعه در بین هر لایه مشخص شده و در نهایت با استفاده از روابط موجود تاخیر بدست می‌آید. بطور کلی روش ردیابی اشعه یک روش تکراری است به بیان دیگر با یکبار انجام ردیابی اشعه از پایین‌ترین لایه تا بالاترین لایه تروپوسفر نمی‌توان به جواب مورد نظر دست یافت زیرا زاویه ارتفاعی اشعه در هنگام ورود به تروپوسفر شکسته شده و با زاویه نامعلومی به ایستگاه مورد نظر رسیده است. در شکل ۲ نمایی کلی از روش ردیابی اشعه دو بعدی ملاحظه می‌گردد. نقطه  $P_1$  ایستگاه مورد نظر بوده و زاویه ارتفاعی ورود اشعه به تروپوسفر  $e_k$  می‌باشد. این زاویه باتوجه به مختصات ماهواره‌ها و گیرنده‌ها معلوم بوده و زاویه  $e_1$  که نامعلوم است می‌تواند در تکرار اول با زاویه  $e_k$  یکسان در نظر گرفته شود. با انجام ردیابی اشعه و بدست آوردن زاویه ارتفاعی در لایه انتهایی و مقایسه آن با  $e_k$  تصحیحی بدست می‌آید که می‌توان آن را به زاویه شروع اعمال کرده و دوباره ردیابی اشعه صورت پذیرد و اینکار تا جایی ادامه می‌یابد که زاویه ارتفاعی در لایه آخر با زاویه  $e_k$  در حد قابل قبولی اختلاف داشته باشند [۱].



شکل ۲- ردیابی اشعه دو بعدی [۱]

برای انجام یک ردیابی اشعه سه بعدی می‌بایست معادلات آیکنال<sup>۱</sup> اشعه در سیستم مختصات مورد نظر نوشته شوند، فرم همیلتونین معادلات آیکنال طبق روابط زیر است [۲]:

$$H(r_i, \nabla L_i) \{ (\nabla L_i \cdot \nabla L_i)^{\frac{1}{2}} - n(r_i) \} = 0 \quad (12)$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$\frac{dr_i}{du} = \frac{\partial H}{\partial \nabla L_i} \quad (13)$$

$$\frac{d \nabla L_i}{du} = - \frac{\partial H}{\partial r_i} \quad (14)$$

$$\frac{dL}{du} = \nabla L_i \frac{\partial H}{\partial \nabla L_i} \quad (15)$$

در معادلات بالا  $H(r_i, \nabla L_i)$  تابع همیلتونین نام دارد. همچنین  $r_i = r_i(u)$  مسیر سه بعدی اشعه را توصیف می‌کند. در سیستم مختصات کروی داریم [۲]:

$$\frac{dL}{du} = \nabla L_i \frac{\partial H}{\partial \nabla L_i} \quad (16)$$

که در آن  $r$  فاصله شعاعی از مرکز زمین،  $\theta$  متمم عرض جغرافیایی و  $\lambda$  طول جغرافیایی است. با انجام مشتقات در سیستم مختصات کروی به فرم زیر خواهد رسید [۲]:

$$H(r, \theta, \lambda, L_r, L_\theta, L_\lambda) = (L_r^2 + \frac{1}{2} L_\theta^2 + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} L_\lambda^2)^{\frac{1}{2}} - n(r, \theta, \lambda) = 0 \quad (17)$$

در این معادله  $n$  پارمتر ضریب شکست است که تابعی از سه مولفه سیستم مختصات کرویست و  $L_r = \frac{\partial L}{\partial r}$  و  $L_\theta = \frac{\partial L}{\partial \theta}$  و  $L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$  می‌باشد. با استفاده از معادلات بالا و مشتق‌گیری از فرم همیلتونین به روابط زیر خواهیم رسید [۲]:

$$\frac{dr}{du} = \frac{1}{B} L_r \quad (18)$$

$$\frac{d\theta}{du} = \frac{1}{B \cdot r^2} L_\theta \quad (19)$$

$$\frac{d\lambda}{du} = \frac{1}{B \cdot r^2 \sin^2(\theta)} L_\lambda \quad (20)$$

<sup>۱</sup> Eikonal

$$T_v = \frac{T \cdot P}{P - (1 - \frac{M_v}{M_d})e} \quad (26)$$

$$e_{int} = e_i \exp(\frac{h_{int} - h_i}{C}) \quad (27)$$

$$C = e_i \exp(\frac{h_{i+1} - h_i}{\log(\frac{e_i + 1}{e_i})}) \quad (28)$$

در این روابط  $P_{int}$  فشار در لایه میانی،  $P_i$  فشار در لایه زیرین،  $h_{int}$  ارتفاع در لایه میانی،  $g_m$  شتاب ثقل متوسط،  $T_v$  دمای مجازی،  $e$  فشار بخار آب،  $M_v$  وزن مولکولی هوای مرطوب و  $M_d$  وزن مولکولی هوای مرطوب می‌باشند. به منظور انجام ردیابی اشعه فاصله ارتفاعی لایه‌ها مطابق جدول ۱ در نظر گرفته می‌شوند [۹].

جدول ۱- فاصله ارتفاعی لایه‌ها به منظور انجام درونیابی ارتفاعی [۹]

| ارتفاع (کیلومتر) | فاصله ارتفاعی بین لایه‌ها (متر) |
|------------------|---------------------------------|
| ۰ تا ۲           | ۱۰                              |
| ۲ تا ۶           | ۲۰                              |
| ۶ تا ۱۶          | ۵۰                              |
| ۱۶ تا ۳۶         | ۱۰۰                             |
| ۳۶ تا ۷۶         | ۵۰۰                             |

با انجام ردیابی اشعه و بدست آوردن مختصات اشعه در هر لایه می‌بایست برای این نقاط شکست‌پذیری محاسبه شود که برای این کار احتیاج به یک درونیابی افقی با استفاده از نقاط گرید داریم تا با بهره‌گیری از آن شکست‌پذیری را برای نقطه مورد نظر بدست آوریم درونیابی پیشنهادی با استفاده از مطالعات انجام شده قبلی روش درونیابی اسپلاین توصیه گردیده است [۲].

#### ۴- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

کشور ایران به منظور بررسی اهداف این مقاله انتخاب گردید. خطاهای جوی از جمله خطای ناشی از لایه تروپوسفر در کشور ایران بدلیل شرایط آب و هوایی گوناگون از اهمیت بسیاری برخوردار است. جهت انجام پردازش‌ها بایستی روزهای مناسبی از لحاظ وجود و تطابق مشاهدات انتخاب می‌گردیدند. سال ۲۰۰۷ در کشور ایران از لحاظ تعداد مشاهدات رادیوسوند در ایستگاه‌های مختلف سالی

$$\frac{dL_r}{du} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial r} + \frac{1}{Br} \left( \frac{L_\theta^2}{r^2} \frac{\cos \theta L_\lambda^2}{r^2 \sin^2(\theta)} \right) \quad (29)$$

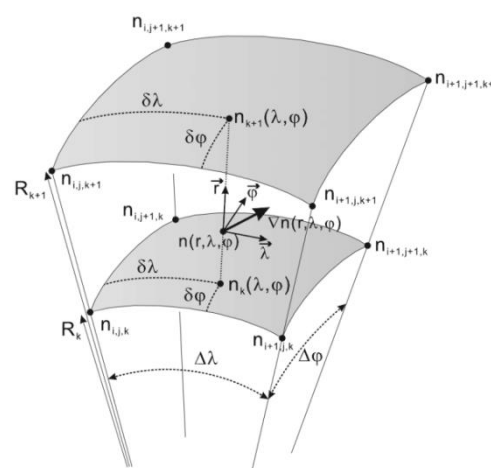
$$\frac{dL_\theta}{du} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial \theta} + \frac{1}{B} \left( \frac{L_\lambda^2}{r^2 \sin^3(\theta)} \right) \quad (30)$$

$$\frac{dL_\lambda}{du} = \frac{\partial n(r, \theta, \lambda)}{\partial \lambda} \quad (31)$$

$$B = (L_r^2 + \frac{1}{r^2} L_\theta^2 + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} L_\lambda^2)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

$$= n(r, \theta, \lambda)$$

معادلات می‌بایست بصورت همزمان حل گردند. در شکل ۳ نمایی کلی از روش ردیابی اشعه سه بعدی ملاحظه می‌گردد [۲].



شکل ۳- ردیابی اشعه سه بعدی [۲]

باتوجه به اینکه بیشترین میزان تاخیر تروپوسفر مربوط به لایه‌های نزدیک به زمین می‌باشد بدین منظور بایستی فواصل ارتفاعی بین لایه‌ها در مجاورت زمین کمتر و تعداد لایه‌های بیشتر در نظر گرفته شود و همینطور که به لایه‌های بالاتر تروپوسفر نزدیک می‌شویم فاصله لایه‌ها بیشتر شوند. بنابراین شاخص‌های هواشناسی اعم از فشار و فشار بخار آب و دما در این لایه‌ها می‌بایست درونیابی شوند. برای دما یک درونیابی خطی خواهیم داشت ولی برای فشار و فشار بخار آب باتوجه به اینکه نسبت به افزایش ارتفاع یک نرخ تقریباً نمایی وجود دارد. می‌توان از روابط ۲۵ تا ۲۸ بدین منظور استفاده نمود [۸]:

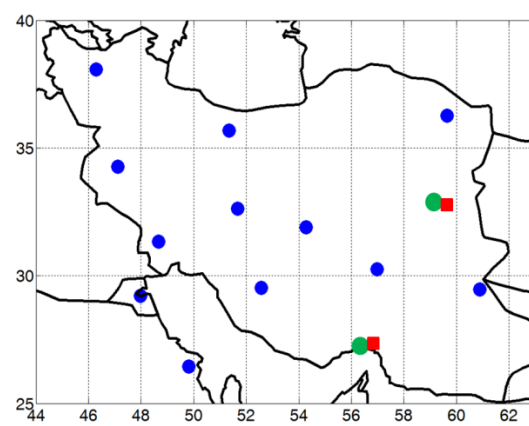
$$P_{int} = P_i \exp\left(-\frac{(h_{int} - h_i)g_m}{R_d T_v}\right) \quad (33)$$

علاوه بر مشاهدات رادیوسوند در این مقاله از داده‌های باز تحلیل شده ERA-Interim استفاده خواهیم کرد. این داده‌ها حاصل از آخرین آنالیز دوباره جو است که از سال ۱۹۸۹ آغاز گردید و تا کنون ادامه دارد. این داده‌ها مجموعه‌ای از شاخص‌های هواشناسی از ژانویه ۱۹۸۹ تا کنون را دربردارد. قدرت تفکیک مکانی آن‌ها از ۰/۱ درجه تا ۳ درجه متغیر است. همچنین حدود ۳۰۰ شاخص از جمله رطوبت نسبی، دما، فشار و... را در فرمت NetCDF<sup>۲</sup> در اختیار کاربران قرار می‌دهند. این داده‌ها از عرض جغرافیایی ۸۹/۴۲۵ تا ۸۹/۴۲۵- درجه و از طول جغرافیایی ۰ تا ۳۵۹/۲۵ درجه را شامل می‌شوند. قدرت تفکیک زمانی آن‌ها ۶ ساعت است و اطلاعات را در ۳۷ لایه فشاری و در ساعات ۶ صبح ۱۲ ظهر ۶ بعدازظهر و ۱۲ شب دربردارند [۱۱].

## ۵- پردازش

قبل از تصمیم‌گیری نسبت به تاثیر این دو نوع داده در بهبود تعیین موقعیت مطلق با استفاده از روش ردیابی اشعه می‌بایست از اشتباه نبودن داده‌های رادیوسوند اطمینان حاصل گردد. اطلاعات رادیوسوندها در برخی ارتفاعات بدلیل مشکلات موجود از بین رفته و به ثبت نمی‌رسند که این مسئله در فرمت داده‌ها با عدد ۳۲۷۶۷ یا ۹۹۹۹۹ در مقابل شاخص از دست رفته نمایان می‌گردد. علاوه بر این موضوع می‌بایست آزمایشی جهت کشف مشاهدات اشتباه بر روی مشاهدات هر دو ایستگاه صورت گیرد تا از سلامت داده‌های ارسالی اطمینان حاصل شود. به منظور کشف مشاهدات اشتباه ابتدا روش ردیابی اشعه در زمان اول مشاهدات مورد نظر و در هر دو ایستگاه پیاده‌سازی گردید. سپس تاخیر کلی مربوط به لایه تروپوسفر را از نرم‌افزار Bernese محاسبه نموده و در ادامه تاخیر هیدروستاتیک تروپوسفر با کمک مدل سستامین تخمین زده خواهد شد. سپس این مقادیر را با نتایج روش ردیابی اشعه بدست آمده از داده‌های رادیوسوند مقایسه شده و با استفاده از تست ۳۵ صحت مشاهدات ارزیابی می‌گردند. در شکل ۵ فشار بخار آب بدست آمده از مشاهدات رادیوسوند در ساعت صفر و در ایستگاه‌های مورد نظر ملاحظه می‌گردند.

غنی بشمار می‌آید. در شکل ۴ پراکندگی ایستگاه‌های رادیوسوند که حداقل در ۱۵۰ روز سال ۲۰۰۷ دارای مشاهده می‌باشند ملاحظه می‌گردد. به جهت پیاده‌سازی روش ردیابی اشعه و همچنین ارزیابی نتایج، نیاز به وجود ایستگاه‌های GPS در نزدیکی ایستگاه‌های رادیوسوند می‌باشد. علاوه بر این موضوع به منظور مقایسه نتایج در شرایط آب و هوایی متفاوت، می‌بایست مناطقی انتخاب می‌شدند که از لحاظ میزان رطوبت تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشتند. به همین علت و با توجه به تعداد مشاهدات، دو ایستگاه بیرجند و بندرعباس که در شکل ۴ مشخص گردیده‌اند به منظور پیاده‌سازی پردازش‌ها انتخاب گردیدند.



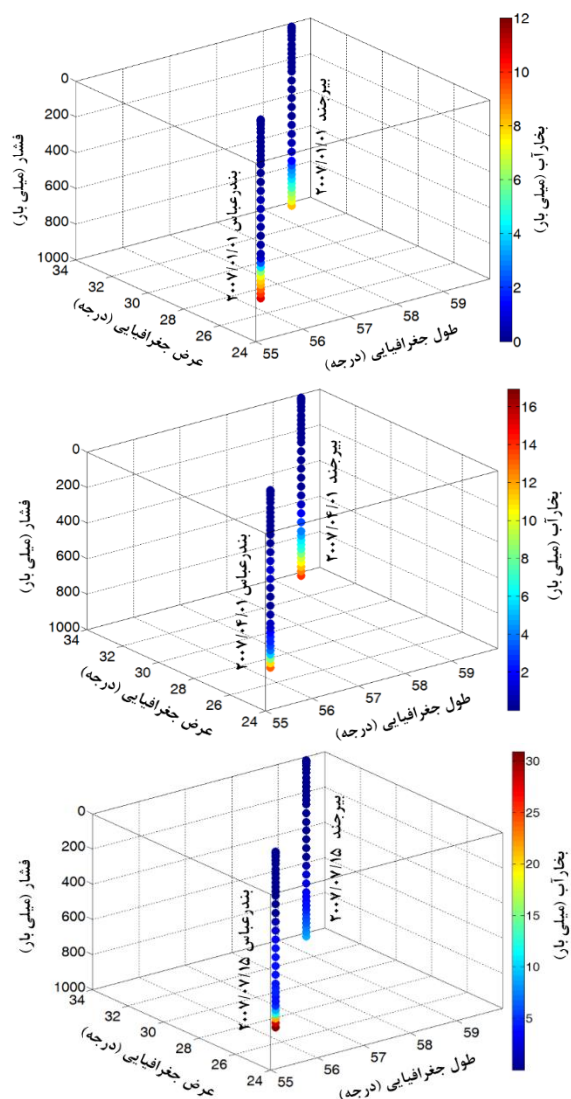
شکل ۴- پراکندگی ایستگاه‌های رادیوسوند در سال ۲۰۰۷. مربع‌های قرمز رنگ نماد ایستگاه‌های GPS می‌باشند. ایستگاه‌های انتخابی با دایره سبز مشخص گردیده‌اند

از بین روزهای مختلف، ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ و ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ و ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ به منظور پیاده‌سازی روش‌ها در نظر گرفته شدند.

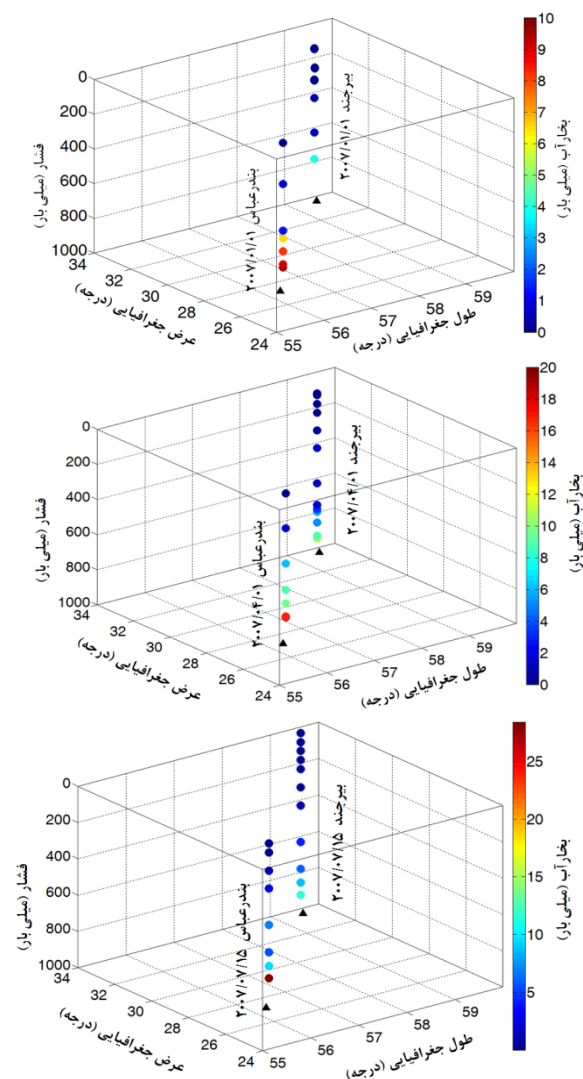
اولین سری مشاهدات مورد استفاده در این مقاله داده‌های رادیوسوند می‌باشد. رادیوسوندها مجموعه‌ای از سنسورها و ابزارهایی است که توسط یک بالن برای اندازه‌گیری شاخص‌های جوی به لایه‌های بالایی جو فرستاده می‌شود. اندازه‌گیری فشار و درجه حرارت با فاصله زمانی ۲ ثانیه انجام می‌شود ولی بدلیل مشکلاتی، تنها اندازه‌گیری‌های برخی سطوح و به شکل نامنظم ذخیره می‌گردند. داده‌های رادیوسوند معمولاً در قالب فرمت FSL<sup>۱</sup> ارائه می‌گردند. این اطلاعات عبارتند از فشار، ارتفاع، دما، نقطه شبنم و باد که در بهترین حالت با قدرت تفکیک زمانی ۱۲ ساعت ارائه می‌گردند [۱۰].

<sup>۲</sup> Network Common Data Form

<sup>۱</sup> Forecast Systems Laboratory

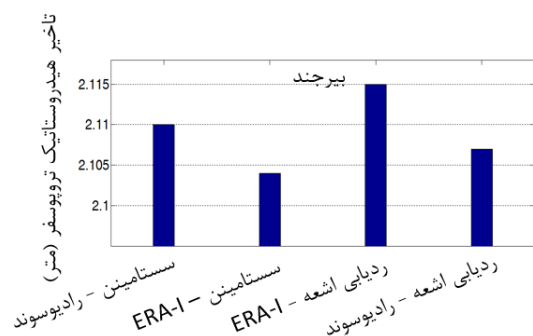


شکل ۶- فشار بخار آب بدست آمده از داده‌های ERA-Interim در روزهای مورد نظر در ساعت صفر



شکل ۵- فشار بخار آب بدست آمده از مشاهدات رادیوسوند در روزهای مورد نظر در ساعت صفر. مثلث‌های مشکی نماد موقعیت ایستگاه‌های GPS می‌باشند

تأخیر هیدروستاتیک تروپوسفری با استفاده از مدل سستامین و روش ردیابی اشعه با بکارگیری پارامترهای جوی حاصل از هر دو نوع مشاهده محاسبه گردیده است. در شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه بین نتایج در زمان اول مشاهدات رادیوسوند ملاحظه می‌گردد.



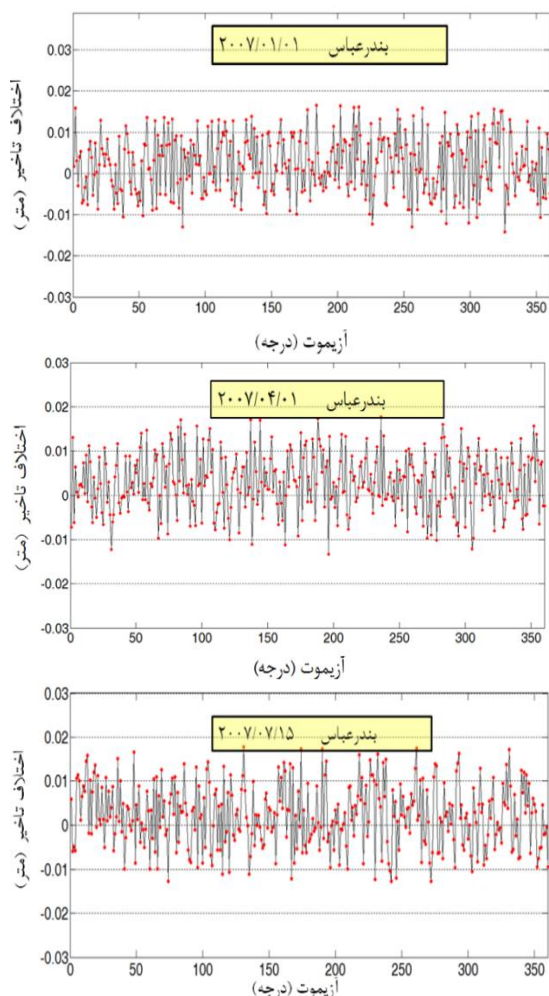
شکل ۷- مقایسه تأخیر هیدروستاتیک بدست آمده از روش‌های مختلف در زمان اول مشاهدات در ایستگاه بیرجند

در شکل ۶ فشار بخار آب در محل مربوط به دو ایستگاه، که از داده‌های هواشناسی ERA-Interim بدست آمده، در روزها و ایستگاه‌های مورد نظر قابل مشاهده می‌باشد. در شکل‌های ۵ و ۶ علاوه بر تفاوت قدرت تفکیک ارتفاعی داده‌های هواشناسی ERA-Interim و مشاهدات رادیوسوند، تفاوت بین شرایط جوی دو ایستگاه به منظور دستیابی به نتایج جامع‌تر نیز قابل مشاهده می‌باشد.

اختلاف بین تاخیر کلی بدست آمده در ایستگاه بندرعباس با استفاده از دو نوع داده و شاخص‌های آماری مربوط به آن در جدول ۴ و شکل ۹ مشاهده می‌شود.

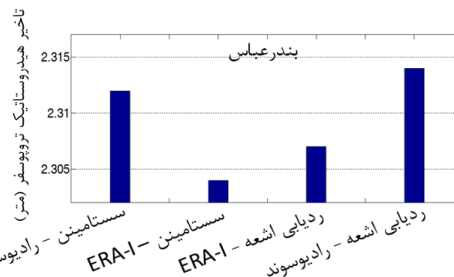
جدول ۴- شاخص‌های آماری مربوط به اختلاف بین تاخیر بدست آمده از دو نوع داده در ایستگاه بندرعباس

| تاریخ      | بیشینه<br>اختلاف تاخیر<br>بدست آمده از<br>دو داده<br>(میلیمتر) | کمینه<br>اختلاف تاخیر<br>بدست آمده از<br>دو داده<br>(میلیمتر) | انحراف معیار<br>اختلاف تاخیر<br>بدست آمده از<br>دو داده (mm) |
|------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ | ۱۷/۲۱                                                          | ۰/۰۰                                                          | ۵/۵۳                                                         |
| ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ | ۱۸/۶۱                                                          | ۰/۰۰                                                          | ۶/۸۹                                                         |
| ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ | ۱۹/۳۷                                                          | ۰/۰۰                                                          | ۷/۴۵                                                         |



شکل ۹- اختلاف بین تاخیر کلی بدست آمده از روش ردیابی اشعه سه بعدی برای دو نوع داده در ایستگاه بندرعباس

شاخص‌های آماری تاخیر کلی بدست آمده در حالت استفاده از دو نوع مشاهدات در ایستگاه بیرجند در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۸- مقایسه تاخیر هیدروستاتیک بدست آمده از روش‌های مختلف در زمان اول مشاهدات در ایستگاه بندرعباس

جدول ۲ نیز نشان دهنده مقایسه بین تاخیر کلی بدست آمده از نرم‌افزار Bernese و روش ردیابی اشعه با استفاده از مشاهدات رادیوسوند می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه تاخیر کلی بدست آمده از روش‌های مختلف در زمان اول مشاهدات رادیوسوند

| ایستگاه  | ردیابی اشعه با استفاده از<br>رادیوسوند (متر) | نرم‌افزار<br>Bernese (متر) |
|----------|----------------------------------------------|----------------------------|
| بندرعباس | ۲/۵۱۱                                        | ۲/۵۰۱                      |
| بیرجند   | ۲/۲۵۶                                        | ۲/۲۴۸                      |

از آنجاییکه مدل سستامین می‌تواند با دقت ۵ میلیمتر تاخیر هیدروستاتیک تروپوسفر را مدلسازی نماید، بازه اعتبار مشاهدات را ۱۵ میلیمتر در نظر گرفتیم و در نهایت بدلیل کمتر بودن اختلاف نتایج بدست آمده از مشاهدات رادیوسوند با مدل سستامین و نتایج بدست آمده از نرم‌افزار Bernese می‌توان از صحت مشاهدات اطمینان داشت. حال می‌توان به سراغ محاسبه تاخیر ناشی از لایه تروپوسفر و پیاده‌سازی روش ردیابی اشعه سه بعدی رفت. با استفاده از روابط ذکر شده در بخش ۳-۳ میزان تاخیر تروپوسفری در دو ایستگاه و در زمان‌ها مختلف و در آزمایش‌های متفاوت از صفر تا ۳۶۰ درجه، با توجه به زاویه تابش امواج محاسبه گردید. تاخیر کلی بدست آمده در حالت استفاده از دو نوع مشاهدات در ایستگاه بندرعباس در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۳- شاخص‌های آماری مربوط به تاخیر کلی بدست آمده با استفاده از دو نوع داده در ایستگاه بندرعباس

| مشاهدات     | تاریخ      | بیشینه<br>تاخیر کلی<br>بدست آمده<br>(متر) | کمینه<br>تاخیر کلی<br>بدست آمده<br>(متر) | انحراف معیار<br>تاخیر کلی<br>بدست آمده<br>(m) |
|-------------|------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| رادیوسوند   | ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ | ۲۱/۱۵                                     | ۲۱/۰۵                                    | ۰/۰۲                                          |
| رادیوسوند   | ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ | ۲۳/۴۵                                     | ۲۳/۱۳                                    | ۰/۳۲                                          |
| رادیوسوند   | ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ | ۲۸/۳۹                                     | ۲۷/۰۲                                    | ۰/۴۸                                          |
| ERA-Interim | ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ | ۲۱/۱۲                                     | ۲۰/۰۴                                    | ۰/۰۴                                          |
| ERA-Interim | ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ | ۲۳/۲۵                                     | ۲۳/۱۶                                    | ۰/۲۹                                          |
| ERA-Interim | ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ | ۲۸/۱۷                                     | ۲۷/۰۵                                    | ۰/۴۱                                          |

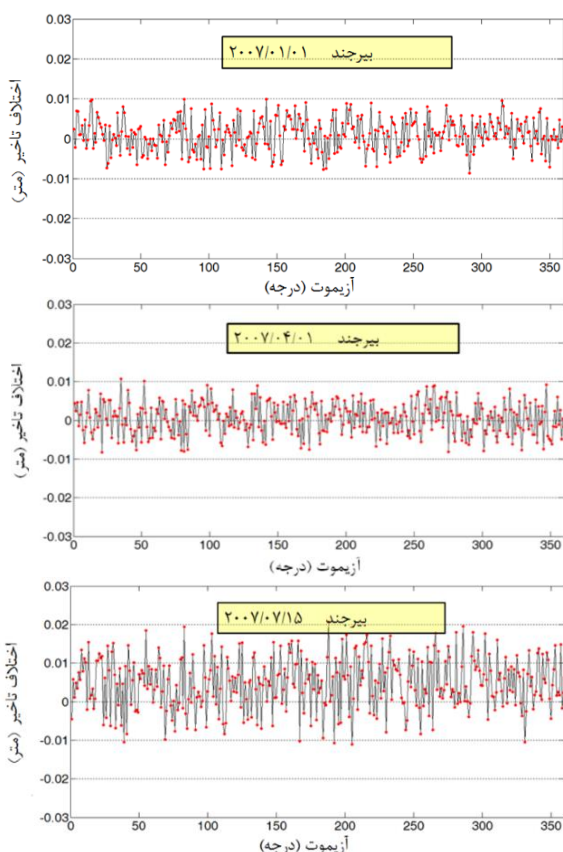
جدول ۵- شاخص‌های آماری مربوط به تاخیر کلی بدست آمده با استفاده از دو نوع داده در ایستگاه بیرجند

| مشاهدات     | تاریخ      | بیشینه تاخیر کلی بدست آمده (متر) | کمینه تاخیر کلی بدست آمده (متر) | انحراف معیار تاخیر کلی بدست آمده (m) |
|-------------|------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| رادیوسوند   | ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ | ۱۷/۱۶                            | ۱۵/۱۹                           | ۰/۱۱                                 |
| رادیوسوند   | ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ | ۱۹/۴۵                            | ۱۸/۱۱                           | ۰/۲۹                                 |
| رادیوسوند   | ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ | ۲۳/۱۵                            | ۲۲/۰۱                           | ۰/۳۹                                 |
| ERA-Interim | ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ | ۱۷/۰۱                            | ۱۵/۰۸                           | ۰/۰۸                                 |
| ERA-Interim | ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ | ۱۹/۲۴                            | ۱۸/۱۲                           | ۰/۲۱                                 |
| ERA-Interim | ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ | ۲۳/۱۰                            | ۲۲/۰۲                           | ۰/۲۴                                 |

اختلاف بین تاخیر کلی بدست آمده در ایستگاه بیرجند با استفاده از دو نوع داده و شاخص‌های آماری مربوط به آن در جدول ۶ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در نهایت بایستی به بررسی تفاوت اثر این دو نوع داده در دقت تعیین موقعیت مطلق بپردازیم. بدین منظور از نسخه ۵/۲ نرم‌افزار Bernese که در زمینه تعیین موقعیت مطلق و محاسبات مربوط به ژئودزی ماهواره‌ای نرم‌افزاری دقیق و شناخته شده است استفاده گردید [۱۲]. ابتدا مشاهدات مربوط به دو ایستگاه به نرم‌افزار وارد و بدون اعمال تصحیحات خارجی لایه تروپوسفر موقعیت دو ایستگاه محاسبه گردید. در طول این پروسه خطای مربوط به لایه تروپوسفر به عنوان مجهول در نظر گرفته شده و در زمان مربوط به مشاهدات برآورد شد. در مرحله بعد تعیین موقعیت بدون در نظر گرفتن وجود لایه تروپوسفر و بدون هیچگونه تصحیح یا برآوردی صورت پذیرفت. در ادامه با اعمال تصحیحات بدست آمده از مشاهدات رادیوسوند و داده‌های هواشناسی بار دیگر تعیین موقعیت برای این دو حالت نیز انجام گرفت. جدول ۶ نشان دهنده نتایج بدست آمده در دو ایستگاه می‌باشد.

جدول ۶- شاخص‌های آماری مربوط به اختلاف بین تاخیر بدست آمده از دو نوع داده در ایستگاه بیرجند

| تاریخ      | بیشینه اختلاف تاخیر بدست آمده از دو داده (mm) | کمینه اختلاف تاخیر بدست آمده از دو داده (mm) | انحراف معیار اختلاف تاخیر بدست آمده از دو داده (mm) |
|------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ | ۱۱/۰۷                                         | ۰/۰۰                                         | ۳/۴۲                                                |
| ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ | ۱۱/۴۵                                         | ۰/۰۰                                         | ۴/۱۴                                                |
| ۲۰۰۷/۰۷/۱۵ | ۰/۲۱                                          | ۰/۰۰                                         | ۵/۵۷                                                |



شکل ۱۰- اختلاف بین تاخیر کلی بدست آمده از روش ردیابی اشعه سه بعدی برای دو نوع داده در ایستگاه بیرجند

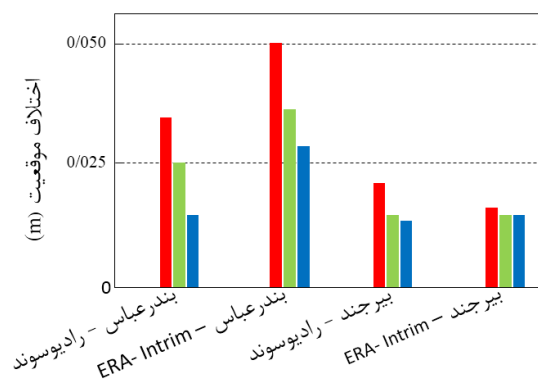
جدول ۶- موقعیت بدست آمده با استفاده از روش‌های مختلف

| روش - داده                | ایستگاه  | شرقی-غربی (متر) | شمالی - جنوبی (متر) | ارتفاعی (متر) |
|---------------------------|----------|-----------------|---------------------|---------------|
| برآورد بصورت مجهول        | بندرعباس | ۳۱۴۸۹۸۱/۵۱۲     | ۴۷۲۳۰۹۴/۵۶۱         | ۲۸۹۸۳۳۴/۰۹۱   |
| بدون اعمال تصحیحات        | بندرعباس | ۳۱۴۸۹۷۹/۳۱۸     | ۴۷۲۳۰۹۳/۷۸۴         | ۲۸۹۸۳۲۹/۱۱۳   |
| ردیابی اشعه - رادیوسوند   | بندرعباس | ۳۱۴۸۹۸۱/۴۹۹     | ۴۷۲۳۰۹۴/۵۷۲         | ۲۸۹۸۳۳۴/۰۶۵   |
| ردیابی اشعه - ERA-Interim | بندرعباس | ۳۱۴۸۹۸۱/۴۸۸     | ۴۷۲۳۰۹۴/۵۴۳         | ۲۸۹۸۳۳۴/۰۵۳   |
| برآورد بصورت مجهول        | بیرجند   | ۲۷۴۰۹۹۸/۳۴۸     | ۴۶۰۸۱۶۳/۰۷۱         | ۳۴۴۵۴۷۳/۱۳۷   |
| بدون اعمال تصحیحات        | بیرجند   | ۲۷۴۱۰۰۱/۴۵۹     | ۴۶۰۸۱۶۴/۰۱۲         | ۳۴۴۵۴۷۰/۴۲۹   |
| ردیابی اشعه - رادیوسوند   | بیرجند   | ۲۷۴۰۹۹۸/۳۳۶     | ۴۶۰۸۱۶۳/۰۸۲         | ۳۴۴۵۴۷۳/۱۵۲   |
| ردیابی اشعه - ERA-Interim | بیرجند   | ۲۷۴۰۹۹۸/۳۴۰     | ۴۶۰۸۱۶۳/۰۷۹         | ۳۴۴۵۴۷۳/۱۵۱   |

## ۶- بحث و نتیجه گیری

هدف این مقاله بکارگیری روش ردیابی اشعه سه بعدی و مقایسه نقش دو داده هواشناسی ERA-Interim و رادیوسوند در افزایش دقت تعیین موقعیت مطلق بود. در راستای این هدف و باتوجه به تعداد مشاهدات در هر منطقه از کشور ایران دو ایستگاه بندرعباس و بیرجند به منظور انجام پردازشها انتخاب گردیدند. قبل از هر اقدامی به بررسی و کشف مشاهدات اشتباه پرداختیم و بدین منظور از تست ۳۵ با کمک رابطه سستامین و همچنین تاخیر بدست آمده از نرم افزار Bernese در زمان اول مشاهدات رادیوسوند استفاده نمودیم. سپس تکنیک ردیابی اشعه سه بعدی را با استفاده از دو نوع داده و در محل دو ایستگاه پیاده سازی نمودیم. بیشینه اختلاف بین نتایج در ایستگاه بندرعباس مربوط به تاریخ ۱۵/۰۷/۲۰۰۷ و معادل ۰/۰۱۹۴ متر بود و بیشترین میزان اختلاف نتایج در ایستگاه بیرجند در تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ و به میزان ۰/۰۱۱۵ متر بوقوع پیوسته بود. با توجه به هدف مقاله که مقایسه میزان تاثیر این دو نوع داده در افزایش دقت تعیین موقعیت مطلق می باشد از ورژن ۵/۲ نرم افزار Bernese به جهت انجام روند تعیین موقعیت مطلق استفاده گردید. عملیات تعیین موقعیت در چهار حالت صورت پذیرفت. بار اول با مجهول در نظر گرفتن خطای تروپوسفری و برآورد آن با استفاده از نرم افزار، بار دوم بدون اعمال تصحیحات تروپوسفری به مشاهدات و بار سوم و چهارم با اعمال تصحیحات بدست آمده از رادیوسوند و داده های هواشناسی ERA-Interim بر مشاهدات. نتایج نشان دهنده اهمیت تاخیر لایه تروپوسفر در محاسبات تعیین موقعیت بود. اختلاف بین مختصات دقیق و مختصات حاصل از اعمال تصحیحات تروپوسفری به روش ردیابی اشعه با داده های رادیوسوند برابر ۰/۰۳۲۹ و با داده های هواشناسی ERA-Interim برابر با ۰/۰۴۹۱ متر مشاهده گردید. در ایستگاه بندرعباس تصحیحات رادیوسوند نسبت به تصحیحات داده های هواشناسی منجر افزایش دقت تعیین موقعیت در حدود ۰/۰۱۶۲ متر گردید که باتوجه دقت موقعیت ایستگاه از لحاظ آماری معنادار می باشد. این در حالی است که اختلاف بین مختصات دقیق و مختصات حاصل از اعمال تصحیحات تروپوسفری به روش ردیابی اشعه با

اختلاف بین موقعیت بدست آمده در روش های مختلف با موقعیت محاسبه شده در حالت مجهول فرض کردن خطای تروپوسفر در نرم افزار که دقیق ترین روش محاسبه خطای تروپوسفر می باشد، در شکل ۱۱ ملاحظه می گردد.



شکل ۱۱- اختلاف بین موقعیت بدست آمده در روش های مختلف با موقعیت محاسبه شده در حالت مجهول فرض کردن خطای تروپوسفر در نرم افزار (ستون قرمز: اختلاف در موقعیت سه بعدی، ستون سبز: اختلاف موقعیت مسطحاتی و ستون آبی: اختلاف در موقعیت ارتفاعی)

در نظر نگرفتن تاخیر ناشی از لایه تروپوسفر منجر به خطایی به میزان ۵/۴۹ متر در ایستگاه بندرعباس و ۴/۲۳ متر در ایستگاه بیرجند گردیده است که نشان دهنده اهمیت این خطا در بحث تعیین موقعیت می باشد. باتوجه به مقادیر جدول ۶ و شکل ۱۱ می توان نتیجه گرفت که در ایستگاه بندرعباس مشاهدات رادیوسوند از قدرت بیشتری نسبت به داده های هواشناسی برخوردار بوده اند زیرا موقعیت محاسبه شده با استفاده از مشاهدات رادیوسوند در مقایسه با موقعیت محاسبه شده با بکارگیری داده های هواشناسی اختلاف کمتری با موقعیت محاسبه شده در حالت مجهول در نظر گرفتن خطای تروپوسفر دارد. این در حالی است که در ایستگاه بیرجند در نتایج دو نوع داده تفاوت چشمگیری ملاحظه نمی گردد. باتوجه به این موضوع که دقت مختصات در حالت مجهول در نظر گرفتن خطای لایه تروپوسفر در ایستگاه بندرعباس در حدود ۱۴ میلیمتر و در ایستگاه بیرجند ۱۱ میلیمتر برآورد گردیده است می توان نتیجه گرفت در ایستگاه بندرعباس اختلاف بین نتایج معنادار بوده ولی در ایستگاه بیرجند عکس این قضیه صورت پذیرفته و اختلاف بین نتایج باتوجه به دقت موقعیت از لحاظ آماری معنادار نمی باشد.

داده‌های رادیوسوند و داده‌های هواشناسی ERA-Interim در ایستگاه بیرجند به ترتیب ۰/۰۲۱۱ و ۰/۰۱۸۷ متر است که باتوجه به دقت موقعیت ایستگاه اختلاف بسیار ناچیزی بوده و از لحاظ آماری معنادار نمی‌باشد. این موضوع را می‌توان به تغییرات کم بخار آب و سایر شاخص‌های جوی در راستاهای ارتفاعی و مسطحاتی این ایستگاه نسبت به ایستگاه بندرعباس دانست.

در نهایت می‌توان گفت که تصحیح تروپوسفری حاصل از ردیابی اشعه با استفاده از داده‌های رادیوسوند و داده‌های هواشناسی ERA-Interim در مناطق با تغییرات زمانی و مکانی بالای شاخص‌های جوی، دارای تفاوت معنی‌دار خواهد بود و در مناطقی که شاخص‌های جوی دارای تغییرات مکانی و زمانی زیادی نیستند، تصحیح تروپوسفری حاصل از دو نوع داده فوق یکسان است.

## مراجع

- [1] Thayer, G.D., 1967. A rapid and accurate ray tracing algorithm for a horizontally stratified atmosphere., Radio Science, Vol. 1 (new series), No. 2.
- [2] Hobiger, T., Ichikawa, R., Koyama, Y., Kondo, T., 2008. Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models. Journal of Geophysical Research 113.
- [3] Haji Aghajany, S., Amerian, Y., 2017. Three dimensional ray tracing technique for tropospheric water vapor tomography using GPS measurements. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 164, 81-88. doi: 10.1016/j.jastp.2017.08.003.
- [4] Hofmeister, A., 2016. Determination of path delays in the atmosphere for geodetic VLBI by means of ray-tracing". PhD thesis. Department of Geodesy and Geoinformation, TU Wien.
- [5] Mendes, V.B., 1998. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. U.N.B., p. 353.
- [6] Saastamoinen, J., 1973. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction. Bulletin Geodesique, 105, pp.279-298, 106, pp. 383-397, 107, pp. 113-134. Printed in three parts.
- [7] Böhm, J., Schuh, H., 2003. Vienna Mapping Functions, Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Leipzig, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, pp. 131 – 143.
- [8] Wallace, J. M., & Hobbs, P. V., 2006. Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92). Academic press.
- [9] Rocken, C., Sokolovskiy, S., Johnson, J. M., & Hunt, D., 2001. Improved mapping of tropospheric delays. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18(7), 1205-1213.
- [10] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- [11] Dee, D. P., et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, Q. J. R. Meteorology. Soc., 137(656), 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- [12] Dach, R., Hugentubler, U., Fridez, P., Meindl, M., 2007. Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Berne., p. 612.