

ارزیابی بکارگیری نهفتگی رادیویی زمین‌پایه جهت رصد تغییرات رطوبت نسبی و فشار لایه‌های جو پایین در کشور

شروین امیری^{۱*}، فهیمه نجفی^۲، لیلا محمدی^۳

۱-دانشیار، پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران،

۲- کارشناسی ارشد سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۳-استادیار، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات

چکیده

امروزه کاربردهای نوینی از سیستم ماهواره‌های ناوبری مانند GPS در زمینه‌های هواشناسی مطرح شده است. استخراج پارامترهای جوی با استفاده از روش نهفتگی رادیویی با توجه به قرارگیری ماهواره‌های ناوبری GPS در مدار زمین، در سال‌های اخیر به یک روش کاربردی تبدیل شده است. نهفتگی رادیویی زمین‌پایه یک تکنیک نو برای کاوش جو پایین می‌باشد. در این پژوهش شبیه‌سازی ای از نهفتگی رادیویی زمین‌پایه بر روی کوه دماوند، کوه سبلان در منطقه شمال غربی و کوه بزمان در جنوب غربی ایران انجام شده و برنامه استخراج داده‌های جوی با استفاده از این روش پیاده‌سازی شده است. اعتبار داده‌های بدست آمده از پدیده نهفتگی رادیویی زمین‌پایه بر روی قله دماوند در دو روز متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای جوی بدست آمده از این روش با داده‌های رادیوسوند واقع در منطقه مهرآباد مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه نشان می‌دهد که نمودارهای بدست آمده از روش نهفتگی رادیویی زمین‌پایه مطابقت خوبی با نمودارهای رادیوسوند در منطقه دارد. همانطور که در کشورهای دیگر نیز آزمایش شده، روش نهفتگی رادیویی زمین‌پایه به عنوان یک تکنیک نو و اقتصادی برای کاوش تغییرات جو پایین و روش مکمل رادیوسوند برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به جو پایین است که از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشد و موجب بالا بردن دقت پیش‌بینی‌های هواشناسی در کشور می‌شود.

کلمات کلیدی: نهفتگی رادیویی زمین‌پایه، پارامترهای جوی، رادیوسوند

مقدمه

رادیوسوند روش متداول در سازمان‌های هواشناسی برای استخراج پروفایل تغییرات پارامترهای جوی می باشد. هر بار پرتاب رادیوسوند که حدود ۲ ساعت طول می کشد داده‌های مختلف از سطح زمین تا ارتفاع ۳۰ کیلومتری از سطح دریا را ثبت می کند. با توجه به هزینه‌بر بودن این روش عموماً اکثر ایستگاه‌های سنجش هواشناسی به یک یا حداکثر دو ارسال بالن مجهز به رادیوسوند در روز بسنده می کنند. طبعاً این محدودیت باعث کاهش دقت زمانی پیش بینی تغییرات جوی خصوصاً رطوبت نسبی می شود به ویژه در فصلی مانند بهار که تغییرات گاه‌ها به صورت ساعتی می باشد. بنابراین استفاده از روش‌های مکملی که بتواند این نقیصه را بر طرف نموده و امکان ارزیابی شرایط جوی در دفعات بیشتر در طول شبانه‌روز را تامین نماید از مواردی است که مورد توجه بیشتر مراکز تحقیقاتی هواشناسی دنیاست.

فعالیت‌های تحقیقاتی متعددی جهت استفاده از اندازه گیریهای انجام شده توسط گیرنده های زمینی جهت افزایش دقت پیش بینی های هواشناسی مورد توجه می باشد. در این مقاله، به نحوه به کارگیری امواج رادیویی در حال گذر از جو جهت سنجش ضریب شکست جو و بدنبال آن استخراج پارامترهایی همچون رطوبت نسبی و فشار بخار آب می‌پردازیم. منبع سیگنال رادیویی به کار گرفته شده در این روش سیگنال‌های ماهواره‌های ناوبری همچون GPS و GLONASS می‌باشد. منظومه ماهواره‌های GPS که با ماموریت تعیین موقعیت مکانی به فضا ارسال شد (شورچه، آزموده اردلان ۱۳۸۹)، امروزه دارای کاربردهای عمومی متعددی می باشند. با توسعه گیرنده های GPS زمینی، یک روش جدید برای استفاده از تاخیر GPS مبتنی بر زمین برای تخمین و بازیابی پروفایل اتمسفر مطرح نمودند (لوری و همکاران ۲۰۰۲) و (شنگ و همکاران ۲۰۱۳). وو و همکاران سعی نمودند، دقت تبدیل معکوس را با افزایش رزولوشن عمودی در مدل تبدیل معکوس بهبود دهند، با این حال، همچنان، تفاوت بین نتایج بازیابی شده و مشاهدات در اتمسفر پایین بارز بود (وو و همکاران ۲۰۱۴). زیرا، این نتایج، از مشاهدات تکی بازیابی شده بود. وو و

همکاران، از تاخیر فاز و زاویه خمشی برای بازیابی پروفایل انکسار استفاده نمودند و نتیجه‌ای نسبتاً دقیق به دست آوردند (وو و همکاران ۲۰۱۰). با این وجود، این روش، برتری معکوس توأم را به دلیل همبستگی قوی بین دو مشاهدات برجسته نکرده است. معکوس توأم، یک روش برای تخمین پارامترهای سنتز شده از مشاهدات متعدد است (میلر و همکاران ۲۰۱۲) و (لیو و همکاران ۲۰۱۴). توسط (لیائو و همکاران ۲۰۱۶)، تخمین جدیدی از پروفایل‌های انکسار جوی با ترکیب سیگنال پراکندگی (اتلاف انتشار موج الکترومغناطیسی) و سیگنال مستقیم (تاخیر فاز) ارائه گردیده است.

در این مقاله، به کاربری جدید این سیگنال‌ها در حوزه هواشناسی پرداخته می‌شود. این موضوع با قراردادن یک گیرنده GPS بر روی سکوه‌های مختلفی مانند ماهواره، هواپیما، بالون و یا نقاط مرتفع همانند کوه‌ها و دریافت سیگنال در شرایط نهفتگی (یعنی در جاییکه گیرنده در دید مستقیم فرستنده قرار ندارد) عملیاتی می‌شود.

گیرندگی نهفتگی، هنگامیکه گیرنده در نقاط مرتفع مانند قله کوه‌ها قرار می‌گیرد، به نهفتگی رادیویی زمین‌پایه^۱ (MBRO) موسوم است که توسط زوفادا و همکاران (۱۹۹۹) معرفی شد. آزمایش‌هایی از نهفتگی رادیویی زمین‌پایه توسط یوچی و همکاران (۲۰۰۱) در ژاپن، یانگ و همکاران (۲۰۰۶) در چین انجام گردید.

براساس آزمایش‌های اولیه انجام شده در چین، مشخص شد که با قراردادن یک گیرنده GPS با میدان دید ۳۶۰ درجه بر روی کوهی به ارتفاع ۵ کیلومتر، تعداد ۸۰ الی ۱۰۰ رویداد نهفتگی قابل ردیابی است (هو و همکاران ۲۰۰۸). بنابراین به همین تعداد نمودار ضریب شکست در هر روز قابل محاسبه می‌باشد. این اطلاعات که قابل تبدیل به پارامترهای جوی است، پیرامون محل استقرار گیرنده می‌باشند. نتایج به دست آمده از این روش و مقایسه آن با داده‌های مستخرج از رادیوسوند بیانگر قابل اطمینان بودن این روش است.

به منظور فراهم آوردن شرایط لازم برای انجام چنین آزمایش‌هایی در ایران، نقاط مرتفعی جهت قراردادن گیرنده-

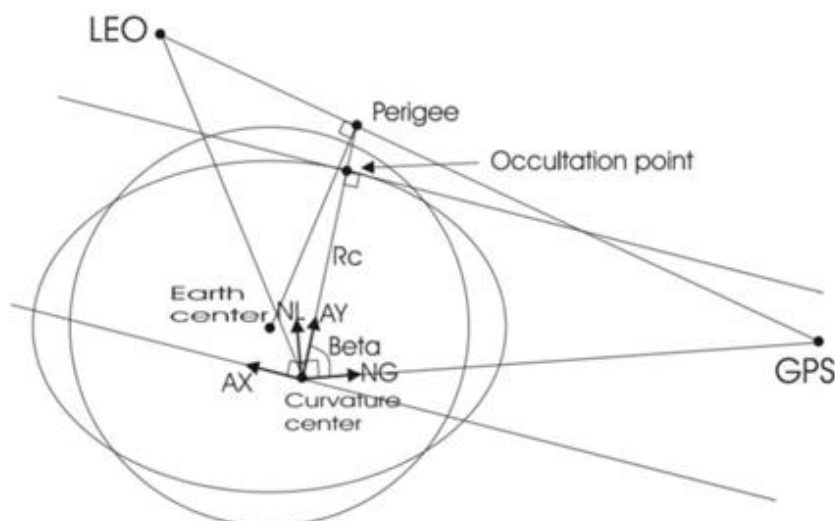
^۱ Mountain Base Radio Occultation (MBRO)

اطلاعات رادیوسوند واقع در فرودگاه مهرآباد مقایسه و نتایج آن ارائه شده است.

بررسی هندسه و فیزیک نهفتگی رادیویی

زمین پایه

پدیده نهفتگی هنگامی رخ می‌دهد که فرستنده سیگنال GPS و گیرنده سیگنال GPS در دید مستقیم هم قرار نداشته باشند و به دلیل شکست سیگنال در اتمسفر، پرتو عبوری خم شده و به گیرنده برسد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، تحلیل پدیده نهفتگی با استفاده از تعریف مرکز انحنا و تبدیل مختصات در طول نهفتگی، در یک صفحه دوبعدی قابل نمایش است.



شکل ۱- نمایش از صفحه دو بعدی نهفتگی

عمودی از صفحه نهفتگی در مدت زمان وقوع رویداد نهفتگی دارای مقداری ثابت بوده و بنابراین سرعت آن در این صفحه تقریباً صفر است و به این طریق شروع زمان نهفتگی تعیین می‌شود (بنزن ۲۰۰۳). حداکثر ارتفاع هندسی نقاط مماسی بدست آمده از شبیه‌سازی‌های نهفتگی رادیویی زمین پایه زیر ارتفاع گیرنده است (زوفادا و همکاران ۱۹۹۹).

همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، مسیر سیگنال با پارامترهایی مانند زاویه خم α ، ضریب موثر a و نقطه مماسی قابل بیان است. در این شکل، R نشان دهنده گیرنده واقع بر روی قله است R_T نشان دهنده فاصله ماهواره GPS

های MBRO انتخاب شدند. در این ارتفاعات میزان پوشش و تعداد رویدادهای نهفتگی قابل دستیابی مورد ارزیابی قرار گرفت و نرم‌افزار مورد نیاز جهت استخراج پارامترهای هواشناسی از داپلر اضافی ایجاد شده در سیگنال دریافتی، پیاده‌سازی شد که نتایج آن ارائه شده است.

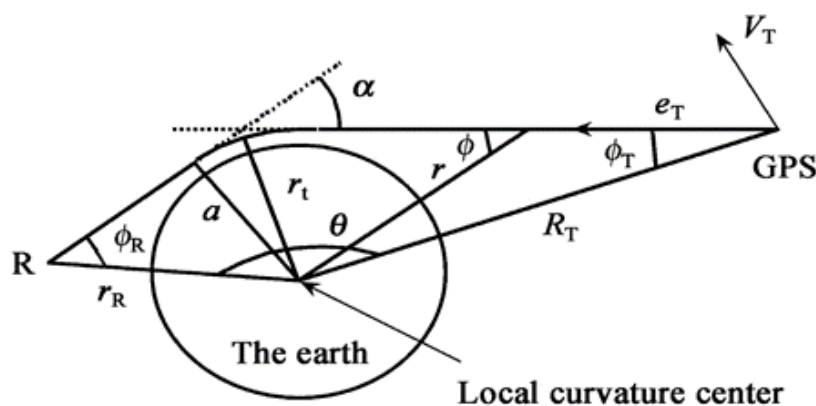
در این مقاله ابتدا به معرفی هندسه نهفتگی رادیویی زمین پایه می‌پردازیم. سپس شبیه‌سازی انجام شده بر روی کوه‌های (دماوند، سبلان، بزمان) را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. در پایان مقایسه‌ای بین نتایج به کارگیری نهفتگی رادیویی زمین پایه بر روی کوه دماوند در دو فصل مختلف با

برای شروع محاسبات ابتدا نقاط مماسی برای سیگنال دریافتی در لحظات مختلف بدست می‌آید. پس از مشخص شدن نقاط مماسی با توجه به کمترین ارتفاع هندسی (بدون در نظر گرفتن ارتفاع منفی) نسبت به مرجع بیضوی زمین، نقطه نهفتگی^۱ تعیین می‌شود. با مشخص شدن نقاط مماسی و نقطه نهفتگی، بردار مرکز منحنی مشخص می‌شود. سپس بردارهای سه بعدی فرستنده براساس نقطه نهفتگی و بردار مرکز منحنی، به صفحه دو بعدی نهفتگی منتقل می‌شود. در حالت نهفتگی مقدار بردار موقعیت ماهواره GPS در محور

^۱ Occultation point

در فرستنده و گیرنده هستند. اولین مرحله در اندازه گیری نهفتگی رادیویی، تشخیص وقوع آرایش نهفتگی یعنی شرایط قرارگیری ماهواره های GPS و گیرنده نهفتگی نسبت به هم می باشد (امیری، فهامی ۱۳۹۲) و (هو و همکاران ۲۰۰۸).

از مرکز انحنای محلی، r_R نشان دهنده فاصله گیرنده GPS (واقع بر روی قله) از مرکز انحنای محلی، e_T بردار یک پرتو در فرستنده، r_t فاصله نقطه مماسی تا مرکز انحنای محلی، θ زاویه بین بردارهای فرستنده و گیرنده، ϕ زاویه بین بردار موقعیت $\vec{r}$ و بردار مماس مسیر پرتو، ϕ_R و ϕ_T به ترتیب زاویه بین مسیر پرتو و بردارهای موقعیت ماهواره



شکل ۲- هندسه نهفتگی رادیویی زمین پایه

دلیل محل قرارگیری ماهواره های GPS در فضا مقدار ضریب شکست در این نقطه، یک در نظر گرفته می شود. r فاصله بین هر نقطه از سیگنال با مرکز منحنی می باشد. با مشخص بودن تاخیر اضافی (شیفت داپلر اضافی) به صورت تابعی از زمان می توان به مقدار زاویه خمش سیگنال دریافتی توسط گیرنده دست یافت (نجفی، امیری ۱۳۹۳).

$$\alpha = \phi_t + \phi_R + \theta - \pi \quad (3)$$

برای بدست آوردن مقدار ضریب شکست در حالت نهفتگی رادیویی لازم است زاویه خمش جزئی^۱ را بدست آورد. مطابق شکل ۳ مقدار خمش جزئی از تفاضل خمش سیگنال با زاویه فراز ورودی مثبت با خمش با زاویه فراز ورودی منفی از یک ماهواره GPS در حالت بالارونده و یا پایین رونده در حالی که زاویه فراز هنگام دریافت توسط گیرنده برای دو سیگنال تقریباً مقدار یکسانی باشد، مطابق رابطه (۴) بدست می آید (اشرف، تسودا ۲۰۱۲).

بعد از مشخص شدن زمان قرارگیری ماهواره GPS در شرایط نهفتگی، محدوده زاویه فراز در این حالت مشخص می شود. فرکانس شیفت داپلر که ناشی از حرکت نسبی گیرنده و فرستنده و همچنین تاثیر محیط عبور سیگنال می باشد، از رابطه زیر بدست می آید (هو و همکاران ۲۰۰۸).

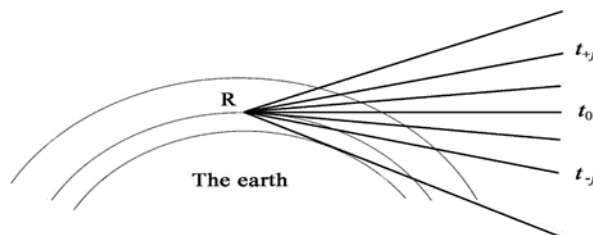
$$f_d = \frac{f}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{e}) = -\frac{f}{c} \times (v_t^r \cos \phi_t + v_t^e \sin \phi_t) \quad (1)$$

در این رابطه f_d فرکانس شیفت داپلر، f فرکانس موج حامل و c سرعت نور می باشد. بالانویس های r و t به مولفه های سرعت فرستنده در جهت مماسی و شعاعی اشاره دارد. v سرعت ماهواره و e بردار واحد از فرستنده در جهت ارسال سیگنال می باشد. لازم به ذکر است که سرعت ایستگاه زمینی صفر است. در طول حرکت سیگنال در مسیر منحنی بر اساس میانگین تقارن کروی رابطه زیر صادق است (هو و همکاران ۲۰۰۸).

$$n_t \times r_t \times \sin \phi_t = n_R \times r_R \times \sin \phi_R \quad (2)$$

این تساوی در فضای دو بعدی به عنوان قانون اسنل بیان شده و در فضای سه بعدی به قانون بوگر شناخته می شود. n_t ، n_R و n به ترتیب ضریب شکست اتمسفر در محل گیرنده، فرستنده و هر نقطه از مسیر سیگنال می باشند. به

^۱ Partial bending



شکل ۳- دریافت سیگنال با زاویه فراز مثبت و منفی توسط گیرنده

در رابطه بالا $\alpha_p(a)$ مقدار خمش جزئی و n ضریب شکست زیر ارتفاع استقرار گیرنده را مشخص می‌کند. با توجه به کوچک بودن مقدار ضریب شکست می‌توان از رابطه (۷) مقدار ضریب شکست جو بر اساس این پارامتر را بدست آورد. هدف از بدست آوردن نمودار شکست جو، مشخص کردن پارامترهای جوی پیرامون مکان قرارگیری گیرنده است. با توجه به روابط زیر پارامترهای جوی بر اساس مقدار شکست جو بدست می‌آید (هچ و همکاران ۲۰۰۲).

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (9)$$

$$N = 77.6 \times \frac{P}{T} + 3.75 \times 10^5 \times \frac{e}{T^2} \quad (10)$$

در رابطه بالا پارامتر N ضریب شکست جو و مقدارهای P و T به ترتیب فشار هوا، دما و بخار آب را نشان می‌دهند که با روابط زیر با هم در ارتباط هستند.

$$\frac{dp}{dh} = -g\rho \quad (11)$$

$$\rho = \rho_d + \rho_w = \frac{m_d \times p}{T \times R} + \frac{(m_w - m_d) \times e}{T \times R} \quad (12)$$

$$\frac{dp}{dh} = -\frac{gm_d}{77.6R} N + \frac{3.7310^5 gm_d p_w}{77.6R T^2} + \frac{g(m_d - m_w) p_w}{R T} \quad (13)$$

$$p_w = \vartheta \times 6.11 \times \exp\left(17.67 \times \frac{T - 273.15}{T - 29.65}\right) \quad (14)$$

در روابط بالا، ρ_w و ρ_d به ترتیب چگالی هوای خشک و بخار آب می‌باشند. R ثابت جهانی گازها و p_w فشار بخار آب است. g شتاب گرانش زمین، h ارتفاع، m_w و m_d بیان کننده جرم مولکولی از هوای خشک و بخار آب است که مقدار آن به ترتیب برابر با $28/97$ و 18 گرم بر مول می‌باشند. در جو خشک می‌توان مقادیر دما و فشار را با صرف نظر کردن از مقدار کوچک و قابل حذف فشار بخار آب بدست آورد. اما در ارتفاعات پایین که مقدار بخار آب قابل صرف نظر کردن نیست، نمی‌توان سه پارامتر مجهول دما، فشار هوا و فشار بخار آب یا رطوبت نسبی را بدست آورد. برای حل این روابط به یک نمودار کمکی در ارتفاعات پایین برای بدست آوردن پارامترهای فشار هوا و

یک ماهواره در حالت طلوع و یا غروب در سه وضعیت، سیگنال منتشر می‌کند. در زمانی که سیگنال از ماهواره مورد نظر به گیرنده می‌رسد، دارای زاویه ورودی صفر باشد، بیشترین پارامتر تاثیر ایجاد می‌شود. برای سیگنال‌هایی با پارامتر تأثیری بیشتر از a_{max} ، ماهواره از دید گیرنده خارج شده و در نتیجه گفته می‌شود نهفتگی رادیویی زمین پایه سیگنال‌هایی با پارامتر تأثیر بالاتر از a_{max} را نمی‌تواند مشاهده کند. بیشترین پارامتر تأثیر، زمانی است که $\varnothing_R = 90$ درجه باشد.

$$a_{max} = n_R \times r_R \quad (4)$$

در نتیجه برای سیگنال با زاویه ورودی صفر درجه رابطه زیر برقرار است:

$$n_T \times r_T \times \sin \varnothing_T = n_R \times r_R \Rightarrow n_R = \frac{n_T \times r_T \times \sin \varnothing_T}{r_R} \quad (5)$$

با توجه به اینکه با مشخص بودن مقدار شیفیت داپلر سیگنال با ورودی صفر مقدار مشخص $\varnothing_T$ می‌باشد و مقادیر n_T و r_T دارای مقادیر مشخصی می‌باشند، می‌توان ضریب شکست در نقطه گیرنده را بدست آورد و با داشتن این پارامتر که مقداری ثابت است می‌توان $\varnothing_R$ را برای سیگنال ماهواره‌ای حساب کرد. با دانستن مقدار این زاویه، مقدار زاویه خمش هر سیگنال محاسبه می‌شود (هو و همکاران ۲۰۰۶ و (هو و همکاران ۲۰۰۸).

$$\alpha(a) = \alpha(a(t_{-j})) - \alpha(a(t_{+j})) \quad (6)$$

با مشخص کردن مقدار زاویه خمش جزئی و استفاده از رابطه آبل می‌توان به نمودار ضریب شکست رسید. (هو و همکاران ۲۰۰۸) و (اشرف، تسودا ۲۰۱۲).

$$\alpha_p(a_0) = 2a_0 \int_{a_0}^{a_{max}} \frac{d \ln n(a)}{da} \frac{1}{\sqrt{a^2 - a_0^2}} da \quad (7)$$

$$n(a) = n_R \times EXP \left[\frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{a_{max}} \frac{\alpha_p(a)}{\sqrt{a^2 - a_0^2}} \times da \right] \quad (8)$$

شده از نهفتگی رادیویی زمین‌پایه از مدل اتمسفری MSIS-90 که در مقایسه با نمودارهای دمای مستخرج از رادیوسوند دارای کمترین اختلاف هستند، استفاده می‌شود <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. نتایج مستخرج از این مدل براساس زمان و مکان جغرافیایی دقیق توسط ناسا در سایت www.omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.htm ارائه شده است. اطلاعات دمای موجود در این مدل هواشناسی از سطح زمین می‌باشد.

شبیه‌سازی نهفتگی رادیویی زمین‌پایه در

ایران

در نهفتگی رادیویی زمین‌پایه، زاویه فراز سیگنال دریافتی توسط گیرنده معمولاً کمتر از ۳ درجه می‌باشد و رویداد نهفتگی بالارونده و یا پایین‌رونده بر اساس افزایش و کاهش زاویه فراز مشخص می‌شود. در این مقاله رویداد نهفتگی زمین‌پایه بر اساس قرارگیری گیرنده بر روی سه کوه که اطلاعات آن در جدول (۱) آمده است، شبیه‌سازی شده است.

رطوبت نسبی از دو معادله حالت و شکست نیاز است. از آنجاییکه پارامتر دما در نواحی با عرض جغرافیایی متفاوت، دارای تغییرات ناگهانی کمتر و همچنین مقادیر آن در دسترس‌تر می‌باشد، معمولاً به عنوان پارامتر کمکی در نظر گرفته می‌شود. برای حل روابط فوق، ابتدا در رابطه (۱۱) مقدار بخارآب، صفر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین مقدار فشار هوا با توجه به مشخص بودن مقدار شکست و خمشی جزئی بدست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه (۸) و قرار دادن مقدار فشار هوا و دما، فشار بخار آب یا رطوبت نسبی محاسبه می‌شود. این روند را یک بار دیگر با مشخص بودن مقدار بخار آب تکرار کرده و مقدار دقیقی از پارامترهای جوی حاصل می‌شود. در پایان مقدار فشار بخار آب با توجه به رابطه (۱۲) به مقدار رطوبت نسبی تبدیل می‌شود (هج و همکاران ۲۰۰۲).

از سویی نقاط مماسی بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌های نهفتگی زمین‌پایه دارای نقاط مماسی با موقعیت جغرافیایی متفاوت با گیرنده می‌باشند. دما به عنوان داده کمکی از مدل هواشناسی ECMWF استفاده می‌شود (هج و همکاران ۲۰۰۲). برای تعیین مقدار دقیق دما در نقاط مماسی ایجاد

جدول ۱- زمان و مکان شبیه‌سازی‌های انجام شده در ایران

ارتفاع (متر)	مکان	زمان
۵۶۷۱	کوه دماوند (۳۵/۹۵) درجه عرض جغرافیایی و ۵۲/۱ درجه طول جغرافیایی	۱۶ فوریه ۲۰۱۵
۴۸۱۱	کوه سبلان (۳۸/۲۶) درجه عرض جغرافیایی و ۴۸/۸۳ درجه طول جغرافیایی	۱۶ فوریه ۲۰۱۵
۳۴۹۰	کوه بزمان (۲۹/۴۰) درجه عرض جغرافیایی و ۵۷/۳۴ درجه طول جغرافیایی	۱۶ فوریه ۲۰۱۵

- ۱- تعداد و مدت زمان قرارگیری ماهواره های GPS در حالت نهفتگی زمین‌پایه برای گیرنده واقع بر این کوه‌ها
- ۲- مشخص کردن محدوده زاویه فراز سیگنال دریافتی توسط گیرنده در حالت نهفتگی زمین‌پایه
- ۳- مشخص کردن موقعیت جغرافیایی نقاط شکست و نقطه نهفتگی در سه سناریوی تعریف‌شده
- ۴- مشخص کردن شعاع پوششی مناطق مورد آزمایش بر اساس مشخصات نقاط مماسی

شبیه‌سازی هندسی و نحوه برقراری ارتباط ماهواره های GPS و ایستگاه دریافت توسط نرم افزار شبیه ساز ماهواره ای (STK (Satellite Tool Kit پیاده سازی شده و خروجیهای مورد نیاز برای گیرنده های مستقر بر سه کوه بلند در مناطق متفاوت جغرافیایی ایران بشرح زیر استخراج شد:

۵- تعیین بردارهای موقعیت و سرعت ماهواره‌های GPS و گیرنده در مدت زمان نهفتگی

شبیه‌سازی نهفتگی رادیویی زمین‌پایه بر روی کوه دماوند

شبیه‌سازی نهفتگی رادیویی برای ۱۶ فوریه ۲۰۱۵ بر روی قله دماوند با بکارگیری نرم افزار STK انجام شد. در این شبیه‌سازی ماهواره GPS شماره یک مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که در این حالت ماهواره مذکور در یک روز ۴ بار و هر بار بطور متوسط حدود ۲۰ دقیقه (بین ۱۷ تا ۲۳ دقیقه) در دید گیرنده با میدان دید ۳۶۰ درجه قرار می‌گیرد. این ماهواره دوبار در حالت بالارونده و دوبار نیز در حالت پایین‌رونده قرار دارد. جدول زیر لیستی از زمان دستیابی گیرنده و مدت زمان نهفتگی را در هر دستیابی برای ماهواره شماره یک GPS نشان می‌دهد.

شکل ۴ موقعیت ماهواره شماره یک GPS را در دوره دستیابی اول در صفحه نهفتگی نشان می‌دهد. این ماهواره در مدت زمان نهفتگی در محور عمودی از صفحه نهفتگی

دارای مقدار ثابت (شکل ۴- الف)، ولی در محور افقی در این مدت دارای تغییرات می‌باشد (شکل ۴- ب).

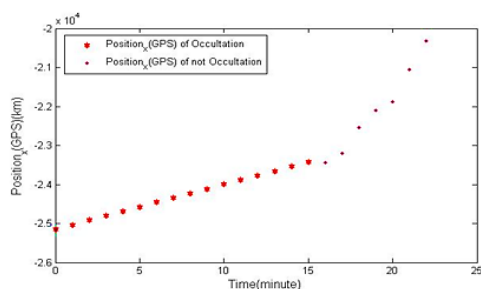
با تعیین مدت نهفتگی در این دوره دستیابی و مشخص بودن موقعیت مکانی فرستنده و گیرنده در هر زمان، موقعیت جغرافیایی نقاط مماسی و نقطه نهفتگی در این دوره دستیابی مشخص می‌شوند (شکل ۵). از سویی با توجه به زمان نهفتگی بدست آمده، دستیابی‌های ماهواره GPS مذکور مربوط به محدوده زاویه فراز بین (۳- تا ۳+) درجه هستند. نقاط مماسی محاسبه‌شده برای دستیابی اول در مدت زمان نهفتگی، پوشش مکانی حدود ۳۹۰ کیلومتری اطراف قله دماوند را تامین خواهد کرد.

شبیه‌سازی نهفتگی رادیویی زمین‌پایه بر روی کوه سیلان

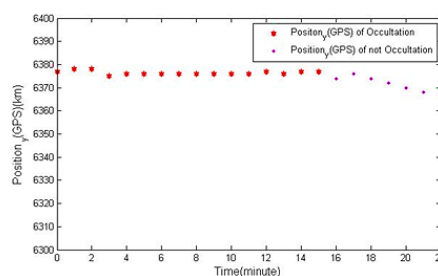
همانند روش گفته شده در این شبیه‌سازی ماهواره GPS شماره یک، با میدان دید ۳۶۰ درجه، ۴ بار در دید گیرنده واقع بر روی این کوه قرار می‌گیرد. لیست دستیابی‌های این ماهواره در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲- مدت زمان دستیابی ماهواره شماره یک GPS در حالت نهفتگی

Access	Start time (UTCG)	Stop time (UTCG)	Duration (sec)
1	16 Feb 2015 04:55:01.348	16 Feb 2015 05:10:42.329	940.981
2	16 Feb 2015 10:50:03.926	16 Feb 2015 11:08:10.631	1086.705
3	16 Feb 2015 14:49:22.977	16 Feb 2015 15:12:45.074	1402.097
4	16 Feb 2015 18:19:31.958	16 Feb 2015 18:37:18.357	1066.399

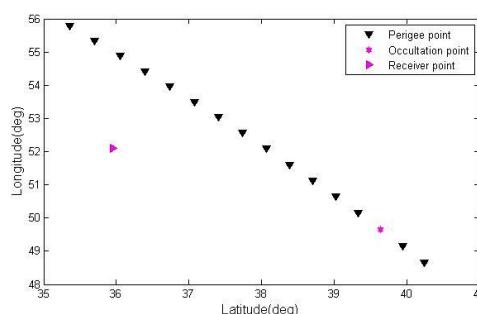


ب



الف

شکل ۴- موقعیت ماهواره شماره یک GPS در صفحه دو بعدی نهفتگی بر حسب زمان : (الف) محور عمودی و (ب) محور افقی



شکل ۵- موقعیت هندسی نقاط مماسی، نقطه نهفتگی و نقطه گیرنده برای دستیابی اول از این شبیه سازی

جدول ۳- مدت زمان دستیابی های ماهواره شماره یک GPS در حالت نهفتگی

Access	Start time (UTCG)	Stop time (UTCG)	Duration (sec)
1	16 Feb 2015 04:45:18.388	16 Feb 2015 04:57:44.728	746.341
2	16 Feb 2015 10:47:43.916	16 Feb 2015 11:01:02.698	798.783
3	16 Feb 2015 15:03:58.922	16 Feb 2015 15:21:44.369	1065.446
4	16 Feb 2015 18:25:02.061	16 Feb 2015 18:39:09.769	847.707

اول با توجه به کوهستانی بودن منطقه برای ردیابی سیگنال، ۳۸۱ کیلومتر می باشد.

شبیه سازی نهفتگی رادیویی زمین پایه بر روی کوه بزمان

این شبیه سازی نیز همزمان با دو شبیه سازی قبلی بر روی کوه بزمان در جنوب شرقی ایران انجام شد. در این حالت نیز ماهواره GPS، با توجه به میدان دید ۳۶۰ درجه برای گیرنده بر روی این کوه، ۴ بار در دید گیرنده قرار گرفته است. مشخصات زمانی دستیابی های این ماهواره در جدول زیر مشخص شده است.

در این دستیابی ها ماهواره در دو حالت بالارونده و پایین رونده قرار دارد. مدت زمان برقراری ارتباط ماهواره GPS با گیرنده در شرایط نهفتگی رادیویی زمین پایه ی در حدود ۱۵ دقیقه (۱۲-۱۷ دقیقه) می باشد. شرایط نهفتگی برای دستیابی اول که در حالت بالارونده قرار دارد، مورد بررسی قرار می گیرد.

با بررسی شرایط نهفتگی رادیویی زمین پایه در ۴ دستیابی این ماهواره، مشخص شد که سیگنال ها با زاویه فراز (۲- تا ۲+) درجه در این شرایط قرار می گیرند. محدوده پوششی نقاط مماسی بدست آمده برای این شبیه سازی در دستیابی

جدول ۴- مدت زمان دستیابی گیرنده برای ماهواره شماره یک GPS در حالت نهفتگی

Access	Start time (UTCG)	Stop time (UTCG)	Duration (sec)
1	16 Feb 2015 05:18:45.699	16 Feb 2015 05:29:53.151	667.453
2	16 Feb 2015 11:13:02.738	16 Feb 2015 11:29:45.741	1003.003
3	16 Feb 2015 14:17:51.725	16 Feb 2015 14:37:49.818	1198.092
4	16 Feb 2015 18:12:53.156	16 Feb 2015 18:25:22.693	749.536

توان به دستیابی ماهواره‌های GPS در حالت نهفتگی زمین‌پایه در زمان‌های متفاوت رسید. دستیابی‌های هر کدام از ماهواره‌های GPS متفاوت می‌باشد. مکان وقوع نقاط مماسی با توجه به مسیر عبوری سیگنال تعیین می‌شوند. شکل ۶ نمایی از پوشش ماهواره شماره یک GPS را برای حالتی که گیرنده بر روی سه کوه و با میدان دید ۳۶۰ درجه در حالت نهفتگی را نشان می‌دهد.



شکل ۶- پوشش کلی از نقاط مماسی برای تمامی دستیابی ماهواره شماره یک GPS بر روی سه کوه در مناطق جغرافیایی متفاوت ایران

فوریه ۲۰۱۵ (بهمن ماه ۱۳۹۳) تکرار و مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه ارائه می‌شود.

استخراج پارامترهای جوی در زمستان (۱۶ فوریه ۲۰۱۵)

در این حالت با فرض میدان دید ۳۶۰ درجه برای گیرنده و دریافت همه جهت، مجموعه ماهواره‌های GPS، ۹۷ بار در حالت نهفتگی رادیویی زمین‌پایه قرار می‌گیرند که ۴۹ تای آنها در حالت بالارونده و ۴۸ تای آنها در حالت پایین‌رونده قرار دارند.

شکل ۷ محدوده زاویه سمت و زاویه فراز برای ماهواره شماره یک GPS در دومین دستیابی در حالت نهفتگی رادیویی زمین‌پایه را نشان می‌دهد. موقعیت جغرافیایی نقاط مماسی با توجه به موقعیت جغرافیایی کوه دماوند و ایستگاه رادیوسوند فرودگاه مهرآباد و نیز مسیر حرکت رادیوسوند در طول پرواز در این دستیابی توسط نرم افزار Google Earth استخراج و در شکل ۸ ارائه شده‌است.

مدت زمان نهفتگی رادیویی برای این ۴ دستیابی به طور میانگین ۱۴ دقیقه (۱۱-۱۹ دقیقه) در هربار می‌باشد. زاویه فراز برای این شبیه‌سازی در دستیابی اول بین ۲- تا ۲۰+ درجه و در حالت نهفتگی رادیویی زمین‌پایه خواهد بود. محدوده پوششی برای این دستیابی به دلیل ارتفاع کم کوه‌ها در منطقه جنوب شرقی ایران برای دستیابی اول از ماهواره GPS، در حدود ۴۲۵ کیلومتر می‌باشد.

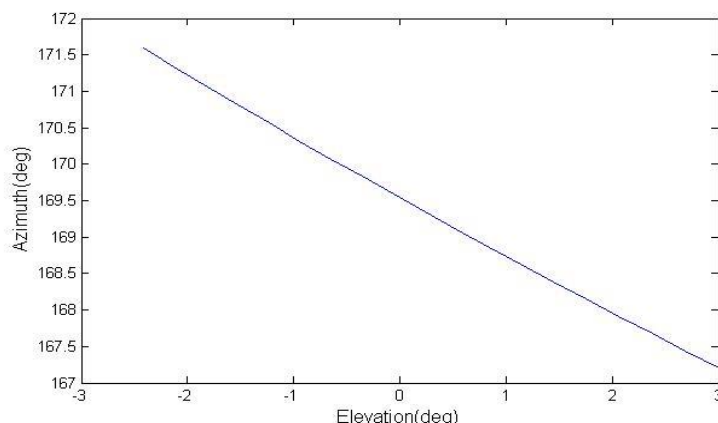
با توجه به شبیه‌سازی نهفتگی رادیویی زمین‌پایه و قرارگیری گیرنده و همچنین تنظیم میدان دید گیرنده بر روی کوه می-

چنانچه تعداد دستیابی سایر ماهواره‌های GPS موجود را برای موقعیت جغرافیایی گیرنده ثابت استخراج نماییم، نقاط مماسی در این دستیابی‌ها در مدت زمان نهفتگی می‌توانند پوشش مناسب و کاملی را برای بیشتر نقاط ایران ایجاد کنند.

استخراج و ارزیابی پارامترهای جوی بدست

آمده از روش MBRO بر روی کوه دماوند

با بکارگیری روابط استخراج شده در بخش دوم، پارامترهای جوی از جمله فشار هوا، فشار بخار آب و مقدار رطوبت نسبی از روش نهفتگی رادیویی زمین‌پایه برای گیرنده واقع بر روی کوه دماوند محاسبه و جهت صحت سنجی با داده های ثبت شده توسط ایستگاه رادیوسوند فرودگاه مهرآباد تهران در همان تاریخ به عنوان مرجع مقایسه شده‌اند. جهت بررسی صحت عملکرد این روش در فصول مختلف نیز سناریو یکبار در تابستان به تاریخ ۲۵ آگوست ۲۰۱۴ (شهریور ماه ۱۳۹۳) و یکبار در فصل زمستان به تاریخ ۱۶



شکل ۷- محدوده زاویه های فراز و سمت در دستیابی دوم به ماهواره GPS شماره یک



شکل ۸- پوشش نقاط مماسی در دستیابی دوم (نقاط صورتی رنگ) نسبت به گیرنده واقع بر کوه دماوند و ایستگاه فرودگاه مهرآباد (نقاط زرد رنگ)

است، میزان داپلر اتمسفری برای حالت زمین‌پایه محاسبه می‌شود. در این شبیه‌سازی به منظور کاهش خطا و با توجه به مشخص بودن موقعیت جغرافیایی نقاط نهفتگی بدست آمده از روش زمین‌پایه، نزدیک‌ترین نقاط نهفتگی مستخرج از ماهواره کاسمیک در طول ماه فوریه ۲۰۱۵ در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از تئوری نهفتگی رادیویی زمین‌پایه و محاسبه زاویه خمش جزئی و همچنین مقدار ضریب شکست در نقاط متفاوت در ارتفاعات پایین، می‌توان به مقدار پارامترهای جوی در زیر ارتفاع محل نصب گیرنده رسید.

داده‌های بدست آمده از روش نهفتگی رادیویی در روز ۱۶م فوریه ۲۰۱۵ و در دومین دستیابی ماهواره و گیرنده از ساعت ۱۰:۵۰:۰۳ به مدت ۱۰۸۶ ثانیه با مقادیر بدست آمده از ایستگاه رادیوسوند فرودگاه مهرآباد در همان روز و

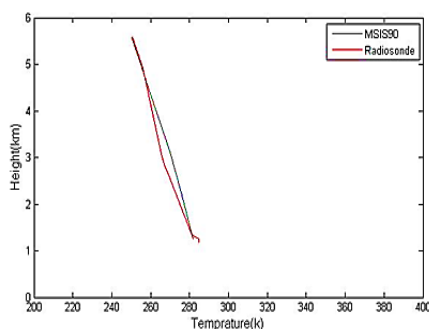
مدت زمان نهفتگی برای هر دستیابی توسط گیرنده به طور میانگین حدود ۲۰ دقیقه می‌باشد. برای این شبیه‌سازی محدوده زاویه فراز بین (۳- تا ۳+) درجه بدست آمد.

در کنار محاسبه زمان نهفتگی برای این شبیه‌سازی، به شیفت داپلر که از مشتق فاز اضافی ناشی از تاخیر اتمسفری سیگنال منطبق بر هر نقطه مماسی بدست آمده نیاز است. مقدار فاز اضافی سیگنال از بانک اطلاعاتی موجود در سایت رسمی CDAAC که داده‌های خام فاز و دامنه ذخیره شده مربوط به ۸ ماموریت نهفتگی از جمله ماهواره کاسمیک داده‌های atmphs و prfphs را در زمانهای مختلف نگهداری می‌کند، استفاده می‌کنیم.

با انطباق نقاط مماسی هر دو حالت و با توجه به یکسان بودن شرایط محیطی و با استفاده از داده واقعی که برای گیرنده روی ماهواره کاسمیک در همان زمان ثبت شده

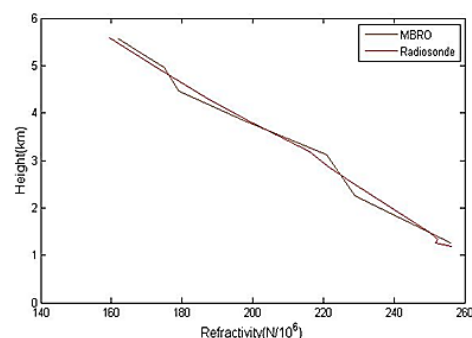
بیانگر مطابقت قابل قبول روش ارائه شده می‌باشد.

پرتاب رادیوسوند نوبت ۱۲:۰۰ UTC مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مذکور در شکل‌های ۹ الی ۱۲،



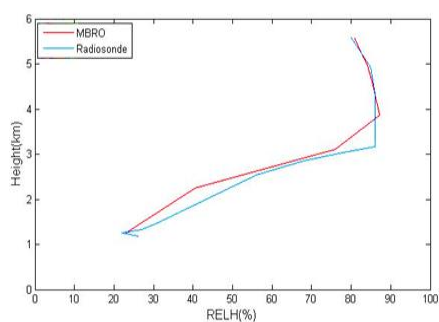
شکل ۱۰- مقایسه دمای بدست آمده از مدل هواشناسی

MSIS-90 و رادیوسوند



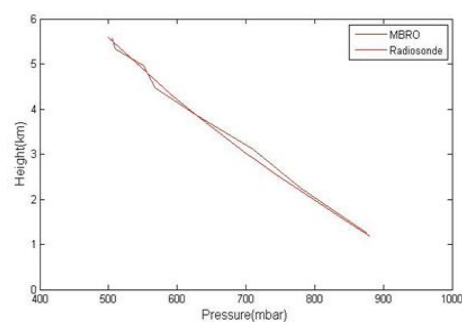
شکل ۹- مقایسه مقادیر شکست بدست آمده از روش MBRO و

رادیوسوند



شکل ۱۲- مقایسه مقدار رطوبت نسبی بدست آمده از روش MBRO

و رادیوسوند



شکل ۱۱- مقادیر فشار بدست آمده از روش MBRO و

رادیوسوند

جدول زیر مقادیر عددی حداکثر خطا، میانگین خطا و همچنین میزان شاخص پراکندگی خطا را برای هر پارامتر جوی به تفکیک بیان می‌کند.

جدول ۵: نتایج آماری مقایسه پارامترهای جوی بدست آمده

انحراف معیار	میانگین خطا	حداکثر خطا	نمودار
۰/۱۰	۱/۲۴	۲/۷۱	انکسار ($N/10^6$)
۰/۶۷	۱/۴۳	۲/۶۳	فشار (mbar)
۰/۳۸	۱/۵۱	۲/۹۹	رطوبت نسبی (%)

زمین پایه در این حالت به طور میانگین ۱۹ دقیقه می‌باشد. بازه زاویه فراز در مدت زمان نهفتگی بین (۳- تا ۳+) درجه است. همچنین محدوده زاویه سمت بر اساس زاویه فراز در دستیابی چهارم از ماهواره اول GPS با توجه به موقعیت کوه دماوند و ایستگاه رادیوسوند فرودگاه مهرآباد در شکل ۱۳ مشخص شده است.

استخراج پارامترهای جوی در تابستان (۲۵ آگوست ۲۰۱۴)

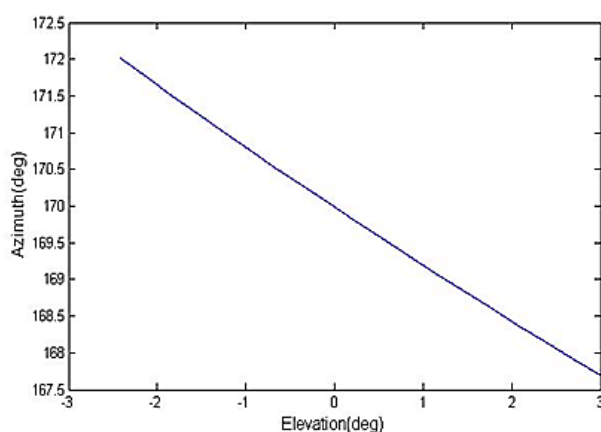
در این حالت نیز مطابق شبیه سازی قبل، ماهواره‌های GPS در حالت کلی با میدان دید ۳۶۰ درجه گیرنده به تعداد ۹۷ بار در حالت نهفتگی زمین پایه قرار می‌گیرند که ۴۹ رویداد آن در حالت بالارونده و ۴۸ رویداد آن در شرایط پایین‌رونده قرار دارد. مدت زمان نهفتگی

جدول ۶- دستیابی‌های ماهواره شماره یک GPS و قرارگیری آن در زمان نهفتگی

Access	Start time (UTCG)	Stop time (UTCG)	Duration (sec)
1	25 Aug 2014 02:47:45.680	25 Aug 2014 03:11:15.754	1410.074
2	25 Aug 2014 06:15:32.922	25 Aug 2014 06:33:29.660	1076.739
3	25 Aug 2014 16:46:47.082	25 Aug 2014 17:02:32.720	945.638
4	25 Aug 2014 22:43:03.944	25 Aug 2014 23:01:07.553	1083.610



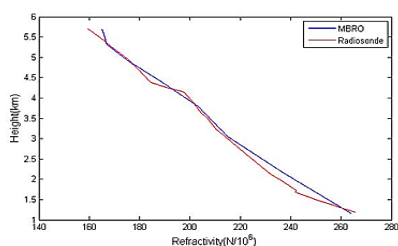
شکل ۱۳- پوشش نقاط مماسی در دستیابی چهارم از ماهواره (نقاط سفید رنگ) نسبت به محدوده کوه دماوند و ایستگاه فرودگاه مهرآباد (نقاط زرد رنگ)



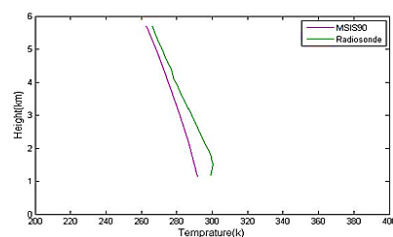
شکل ۱۴- محدوده زاویه فراز نسبت به زاویه سمت برای دستیابی چهارم

استخراج شده با این روش با داده‌های رادیوسوند در همان بازه زمانی در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸ و ارزیابی آماری نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.

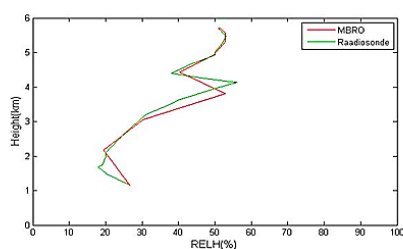
در شکل ۱۵ مقایسه مقادیر ضریب شکست در ارتفاعات زیر محل نصب گیرنده با مقادیر ضریب شکست بدست آمده از داده‌های رادیوسوند از ایستگاه فرودگاه مهرآباد در این روز ارائه شده است. مقایسه سایر پارامترهای جوی



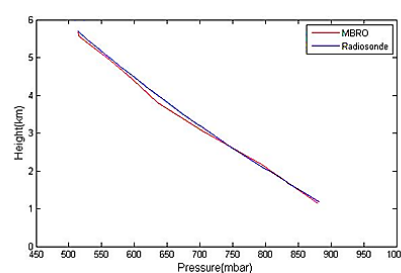
شکل ۱۶- مقادیر ضریب شکست (انکسار) بدست آمده از روش MBRO و رادیوسوند



شکل ۱۵- داده‌های دمای مدل MSIS-90 و رادیوسوند



شکل ۱۸- مقدار رطوبت نسبی از دو روش MBRO و رادیوسوند



شکل ۱۷- فشار هوای بدست آمده از روش MBRO و رادیوسوند

جدول ۷- مقادیر آماری از مقایسه پارامترهای جوی روش نهفتگی رادیویی زمین پایه و رادیوسوند

نمودار	ماکزیمم خطا	میانگین خطا	میزان پراکندگی خطا (انحراف معیار)
انکسار ($N/10^6$)	۲/۵۱	۱/۵	۰/۲
فشار (mbar)	۲/۷۶	۱/۴۶	۰/۷۲
رطوبت نسبی (%)	۲/۸۶	۱/۵۳	۰/۴۷

مدت زمان نهفتگی به منطقه جغرافیایی قرارگیری گیرنده و ارتفاع آن بستگی دارد. هرچه زاویه دید محدودتر و ارتفاع پایین‌تر باشد ماهواره زودتر از دید گیرنده خارج می‌شود و در نتیجه مدت زمان کمتری در شرایط نهفتگی قرار می‌گیرد. حداکثر مدت زمان قرارگیری ماهواره در شرایط نهفتگی رادیویی زمین پایه در ایران در حدود ۲۰ دقیقه می‌باشد. با بدست آوردن این نقاط مماسی در مناطق مورد نظر و مشخص شدن میزان خمش هر سیگنال دریافتی و استفاده از خمش جزئی که به دلیل دریافت سیگنال با زاویه فراز مثبت و منفی در نهفتگی رادیویی زمین پایه بدست می‌آید می‌توان به مقدار ضریب شکست جو در ارتفاعات زیر محل نصب گیرنده و در نتیجه پارامترهای جوی در ارتفاعات پایین رسید و با توجه به گستردگی اطلاعات نهفتگی در محدوده

بر اساس جدول بالا مقادیر خطا پارامترهای جوی مستخرج از این روش در مقایسه با نتایج رادیوسوند کم و قابل قبول است و نشان می‌دهد که روش نهفتگی رادیویی زمین پایه می‌تواند روشی مکمل برای رادیوسوند باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله مفهوم و عملکرد روش نهفتگی رادیویی زمین پایه ارائه و نتایج آن به روش شبیه سازی و مقایسه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی های انجام شده نشان می‌دهد با قرار دادن گیرنده نهفتگی در کوه‌های متفاوت ایران می‌توان پوشش مناسبی از نقاط مماسی را بدست آورد. میزان این پوشش و تعداد پدیده نهفتگی و

- looking GPS Radio Occultation: simulation analysis, J. Arab. Geosic., 33, 217-222.
7. Hajj, G.A., Kursinski, E.R., Romans, L.J., 2002, A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 64, 451-469
 8. Zuffada, C., George, A., Hajj, E., Robert, Kursinski., 1999, A novel approach to atmospheric profiling with a mountain-based or airborne GPS receiver, J. Geophysical, 20, 435-447.
 9. Hu X., Zhang, X.X., Wu, X., Wu X.C.H., Xiao C.Y., Zhang Z., and Gong X.Y., Mountain-based GPS Observations of Occultation and its Inversion Theory. Journal of the Geophysics, v. 49, n. 1, 2006, pp. 15-21.
 10. Liao, Qixiang, Zheng Sheng, and Hanqing Shi. "Joint Inversion of Atmospheric Refractivity Profile Based on Ground-Based GPS Phase Delay and Propagation Loss." Atmosphere 7.1 (2016): 12.
 11. Lowry, A.R.; Rocken, C.; Sokolovskiy, S.V.; Anderson, K.D. Vertical profiling of atmospheric refractivity from ground-based GPS. Radio Sci. 2002, 37.
 12. Sheng, Z.; Fang, H.X. Monitoring of ducting by using a ground-based GPS receiver. Chin. Phys. B 2013, 22, 575-579.
 13. Wu, X.; Wang, X.; Lü, D. Retrieval of vertical distribution of tropospheric refractivity through ground-based GPS observation. Adv. Atmos. Sci. 2014, 31, 37-47.
 14. Wu, Y.Y.; Hong, Z.J.; Guo, P.; Zheng, J. Simulation of atmospheric refractive profile retrieving from low-elevation ground-based GPS observation. Chin. J. Geophys. 2010, 53.
 15. Miller, E.L.; Abriola, L.M.; Aghasi, A. Environmental remediation and restoration: Hydrological and geophysical processing methods. IEEE Signal Process. Mag. 2012, 29, 16-26.
 16. Liu, J.; Liu, Q.H.; Li, J.; Ma, H.Z.; Yang, L.; Du, H.J. Radiant directionality modeling of joint thermal infrared and microwave for typical crops. J. Remote Sens. 2014, 18.
 17. <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
 18. http://www.omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html
- چند صد کیلومتری نقاط مرتفع در کشور و با هزینه کم، اندازه گیریهای انجام شده توسط رادیوسوند ها را در بازه های زمانی کوتاهتری تکمیل نمود و پیش بینی های کوتاه مدت هواشناسی را بهبود بخشید.
- چنانچه در این روش از گیرنده های تلفیقی که بتوانند سیگنال های دیگر ماهواره های ناوبری مانند گلوناس و گالیله را نیز دریافت کنند استفاده شود حجم داده های قابل دسترس و دقت نتایج به مراتب افزایش خواهد یافت. ارزیابی انجام شده نشان می دهد به کارگیری روش نهفتگی زمین پایه به دلیل افزایش اطلاعات استخراجی از اتمسفر به ویژه در ارتفاعات پایین، تاثیر به سزایی در بالا بردن دقت و سرعت پیش بینی های هواشناسی و افزایش کارایی آن در هشدارهای به هنگام و کاهش خسارات حاصله از پدیده هایی همچون سیل خواهد داشت.
- ### منابع
۱. شورچه، ب.، آزموده اردلان، ع.، ۱۳۸۹، بررسی قابلیت مدل سیستمین مدل سازی خطای وردسپهری (تروپوسفری) در تصحیح مشاهدات GPS ۲۲ اردیبهشت ۱۳۸۸، م. فیزیک زمین و فضا، ۱، ۳۹-۴۵.
 ۲. امیری، ش.، فهمی، م.، ۱۳۹۲، سنجش TEC به منظور تصحیح خطای یونوسفری در مخابرات ماهواره ای به روش نهفتگی رادیویی، م. علوم و فناوری فضایی، ۲، ۲۸-۲۱.
 ۳. نجفی، ف.، امیری، ش.، ۱۳۹۳، بررسی و شبیه سازی نهفتگی رادیویی زمین پایه بوسیله ماهواره GPS، چهاردهمین کنفرانس بین المللی انجمن هوا و فضای ایران.
 4. Hu X. Wu X.C., Gong X.Y., Xiao C.Y., Zhang X.X., Fu y. Li H. Fang Z.Y., Xia Q. Yang G.L., and Mao J.T., 2008, An Introduction of Mountain-based GPS Radio Occultation Experiments of China, J. Adv. Space Res., 42, 1723-1729.
 5. Benzozon, H., 2003, An Atmospheric Wave Optics Propagator –Theory and Application.,
 6. Ashraf, M., Tsuda, T., 2012, Abel Inversion for Driving Refractivity Profile from Down-