

## ارزیابی نمایه های دمای سنجنده مادیس به کمک اندازه گیری های RO GPS در ایران

علی سام خانیانی<sup>\*</sup>، عبادت قنبری پرمهر

گروه نقشه برداری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۸ ، تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۵

### چکیده

در سال های اخیر روش های مختلفی در فنون سنجش از دور به منظور اندازه گیری پارامترهای ساختار قائم جو زمین مورد استفاده قرار گرفته اند. سنجنده مادیس سوار بر ماهواره های ترا (صبح هنگام) و آکوا (عصر هنگام) قادر به تولید محصولات نمایه جوی با تفکیک افقی بالا به صورت روزانه و در مقیاس جهانی هستند. در این مطالعه، نمایه های دمای سنجنده مادیس در سال ۲۰۱۵ به کمک نمایه های دمای روش اختفای رادیویی سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS RO) به عنوان مقادیر قابل اعتماد در منطقه ایران مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ابتدا نمایه های دمای GPS RO با مقادیر متناظر حاصل از مشاهدات رادیوگمانه ایستگاه مهرآباد تهران در زمان های مختلف از سال با هم مقایسه شدند و نتایج حاصل، همخوانی بالایی بین مقادیر این دو روش مستقل نشان داد. در تمام فصل های سال، نمایه های دمای مادیس در ارتفاعات زیر ۱۵ کیلومتر دارای اریبی تر به اندازه ۲،۴ کلوین و بالای ۱۵ کیلومتر از سطح زمین دارای اریبی خشک حدود ۳ کلوین نسبت به دمای GPS RO هستند. علاوه بر این، RMSE داده های دمای مادیس به طور میانگین در تمامی لایه های ارتفاعی حدود ۴،۵ کلوین برآورد شد. همچنین، بررسی توزیع مکانی مقادیر RMSE نمایه های دمای مادیس در منطقه مورد مطالعه نشان داد که رابطه معناداری بین طول و عرض جغرافیایی و میزان دقت نمایه های دمای مادیس وجود ندارد.

کلمات کلیدی: نمایه های دما، سنجنده مادیس، روش GPS RO، اریبی دما

مدلسازی جهانی آب و هوا و اقلیم نیازمند به پایش صحیح پارامترهای جوّی نظیر دمای هوا و رطوبت است. در سالهای اخیر، گزارشهای مرتبط با گرمایش جهانی حاصل از مطالعات انجام گرفته در مورد تغییرات اقلیم موجب شد تا تحلیل ناهنجاریها و تغییرات این پارامترها بسیار مورد توجه قرار گیرد. بنابراین به کمک داده های دما در لایه های ارتفاعی مختلف با استفاده از روشهای جدید، درک عمیقتر از روند تغییر پارامترهایی نظیر دمای جوّ ممکن شده است (Sobrin et al, 2014; Chang et al, 2018).

به صورت مرسوم، ویژگی های جوّ به کمک پارامترهای محدود نزدیک به سطح زمین مانند دما و رطوبت نسبی اندازه گیری شده در ایستگاه های هواشناسی توصیف میشود. همچنین ساختار قائم جوّ نیز با اندازه گیری های محدود محلی نظیر پرتاب بالنهای رادیوگمانه در ساعت های مخصوص، ۰۰ و ۱۲، مورد تحلیل قرار میگرفت. رادیوگمانه ها ابزار رایجی برای مطالعه تغییرات دما در وردسپهر و پوشش سپهر پایینی هستند. البته داده های رادیوگمانه معمولاً در خشکیها در دسترس هستند و این ابزار دارای تفکیک مکانی پایینی هستند (Divakarla et al, 2006; Bohlinger et al, 2014).

امروزه با پیشرفت فن آوری، روشهای سنجنش از دور به عنوان ابزاری قدرتمند به محدودیت های مذکور چیره شده و تهیه داده های ارزشمند از جوّ زمین به صورت جهانی و در مقیاس های مختلف مکانی و زمانی را ممکن ساخته است. مشاهدات حاصل از ماهواره های سنجنش از دور به بهبود مدل های پیشبینی عددی وضع هوا، پایش تغییرات اقلیمی و درک عمیق ما از فرآیندهای حاکم بر زمین و جوّ آن کمک میکند (Chahine et al, 2006; Seidel et al, 2011; Thorne et al, 2011).

اندازه گیریهای فضاپایه پارامترهای هواشناسی یکی از راه های موثر و مهم در دستیابی به نمایه های دما و بهبود دقت هم روی خشکیها و هم روی آنها است، که توسط

ماموریت های سنجنش از دور مانند مادیس (MODIS)، AIRS<sup>2</sup> و HIRS<sup>۳</sup> عملیاتی شده اند (Liu and Key, 2003; Liu et al, 2006; Devasthale et al, 2010). این سنجنده ها به دلیل استفاده از طیف امواج فرسرخ، در شرایط ابری فاقد کارایی هستند (Chan and Comiso, 2013).

در این میان، سنجنده مادیس اگرچه ابزاری برای گمانه زنی قائم جوّ نیست، اما دارای ۱۶ باند فرسرخ (باندهای ۳۶-۲۰) با پوشش طول موج بین ۳ تا ۱۴۱ m است که بازیابی نمایه های قائم دما و رطوبت را ممکن میسازد (Sobrin et al, 2014). یکی از مزایای نمایه های جوّی حاصل از مادیس، تفکیک مکانی مناسب آن (۵ km) است. با این ویژگی، گرادیان های دما، رطوبت و ازون کلی جوّ بهتر از سایر ابزارها تعیین میشود (Seemann et al, 2003). بنابراین نمایه های حاصل از مشاهدات مادیس نه تنها برای مطالعات جهانی بلکه برای مطالعات منطقه ای نیز مناسب است. همچنین از نمایه های جوّی حاصل از این سنجنده میتوان برای تصحیح جوّی تصاویر سنجنش از دور استفاده نمود (Jiménez-Muñoz et al, 2010; Hully and Hook, 2011).

اگرچه فنون سنجنش از دور ابزار مناسبی برای تهیه مشاهدات پیوسته و در مقیاس جهانی از زمین هستند، محصولات بدست آمده از داده های سنجنش از دور نیاز به اعتبارسنجی به کمک داده های محلی دارند (Sobrin et al, 2014). روش اختفای رادیویی (GPS<sup>۴</sup> RO) به عنوان اولین روش سنجنش از دور جوّ زمین به صورت فضا پایه است که با تفکیک ارتفاعی بالا (کمتر از یک کیلومتر) قادر به تهیه نمایه های شکست در هر شرایط آب و هوایی است، این نمایه ها وابسته به پارامترهایی نظیر فشار، دما و رطوبت هستند (Kuo et al, 1999; Yunck et al, 2000). همچنین به کمک پردازش اندازه گیری گیرنده های GPS روی زمین میتوان به مقادیر تاخیر تر وردسپهری سیگنالهای GPS

1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
2 Atmospheric Infrared Sounder  
3 High-Resolution Infrared Sounder  
4 GPS Radio Occultation

Ware et al, 1996; Rocken et al, 1997; (Gorbanov and Kornblueh, 2001).

مطالعات در عرض‌های میانی و بالا نشان دادند که اختلاف بین دمای حاصل از روش GPS RO با استفاده از ماموریت‌های CHAMP و GPS/MET در مقایسه با مقادیر متناظر از مدل ECMWF بالای وردایست کمتر از ۱ کلوین و بین ۱۲ تا ۲۰ کیلومتر، کمتر از ۰.۵ کلوین است (Wickert et al, 2001; 2004).

نتایج مطالعه‌های دیگر نشان داد که دقت نمایه‌های دمای حاصل از ماموریت CHAMP بین ۵ تا ۱۵ کیلومتر بهتر از ۰.۶ کلوین است (Hajj et al, 2004). همچنین میانگین جهانی اختلاف دمای بین نمایه‌های ماموریت COSMIC و مدل‌های جهانی با کیفیت بالا در بازه‌ی ارتفاعی ۸ تا ۳۰ کیلومتری از سطح زمین کمتر از ۰.۶۵ کلوین برآورد شده است (Kishore et al, 2008).

با توجه به پتانسیل کاربردی بالای نمایه‌های دمای سنجنده مادیس به خصوص داشتن پوشش جهانی و تفکیک افقی مناسب، مطالعات مختلفی به ارزیابی این محصولات به صورت محلی پرداخته‌اند تا به میزان دقت این داده‌ها قبل از کاربردهای مختلف پی ببرند (Seeman et al, 2003, 2008; Lee et al, 2014; Sobrino et al, 2014). برای نمونه، مقایسه نمایه‌های دمای مدل جهانی NCEP<sup>6</sup> و محصولات MOD07<sup>7</sup> نشان داد که نمایه‌های دمای حاصل از سنجنده مادیس در مکان و زمان‌های مختلف خیلی به مدل NCEP نزدیک است و تطابق بالای این دو محصول مستقل، در سطوح فشاری بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰ میلیبار مشاهده شد. بر اساس نتایج این تحقیق، بیشترین اختلافات بین داده‌های دمای مادیس و NCEP در سطوح فشاری ۱۵۰ تا ۵۰ میلیبار برآورد شد (Lee et al, 2014). در مطالعه دیگری که در سال ۲۰۱۴ انجام شد، نمایه‌های جوّی مادیس در طول شبانه‌روز با استفاده از مشاهدات ۹ ایستگاه رادیوگمانه در طی ۱۰ سال مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که اریبی نمایه‌های دمای مادیس نسبت به

بالای سر هر ایستگاه و در نهایت با اندازه‌گیری دما و فشار سطحی در ایستگاه به بخار آب قابل بارش جوّ<sup>۵</sup> (PWV) دست یافت. در سال‌های اخیر چندین مطالعه در زمینه کاربردهای مختلف هواشناسی مشاهدات GPS نظیر داده‌های ورودی داده‌های بخار آب قابل بارش GPS و توموگرافی جوّ در ایران انجام گرفته است (Adavi and Mashhadi-Hossainali, 2014; Sharifi et al, 2016).

اساس این روش، تاخیر سیگنال‌های رادیویی ماهواره‌های GPS است که در حال عبور از جوّ تا رسیدن به گیرنده‌های قرار گرفته روی ماهواره‌های ارتفاع پایین دچار خمش میشوند (Kursinski et al, 1997). در واقع، سیگنال‌های رادیویی توسط جوّ زمین خم میشوند و زوایای خمیدگی سیگنال‌های RO به کمک اندازه‌گیری‌های زمان سیر سیگنال که توسط ساعت‌های اتمی با دقت بالا اندازه‌گیری میشود، قابل محاسبه است. با محاسبه مقادیر خمش برای همه‌ی سیگنال‌ها، نمایه‌ی زوایای خمیدگی سیگنال‌ها بدست می‌آید که از آن در ارزیابی نمایه‌ی شکست استفاده میشود. به دنبال آن با داشتن نمایه شکست، محاسبه نمایه‌های دما، فشار و رطوبت انجام می‌گیرد (Kuo et al, 2000).

پوشش جهانی مناسب، دقت بالا، پایداری بلند مدت و عدم نیاز به کالیبراسیون باعث شده که روش RO روشی ارزشمند در پایش پارامترهای هواشناسی باشد (Kursinski et al, 1997; Wickert et al, 2004; Haj et al, 2001). نتایج حاصل از مطالعات مختلف، که به اعتبارسنجی نمایه‌های دمای حاصل از روش GPS RO پرداخته‌اند، نشان میدهد که این محصولات دارای کیفیت بسیار بالایی در وردسپهر بالایی و پوشش‌سپهر پایینی هستند. اولین مطالعه در بهکارگیری روش GPS RO برای سنجش جوّ زمین توسط ماموریت GPS/MET انجام شد که با اندازه‌گیری‌های متناظر رادیوگمانه در ارتفاعات بین ۵ تا ۳۰ کیلومتر، تطابق بهتر از ۱.۵ کلوین بدست آمد (Kursinski et al, 1996).

6 National Center for Environmental Prediction  
7 MODIS-07

5 Precipitable Water Vapor

برای جوامع علمی تهیه میکند. محصولات نمایه ی قائم جوی این ماموریت هنگامیکه سنجنده سوار بر ماهواره های ترا و آکوا باشد به ترتیب MOD07 و MYD07 نامگذاری شده اند.

محصولات MOD07/MYD07 شامل ۳۰ پارامتر جوی مختلف مرتبط با ازون کلی، پایداری جوی، نمایه های جوی دما، رطوبت و بخار آب قابل بارش هستند. لازم به ذکر است که این محصولات در شرایطی تولید میشوند که در هر ۵ کیلومتر مربع حداقل ۹ دیده بانی بدون ابر وجود داشته باشد.

علاوه براین، نمایه های قائم از پارامترهای هواشناسی محصولات مادیس در ۲۰ سطح فشاری زیر تهیه میشوند: ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۲۰، ۷۰۰، ۷۸۰، ۸۵۰، ۹۲۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰ میلی بار.

در این مطالعه به منظور ارزیابی مشاهدات سنجنده مادیس در ایران، تمامی نمایه های دمای MOD07 در منطقه مورد مطالعه از اول ژانویه تا ۳۱ دسامبر سال ۲۰۱۵ انتخاب شدند. این محصولات از وب سایت <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data> و با فرمت HDF گردآوری شدند. پس از جمعآوری داده های خام، نمایه های دمای مادیس در شرایط بدون ابر استخراج و آماده ارزیابی قرار گرفتند.

باید توجه داشت که زمان مربوط به داده های مادیس مورد استفاده در این مطالعه، تقریباً بین ساعت های ۰۵ تا ۰۹ و ۱۶:۳۰ تا ۲۰ UTC قرار دارد. بنابراین چون مشاهدات رادیوگمانه در کشور برای ساعتهای ۰۰ و ۱۲ در دسترس است، نمایه های دمای مادیس دارای فاصله زمانی حداقل ۳ ساعت با مشاهدات متناظر حاصل از رادیوگمانه ها هستند. همچنین، تعداد ایستگاه های رادیوگمانه در کل کشور که هر روز گزارش جو بالا داشته باشند خیلی کمتر از تفکیک مکانی داده های مادیس است.

ماموریت ماهواره ای COSMIC در آوریل ۲۰۰۶ پرتاب شد و به عنوان یک ماموریت GPS RO مشترک

رادیوگمانه ها به صورت میانگین در حدود ۱ کلوین و دارای انحراف معیار بین ۲ تا ۳ کلوین در سطوح فشاری مختلف است (Sobrin et al, 2014).

حلیمی و همکاران (۱۳۹۰) محصولات دمای قائم از سنجنده مادیس روی ماهواره ی آکوا را برای سال ۲۰۰۷ در ایستگاه مهرآباد با مشاهدات متناظر رادیوگمانه مورد اعتبارسنجی قرار دادند. همچنین مطالعات دیگری نیز به ارزیابی نمایه های جوی از داده های باند فروسرخ سنجنده مادیس و یا بکارگیری داده های این سنجنده در برآورد مشخصه های وارونگی دما در ایران پرداخته اند (کچار و همکاران (۱۳۹۴)، صیدی و همکاران (۱۳۹۷)). به هر حال مطالعات اعتبارسنجی نمایه های دمای مادیس در ایستگاه های محدودی انجام شده و نتایج جامعی به منظور تعیین کارایی نمایه های دمای سنجنده مادیس در ایران ارائه نشده است. با توجه به ویژگی های منحصر به فرد روش GPS RO و فقدان دانش کافی نسبت به دقت نمایه ی دمای این سنجنده، در این مطالعه، از یک سال نمایه دمای حاصل از ماموریت GPS RO با نام COSMIC<sup>۸</sup> برای ارزیابی صحت مقادیر متناظر حاصل از سنجنده مادیس در ایران استفاده میشود. در بخش ۲ داده های مورد استفاده در این مطالعه ارائه میشوند. اساس تعیین نمایه های دما به کمک دو روش مستقل GPS RO و مادیس در بخش ۳ آورده شده است. بخش ۴، نتایج آماری از مقایسه بین نمایه های دمای مادیس و ماموریت COSMIC را ارائه میکند و نتیجه گیری این پژوهش در بخش ۵ آمده است.

### مواد و روش ها

سنجنده مادیس در تاریخ ۱۸ دسامبر سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره ی ترا با پشتیبانی ناسا پرتاب شد. عرض پوشش زمینی این ماهواره ۲۳۳۰ کیلومتر است که پوشش جهانی و روزانه را برای مشاهدات آن ممکن ساخته است. این سنجنده در سطوح مختلف، محصولات استاندارد را

8 Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate

بین تایوان و آمریکا شناخته میشود که از ۶ ماهواره‌ی کوچکتر شبیه به هم تشکیل شده است. این ماموریت قادر به فراهم آوردن نمایه‌های قائم از زاویه‌ی خمیدگی سیگنال، شکست، فشار، دما و بخار آب در جوّ خنثی و چگالی الکترون در لایه یون‌سپهر با پوشش جهانی است. با توجه به محدودیت‌های رادیوگمانه‌ها در ارزیابی صحیح نمایه‌های دمای مادیس و از طرف دیگر، پتانسیل بالای روش GPS RO در تهیه نمایه‌های جوّی با تفکیک قائم بسیار بالا و تفکیک افقی بهتر از رادیوگمانه‌ها، در این مطالعه از داده‌های دمای حاصل از ماهواره‌ی ارتفاع پایین COSMIC به عنوان یکی از موفقترین ماموریت‌های GPS RO به عنوان مبنا جهت اعتبار سنجی نمایه‌های دمای مادیس استفاده شده است.

منطقه مورد مطالعه در عرضهای ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیای ۴۶ تا ۶۴ درجه شرقی قرار دارد. در کل تعداد ۵۵۲۸ نمایه حاصل از ماموریت‌های GPS RO و ۲۹۵۸ فایل HDF که شامل محصولات جوّی قائم مادیس است در منطقه مورد مطالعه برای سال ۲۰۱۵ جمع‌آوری و جهت مقایسه‌های آماری مورد استفاده قرار گرفتند.

### برآورد نمایه‌های دما

مادیس

برای توسعه مدل‌های هواشناسی پارامترهای جوّی مانند دما و رطوبت مورد نیاز است (Seemann et al, 2006). در سالهای اخیر، استفاده از تصاویر ماهواره‌های در باند حرارتی برای تعیین پارامترهای جوّی به امری رایج تبدیل شده است. (Borbas et al, 2011). در این میان، سنجنده مادیس روی دو ماهواره ترا و آکوا که به ترتیب در سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شدند، امکان پایش جهانی دما، رطوبت، ازون و تغییرات آنها را با دقت قابل قبولی ارائه میدهند. این سنجنده دارای ۳۶ باند طیفی در محدوده مرئی، فروسرخ و فروسرخ حرارتی است. پس از پردازش تصاویر مادیس محصولات متنوعی مانند دما و رطوبت جوّی به صورت روزانه در سایت مادیس قابل

دسترسی است (Borbas et al, 2011).

از داده‌های دمای مادیس برای تصحیحات جوّی تصاویر با قدرت تفکیک بالا (Hully and Hook, 2014; Jiménez-Muñoz et al, 2011) و همچنین برآورد دمای سطح زمین استفاده شده است (Li et al, 2013). علاوه براین، مطالعات مختلفی از نمایه‌های دمای مادیس در برآورد دمای کمینه و بیشینه هوا بهره گرفته‌اند (Jang et al, 2014; Bustos and Meza, 2015).

روش عملی استخراج دما از داده‌های مادیس بر رابطه آماری بین میزان شدت تابش و نمایه دمای جوّ استوار است (Seemann et al, 2006). در این روش، همبستگی بین شدت تابش از CO<sub>2</sub> و بخار آب در باندهای جاذب مدل میشود. در شرایط آسمان بدون ابر، شدت تابش بالای جوّ (L) در بسامد  $f_j$  به عنوان مجموع همه تابش‌های ارسالی از سطح زمین و جوّ تا سنجنده است.

$$L(f_j) = \sum_{i=1}^N P[f_j, T(p_i)] w(f_j, p_i) \quad (1)$$

$j = 1, 2, \dots, M$

در اینجا،  $w(f_j, p_i)$  تابع وزن تابش در هر باند و هر لایه جوّ و  $P[f_j, T(p_i)]$  شدت تابش پلانک در بسامد  $f_j$  در لایه جوّی با دمای T و فشار  $p_i$  است (Smith, 1970).

در واقع هدف تعیین دمای N لایه در M باند تصویر است و با توجه به این که اندازه‌گیری‌های M باند تصویر مستقل از یکدیگر نیستند، راه حل یکسانی برای حل مسئله وجود ندارد. یک راه حل پیشنهادی بر فرض یکنواخت بودن معادله پلانک برای بسامد در محدوده فروسرخ حرارتی استوار است که با روش کمترین مربعات ارتباط بین تابش و دما به دست می‌آید. این روش به دلیل سادگی و سرعت بالا مورد توجه تیم تحقیقاتی مادیس قرار گرفته است.

رابطه ی زیر با پارامترهای ژئوفیزیکی مرتبط است (Hajj et al, 2001).

$$N = (n - 1) \times 10^6 = a_1 \frac{P}{T} + a_2 \frac{P_w}{T^2} \quad (3)$$

در رابطه ی (۳)، ضرایب  $a_1$ ،  $a_2$  به ترتیب  $77.6 \text{ K/mbar}$  و  $3.73 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{mbar}$  هستند. برای محاسبه ی مقادیر فشار ( $P$ )، دما ( $T$ ) و یا فشار بخار آب ( $P_w$ ) از طریق شکست، از تعادل آباستایی و قانون گازهای ایده ال به عنوان قیدهای اضافی استفاده میشود.

$$\frac{dP}{dh} = -g\rho \quad (4)$$

$$\rho = \rho_d + \rho_w = \frac{m_d P}{TR} + \frac{(m_w - m_d) P_w}{TR} \quad (5)$$

که  $g$  و  $h$  شتاب ثقل و ارتفاع و  $\rho$ ،  $\rho_d$  و  $\rho_w$  به ترتیب چگالی کلی، چگالی هوای خشک و چگالی بخار آب هستند.  $m_w$  و  $m_d$  متوسط جرم مولکولی هوای خشک ( $28.97 \text{ g/mole}$ ) و بخار آب ( $18.0 \text{ g/mole}$ ) و  $R$  ثابت جهانی گازها است.

در مناطقی که فشار بخار آب ناچیز است میتوان با ترکیب رابطه های (۴) و (۵) و با استفاده از رابطه ی (۳)، با حل دستگاه دو معادله دو مجهول مقادیر دما و فشار را برآورد نمود (Hajj et al, 2001). ولی در لایه وردسپهر، جایی که مقادیر فشار بخار آب حائز اهمیت باشد با استفاده از روشهای داده گواری وردشی<sup>۹</sup> برآورد هر سه متغیر رابطه (۱) صورت میپذیرد (Poli et al, 2002). به طور کلی مراحل پردازش داده های روش RO برای بازیابی نمایه های جوّی در شکل ۱، آورده شده است.

### نتایج و بحث

مقایسه نمایه های دمای روش *GPS RO* و رادیوگمانه مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا برای اعتبارسنجی نمایه های دمای حاصل از روش *GPS RO*

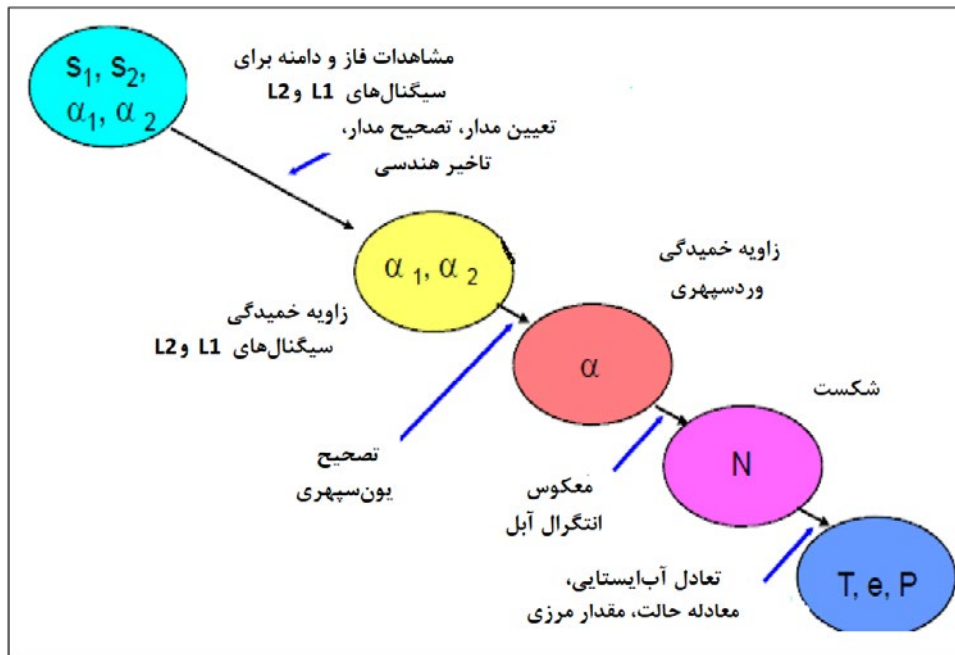
ماهواره های *GPS* و ارتفاع پایین (برای مثال ماموریت *COSMIC*) به صورت مجزا در مدارهای مستقل به دور زمین در حال حرکت هستند. در زمان های خاصی، ماهواره ی *GPS* و *COSMIC* در دو طرف زمین قرار میگیرند طوری که به صورت مستقیم در خط دید هم قرار ندارند ولی به دلیل وجود گرادیان قائم چگالی جوّ زمین، سیگنال های ارسالی از ماهواره ی *GPS* خم شده و در گیرنده های موجود روی ماهواره ی *COSMIC* دریافت میشوند. اصطلاحاً ماهواره ها نسبت به هم دچار اختفا رادیویی شده اند ولی جوّ زمین موجب دریافت برخی از سیگنال ها در گیرنده ی *GPS* نصب در ماهواره ی *COSMIC* شده است.

ماهواره های ارتفاع پایین، فاز و دامنه دو بسامد ارسالی از ماهواره های *GPS* در باند  $L$  را به صورت تابعی از زمان اندازه میگیرند. حرکت نسبی ماهواره های *COSMIC* نسبت به ماهواره های *GPS* و حضور جوّ باعث جابجایی بسامد داپلر سیگنال های ارسالی *GPS* میگردد که در ماهواره های *COSMIC* دریافت شده اند. اندازه جابجایی بسامد با مشتق زمانی مقادیر فاز سیگنال های *GPS* بدست می آید، که در کنار اطلاعات دقیق در مورد موقعیت و سرعت هر دو ماهواره ی *GPS* و ماهواره ی ارتفاع پایین، منجر به برآورد زاویه خمش سیگنال های *GPS* به دلیل حضور جوّ میشود.

پس از محاسبه ی نمایه خمیدگی برای هر دو سیگنال *GPS*، با ترکیب خطی بین دو نمایه خمش سیگنال ها اثر یون سپهری از روی خمش محاسبه شده حذف میگردد (Vorb'ev and Krasil'nikova, 1994). در نهایت با داشتن زاویه خمیدگی بدون اثر یون سپهر ( $\alpha(a)$ )، ضریب شکست جوّی ( $n$ ) از رابطه ی زیر قابل استخراج است (Kursinski et al, 1997).

$$n(r) = \exp \left[ \frac{1}{\pi} \int_x^\infty \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right] \quad (2)$$

در جوّ خنثی، مقادیر شکست ( $N$ ) با توجه به



شکل ۱: مراحل بازیابی نمایه های جوّی با استفاده روش اختفاء رادیویی GPS.

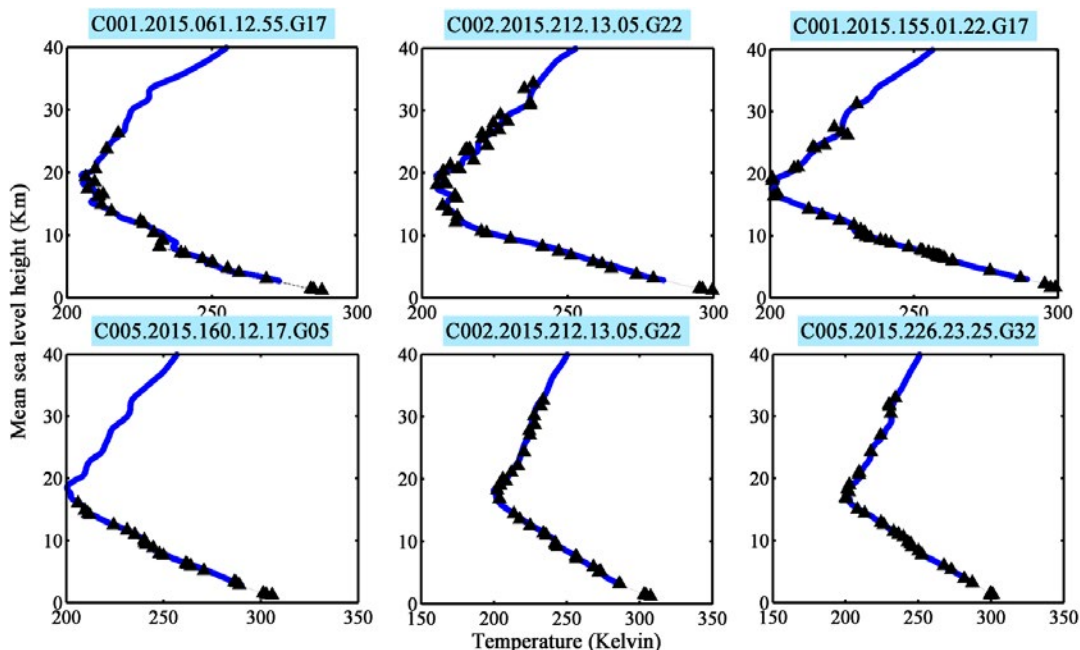
ماهواره‌ی اول COSMIC (C001) و در روز ۶۱ ام سال ۲۰۱۵، ساعت ۱۲ و ۵۵ دقیقه و مشاهدات ماهواره‌ی ۱۷ام GPS (G17) بدست آمده است. با توجه به زمان داده ها در شکل (۲)، چهار گراف از شکل ۲، نمایه های دما در طول روز و ۲ گراف مربوط به مشاهدات نمایه‌ی دما در طول شب هستند.

با توجه به شکل ۲، تفکیک ارتفاعی نمایه های حاصل از COSMIC به قدری بالا است که گراف پیوست های از دما را به صورت قائم نشان میدهند. چگالی بالای داده های COSMIC در سطوح مختلف ارتفاعی، پایش دقیقتر تغییرات دمایی در لایه های مختلف جو را ممکن میسازد. همچنین، مشاهدات گسسته رادیوگمانه (مثلث های مشکی) و نمایه های دمای روش GPS RO به خوبی یکدیگر را دنبال میکنند.

همانطور که از شکل ۲ میتوان دریافت، همخوانی و تطابق نمایه های دمای COSMIC و رادیوگمانه ها در طول شب و روز یکسان است. علت این امر پایداری بالای مشاهدات GPS در طول زمان و دقت یکسان این مشاهدات در طول شب و روز است. این نتایج نشان

انجام شده است که نتایج آنها دقت بالای این محصولات را تایید میکند (Fu et al, 2007; Zhang et al, 2011). هدف این مطالعه اعتبارسنجی نمایه های دمای روش GPS RO در ایران نیست چرا که نزدیک به دو دهه قابلیت این داده ها تایید شده است. به هرحال، در این بخش در شکل ۲، چند نمایه‌ی دمای حاصل از ماموریت COSMIC، که متناظر با مشاهدات رادیوگمانه ایستگاه مهرآباد تهران استخراج شده اند همراه با مقادیر حاصل از روش GPS RO، مورد مقایسه قرار گرفته اند تا میزان اعتبار روش GPS RO در منطقه دیده شود.

برای اینکه نمایه های دمای ماموریت COSMIC متناظر با مشاهدات رادیوگمانه انتخاب شوند، حداکثر فاصله زمانی و حداکثر فاصله مکانی بین نمایه های دو روش به ترتیب ۲ ساعت و ۲۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده میشود، نمایه‌ی دمای حاصل از این دو روش در ۶ زمان متفاوت از سال با یکدیگر مقایسه شده اند. برای نمونه گراف اول از بالا- سمت چپ در شکل ۲، نشان میدهد که نمایه‌ی دمای روش GPS RO به کمک پردازش مشاهدات



شکل ۲: مقایسه نمایه های دمای حاصل از ماموریت COSMIC با مشاهدات رادیوگمانه ایستگاه مهرآباد تهران در سال ۲۰۱۵. خط آبی مربوط به نمایه دمای روش GPS RO از ماموریت COSMIC و مثلثها مربوط به رادیوگمانه است.

دما هستند و همچنین با توجه به زمان مشاهده سنجنده مادیس، نمایه های GPS RO که در فاصله زمانی حداکثر ۲ ساعته و فاصله مکانی حداکثر ۲۰۰ کیلومتری نمایه متناظر مادیس قرار دارند، به عنوان مقادیر قابل اعتماد جهت مقایسه آماری برگزیده شدند.

براساس شرط هم مکانی و هم زمانی انتخاب شده در این تحقیق، ۳۳۹۸ زوج نمایه های دمای GPS RO و مادیس در طول یکسال از بین تمامی داده ها برای مقایسه استخراج شدند. برای نمونه، شش نمایه های دمای روش GPS RO و مادیس در زمان ها و مکان های مختلف از سال ۲۰۱۵ در شکل ۳ ترسیم شده اند.

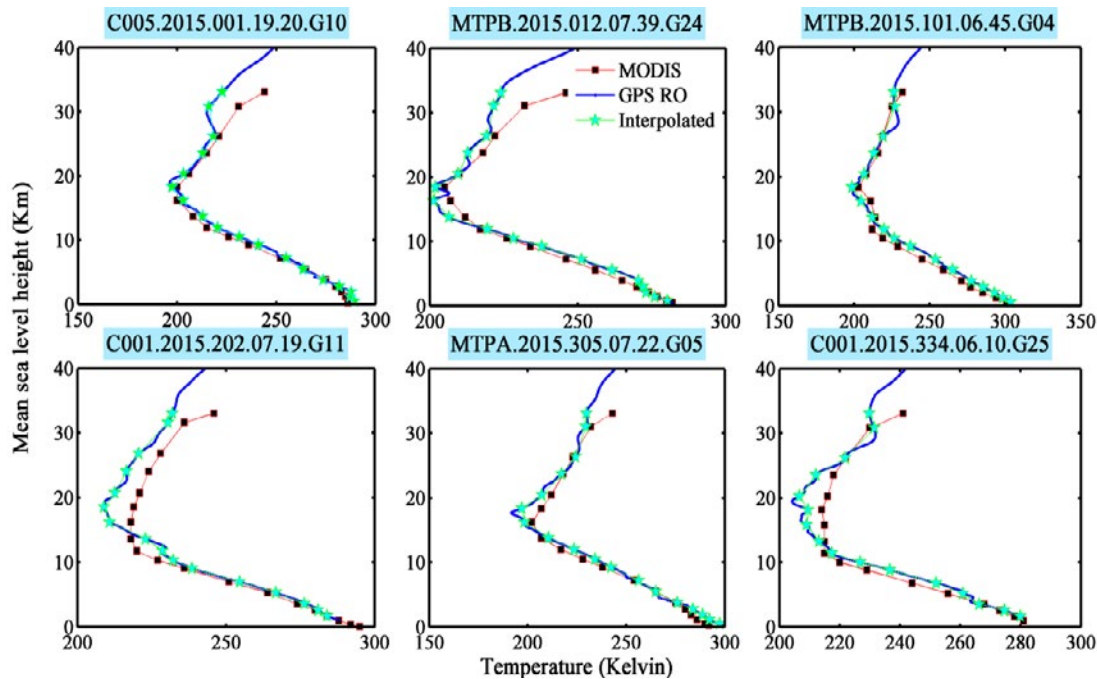
در اینجا داده های دمای GPS RO همانند شکل ۲، با نقاط آبی رنگ نشان داده شده اند که دارای تفکیک قائم بسیار بالایی هستند. نقاط مشکی رنگ نشان دهنده ی مقادیر دمای نمایه حاصل از سنجنده مادیس هستند.

به منظور انجام مقایسه آماری، تمامی نمایه های روش GPS RO در ارتفاعاتی که نمایه ی متناظر حاصل از مادیس مقدار داشتند، درون یابی شدند. مقادیر درون یابی شده دمای روش GPS RO در شکل ۳ با

میدهد که نمایه های دمای روش GPS RO نیز به خوبی میتوانند همانند رادیوگمانه ها به عنوان مرجع برای ارزیابی دیگر روش ها و همچنین کاربردهای مختلف اقلیمی و آب وهواشناسی مورد استفاده قرار گیرند.

اعتبارسنجی نمایه های دمای مادیس با روش GPS RO از آنجا که سنجنده ی مادیس با تفکیک افقی بسیار خوب قادر به تهیه پارامترهای جوی در ۲۰ سطح فشاری مختلف از جوی زمین است، بنابراین مورد توجه هواشناسان و سایر کاربران در نقاط مختلف جهان و به صورت خاص در ایران قرار گرفته است. بنابراین، اطلاع از دقت این داده ها در کشور ایران امری ضروری برای محققان به ویژه در زمینه های مرتبط با تغییرات اقلیمی و پیشبینی های وضع آب و هوا است.

در این کار، مشاهدات دمای بدست آمده از GPS RO در سال ۲۰۱۵، به عنوان مبنا برای ارزیابی محصولات متناظر سنجنده مادیس در منطقه ایران به کار گرفته شده است. با توجه به موقعیت پیکسل هایی از داده های مادیس که در شرایط بدون ابر دارای نمایه های



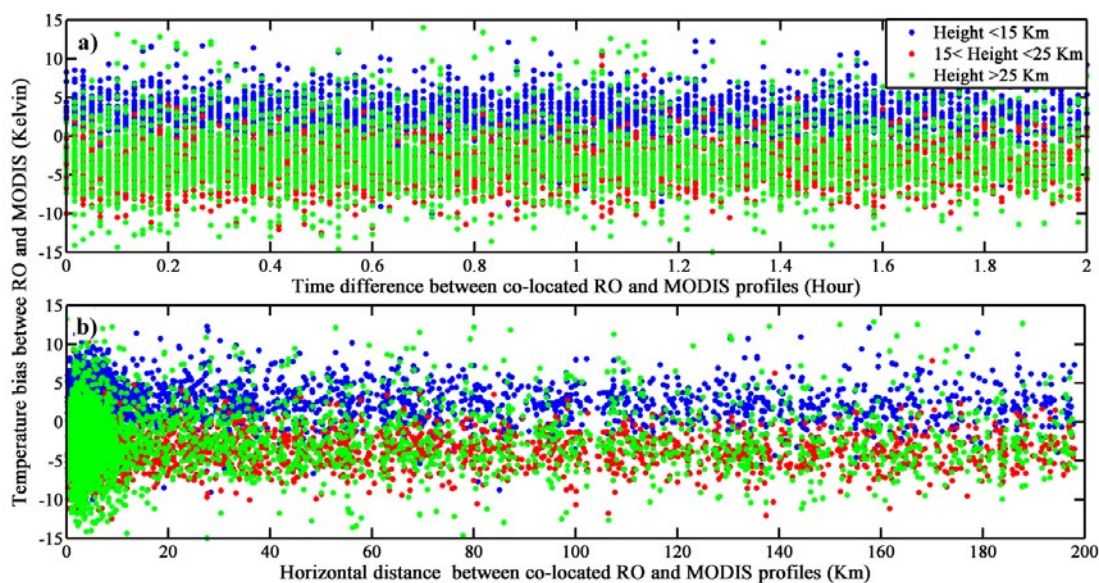
شکل ۳: مقایسه نمایه های دمای حاصل از ماموریت‌های GPS RO با محصولات دمای مادیس برای ایستگاه مهرآباد تهران در سال ۲۰۱۵.

جدول ۱: پارامترهای آماری فصلی برای مقایسه دمای بین روش GPS RO و مادیس در بازه های ارتفاعی مختلف برای سال ۲۰۱۵. پارامترها برای تمامی اختلافات بین دو روش GPS RO-MODIS محاسبه و در طول یکسال میانگینگیری شده‌اند.

	Spring			Summer			Autumn			Winter		
	<15	15-25	>25 km	<15	15-25	>25 km	<15	15-25	>25 km	<15	15-25	>25 km
MBE	2.4	-3.7	-3.1	2.4	-3.9	-3	2.3	-3.3	-2	2.4	-3.7	-2.5
RMSE	4.1	4.7	5.4	4.3	4.7	5.3	4.2	4.1	4.8	4.5	4.7	6.1
Number of Profiles	1117			970			403			908		

۲۵-۱۵ و بالاتر از ۲۵ کیلومتر در فصل های مختلف سال محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به جدول ۱، از بین ۳۳۹۸ زوج نمایه ی دمای GPS RO و مادیس در طول یکسال، ۱۱۱۷ زوج در فصل بهار، ۹۷۰ زوج در فصل تابستان، ۴۰۳ زوج در فصل پاییز و ۹۸۰ زوج داده در فصل زمستان جهت ارزیابی آماری محصولات دمای مادیس استفاده شدند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده میشود، محصولات دمای مادیس در ارتفاعات زیر ۱۵ کیلومتر از سطح زمین دارای اریبی تر در حدود ۲,۴ کلون نسبت به روش GPS RO است. لازم به ذکر است که مقادیر اریبی در تمامی فصلها و کل منطقه مطالعاتی رفتار یکسانی را از خود

ستاره های سبز رنگ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل دیده میشود، داده های دمای مادیس در ارتفاعات نزدیک به سطح زمین، همخوانی بیشتری با روش GPS RO دارد و در لایه های مختلف جو دقت این محصول متغییر است. برای درک بهتر کیفیت محصولات دمای مادیس، در سه لایه ی ارتفاعی از جو (۰-۱۵، ۱۵-۲۵ و بالاتر از ۲۵ کیلومتر)، پارامترهای آماری نشان دهنده ی خطا از قبیل RMSE و اریبی در طول کل بازه ی مطالعاتی برای این محصولات برآورد شدند. میانگین RMSE و اریبی اختلاف مقادیر دما (GPS RO-MODIS) در لایه های ارتفاعی ۰-۱۵،



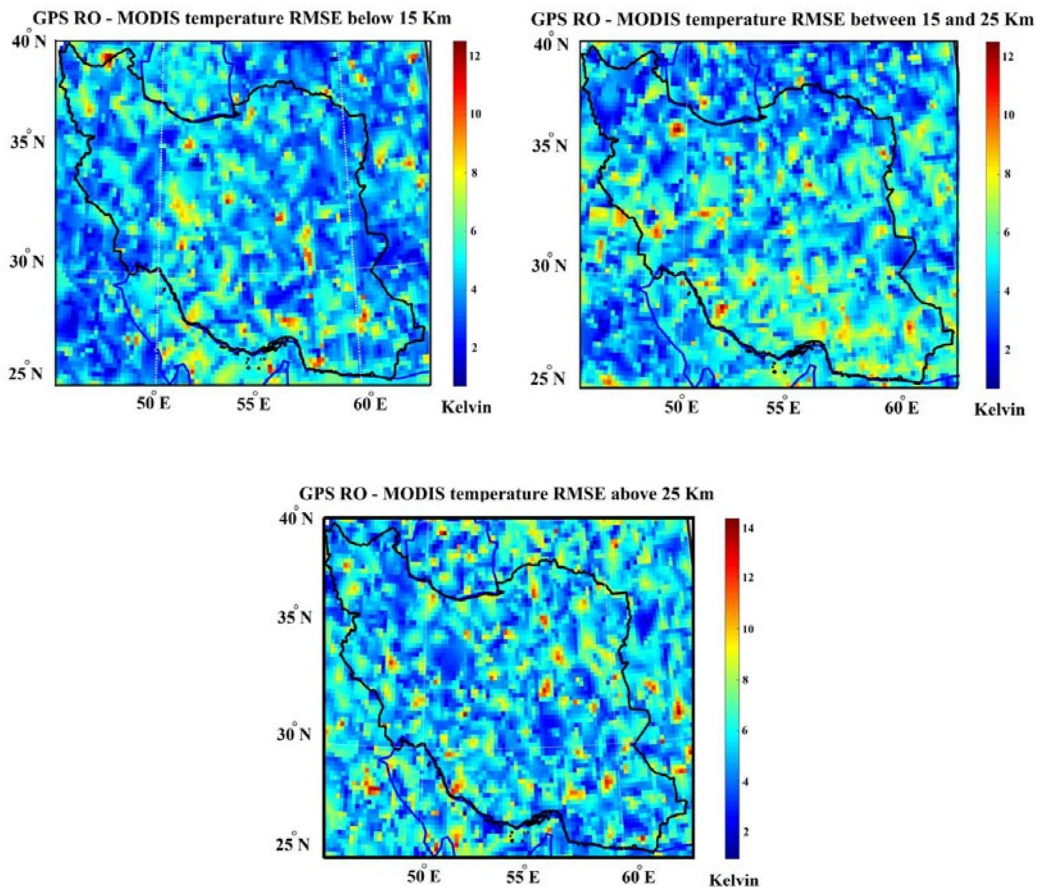
شکل ۴: نمایش اربیی نمایه های دمای مادیس در سه لایه ارتفاعی زیر ۱۵ کیلومتر ۱۵-۲۵ کیلومتر و بالای ۲۵ کیلومتر از سطح زمین بر حسب (a) فاصله زمانی و (b) فاصله مکانی بین زوج نمایه های GPS RO و مادیس انتخاب شده در مقایسه آماری.

مادیس به ۲ ساعت برسد یا فاصله مکانی به ۲۰۰ کیلومتر برسد، آیا این کار میتواند منجر به برآورد خطای بیشتری برای محصولات دمای مادیس شود؟ برای پاسخ به سول فوق در شکل ۴، مقادیر اربیی برآورد شده ی تمامی نمایه های دمای مادیس که در شرایط بدون ابر استخراج شده اند بر حسب فاصله مکانی و زمانی از نمایه متناظر دما حاصل از روش GPS RO برای سال ۲۰۱۵ ترسیم شده است. مقادیر اربیی در سه لایه ارتفاعی زیر ۱۵ کیلومتر (با نقاط آبی رنگ)، ۱۵-۲۵ کیلومتر (نقاط قرمز رنگ) و بالای ۲۵ کیلومتر (نقاط سبز رنگ) نمایش داده شده اند. بر اساس شکل ۴، قدر مطلق مقادیر اربیی محصولات دمای مادیس در هر سه لایه کمتر از ۱۵ کلوین است که البته بیشتر مقادیر اربیی، زیر ۱۰ کلوین واقع شده اند.

براساس شکل (a) دو نکته قابل استخراج است: اول اینکه از لحاظ اختلاف زمانی، تقریباً تمامی زوج نمایه های دمای مادیس و GPS RO به صورت یکنواخت دارای فواصلی زمانی بین ۰ تا ۲ ساعت با یکدیگر بوده اند. همچنین میتوان دریافت که با افزایش فاصله زمانی بین زوج نمایه های انتخابی در مقایسه آماری، میزان اربیی

نشان میدهند. همچنین مقادیر RMSE داده های دمای سنجنده مادیس در ارتفاعات پایینتر از ۱۵ کیلومتر در حدود ۴٫۵ کلوین بدست آمده است. بر اساس این نتایج، نمایه های دمای مادیس در لایه های ارتفاعی ۱۵-۲۵ و بالاتر از ۲۵ کیلومتر دارای اربیی خشک نسبت به روش GPS RO هستند. به عبارت دیگر در ارتفاعات بالاتر از ۱۵ کیلومتر، مقادیر دما را نسبت به GPS RO حدود ۳ کلوین بیشتر برآورد میکند. همچنین اربیی خشک محصولات دمایی مادیس در ارتفاعات بالای ۱۵ کیلومتر از سطح زمین تقریباً در تمامی فصل ها رفتار یکسانی از خود نشان داده است. به طور کلی با توجه به مقادیر RMSE در ارتفاعات بالای ۲۵ کیلومتر میتوان دریافت که بیشترین اختلاف دما بین مادیس و GPS RO در ارتفاعات بالا رخ میدهد که سازگار با نتایج مطالعه (Lee et al., 2014) است.

مساله دیگر در ارزیابی نمایه های دمای مادیس، بررسی اثر فاصله مکانی و زمانی بین نمایه متناظر انتخابی از روش GPS RO با نمایه مادیس در میزان برآورد خطای این محصول است. به عبارت دیگر این سوال مطرح است که اگر فاصله زمانی نمایه GPS RO با داده ی



شکل ۵: توزیع مکانی مقادیر RMSE نمایه های دمای مادیس در منطقه‌ی مورد مطالعه. نقشه های RMSE دمای مادیس در سه لایه ارتفاعی زیر ۱۵ کیلومتر ۱۵-۲۵ کیلومتر و بالای ۲۵ کیلومتر از سطح زمین برای سال ۲۰۱۵ ترسیم شده‌اند.

بررسی مکانی دقت نمایه های دمای مادیس برای بررسی توزیع مکانی دقت نمایه های دمای مادیس، در شکل ۵، نقشه های RMSE دمای مادیس در سه لایه مختلف ارتفاعی انتخاب شده در این مطالعه ترسیم شده است.

با توجه به شکل، نمایه های دمای مادیس در لایه های زیر ۱۵ کیلومتر و ۱۵-۲۵ کیلومتر از سطح زمین دارای مقادیر خطای زیر ۱۲ کلوین و در لایه بالای ۲۵ کیلومتر دارای خطای زیر ۱۴ کلوین است. همچنین با توجه به سه نقشه تهیه شده در شکل ۵، با تغییر طول و عرض جغرافیایی همبستگی معناداری با میزان دقت نمایه های دمای مادیس در هیچ کدام از لایه های ارتفاعی دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر مقادیر RMSE تقریباً به صورت

دمای مادیس در هیچ کدام از لایه های ارتفاعی تغییر خاصی نداشته است. بنابراین در بازه ی بین ۰ تا ۲ ساعت، همبستگی معناداری بین میزان اریبی برآورد شده برای دمای نمایه مادیس و اختلاف زمانی این نمایه با نمایه متناظر GPS RO وجود ندارد.

همچنین براساس شکل ۴(b) میتوان دریافت که زوج نمایه های انتخابی با اختلاف فاصله زیر ۱۵ کیلومتر از تعداد بالایی برخوردار هستند. همچنین با افزایش فاصله مکانی بین نمایه های دمای مادیس و نمایه ی متناظر قابل اعتماد از روش GPS RO در مقایسه آماری، تغییر معناداری روی اریبی برآورد شده ی مقادیر دمای مادیس در هیچ کدام از لایه های ارتفاعی انتخاب شده در این مطالعه دیده نمی‌شود.

تصادفی در تمامی منطقه مورد مطالعه پخش شده اند و نمیتوان بیان کرد که در بخش خاصی از ایران میزان دقت محصولات نمایه های دمای مادیس کمتر یا بیشتر از بقیه نقاط است.

### جمع بندی

اندازه گیری از ساختار قائم جو در قالب نمایه های جوی نظیر دما، فشار و رطوبت در بسیاری از مطالعات اقلیمی و آب و هواشناسی اجتناب ناپذیر است. در این مطالعه محصولات قائم دما که از مشاهدات سنجنده مادیس بدست آمده اند، در منطقه ایران مورد ارزیابی قرار گرفتند. در اینجا از نمایه های دمایی بدست آمده از روش GPS RO در سال ۲۰۱۵ به عنوان مقادیر قابل اعتماد استفاده شد. در ابتدا، نمایه های دمای GPS RO در ۶ زمان مختلف از سال با نمایه های نظیر بدست آمده از مشاهدات رادیوگمانه مقایسه شدند. نتایج تطابق بسیار مناسبی بین نمایه های دمایی این دو روش مستقل را نشان داد.

سپس، به منظور ارزیابی آماری نمایه های مادیس در منطقه مورد مطالعه، نمایه هایی که در شرایط غیر ابری توسط مشاهدات مادیس بدست آمده اند استخراج شدند. پس از آماده سازی نمایه های مادیس در مدت زمان مطالعاتی، ۳۳۹۸ نمایه متناظر GPS RO با حداکثر فواصل مکانی و زمانی به ترتیب ۲۰۰ کیلومتر و ۲ ساعت از نمایه های دمای مادیس به منظور مقایسه انتخاب شدند. یک سال مقایسه آماری بین دمای قائم حاصل از این دو روش در لایه های ارتفاعی ۱۵-، ۰-، ۱۵-۲۵ و بالاتر از ۲۵ کیلومتر نشان داد که نمایه های دمای مادیس در ارتفاعات زیر ۱۵ کیلومتر دارای اریبی تر و در لایه های ارتفاعی ۱۵-۲۵ و بالاتر از ۲۵ کیلومتر دارای اریبی خشک است. به عبارت دیگر نتایج نشان داد که به صورت متوسط نمایه های مادیس نسبت به روش GPS RO، دما را در ارتفاعات پایینتر از ۱۵ کیلومتر حدود ۲،۴ کلون کمتر و در ارتفاعات بالاتر از ۱۵ کیلومتری سطح زمین حدود ۳ کلون بیشتر برآورد میکنند. همچنین RMSE

داده های دمای مادیس در ارتفاعات زیر ۱۵ کیلومتر و بالای ۱۵ کیلومتر از سطح زمین به ترتیب حدود ۴ و ۵ کلون برآورد شد. علاوه بر این مقادیر میانگین فصلی RMSE و اریبی محصولات دمای مادیس نشان داد که این پارامترهای آماری برای لایه های ارتفاعی متفاوت در فصلهای مختلف دارای مقادیر تقریباً یکسانی هستند. علاوه بر این، تاثیر میزان فاصله مکانی و زمانی نمایه های دمای GPS RO انتخابی برای ارزیابی نمایه های دمای مادیس روی مقادیر برآورد شده ی اریبی و RMSE مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج، افزایش فاصله مکانی و زمانی زوج نمایه های دمای حاصل از این دو روش به ترتیب در بازه های ۰ تا ۲۰۰ کیلومتر و ۰ تا ۲ ساعت اثر معناداری در افزایش مقادیر اریبی و RMSE محاسباتی نداشت.

در نهایت، به منظور بررسی تغییرات مکانی دقت نمایه های دمای مادیس، نقشه های RMSE دما برای کشور ایران تهیه شد. با توجه به نقشه ها، توزیع مکانی RMSE برای هر سه بازه ی ارتفاعی در سراسر ایران به صورت تصادفی بدست آمد. به عبارت دیگر ارتباط معناداری بین تغییرات طول و عرض جغرافیایی و دقت نمایه های دمای مادیس دیده نشد.

به هر حال باید توجه نمود که در این پژوهش با توجه به حجم بالای داده های مادیس و GPS RO، ارزیابی آماری محصولات دمای مادیس برای بازه ی زمانی یک سال انجام شد. با افزایش بازه ی زمانی مطالعه، میتوان کارایی محصولات مادیس را در سال های مختلف با هم مقایسه نمود و نتایج جامع تری را بدست آورد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از داوران محترم برای نظرات و پیشنهادات ارزشمندی که به منظور افزایش کیفیت این تحقیق ارائه نمودند، تشکر میکنند. همچنین، مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی به شماره های BNUT/394099/97 و BNUT/395022/97 اعلام میدارند.

### منابع مورد استفاده

- C. J. A. C. and Physics (2010) 'Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles', 10(12), 5565-5572.
- Divakarla, M. G., Barnet, C. D., Goldberg, M. D., McMillin, L. M., Maddy, E., Wolf, W., Zhou, L. and Liu, X. J. J. o. G. R. A. (2006) 'Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts', 111(D9).
- Fu, E., Zhang, K., Wu, F., Xu, X., Marion, K., Rea, A., Kuleshov, Y. and Weymouth, G. J. P. (2007) 'An evaluation of GNSS radio occultation technology for Australian meteorology', 1(11), 0.
- Gorbunov, M. E. and Kornblueh, L. J. J. o. G. R. A. (2001) 'Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data', 106(D15), 17161-17169.
- Hajj, G. A., Ao, C., Iijima, B., Kuang, D., Kursinski, E., Mannucci, A., Meehan, T., Romans, L., de La Torre Juarez, M. and Yunck, T. J. J. o. G. R. A. (2004) 'CHAMP and SAC-C atmospheric occultation results and intercomparisons', 109(D6).
- Hajj, G. A., Kursinski, E., Romans, L., Bertiger, W., Leroy, S. J. J. o. A. and Physics, S.-T. (2002) 'A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation', 64(4), 451-469.
- Hulley, G. C., Hook, S. J. J. I. T. o. G. and Sensing, R. (2011) 'Generating consistent land surface temperature and emissivity products between ASTER and data for earth science research', 49(4), 1304-1315.
- Jang, K., Kang, S., Kimball, J. and Hong, S. J. R. S. (2014) 'Retrievals of all-weather daily air temperature using and AMSR-E data', 6(9), 8387-8404.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Mattar, C. and Franch, B. J. R. S. o. E. (2010) 'Atmospheric correction of optical imagery from and Reanalysis atmospheric products', 114(10), 2195-2210.
- Kishore, P., Namboothiri, S., Jiang, J., Sivakumar, V. and Igarashi, K. (2009) 'Global temperature estimates in the troposphere and stratosphere: a validation study of COSMIC/FORMOSAT-3 measurements'.
- Kuo, Y.-H., Sokolovskiy, S. V., Anthes, R. A., Vandenberghe, F. J. T., Atmospheric and Sciences, O. (2000) 'Assimilation of GPS Radio Occultation Data for Numerical Weather Prediction', 11(1), 157-186.
- Kursinski, E., Hajj, G., Bertiger, W., Leroy, S., Meehan, T., Romans, L., Schofield, J., McCleese, D., Melbourne, W. and Thornton, C. J. S. (1996) 'Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System', 271(5252), 1107-1110.
- Kursinski, E., Hajj, G., Schofield, J., Linfield, R. and Hardy, K. R. J. J. o. G. R. A. (1997) 'Observing
- حلیمی، فریبا سادات، آبکار، ع.ا.، مشکواتی، ا.م.، صادقی نائینی، ع. ۱۳۹۰. اعتبارسنجی پروفایل های دما و دمای نقطه شبنم سنجنده مادیس با استفاده از داده های رادیوگمانه در تهران، مجله سنجش از دور و GIS ایران، ۲(۱۰).
- کاچار، حامد،، مباشری، م.ر.، آبکار، ع.ا.، رحیم زادگان، م. ۱۳۹۴. تأثیر رطوبت جو در برآورد مشخصه های وارونگی دمایی از تصاویر ماهواره ای مادیس، مجله سنجش از دور و GIS ایران، ۶(۲).
- صیدی، جبار.، خلیل زاده، ج.، خزایی، ص.، مومنی، م.، ۱۳۹۷. بازیابی پروفیل بومی اتمسفر از داده های فرسرخ حرارتی طول موج بلند سنجنده ماهواره ای مادیس به جای داده های رادیوگمانه، مجله علوم و فناوریهای پدافند نوین، ۳(۳۳).
- Adavi, Z. and Mashhadi-Hossainali, M. (2014). '4D tomographic reconstruction of the tropospheric wet refractivity using the concept of virtual reference station, case study: northwest of Iran', Meteorol. Atmos. Phys., 126, 193-205.
- Bohlinger, P., Sinnhuber, B.-M., Ruhnke, R., Kirner, O. J. A. C. and Physics (2014) 'Radiative and dynamical contributions to past and future Arctic stratospheric temperature trends', 14(3), 1679-1688.
- Borbas, E., Seemann, S. W., Kern, A., Moy, L., Li, J., Gumley, L. and Menzel, W. P. J. t. r., gfs. nasa (2011) 'atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document'.
- Bustos, E., Meza, F. J. J. T. and Climatology, A. (2015) 'A method to estimate maximum and minimum air temperature using surface temperature and vegetation data: application to the Maipo Basin, Chile', 120(1), 211-226.
- Chahine, M. T., Pagano, T. S., Aumann, H. H., Atlas, R., Barnet, C., Blaisdell, J., Chen, L., Divakarla, M., Fetzer, E. J. and Goldberg, M. J. B. o. t. A. M. S. (2006) 'AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases', 87(7), 911-926.
- Chan, M. A. and Comiso, J. C. J. J. o. C. (2013) 'Arctic cloud characteristics as derived from CALIPSO, and CloudSat', 26(10), 3285-3306.
- Chang, L., Guo, L., Feng, G., Wu, X., Gao, G., Zhang, Y. and Zhang, Y. J. A. O. S. (2018) 'Comparison of the Arctic upper-air temperatures from radiosonde and radio occultation observations', 37(1), 30-39.
- Devasthale, A., Willén, U., Karlsson, K.-G., Jones,

- with assimilation of conventional and GPS observations over north of Iran', *Geophys-Italy*, 59, P0322, doi:10.4401/ag-6919.
- Smith, W., Woolf, H. and Jacob, W. J. r. (1970) 'A rrgression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to NIMBUS 3" SIRS" observations', 8, 10.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Mattar, C. and Sòria, G. J. I. J. o. D. E. (2015) 'ار/ات/ atmospheric profiles product (MOD07) over the Iberian Peninsula: A comparison with radiosonde stations', 8(10), 771-783.
- Thorne, P. W., Lanzante, J. R., Peterson, T. C., Seidel, D. J. and Shine, K. P. J. W. I. R. C. C. (2011) 'Tropospheric temperature trends: History of an ongoing controversy', 2(1), 66-88.
- Vorob'ev, V. J. A. O. P. (1994) 'Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from Doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system', 29, 602-609.
- Ware, R., Exner, M., Feng, D., Gorbunov, M., Hardy, K., Herman, B., Kuo, Y., Meehan, T., Melbourne, W. and Rocken, C. J. B. o. t. A. M. S. (1996) 'GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: Preliminary results', 77(1), 19-40.
- Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T. K. and Melbourne, W. G. J. G. r. l. (2001) 'Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP', 28(17), 3263-3266.
- Wickert, J., Schmidt, T., Beyerle, G., König, R., Reigber, C. and Jakowski, N. J. J. o. t. M. S. o. J. S. I. (2004) 'The radio occultation experiment aboard CHAMP: Operational data analysis and validation of vertical atmospheric profiles', 82(1B), 381-395.
- Yunck, T., Liu, C.-H. and Ware, R. (1999) 'A history of GPS sounding'.
- Zhang, K., Fu, E., Silcock, D., Wang, Y. and Kuleshov, Y. J. A. M. T. (2011) 'An investigation of atmospheric temperature profiles in the Australian region using collocated GPS radio occultation and radiosonde data', 4(10), 2087-2092.
- Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System', 102(D19), 23429-23465.
- Lee, Y.-K., Otkin, J. A., Greenwald, T. J. J. J. o. A. M. and Climatology (2014) 'Evaluating the accuracy of a high-resolution model simulation through comparison with observations', 53(4), 1046-1058.
- Liu, Y., Key, J. R., Schweiger, A. and Francis, J. J. J. o. c. (2006) 'Characteristics of satellite-derived clear-sky atmospheric temperature inversion strength in the Arctic, 1980-96', 19(19), 4902-4913.
- Liu, Y., Key, J. R. J. J. o. A. and Technology, O. (2003) 'Detection and analysis of clear-sky, low-level atmospheric temperature inversions with', 20(12), 1.727-1737.
- Poli, P., Joiner, J. and Kursinski, E. R. J. J. o. G. R. A. (2002) '1DVAR analysis of temperature and humidity using GPS radio occultation refractivity data', 107(D20).
- Rocken, C., Anthes, R., Exner, M., Hunt, D., Sokolovskiy, S., Ware, R., Gorbunov, M., Schreiner, W., Feng, D. and Herman, B. J. J. o. G. R. A. (1997) 'Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere', 102(D25), 29849-29866.
- Seemann, S. W., Borbas, E. E., Knuteson, R. O., Stephenson, G. R., Huang, H.-L. J. J. o. A. M. and Climatology (2008) 'Development of a global infrared land surface emissivity database for application to clear sky sounding retrievals from multispectral satellite radiance measurements', 47(1), 108-123.
- Seemann, S. W., Borbas, E. E., Li, J., Menzel, W. P. and Gumley, L. E. J. C. I. f. M. S. S., University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, Version (2006) 'atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document', 6.
- Seemann, S. W., Li, J., Menzel, W. P. and Gumley, L. E. J. J. o. a. m. (2003) 'Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from infrared radiances', 42(8), 1072-1091.
- Seidel, D. J., Gillett, N. P., Lanzante, J. R., Shine, K. P. and Thorne, P. W. J. W. I. R. C. C. (2011) 'Stratospheric temperature trends: Our evolving understanding', 2(4), 592-616.
- Sharifi, M.A., Azadi, M. and Sam Khaniani, A. (2016) ' Numerical simulation of rainfall

## Assessment of MODIS temperature profiles using GPS RO measurements over Iran

*Ali Sam-Khaniani* \*, *Ebadat Ghanbari Parmehr*

*Babol Noshirvani University of Technology, Civil Engineering Department, P.O.Box484, Shariati Ave, Babol, Mazandaran 47148-71167, Iran*

\*Corresponding Author Email: [ali.sam@nit.ac.ir](mailto:ali.sam@nit.ac.ir)

Received: 09 August 2018, accepted: 07 October 2018

### ABSTRACT

In the recent years, remote sensing techniques have been widely used for measuring the vertical structure of the atmospheric parameters. MODIS sensors on board Terra and Aqua satellites are able to produce daily atmospheric profiles with high horizontal resolution over the globe. In this research, the quality of MODIS temperature profiles collected in 2015 over Iran has been assessed using the GPS RO technique which has been considered as the reference. First, temperature profiles of GPS RO have been compared with corresponding temperature values derived from radiosonde observations at Tehran station at different times of the year. The results showed a strong relationship between temperature values obtained by both methods. For all seasons of the year, MODIS temperature profiles have a wet bias of 2.4 K and dry bias of 3 K compared to GPS RO for lower than 15 km and higher than 15 km, respectively. In addition, the average RMSE of 4.5 K was estimated from MODIS temperature data over the all atmospheric layers. Furthermore, the spatial distribution of RMSE of MODIS temperature profiles of the study area confirmed that there is no significant relationship between geographical location and accuracy of MODIS temperature profiles over this region.

**Keywords:** *Temperature profile, MODIS sensor, GPS RO technique, Temperature bias*

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

*Khaniani, AS.; Ghanbari Parmehr, E. (2018). Assessment of MODIS Temperature Profiles Using GPS RO Measurements over Iran . J. Meteorol. Atmos. Sci., 1(3): 212-225*

#### COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

