

استخراج پارامترهای وارونگی دمایی از تصاویر MODIS در آسمان بدون ابر با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حامد کاجار^۱، محمدرضا مباشری*^۲، علی‌اکبر آبکار^۳، مجید رحیم‌زادگان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه مهندسی سنجش از دور، موسسه آموزش عالی خاوران مشهد

۳- استادیار گروه مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۴- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۰۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۵/۰۱

چکیده

از جمله مشخصه‌های وارونگی دمایی، پارامترهای قدرت و عمق وارونگی دمایی می‌باشد. قدرت وارونگی به اختلاف دمایی بین قله‌ی وارونگی و سطح زمین، اطلاق شده و ارتفاع متناظر با این اختلاف دمایی، عمق وارونگی نام دارد. راهکار رایج جهت تعیین این مشخصه‌ها، اندازه‌گیری‌های میدانی توسط رادیوسوند است، که یک اندازه‌گیری نقطه‌ای از جو محسوب می‌گردد. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه روشی جهت تخمین قدرت و عمق وارونگی دمایی با استفاده از داده‌های مادون قرمز سنجنده MODIS می‌باشد. شهر تهران سالانه بیش از ۲۰۰ روز دچار پدیده وارونگی دمایی است. با بررسی داده‌های رادیوسوند طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و احراز شرایط آسمان صاف، مجموعاً ۱۲۰ روز وارونگی تحت شرایط آسمان صاف مشخص شد. دمای درخشندگی برای باندهای ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۳۴ سنجنده MODIS محاسبه شد. اختلاف دمای درخشندگی زوج باندهای $BT_{11} - BT_{6.7}$ ، $BT_{11} - BT_{7.2}$ ، $BT_{11} - BT_{13.3}$ و $BT_{11} - BT_{13.6}$ محاسبه گردید. ضرایب همبستگی خطی بدست آمده بین اختلاف دمای درخشندگی زوج باندهای مذکور با عمق و قدرت وارونگی محاسبه شده از داده‌های رادیوسوند بسیار ضعیف بود که می‌تواند ناشی از تغییرات زیاد محتوای بخار آب در جو تهران باشد. لذا مدل‌های ریاضی چندجمله‌ای، جهت مدل سازی وارونگی دمایی مورد استفاده قرار گرفت. اختلاف دماهای درخشندگی زوج باندهای مذکور و عمق و قدرت وارونگی محاسبه شده از داده‌های رادیوسوند، ورودی‌های چند جمله‌ای می‌باشند. به علت فضای جست و جوی بسیار بزرگ برای یافتن بهینه‌ترین مدل، الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شد. با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، یافتن مدلی با کم‌ترین جمله ممکن و بالاترین دقت، محقق گشت. مدل با ۴۵ داده کنترلی که در تعیین ساختار و ضرایب مدل شرکت نداشتند، ارزیابی شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل در منطقه ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران، تخمین قدرت وارونگی دمایی را با RMSE برابر ۰/۱۶ سلسیوس، و R^2 برابر ۰/۷۰ و برآورد عمق وارونگی دمایی را با RMSE برابر ۴۵/۵ متر و R^2 برابر ۰/۶۸ نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: وارونگی دمایی، مهرآباد، تصاویر ماهواره‌ای MODIS، رادیوسوند، الگوریتم ژنتیک.

مقدمه

یکی از بسترهای مهم در ایجاد تراکم و ایستایی آلودگی در مناطق شهری پدیده‌ی وارونگی دمایی^۱ محسوب می‌گردد (صفوی و علیجانی، ۱۳۸۵). وارونگی دمایی زمانی رخ می‌دهد که لایه‌ای از هوای گرم بالای هوای سرد مجاور سطح زمین قرار گیرد، در چنین شرایطی پایداری هوا ایجاد می‌شود. یعنی در ورد سپهر^۲ تا ارتفاعی خاص با افزایش ارتفاع، دما افزایش می‌یابد (وثوقی و صراف‌زاده، ۱۳۹۰). جهت مقایسه و بررسی وارونگی‌های جوی، پارامترهای مختلفی تعریف شده است که از جمله آن‌ها، می‌توان به پارامترهای قدرت^۳، عمق^۴ و بازه زمانی وقوع وارونگی اشاره نمود (Liu and Key, 2003). قدرت وارونگی به اختلاف دمایی بین قله وارونگی و سطح زمین، اطلاق شده و ارتفاع متناظر با این اختلاف دمایی، عمق وارونگی نام دارد (Liu and Key, 2003). راهکار رایج جهت تعیین قدرت و عمق وارونگی دمایی، اندازه‌گیری‌های میدانی، توسط دستگاه رادیوسوند^۵ است، که یک اندازه‌گیری نقطه‌ای از جو محسوب می‌گردد. توزیع مکانی و زمانی مطلوب در اندازه‌گیری‌های دمایی در یک پهنه امری پرهزینه بوده و نیازمند وجود ایستگاه‌های متعدد هواشناسی می‌باشد. با توجه به این محدودیت، تعیین پارامترهای وارونگی با توزیع مطلوب در یک پهنه امری دشوار محسوب شده و با توجه به نیاز روزانه به چنین بررسی‌هایی، توسعه روش‌های کم هزینه، دقیق و همچنین با پوشش وسیع لازم به نظر می‌رسد (Liu and Key, 2003). وجود راهکارهای مدل‌سازی وارونگی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS^۶ در مناطق قطبی، بیانگر امکان تخمین مشخصه‌های وارونگی توسط تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. به علت شرایط متفاوت جوی قطب و مناطق آلوده شهری، مدل‌سازی وارونگی‌های دمایی توسط تصاویر ماهواره‌ای، در مناطق شهری، امری لازم و ضروری است، از این رو، محوریت پژوهش حاضر، امکان‌سنجی تشخیص وارونگی‌های دمایی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و استخراج اطلاعاتی درباره آن‌هاست.

پیشینه تحقیق

استخراج پروفایل‌های جوی از مشاهدات جوی چگالی شار تابش‌های مادون قرمز حرارتی برای اولین بار توسط کینگ (King, 1956) ارائه گردید. این تحقیق امکان استخراج پروفایل دما را از اندازه‌گیری‌های اسکن چگالی شار تابش ماهواره‌ای نشان می‌داد. وارک (Wark, 1961) در سال ۱۹۶۱ یک برنامه پروفایل‌گیری قائم ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری پروفایل‌های دمای جو پیشنهاد داد. سال ۲۰۱۰، رحیم‌زادگان و مباشری (Rahimzadegan and Mobasheri, 2010) مدلی جهت بهبود دقت پروفایل دمایی استحصال شده از MODIS ارائه نمودند. این مدل برای روزهای غیر وارونگی و معمولی کالیبره شده و روزهای وارونگی در آن لحاظ نشده است.

اولین تحقیقات در زمینه تشخیص و تخمین مشخصه‌های وارونگی دمایی توسط سنجنده MODIS، در سال ۲۰۰۳ انجام گرفت. سال ۲۰۰۳، لیو و کی (Liu and Key, 2003) به بررسی و آشکارسازی وارونگی‌های دمایی سطوح پایین ورد سپهر با استفاده از داده‌های MODIS پرداختند. آن‌ها به علت آن که جو نزدیک سطح زمین در اکثر سال در منطقه قطب شمال و جنوب دچار وارونگی دمایی است، نواحی مذکور را به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب کردند (Liu and Key, 2003). در مطالعه انجام شده توسط آن‌ها، به دلیل ممانعت و اختلال ابر در فضای اندازه‌گیری و میدان دید بین سنجنده و سطح زمین، تنها وارونگی‌های دمایی تحت شرایط آسمان صاف^۷ مورد بررسی قرار گرفت (Liu and Key, 2003).

برای تعیین پروفایل‌های دما و رطوبت از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای نظیر تصاویر MODIS، الگوریتم‌های مختلفی مطرح شده است. این روش‌ها معمولاً از روابط آماری تعیین شده (یا مدل سازی شده) قبلی بین تابش‌های اندازه‌گیری شده و پروفایل جوی متناظر آن استفاده می‌کنند. بر پایه کار سیمن و همکاران (Seeman et al., 2006) در یک آسمان عاری از ابر، چگالی شار تابش

1. Temperature Inversion
3. Strength
5. Radiosonde
7. Clear sky

2. Troposphere
4. Depth
6. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

چگالی شار پلانک در بسامد f_j و دمای T در لایه فشار p_i ، در حالی که همبستگی فشار به ارتفاع حتمی فرض می‌شود، تابع وزندهی، اثر گسیلمندی \mathcal{E} و عبوردهی τ بالای جو تا سطح i در باند j را ترکیب می‌نماید و می‌تواند توسط رابطه (۲) نشان داده شود (Seeman et al., 2006).

$$w(f_j, p_i) = \mathcal{E}(f_j, p_i) \tau(f_j, 0 \rightarrow p_i) \quad (2)$$

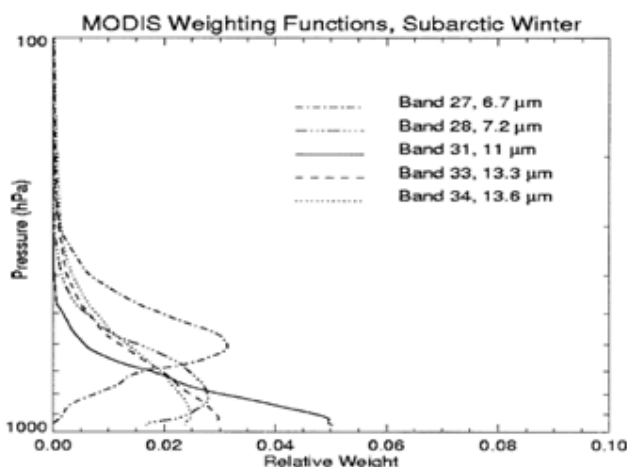
شکل (۱)، تابع وزندهی دما را، برای باندهای ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۳ و ۳۴ سنجنده MODIS که برای جو استاندارد در فصل زمستان قطب شمال محاسبه شده است، نشان می‌دهد.

رسیده در بالای جو در بسامد f_j می‌تواند به صورت مجموع تابش‌هایی که از سطح زمین و از تمام لایه‌های جوی شرکت می‌کنند، در نظر گرفته شوند. به طور نمونه می‌توان در مورد پروفایل‌های دمایی جو رابطه زیر را در نظر گرفت و در مورد دیگر پروفایل‌های جوی نیز چنین رابطه‌ای وجود دارد (Seeman et al., 2006):

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

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

در این معادله $w(f_j, p_i)$ یک تابع وزندهی برای در نظر گرفتن وزن شرکت هر لایه، $p[f_j, T(p_i)]$



شکل شماره ۱- تابع وزندهی دما برای باندهای ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۳ و ۳۴ سنجنده MODIS، توسط به کارگیری پروفایل جو استاندارد قطب شمال (Liu and Key, 2003).

$BT_{7.2}$ ، به دمای سطح ۸۰۰ هکتوپاسکال، حساس‌تر است. بزرگی اختلاف دمای درخشندگی^۲ (BTD) بین باندهای ۷/۲ و ۱۱ میکرومتر، $BT_{7.2} - BT_{11}$ ، با بزرگی اختلاف دمای بین لایه ۸۰۰ هکتوپاسکال و سطح زمین که مرتبط با قدرت وارونگی است، متناسب است (Liu and Key, 2003).

ضرایب همبستگی بین قدرت وارونگی دمایی و $BT_{13.3} - BT_{11}$ ، $BT_{7.2} - BT_{11}$ ، $BT_{6.7} - BT_{11}$ و $BT_{13.6} - BT_{11}$ به ترتیب، ۰/۹۷، ۰/۹۸، ۰/۹۵ و ۰/۹۳

باندهای ۲۷ و ۲۸، باندهای جذبی بخار آب و ۳۱، روزنه جوی و باند ۳۳ و ۳۴، باندهای جذبی دی اکسید کربن می‌باشند. با توجه به شکل (۱)، نوک^۱ تابع وزندهی نسبی، برای باندهای ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۳ و ۳۴ به ترتیب، در سطوح فشار ۶۰۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال، سطح زمین، ۹۰۰ و ۹۵۰ هکتوپاسکال می‌باشد (Liu and Key, 2003). شکل (۱)، نشان‌دهنده این است که در قطب، دمای درخشندگی^۲ روزنه جوی در ۱۱ میکرومتر، BT_{11} ، به دمای سطح زمین و دمای درخشندگی باند بخار آب (۷/۲ میکرومتر)،

1. Peaks
3. Brightness Temperature Difference

2. Brightness Temperature

قوی بوده و وارونگی‌های حاصل از این شرایط با دوام می‌باشد (لشگری و هدایت، ۱۳۸۵). شهر تهران سالانه بیش از ۲۰۰ روز دچار پدیده وارونگی دمایی است (لشگری و هدایت، ۱۳۸۵). با توجه به وجود تنها یک سیستم اندازه‌گیری جوی (رادبو سوند)، مشاهدات انجام شده توسط رادیوسوند تنها در یک نقطه تهران (ایستگاه مهرآباد) صورت می‌پذیرد. در این پژوهش با توجه به اهمیت شهر تهران به عنوان بزرگ‌ترین کلان شهر ایران، این منطقه به عنوان محوریت تحقیق در حوزه تشخیص وارونگی دمایی توسط تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شد. ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران در موقعیت ۵۱ درجه و ۲۱ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه عرض جغرافیایی و به ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. شناسه ایستگاه در سطح جهانی OIII و شماره ایستگاه ۴۰۷۵۴ می‌باشد. علت انتخاب این ایستگاه فراوانی اطلاعات در بانک داده‌های رادیوسوند به خاطر فرستادن دو بالون در روز می‌باشد (مباشری و همکاران، ۱۳۸۹).

طبق شکل (۲)، ایستگاه مهرآباد در منطقه‌ای هموار و با شیب کم واقع شده است که با دشت‌های اطراف تقریباً هم ارتفاع بوده و لذا خصوصیات آب و هواشناسی ایستگاه مهرآباد با دشت‌های مجاورش تقریباً یکسان می‌باشد.

می‌باشد و همچنین ضرایب همبستگی بین عمق وارونگی دمایی و $BT_{13,6} - BT_{11}$ به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۸۸، ۰/۸۷ و ۰/۸۷ می‌باشد.

طبق نتایج بیان شده، رابطه خطی قوی‌تری بین عمق و قدرت وارونگی با $BT_{7,2} - BT_{11}$ نسبت به دیگر جفت‌های BTD وجود دارد، بنابراین $BT_{7,2} - BT_{11}$ برای بازیابی عمق و قدرت وارونگی دمایی در قطب به کار برده شد (Liu and Key, 2003).

معادله دست‌یابی به قدرت و عمق وارونگی دمایی در قطب (Liu and Key, 2003):

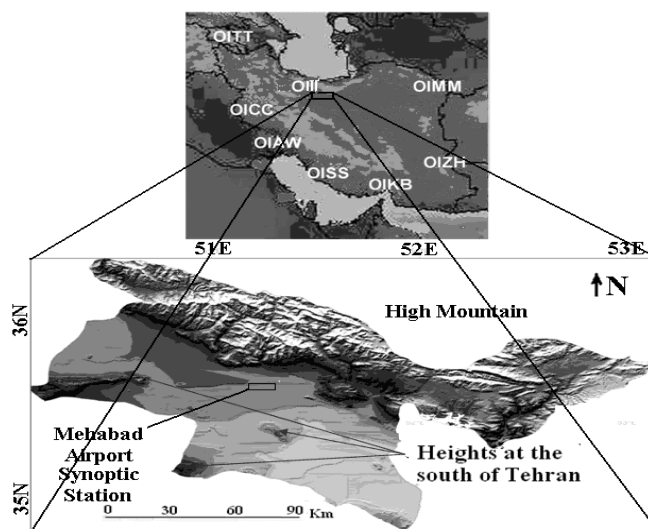
$$\text{Depth or Strength} = a_0 + a_1(BT_{7,2} - BT_{11}) + a_2(BT_{11} - BT_{12}) + a_3(BT_{11}) + a_4(BT_{7,2} - BT_{11})^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $BT_{11} - BT_{12}$ ، اطلاعات اضافی را در مورد مقدار بخار آب که مرتبط به قدرت وارونگی است، فراهم می‌کند (Liu and Key, 2003).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

با توجه به ویژگی‌های توپوگرافی و خصوصیات ترمودینامیکی جو، پدیده وارونگی دمایی بر روی شهر تهران در تمام فصول در شرایط همدیدی حاکم بر منطقه بسیار



شکل شماره ۲- موقعیت توپوگرافی منطقه مورد مطالعه نسبت به استان تهران (مباشری و همکاران، ۱۳۸۹)

داده‌های مورد استفاده

داده‌های رادیوسوند

با تحلیل پروفایل دمایی بدست آمده از اندازه‌گیری‌های رادیوسوند و مقایسه آن با شرایط ایده‌آل جوی، بروز پدیده وارونگی دمایی قابل تشخیص می‌باشد. در این پژوهش به منظور شناسایی روزهای وارونگی دمایی در بازه سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ از اطلاعات مربوط به دمای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رادیوسوند مستقر در ایستگاه هواشناسی مهرآباد استفاده گردید. این اطلاعات روزانه در دو زمان (UTC^۱) و (UTC) ۱۲:۰۰ اخذ می‌گردند. داده‌های مذکور در فرآیند کالیبراسیون پارامترهای مدل‌سازی و همچنین ارزیابی دقت نتایج حاصل از مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کلیه داده‌های رادیوسوند مربوط به ایستگاه هواشناسی مهرآباد از طریق سایت <http://weather.uwyo.edu> اخذ گردید.

تصاویر ماهواره‌ای

سنجنده MODIS یک اسپکترورادایومتر^۲ پوششگر^۳ با ۳۶ باند طیفی در محدوده‌های مرئی^۴ (VIS)، مادون قرمز نزدیک^۵ (NIR) و مادون قرمز^۶ (IR) بین ۰/۶۴۵ و ۱۴/۲۳۵ میکرومتر است (Randall, 2008). برای تشخیص پیکسل‌های بدون ابر از محصول ابر MODIS، یعنی MYD35 استفاده گردید. همچنین در جهت مدل‌سازی وارونگی‌های دمایی توسط تصاویر ماهواره‌ای نیاز به استفاده از دمای درخشندگی می‌باشد. لذا برای نیل به این هدف محصول MYD02 سنجنده MODIS نیز مورد استفاده قرار گرفت.

از طرف دیگر به دلیل رعایت شرط همزمانی بین داده‌های رادیوسوند و تصاویر ماهواره‌ای، نیاز بود تا از تصاویر ماهواره‌ای در نزدیک‌ترین زمان به داده‌های رادیوسوند استفاده نمود، لذا از تصاویر سنجنده MODIS نصب شده بر روی سکوی Aqua که به وقت محلی تقریباً در ساعت ۲:۳۰ و ۱۴:۳۰ از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه

مهرآباد تهران گذر می‌کند، استفاده شد. لازم به توضیح است که محصولات و تصاویر ماهواره‌ای MODIS مرتبط با روزهای وارونگی از طریق سایت <http://ladsweb.nascom.nasa.gov> اخذ گردید.

آماده‌سازی داده‌ها

با استفاده از داده‌های رادیوسوند و تصاویر ماهواره‌ای MODIS، مجموعاً ۱۲۰ روز وارونگی تحت شرایط آسمان صاف که همه فصول را پوشش می‌دهند، استخراج گردید. با استفاده از داده‌های رادیوسوند مربوط به روزهای وارونگی عاری از ابر، قدرت وارونگی به عنوان اختلاف دمای سطح و قله وارونگی و عمق وارونگی به عنوان اختلاف ارتفاع بین سطح و بالای وارونگی محاسبه شد. با استفاده از معادله پلانک (مباشری، ۱۳۸۹)، دمای درخشندگی برای تصویر MYD02 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و باندهای حرارتی ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۳۴ با در نظر گرفتن روزانه ۵ کیلومتر ۵×۵ کیلومتر در حاشیه جنوبی شهر و جنوب فرودگاه مهرآباد تهران، محاسبه گردید. دمای درخشندگی برای هر یک از باندهای مذکور برای منطقه ایستگاه هواشناسی مهرآباد توسط میانگین‌گیری از محدوده ۵×۵ پیکسل‌ها با مد نظر قرار دادن شرایط آسمان کاملاً صاف، بدست آمد.

پیاده‌سازی

با توجه به محاسبه عمق و قدرت وارونگی با استفاده از ۱۲۰ داده رادیوسوند ایستگاه سینوپتیک مهرآباد که شرط آسمان صاف در آن‌ها احراز گردید، و استفاده از تصاویر MYD02 که از جهت زمانی و موقعیت مکانی منطبق با ۱۲۰ داده رادیوسوند می‌باشد، محاسبه دمای درخشندگی در باندهای ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۳۴ و برآورد اختلاف دمای درخشندگی زوج باندهای $BT_{6,7} - BT_{11}$ ، $BT_{7,2} - BT_{11}$ ، $BT_{13,3} - BT_{11}$ و $BT_{13,6} - BT_{11}$ صورت گرفت. لازم به ذکر است که کلیه مراحل پیاده‌سازی

1. Coordinated Universal Time
3. Scanning6
5. Near-infrared

2. Spectroradiometer
4. Visible
6. Infrared

پژوهش حاضر در نرم‌افزارهای Matlab و Envi 4.7 انجام شده است. در ابتدا با استفاده از اطلاعات بدست آمده، ضرایب مدل قطب، یعنی رابطه (۳)، توسط ۷۵ داده با استفاده از روش کم‌ترین مربعات^۱ برای منطقه ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد محاسبه و سپس برای ارزیابی دقت مدل، از ۴۵ داده دیگر استفاده شد که نتایج آن، در جدول (۱)، نشان داده شده است.

نتایج مندرج در جدول (۱)، نشان‌دهنده عدم توانایی مدل قطب جهت تخمین مشخصه‌های وارونگی دمایی در منطقه‌ی شهری همچون تهران می‌باشد. در ادامه روند پیاده سازی، ضرایب همبستگی بین عمق و قدرت وارونگی با اختلاف دمایی درخشندگی برآورد شد که شرح آن در جدول (۲) بیان شده است.

جدول شماره ۱- نتایج ارزیابی عمق و قدرت وارونگی در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد با استفاده از مدل استفاده شده در قطب

پارامترهای ارزیابی دقت	RMSE ²	R ²
مقایسه عمق وارونگی مشاهده شده با عمق وارونگی ارزیابی شده	۸۲/۰۹ متر	۰/۱۳
مقایسه قدرت وارونگی مشاهده شده با قدرت وارونگی ارزیابی شده	۱/۳۵ سلسیوس	۰/۰۵

جدول شماره ۲- ضرایب همبستگی بین اختلاف دمایی درخشندگی با عمق و قدرت وارونگی دمایی منتج شده از داده های

رادیسوند در منطقه ایستگاه هواشناسی مهرآباد

اختلاف دمایی درخشندگی (BTD)	BT _{6.7} - BT ₁₁	BT _{7.2} - BT ₁₁	BT _{13.3} - BT ₁₁	BT _{13.6} - BT ₁₁
ضریب همبستگی بین BTD با قدرت وارونگی دمایی	۰/۹	۰/۱۵	۰/۲۹	۰/۳۲
ضریب همبستگی بین BTD با عمق وارونگی دمایی	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۵۱

واقعی بخار آب موجود در یک نمونه هوا با پارامترهایی نظیر، نسبت آمیزه رطوبت^۳ تعریف می‌شود (مباشری، ۱۳۷۹). جهت بیان تاثیر بخارآب در برآورد اختلاف دماهای درخشندگی، ضرایب همبستگی بین اختلاف دمایی درخشندگی با نسبت آمیزه رطوبت منتج از داده‌های رادیسوند در ارتفاع ۱۱۹۱ متری، که همان ارتفاع ایستگاه مهرآباد می‌باشد، محاسبه شد، که شرح آن در جدول (۳)، بیان شده است.

همان طور که در جدول (۲)، نشان داده شده است، برای منطقه مورد مطالعه یعنی ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد، ضرایب همبستگی نسبتاً ضعیفی در مقایسه با قطب، بین اختلاف دمایی درخشندگی زوج باندهای مختلف با قدرت و عمق وارونگی دمایی وجود دارد. عوامل بسیاری همچون رطوبت، فشار، سرعت و سمت باد، اقلیم و توپوگرافی و بسیاری موارد دیگر بر روابط و شرایط حاکم در جو، تاثیرگذار است (مباشری، ۱۳۷۹). یکی از مهم‌ترین این پارامترها، میزان بخار آب موجود در جو است. مقدار بخار آب موجود در جو بر حسب زمان و مکان متغیر است. به همین علت مقدار آن در جو تهران متفاوت از منطقه قطب (مرجع کارهای انجام شده در قطب) می‌باشد. مقدار

1. Least Squares
3. Humidity mixing ratio

2. Root mean square Error

جدول شماره ۳- ضرایب همبستگی بین اختلاف دمای درخشندگی با نسبت آمیزه رطوبت منبج از داده‌های رادیوسوند در منطقه ایستگاه

هواشناسی مهرآباد

اختلاف دمای درخشندگی (BTD)	$BT_{6.7} - BT_{11}$	$BT_{7.2} - BT_{11}$	$BT_{13.3} - BT_{11}$	$BT_{13.6} - BT_{11}$
ضریب همبستگی بین اختلاف دمای درخشندگی با نسبت آمیزه رطوبت	-۰/۳	-۰/۵۲	-۰/۵۲	-۰/۴۳

مدل‌سازی و اروننگی‌های دمایی امری اجتناب ناپذیر است، مدل‌های ریاضی چند جمله‌ای، دارای قدرت درون‌یابی بالا و توانایی پخش خطاهای درون‌یابی به طور یکنواخت در فضای مدل می‌باشند، به همین علت از مدل ریاضی چند جمله‌ای نشان داده شده در رابطه (۴)، جهت مدل‌سازی استفاده شد.

$$P(X, Y, Z, D, E) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 \quad (4)$$

$$A_{i,j,k,m,n} X^i Y^j Z^k D^m E^n$$

در رابطه (۴)، پارامتر A، مبین ضرایب مدل و X، Y، Z، D و E اختلاف دمای درخشندگی زوج باندهای مختلف MODIS می‌باشند. از جمله مشکلات مدل ریاضی چند جمله‌ای نشان داده شده در رابطه (۴) در مدل‌سازی و اروننگی دمایی، وجود فضای جست و جوی بسیار بزرگ، یعنی 2^{23} حالت می‌باشد. با توجه به نیاز، جهت بهینه‌سازی مدل ریاضی به معنای انتخاب ترم‌های بهینه در چند جمله‌ای‌ها و دست‌یابی به حداکثر دقت ممکن در برآورد مشخصه‌های و اروننگی دمایی و همچنین عدم امکان جست و جوی کامل^۲ جهت رسیدن به بهینه‌ترین مدل، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی استفاده گردید. لازم به ذکر است که منظور از ترم‌های بهینه، استفاده از حداقل ترم‌های ممکن جهت ایجاد بهترین دقت ممکن در استخراج عمق و قدرت و اروننگی دمایی از تصاویر ماهواره‌ای MODIS می‌باشد. با توجه به تعداد زیاد حالات ممکن و پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید (Beasley et al., 1993).

شرح پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی رابطه (۴)، جهت دست‌یابی به عمق و قدرت و اروننگی دمایی به صورت زیر است. اطلاعات ورودی به الگوریتم

بیشتر تحقیقات صورت گرفته در حوزه مطالعه و اروننگی دمایی توسط تصاویر ماهواره‌ای در مناطق قطبی صورت پذیرفته است. یک از دلایل این امر و همچنین همبستگی بالا، بین اختلاف دمای درخشندگی با عمق و قدرت و اروننگی دمایی در قطب، کمبود محتوای بخار آب در جو قطب می‌باشد. وجود بخار آب در جو موجب افزایش جذب انرژی الکترومغناطیسی در محدوده امواج مادون قرمز حرارتی شده که برآورد دمای جو با استفاده از تصاویر حرارتی را دچار اختلال می‌کند (Jensen, 2007). این امر موجب ایجاد عدم قطعیت در استفاده از مدل‌سازی‌های صورت گرفته برای مناطق غیر قطبی توسط تصاویر حرارتی می‌گردد. همان طور که در بخش پیشینه تحقیق ملاحظه گردید، استفاده از اختلاف دمای درخشندگی بدست آمده برای باندهای حرارتی خاص از تصاویر سنجنده MODIS در شرایط عدم وجود و یا ناچیز بودن بخار آب، ارتباط قوی و معنی‌داری را با پارامترهای و اروننگی نشان داده‌اند (Liu and Key, 2003). اما بخار آب جزء جدا نشدنی از جو در بیشتر مناطق زمین بوده و با توجه به جدول (۳)، رابطه نسبتاً قوی بین بخار آب موجود در جو و اختلاف دمای درخشندگی وجود دارد، لذا آزمون این روش‌های ساده، توفیق زیادی را در چنین شرایطی بدست نمی‌آورند. هدف این پژوهش، توسعه روش مدل‌سازی مناسبی به منظور بدست آوردن پارامترهای و اروننگی توسط تصاویر MODIS در مناطق شهری می‌باشد. در پژوهش حاضر با توجه به نتایج بدست آمده، مشخص شد که مدل‌سازی و اروننگی‌های دمایی در یک منطقه شهری همانند تهران با وجود بخار آب و آلودگی‌های متفاوت، از یک رابطه خطی تبعیت نمی‌کند، لذا استفاده از مدل‌های ریاضی کلی، مانند چندجمله‌ای‌ها^۱ جهت

کمترین مربعات، در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، به کار رفته است. با استفاده از جامعه اولیه^۹ ۱۰۰۰ کروموزوم و ۵۰۰ نسل^{۱۰} و قرار دادن شرط توقف^{۱۱} به ازای دقت مناسب و ۱۰۰۰ مرتبه تکرار^{۱۲}، ساختار و ترم‌های بهینه مدل استخراج شد.

نتایج، بحث

در نهایت، با برازش مدل ریاضی چندجمله‌ای‌ها و به کارگیری الگوریتم ژنتیک جهت دستیابی به بهترین مدل، معادلات رگرسیون آماری برای کمی‌سازی ارتباط بین قدرت و عمق وارونگی دمایی و ترکیب‌های دمایی درخشندگی باندهای متفاوت مادون قرمز MODIS، به شرح زیر، محاسبه شد.

برای قدرت وارونگی دمایی:

$$X : BT_{6.7} - BT_{11}$$

$$Y : BT_{7.2} - BT_{11}$$

$$Z : BT_{13.3} - BT_{11}$$

$$D : BT_{13.6} - BT_{11}$$

$$E : BT_{11} - BT_{12}$$

ژنتیک، شامل اختلاف دماهای درخشندگی $BT_{6.7} - BT_{11}$ ، $BT_{7.2} - BT_{11}$ ، $BT_{13.3} - BT_{11}$ و $BT_{13.6} - BT_{11}$ مستخرج از تصاویر MYD02 و همچنین عمق و قدرت وارونگی دمایی استحصال شده از داده‌های رادیوسوند برای ۱۲۰ روز وارونگی، می‌باشد. کد گذاری مدل ریاضی نشان داده شده در رابطه (۴)، برای ارائه به الگوریتم ژنتیک به طریق باینری^۱ انجام شد. برای ارزیابی شایستگی هر راه حل (کروموزوم^۲)، تابع شایستگی^۳، چندجمله‌ای نمایش داده شده توسط هر کروموزوم را، با استفاده از ۷۵ داده حل کرده و پس از یافتن ساختار و ضرایب چند جمله‌ای، RMSE را برای ۴۵ داده کنترلی^۴ که در یافتن ساختار و ضرایب شرکت نداشته‌اند، برآورد می‌کند و نماد بهبود شایستگی هر راه حل، تولید RMSE کم‌تر می‌باشد. از جمله پارامترها و تنظیمات الگوریتم ژنتیک می‌توان به استفاده از روش انتخاب رقابتی^۵ احتمالاتی برای انتخاب والدین و پر کردن حوضچه جفت‌گیری^۶، به کارگیری روش تلفیق^۷ دو نقطه‌ای و همچنین اعمال تکنیک جهش^۸ بر روی تمامی ژن‌های کروموزوم با احتمال ۰/۰۰۳، اشاره کرد. لازم به ذکر است، ملاحظات اجرایی از قبیل، به کارگیری داده‌های ورودی بدون نرمالیزه شدن، همچنین استفاده از ماتریس معکوس گوس- جردن در مرحله برآورد پارامترهای مجهول از روش

$$\text{Strength} = (0.389485936 \times Z) - (0.782590734 \times Y) + (0.000510144 \times Y \times D^2 \times E) - (0.012749953 \times X \times D \times E) - (0.00107703 \times X \times Z \times D \times E) - (0.008667102 \times X \times Y) \quad (5)$$

برای عمق وارونگی دمایی:

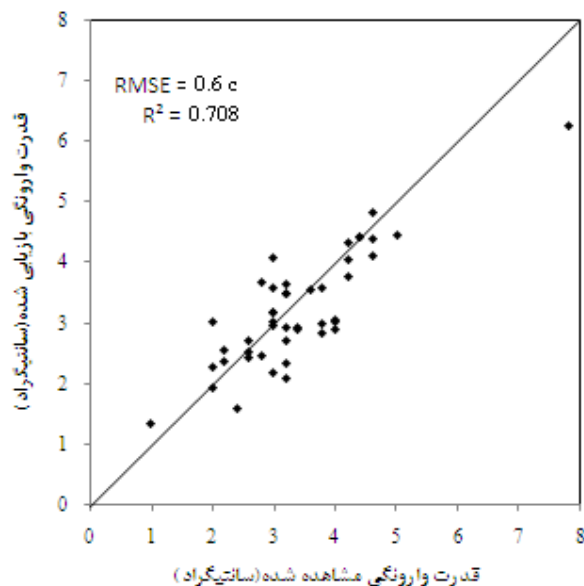
$$\text{Depth} = 1474.605 + (63.42749 \times D) - (50.3291 \times Z \times E^2) + (1.169834 \times Z \times D) + (0.093377 \times X \times Z \times D \times E^2) + (0.034452 \times X \times Y \times Z \times E^2) - (0.00019 \times X \times Y \times Z \times D \times E) + (0.003058 \times X \times Y \times Z \times D \times E^2) \quad (6)$$

ساختار و ضرایب مدل شرکت نداشته‌اند، اعمال شد که نتایج آن در شکل (۳) و (۴)، نشان داده شده است.

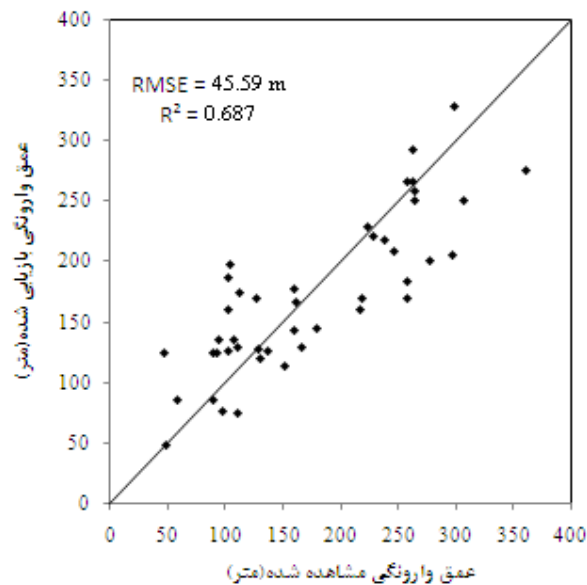
با استفاده از رابطه (۵) و (۶)، مدل تخمین قدرت و عمق وارونگی دمایی بر روی ۴۵ داده کنترلی که در تعیین

1. Binary
3. Fitness Function
5. Tournament
7. Crossover
9. Initial Population
11. Stopping criteria

2. Chromosome
4. Check
6. Generation pool
8. Mutation
10. Generation
12. Iteration



شکل شماره ۳- مقایسه قدرت وارونگی مشاهده شده توسط رادیوسوند و قدرت وارونگی بازایی شده توسط MODIS در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران



شکل شماره ۴- مقایسه عمق وارونگی مشاهده شده توسط رادیوسوند و عمق وارونگی بازایی شده توسط MODIS در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران

همبستگی بین عمق وارونگی دمایی مشاهده شده و بازایی شده، برابر با $0/82$ می‌باشد.

با توجه به شکل (۳)، قدرت وارونگی دمایی با RMSE، $0/6$ سلسیوس قابل تشخیص است و ضریب همبستگی بین قدرت وارونگی دمایی مشاهده شده و بازایی شده، برابر با $0/84$ می‌باشد و همچنین طبق شکل (۴)، عمق وارونگی دمایی با RMSE، $45/59$ متر قابل تشخیص است و ضریب

نتیجه گیری

یکی از کاربردهای روش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای جهت مدل سازی وارونگی‌های دمایی، امکان برآورد قدرت و عمق وارونگی دمایی در یک پهنه‌ی وسیع جغرافیایی می‌باشد. با وجود تنها یک سیستم اندازه‌گیری جوی (رادیوسوند)، در تهران، تصاویر ماهواره‌ای MODIS، جزئیات مکانی و روند سیر تکامل زمانی بهتری را جهت تخمین مشخصه‌های وارونگی دمایی در مقایسه با داده‌های رادیوسوند، فراهم می‌کند. با ارتقای دقت مدل، جهت برآورد مشخصه‌های وارونگی دمایی و به سبب ایجاد قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا توسط سنجنده MODIS، فرصت مطالعات جزئی‌تر توزیع مکانی و سیر تکامل زمانی وارونگی دمایی در مناطق شهری فراهم می‌آید و نهایتاً، این امکان، دانش مدیریت شهری را در زمینه آلودگی و وارونگی هوا افزایش می‌دهد.

منابع

1. Safavi, S. Y. and Alijani, B., 1385, Analysis of geographical factors on air pollution in Tehran, Geographical Research, No. 58, pp. 99-112.
2. Lashgari, H. and Hedayat, P., 1385, Analysis of synoptic patterns of intense inversions in Tehran, Geographical Research, No. 56, pp. 65-82.
3. Mobasheri, M. R., 1379, Understanding the physics of air, Behnashr Publications, 149p.
4. Mobasheri, M. R., 1389, Fundamentals of Physics in Remote Sensing & Satellite Technology, K. N. Toosi University of Technology Publications, 368p.
5. Mobasheri, M. R., Poorbaghere kordi, M., Farajzade Asle, M., Sadeghi, A., 1389, Estimating total water precipitation using MODIS images and Radiosonde data: Tehran area, Journal of Modarres, No. 1, pp. 107-126.
6. Vosoughi, A. and Sarrafzade, M. H., 1390, Studying the phenomenon of temperature inversion and its effects on the metropolitan, 1st Environmental Remediation Technologies Conference, Tehran, pp. 36-44.
7. Beasley, D., Bull, D. R., Martin, R. R., 1993, an overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals, Univ. Camping 15 (2), pp. 58-69.
8. Jensen, J., 2007, Remote sensing of the environment an earth resource perspective,

در مطالعه حاضر، روش تخمین قدرت و عمق وارونگی دمایی با استفاده از داده‌های مادون قرمز سنجنده MODIS، مورد بررسی قرار گرفت. روش مذکور شامل مدل‌سازی ارتباط بین قدرت و عمق وارونگی دمایی با اختلاف دمای درخشندگی منتج از سنجنده MODIS در طول موج باندهای ۲۷، ۲۸، ۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۳۴ می‌باشد. پس از مشخص شدن ارتباط ضعیف بین اختلاف دمای درخشندگی هر ۴ زوج باند با قدرت و عمق وارونگی دمایی و اثبات عدم تبعیت مدل سازی وارونگی دمایی از یک رابطه خطی، مدل‌های ریاضی چند جمله‌ای جهت مدل سازی مشخصه‌های وارونگی دمایی به کار گرفته شد. با توجه به فضای جست‌وجوی بسیار بزرگ جهت دستیابی به مدلی با کم‌ترین ترم ممکن و بالاترین دقت و عدم امکان جست و جوی کامل، به کارگیری الگوریتم جست‌وجوگر هوشمندی همچون ژنتیک، امری اجتناب‌ناپذیر می‌نمود. با برازش مدل ریاضی چند جمله‌ای به زوج اختلاف دماهای درخشندگی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و قدرت و عمق وارونگی دمایی منتج از داده‌های رادیوسوند و به کارگیری الگوریتم ژنتیک جهت دستیابی به بهینه‌ترین مدل، مدلسازی مشخصه‌های وارونگی دمایی با دقت قابل توجهی انجام گرفت.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌سازی انجام شده در منطقه ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران، تخمین قدرت وارونگی دمایی با RMSE، ۰/۶ سلسیوس، R^2 ، ۰/۷۰ و برآورد عمق وارونگی دمایی با RMSE، ۴۵/۵ متر، R^2 ، ۰/۶۸ را نشان می‌دهد، در حالیکه برآورد قدرت وارونگی دمایی در قطب با RMSE، ۱/۹ سلسیوس، R^2 ، ۰/۹۷ و برآورد عمق وارونگی دمایی با RMSE، ۱۳۶ متر، R^2 ، ۰/۸۲ محقق گشت. با مقایسه بین پارامتر R^2 تخمین عمق و قدرت وارونگی در قطب و تهران، انطباق مناسب‌تر عمق و قدرت وارونگی مشاهده شده با عمق و قدرت وارونگی برآورد شده، در قطب، مشهود است و این پدیده، به دلیل، آلودگی، گرد و غبار، میزان بخار آب موجود در جو تهران و شهری بودن منطقه مورد مطالعه، امری، طبیعی است.

- prentice hall series in geographic information science, Second edition.
9. King, J. I. F., 1956, the radiative heat transfer of planet earth. Scientific use of earth satellites, University of Michigan press, Ann Arbor, Michigan, pp. 133-136.
 10. Liu, Y. and Key, J., 2003, Detection and analysis of clear sky, low-level atmospheric temperature inversion with MODIS, J.Atmos. Oceanic Technol, No. 20, pp. 1727-1737.
 11. Rahimzadegan, M. and Mobasheri, M. R., 2010, An attempt for improving MODIS atmospheric temperature profiles products in clear sky, Meteorological Application, Published online in wiely interscience, pp. 20-27.
 12. Randall, M., 2008, Reviw satellite remote sensing of surface air quality, Atmospheric Environment, No. 42, pp. 7823-7843.
 13. Seeman, S. W., Borbas, E. E., Menzel, W. P., Gumley, L. E., 2006, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document, MOD07/MYD07 ATBD C005, Version 6.
 14. Wark, D. Q., 1961, on indirect temperature soundings of the stratosphere from satellites, J. Geophys. Res., pp. 66-77.