

ارزیابی کارایی سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار در مدل‌سازی بخار آب مایل وردسپهر

میررضا غفاری رزین*

استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(دریافت: ۹۹/۹/۴، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

در این مقاله، ایده استفاده از سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار (*ANFIS*) برای حل مسئله توموگرافی وردسپهر و برآورد بخار آب مایل (*SWV*) ارائه شده است. در این روش (*TomoANFIS*) مقدار تأخیر نم مایل (*SWD*) حاصل از مشاهدات جی‌ان‌اس‌اس برای سیگنال‌های قابل‌رؤیت در هر ایستگاه با مقدار تأخیر نم مایل حاصل از شبکه *ANFIS* مقایسه می‌شود (*SWD_{GPS}-SWD_{ANFIS}*). مربع اختلاف مابین این دو مقدار، تابع هدف در شبکه *ANFIS* است و با محاسبه میزان این اختلاف در هر مرحله، مقدار وزن‌های مربوط به شبکه با استفاده از روش پس‌انتشار خطا (*BP*) تصحیح می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از انکسار نم حاصل، مقدار بخار آب مایل (*SWV*) محاسبه می‌شود. ارزیابی روش ارائه شده در این مقاله با استفاده از مشاهدات ۲۰ ایستگاه *GPS* در منطقه شمال‌غرب ایران مربوط به سال ۲۰۱۱ و روزهای ۳۰۰ الی ۳۰۴ (۵ روز)، مشاهدات ایستگاه رادیوسوند تبریز ($38.08^{\circ}N, 46.28^{\circ}E$) و همچنین مقادیر تأخیر نم سمت‌الرأسی (*ZWD*) حاصل از *GPS* در ۲ ایستگاه آزمون *ARDH* و *MNDB* انجام گرفته است. برای بررسی هر چه بیشتر دقت و صحت روش پیشنهادی، نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از روش توموگرافی عناصر حجمی (*TomoVoxel*)، یک روش رایج توموگرافی، و همچنین مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (*TomoANN*) مقایسه شده است. کمینه مقدار خطای نسبی برای سه مدل *TomoANFIS*، *TomoANN* و *TomoVoxel* به ترتیب برابر با ۸/۳۱٪، ۸/۵۵٪ و ۸/۷۱٪ حاصل شده است. همچنین بیشینه مقدار *RMSE* برای سه مدل به ترتیب برابر با ۰/۹۷۱۸، ۱/۰۲۸۱ و ۱/۲۳۴۶ میلی‌متر بر کیلومتر محاسبه شده است. نتایج حاصل از این مقاله بیانگر قابلیت بسیار بالای مدل *TomoANFIS* در نشان دادن تغییرات زمانی و مکانی بخار آب مایل است.

واژه‌های کلیدی: مؤلفه نم وردسپهر، مؤلفه خشک وردسپهر، سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار، توموگرافی، بخار آب مایل.

۱. مقدمه

سیگنال‌های عبوری، به دلیل ماهیت دینامیکی این لایه از جو، مدل‌سازی تأخیر وردسپهری کاری سخت و دشوار خواهد بود. عبور سیگنال‌های ارسالی از طرف ماهواره‌ها از طبیعت متفاوت و متغیر وردسپهر، تأخیر قابل‌ملاحظه‌ای را در نحوه حرکت این سیگنال‌ها خواهد داشت. این اثر معمولاً به صورت تأخیر سمت‌الرأسی وردسپهر (*ZTD*) شناخته می‌شود. می‌توان تأخیر سمت‌الرأسی لایه وردسپهر را به دو مؤلفه نم (*WD*) و خشک (*HD*) تقسیم نمود (ساستامینین ۱۹۷۳؛ دیویس و همکاران، ۱۹۸۵). مؤلفه خشک را می‌توان مؤلفه هیدروستاتیکی نیز نام‌گذاری کرد. این مؤلفه معمولاً با استفاده از دستگاه‌هایی، که فشار هوا را اندازه‌گیری می‌کنند، مدل‌سازی می‌شود. بر خلاف مؤلفه خشک، مؤلفه نم انکسار وردسپهری نمی‌تواند با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار هوا مدل‌سازی

زمانی که سیگنال‌های جی‌ان‌اس‌اس (ماهواره‌ای) از میان جو عبور می‌کنند، به دلیل وجود عوامل مختلفی دچار تأخیراتی می‌شوند. جو اثرات مهم و قابل‌توجه روی سیگنال‌های منتشرشده جی‌ان‌اس‌اس دارد. فرض اصلی و اولیه در انتقال سیگنال‌های جی‌ان‌اس‌اس از ماهواره‌ها به سمت گیرنده‌ها این است، که این سیگنال‌ها با سرعت نور حرکت می‌کنند. برای ماهواره‌های سامانه جی‌پی‌اس، که در ارتفاع تقریبی ۲۰۲۰۰ کیلومتری از سطح زمین واقع شده‌اند، سیگنال‌های سامانه می‌بایستی از لایه یونسپهر و جو خنثی (لایه وردسپهر) عبور کنند. تأثیر هر یک از این لایه‌ها بر نحوه حرکت سیگنال‌های عبوری بسیار مهم است. اثر لایه یونسپهر را با استفاده از گیرنده‌های دوسامدی جی‌ان‌اس‌اس تا ۹۰ درصد می‌توان کاهش داد (سیبر، ۲۰۰۳). در مورد لایه وردسپهر و اثر آن بروی

شود. این مؤلفه بیشتر به بخار آب و رطوبت لایه وردسپهر بستگی دارد و مقدار آن در مناطق خشک در حد چند سانتی متر یا کمتر و در مناطق مرطوب حدود ۳۵ سانتی متر است. بخار آب یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل‌های سامانه وضع هوا و عامل اصلی در رخدادهای جوی است. تراکم بخار آب با تغییر در عرض جغرافیایی تغییر کرده و در عرض‌های میانی بیشترین مقدار را دارد، که با حرکت به سمت قطب کاهش می‌یابد.

تاکنون مدل‌های مختلفی برای برآورد و پیش‌بینی مقدار بخار آب و رطوبت مؤلفه نم انکسار وردسپهری توسعه داده شده است. این مدل‌ها را می‌توان به دو دسته: الف-مدل‌های تجربی و ب-مدل‌های تحلیلی تقسیم کرد. از جمله، مدل‌های تجربی ارائه شده برای محاسبه بخار آب و رطوبت مؤلفه نم، می‌توان به مدل‌های ساستامین، هوپفیلد، ایفادیس و برمن اشاره کرد (بویس و همکاران، ۱۹۹۲؛ اماردسون و همکاران، ۱۹۹۸). از جمله، مدل‌های تحلیلی، می‌توان به مدل‌های توموگرافی اشاره کرد. در سال‌های اخیر، این نوع از مدل‌ها به دلیل قابلیت و دقت بسیار بالا در برآورد مقدار بخار آب و رطوبت وردسپهر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. رحیمی و همکاران (۲۰۱۳) از روش ردیابی پرتو به منزله راه‌حلی کارا برای تعیین تأخیر وردسپهری استفاده کردند. آنها از مدل‌های هواشناختی عددی، داده‌های سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های VLBI و همچنین داده‌های رادیوسوند برای برآورد مقدار تأخیر وردسپهری استفاده کردند. اداوی و مشهدی حسینی (۲۰۱۴) با استفاده از مفهوم ایستگاه مرجع مجازی (VRS) مقدار انکسار نم را در منطقه شمال غرب ایران مورد بررسی قرار دادند. آنها از ماتریس تفکیک برای بهینه‌سازی تفکیک مکانی استفاده کردند. چن و لیو (۲۰۱۴) از نمایه‌های رادیوسوندی برای بهینه‌سازی تفکیک ارتفاعی مدل توموگرافی و از روش تقاطع پرتو با سطح عناصرهای حجمی برای بهینه‌سازی تفکیک افقی استفاده کردند. آنها همچنین نتایج کار خود را با نتایج حاصل از روش‌های عددی هواشناختی و

خروجی‌های ایستگاه‌های رادیوسوند در چین مقایسه کردند. اداوی و مشهدی حسینی (۲۰۱۵) با استفاده از روش پایدارسازی هیبرید به حل مسئله توموگرافی وردسپهر و برآورد مقدار انکسار نم در منطقه شمال غرب ایران پرداختند. یائو و ژو (۲۰۱۶) یک روش جدید برای افزایش تعداد عناصر حجمی مورد استفاده در حل مسئله توموگرافی وردسپهر را ارائه دادند. آنها از مقادیر حاصل از نمایه‌های رادیوسوندی برای بهینه‌سازی حوزه ارتفاعی و مفهوم تقارن غیریکنواخت عناصر برای بهینه‌سازی افقی مدل توموگرافی استفاده کردند. حاجی آقاجانی و عامریان (۲۰۱۷a) از روش ردیابی پرتو سه بعدی با معادلات آیکونال برای بازسازی مقدار بخار آب وردسپهر در منطقه ایران استفاده کردند. آنها همچنین روش پایدارسازی QR را برای دستیابی به جواب یکتا مورد استفاده قرار دادند. ویلقان و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل‌های عددی هواشناختی، مشاهدات ایستگاه‌های جی‌ان‌اس‌اس و مشاهدات زمینی هواشناختی، مسئله توموگرافی وردسپهر را حل کرده و انکسار کل وردسپهر را محاسبه کردند. حاجی آقاجانی و عامریان (۲۰۱۷b) میزان کارایی داده‌های هواشناختی رادیوسوند و ERA-Interim را برای تصحیح وردسپهری در تعیین موقعیت مطلق دقیق با به کارگیری روش ردیابی پرتو سه بعدی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. بدین منظور، با به کارگیری روش ردیابی پرتو سه بعدی و انتخاب دو ایستگاه بندرعباس و بیرجند و آماده‌سازی داده‌های مذکور در این مناطق، تصحیحات وردسپهری با هر دو نوع داده هواشناختی فوق برای سه تاریخ متفاوت محاسبه و مقایسه شد. بنویدس و همکاران (۲۰۱۸) بازسازی وردسپهر به روش توموگرافی را برای محاسبه مقدار بخار آب در مقیاس‌های محلی ارائه کردند. آنها از مقادیر بخار آب نمایه‌های رادیوسوندی به منزله مقادیر اولیه روش توموگرافی استفاده کردند. ژو و همکاران (۲۰۱۹) از مشاهدات ایستگاه‌های خارج از محدوده توموگرافی برای افزایش دقت بازسازی وردسپهر استفاده کردند. نتایج حاصل از روش پیشنهادی ایشان در

تمرکز این مقاله بر روی به‌دست آوردن بخار آب مایل (SWV) موجود در جو با استفاده از اندازه‌گیری‌های جی‌ان‌اس‌اس است. روش مورد استفاده در این تحقیق برای محاسبه بخار آب، فن توموگرافی است. این روش بخار آب و رطوبت موجود در لایه وردسپهر را به‌صورت سه‌بعدی در اختیار کاربران قرار می‌دهد. نوآوری اصلی این مقاله در بخش برآورد پارامترهای وردسپهری است. در این قسمت برای برآورد پارامترهای وردسپهری از سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار ($ANFIS$) استفاده شده و چگونگی اصلاح وزن‌های شبکه بر اساس رابطه مربوط به روش توموگرافی وردسپهر می‌باشد. حسن این ایده در انجام محاسبات بسیار ساده ریاضی و همچنین برآورد دقیق و صحیح پارامترهای وردسپهری است. در صورت وجود داده‌های ورودی بسیار زیاد، روش ارائه شده در این مقاله بسیار کارآمد و سودمند خواهد بود. برای ارزیابی روش پیشنهادی این مقاله، نتایج حاصل با روش توموگرافی عناصر حجمی ($Tomo_{Voxel}$) به‌منزله یک روش مرسوم و رایج و همچنین مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی ($Tomo_{ANN}$) مقایسه شده است. روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای حل مسئله توموگرافی وردسپهر و برآورد انکسار نم اخیراً توسط غفاری رزین و وثوقی (۲۰۲۰) ارائه شده و هدف از مقایسه نتایج این مقاله با نتایج روش مذکور، نشان دادن بهبود به‌وجود آمده در نتایج مدل $ANFIS$ است. شاخص‌های آماری خطای نسبی، جذر خطای مربعی میانگین ($RMSE$)، انحراف معیار و ضریب همبستگی برای ارزیابی نتایج حاصل استفاده می‌شوند.

۲. وردسپهر و ساختار آن

بر خلاف لایه یونسپهر، وردسپهر یک محیط پراکنش‌گر برای امواج جی‌ان‌اس‌اس نیست. در نتیجه انتشار امواج در این لایه از جو به‌سامد امواج بستگی ندارد. با استفاده از ترکیب دو بسامد در اندازه‌گیری‌های سامانه جی‌ان‌اس‌اس، نمی‌توان اثر لایه وردسپهر را از روی امواج گذرنده

بازسازی مقدار بخار آب جو بالای شبکه مورد بررسی، حاکی از دقت و صحت بالای آن بود. غفاری رزین و وثوقی (۲۰۲۰) از روش توموگرافی عناصر حجمی به‌همراه شبکه‌های عصبی مصنوعی ($Tomo_{ANN}$) برای بازسازی مقدار انکسار نم وردسپهر در منطقه شمال‌غرب ایران استفاده کردند.

فنون مختلفی برای تعیین مقدار بخار آب جو از قبیل رادیوسوندا، بخارسنج رادیومتری (WVR)، ماهواره‌های هواشناختی، فن هواشناختی با جی‌ان‌اس‌اس وجود دارد. بایستی اشاره کرد که در هنگام استفاده از هر یک از این فنون، عوامل مختلفی چون هزینه، دقت، محدودیت عملیاتی، تفکیک مکانی و زمانی دخیل می‌باشد. سرویس بین‌المللی آب و هوا اطلاعات مربوط به چگونگی توزیع بخار آب را از طریق ماهواره و رادیوسوندهایی، که دو بار در روز پرتاب می‌شوند، به‌دست می‌آورد. مشاهداتی، که به‌وسیله بالون‌های هواشناختی رادیوسوندی صورت می‌گیرد، مناسب و کافی نیستند، زیرا مشاهدات حاصل از بالون‌هایی، که پرتاب می‌شوند، متراکم، یکنواخت و پیوسته نیستند. به‌علاوه، اطلاعات رادیوسوندی به‌سرعت در اختیار کاربران قرار نمی‌گیرد، زیرا حدود یک ساعت زمان لازم است، که بالون‌های رادیوسوندی به وردسپهر برسند. امکان بررسی لحظه‌ای تغییرات زمانی و مکانی بخار آب از طریق رادیوسوندها امکان‌پذیر نیست، زیرا بالون‌های رادیوسوندی حداکثر دو یا سه بار در روز پرتاب می‌شوند. بنابراین تفکیک زمانی مشاهدات بخار آب و نیز تراکم افقی اطلاعات کافی نیست. به‌علاوه تجهیزات رادیوسوندی گران‌قیمت هستند. در حالی که فن هواشناختی با جی‌ان‌اس‌اس می‌تواند، مشاهدات پیوسته و تقریباً آنی از مقدار بخار آب اطراف یک ایستگاه جی‌ان‌اس‌اس در اختیار قرار دهد. تحقیقات انجام گرفته نشان داده است که با استفاده از فنون وابسته به جی‌ان‌اس‌اس می‌توان دقت پیش‌بینی‌های وضع هوایی را بهبود بخشید (بوسی و همکاران، ۲۰۱۰؛ موسوی و همکاران، ۱۳۸۶).

انکسار بستگی به تغییرات ارتفاعی داشته، در نتیجه تأخیر وردسپهری نیز با ارتفاع تغییر خواهد کرد. تأخیر وردسپهری متناسب با ضریب انکسار است. این کمیت را می‌توان با انتگرال‌گیری از ضریب انکسار وردسپهری در مسیر حرکت سیگنال در لایه وردسپهر به دست آورد (سیبر، ۲۰۰۳):

$$d_{trop} = \int_{path} (n-1) ds \quad (1)$$

در رابطه بالا، n انکسار در لایه وردسپهر و ds عنصر طولی دیفرانسیلی در روی سیگنال است. رابطه ۱ را با وارد کردن ضریب انکسار وردسپهری (N)، به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$d_{trop} = 10^{-6} \int_{path} N ds \quad (2)$$

در رابطه ۲ ضریب انکسار وردسپهری N را می‌توان به صورت زیر تجزیه کرد (سیبر، ۲۰۰۳):

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} = N_h + N_w \quad (3)$$

در رابطه بالا، متغیر P نشان‌دهنده فشار هوا در واحد میلی‌بار، T بیانگر دما با واحد کلون و e نشان‌دهنده فشار جزئی در بخار آب با واحد میلی‌بار هستند. همچنین متغیرهای N_h و N_w بترتیب بیانگر انکسار خشک و نم می‌باشند. رابطه تأخیر وردسپهری را می‌توان با استفاده از رابطه ۳ به صورت زیر بازنویسی کرد:

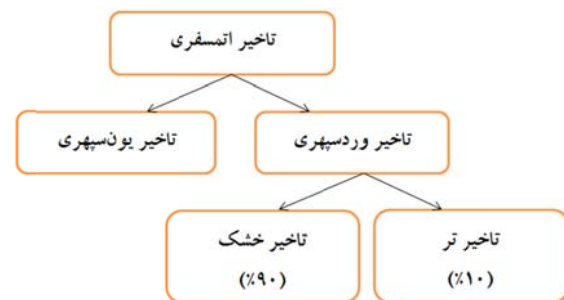
$$d_{trop} = 10^{-6} \int_{path} N_h ds + 10^{-6} \int_{path} N_w ds \quad (4)$$

در نتیجه، با کمک روابط به دست آمده، تأخیر وردسپهری را در حالت کلی می‌توان با رابطه زیر بیان کرد:

$$d_{trop} = SHD + SWD \quad (5)$$

در رابطه ۵، SHD و SWD بترتیب تأخیر وردسپهری خشک و نم در راستای مایل می‌باشند. مؤلفه خشک وردسپهری را می‌توان با دقت مناسب با استفاده از مدل‌های هواشناختی و مدل‌های فشارسنجی به دست آورد

برداشت. تأخیر بوجود آمده در اثر لایه وردسپهر را می‌توان به دو بخش خشک و نم تقسیم‌بندی کرد. مؤلفه خشک تأخیر وردسپهری در اثر گازهای خشک موجود در این لایه حاصل می‌شود. این بخش از تأخیر وردسپهری را با دقت زیادی می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی پارامترهای هواشناختی همانند دما، فشار و رطوبت، به دست آورد. در مقابل، مؤلفه نم انکسار وردسپهری در اثر بخار آب موجود در لایه وردسپهر به وجود می‌آید. این مؤلفه به دلیل اینکه دارای تغییرات زیاد مکانی و زمانی است، با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی قابل مدل‌سازی دقیق نیست. برای مدل‌سازی این بخش از انکسار وردسپهری، میزان بخار آب و تغییرات آن می‌بایستی به دقت در دسترس باشد. شکل (۱)، تأخیرات جوی موجود و میزان آنها برای لایه وردسپهر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تأخیرات جوی موجود.

مؤلفه خشک تقریباً ۹۰٪ و مؤلفه نم تقریباً ۱۰٪ کل خطای حاصل از انکسار وردسپهری را تشکیل می‌دهند (سیبر، ۲۰۰۳). لایه‌های مختلف جو خنثی با ویژگی‌هایی مانند فشار، دما و ترکیبات شیمیایی شناخته می‌شوند. نزدیک‌ترین لایه، وردسپهر بوده که از سطح زمین شروع و تا ارتفاع ۱۰ کیلومتری از آن ادامه دارد. ارتفاع ۱۰ کیلومتر به پایین در لایه وردسپهر دارای بیش از ۷۵ درصد جرم جو است (موسوی و همکاران، ۱۳۸۶). همچنین بیشترین مقدار بخار آب در این بخش از لایه وردسپهر واقع شده است. زمانی که سیگنال‌های سامانه جی‌ان‌اس‌اس از لایه وردسپهر عبور می‌کنند، تحت تأثیر خاصیت انکساری این لایه از جو واقع می‌شوند. ضریب

ارتفاعی متمایز می‌تواند به صورت ثابت در نظر گرفته شود.

این نوع تقریب مشابه الگوریتم عناصرهای حجمی است که در آن وردسپهر شامل لایه‌های ارتفاعی مجزا می‌باشد. تغییرات افقی با استفاده از توابع چندجمله‌ای ساده تقریب می‌شوند. تأخیر نم مایل با استفاده از رابطه زیر به انکسار نم در یک موقعیت خاص مرتبط می‌شود (اسکونه و هوئل، ۲۰۰۵):

$$SWD = 10^{-6} \int_{path} N_W(\phi, \lambda, h) ds \quad (7)$$

در رابطه ۷، انکسار نم (N_W) یک تابع چندجمله‌ای ساده با متغیرهای طول (λ)، عرض (ϕ) و ارتفاع (h) می‌باشد. فرض اصلی این است که انکسار نم در هر لایه ارتفاعی مقدار ثابتی است. در این حالت رابطه ۷ را می‌توان به صورت مجموع گسسته زیر در نظر گرفت:

$$SWD = \sum_{j=1}^n N_{Wj}(\phi_j, \lambda_j, h_j) ds_j \quad (8)$$

رابطه بالا بیانگر این موضوع است، که وردسپهر به n لایه ارتفاعی مجزا تقسیم می‌شود. همچنین N_{Wj} نشان‌دهنده انکسار نم در موقعیت (ϕ_j, λ_j, h_j) بر روی سیگنالی با طول ds_j است. رابطه ۸ را می‌توان با استفاده از یک چندجمله‌ای ساده با متغیرهای طول و عرض جغرافیایی برای بیان تغییرات افقی به صورت زیر گسترش داد (اسکونه و هوئل، ۲۰۰۵):

$$SWD = \sum_{j=1}^n (a_{0j} + a_{1j} \Delta\phi_j + a_{2j} \Delta\lambda_j + a_{3j} \Delta\phi_j^2 + a_{4j} \Delta\lambda_j^2 + a_{5j} \Delta\phi_j \Delta\lambda_j) ds_j \quad (9)$$

در رابطه ۹، $a_{0j}, a_{1j}, \dots, a_{5j}$ ضرایب چندجمله‌ای (پارامترهای وردسپهری) برای لایه j ام در ارتفاع h_j می‌باشد. همچنین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_j &= \phi_j - \phi_0 \\ \Delta\lambda_j &= \lambda_j - \lambda_0 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، (ϕ_0, λ_0) نشان‌دهنده نقطه مرکز شبکه

(موسوی و همکاران، ۱۳۸۶). در این مقاله از مدل تجربی ساستامنین (۱۹۷۳) برای محاسبه تأخیر خشک وردسپهری استفاده شده است. یکی از پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در محاسبه تأخیر وردسپهری، مدل تجربی ساستامنین است، که با استفاده از رابطه زیر تأخیر خشک را محاسبه می‌کند:

$$ZHD = \frac{0.002277 P_s}{(1 - 0.0026 \cos 2\phi - 0.00000028 H_s)} \quad (6)$$

در رابطه فوق، P_s فشار هوای خشک در واحد میلی‌بار، H_s و ϕ به ترتیب عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه می‌باشند. با حذف مقدار تأخیر وردسپهری خشک از مقدار کلی آن، می‌توان تأخیر نم مایل را برای هر خط دید مابین گیرنده زمینی و ماهواره محاسبه کرد. با گسترش شبکه‌های ژئودینامیک با تعداد ایستگاه‌های زیاد و متراکم، امکان محاسبه مؤلفه نم تأخیر وردسپهری با دقت بالا به وجود آمده است. انکسار نم وردسپهری دارای تغییرات بسیار زیادی در حوزه زمان و مکان (افقی و ارتفاعی) است. این مؤلفه می‌تواند، به منزله مشاهده ورودی برای تعیین مقدار بخار آب موجود در جو برای روش توموگرافی به کار رود.

۳. توموگرافی وردسپهر

استفاده از روش توموگرافی برای بررسی ویژگی‌های لایه وردسپهر در سال‌های اخیر، مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است (حاجی آقاجانی و همکاران، ۲۰۲۰). روش‌های مختلفی برای حل مسئله توموگرافی وردسپهر ارائه شده، که هر کدام دارای معایب و مزایایی خاص خودشان هستند. در این مقاله از دو فرض اساسی زیر برای حل مسئله توموگرافی وردسپهر استفاده می‌شود (اسکونه و هوئل، ۲۰۰۵):

۱- تغییرات افقی انکسار وردسپهری (N_W) می‌تواند با استفاده از یک چند جمله‌ای از مرتبه پایین با متغیرهای طول و عرض جغرافیایی مدل‌سازی شود.

۲- تغییرات ارتفاعی انکسار وردسپهری (N_W) در لایه‌های

(زاده، ۱۹۶۵). سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار شبکه‌ای ۵ لایه‌ای، متشکل از گره‌ها و کمان اتصال دهنده گره می‌باشد. لایه اول، داده‌های ورودی با درجه عضویت می‌باشد، که توسط کاربر مشخص می‌شود. کلیه عملیات مدل‌سازی در لایه‌های دوم تا چهارم انجام می‌گیرد. لایه آخر، خروجی شبکه می‌باشد، که هدف آن حداقل کردن اختلاف خروجی به دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است. در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. روابط پیش‌خور برای ساختار شبکه ANFIS ۵ لایه به شرح زیر می‌باشد:

$$w_{jk} = \mu_{M^1_j}(x_1) \cdot \mu_{M^2_k}(x_2) \quad (13)$$

$$j, k = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{w}_{jk} = \frac{w_{jk}}{\sum_{i=1}^m \sum_{i=2}^m w_{i1i2}} \quad j, k = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$f_{jk} = q_{0,jk} + q_{1,jk} \cdot x_1 + q_{2,jk} \cdot x_2 \quad (15)$$

در روابط فوق m نشان‌دهنده تعداد توابع وابسته برای هر متغیر ورودی، μ_M بیانگر درجه تابع عضویت، w_{jk} نشان‌دهنده مقدار تأثیر هر قانون، مقدار نرمالیزه شده تأثیر کل قوانین و (q_0, q_1, q_2) اعداد حقیقی متناظر با وزن‌های خطی در بخش تالی سامانه ANFIS می‌باشند. خروجی نهایی y شبکه ANFIS به صورت زیر قابل محاسبه است (جنگ، ۱۹۹۳):

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m f_{jk} \mu_{M^1_j}(x_1) \mu_{M^2_k}(x_2)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \mu_{M^1_j}(x_1) \mu_{M^2_k}(x_2)} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m f_{jk} \bar{w}_{jk} \quad (16)$$

قابلیت شبکه ANFIS به تعداد توابع وابسته در نظر گرفته شده برای هر بعد ورودی وابسته است. معمولاً توابع تعلق استفاده شده توابع زنگی شکل گوسی با میزان بیشینه برابر با یک و کمینه برابر با صفر می‌باشند که به فرم زیر قابل تعریف می‌باشند (زاده، ۱۹۶۵):

ژئودینامیکی است. این نقطه به صورت اختیاری در مرکز شبکه انتخاب می‌شود. برای برآورد ضرایب چندجمله‌ای در رابطه ۹ از روش‌های مختلف می‌توان استفاده کرد. ایده جدید ارائه شده در این مقاله استفاده از شبکه ANFIS برای برآورد این پارامترها است.

۴. سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار

مدل‌های فازی-عصبی که توسط جنگ در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت، برای تسهیل فرآیند یادگیری و انطباق، منطق فازی را با شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیب می‌کند. در واقع در مدل‌های فازی-عصبی برای حل مشکل شناسایی پارامترهای سامانه استنتاج فازی (FIS)، از یک شبکه تطبیقی، که حالت عمومی شبکه عصبی پیشرو چندلایه است، استفاده می‌شود. معمول‌ترین نوع سامانه استنتاج فازی، که قابلیت قرارگیری در یک شبکه تطبیقی را دارا است، سیستم فازی تاکاگی-سوگنو است، که خروجی آن یک رابطه خطی است و پارامترهای آن را می‌توان با روش پس انتشار خطا (BP) برآورد کرد (زاده، ۱۹۶۵). برای سادگی کار فرض می‌شود، که FIS مورد بررسی از دو ورودی x و y و یک خروجی f تشکیل شده و همچنین پایگاه قانون در آن شامل دو قانون اگر-آنگاه است. قوانین موجود در این سامانه عبارت‌اند از:

$$IF \quad x = A_1 \quad AND \quad y = B_1, \quad (11)$$

$$Then \quad f_1 = p_1 + q_1 + r_1$$

$$IF \quad x = A_2 \quad AND \quad y = B_2, \quad (12)$$

$$Then \quad f_2 = p_2 + q_2 + r_2$$

که در آن A_1 و A_2 توابع عضویت برای ورودی x و B_1 و B_2 توابع عضویت برای ورودی y و در نهایت p_1, q_1, r_1 و p_2, q_2, r_2 پارامترهای تابع خروجی هستند. همانند سامانه‌های فازی، ساختار ANFIS نیز از دو بخش تشکیل شده است. بخش نخست مقدم و بخش دوم تالی (استنتاج-نتیجه) نامیده می‌شود، که این دو بخش توسط قواعد فازی در فرم یک شبکه به یکدیگر متصل می‌شوند

خواهد بود. بر اساس رابطه ۹ انکسار نم وردسپهر با استفاده از یک چندجمله‌ای بیان شده است، که ضرایب آن می‌بایستی برای هر خط دید برآورد شود. این چندجمله‌ای دارای ۶ ضریب مجهول است، که اگر n لایه ارتفاعی برای بررسی وردسپهر در نظر گرفته شود در نتیجه $6n$ پارامتر وردسپهری مجهول برای کل شبکه خواهیم داشت. اگر یک شبکه جی‌ان‌اس‌اس دارای u ایستگاه باشد در این حالت تعداد کل مشاهدات شبکه برابر با $u \times n$ و تعداد مجهولات برابر $6n$ خواهد بود. در یک بار اجرای شبکه برای مشاهدات تأخیر نم مایل وردسپهری در یک بازه زمانی دو ساعته، تعداد $6n$ پارامتر مجهول وردسپهری برآورد می‌شوند. مرحله بعد برآورد تابع هدف رابطه (۱۸) و متعاقب آن اصلاح وزن‌های شبکه برای دستیابی به جواب صحیح است. می‌توان تصحیح وزن‌های شبکه را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} = -\eta \times \frac{\partial E}{\partial SWD^{ANFIS}} \times \frac{\partial SWD^{ANFIS}}{\partial N_w^{ANFIS}} \times \frac{\partial N_w^{ANFIS}}{\partial w} \quad (19)$$

در رابطه ۱۹، μ نرخ همگرایی و w بیانگر وزن اولیه در شبکه $ANFIS$ است. معمولاً وزن‌های اولیه به صورت اختیاری انتخاب می‌شوند. برای رابطه ۱۹ خواهیم داشت:

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} = -2\eta \times (SWD^{ANFIS} - SWD^{GPS}) \times \frac{\partial N_w^{ANFIS}}{\partial w} \quad (20)$$

اصلاح وزن‌ها برای همه خط دیدهای موجود در شبکه (برای تمامی SWD^{GPS}) انجام می‌گیرد. در نتیجه رابطه ۲۰ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} = -2\eta \times \sum_{q=1}^Q (SWD_q^{ANFIS} - SWD_q^{GPS}) \times \frac{\partial (N_w^{ANFIS})_q}{\partial w} \quad (21)$$

الگوریتم توموگرافی وردسپهر با استفاده از مدل $ANFIS$ به صورت زیر خواهد بود:

$$\mu_{M_i}(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x - \bar{x}_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \quad (17)$$

که در رابطه فوق (\bar{x}_i, σ_i) پارامترهای توابع وابسته هستند، که به روی شکل آن تأثیر می‌گذارند. در این مقاله، برای آموزش شبکه $ANFIS$ و تعیین وزن‌های بهینه، از روش پس انتشار خطا (BP) استفاده شده است (مارس و همکاران، ۱۹۹۶). در پس انتشار خطا، از روش گرادیان شیب برای برقراری ارتباط مابین ورودی‌ها، وزن‌ها و خروجی‌های شبکه استفاده می‌شود.

۵. توموگرافی وردسپهر با سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار

در بخش سه اشاره شد که تغییرات افقی وردسپهر در لایه‌های ارتفاعی مجزا با استفاده از رابطه ۸ مدل‌سازی می‌شود. در این رابطه، پارامتر تأخیر نم مایل برای هر خط دید مابین گیرنده و ماهواره و در بازه‌های زمانی مختلف به کمک مشاهدات گیرنده‌های جی‌ان‌اس‌اس قابل محاسبه است. برای محاسبه انکسار نم وردسپهری، که می‌تواند یک پارامتر مهم برای مدل‌سازی مقدار بخار آب باشد، این کمیت با استفاده از یک چندجمله‌ای با متغیرهای طول و عرض جغرافیایی از درجه و مرتبه پایین مدل‌سازی می‌شود. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی پارامتر انکسار نم وردسپهری با استفاده از چندجمله‌ای، برآورد ضرایب مربوط به پارامترهای وردسپهری است. ایده اصلی ارائه شده در این مقاله برای برآورد این پارامترها با دقت بالا، استفاده از مدل $ANFIS$ است. در این شبکه تابع هدفی که بایستی کمینه شود، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{q=1}^Q (SWD^{ANFIS} - SWD^{GPS})^2 \quad (18)$$

در رابطه ۱۸، SWD^{GPS} خروجی واقعی بوده که از مشاهدات جی‌ان‌اس‌اس حاصل می‌شود و SWD^{ANFIS} برای هر خط دید مابین گیرنده و ماهواره به منزله خروجی حاصل از مدل $ANFIS$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین Q نشان‌دهنده تعداد سیگنال‌های قابل‌رؤیت در کل شبکه

مشاهدات ایستگاه رادیوسوند و ایستگاه‌های آزمون صورت می‌گیرد.

۵-۱. برآورد بخار آب مایل با سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار

پس از اینکه مقدار ضرایب چندجمله‌ای در رابطه ۹ با استفاده از شبکه *ANFIS* برآورد شده و صحت و دقت آن در ایستگاه رادیوسوند و ایستگاه‌های آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت، حال می‌توان با ضرایب به دست آمده، مقدار تأخیر نم مایل و همچنین انکسار نم را در هر نقطه از شبکه مورد مطالعه و در هر زمان دلخواه محاسبه کرد. بنابراین برای رابطه ۹ خواهیم داشت:

$$SWD_{ANFIS} = \sum_{j=1}^n (a_{0j} + a_{1j}\Delta\varphi_j + a_{2j}\Delta\lambda_j + a_{3j}\Delta\varphi_j^2 + a_{4j}\Delta\lambda_j^2 + a_{5j}\Delta\varphi_j\Delta\lambda_j) ds_j \quad (22)$$

کلید پارامترهای رابطه ۲۲ قبلاً تعریف شده است (رابطه ۹). با در دست داشتن مقادیر دقیق تأخیر نم مایل در هر زمان و مکان در داخل شبکه مورد مطالعه، با رابطه زیر می‌توان مقدار بخار آب مایل (*SWV*) را برآورد کرد:

$$SWV_{ANFIS} = \prod (T_m) \times SWD_{ANFIS} \quad (23)$$

در رابطه ۲۳، *SWV_{ANFIS}* مقدار بخار آب در راستای مایل است که با استفاده از تابع تصویر مناسب می‌توان آن را به راستای سمت‌الرأسی (*ZWV_{ANFIS}*) تبدیل کرد. خواهیم داشت:

$$\Pi = \left(10^{-6} \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right) \times R_v \times \rho \right)^{-1} \quad (24)$$

در رابطه ۲۴، $R_v = 461.45 (J/KgK)$ نشان‌دهنده ثابت گاز، $K_3 = 3.7 \times 10^5$ ، $K_2' = 17$ بیانگر ثوابت انکسار جوی و $\rho = 1000 (kg/m^3)$ معرف چگالی آب مایع است. در این مقاله رابطه زیر برای محاسبه پارامتر T_m مورد استفاده قرار گرفته است (صادقی و همکاران، ۲۰۱۴):

$$T_m = 75.39 + 0.7103T_0 \quad (25)$$

۱- فراهم کردن مقادیر داده‌های ورودی (مشاهدات طول و عرض جغرافیایی بر روی سیگنال‌ها در لایه‌های ارتفاعی مشخص شده).

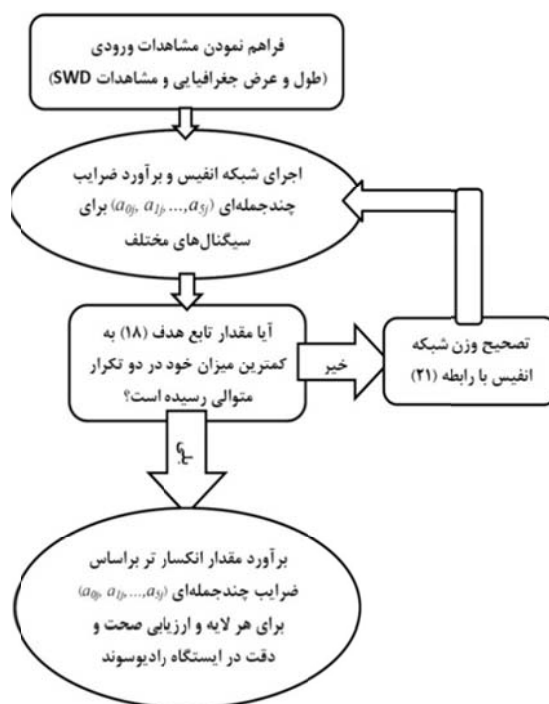
۲- فراهم کردن مشاهدات *SWD* حاصل از مشاهدات جی‌ان‌اس‌اس برای تمامی سیگنال‌ها به‌منزله خروجی مطلوب.

۳- اجرای شبکه بر اساس ورودی‌های مورد نظر و سپس برآورد ضرایب چندجمله‌ای ($a_{0j}, a_{1j}, \dots, a_{5j}$) و متعاقب آن محاسبه مقادیر *SWD* حاصل از شبکه *ANFIS* برای تمامی سیگنال‌ها.

۴- برآورد تابع هدف رابطه (۱۸) برای تمامی سیگنال‌ها و تصحیح وزن‌های شبکه بر اساس رابطه (۲۱).

۵- تکرار مراحل ۳ و ۴ تا حدی که مقدار خطای قابل قبول ($E < 10^{-2}$) در تابع هدف مشخص شود.

روندنا مربوط به چگونگی پردازش مدل پیشنهادی، ارزیابی دقت و صحت نتایج به‌صورت شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲. روندنا مربوط به چگونگی پردازش مدل پیشنهادی، ارزیابی دقت و صحت نتایج.

ارزیابی دقت و صحت نتایج حاصل از روش پیشنهادی ابتدا در مرحله آزمون شبکه و در مرحله بعد با استفاده از

در رابطه ۲۵، T_0 دمای اولیه در محیط مورد بررسی است.

۶. توموگرافی وردسپهر به روش عناصر حجمی

روش توموگرافی وردسپهر با عناصر حجمی یکی از روش‌های معمول و رایج در برآورد انکسار نم و مقدار بخار آب موجود در جو است. این روش به کرات و توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (در مقدمه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره شده است). حل این روش به دلیل کمبود مرتبه ماتریس ضرایب آن نیازمند استفاده از روش‌های پایدارسازی است (اداوی و مشهدی حسینعلی، ۲۰۱۵). تفاوت عمده روش‌های موجود نیز به دلیل استفاده از فنون مختلف پایدارسازی در حل مسئله توموگرافی وردسپهر و برآورد پارامترهای مجهول است. به دلیل استفاده از روش‌های پایدارسازی، پارامترهای برآورد شده دارای بایاس بوده و می‌بایستی مقدار آن مورد بررسی قرار گیرد. با گسسته‌سازی معادله ۷ خواهیم داشت:

$$SWD = G \times N_W \quad (26)$$

در رابطه ۲۶، SWD بردار مشاهدات، N_W بردار مجهولات و G ماتریس ضرایب مسئله است. درایه‌های ماتریس G بر اساس طول سیگنال عبوری از عناصر حجمی ساخته می‌شوند. اگر عناصری خالی باشد درایه متناظر آن در ماتریس، صفر خواهد بود. ماتریس G دارای کمبود مرتبه است. بنابراین، در این مقاله از فن بازسازی جبری همزمان ($SART$) برای حل مسئله توموگرافی وردسپهر به روش عناصر حجمی استفاده شده است (استر و همکاران، ۲۰۰۳). برآورد پارامترهای مجهول در روش $SART$ با رابطه زیر صورت می‌گیرد:

$$m^{k+1} = m^k + \lambda V^{-1} G^T W^{-1} (l - Gm) \quad (27)$$

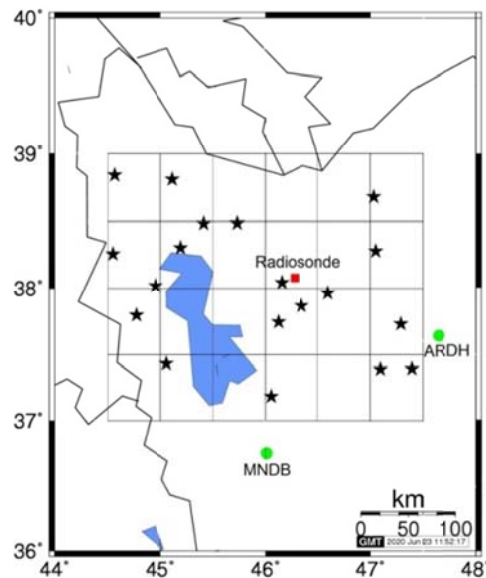
در رابطه ۲۷، m بردار مجهولات، λ پارامتر پایدارسازی و l بردار مشاهدات هستند. در این رابطه V و W ماتریس‌هایی قطری می‌باشند. در این مقاله از روش منحنی

L برای تعیین بهینه مقدار پارامتر پایدارسازی استفاده شده است (استر و همکاران، ۲۰۰۳). این روش یکی از ساده‌ترین روش‌های موجود برای انتخاب بهینه پارامتر پایدارسازی در یک مسئله گسسته معکوس ناپایدار است که در آن تغییرات نرم جواب پایدارسازی شده نسبت به تغییرات نرم بردار باقی‌مانده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۷. منطقه مورد مطالعه، مشاهدات مورد استفاده و

پیش‌پردازش‌ها

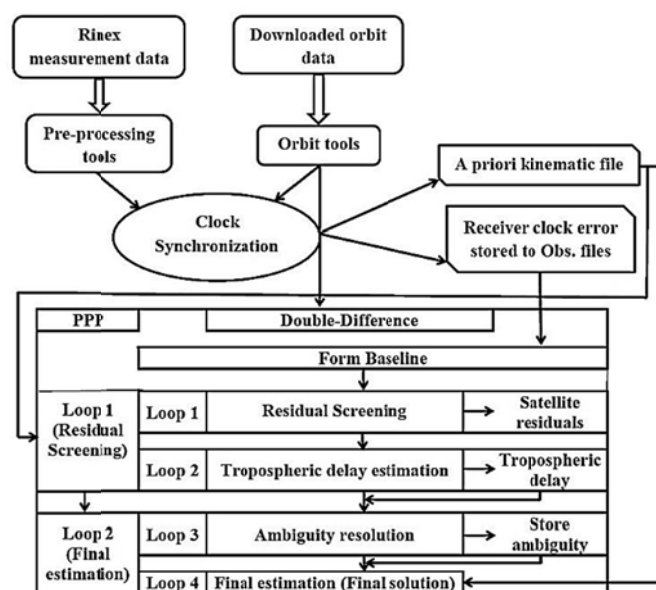
برای بررسی روش پیشنهادی این مقاله یعنی حل مسئله توموگرافی وردسپهر با استفاده از سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار و همچنین ارزیابی دقت و صحت آن، از مشاهدات ۲۰ ایستگاه GPS موجود در منطقه شمال غرب ایران و مربوط به سال ۲۰۱۱ و روزهای ۳۰۰ الی ۳۰۴ (۵ روز مشاهده) استفاده می‌شود. این ایستگاه‌ها توسط سازمان نقشه‌برداری کشور ایران راه‌اندازی شده و کلیه مشاهدات نیز از این سازمان تهیه شده است. ارتفاع این ایستگاه‌ها از ۱۲۸۰ تا ۱۹۵۲ متر متغیر است. همچنین برای غلبه بر خطای چندمسیری، در این ایستگاه‌ها از آنتن چوک رینگ با زاویه ارتفاعی ۱۵ درجه استفاده شده است. برخی از این ایستگاه‌ها مجهز به سنجنده‌های دما، فشار و رطوبت هستند. بر اساس اطلاعات سازمان هواشناسی کشور، مقدار رطوبت نسبی در ۵ روز مورد مطالعه، بیشینه مقدار بوده است. دلیل اصلی انتخاب این منطقه و همچنین این بازه زمانی برای آزمون روش، وجود مجموعه کاملی از مشاهدات ایستگاه‌های GPS و رادیوسوند تبریز ($38.08^{\circ}N$, $46.28^{\circ}E$) است. شکل ۳ نشان‌دهنده چگونگی توزیع ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق به همراه محل ایستگاه رادیوسوند تبریز (مربع قرمز رنگ)، ایستگاه‌های آزمون (دایره‌های سبز رنگ) و همچنین محدوده توموگرافی است.



شکل ۳. ستاره‌ها نشان‌دهنده ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در مدل‌سازی، دایره‌های سبز رنگ ایستگاه‌های آزمون و مربع قرمز رنگ ایستگاه رادیوسوند تبریز است. شبکه‌بندی در شکل محدوده توپوگرافی را نمایش می‌دهد.

آزمون محاسبه شده و با مقدار ZWD حاصل از GPS مقایسه می‌شود. بر اساس این ارزیابی دقت مدل پیشنهادی این مقاله در کناره‌های محدوده توپوگرافی مشخص می‌شود. پس از محاسبه مقدار تأخیر خشک با مدل تجربی ساستامین، مقدار تأخیر کل نیز با استفاده از نرم افزار برنیز محاسبه می‌شود (دش و همکاران، ۲۰۰۷). روندنا پردازش مشاهدات و محاسبه تأخیر کل وردسپهر با نرم‌افزار برنیز در شکل ۴ نمایش داده شده است.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر، دو ایستگاه $ARDH$ ($37.64^{\circ}N$) و $MNDB$ ($36.74^{\circ}N$, $46.00^{\circ}E$) به منزله ایستگاه‌های آزمون در نظر گرفته شده‌اند. این ایستگاه‌ها در شکل ۳ با دایره‌های سبز رنگ نمایش داده شده‌اند. بایستی اشاره شود، که مشاهدات این ایستگاه‌ها در مرحله مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. پس از برآورد ضرایب چندجمله‌ای رابطه ۹ با استفاده از شبکه $ANFIS$ ، مقدار تأخیر نم سمت‌الرأسی (ZWD) در ایستگاه‌های



شکل ۴. روندنا مراحل پردازش مشاهدات در نرم افزار برنیز و محاسبه مقدار تأخیر کل وردسپهری (غفاری رزین و وثوقی، ۲۰۲۰).

حاصل از شبکه $ANFIS$ ، پارامترهای آماری خطای نسبی، جذر خطای مربعی میانگین ($RMSE$)، انحراف معیار و ضریب همبستگی در محل ایستگاه رادیوسوند تبریز و همچنین محل ایستگاه‌های آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرند. جدول ۱، مقادیر ضریب همبستگی را برای مرحله آزمون مدل شبکه $ANFIS$ ($Tomo_{ANFIS}$)، مدل عناصر حجمی ($Tomo_{Voxel}$)، مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی ($Tomo_{ANN}$) و در موقعیت ایستگاه رادیوسوند نشان می‌دهد. هر چقدر مقدار این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد بیانگر همبستگی بالاتر نتایج حاصل از مدل با مشاهدات مستقیم رادیوسوند است.

بر اساس جدول ۱ مقدار ضریب همبستگی برای مدل توموگرافی با شبکه $ANFIS$ نسبت به مدل توموگرافی عناصر حجمی و مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی بالاتر است. ضریب همبستگی به دست آمده برای مدل پیشنهادی این مقاله از ضریب همبستگی ارائه شده توسط غفاری رزین و وثوقی (۲۰۲۰) بالاتر بوده و این بیانگر بهبود در نتایج مدل توموگرافی است. به دلیل استفاده از روش پایدارسازی $SART$ در برآورد N_W با مدل عناصرهای حجمی، وجود بایاس در نتایج حاصل از این روش دور از ذهن نیست. همچنین با توجه به اینکه، شبکه $ANFIS$ ترکیبی از شبکه عصبی و شبکه فازی بوده و چگونگی تعریف وزن‌ها و قواعد اگر-آنگاه بر اساس اصول خاصی است، در نتیجه می‌توان انتظار داشت که نتایج آن نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی دقیق‌تر باشد. جدول ۲ مقادیر شاخص‌های آماری $RMSE$ ، انحراف معیار و خطای نسبی را برای مدل شبکه $ANFIS$ ، عناصر حجمی و مدل شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد. بایستی اشاره شود، که متوسط مقادیر این سه شاخص آماری برای پنج روز مورد نظر این تحقیق و در موقعیت ایستگاه رادیوسوند تبریز در جدول ارائه شده است.

مدل توموگرافی در نظر گرفته شده دارای تفکیک افقی ۴۵ کیلومتر، تفکیک زمانی دو ساعته و تفکیک ارتفاعی ۵۰۰ متر تا ارتفاع ۸ کیلومتری می‌باشد. با توجه به اینکه مشاهدات ورودی برای الگوریتم توموگرافی بر پایه شبکه $ANFIS$ استفاده از مقادیر تأخیر نم مایل (SWD) برای تمامی خط دیدهای مشاهداتی میان گیرنده و ماهواره‌های قابل رؤیت در هر ایستگاه است، بنابراین در وهله اول مقادیر کمیت‌های تأخیر کلی وردسپهر (ZTD) در راستای سمت‌الرأس به کمک نرم افزار برنیز محاسبه شده است. سپس تأخیر سمت‌الرأسی خشک (ZHD) با استفاده از مدل تجربی ساستامین محاسبه شده و از تأخیر سمت‌الرأسی کل، کم می‌شود تا تأخیرهای سمت‌الرأسی نم به دست آید. سرانجام تأخیر سمت‌الرأسی نم با استفاده از تابع تصویر GMF به تأخیرهای نم مایل تبدیل می‌شود. دلیل استفاده از این تابع تصویر، دقت بالا و همچنین موارد استفاده بسیار زیاد در تحقیقات مشابه است. تأخیرهای نم مایل به دست آمده به منزله مشاهده در رابطه ۹ قرار گرفته و مقادیر ضرایب چندجمله‌ای ($a_{0j}, a_{1j}, \dots, a_{5j}$) با شبکه $ANFIS$ برآورد می‌شود.

۷-۱. ارزیابی صحت و دقت مدل پیشنهادی

با توجه به اینکه هدف اصلی این مقاله برآورد مقدار بخار آب مایل (SWW) است، در مرحله اول و پس از محاسبه تأخیرهای نم مایل، مقادیر ضرایب چندجمله‌ای در رابطه ۹ با شبکه $ANFIS$ برآورد می‌شوند. سپس مقدار انکسار نم (N_W) با استفاده از پارامترهای برآورد شده و در محل ایستگاه رادیوسوند محاسبه شده و با مقادیر حاصل از رادیوسوند مقایسه می‌شوند. همچنین در محل ایستگاه‌های آزمون و مجدداً با استفاده از ضرایب چندجمله‌ای برآورد شده توسط شبکه $ANFIS$ ، مقدار تأخیر نم سمت‌الرأسی محاسبه شده و با مقدار حاصل از GPS (ZWD_{GPS}) مقایسه می‌شوند. برای ارزیابی دقت و صحت ZWD و N_W

جدول ۱. مقادیر ضریب همبستگی برای مرحله آزمون و در محل ایستگاه رادیوسوند تبریز برای مدل شبکه ANFIS، مدل عناصر حجمی و مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی.

<i>R. (Radiosonde - ANN)</i>	<i>R. (Radiosonde - ANFIS)</i>	<i>R. (Radiosonde-Voxel)</i>	ضریب همبستگی مرحله آزمون
۰/۹۰۰۶	۰/۹۱۳۱	۰/۸۸۶۳	

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های آماری RMSE، انحراف معیار و خطای نسبی در پارامتر N_W برای موقعیت ایستگاه رادیوسوند تبریز و در زمان‌های مختلف به صورت میانگین از ۵ روز مورد نظر برای مدل‌های شبکه ANFIS، عناصر حجمی و مدل شبکه عصبی مصنوعی.

<i>Relative error (%)</i>			<i>Std. (mm/km)</i>			<i>RMSE (mm/km)</i>			زمان به وقت جهانی (UT)
<i>Voxel</i>	<i>ANN</i>	<i>ANFIS</i>	<i>Voxel</i>	<i>ANN</i>	<i>ANFIS</i>	<i>Voxel</i>	<i>ANN</i>	<i>ANFIS</i>	
۱۰/۴۶	۱۰/۰۵	۹/۸۱	۰/۳۹۰۶	۰/۳۸۹۷	۰/۳۸۶۴	۰/۳۹۵۴	۰/۳۸۶۹	۰/۳۷۴۱	۰۰:۰۰
۱۲/۶۸	۱۲/۱۱	۱۰/۲۲	۰/۴۷۹۵	۰/۴۷۰۳	۰/۴۲۰۹	۰/۴۶۳۱	۰/۴۵۹۷	۰/۴۳۵۷	۰۲:۰۰
۱۳/۹۸	۱۲/۷۱	۱۰/۶۴	۰/۴۲۳۹	۰/۴۱۸۶	۰/۳۹۱۷	۰/۴۴۶۵	۰/۴۲۳۴	۰/۴۰۱۲	۰۴:۰۰
۱۲/۸۶	۱۳/۰۵	۱۱/۵۴	۰/۹۱۲۸	۰/۸۶۵۴	۰/۶۷۵۵	۰/۶۹۸۲	۰/۷۰۱۱	۰/۶۸۵۹	۰۶:۰۰
۱۵/۴۹	۱۳/۴۲	۱۰/۹۷	۰/۸۵۲۸	۰/۷۶۴۱	۰/۷۲۴۶	۰/۸۳۱۹	۰/۷۱۶۴	۰/۷۰۳۹	۰۸:۰۰
۱۲/۷۲	۱۲/۴۳	۱۲/۱۱	۰/۴۳۶۷	۰/۴۲۹۷	۰/۴۱۰۸	۰/۴۱۹۵	۰/۴۱۳۵	۰/۴۰۳۷	۱۰:۰۰
۱۳/۷۹	۱۲/۱۴	۱۰/۵۵	۰/۷۹۸۲	۰/۷۲۴۹	۰/۶۴۲۸	۰/۷۸۹۱	۰/۶۶۲۸	۰/۶۱۳۷	۱۲:۰۰
۱۶/۳۵	۱۴/۹۱	۱۲/۳۶	۰/۶۶۴۱	۰/۵۵۴۲	۰/۵۳۹۱	۰/۶۴۱۹	۰/۵۰۳۹	۰/۴۹۶۷	۱۴:۰۰
۱۵/۲۷	۱۳/۴۹	۱۲/۲۸	۰/۹۰۲۰	۰/۸۱۷۳	۰/۶۵۴۱	۰/۸۷۲۸	۰/۷۱۲۴	۰/۶۷۵۴	۱۶:۰۰
۱۷/۹۵	۱۵/۶۷	۱۲/۷۶	۱/۲۵۹۴	۰/۸۸۴۹	۱/۰۳۴۱	۱/۲۳۴۶	۱/۰۲۸۱	۰/۹۷۱۸	۱۸:۰۰
۸/۷۱	۸/۵۵	۸/۳۱	۰/۴۰۸۲	۰/۴۰۵۱	۰/۳۹۸۲	۰/۳۸۹۸	۰/۳۸۶۴	۰/۳۷۹۱	۲۰:۰۰
۱۴/۳۷	۱۲/۵۲	۱۱/۴۶	۰/۹۴۶۸	۰/۷۹۵۲	۰/۶۹۴۸	۰/۸۴۲۹	۰/۶۷۵۹	۰/۶۴۲۶	۲۲:۰۰
۱۳/۷۲	۱۲/۵۸	۱۱/۰۸	۰/۷۰۰۶	۰/۶۲۶۶	۰/۵۸۱۰	۰/۶۷۰	۰/۵۸۹۲	۰/۵۶۵۳	میانگین

مصنوعی و در هر سه شاخص آماری، مدل ANFIS دقیق‌تر از مدل‌های دیگر (عناصر حجمی و شبکه عصبی مصنوعی) مقدار N_W را برآورد کرده است. بر اساس مقادیر میانگین خطای نسبی محاسبه شده برای هر سه روش، مدل ANFIS تا ۸۹ درصد، مدل عناصر حجمی تا ۸۶ درصد و مدل شبکه عصبی مصنوعی تا ۸۷ درصد توانایی مدل‌سازی مقدار انکسار نم را دارند. نتایج حاصل از مدل جدید ارائه شده در این مقاله از لحاظ مقدار دقت در مدل‌سازی انکسار نم، از مدل‌های ارائه شده توسط اداوی و مشهدی حسینی (۲۰۱۵) و غفاری رزین و وثوقی (۲۰۲۰) بالاتر است. برای مشاهدات ایستگاه رادیوسوند، خطای سیستماتیک به دلیل واسنجی نامناسب دستگاه قبل از استفاده و همچنین شرایط نامساعد وضع

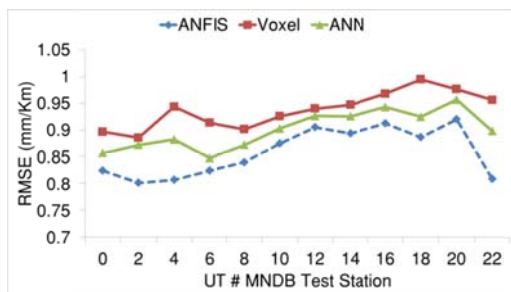
بر اساس نتایج حاصل از جدول ۲ مقادیر میانگین شاخص‌های آماری RMSE، انحراف معیار و خطای نسبی برای مدل ارائه شده در این تحقیق به ترتیب برابر با ۰/۵۶۵۳، ۰/۵۸۱۰ میلی‌متر بر کیلومتر و ۱۱/۰۸ درصد حاصل شده است. همین سه شاخص برای مدل توموگرافی عناصر حجمی به ترتیب برابر با ۰/۶۷۰، ۰/۷۰۶ میلی‌متر بر کیلومتر و ۱۳/۷۲ درصد به دست آمده است. برای مدل شبکه عصبی مصنوعی مقدار میانگین سه شاخص RMSE، انحراف معیار و خطای نسبی در ۵ روز مورد بررسی به ترتیب برابر با ۰/۵۸۹۲، ۰/۶۲۶۶ میلی‌متر بر کیلومتر و ۱۲/۵۸ درصد محاسبه شده است. در مقایسه صورت گرفته مابین روش پیشنهادی این مقاله، مدل توموگرافی عناصر حجمی و مدل شبکه‌های عصبی

هوایی می‌تواند بر صحت نتایج آن تأثیرگذار باشد. همچنین در روش *ANFIS* و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، عمده‌ترین دلیل ایجاد خطا در نتایج، عدم انتخاب صحیح مقدار پارامتر μ (نرخ همگرایی) می‌باشد. برای مدل عناصر حجمی، به دلیل کمبود مرتبه ماتریس ضرایب و استفاده از روش‌های پایدارسازی برای برآورد پارامترها، بایاس قابل توجه در نتایج این روش تولید می‌شود. پس از ارزیابی سه مدل *ANFIS*، عناصر حجمی و مدل شبکه عصبی مصنوعی در برآورد مقدار انکسار نم در محل ایستگاه رادیوسوند تبریز، مقادیر تأخیر نم سمت‌الرأسی در محل دو ایستگاه آزمون با هر سه مدل محاسبه شده و با مقدار حاصل از *GPS* مقایسه می‌شوند. هدف از این مقایسه بررسی و ارزیابی دقت و صحت مدل در کناره‌های محدوده مدل‌سازی است. شکل ۵ نمودار شاخص خطای *RMSE* را برای هر سه مدل و در موقعیت ایستگاه‌های آزمون *MNDB* و *ARDH* نمایش می‌دهد.

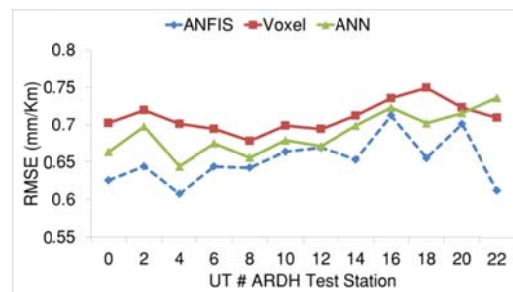
مطابق با شکل ۵ میانگین خطای *RMSE* برای مدل *ANFIS*، در ۵ روز مورد مطالعه و در دو ایستگاه آزمون *ARDH* و *MNDB* به ترتیب برابر با ۰/۶۵۲ و ۰/۸۵۸ میلی‌متر بر کیلومتر محاسبه شده است. برای مدل عناصر حجمی و در همین دو ایستگاه آزمون، مقدار *RMSE* به ترتیب برابر با ۰/۷۰۱ و ۰/۹۱۰ میلی‌متر بر کیلومتر حاصل شده است. در این دو ایستگاه آزمون و برای مدل شبکه عصبی مصنوعی، مقدار میانگین خطای *RMSE* در ۵ روز مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۶۸۸ و ۰/۹۰۱ میلی‌متر

۷-۲. ترسیم نمایه‌های افقی بخار آب مایل با الگوریتم پیشنهادی

پس از ارزیابی دقت و صحت مدل *ANFIS* در موقعیت ایستگاه رادیوسوند تبریز و همچنین ایستگاه‌های آزمون، حال می‌توان با استفاده از مدل پیشنهادی این مقاله، مقادیر تغییرات افقی بخار آب مایل را در زمان‌های مختلف ترسیم کرده و مورد ارزیابی قرار داد. شکل ۶ چگونگی تغییرات افقی مقادیر بخار آب مایل (*SWV*) را در زمان‌های ۲، ۵، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷ و ۲۰ به وقت جهانی و در پنج روز مورد مطالعه (*DOY # 300, 301, 302, 303, 304*) نمایش می‌دهد. بایستی اشاره شود که عدم ترسیم تمامی ساعات شبانه‌روز برای اختصار می‌باشد.

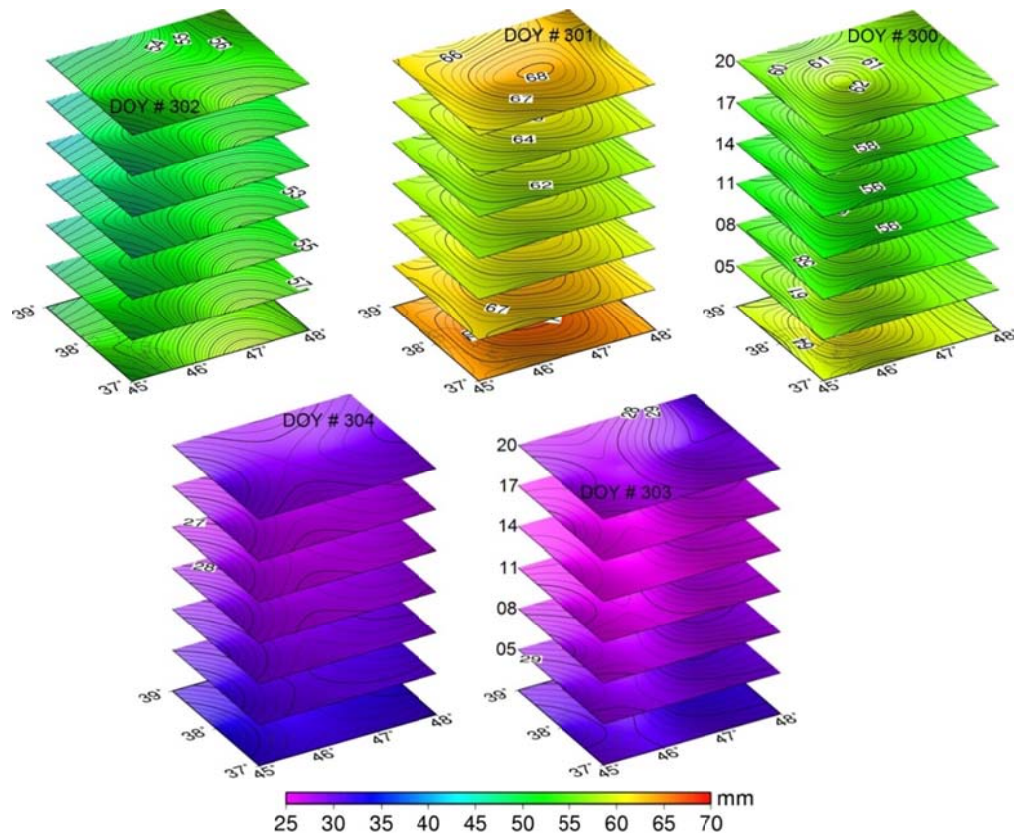


(ب)



(الف)

شکل ۵. چگونگی تغییرات شاخص خطای *RMSE* در موقعیت ایستگاه‌های آزمون *ARDH* (الف) و *MNDB* (ب)، برای سه مدل *ANFIS*، عناصر حجمی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و به صورت میانگین از ۵ روز مورد مطالعه.



شکل ۶. چگونگی تغییرات افقی مقادیر بخار آب مایل حاصل از روش پیشنهادی این مقاله در زمان‌های مختلف شبانه‌روز و همچنین پنج روز ۳۰۰، ۳۰۱، ۳۰۲، ۳۰۳ و ۳۰۴ (DOY # day of year) مورد مطالعه.

است. همچنین با توجه به اینکه رطوبت نسبی در ۵ روز مورد مطالعه در حالت بیشینه مقدار بوده است، در نتیجه بخار آب مایل در اشکال ۶ نیز مقادیر عددی نسبتاً بالایی دارد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله کارایی استفاده از سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS) برای حل مسئله توموگرافی وردسپهر و متعاقب آن برآورد مقدار بخار آب مایل (SWV) مورد بررسی قرار گرفت. لایه وردسپهر به لایه‌های ارتفاعی مجزا تقسیم شد و تغییرات انکسار نم به صورت ارتفاعی ثابت و در حالت افقی با استفاده از یک چندجمله‌ای با ۶ ضریب بیان شد. در این مقاله ایده ارائه شده، استفاده از شبکه ANFIS برای برآورد این ضرایب است. در حقیقت نوآوری اصلی این مقاله در حل مسئله توموگرافی وردسپهر با استفاده از ANFIS و سپس برآورد

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۶، در طول یک روز و در ساعات مختلف شبانه‌روز، مقادیر بخار آب مایل دارای تغییرات فراوانی است. الگوی کلی که تقریباً در هر پنج روز مورد بررسی دیده می‌شود این است که مقادیر بخار آب در ساعات نزدیک صبح (ساعت ۲ الی ۵) دارای بیشترین مقدار و در ساعات ظهر و کمی بعدازظهر (ساعت ۱۱ الی ۱۷)، دارای کمترین مقدار است. البته تغییرات بخار آب دارای الگوی خاصی نیست و به عوامل مختلفی از جمله شرایط وضع هوا و همچنین ارتفاع منطقه بستگی دارد. بر اساس اطلاعات حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه و بازه زمانی مشاهدات مورد بررسی، در روز ۳۰۱ مقدار بارش سطحی در منطقه و مخصوصاً در محدوده شهرستان تبریز نسبت به روزهای قبل و بعد زیادتر بوده است. نتیجه به‌دست آمده در شکل ۶ و روز ۳۰۱ هم نشان می‌دهد که مقدار بخار آب مایل نسبت به روزهای قبل و بعد از آن دارای تغییرات زیادتری

صورت گرفته، حاکی از آن بود، که مدل *ANFIS* نسبت به مدل عناصر حجمی و مدل شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتری در مدل‌سازی مؤلفه نم انکسار وردسپهری و همچنین مقدار بخار آب مایل را دارد.

تشکر و قدردانی

نویسنده مقاله از سازمان نقشه‌برداری کشور (*NCC*) برای در اختیار قرار دادن مشاهدات ایستگاه‌های شبکه آذربایجان برای تاریخ‌های مورد درخواست تشکر و قدردانی می‌کند. همچنین از سازمان هواشناسی کشور برای در اختیار گذاشتن دیتاهای ایستگاه رادیوسوند تبریز تشکر می‌کند.

مراجع

موسوی، ز.، خرمی، ف.، نانکلی، ح.ر.، جمور، یحیی.، ۱۳۸۶، تعیین مقدار بخار آب موجود در جو با استفاده از تخمین تأخیر وردسپهری سیگنال‌های جی‌پی‌اس در شبکه ژئودینامیک سراسری ایران، همایش ژئوماتیک ۱۳۸۶.

- Adavi, Z. and Mashhadi hossainali, M., 2014, 4D-Tomographic Reconstruction of the Tropospheric Wet Refractivity Using the Concept of Virtual Reference Station, Case Study: North West of Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 126 (3-4), 193-205.
- Adavi, Z. and Mashhadi hossainali, M., 2015, 4D-tomographic reconstruction of water vapor using the hybrid regularization technique with application to the North West of Iran. *Advances in Space Research* 55 (7), 1845-1854.
- Aster, R., Borchers, B. and Thurber, C., 2003, *Parameter estimation and inverse problems*, vol 90. Elsevier Academic Press, USA.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C. and Ware, R.H., 1992, GPS metrology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J Geophys Res* 97(D14), 15787-15801.
- Benevides, P., Catalao, J., Nico, G. and Miranda, P., 2018, 4D wet refractivity estimation in the atmosphere using GNSS tomography initialized by radiosonde and AIRS measurements: results from a 1-week intensive campaign. *GPS Solutions* 91(2018): 22:91.

مقدار بخار آب مایل در هر نقطه و زمان از شبکه مورد بررسی است. ارزیابی مدل پیشنهادی این مقاله با مشاهدات ایستگاه رادیوسوند تبریز، مدل توموگرافی عناصر حجمی، مدل توموگرافی با شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین در ایستگاه‌های آزمون صورت گرفت. شاخص‌های آماری مختلفی برای ارزیابی دقت و صحت مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفتند. در محل ایستگاه رادیوسوند تبریز، مقادیر ضریب همبستگی برای سه مدل *ANFIS*، عناصر حجمی و مدل شبکه عصبی به ترتیب برابر با ۰/۹۱۳۱، ۰/۸۸۶۳ و ۰/۹۰۰۶ محاسبه شدند. همچنین میانگین خطای *RMSE* در ایستگاه‌های آزمون *ARDH* و *MNDB* برای مدل‌های *ANFIS*، عناصرهای حجمی و مدل شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۷۵۵، ۰/۸۲۳ و ۰/۷۹۴ میلی‌متر بر کیلومتر به دست آمدند. آنالیزهای آماری نشان داد که دقت هر سه مدل در ایستگاه آزمون *ARDH* بیشتر از ایستگاه آزمون *MNDB* است. در مورد ایستگاه آزمون *MNDB* پراکندگی ایستگاه‌های *GPS* در اطراف آن مناسب نبوده و طبیعتاً دقت در این ایستگاه پایین‌تر از ایستگاه آزمون *ARDH* است. بررسی و تحلیل‌های آماری

- Bosy, J., Rohm, W. and Siemy, J., 2010, The concept of the near real time atmosphere model based on the GPS and the meteorological data from the ASG-EUPOS reference stations. *Acta Geodyn Geomater* 7:253-261.
- Chen, B. and Liu, Z., 2014, Voxel-optimized regional water vapor tomography and comparison with radiosonde and numerical weather model. *Journal of Geodesy* 88(7): 691-703.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, H., Rogers, E.E. and Elgered, G., 1985, *Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length*. *Radio Sci* 20(6), 1593-1607.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. and Meindl, M., 2007, *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern, Bern.
- Emardson, T.R., Elgered, G. and Johansson, J.M., 1998, Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers. *J Geophys Res* 103:1807-1820.
- Ghaffari Razin, M.R. and Voosoghi, B., 2020, Estimation of tropospheric wet refractivity using tomography method and artificial neural networks

- in Iranian case study. *GPS Solutions* 24(3), 1-14.
- Haji Aghajany, S. and Amerian, Y., 2017a, three dimensional ray tracing technique for tropospheric water vapor tomography using GPS measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 164 (2017), 81-88.
- Haji Aghajany, S. and Amerian, Y., 2017b, Comparing the Efficiency of Radiosonde and ERA-Interim Meteorological Data in Precise Point Positioning Tropospheric Delay Correction Using Three Dimensional Ray Tracing Method. *JGST*; 7 (3), 127-138.
- Haji Aghajany, S., Amerian, Y. and Verhagen, S., 2020, B-spline function-based approach for GPS tropospheric tomography. *GPS Solutions* 24(3), 1-12.
- Jang, J.S., 1993, ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 23(3), 665-685. 10.1109/21.256541.
- Mars, P., Chen, J.R. and Nambiar, R., 1996, *Learning Algorithms: Theory and Applications in Signal Processing, Control and Communications*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Rahimi, H., Nafisi, V. and Asgari, J., 2013, Tropospheric Delay estimation using constrained ray-tracing method based on surface meteorological parameters and Numerical Weather Models. *JGST*, 3 (2), 15-26.
- Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy, Foundations, Methods and Application*, Walter de Gruyter, Berlin and New York, 531.
- Saastamoinen, J., 1973, Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II: refraction corrections in satellite geodesy. *Bull.Geod*, 107, 13-34.
- Skone, S. and Hoyle, V., 2005, Troposphere Modeling in a Regional GPS Network, *Journal of Global Positioning Systems*, 4(1-2), 230-239.
- Sadeghi, E., Mashhadi Hossainali, M. and Etemadfar, H., 2014, Determining precipitable water in the atmosphere of Iran based on GPS zenith tropospheric delays. *Annals of geophysics* 57.
- Wilgan, K., Hurter, F., Geiger, A., Rohm, W. and Bosy, J., 2017, Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-squares collocation of meteorological and GNSS data. *Journal of Geodesy* 91(2), 117-134.
- Yao, Y. and Zhao, Q., 2016, A novel optimized approach of voxel division for water vapor tomography. *Meteorol. Atmos. Phys.* **2016**, 129, 57-70.
- Zhao, Q., Zhang, K., Yao, Y. and Li, X., 2019, A new troposphere tomography algorithm with a truncation factor model (TFM) for GNSS networks. *GPS Solutions* 23(3), 23:64.
- Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy sets. *Information and control*. 8, 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

Efficiency of the adaptive neuro-fuzzy inference system in tropospheric slant water vapor modeling

Ghaffari Razin, M. R. *

Assistant Professor, Department of Geoscience Engineering, Faculty of surveying, Arak University of Technology, Arak, Iran

(Received: 24 Nov 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

Summary

The passage of satellite signals through the atmosphere with variable nature of its troposphere will have a significant delay in the movement of these signals. This effect is commonly known as tropospheric delay. It can be divided into wet and dry components. The dry component is usually modeled using devices that measure air pressure. Unlike the dry component, the wet component of tropospheric refraction cannot be modeled using air pressure measuring devices. This component depends on the water vapor (WV) and moisture content of the troposphere. The WV is one of the key parameters in climate system analysis and a major factor in atmospheric events. Using the observations of local and regional GNSS networks, it is possible to estimate the slant tropospheric delay (STD) and subsequently, the slant wet delay (SWD) for each line of sight between the receiver and the satellite. The SWD observations are used to model horizontal and vertical WV variations in the upper atmosphere of the study network. This is done with a tomography technique. In tomography, the horizontal variations of tropospheric wet refractivity are modeled with the polynomial in degree and rank of 2 with latitude and longitude as variables. Also, altitude variations are modeled in the form of discrete layers with constant heights.

The main innovation of this paper is in estimating the tropospheric parameters for each line of sight between the receiver and the satellite by the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). The SWD obtained from GPS observations for the different signals at each station is compared with the SWD generated by the ANFIS ($SWD_{GPS} - SWD_{ANFIS}$). The square of the difference between these two values is introduced as the cost function in the ANFIS. By calculating the value of the cost function at each step, the weights associated with the ANFIS network are corrected by the back-propagation (BP) method. In the next step, using the estimated wet refractivity, the value of slant water vapor (SWV) is calculated. To evaluate, GPS observations from 27-31 October 2011 and Tabriz radiosonde observations are used. For a more detailed evaluation, 2 test stations are selected and ANFIS zenith wet delays (ZWD_{ANFIS}) are compared with the ZWD_{GPS} . Observations of test stations are not used in modeling step. In order to further examine the accuracy of the proposed method, the results of this study have been compared with the results of voxel-based tomography ($Tomo_{Voxel}$) method and troposphere tomography using artificial neural network ($Tomo_{ANN}$). Also, relative error, mean square error (RMSE), standard deviation, and correlation coefficient were used to evaluate the results. At the Tabriz Radiosonde station, the correlation coefficient for the ANFIS, $Tomo_{Voxel}$ and $Tomo_{ANN}$ have been calculated as 0.9131, 0.8863 and 0.9006, respectively. The minimum relative error for the $Tomo_{ANFIS}$, $Tomo_{ANN}$ and $Tomo_{Voxel}$ are 8.31%, 8.55% and 8.71%, respectively. Also, the maximum RMSE for three models is 0.9718, 1.0281 and 1.2346 mm/km, respectively. The results of this paper indicate the very high capability of the $Tomo_{ANFIS}$ model in showing the temporal and spatial variations of SWV. This method can be used to discuss the behavior of the atmosphere in real time and near to real time applications.

Keywords: Tropospheric wet component, Tropospheric dry component, ANFIS, ANN, Tropospheric tomography, GPS.

* Corresponding author:

mr.ghafari@arakut.ac.ir