

نرمالیزاسیون رادیومتریکی اتوماتیک تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مبتنی بر تبدیل IR-MAD و شبکه‌های عصبی مصنوعی

آرمین مقیمی^{۱*}، حمید عبادی^۲، وحید صادقی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
armin.moghimi@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ebadi@kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
vahid.sadeghi.1985@gmail.com

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۳)

چکیده

نرمالیزاسیون رادیومتریکی نسبی، اغلب در آنالیزهای تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، خصوصاً در آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق ضمن بررسی تبدیل IR-MAD، تکنیک جدیدی مبتنی بر تبدیل IR-MAD و شبکه‌های عصبی مصنوعی توسعه داده شده است. تکنیک پیشنهادی بر روی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه لندست تی‌ام متعلق به سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۱۰ شهر تبریز، پیاده‌سازی شده است. استفاده از ترکیب خطی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، انتقال این تصاویر به فضای دیگر و تکراری بودن فرآیند تبدیل IR-MAD باعث شده که این تبدیل به عنوان روشی مستقل از نویز آماری و شرایط اتمسفری در جهت شناسایی تغییرات و انتخاب نقاط کنترل رادیومتریکی در این تحقیق بکار رود. همچنین قابلیت و انعطاف بالای شبکه عصبی مصنوعی در تقریب توابع غیرخطی و خطی پیوسته در فضای ترکیبی باعث شد که از این شبکه‌ها در مدلسازی رابطه بین نقاط کنترل رادیومتریکی در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه استفاده گردد. معیارهای ارزیابی بکار رفته در این تحقیق، شامل میانگین خطای کمترین مربعات و آزمون‌های آماری t و F می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی موجب افزایش دقت و عملکرد نرمالیزاسیون رادیومتریکی نسبی شده است. روش توسعه داده شده در این تحقیق از نظر میانگین خطای کمترین مربعات در تمامی باندهای طیفی نسبت به روش IR-MAD و داده‌های خام بترتیب ۰/۱۱ و ۸/۱۳ درصد افزایش دقت داشته است.

واژگان کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، نرمالیزاسیون رادیومتریکی نسبی، تبدیل IR-MAD، شبکه‌های عصبی مصنوعی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

مناسبی برای تصحیح رادیومتریکی در تحقیق حاضر می- باشد. فرض اولیه در جهت نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی بیانگر این مطلب می‌باشد که ارتباط بین رادیانس ثبت شده توسط سنسور در دو زمان مختلف از یک منطقه ثابت می‌تواند به وسیله یک تابع خطی تخمین زده شود [۷-۱۲]. روش‌های متعددی به منظور نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی تصاویر ماهواره‌ای بر مبنای این فرض توسعه داده شده است. به طور کلی روش‌های نرمالیزاسیون نسبی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که اختلاف آن‌ها در استفاده از نقاط کنترل رادیومتریکی^{۱۰} می‌باشد. روش‌هایی که بدون در نظر گرفتن نقاط کنترل رادیومتریکی عمل می‌کنند شامل تطابق هیستوگرام^{۱۱}، تصحیح Haze^{۱۲}، میانگین و انحراف معیار^{۱۳}، بیشترین و کمترین^{۱۴} و رگرسیون ساده^{۱۵} می‌باشند و روش‌هایی که بر مبنای نقاط کنترل رادیومتریکی عمل می‌کنند شامل روش‌های DB^{۱۶} و PIF^{۱۷}، رگرسیون خطی قطعه‌ای با استفاده از پیکسل‌های تغییرنیافته^{۱۸}، تبدیل شناسایی تغییرات چند متغیره (MAD)^{۱۹} و تبدیل شناسایی تغییرات چند متغیره وزن دار (IR-MAD)^{۲۰} می‌باشند. با توجه به مطالعاتی که در زمینه تصحیح رادیومتریکی نسبی در سراسر دنیا صورت گرفته است، انتظارات معقول از یک روش نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی این است که بتواند شرایط مختلف موثر در تصویربرداری را در نظر گرفته و مدل کند. در روش‌هایی که با نادیده گرفتن نقاط کنترل رادیومتریکی جهت نرمالیزاسیون رادیومتریکی عمل می- کنند از درجات خاکستری تمامی پیکسل‌های هر باند طیفی استفاده می‌شود و به طور ضمنی فرض می‌شود که تغییرات واقعی قابل ملاحظه‌ای در فاصله اخذ تصویر رخ نداده است. به همین سبب پیکسل‌هایی که تغییرات شدیدی نسبت به یکدیگر در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه

جهت آشکارسازی تغییرات^۱ واقعی صورت گرفته در منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه^۲ لازم است که تصحیح رادیومتریکی بر روی آن‌ها صورت گیرد [۲۳]. تعیین انعکاس^۳ سطح زمین از تصاویر ماهواره‌ای نیازمند تصحیحات اتمسفری و پارامترهای اتمسفری در لحظه اخذ تصویر می‌باشد [۱]. به طور کلی تصحیح رادیومتریک به دو روش مطلق^۴ و نسبی^۵ صورت می‌گیرد [۲].

روش مطلق نیازمند استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی در لحظه‌ای اخذ تصاویر از منطقه مورد نظر است. این اندازه‌گیری‌ها معمولاً شامل شرایط اتمسفر (انتقال تابشی^۶)، انحراف و شیب^۷ سنجنده تابندگی خورشید^۸ و زاویه زینتی خورشید در لحظه اخذ تصویر توسط سنجنده می‌باشند [۳-۵]. براساس این پارامترها تکنیک‌های زیادی جهت تصحیح رادیومتریک مطلق توسعه داده شده است. لازم بذکر است که اندازه‌گیری این پارامترها نه تنها پر- هزینه است، بلکه در مواقعی که از تصاویر آرشیو ماهواره‌ای برای آنالیز تغییرات استفاده می‌شود غیر عملی می‌باشند [۶]. به همین دلیل اکثر تحقیقات، در زمینه نرمالیزاسیون تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه در زمینه روش‌های نسبی صورت گرفته است. تصحیح رادیومتریک نسبی که به نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی^۹ معروف است، نسبت به روش مطلق برتری‌هایی دارد، چرا که نیازی به داده‌های اتمسفری سایت، در لحظه‌ای اخذ تصویر ندارد و با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، ارتباط بین دو تصویر را در جهت نرمالیزاسیون رادیومتریکی برقرار می‌کند. همچنین بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از روش‌های نرمالیزاسیون رادیومتریک مطلق می‌باشند [۲۲].

با توجه به اینکه روشی که در این تحقیق ارائه شده بر پایه آنالیز تصاویر چندزمانه است، لذا روش نسبی روش

۱۰ Radiometric Control points
 ۱۱ Histogram matching
 ۱۲ Haze Correction
 ۱۳ Mean-Standard deviation normalization
 ۱۴ Minimum-Maximum normalization
 ۱۵ Simple Regression
 ۱۶ Dark set-Bright set
 ۱۷ Pseudo Invariant Features
 ۱۸ Regression using Unchanged Pixels
 ۱۹ Multivariate Alteration Detection
 ۲۰ Iteratively reweighted multivariate alteration detection

۱ Change Detection
 ۲ Multitemporal Satellite Images
 ۳ Radiance
 ۴ Absolute radiometric correction
 ۵ Relative radiometric correction
 ۶ Radiated Transfer
 ۷ Gain and Offset
 ۸ Solar Irradiance
 ۹ RRN

HRV بخشی از کشور کنیا ارائه کرد و به مقایسه روش رگرسیون معمولی با روش کمترین مربعات و رگرسیون متعامد پرداخت [۱۳]. Schmidt و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به کالیبراسیون داخلی یازده تصویر ماهواره‌ای چندزمانه با قدرت تفکیک بالا از ماهواره NOAA از منطقه‌ای در استرالیا پرداختند و به مقایسه عملکرد و اثر بخشی روش تبدیل MAD با دیگر روش‌ها و بحث و تاثیر نسبی آنها در حالت کلی و کالیبراسیون بلند مدت در سری زمانی پرداخته و به این نتیجه رسیده است که تبدیل MAD دارای عملکرد بهتری در کالیبراسیون تصاویر با قدرت تفکیک بالا دارد [۱۴].

Schroeder و همکارانش در سال ۲۰۰۶ در پی آشکارسازی و توصیف تغییرات مربوط به جنگل‌ها در منطقه اروگان از پنج روش تصحیح رادیومتریک که (دو روش مطلق و سه روش نسبی) با استفاده از مجموعه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه لندست + ETM (۱۹ تصویر) طی ۲۰ سال پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تبدیل MAD در نرمالیزاسیون تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد [۱۵].

Nielsen و همکارانش در سال ۲۰۰۷ تبدیل MAD را به وسیله وزن دهی طی یک فرآیند تکراری به عنوان تبدیل IR-MAD معرفی کردند و در جهت آشکارسازی تغییرات تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای SPOT مربوط به یک منطقه کشاورزی در کنیا و همچنین تصاویر هوایی چندزمانه HyMap مربوط به یک منطقه روستایی کوچک در منطقه جنوبی آلمان بکار بردند و پیش‌زمینه بهتری از مشاهدات تغییرناپذیر نسبت به زمان ارائه کردند و روش تبدیل IR-MAD را به عنوان روشی که دارای دقت و قابلیت انعطاف بیشتری در تعیین مناطق تغییرنیافته نسبت به زمان است را معرفی کردند [۱۶].

همچنین Canty و Nielsen در سال ۲۰۰۷ از روش تبدیل IR-MAD برای نرمالیزاسیون رادیومتریک اتوماتیک تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه لندست + ETM منطقه‌ای از غرب مراکش و شهر مونیخ از آلمان و ASTER منطقه نزدیک اصفهان استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از تبدیل IR-MAD در تصحیح رادیومتریک دارای قابلیت بالایی در پیدا کردن پیکسل‌های تغییر نیافته می‌باشد [۱]. Broncano و همکارانش در سال ۲۰۱۰ به مقایسه روش‌های نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی با استفاده از

دارند نتایج نرمالیزاسیون را بشدت تخریب می‌کنند. محدودیت دیگر موجود در این روش‌ها خطی در نظر گرفتن ارتباط بین تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه می‌باشد. در مقابل در روش‌هایی که از نقاط کنترل رادیومتریکی استفاده می‌کنند تخریب نتایج نرمالیزاسیون به دلیل تغییرات واقعی قابل ملاحظه در فاصله اخذ تصاویر وجود ندارد ولی فرض خطی بودن ارتباط بین نقاط کنترل رادیومتریکی در تصاویر چندزمانه وجود دارد. در این تحقیق از روش تبدیل IR-MAD به عنوان یک روش کارآمد در آشکارسازی تغییرات تصاویر ماهواره‌ای چند-زمانه استفاده شد. در این روش پیکسل‌هایی که به احتمال ۹۵ درصد در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه تغییر نیافته‌اند مشخص می‌شوند. سپس از آن‌ها به عنوان نقاط کنترل رادیومتریکی استفاده شد و به جای استفاده از رگرسیون خطی جهت تخمین ارتباط بین نقاط کنترل رادیومتریکی در تصاویر چندزمانه، در این روش از شبکه عصبی مصنوعی^۱ جهت برآورد این ارتباط استفاده شد. معمولاً ارتباط بین درجات خاکستری پیکسل‌های تغییرنیافته در تصویر هدف و مرجع از مدل خطی تبعیت نمی‌کند و این فرض تنها به خاطر ساده کردن مرحله مدلسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین یک روش نرمالیزاسیون بهینه باید بتواند از مدل‌های خطی و غیر خطی نیز برای مدلسازی بهینه اثرات ناشی از کالیبراسیون سنجنده و اتمسفر و غیره استفاده کند.

۱-۱- پیشینه تحقیق

در زمینه استفاده از تبدیل MAD جهت نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی، تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در ادامه به بررسی برخی از آن‌ها می‌پردازیم. Canty و همکارانش در سال ۲۰۰۴ یک روش کاملاً اتوماتیک در جهت تعیین مشاهدات مستقل از زمان براساس تبدیل MAD که در سال ۱۹۹۸ توسط Nielsen و همکارانش معرفی شده در جهت تصحیح رادیومتریک مربوط به تصاویر چندزمانه ماهواره‌های لندست TM بخشی از ایالت نودا و لندست + ETM بخشی از کشور مراکش و SPOT

^۱ Artificial neural network

تصاویر هوایی چندزمانه WILD RC30 از منطقه تولدو پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش تبدیل IR-MAD در تصحیح رادیومتریک دارای دقت بهتری نسبت به روش-های دیگر می‌باشد [۱۷]. Wenjing و همکارانش در سال ۲۰۱۱ در پی آشکارسازی تغییرات در جهت نظارت بر بازسازی مناطق شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چند-زمانه از ماهواره‌های QuickBird و GeoEye منطقه باندآچه در شمال سوماترا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش IR-MAD دارای بهترین عملکرد از نظر معیار ROC نسبت به سایر روش‌ها بود [۱۸]. در تمامی تحقیقات مذکور ارتباط بین تصاویر هوایی و ماهواره‌ای چندزمانه خطی فرض شده است در حالیکه این ارتباط در اکثر موارد خطی نمی-باشد. صادقی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ روشی مبتنی بر استفاده از شبکه‌های عصبی و مصنوعی در جهت نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مربوط به جزیره شیخ اسلامی معرفی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از شبکه‌های عصبی و مصنوعی برای مدلسازی رابطه بین تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، باعث افزایش دقت و قابلیت انعطاف در جهت نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه می‌شود [۲۲]. به همین دلیل در این تحقیق از روش تبدیل IR-MAD در جهت تولید نقاط کنترل رادیومتریک در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه استفاده شد و سپس در جهت مدلسازی ارتباط بین این تصاویر، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده گردید.

روش پیشنهادی بدلیل استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر به مدلسازی خطی و غیر خطی اثرات ناشی از کالیبراسیون سنجنده و اتمسفر و غیره بین تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه است. در ادامه در بخش بعدی تبدیل MAD و IR-MAD به عنوان روشی برای تعیین پیکسل-های تغییرنیافته معرفی شده و جزئیات آن تشریح می‌شود. سپس در بخش سوم جزئیات روش پیشنهادی بیان شده و در بخش چهارم نیز نتایج پیاده‌سازی و ارزیابی آن بیان شده و مورد بحث قرار می‌گیرد. و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان می‌شود.

۲- روش تبدیل MAD و IR-MAD

روش تبدیل MAD به عنوان یک روش کارآمد در آشکارسازی تغییرات تصاویر ماهواره‌ای و هوایی چندزمانه

به کار می‌رود و کاملاً مستقل از تبدیل خطی بین پیکسل-های متناظر در این تصاویر است [۱۳]. تبدیل MAD به عنوان یک ایده و روش نو در آنالیز تغییرات تصاویر ماهواره‌ای و هوایی چندزمانه توسط Nielsen در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است [۱۹]. هدف از این روش ورود داده‌های هر یک از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه به تبدیلی است که بتواند حداکثر واریانس هر باند طیفی را در تصویر اختلاف متناظر با آن باند طیفی ظاهر کند [۱]. این تبدیل، مجموعه‌ای از تصاویر اختلاف را که دو به دو با یکدیگر متعامد، (عضوهای تبدیل MAD) هستند، متناظر با باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای ورودی تولید می‌کند [۱۳]. همچنین این تبدیل براساس تجربه و تحلیل ضرایب همبستگی میان تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه عمل می‌کند، به این معنی که اختلاف ضرایب همبستگی خطی بین دو مجموعه داده را بدست آورده به طوری که بیشترین همبستگی بیانگر اولین آنالیز ضریب همبستگی استاندارد ۱ (CCA) می‌باشد [۱۹]. برای تشریح این تکنیک، فرض شده است، دو تصویر ماهواره‌ای، با فاصله زمانی از یک منطقه موجود می‌باشد که هر یک از آن‌ها به صورت برداری با متغیرهای تصادفی در رابطه ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. در هر دو تصویر توزیع درجات خاکستری نرمال فرض می‌شود [۱۷].

$$\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

$$\vec{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N) \quad (2)$$

در روابط فوق بردار X و Y بیانگر تصویر زمان اول و دوم می‌باشد و N بیانگر تعداد باندهای طیفی هر یک از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. می‌توان هر یک از این تصاویر را به صورت ترکیب خطی از درجات خاکستری تمامی باندهای طیفی مربوط با آن تصاویر، نشان داد. با توجه به این نکته ترکیب خطی هر یک از تصاویر ماهواره‌ای به صورت رابطه ۳ و ۴ بیان می‌شود [۱۷].

$$\vec{U} = \vec{a}^T \cdot \vec{X} \quad (3)$$

$$\vec{V} = \vec{b}^T \cdot \vec{Y} \quad (4)$$

که در روابط فوق بردارهای a و b بیانگر ضرایب تبدیل تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه به صورت ترکیب‌های خطی U

۱ Standard Canonical Correlation Analysis

طیفی می‌باشد. برای تعیین هر یک از ضرایب مجهول a و b بهترین راه استفاده از تبدیل آنالیز مولفه اصلی (PCA)^۲ بر روی مجموعه بردارهای X و Y است [۱]. بنابراین زوج مرتب (U_1, V_1) دارای بیشترین همبستگی می‌باشد و زوج مرتب (U_2, V_2) دارای بیشترین همبستگی بعدی می‌باشد که کاملاً مستقل از (U_1, V_1) است [۱]. به هر یک از این زوج مرتبها مولفه‌های تبدیل MAD ^۳ می‌گویند و به تصویر اختلاف حاصل از این مولفه‌ها، تبدیل MAD می‌گویند که به صورت رابطه ۱۰ بیان شده است [۱۷].

$$M_i = U_{N-i+1} - V_{N-i+1} \quad (10)$$

$$Cov(M_i, M_j) = 0 \quad i \neq j \quad (11)$$

$$Var(M_i) = \sigma_{M_i}^2 = 2(1 - \rho_{N-i+1}) \quad (12)$$

که در روابط فوق پارامتر N بیانگر تعداد باندهای طیفی می‌باشد. تمامی اطلاعات مربوط به تغییرات با آنالیز این تصویر تبدیل MAD بدست می‌آید [۱]. مولفه‌های تبدیل MAD دارای بیشترین واریانس در شدت هر یک از پیکسل‌ها می‌باشند [۱۳]. بررسی و شناسایی تغییرات از تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از مولفه‌های تبدیل MAD بسیار ساده‌تر نسبت به دیگر روش‌ها می‌باشد [۱۷]. علاوه بر این به دلیل استفاده از ترکیب خطی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و انتقال تصاویر به فضایی دیگر اطلاعات پایه بدست آمده از تصویر اختلاف تبدیل MAD نسبت به شرایط اتمسفری و نویز آماری^۴، تصویری ناهمبسته می‌باشد [۱]. به همین دلیل به عنوان روشی قوی در جهت نرمالیزاسیون اتوماتیک تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه به کار می‌رود [۱۳]. روش تبدیل IR-MAD طی یک فرآیند تکراری برای شناسایی و بررسی تغییرات رخ داده در داده‌های چند متغیره به کار می‌رود [۱۶]. به دلیل تکراری بودن فرآیند این تبدیل شناسایی تغییرات به وسیله آن با دقت بهتری نسبت به تبدیل MAD صورت می‌گیرد [۱]. برای تشریح این روش می‌توان گفت Z به عنوان مجموع مربعات مولفه‌های استاندارد تبدیل MAD از رابطه زیر بدست می‌آید [۱].

V می‌باشند و در این روابط به عنوان مجهول هستند [۱]. Nielsen و همکارانش در سال ۱۹۹۸ برای بدست آوردن این مجهولات، استفاده از ضرایب CCA را پیشنهاد کردند [۱۹]. این ضرایب توسط Hotelling در سال ۱۹۳۶ معرفی شد [۲۰]. فرض می‌شود که بردار U و V نسبت به یکدیگر دارای همبستگی مثبت هستند [۱۷]. تعیین اختلاف بین ترکیب‌های خطی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه با بیشترین واریانس به مانند تعیین ترکیب‌های خطی می‌باشد که دارای کمترین همبستگی مثبت است [۱۳]. این آنالیز شامل ترکیب خطی هر یک از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه است که به جای استفاده از رفتار طیفی پیکسل‌ها از ارتباط متقابل آن‌ها یا ضرایب همبستگی میان آن‌ها استفاده می‌کند [۱۶]. بزرگترین ضریب همبستگی متقابل بین هر یک از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه به نام اولین متغیر متعارف CV انتخاب می‌شود و متغیرهای بعدی نیز به همین ترتیب انتخاب می‌گردند [۱۶]. در حقیقت بردار a و b باید به گونه‌ای تعیین شوند که واریانس اختلاف بردار U و V دارای بیشترین مقدار شود [۱۷]. این مطلب را می‌توان در رابطه زیر ارایه کرد.

$$Var(\vec{U}) = Var(\vec{V}) = 1 \quad (5)$$

در حقیقت برای بدست آوردن این مجهولات باید از تعمیم مسئله به مقادیر ویژه استفاده کنیم [۱].

$$\sum_{xy} \sum_{yy}^{-1} \sum_{yx}^T \vec{b} = \rho^2 \sum_{xx} \vec{a} \quad (6)$$

$$\sum_{yx} \sum_{xx}^{-1} \sum_{xy}^T \vec{b} = \rho^2 \sum_{yy} \vec{b} \quad (7)$$

بطوریکه:

$$\sum_{yx} = \sum_{xy} \quad (8)$$

$$\rho = corr(U_i, V_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

که در روابط فوق ρ بیانگر ضریب همبستگی، \sum_{xy} بیانگر ماتریس کواریانس بین تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه X و Y ، \sum_{xx} ماتریس کواریانس تصویر X ، \sum_{yy} ماتریس کواریانس تصویر Y و N تعداد باندهای

^۲ Principal component analysis

^۳ MAD Components

^۴ Statistical Noise

^۱ Ccanonical varieties

$$Z = \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i}{\sigma_{M_i}} \right) \quad (13)$$

که در رابطه فوق σ_{M_i} در رابطه ۱۲ و M_i نیز در رابطه ۱۰ معرفی شد. پیکسل‌های تغییرنیافته نسبت به یکدیگر ناهمبسته هستند و دارای توزیع نرمال^۱ می‌باشند بنابراین آن‌ها را می‌توان به وسیله توزیع کای-اسکوئر^۲ با N درجه آزادی تخمین زد (تابع توزیع $P_{\chi^2, N}$) [۱۶]. برای هر تکرار مشاهدات Z (برگرفته از مشاهدات Z) می‌توانند به وسیله توزیع کای-اسکوئر وزن‌دهی شوند [۱].

$$P_r(\text{no change}) = 1 - P_{\chi^2, N} \quad (14)$$

در رابطه فوق پارامتر P_r بیانگر این مطلب می‌باشد که احتمال قرار گرفتن نمونه Z در توزیع کای-اسکوئر بزرگ و بزرگ‌تر باشد [۱۶]. به ازای نمونه‌های Z با مقدار کوچک، احتمال رخداد تغییرات کمتر است [۱]. به این دلیل می‌تواند به عنوان روشی کارآمد در آشکارسازی تغییرات بدون نظارت به کار رود. تکرار تبدیل MAD تا زمانی ادامه دارد که ضرایب همبسته استاندارد تغییر نکنند [۱۶]. در جهت تعیین احتمال تغییر نیافتن هر یک از پیکسل‌ها، از حدآستانه‌ی t طبق رابطه زیر استفاده می‌شود [۱].

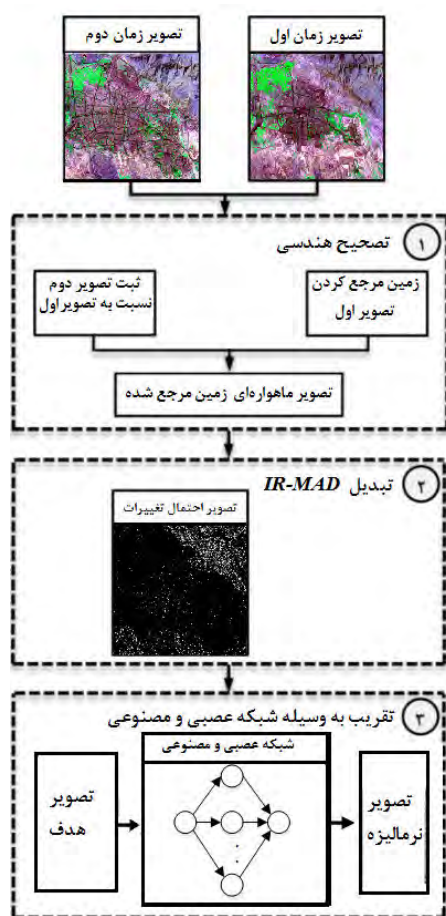
$$P_r(\text{no change}) > t \quad (15)$$

با توجه به رابطه فوق پیکسل‌هایی تغییرنیافته با احتمال بیشتر از حدآستانه t انتخاب می‌شوند و از آن‌ها به عنوان نقاط کنترل رادیومتریکی استفاده می‌گردد. معمولاً مقدار حدآستانه t را ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

۳- روش پیشنهادی جهت نرمالیزاسیون اتوماتیک رادیومتریکی

در این قسمت جزئیات روش پیشنهادی جهت نرمالیزاسیون رادیومتریکی در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه ارائه می‌شود. شکل ۱ مراحل روش پیشنهادی برای این منظور را نشان می‌دهد. داده‌ها شامل دو تصویر ماهواره‌ای

مربوط به دو زمان مختلف می‌باشد. مطابق شکل روش پیشنهادی از سه مرحله اصلی تشکیل شده است. مرحله اول شامل تصحیح هندسی می‌باشد، که به منظور هم-مرجع‌سازی دو تصویر نسبت به یکدیگر صورت می‌گیرد. در مرحله دوم به منظور تعیین پیکسل‌های تغییر نیافته از روش تبدیل IR-MAD پیکسل‌های استفاده می‌شود و در مرحله سوم ارتباط بین هر یک از آن‌ها توسط شبکه عصبی و مصنوعی مدل‌سازی می‌شود.



شکل ۱- مراحل روش پیشنهادی جهت نرمالیزاسیون رادیومتریکی

۳-۱- تصحیح هندسی

یکی از مهم‌ترین پردازش‌هایی که بر روی تصاویر ماهواره‌ای صورت می‌گیرد، حذف اعوجاجات هندسی بر روی این تصاویر می‌باشد. مجموعه عواملی که موجب ایجاد خطاهای هندسی^۳ در تصاویر ماهواره‌ای می‌گردند، شامل خطای دوران، کرویت، پانورامیک، حرکات سنجنده

^۳ Geometric Errors

^۱ Normal distribution

^۲ Chi-square distribution

پس از اعمال حدآستانه بر روی این نقشه، نقاط کنترل رادیومتریکی جهت نرمالیزاسیون نسبی انتخاب می‌گردند تا با استفاده از برقراری ارتباط بین آن‌ها نرمالیزاسیون رادیومتریکی صورت گیرد.

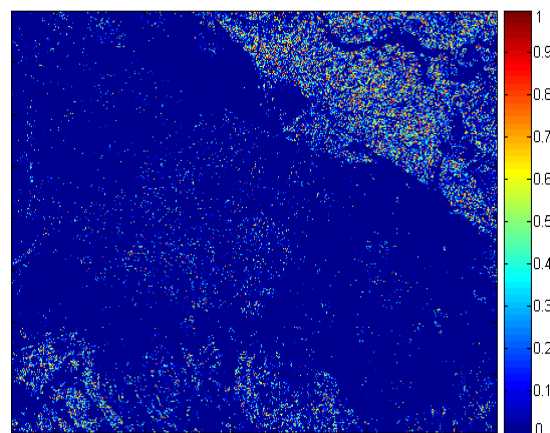
۳-۳- تقریب با شبکه عصبی مصنوعی

پس از تعیین نقاط کنترل رادیومتریکی، در این مرحله ارتباط میان آن‌ها در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تخمین زده می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی یک تکنیک پردازش اطلاعات مبتنی بر روش سیستم‌های عصبی بیولوژیکی مانند مغز و پردازش اطلاعات است [۲۲]. مفهوم بنیادی شبکه‌های عصبی، ساختار سیستم پردازش اطلاعات است که از تعداد زیادی واحدهای پردازشی (نورون)^۱ مرتبط با شبکه‌ها تشکیل شده‌اند [۲۲]. شبکه‌های عصبی چند لایه، با یک یا چند لایه مخفی به شرط آن که تعداد نرون‌های لایه‌ها مخفی کافی داشته باشند، می‌توانند هر تابع غیر خطی پیوسته‌ای را در فضای ترکیبی تخمین بزنند. اگر بخواهیم تابعی را تقریب بزنیم که تعداد زیادی نقطه خمیدگی دارد، نیازمند آن خواهیم بود که تعداد بسیار زیادی نورون در لایه پنهان داشته باشیم. روش تبدیل IR-MAD از این فرض که درجات خاکستری پیکسل‌های تغییرنیافته در تصویر هدف تابع خطی از تصویر مرجع می‌باشد به منظور نرمالیزاسیون رادیومتریکی نسبی استفاده می‌کند. فرض خطی بودن ارتباط بین درجات خاکستری پیکسل‌های تغییرنیافته در تصویر هدف و تصویر مرجع نتایج نرمالیزاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. چرا که معمولا ارتباط بین درجات خاکستری پیکسل‌های تغییرنیافته در تصویر هدف و مرجع از مدل خطی تبعیت نمی‌کند و از این فرض به منظور ساده‌کردن مرحله مدلسازی استفاده می‌شود. به عنوان مثال پیکسل‌هایی که به احتمال ۹۵ درصد در باند دوم تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه تغییرنیافته‌اند، در شکل ۳ مشاهده می‌شوند، که دارای رفتاری تقریبا غیر خطی می‌باشند.

و ... می‌باشند. مدلسازی ریاضی با هدف تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای نخستین فرآیند در استخراج اطلاعات مکانی و نرمالیزاسیون رادیومتریکی می‌باشد [۲۳]. به همین منظور در این تحقیق یکی از تصاویر ماهواره‌ای با نقشه‌های ۱/۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیای نیروهای مسلح زمین مرجع شده است. روش کار به این صورت بود که با استفاده از نقشه‌های مذکور نقاط کنترل انتخاب شد و با توجه به پراکندگی آن‌ها در سطح تصویر از مدل ریاضی که عموما یک چندجمله‌ای درجه دو می‌باشد برای زمین-مرجع کردن استفاده شد. چندجمله‌ای درجه دو از ساده-ترین مدل‌های مورد استفاده در ثبت و تصحیح هندسی دو بعدی تصاویر ماهواره‌ای هستند و صرفا برای برقراری ارتباط فضاهای دو بعدی تدوین شده‌اند [۲۱].

۳-۲- آشکارسازی تغییرات اتوماتیک با تبدیل IR-MAD

پس از تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، مرحله بعدی تعیین نقاط کنترل رادیومتریکی با بکارگیری تکنیک‌های آشکارسازی تغییرات می‌باشد. با استفاده از تبدیل IR-MAD که در بخش ۲ تشریح شد تصویر احتمال تغییرات بدست آمد و برای نرمالیزاسیون رادیومتریکی مطابق رابطه ۱۵ از پیکسل‌هایی که به احتمال ۹۵ درصد متعلق به مناطق تغییرنیافته هستند به عنوان نقاط کنترل رادیومتریکی استفاده شد. در شکل ۲ نقشه احتمال تغییرات حاصل از تبدیل IR-MAD نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشه احتمال تغییرات حاصل از تبدیل IR-MAD

^۱ Neuron

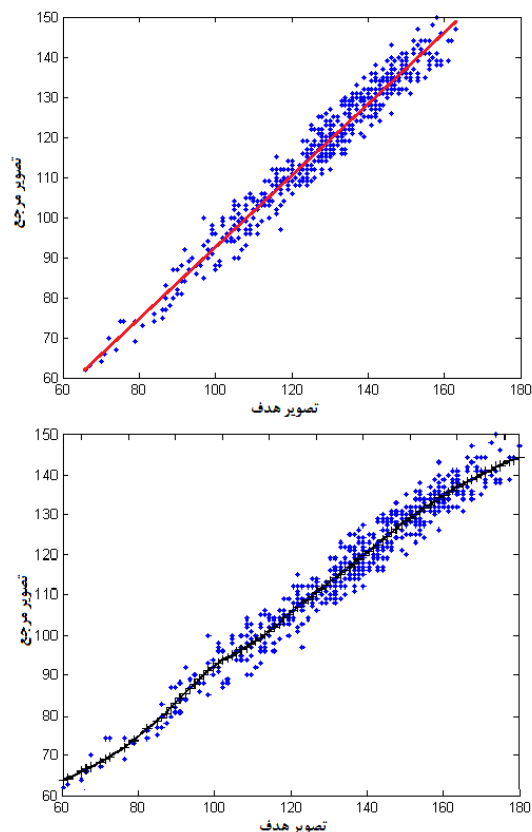
به طور معمول برای نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو مرحله ضروری در استفاده از شبکه‌های عصبی وجود دارد که شامل مرحله یادگیری^۲ و مرحله فراخوانی^۳ می‌باشد. مرحله یادگیری به مرحله پردازش و تنظیم و تغییر وزن‌های اتصال اطلاق می‌شوند تا در نهایت این شبکه برای کاربرد خاصی بهینه شود. در این مرحله مقادیر درجات خاکستری در پیکسل‌های تغییر نیافته در دو تصویر هدف و مرجع برای تقریب تابع نرمالیزاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله فراخوانی شبکه عصبی آموزش دیده برای درون‌یابی^۴ و برون‌یابی^۵ مورد استفاده قرار گرفته و تصویر هدف نسبت به تصویر مرجع با استفاده از رابطه زیر نرمالیزه می‌شود.

$$X = f(Y) \quad (17)$$

در استفاده از شبکه‌های عصبی به منظور نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای هر دو لایه ورودی و خروجی از یک نورون که به ترتیب درجه خاکستری پیکسل‌های تغییر نیافته در تصویر هدف و تصویر مرجع می‌باشد تشکیل شده است [۲۲]. با توجه به ماهیت مسئله نرمالیزاسیون نسبی یک لایه پنهان در معماری شبکه عصبی با تعداد نورون‌های متغیر در این لایه در نظر گرفته شد. باید توجه نمود که افزایش تعداد نورون‌ها در لایه پنهان قابلیت شبکه را برای حل مسئله پیچیده بالاتر برده ولی از طرف دیگر زمان لازم برای یادگیری شبکه را افزایش می‌دهد همچنین احتمال رخ دادن فرا یادگیری^۶ را نیز افزایش می‌دهد [۲۲].

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی، از نرم‌افزار MATLAB 2013b و از کد توسعه داده شده توسط نویسندگان روش تبدیل IR-MAD، استفاده شده است. دیگر قسمت‌های روش پیشنهادی مطابق با جزئیات بیان



شکل ۳- توزیع درجات خاکستری پیکسل تغییر نیافته به احتمال ۹۵ درصد به همراه مدل خطی و مدل غیر خطی حاصل از شبکه عصبی

در نمودارهای شکل فوق مدل خطی حاصل از رگرسیون خطی با رنگ قرمز، و مدل غیر خطی حاصل از شبکه عصبی با رنگ مشکی مشخص می‌باشد. با توجه به این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که هر چند تا حدی می‌توان با مدل خطی رفتار پیکسل‌های تغییر نیافته را تقریب زد ولی در کل شبکه عصبی قابلیت بالایی در مدل‌سازی این ارتباط دارد. بنابراین به دلیل بهبود نتایج نرمالیزاسیون رادیومتریک، از شبکه عصبی مصنوعی در جهت تبدیل غیرخطی و اعمال تصحیح رادیومتریک استفاده شد.

۳-۳-۱- طراحی شبکه عصبی مصنوعی

نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به عنوان یک مسئله تقریب تابع^۱ در نظر گرفته شود [۲۲]. مدل‌های غیرخطی با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های خطی باشد که

۲ Training
 ۳ Recalling
 ۴ Interpolation
 ۵ Extrapolation
 ۶ Over Learning

۱ Function Approximation



شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای لندست ۵ از شهر تبریز در سال ۲۰۱۰ با ترکیب رنگی باندهای (۲،۳،۴)

۲-۴- معیارهای ارزیابی

تصویر ماهواره‌ای زمان دوم به دلیل کیفیت رادیومتریکی بهتر به عنوان تصویر مرجع و تصویر ماهواره-ای زمان اول به عنوان تصویر هدف در نظر گرفته شد. به منظور تهیه داده‌های مورد نیاز جهت مقایسه و ارزیابی صحت نرمالیزاسیون رادیومتریکی نسبی با استفاده از دو روش IR-MAD مبتنی بر رگرسیون خطی و روش پیشنهادی، پیکسل‌های تغییرنیافته به دو بخش داده‌های آموزشی و ارزیابی تقسیم می‌شوند. با توجه به این که ماهیت و عملکرد روش‌های نرمالیزاسیون بکار رفته در این تحقیق، متفاوت می‌باشد ولی لازم است تا ارزیابی با داده‌های مشابه صورت گیرد، لذا ۲۵ درصد پیکسل‌های تغییر نیافته تعیین شده به روش پیشنهادی به عنوان داده‌های ارزیابی برای هر دو روش نرمالیزاسیون در نظر گرفته شد. معمولاً ارزیابی نتایج نرمالیزاسیون با استفاده از پارامتر کیفی و کمی صورت می‌گیرد. پارامتر کیفی می‌تواند مربوط به ارزیابی هیستوگرام تصویر اختلاف حاصل از تصویر مرجع و تصویر هدفی باشد که به وسیله روش‌های مختلف نرمال شده است و یا، از لحاظ بصری تصویر مرجع با تصاویر نرمالیزه، از طریق مشابَهت رادیومتریکی به روش‌های مختلف، مقایسه شود. پارامتری که در این زمینه، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد پارامتر کمی است، که مربوط به محاسبه و مقایسه خطای کمترین

شده در بخش قبل برنامه‌نویسی شده است. در این بخش داده‌های مورد استفاده، جزئیات پیاده‌سازی و نتایج حاصله بیان شده و بحث می‌شود.

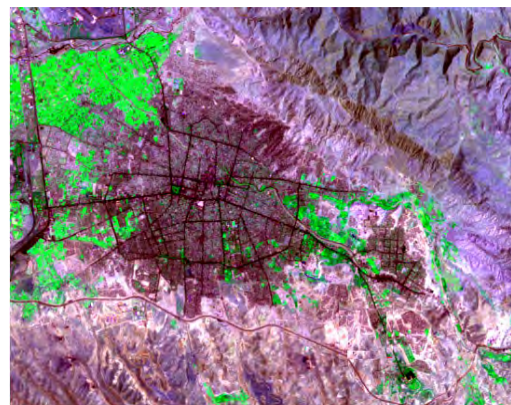
۱-۴- منطقه مورد مطالعه

تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه مورد استفاده در این تحقیق مربوط به شهر تبریز می‌باشند. تصویر زمان اول مربوط به ۱۳ می ۱۹۸۹ و تصویر زمان دوم مربوط به ۱۷ جُون سال ۲۰۱۰، از سنجنده لندست ۴ و ۵ می‌باشد. جزئیات این تصاویر در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۴ و ۵ تصاویر مورد استفاده به صورت کامل نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاده

تصویر	لندست ۴	لندست ۵
تعداد باند طیفی	۷	۷
تاریخ اخذ تصویر	۱۳-۰۵-۱۹۸۹	۱۷-۰۶-۲۰۱۰
ابعاد زمینی پیکسل زمینی(متر)	۳۰	۳۰

به دلیل پایین بودن دقت رادیومتریکی باند ششم تصاویر ماهواره‌ای لندست ۴ و ۵، از این باند طیفی در جهت برآورد نتایج نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه شهر تبریز استفاده نشده است.



شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای لندست ۴ از شهر تبریز در سال ۱۹۸۹ با ترکیب رنگی باندهای (۲،۳،۴)

مربعات (RMSE)^۱ نرمالیزاسیون در محل داده‌های ارزیابی می‌باشد که در رابطه زیر آمده است.

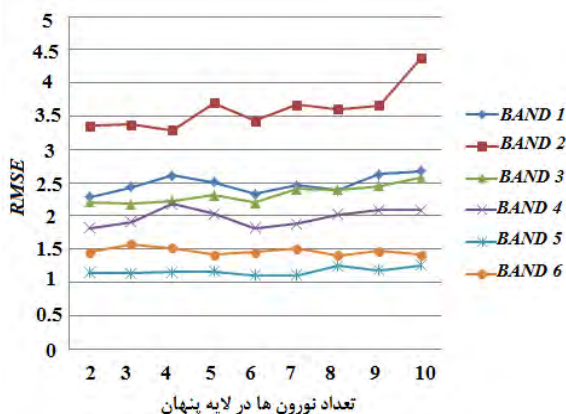
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (18)$$

در این رابطه n بیانگر تعداد پیکسل‌های تغییر نیافته در داده‌های ارزیابی می‌باشد که به روش پیشنهادی تعیین شده است. همچنین نتایج نرمالیزاسیون به روش پیشنهادی برای بررسی کیفیت، مورد آزمون‌های فرض t و F قرار داده شد. آزمون‌های t و F از میانگین و واریانس داده‌های ارزیابی روش پیشنهادی تصویر مرجع و تصویر نرمالیزه شده استفاده می‌کنند [۱]. در آزمون فرض t ، سعی می‌شود که مقدار این آزمون برای هر باند نزدیک صفر باشد و برای آزمون فرض F ، سعی می‌شود که مقدار این آزمون نزدیک یک باشد [۴]. در هر دو آزمون مقدار p که بیانگر احتمال قبولی در آزمون مورد نظر است هر چه به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است و معمولاً مقدار بزرگتر از $0/5$ به معنای قبولی در آن آزمون می‌باشد [۱].

۳-۴- ارزیابی نتایج

در خصوص شبکه عصبی و مصنوعی و ضرورت استفاده از آن به منظور نرمالیزاسیون تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و طراحی شبکه‌های عصبی و مصنوعی در این کاربرد خاص در بخش ۳-۳ توضیحاتی ارائه شد. با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نورون‌ها در شبکه عصبی این شبکه‌ها قادر خواهند بود یک نگاشت غیر خطی با دقت بالا انجام دهند. در این تحقیق یک شبکه عصبی پس-انتشار با یک لایه پنهان در نظر گرفته شد و ماهیت مسئله نرمالیزاسیون نسبی ایجاب کرد که برای هر دو لایه ورودی و خروجی شبکه از یک نورون که به ترتیب درجه خاکستری پیکسل‌های تغییرنیافته در تصویر هدف و مرجع می‌باشد استفاده شود. با توجه به اهمیت تعداد نورون‌های لایه پنهان برای تعیین مقدار مناسب این پارامتر، معماری‌های مختلفی از شبکه عصبی با تعداد ۲ تا ۱۰ نورون در لایه پنهان در نظر گرفته شد و در هر معماری ۵ بار با دفعات تکرار ۱۰۰۰ آموزش دیده و در

ادامه میانگین خطای کمترین مربعات داده‌های ارزیابی برآورد گردید. شکل ۶ روند تغییر خطای کمترین مربعات داده‌های ارزیابی به ازای افزایش تعداد نورون‌های لایه پنهان در باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد روند تغییر خطای کمترین مربعات داده‌های ارزیابی حاصل از نرمالیزاسیون با افزایش نورون در لایه پنهان دارای رفتاری متفاوت، در باندهای مختلف می‌باشد.



شکل ۶- روند تغییرات خطای کمترین مربعات با افزایش نورون‌ها

با توجه به شکل فوق تعداد نورونی که دارای کمترین خطای RMSE به ازای باند مورد نظر باشد به عنوان تعداد نورون مناسب، در جهت مدلسازی غیرخطی در باند مربوطه در شبکه عصبی به کار می‌رود. بنابراین به ترتیب برای باند اول تا ششم، از ۲، ۳، ۴، ۲، ۶ و ۸ نورون در لایه پنهان، به عنوان معماری بهینه شبکه عصبی در نظر گرفته شد، و با استفاده از پیکسل‌های تغییرنیافته که در مرحله آشکارسازی اتوماتیک تغییرات با استفاده از تبدیل IR-MAD تعیین شده بودند آموزش دیده و سپس این شبکه آموزش دیده برای انجام نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی تصویر هدف مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ و همچنین نمودارهای شکل ۷ و ۸ خطای کمترین مربعات حاصل از داده‌های خام و روش‌های تبدیل IR-MAD و تبدیل IR-MAD مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- خطای کمترین مربعات داده‌های ارزیابی (RMSE)

باند \ روش	1	2	3	4	5	6
RAW	7.29	11.4	9.02	9.51	6.92	16.9
IR-MAD-ANN	2.28	3.46	2.18	1.94	1.13	1.44
IR-MAD	2.53	3.59	2.31	2.01	1.17	1.47

^۱ Root Mean Square Errors

صحت آزمون‌های آماری بیان شده از پیکسل‌های بیشتری به عنوان تست در روش پیشنهادی استفاده شد، که نتایج آن در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

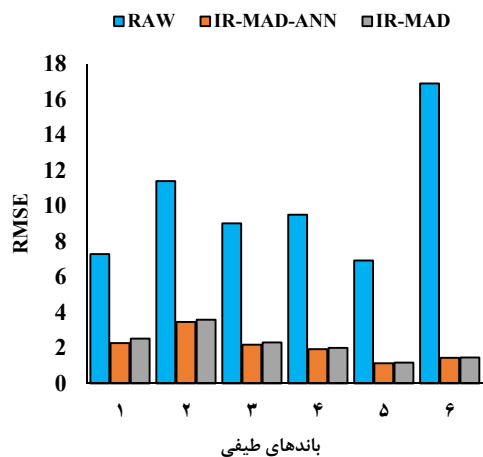
جدول ۳- مقایسه میانگین و واریانس ۱۴۱ داده‌های ارزیابی از ۵۶۵ داده کل به روش پیشنهادی جهت آزمون آماری t و F برای تصویر هدف و مرجع و تصویر نرمالیزه شده به روش پیشنهادی

باند/ متغیرها	1	2	3	4	5	6
Tar. mean	77.7	128	84.2	83.7	58.8	108
Ref. mean	70.7	117	75.3	74.4	52.1	91.6
Norm.mean	70.8	118	75.5	74.5	52.2	91.6
t-stat	0.47	1.27	0.86	0.99	0.64	0.42
P-value	0.64	0.21	0.39	0.32	0.53	0.67
Tar. var	163	423	108	118	69.9	225
Ref. var.	132	355	87.9	83.5	45.4	118
Norm. var	125	336	83	80	44.9	116
F-stat	0.95	0.95	0.95	0.96	0.99	0.98
P-value	0.76	0.74	0.74	0.8	0.95	0.91

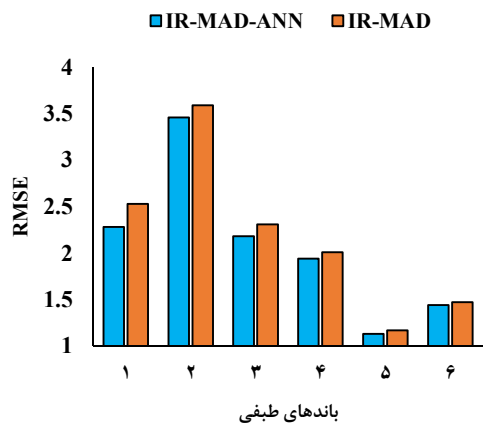
جدول ۴- مقایسه میانگین و واریانس ۱۷۰ داده‌های ارزیابی از ۵۶۵ داده کل به روش پیشنهادی جهت آزمون آماری t و F برای تصویر هدف و مرجع و تصویر نرمالیزه شده به روش پیشنهادی

باند/ متغیرها	1	2	3	4	5	6
Tar. mean	77.5	127	84.1	83.8	59.2	109
Ref. mean	70.6	117	75.4	74.6	52.4	92.2
Norm.mean	70.6	117	75.4	74.6	52.4	92.2
t-stat	-0.1	0.47	-0.1	0.01	-0	0.23
P-value	0.92	0.64	0.95	0.99	0.98	0.82
Tar. var	160	406	107	116	72	234
Ref. var.	128	336	87.6	83.5	46.7	122
Norm. var	123	323	84.1	81	46	121
F-stat	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99
P-value	0.76	0.79	0.79	0.84	0.92	0.96

با توجه به جدول ۳ و ۴ و این مطلب که زمانیکه از تعداد پیکسل‌های بیشتری در جهت ارزیابی نتایج حاصل از نرمالیزاسیون نسبی استفاده شود، باعث افزایش درجه آزادی در محاسبه فاصله اطمینان می‌شود. به این معنا که زمانیکه از ۱۴۱ پیکسل به عنوان داده‌های ارزیابی استفاده می‌شود مقدار احتمال p برای آزمون t به ازای باندهای ۲، ۳ و ۴ از ۰/۵ کمتر است ولی زمانی که تعداد داده‌های ارزیابی به ۱۷۱ پیکسل می‌رسد مقدار احتمال p برای تمامی باندها در آزمون t بالاتر از ۰/۵ می‌باشد و مقدار احتمال p در آزمون F در هر دو مجموعه داده بالاتر از ۰/۵ می‌باشد. بنابراین نتایج حاصل از نرمالیزاسیون نسبی به روش پیشنهادی، قابل قبول می‌باشد.



شکل ۷- خطای کمترین مربعات (RMSE) داده‌های خام و روش IR-MAD و IR-MAD-ANN به ازای باندهای طیفی



شکل ۸- خطای کمترین مربعات (RMSE) روش IR-MAD و IR-MAD-ANN به ازای باندهای طیفی

همانطور که در جدول ۲ و نمودارهای شکل ۷ و ۸ دیده می‌شود، روش پیشنهادی IR-MAD-ANN دارای خطای RMSE کمتری در نرمالیزاسیون رادیومتریکی هر یک از باندهای طیفی می‌باشد، و در نتیجه دارای دقت و عملکرد بهتری نسبت به روش IR-MAD می‌باشد. با مقایسه نتایج RMSE نرمالیزاسیون رادیومتریکی هر دو روش با داده‌های خام به عملکرد مناسب هر یک از دو روش IR-MAD و IR-MAD-ANN در نرمالیزاسیون رادیومتریک نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، پی برده می‌شود.

در جدول ۳ نتایج مربوط به آزمون‌های آماری t و F را برای پیکسل‌هایی که به عنوان ارزیابی در روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌شوند. برای بررسی

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

براساس تحقیقات انجام شده با استفاده از روش‌های مختلف نرمالیزاسیون مشخص گردید که روش‌هایی که در روند نرمالیزاسیون از نقاط کنترل رادیومتریک (پیکسل-های تغییرنیافته) استفاده می‌کنند به نتایج بهتری در این جهت می‌رسند [۲۲]. همانطور که بیان شد روش‌های نرمالیزاسیون نسبی براساس خطی فرض کردن ارتباط بین پیکسل‌های تصاویر هدف و مرجع می‌باشد. در حالیکه رابطه بین پیکسل‌های تصویر هدف و مرجع خطی نمی‌باشد و از این فرض تنها برای ساده‌سازی مدلسازی استفاده می‌شود. بنابراین برای انتخاب نقاط کنترل رادیومتریک در این تحقیق از تکنیک IR-MAD که نسبت به تغییرات ناوردا (نامتغیر)، از قبیل تفاوت‌های موجود در تنظیمات gain در سنسورها و همچنین تصحیحات اتمسفری و رادیومتریک خطی است استفاده شد. همچنین در جهت مدلسازی ارتباط بین نقاط کنترل رادیومتریک انتخاب شده در مرحله قبل، به روشی انعطاف‌پذیر، که قادر به مدلسازی خطی و غیرخطی در جهت ارتباط بین این نقاط است نیاز می‌باشد. به همین منظور از شبکه عصبی مصنوعی که قابلیت و انعطاف بالایی در جهت تقریب توابع دارد برای تخمین این ارتباط استفاده شد. از این رو در این تحقیق روش جدیدی براساس استفاده از روش تبدیل IR-MAD و شبکه عصبی مصنوعی در جهت نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه ارائه شد.

با استفاده از تبدیل IR-MAD نقشه احتمال تغییرات بدست آمد و با اعمال حدآستانه، پیکسل‌های تغییرنیافته انتخاب گردید و از این پیکسل‌ها به عنوان نقاط کنترل رادیومتریک در تصویر هدف و مرجع استفاده شد. سپس برای مدلسازی ارتباط بین نقاط کنترل رادیومتریک تصویر هدف و مرجع از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج موجود در بخش ۴ نشان داد که شبکه عصبی قابلیت بالایی در مدلسازی رابطه غیر خطی بین پیکسل تغییرنیافته تصویر هدف و مرجع دارد. خطای RMSE، نرمالیزاسیون به روش پیشنهادی به ازای هر باند طیفی از نرمالیزاسیون به روش تبدیل IR-MAD با رگرسیون خطی کمتر بود و در نتیجه روش پیشنهادی در مدلسازی رابطه بین تصویر هدف و مرجع دارای دقت و قابلیت بالاتری می‌باشد. انتخاب تعداد نورون مناسب برای لایه پنهان در روش پیشنهادی از جمله مهمترین چالش‌های پیش رو در جهت نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه می‌باشد. چرا که تعداد نورون مناسب در لایه پنهان، به ازای هر یک از باندهای طیفی در دقت نهایی نرمالیزاسیون نسبی آن باند طیفی بسیار تاثیرگذار می‌باشد. در همین راستا پیشنهاد می‌گردد که از روشی که دارای اتوماسیون بالایی در انتخاب نورون‌های مناسب می‌باشد در جهت مدلسازی ارتباط بین تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده گردد. در این تحقیق تعداد نورون‌های لایه پنهان براساس کمترین RMSE مربوط به آن تعداد، انتخاب گردید.

مراجع

- [1] M. J. Canty and A. A. Nielsen, (2008) "Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, pp. 1025-1036, 2008/3/18.
- [2] C. P. Lo, and X. Yang.(1998) "Some practical considerations of relative radiometric normalization of multirate Landsat MSS data for land use change detection,Tampa,Florida," *Proceedings of ASPRS/RTI 1998 Annual Convention*, pp. 1184-1193.
- [3] H. A. G. D. Rahman, SMAC, (1994) "a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 1, pp. 11-27.
- [4] R. Richter, (1990) "A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images," *International Journal of Remote Sensing*, vol. (1), pp. 159-166.
- [5] C. D. Elvidge, D. Yuan, D.W. Ridgeway, and R.S. Lunetta, (1995) "Relative radiometric normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) data using an automatic scattergram-controlled regression," *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, vol. (10), pp. 1255-1260.

- [6] R. J. Radke, S. Andra, O. Al-Kofahi, and B. Roysam, (2005) "Image change detection algorithms: a systematic survey," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 294-307.
- [7] Y. Du, P. M. Teillet, and J. Cihlar, (2002) "Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection," *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, pp. 123-134.
- [8] S. L. Furby and N. A. Campbell, (2001) "Calibrating images from different dates to 'like-value' digital counts," *Remote Sensing of Environment*, vol. 77, pp. 186-196.
- [9] F. G. Hall, D.E. Strebel, J.E. Nickeson, and S.J. Goetz, (1991) "Toward a common radiometric response among multirate, multisensor images," *Remote Sensing of Environment*, pp. 11-27, 1991.
- [10] M. S. Moran, Jackson, R. D., Slater, P. N., & Teillet, P. M., (1992) "Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output," *Remote Sensing of Environment*, vol. (1), p. 160-184.
- [11] J. R. Schott, C. Salvaggio, and W. J. Volchok, (1998) "Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features," *Remote Sensing of Environment*, vol. 26, pp. 1-16.
- [12] X. Yang, & Lo, C. P, (2000) "Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 6, p. 967-980.
- [13] M. J. Canty, A. A. Nielsen, and M. Schmidt, (2004) "Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 91, pp. 441-451, 6/30/ 2004.
- [14] M. Schmidt, King, E., & McVicar, T. R., (2005) "Towards an internally consistent calibration for 11 AVHRR instruments in a 20-year time series of satellite data," 4th International Asia-Pacific Remote Sensing Symposium, Honolulu.
- [15] T. A. Schroeder, W. B. Cohen, C. Song, M. J. Canty, and Z. Yang, (2006) "Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon," *Remote Sensing of Environment*, vol. 103, pp. 16-26, 7/15/ 2006.
- [16] A. A. Nielsen, (2007) "The Regularized Iteratively Reweighted MAD Method for Change Detection in Multi- and Hyperspectral Data," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 463-478.
- [17] C. Broncano, C. Pinilla, R. G. Crespo, and A. Castillo, (2010) "Relative radiometric normalization of multitemporal images," *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 1.
- [18] L. Wenjing, D. Hoja, M. Schmitt, and U. Stilla, (2011) "Comparative study of change detection for reconstruction monitoring based on very high resolution optical data," in *Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2011 Joint*, pp. 73-76.
- [19] A. A. Nielsen, K. Conradsen, and J. J. Simpson, (1998) "Multivariate Alteration Detection (MAD) and MAF Postprocessing in Multispectral, Bitemporal Image Data: New Approaches to Change Detection Studies," *Remote Sensing of Environment*, vol. 64, pp. 1-19.
- [20] H. Hotelling, (1936) "Relations between two sets of variates. *Biometrika*," p. 321-377.
- [21] T. Touting, (2004) "Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25 ,pp. 1893-1924.
- [22] Sadeghi, V., Ebadi, H., & Ahmadi, F. F. (2013). "A new model for automatic normalization of multitemporal satellite images using Artificial Neural Network and mathematical methods". *Applied Mathematical Modelling*, 37(9), 6437-6445.

[۲۳] آرمین مقیمی، حمید عبادی، وحید صادقی، ۱۳۹۳، پایش اتوماتیک گسترش شهر تبریز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، همایش بین‌المللی ژئوماتیک ۱۳۹۳.

[۲۴] وحید صادقی، حمید عبادی، فرشید فرنود احمدی، توسعه روش‌های متداول نرمالیزاسیون نسبی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، همایش بین‌المللی ژئوماتیک ۱۳۹۰.