

آنالیز حساسیت بر روی متغیرهای سه روش متداول و یک روش جدید تصحیح رادیومتریکی تصاویر سنجش از دور به منظور تولید نقشه تغییرات صحیح

میلاذ جانعلی پور^{۱*}، علی محمدزاده^۲، حکمت اله محمدخانلو^۳، الهه خصالی^۴، حمید عنایتی^۵

^۱دکتری سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
m_janalipour89@yahoo.com

^۲دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
almoh2@gmail.com

^۳کارشناس ارشد ژئودزی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شاهرود
khanlu@gmail.com

^۴دانشجوی دکتری سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
elahe.khesali@gmail.com

^۵کارشناس ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
en.hamid22@gmail.com

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۶، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۷)

چکیده

شناسایی تغییرات با استفاده از تصاویر سنجش از دور اهمیت بسیاری در استخراج اطلاعات جهت کاربردهای مختلف علم مهندسی ژئوماتیک دارد. تصحیح رادیومتریکی تصاویر چندزمانه یکی از گام‌های اولیه و مهم در شناسایی تغییرات محسوب می‌شود به طوری که می‌تواند صحت نهایی نتایج بدست آمده را بهبود دهد. در این مقاله آنالیز حساسیت صحت کلی نقشه تغییرات بدست آمده از سه روش متداول (رگرسیون خطی، PIF و RCSM) و یک روش جدید تصحیح رادیومتریکی نسبت به متغیرهای آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. روش‌های تصحیح رادیومتریکی ذکر شده در دو منطقه آلاسکا و دریاچه ارومیه و تصاویر لندست دو زمان اجرا شدند. با تغییر متغیرهای روش‌های تصحیح رادیومتریکی بهترین صحت کلی روش‌های رگرسیون خطی، PIF و RCSM به ترتیب در منطقه آلاسکا ۶۸٪، ۹۳٪، ۹۱٪ و ۹۴٪ و به ترتیب در منطقه دریاچه ارومیه ۹۲٪، ۹۵٪، ۹۷٪ و ۹۷٪ محاسبه شد. براساس این نتایج، کارایی روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر بالاتر بوده است.

واژگان کلیدی: حدآستانه‌گذاری اتسو، شناسایی تغییرات، سنجش از دور، تصحیح رادیومتریکی، رگرسیون خطی، آنالیز حساسیت

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

شناسایی تغییرات^۱ در سنجش از دور به فرایند شناسایی عوارض تغییر یافته در یک بازه زمانی مشخص با استفاده از تصاویر چندزمانه اطلاق می‌شود [۱]. شناسایی تغییرات با استفاده از تصاویر سنجش از دور در کاربردهایی نظیر جنگل، مدیریت بحران، سیل، تغییرات اراضی کشاورزی و غیره کاربرد فراوان دارد [۲-۴]. به دلیل ساختار رقومی تصاویر، توان تفکیک زمانی بالا، پوشش وسیع از منطقه، انواع تصاویر و غیره، سنجش از دور به عنوان یک منبع مناسب جهت شناسایی تغییرات محسوب می‌شود [۵].

بر اساس تحقیقات پیشین، شناسایی تغییرات در سه گام اصلی انجام می‌شود: (۱) پیش پردازش، (۲) روش شناسایی تغییرات و (۳) ارزیابی صحت و دقت نتایج [۵]. در گام نخست یکسری پیش پردازش‌ها بر روی تصاویر دو یا چندزمانه اعمال می‌شوند. سپس در گام دوم با استفاده از انواع روش‌های شناسایی تغییرات، تغییرات در صحنه تصاویر تصحیح شده شناسایی می‌شوند. نهایتاً در گام سوم، صحت و دقت اطلاعات تغییر و عدم تغییر بدست آمده از روش انتخاب شده در گام دوم محاسبه خواهند شد.

همان طور که مشاهده می‌شود پیش پردازش^۲ یکی از گام‌های اصلی در روش‌های شناسایی تغییرات است. از جمله پیش پردازش‌های زمین‌مرجع کردن، هم‌مرجع کردن، تصحیح توپوگرافی، تصحیح اتمسفری و تصحیح رادیومتریکی هستند [۵-۷]. اعمال تصحیحات رادیومتریکی^۳ و اتمسفری به علت تغییر فصل، تغییر متغیرهای جو، تغییر زاویه دید سنجنده و زاویه تابش خورشید و میزان انرژی تابش شده از خورشید بر روی تصاویر چندزمانه سنجش از دور امری اجتناب ناپذیر است. به طور کلی روش‌های تصحیح رادیومتریکی و اتمسفری به دو دسته روش‌های مطلق و نسبی دسته‌بندی می‌شوند [۸]. در روش‌های تصحیح رادیومتریکی مطلق، هر تصویر به صورت مستقل و با استفاده از متغیرهای فیزیکی اصلاح می‌شود. از آنجا که بدست آوردن متغیرهای فیزیکی دشوار و هزینه‌بر است، محققین به دنبال استفاده از روش‌های تصحیح نسبی تصاویر چندزمانه بوده‌اند. در روش‌های نسبی، درجات خاکستری تصویر زمان نخست به صورت نسبی براساس درجات خاکستری

تصویر دوم اصلاح خواهند شد. به عبارت دیگر درجات خاکستری تصاویر چندزمانه در یک مبدا یکسان و قابل مقایسه قرار خواهند گرفت. روش‌های تصحیح رادیومتریکی نسبی به دلیل عدم وابستگی به متغیرهای فیزیکی و کارایی مناسب بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند.

به منظور تصحیح رادیومتریکی نسبی تصاویر چندزمانه، در برخی از تحقیقات از مدل‌های غیرخطی و پیچیده استفاده شده است. به عنوان مثال صادقی و همکاران (۲۰۱۳) از شبکه عصبی برای تصحیح رادیومتریکی تصاویر چندزمانه سنجش از دور استفاده کردند [۹]. به دلیل پیچیدگی و تعداد مجهولات بالا مدل‌های غیرخطی برخی از محققین از مدل‌های خطی و ساده برای تصحیح رادیومتریکی تصاویر چندزمانه استفاده کرده‌اند. ساده‌ترین روش تصحیح رادیومتریکی، روش رگرسیون خطی است که در بخش ۲-۱ به تفصیل شرح داده خواهد شد [۱۰]. در این روش از معادله یک خط برای ایجاد ارتباط میان درجات خاکستری تصاویر زمان اول و دوم استفاده می‌شود. با توجه به اینکه هدف یکسان کردن درجات خاکستری دو تصویر در مناطق تغییر نکرده است، به علت محاسبه متغیرهای مجهول روش رگرسیون خطی براساس تمامی پیکسل‌ها اعم از تغییر کرده و تغییر نکرده، آن روش دچار خطا و اختلال خواهد شد. از این رو محققین به دنبال شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده و محاسبه متغیرهای مجهول معادله خط از آن پیکسل‌ها هستند. به عنوان مثال روش‌های (Pseudo Invariant Features (PIF و Radiometric control sets method (RCSM از جمله این روش‌های هستند [۱۰]. مشخصاً در این روش‌ها شناسایی درست پیکسل‌های تغییر نکرده در نتایج نهایی تأثیر گذار خواهد بود. از این رو در سال ۲۰۱۷، Novelli و همکاران با ترکیب سه روش شاخص فاصله ممان (Moment distance index)، شاخص اختلاف گیاه نرمال شده و عملگرهای مورفولوژیک پیکسل‌های تغییر نکرده را با صحت بالا شناسایی کردند [۱۱]. همچنین، He و همکاران یک روش جدید به منظور شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده به منظور تصحیح رادیومتریکی تصاویر با توان تفکیک مکانی بالا ارائه نمودند [۱۲].

براساس پیشینه تحقیق، به دلیل پیچیدگی مدل‌های غیرخطی تصحیح رادیومتریکی، محققین از مدل‌های خطی و ساده استفاده کرده‌اند. به منظور اجرای مدل‌های خطی در تحقیقات نیاز به شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده جهت بدست آوردن متغیرهای مدل خطی است.

^۱ Change Detection

^۲ Pre-processing

^۳ Radiometric Correction

۱-۲- روش تصحیح رادیومتریکی رگرسیون خطی [۱۰]

رگرسیون خطی یکی از ساده‌ترین روش‌های تصحیح رادیومتریکی تصاویر است که در آن تصاویر مد نظر بر اساس تصویر مرجع تصحیح رادیومتریکی می‌شوند. فرض کنید تصویر مرجع و تصویر انتخابی برای تصحیح رادیومتریکی برابر R_k و S_k باشند. همچنین واریانس‌های تصویر مرجع و تصویر برای تصحیح به ترتیب برابر $V_{R_k R_k}$ و $V_{S_k S_k}$ در نظر گرفته شوند. علاوه بر این میانگین‌های تصویر مرجع و تصویر برای تصحیح به ترتیب برابر R_k و S_k باشند. همچنین کوواریانس میان تصویر مرجع و تصویر برای تصحیح برابر $V_{R_k S_k}$ باشد. آنگاه دو پارامتر ذیل (مقیاس و انتقال) از آماره‌های ذکر شده محاسبه می‌شوند.

$$m_k = \frac{V_{R_k S_k}}{V_{S_k S_k}} \quad (1)$$

$$b_k = R_k - m_k \times S_k \quad (2)$$

با استفاده از دو پارامتر بدست آمده می‌توان تصویر تصحیح شده را با استفاده رابطه ۳ بدست آورد:

$$S'_k = m_k \times S_k + b_k \quad (3)$$

۲-۲- روش تصحیح رادیومتریکی PIF [۱۰]

روش رگرسیون خطی از تمامی پیکسل‌های تغییر کرده و تغییر نکرده برای تصحیح رادیومتریکی استفاده می‌کند. در حالیکه هدف اعمال تصحیح رادیومتریکی در مناطق تغییر نکرده تصاویر است. از این رو در روش‌های جدیدتر به دنبال شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده و بدست آوردن متغیرهای مجهول رابطه ۳ از آنها بوده‌اند. در روش تصحیح رادیومتریکی PIF ابتدا یک مجموعه از پیکسل‌ها ملقب به PIF از تصویر مرجع با استفاده از رابطه ذیل استخراج می‌شود:

$$PIF = \left\{ \frac{NIR\ Band}{Red\ Band} \leq t_1 \text{ and } \frac{NIR\ Band}{Red\ Band} \geq t_2 \right\} \quad (4)$$

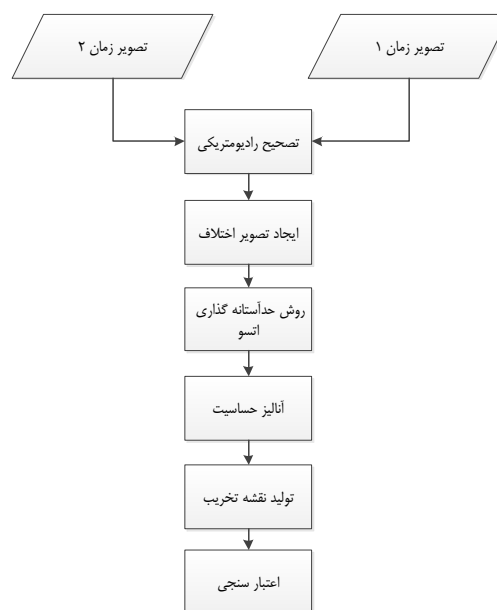
که در رابطه فوق t_1 و t_2 دو حدآستانه هستند که توسط عامل خبره تعیین می‌شوند. پس از بدست آوردن

شناسایی نادرست پیکسل‌های تغییر نکرده سبب کاهش دقت روش‌های تصحیح رادیومتریکی می‌شود. از این رو محققین به دنبال استفاده از روش‌های کارآمد و نوین شناسایی آن پیکسل‌ها بوده‌اند.

در این مقاله یک روش جدید و ساده برای شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده از تصاویر سنجنش از دور ارائه می‌شود که مبتنی بر حد آستانه گذاری بر روی باندهای اختلاف است. علاوه بر این سه روش تصحیح رادیومتریکی رگرسیون خطی، RCSM و PIF نسبت به تغییر مقادیر حدآستانه آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت (روش رگرسیون خطی به حدآستانه وابسته نیست). لذا آنالیز حساسیت بر روی متغیرهای روش‌های پیاده‌سازی شده به عنوان یکی دیگر از اهداف این تحقیق محسوب می‌شود.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، روش پیشنهادی در سه گام اصلی مشابه روش‌های متداول شناسایی تغییرات مطابق شکل ۱ انجام خواهد شد. در گام نخست، با استفاده از چهار روش تصحیح رادیومتریکی تصاویر دو زمانه پیش پردازش می‌شوند و فضای ویژگی با استفاده از تصاویر اختلاف تصحیح شده ساخته می‌شود. در گام دوم با استفاده از روش حدآستانه‌گذاری اتسو و فضای ویژگی ایجاد شده مناطق تغییر کرده و تغییر نکرده شناسایی می‌شوند. در نهایت و در گام سوم، ارزیابی صحت نتایج تغییرات با استفاده از ماتریس ابهام و آماره‌های مستخرج از آن انجام خواهد شد. در ادامه گام‌های روش تحقیق به تفصیل بیان خواهند شد.



شکل ۱- مدل مفهومی روش پیشنهادی

مجموعه پیکسل‌های PIF پارامترهای ذیل از آن مجموعه محاسبه می‌شوند:

σ_{R_k} انحراف معیار مجموعه پیکسل‌های PIF در تصویر مرجع
 σ_{S_k} انحراف معیار مجموعه پیکسل‌های PIF در تصویر برای تصحیح
 R_k میانگین مجموعه پیکسل‌های PIF در تصویر مرجع
 S_k میانگین مجموعه پیکسل‌های PIF در تصویر برای تصحیح

به منظور تصحیح تصویر مد نظر ابتدا دو پارامتر مطابق روابط ۵ و ۶ از آماره‌های ذکر شده در فوق محاسبه می‌شوند. سپس تصویر تصحیح شده از رابطه ۳ محاسبه خواهد شد.

$$m_k = \frac{\sigma_{R_k}}{\sigma_{S_k}} \quad (5)$$

$$b_k = R_k - m_k \times S_k \quad (6)$$

۲-۳- روش تصحیح رادیومتریکی RCSM [۱۰]

یکی دیگر از روش‌های تصحیح رادیومتریکی مبتنی بر مجموعه پیکسل‌های تغییر یافته RCSM است. در روش تصحیح رادیومتریکی RCSM ابتدا تعدادی پیکسل تیره و روشن در تصویر مورد نظر انتخاب می‌شوند. بدین منظور ابتدا ویژگی‌های Brightness و Greenness از باندهای تصویر مرجع با استفاده از روابط ذیل محاسبه می‌شوند (توجه شود که باندهای بیان شده (Band1, ..., Band4) در روابط زیر بر اساس داده‌های لندست^۱ طراحی شده‌اند):

$$\begin{aligned} \text{Brightness} = & 0.332 \times \text{Band1} + 0.603 \\ & \times \text{Band2} + 0.675 \\ & \times \text{Band3} + 0.262 \\ & \times \text{Band4} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Greenness} = & -0.283 \times \text{Band1} - 0.66 \\ & \times \text{Band2} + 0.577 \\ & \times \text{Band3} + 0.388 \\ & \times \text{Band4} \end{aligned} \quad (8)$$

سپس مجموعه پیکسل‌های تیره و روشن از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \text{Initial Dark set} = & [\text{greenness} \\ & \leq t'_1 \text{ and brightness} \\ & \leq t'_2] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Initial Bright set} = & [\text{greenness} \\ & \leq t'_1 \text{ and brightness} \\ & \geq t'_2] \end{aligned} \quad (10)$$

^۱ LANDSAT

که t'_1 و t'_2 مقادیر حدآستانه‌ای هستند که باید به صورت سعی و خطا تنظیم شوند. از مجموعه پیکسل‌های تیره و روشن آماره‌های ذیل استخراج می‌شوند:

B_{R_k} میانگین پیکسل‌های روشن در تصویر مرجع

B_{S_k} میانگین پیکسل‌های روشن در تصویر برای تصحیح

D_{R_k} میانگین پیکسل‌های تیره در تصویر مرجع

D_{S_k} میانگین پیکسل‌های تیره در تصویر برای تصحیح

به منظور تصحیح تصویر مدنظر ابتدا دو متغیر ذیل از آماره‌های ذکر شده در فوق توسط روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از رابطه ۳ تصویر تصحیح شده استخراج خواهد شد.

$$m_k = \frac{B_{R_k} - D_{R_k}}{B_{S_k} - D_{S_k}} \quad (11)$$

$$b_k = \frac{D_{R_k} \times B_{S_k} - D_{S_k} \times B_{R_k}}{B_{S_k} - D_{S_k}} \quad (12)$$

۲-۴- روش تصحیح رادیومتریکی ارائه شده

فرض کنیم تصویر زمان اول $\text{Image}(t_1)$ و تصویر زمان دوم $\text{Image}(t_2)$ باشند و هر یک از این تصاویر n باند طیفی داشته باشند (یعنی $\text{band}_i^{t_1}, i = 1, \dots, n$). به منظور پیاده سازی روش پیشنهادی ابتدا تصاویر اختلاف باندها با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} \text{diff}_i = & |\text{band}_i^{t_1} - \text{band}_i^{t_2}|, i \\ & = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

پس از محاسبه تصاویر اختلاف، پیکسل‌های مربوط به کلاس تغییر نکرده شناسایی می‌شوند. در این مقاله به منظور شناسایی کردن پیکسل‌های تغییر نکرده از تصویر اختلاف استفاده می‌شود. فرض اصلی روش ارائه شده این است که پیکسل‌های تغییر نکرده دارای تغییرات کمتر نسبت به پیکسل‌های تغییر کرده هستند. لذا از رابطه ۱۴ مجموعه پیکسل‌های تغییر نکرده شناسایی می‌شوند. توجه به چند نکته در این رابطه حائز اهمیت است. اول اینکه از باندهای قرمز ($\text{diff}_i^{\text{Red}}$)، آبی ($\text{diff}_i^{\text{Blue}}$) و سبز ($\text{diff}_i^{\text{Green}}$) که در اکثر سنجنده‌ها موجود هستند استفاده می‌شوند. علاوه بر این به دلیل تغییرات رادیومتریکی پیکسل‌های تغییر نکرده در برخی باندها از ترکیب سه باند استفاده می‌شود. بدین منظور از عملگر یا (or) استفاده خواهد شد به این معنی که

در این صورت احتمال رخداد و میانگین درجات خاکستری از روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$w_0 = \sum_{i=1}^k p_i \quad (19)$$

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=1}^k i \times p_i}{w_0} \quad (20)$$

$$w_1 = \sum_{i=k+1}^L p_i \quad (21)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=k+1}^L i \times p_i}{w_1} \quad (22)$$

به راحتی می‌توان برای هر مقدار حدآستانه k رابطه ذیل را نوشت:

$$w_0\mu_0 + w_1\mu_1 = \mu_T \quad (23)$$

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L ip_i \quad (24)$$

در روش حدآستانه‌گذاری اتسو به دنبال انتخاب مقداری برای حدآستانه k هستیم که تابع ذیل را حداکثر سازد:

$$\varepsilon = \frac{w_0 w_1 (\mu_1 - \mu_2)^2}{\sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i} = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2} \quad (25)$$

در رابطه فوق صورت کسر وابسته به مقدار حدآستانه است، لذا مقدار حدآستانه بهینه (k^*) از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k < L} \sigma_B^2(k) \quad (26)$$

۲-۶- آنالیز حساسیت^۲

آنالیز حساسیت یکی از گام‌های مهم در روش‌های ارائه شده در علم سنجش از دور است [۴، ۱۴]. در این تحقیق با تغییر پارامترهای حدآستانه سه روش پیش‌پردازش PIF، RCSM و روش ارائه شده در هر اجرا یک نقشه تغییر استخراج می‌شود. صحت نقشه تغییر استخراج شده با استفاده از آماره صحت کلی^۳ (به زیر بخش بعدی مراجعه شود) مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. بدین ترتیب هر نقشه تغییر بدست آمده دارای یک مقدار صحت کلی خواهد بود. بدین ترتیب حساسیت صحت کلی نقشه تغییرات به مقادیر حدآستانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

اگر اختلاف درجات خاکستری دو زمان یک پیکسل در یکی از این سه باند کمتر از مقدار حدآستانه (t_1) باشد آنگاه به عنوان پیکسل تغییر نکرده انتخاب می‌شود. پس از یافتن پیکسل‌های تغییر نکرده با استفاده از روابط ۱ تا ۳ تصحیح رادیومتریکی انجام می‌شود.

$$\begin{aligned} no_{change} &= [diff_i^{Blue} \\ &\leq t_1^{Red} \text{ or } diff_i^{Red} \\ &\leq t_1^{Green} \text{ or } diff_i^{Green} \\ &\leq t_1^{Blue}] \end{aligned} \quad (14)$$

۲-۵- روش حدآستانه گذاری اتسو^۱ [۱۳]

یکی از روش‌های شناسایی تغییرات استفاده از حدآستانه‌گذاری است [۵]. روش حدآستانه گذاری در شناسایی تغییرات با انتخاب یک مقدار حدآستانه پیکسل-های تصویر اختلاف را به دو دسته تغییر یافته و تغییر نیافته تقسیم می‌کند. به منظور ارزیابی و بررسی حساسیت صحت نتایج به پارامترهای روش‌های پیش پردازش از نتایج یک روش حدآستانه‌گذاری استفاده می‌شود. بدین منظور روش حدآستانه‌گذاری اتسو انتخاب شده است که یکی از روش‌های قوی و متداول در شناسایی تغییرات محسوب می‌شود. فرض کنیم L درجه خاکستری $i = [1, 2, \dots, L]$ در تصویر وجود دارند و همچنین تعداد پیکسل‌های مربوط به درجه خاکستری i ام برابر n_i است. در این صورت احتمال رخداد هر درجه خاکستری (p_i) در تصویر از رابطه ذیل محاسبه خواهد شد.

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad p_i \geq 0, \sum_{i=1}^L p_i = 1 \quad (15)$$

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_L \quad (16)$$

فرض کنیم پیکسل‌ها به دو کلاس تغییر نکرده (C_0) و تغییر کرده (C_1) توسط یک مقدار حدآستانه k تقسیم شده‌اند.

$$C_0 = [1, \dots, k] \quad (17)$$

$$C_1 = [k + 1, \dots, L] \quad (18)$$

^۲ Sensitivity Analysis

^۳ Overall Accuracy

^۱ Otsu

۲-۷- اعتبارسنجی

به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصل از روش شناسایی تغییرات از ماتریس خطا (ابهام) و آماره‌های مستخرج از آن استفاده خواهد شد. مطابق جدول ۱، ماتریس خطا با استفاده از پیکسل‌ها یا نمونه‌های حقیقت زمینی و نتایج روش شناسایی تغییرات در آن‌ها ساخته می‌شود. در این پژوهش مقایسه کارایی روش‌های پیش‌پردازش رادیومتریکی با استفاده از آماره صحت کلی (رابطه ۲۷) انجام می‌شود. همچنین صحت تولید کننده^۱ و صحت کاربر^۲ کلاس‌های تغییر و عدم تغییر بهترین آزمایش با استفاده از روابط ۲۸ و ۲۹ استخراج می‌شوند.

جدول ۱- نمونه‌ای از یک ماتریس خطا تولیدشده از داده‌های حقیقت زمینی و نتایج شناسایی تغییرات

حقیقت زمینی		تغییر نکرده
تغییر کرده	تغییر نکرده	
b	a	تغییر نکرده
d	c	تغییر کرده

$$OA = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad (27)$$

$$UA_{no_change} = \frac{a}{b + a} \quad (28)$$

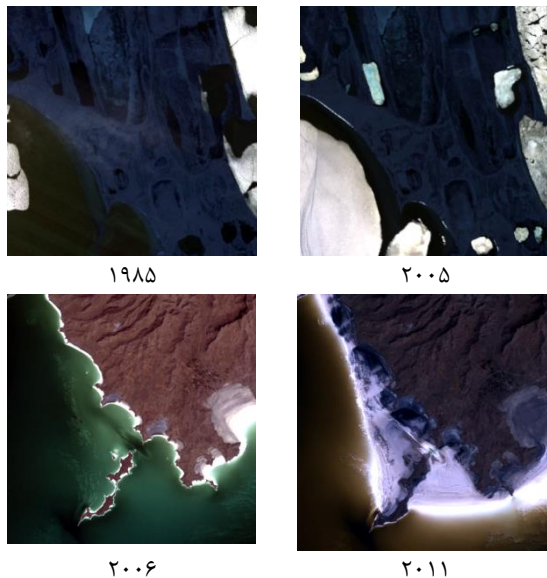
$$PA_{no_change} = \frac{a}{c + a} \quad (29)$$

که OA ، UA_{no_change} و PA_{no_change} به ترتیب صحت کلی، صحت کاربر کلاس تغییر نکرده و صحت تولید کننده کلاس تغییر نکرده هستند.

۳- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

برای اعتبارسنجی نتایج روش‌های پیش‌پردازش از دو مجموعه داده از مناطق آلاسکا و دریاچه ارومیه استفاده می‌شوند. تغییرات وسیع یخ‌های قطبی و تبدیل شدن آن‌ها به آب یا بلعکس سبب انتخاب منطقه مطالعاتی نخست شد. علاوه بر این کاهش سطح آب دریاچه ارومیه باعث شد این منطقه به عنوان منطقه مطالعاتی دوم انتخاب شود. مختصات جغرافیایی منطقه اول و منطقه دوم به ترتیب $(153^{\circ} 7' 7.64'' W, 70^{\circ} 41' 9.40'' N)$ و

$(45^{\circ} 23' 42.93'' W, 37^{\circ} 48' 12.5'' N)$ هستند. تصاویر لندست دو زمانه منطقه اول با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر در ۷ باند طیفی در تاریخ‌های ۱۹۸۵/۳/۲۰ و ۲۰۰۵/۴/۱۹ اخذ شدند. همچنین تصاویر لندست منطقه دوم با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر در ۷ باند طیفی در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۸/۳۰ و ۲۰۱۱/۸/۱۳ اخذ شدند. قسمت‌هایی از تصاویر مناطق مورد مطالعه با ابعاد ۴۰۰ در ۴۰۰ پیکسل به منظور مقایسه و ارزیابی روش‌ها انتخاب شدند [۱۵]. به منظور ارزیابی نتایج روش‌های شناسایی تغییرات، ۱۰۵۲۶۴ پیکسل عدم تغییرات و ۳۵۵۷۹ پیکسل تغییرات در منطقه اول و ۹۷۶۹۱ پیکسل عدم تغییر و ۲۷۳۹۲ پیکسل تغییر در منطقه دوم توسط یک عامل خبره از تصاویر دوزمانه انتخاب شدند. تصاویر مناطق مورد مطالعه در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر طیفی مناطق تغییرنکرده به شکلی است که به نظر می‌رسد استفاده از تصحیحات رادیومتریکی مورد نیاز است.



شکل ۲- تصاویر سال‌های ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ منطقه آلاسکا و ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ منطقه دریاچه ارومیه

۴- پیاده‌سازی و نتایج

به منظور پیاده‌سازی روش تصحیح رادیومتریکی رگرسیون خطی نیازی به تنظیم پارامتر خاصی نیست. اما برای پیاده‌سازی روش‌های تصحیح رادیومتریکی PIF و RCSM نیاز به تنظیم حدآستانه‌ها است که در ادامه به نحوه تنظیم آن‌ها خواهیم پرداخت. به منظور شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده در روش تصحیح رادیومتریکی

^۱ Producer Accuracy

^۲ User Accuracy

تصاویر دو زمان استخراج شدند تا برای تخمین پارامترهای مجهول مورد استفاده قرار گیرند. مقادیر حداقل و حداکثر صحت کلی نتایج روش RCSM در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند. برخلاف روش PIF، تغییر متغیرهای روش RCSM تغییرات اندکی در نتایج صحت کلی دارد. این موضوع نشان دهنده این است که این روش حساسیت کمتری به مقادیر حدآستانه خود دارد.

همان طور که در روش تحقیق بیان شد، روش تصحیح رادیومتریکی ارائه شده در این تحقیق به یک مقدار حدآستانه وابسته است. شکل‌های ۳ و ۴ تغییر صحت کلی را نسبت به مقدار حدآستانه نمایش می‌دهد. براساس این اشکال در مقادیر پایین حدآستانه صحت کلی پایین‌تر از مقادیر متوسط است و با افزایش مقادیر حدآستانه صحت کلی نتایج کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن پیکسل‌های تغییر کرده به پروسه تغییرات سبب کاهش صحت کلی می‌شود.

PIF مقادیر حدآستانه در یک بازه محدود تغییر یافتند تا بهترین مقادیر آنها مشخص شوند. به منظور بررسی حساسیت صحت کلی نقشه تغییرات نهایی به حدآستانه-های روش تصحیح رادیومتریکی PIF، در جدول ۲ مقادیر حداقل و حداکثر صحت کلی هر باند نمایش داده شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود تغییر میان حداقل و حداکثر صحت کلی روش تصحیح رادیومتریکی PIF بسیار بالاست. به عنوان مثال در باند اول اختلاف صحت کلی حداقل و حداکثر حدود ۶۸٪ است. این موضوع نشان دهنده حساسیت بالا روش PIF به حدآستانه‌ها است و توصیه می‌شود به منظور استفاده بهینه از این روش در تحقیقات آتی به دقت متغیرهای آن تنظیم شوند.

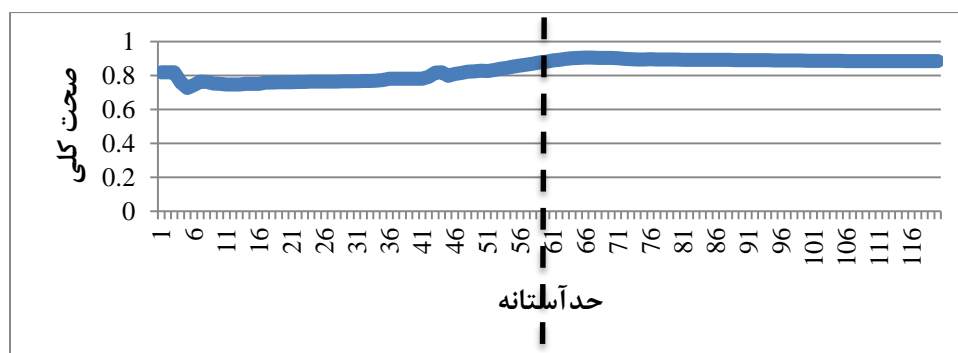
مشابه روش تصحیح رادیومتریکی PIF، حدآستانه‌های روش رادیومتریکی RCSM نیز در یک بازه محدود تغییر یافتند تا حساسیت نتایج نسبت به این پارامترهای مشخص شود. مجموعه پیکسل‌های تغییر نکرده از

جدول ۲- حداقل و حداکثر صحت کلی شناسایی تغییرات باندهای مختلف تصاویر دو منطقه از تصحیح رادیومتریکی PIF

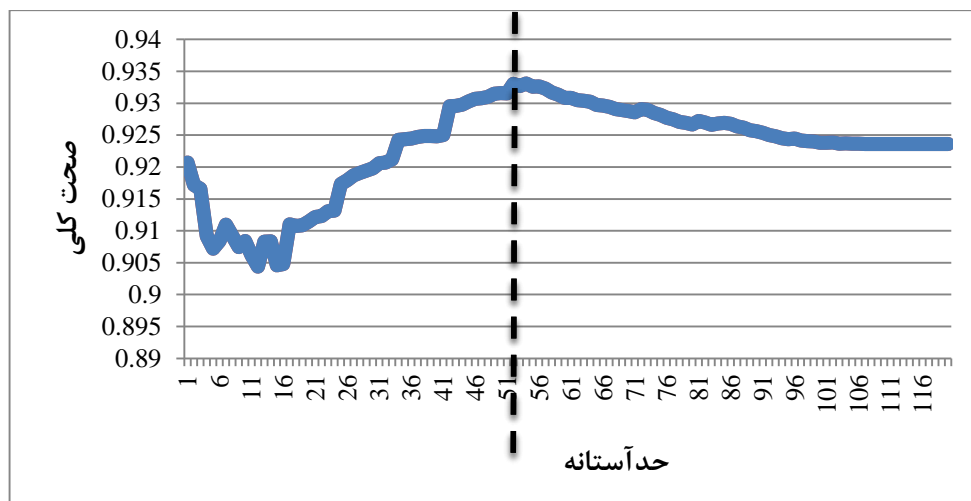
باند ۱ (٪)	باند ۲ (٪)	باند ۳ (٪)	باند ۴ (٪)	باند ۵ (٪)	باند ۶ (٪)	باند ۷ (٪)		
۲۵	۲۶	۲۵	۴۲	۲۴	۳۳		منطقه اول	حداقل صحت
۹۳	۹۳	۹۳	۸۱	۳۷	۵۸			حداکثر صحت
۹۴	۹۲	۹۲	۹۵	۱۰	۵		منطقه دوم	حداقل صحت
۹۷	۹۴	۹۱	۹۷	۸۰	۷۹			حداکثر صحت

جدول ۳- حداقل و حداکثر صحت کلی شناسایی تغییرات باندهای مختلف تصاویر دو منطقه از تصحیح رادیومتریکی RCSM

باند ۱ (٪)	باند ۲ (٪)	باند ۳ (٪)	باند ۴ (٪)	باند ۵ (٪)	باند ۶ (٪)	باند ۷ (٪)		
۸۹	۸۹	۸۶	۹۱	۳۶	۴۰		منطقه اول	حداقل صحت
۹۰	۹۰	۸۸	۹۲	۳۷	۴۱			حداکثر صحت
۹۴	۸۷	۹۲	۹۷	۴۶	۴۲		منطقه دوم	حداقل صحت
۹۴	۸۷	۹۲	۹۷	۴۶	۴۲			حداکثر صحت



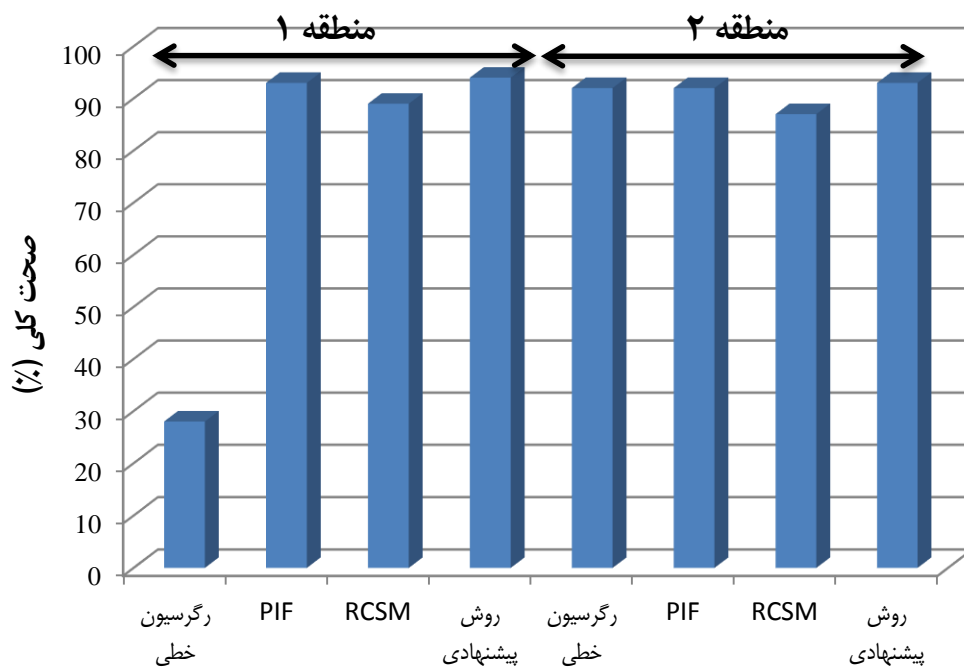
شکل ۳- مقدار حدآستانه مناسب روش پیش پردازش ارائه شده در منطقه اول



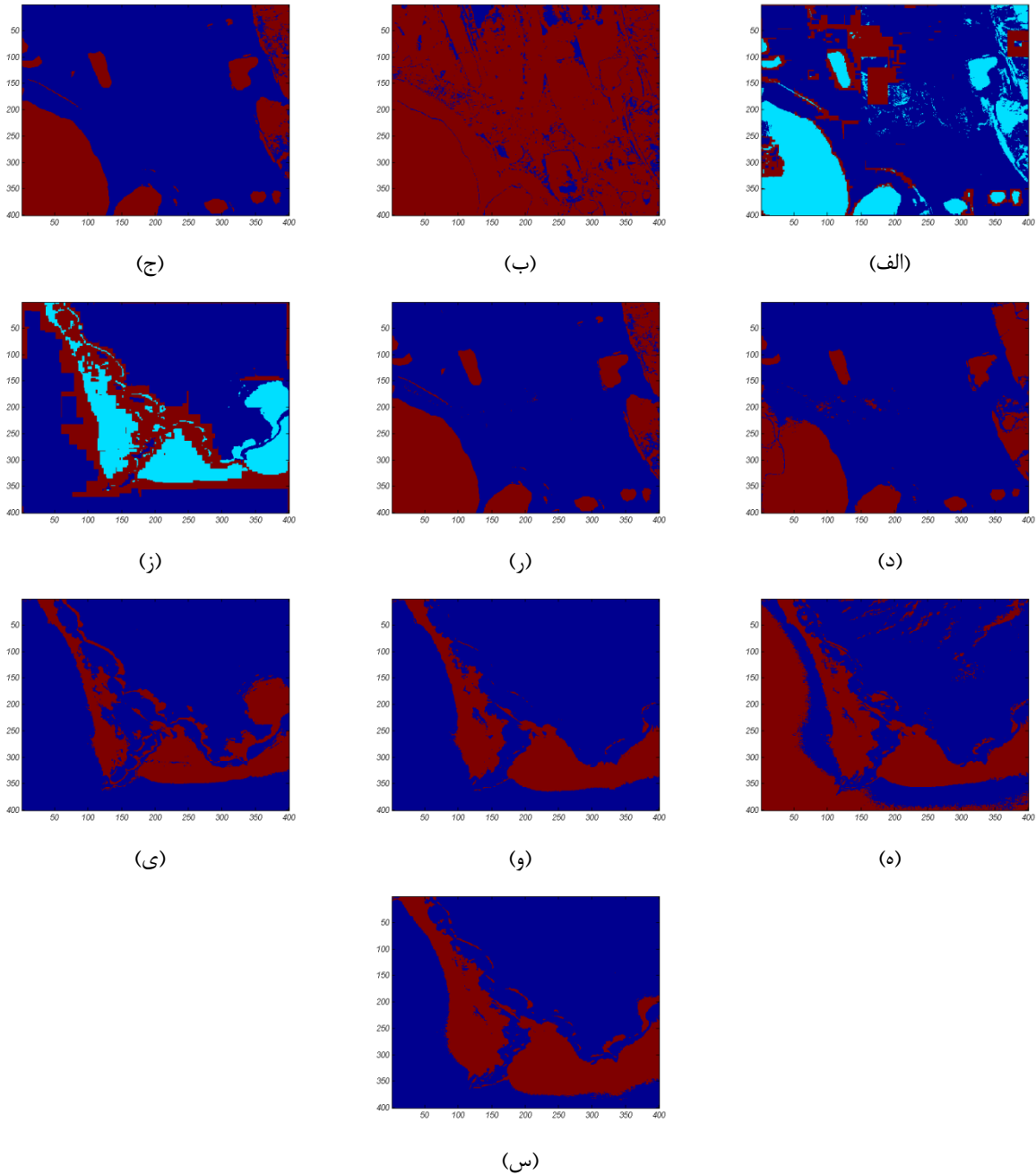
شکل ۴- مقدار حداستانه مناسب روش پیش پردازش ارائه شده در منطقه دوم

جدول ۴- صحت کلی بهترین آزمایش‌های مربوط به چهار روش پیش‌پردازش ارائه شده در این مقاله

باند ۷ صحت کلی (%)	باند ۵ صحت کلی (%)	باند ۴ صحت کلی (%)	باند ۳ صحت کلی (%)	باند ۲ صحت کلی (%)	باند ۱ صحت کلی (%)		
۶۸	۶۲	۵۶	۳۲	۲۸	۲۷	رگرسیون خطی	منطقه اول
۵۸	۳۷	۸۱	۹۳	۹۳	۹۳	PIF	
۴۱	۳۷	۹۱	۸۶	۸۹	۹۰	RCSM	
۶۴	۴۶	۹۰	۹۳	۹۴	۹۳	روش ارائه شده	
۸۱	۸۵	۶۳	۷۴	۹۲	۷۱	رگرسیون خطی	منطقه دوم
۷۹	۸۰	۹۵	۹۱	۹۲	۹۴	PIF	
۴۲	۴۶	۹۷	۹۲	۸۷	۹۴	RCSM	
۹۵	۹۵	۹۷	۶۵	۹۳	۹۶	روش ارائه شده	



شکل ۵- مقایسه صحت کلی روش‌های تصحیح رادیومتریکی در باند ۴ پیاده‌سازی شده در مناطق اول و دوم



شکل ۶- الف) داده‌های حقیقت زمینی از منطقه اول، ب) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش رگرسیون خطی در منطقه اول، ج) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش PIF در منطقه اول، د) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش RCSM در منطقه اول، ر) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش ارائه شده در منطقه اول، ز) داده‌های حقیقت زمینی از منطقه دوم، ه) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش رگرسیون خطی در منطقه دوم، و) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش PIF در منطقه دوم، ی) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش RCSM در منطقه دوم، ی) نتیجه روش شناسایی تغییرات بر روی نتایج روش پیش پردازش ارائه شده در منطقه دوم

جدول ۵- صحت کلی، صحت تولید کننده و کاربر کلاس‌های تغییر و عدم تغییر بدست آمده از نتایج بهترین باند با بالاترین صحت

OA(%)	PA _{change} (%)	UA _{change} (%)	PA _{no_change} (%)	UA _{no_change} (%)	
۹۴/۵	۹۰/۵	۸۸/۲	۹۵/۹	۹۶/۷	منطقه اول
۹۶/۶	۸۸/۹	۹۵/۵	۹۸/۸	۹۶/۹	منطقه دوم

بر اساس جدول ۴، روش رگرسیون خطی دارای پایین‌ترین کارایی میان سایر روش‌ها بوده است که این موضوع به علت درگیر شدن تمامی پیکسل‌ها اعم از تغییر کرده و تغییر نکرده در این روش است. این نتیجه با نتایج آنالیز حساسیت روش پیشنهادی نیز مطابقت دارد زیرا در روش پیشنهادی با افزایش مقدار حدآستانه کاهش صحت مشاهده شد. در مقایسه میان روش‌های تصحیح رادیومتریکی PIF، RCSM و روش ارائه شده به طور کلی بهترین کارایی از نظر صحت کلی مربوط به روش ارائه شده است. بالاترین صحت کلی از باند ۲ منطقه اول با ۹۴٪ و باند ۴ منطقه دوم با ۹۷٪ از روش پیشنهادی حاصل شد که این موضوع نشان دهنده کارایی مناسب و قدرت روش پیشنهادی است. همان طور که پیش‌تر بیان شد، سه روش پیش پردازش PIF، RCSM و روش ارائه شده مبتنی بر شناسایی پیکسل‌های تغییر نکرده هستند. در این بین براساس نتایج جدول ۴، به نظر می‌رسد روش PIF و روش ارائه شده کارایی بالاتری از روش RCSM دارند.

پس از انجام آنالیز حساسیت بر روی نتایج روش‌های پیش‌پردازش رادیومتریکی تصاویر، نقشه تغییرات با استفاده از روش حدآستانه‌گذاری اتسو و باندی که بالاترین صحت را دارا بود استخراج شد. شکل ۶ نقشه تغییرات در مناطق اول و دوم بدست آمده از چهار روش پیش‌پردازش را نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج روش رگرسیون خطی بسیار ضعیف و دارای خطا بالا است. علاوه بر این در برخی جزئیات نتایج روش پیشنهادی با دو روش PIF و RCSM متفاوت هستند که تایید کننده تفاوت صحت نتایج این روش‌ها نسبت به یکدیگر است. شکل ۵ صحت کلی روش‌های تصحیح رادیومتریکی پیاده‌سازی شده در دو منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد که می‌توان دریافت صحت کلی روش پیشنهادی بالاتر از روش‌های دیگر است. جدول ۵ صحت کلی و صحت کاربر در کلاس تغییر و عدم تغییر در دو منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد که از طریق روش پیشنهادی در بهترین باند با بالاترین صحت استخراج شده‌اند.

براساس نتایج بدست آمده از روش‌های تصحیح رادیومتریکی، کارایی روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر بالاتر بوده است. همچنین شناسایی نادرست پیکسل‌های تغییر نکرده سبب کاهش صحت کلی

شناسایی تغییرات خواهد شد. براساس نتایج، صحت کاربر شناسایی عدم تغییرات در مناطق اول و دوم به ترتیب ۹۶/۷٪ و ۹۶/۹٪ است. همچنین، صحت تولیدکننده تغییرات در مناطق اول و دوم به ترتیب ۹۰/۵٪ و ۸۸/۹٪ بدست آمد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله آنالیز حساسیت صحت کلی سه روش تصحیح رادیومتریکی متداول و یک روش جدید تصحیح رادیومتریکی انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده روش رگرسیون خطی کمترین صحت و کارایی میان روش‌های پیاده شده دارا است. همچنین روش‌های تصحیح رادیومتریکی PIF و RCSM حساسیت بالایی به تغییر متغیرهایشان دارند. بر اساس خروجی‌ها، بالاترین صحت کلی از باند ۲ منطقه اول با ۹۴٪ و باند ۴ منطقه دوم با ۹۷٪ از روش پیشنهادی حاصل شد که این موضوع نشان دهنده کارایی مناسب و قدرت آن روش است. بر اساس نتایج، با دخالت دادن پیکسل‌های تغییر کرده در فرآیند تخمین پارامترهای روش رگرسیون خطی، کاهش صحت کلی و کارایی مشاهده می‌شود.

در آینده پیشنهاد می‌شود از پیکسل‌های تغییر نکرده بدست آمده از روش پیشنهادی به عنوان ورودی روش‌های غیرخطی تصحیح رادیومتریکی نظیر شبکه‌های عصبی استفاده شود. همچنین بکارگیری روش پیشنهادی برای تصحیح رادیومتریکی تصاویر ماهواره‌ای از مناطق مختلف نظیر جنگل و کشاورزی و تصاویر با توان تفکیک مکانی بسیار بالا پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از خانم مهندس سارا خانبانی به دلیل تهیه تصاویر و داده‌های حقیقت زمینی در دو منطقه مورد مطالعه تشکر می‌کنند.

- [1] A. Singh, "Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data," *International journal of remote sensing*, vol. 10, pp. 989-1003, 1989.
- [2] P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, and E. Lambin, "Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review," *International journal of remote sensing*, vol. 25, pp. 1565-1596, 2004.
- [3] M. Janalipour and A. Mohammadzadeh, "Evaluation of effectiveness of three fuzzy systems and three texture extraction methods for building damage detection from post-event LiDAR data," *International Journal of Digital Earth*, pp. 1-28, 2017.
- [4] M. Janalipour and M. Taleai, "Building change detection after earthquake using multi-criteria decision analysis based on extracted information from high spatial resolution satellite images," *International journal of remote sensing*, vol. 38, pp. 82-99, 2017.
- [5] M. Hussain, D. Chen, A. Cheng, H. Wei, and D. Stanley, "Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 80, pp. 91-106, 2013.
- [6] R. Vázquez-Jiménez, R. N. Ramos-Bernal, R. Romero-Calcerrada, P. Arrogante-Funes, S. S. Tizapa, and C. J. Novillo, "Thresholding Algorithm Optimization for Change Detection to Satellite Imagery," in *Colorimetry and Image Processing*, ed: InTech, 2018.
- [7] Z. Zhu, "Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 130, pp. 370-384, 2017.
- [8] S. Seyedain, M. V. Zojj, Y. Maghsoudi, and M. Janalipour, "Improving the Classification Accuracy Using Combination of Target Detection Algorithms in Hyperspectral Images," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 4, pp. 161-174, 2015.
- [9] V. Sadeghi, H. Ebadi, and F. F. Ahmadi, "A new model for automatic normalization of multitemporal satellite images using Artificial Neural Network and mathematical methods," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, pp. 6437-6445, 2013.
- [10] X. Yang and C. Lo, "Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, pp. 967-980, 2000.
- [11] A. Novelli, M. A. Aguilar, and E. Tarantino, "A New Threshold Relative Radiometric Correction Algorithm (TRRCA) of Multiband Satellite Data," in *International Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services*, 2017, pp. 41-50.
- [12] H. He, X. Liu, and Y. Shen, "Relative radiometric correction of high-resolution remote sensing images based on feature category," *Cluster Computing*, pp. 1-9, 2018.
- [13] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 9, pp. 62-66, 1979.
- [14] M. Janalipour and A. Mohammadzadeh, "A fuzzy-ga based decision making system for detecting damaged buildings from high-spatial resolution optical images," *Remote Sensing*, vol. 9, p. 349, 2017.
- [15] S. Khanbani, A. Mohammadzadeh, and M. Janalipour, "Global and Local Change Detection Using K-Means Clustering Improved by Particle Swarm Optimization," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 7, pp. 75-88, 2018.