نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲

Vol.11, No.4, Winter 2024

۳۷ -۵۳

مقاله پژوهشی

کاهش اثر دودهای رقیق و گسترده در تصاویر چندطیفی از طریق اعمال تکراری باقیمانده‌های تخمین رگرسیونی به باندهای طیفی

رضا قلاوند[۱]، علیرضا صفدری نژاد[۲*]، بهزاد به‌نبیان[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش

۲- استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

چکیده

وقوع آتش‌سوزی‌های گسترده و برخاستن دودهای رقیق ناشی از آن یکی از اتفاقات پر تکرار در مناطق مختلف از سطح زمین محسوب می‌شود. پهنه‌بندی نواحی واقع در دود می‌تواند در شناسایی مناطق آلوده و مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر، باندهای طیفی مرئی در تصاویر ماهواره‌ای تحت تاثیر چنین پدیده‌هایی قرار داشته و وضوح این تصاویر را مخدوش می‌سازد. حذف اثر دود از تصاویر چندطیفی راهکاری مرسوم در افزایش وضوح تصاویر در این مناطق تلقی می‌شود. در این مقاله راهکاری تکراری مبتنی بر مدل‌های رگرسیونی بمنظور کاهش اثر دودهای رقیق از تصاویر چندطیفی پیشنهاد شده است. ایده این روش از بروز باقیمانده‌های بزرگ در بازسازی باندهای طیفی متاثر از دودهای رقیق، هنگام بکارگیری سایر باندهای طیفی در مدل‌های رگرسیونی بوجود آمده است. در روش پیشنهادی باقیمانده‌های مربوط به مدل‌های رگرسیونی پس از پالایش و محلی‌سازی به نواحی آلوده به دود اعمال شده و مشاهدات طیفی این نواحی در باندهای متاثر از دود اصلاح می‌شوند. این روش ماهیتی تکراری داشته و در هر تکرار سهمی از اثرات دود در نواحی آلوده حذف می‌گردد. این راهکار ضمن حفظ محتوای رادیومتریکی در مناطق پاک تصویر، افزایش محسوس وضوح در مناطق آلوده به دود را بهمراه داشته است. نتایج بکارگیری این روش در تاثیرپذیرترین باندهای طیفی حاکی از افزایش ضرایب همبستگی میان تصاویر اصلاح شده و تصاویر عاری از دود بوده که مقدار عددی آن بطور متوسط ۱۴٫۲ درصد براورد شده است. این روش صرفاً در مورد دودهای رقیق با زمینه قابل رؤیت قابل استفاده است.

کلید واژه‌ها : رگرسیون خطی، دود رقیق، تصاویر چندطیفی، پخش نور، اتمسفر، بردار باقیمانده‌ها.

* نویسنده مکاتبه کننده: استان مرکزی، شهرستان تفرش، کیلومتر ۵ جاده تهران، دانشگاه تفرش.

تلفن: ۰۹۱۲-۳۲۵۸۸۵۲

Email: safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

۱- مقدمه

تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی ابزاری پرکاربرد در مطالعهٔ پدیده‌های سطح زمین محسوب می‌شوند. صرف‌نظر از راهکارهای محاسباتی توسعه یافته، تفسیر بصری، یکی از رویکردهای مرسوم در تحلیل این تصاویر قلمداد می‌شود . ابر، غبار، مه و دود عواملی تلقی شده که وضوح تصاویر ماهواره‌ای را مخدوش ساخته و کاهش تفسیرپذیری پدیده‌های واقع در سطح زمین را بدنبال دارند. این عوامل با دو نمود مات شدگی و پنهان‌شدگی در تصاویر اتفاق می‌افتند. ابرهای ضخیم، مه و دودهای غلیظ عموماً باعث پنهان‌شدگی کامل سطح زمین شده که این موضوع منجر به تخریب کامل محتوای رادیومتریکی رسیده از سطح می‌گردد. اما غبار، دود و ابرهای رقیق در بیشتر مواقع باعث مات شدگی تصاویر شده و کماکان محتوای رادیومتریکی تضعیف شده‌ای از سطح زمین در این تصاویر قابل رؤیت خواهد بود[۱].

حذف یا کاهش اثرات جوی در ثبت تصاویر ماهواره‌ای یک اقدام رایج در آماده‌سازی آنها برای گام‌های بعدی پردازشی است [۲]. اثرات جوی با تضعیف یا پراکنش شار تابشی رسیده به سطح و همچنین نور بازتابی از آن، محتوای طیفی ثبت شده در تصاویر ماهواره‌ای را دچار اختلال می‌سازند. این اختلال بازیابی بازتابندگی سطح را بعنوان یک کمیت فیزیکی در کاربردهای سنجش از دوری با عدم قطعیت روبرو می‌سازد. روش‌های مختلفی به‌منظور تصحیح اتمسفری برای تصاویر ماهواره‌ای توسعه یافته است [۳]. این روش‌ها به دو دستهٔ کلی روش‌های تجربی و فیزیکی تفکیک می‌شوند[۴]. بهره‌گیری از پدیده‌هایی با رفتار طیفی معلوم و یا تنظیم پارامترهای مرتبط با وضعیت جو در مدل‌های انتقال انرژی به ترتیب سنگ‌بنای روش‌های مرسوم تجربی و فیزیکی محسوب می‌شوند [۴]. با پیش‌فرض یکنواختی شرایط جوی در یک صحنه از تصاویر ماهواره‌ای، تصحیحات اتمسفری به شکلی سراسری به این تصاویر اعمال می‌شوند [۵]. این رویکرد مانع از اصلاح اثرات محلی مانند غبار، دود، ابر و مه (همگی بصورت رقیق) در تصاویر می‌گردد. از این رو، پس از تصحیحات اتمسفری مرسوم کماکان پدیده‌های ذکر شده در فضای تصویر قابل رؤیت خواهند بود.

دودهای رقیق در اشکال محلی عموماً به دلایلی مانند آتش‌سوزی پوشش‌های گیاهی، مصرف سوخت‌های فسیلی در کارخانجات و نیروگاه‌ها و فعالیت‌های آتش‌فشانی اتفاق می‌افتند [۶]. امواج الکترومغناطیس در هنگام عبور از محیط آلوده به دود با جذب و پراکندگی مواجه می‌شوند [۷]. پدیدهٔ جذب، تیرگی تصویر را بدنبال داشته و در هنگام رخداد پراکنش، دود شبیه به ابر و مه دیده می‌شود [۸ و ۹]. پراکنش نور رخدادی وابسته به فرکانس بوده که افزایش آن با تشدید پراکندگی همراه است [۹]. دودهای رقیق با ماهیت پراکنده کننده نور عموماً بصورت هاله‌ای روشن در تصویر دیده می‌شوند [۷ و ۹]. روند کاهشی شدت پراکندگی نور با کاهش فرکانس به رِقّت و دانه‌بندی ذرات دود بستگی دارد. با این وجود بیشترین اثرپذیری در باندهای آبی و کمترین اثرپذیری در باندهای طیفی مادون‌قرمز اتفاق می‌افتد [۱۰ و ۱۱]. در صورتیکه حوزهٔ تاثیر دود سراسر صحنهٔ تصویر نباشد؛ روش‌های اصلاح جوی مرسوم قابلیت افزایش وضوح تصویر در این نواحی را برخوردار نیستند. از سوی دیگر، تشدید غلظت دودها نیز مانع دریافت نور رسیده از سطح شده و امکان اجرای اقدامات اصلاحی را ناممکن می‌سازد. اما در شرایطی که پس‌زمینهٔ دودهای محلی قابل رؤیت باشد، می‌توان انتظار بهبود محتوای تصویر را با کاهش اثرات دود داشت.

تاکنون در حوزهٔ آشکارسازی و اصلاح اثر دود، ابر، مه و غبارهای رقیق راهکارهای مختلفی توسعه یافته است. ریشتر (۱۹۹۶) روشی بر پایه تناظریابی هیستوگرام نواحی آلوده به مه با تصاویر فاقد مه به منظور کاهش اثر مه‌آلودگی در تصاویر چندطیفی ارائه نمود [۱۲]. از آنجاییکه تناظریابی هیستوگرام در زمره روش‌های بارزسازی قرار داشته و اصلاحات آن بصورت سراسری به تصویر اعمال می‌شود؛ این روش منجر به حذف کامل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

اثر مه در تصاویر نشده و هنگام وقوع تغییرات پوشش زمین و یا تمایز در راستای تابش خورشید در دو صحنه پاک و آلوده به مه می‌تواند نتایج بازیابی کمیات فیزیکی مرتبط با شار تابشی رسیده به سنجنده را مخدوش سازد [۸]. لیانگ و همکاران (۲۰۰۱) راهکاری به منظور کاهش اثرات جوی و مه در باندهای مرئی تصاویر ماهواره‌ای لندست از رویکردی مبتنی بر خوشه‌بندی فضای ویژگی استفاده کردند. در این تحقیق فضای ویژگی به کمک باندهای طیفی بدون تاثیر از مه خوشه‌بندی شده و در ادامه، افزایش شباهت مولفه‌های مربوط به باندهای طیفی اثرپذیر از مه در مناطق آلوده به‌کمک آماره‌های مستخرج در نواحی پاک تصویر به ازای هر خوشه از تصویر دنبال شده است [۱۳].

شناسایی و بکارگیری پدیده‌های تاریک در تصاویر سنجش از دوری یکی دیگر از روش‌های توسعه یافته بمنظور کاهش اثرات جوی محلی همچون دود و مه است. در این روش‌ها نواحی تیره تصویر (سایه، آب و سایر عوارض با بازتابندگی اندک) بصورت محلی شناسایی شده و در ادامه محتوای رادیومتریکی ثبت شده در این مناطق بعنوان اثرات جوی تلقی شده و مقدار محاسبه شدهٔ آن بصورت محلی از تصویر کسر می‌شود [۸، ۱۴ و ۱۵] . بعنوان مثال ماکارائو و همکاران (۲۰۱۴) روشی بر پایه شناسایی پدیده‌های تاریک در تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی متوسط و بالا به‌منظور کاهش اثر مه پیشنهاد دادند. در این روش، موقعیت‌های مناسب جهت بازیابی نقشه ضخامت رادیومتریکی مه پس از حذف نواحی روشن تصویر و به کمک جستجوی محلی پدیده‌های تاریک شناسایی شده و روشنایی این نواحی پس از کسر متوسط روشنی نواحی تاریک بعنوان اثرات جوی لحاظ می‌شود. درونیابی مکانی و در ادامه لحاظ نمودن روند کاهشی اثرات رادیومتریکی مه با افزایش طول موج باندهای طیفی منجر به برآورد اصلاحات در مناطق آلوده به مه شده است [۸]. عدم قطعیت‌های مرتبط به شناسایی محلی مناطق تیره و بازیابی محتوای رادیومتریکی صحیح این نواحی از چالش‌های این تحقیق به‌شمار می‌رود. خو و همکاران (۲۰۱۵) نیز از روش‌های تخمین تنک[۱] بمنظور بازیابی محتوای رادیومتریکی مناطق آلوده به مه و دود استفاده کردند. ایشان ابتدا شرایط بازیابی مجزای تصویر پاک و آلوده به مه را به کمک روش‌های یادگیری لغتنامه[۲] فراهم آورده و سپس تصویر اصلاح شده را به کمک بکارگیری همزمان لغتنامه تصویر پاک و بردارهای تخمین تنک تصویر آلوده بازیابی نمودند [۱۶]. این روند مستلزم تامین شرایط مشابه از نظر ابعاد و جایگاه برای اتم‌های متناظر در دو لغتنامه بوده و بازسازی سراسری تصویر در این روش احتمال تخریت محتوای رادیومتریکی در نواحی پاک تصویر را به‌دنبال دارد. مجددا خو و همکاران (۲۰۱۶) تولید نقشهٔ ضخامت رادیومتریکی دود را بر پایه روش‌های تجزیه خطی مقید[۳] به اجرا رساندند. عضو انتهایی[۴] دود از غلیظ‌ترین نقطهٔ دود بصورت دستی انتخاب شده و سایر اعضای انتهایی تصویر از طریق روش‌های نظارت نشده شناسایی شده‌اند. محاسبهٔ مقید سهم تعلق اعضای انتهایی و به تبع آن حذف سهم مربوط به عضو انتهایی دود راهکار حذف دود در این روش می‌باشد [۶]. وجود تنوع در بازتابندگی باندهای طیفی غیر متاثر از دود واقع در بستر دود، انتخاب یک عضو انتهایی برای توصیف رفتار طیفی آن را با عدم قطعیت روبرو می‌سازد. فتحی و همکاران (۲۰۲۰) راهکاری تکراری مبتنی بر بکارگیری خوشه‌بندی و مدل‌های رگرسیونی به‌منظور آشکارسازی پهنهٔ دودهای رقیق در تصاویر چندطیفی ارائه دادند. این روش بر پایه آستانه‌گذاری خودکار بردار

[۱] *Sparse Representation*

[۲] *Dictionary Learning*

[۳] *Constrained Linear Unmixing*

[۴] *End member*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

باقیمانده‌های تخمین رگرسیونی باند طیفی آبی به کمک سایر باندهای طیفی بوده که نشان داد مناطق آلوده به دود باقیمانده‌های بزرگتری را ایجاد می‌سازند [۱۷]. ختکری و همکاران (۲۰۲۰) نیز راهکاری به‌منظور شبیه‌سازی باندهای طیفی مرئی در زمان وقوع مه به کمک باندهای طیفی مادون قرمز ارائه دادند. ایشان با فرض وجود همبستگی بین باندهای طیفی مرئی و مادون قرمز، ضرایب یک مدل رگرسیونی را به کمک نواحی عاری از مه براورد ساختند. در زمان وقوع مه، ضرایب محاسبه شده جهت شبه‌سازی تصویر مرئی از باندهای طیفی مادون قرمز استفاده شده است [۷]. این رویکرد عدم‌قطعیت‌های مربوط به بازیابی دقیق باندهای مرئی را به سراسر تصویر تسری می‌دهد. توسعه راهکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی عمیق نیز از جمله رویکردهای حذف و یا کاهش اثرات دود و مه رقیق از تصاویر سنجش از دوری محسوب شده که امروزه مورد اقبال بیشتری قرار دارند. با اینحال دسترسی به حجم بالای داده‌های آموزشی توام با تنوع کافی در پوشش زمین در مناطق آلوده به دود یا مه یکی از چالش‌های بکارگیری روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق محسوب می‌شود [۱۸، ۱۹ و ۲۰].

مطابق با تحقیقات مرور شده، راهکارهای توسعه یافته به‌منظور آشکارسازی و حذف اثر دود و مه رقیق در تصاویر چندطیفی از تنوع در رویکردهای اجرایی برخوردار بوده‌اند. بکارگیری روش تناظریابی هیستوگرام، شناسایی محتوای رادیومتریکی تصویر برای پدیده‌های تاریک، بکارگیری روش‌های تجزیهٔ طیفی و تخمین تنک و استفاده از روش‌های تخمین رگرسیونی، برخی از راهکارهای توسعه یافته در این حوزه محسوب می‌شوند. صرفنظر از محدودیت‌های ذکر شده در مورد هر رویکرد، ماهیت سراسری اصلاح تصویر، نیاز به وجود تصاویر پاک از منطقه، ضرورت شناخت پوشش‌های منطقه به‌منظور شناسایی عناصر انتهایی و همچنین عدم مشارکت تمام باندهای طیفی در روند اصلاح باندهای آلوده محدودیت‌هایی در روش‌های مرور شده محسوب شده که در طراحی روش پیشنهادی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در این مقاله روشی با هدف کاهش اثرات دودهای رقیق در تصاویر چندطیفی بر پایه مدل‌های خطی رگرسیونی پیشنهاد شده است. دست‌آویز اصلی این روش، بروز خطاهای تخمین بزرگتر در مدل‌های رگرسیونی برای مناطق آلوده به دود هنگام بازسازی باندهای متاثر از دود توسط سایر باندهای طیفی است. این ایده به شکل متمایزی در گذشته منجر به آشکارسازی پهنهٔ دود شده است [۱۷]. در روش پیشنهادی محتوای رادیومتریکی باندهای متاثر از دود در روندی متوالی و بصورت محلی به کمک مقادیر باقیمانده‌های براورد شده از مدل‌های رگرسیونی اصلاح می‌شوند. کاهش اثر دود ضمن بهبود وضوح تصاویر در این مناطق می‌تواند زمینهٔ مطالعه رفتار طیفی دود در باندهای طیفی سنجنده‌های چندطیفی را فراهم آورد. بعبارت بهتر، اختلاف تصاویر حاوی دود و تصاویر اصلاح شده می‌تواند در تخمین میزان تضعیف و یا تشدید رادیانس طیفی رسیده ناشی از این آلاینده‌ها موثر باشد. از سوی دیگر، بدیهی است که استفاده از تصاویر اصلاح شده نیز می‌تواند قابلیت اعتماد مربوط به کاربردهای سنجش از دوری همانند طبقه‌بندی، آشکارسازی تغییرات و همچنین استخراج اطلاعات کمی از تصاویر سنجش از دوری را بهبود بخشد.

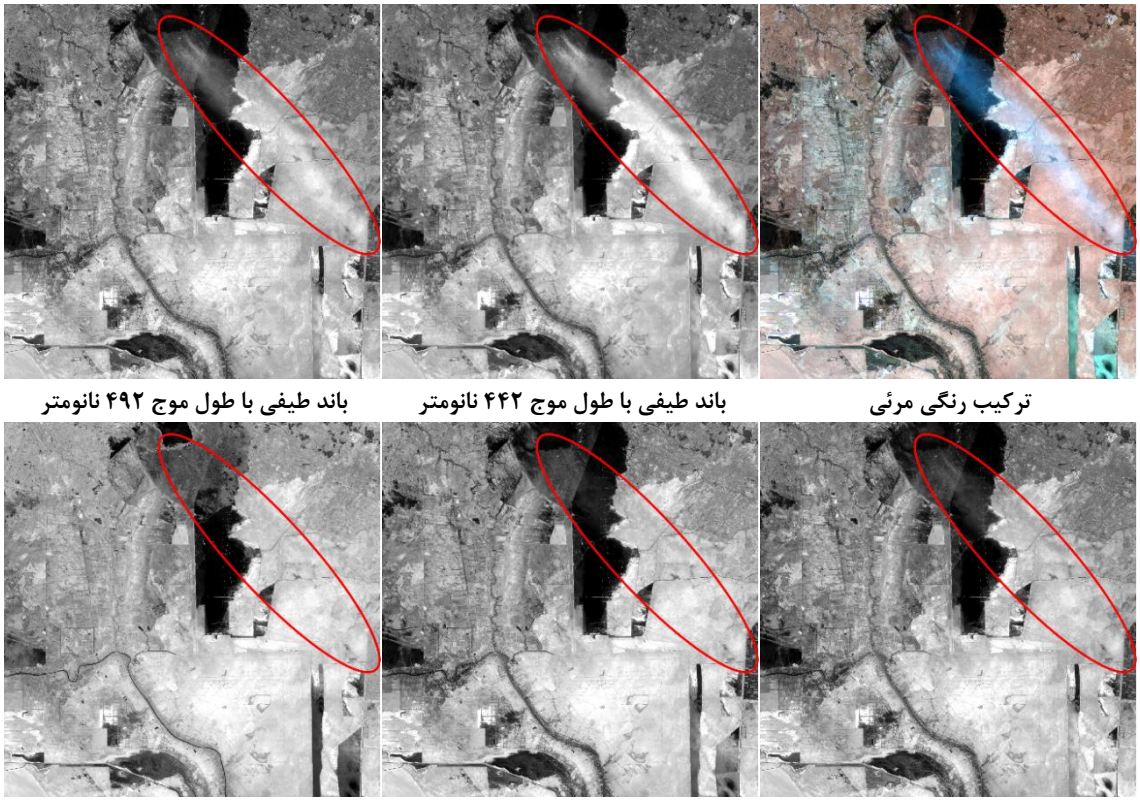
۲- روش‌شناسی

دودهای رقیق ناشی از سوختن به دو شکل جاذب و پراکنده کننده نور ظاهر می‌شوند. جنس، دانه‌بندی ملوکول‌های دود و میزان رقیق بودن آنها عوامل موثر بر چگونگی نمایان شدن آنها خواهد بود. پراکندگی نور هنگام عبور از محیط آلوده به دود منجر به روشن دیده شدن آن می‌شود [۱۱]. در این شرایط دود بصورت لکه‌های سفید یا آبی رنگی در فضا دیده می‌شود. وابستگی شدت پراکنش به طول موج باعث شده که تمامی باندهای طیفی تصاویر چندطیفی اثرپذیری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

مشابهی را نسبت به دودهای رقیق نداشته باشند. بـا در نظر گرفتن ارتباط معکوس میان شدت پـراکنش نـور و طول موج، انتظار می‌رود که بانـدهای طیفـی بـا طـول موج کوتاه‌تر اثرات بارزتری را در قیاس با سایر بانـدهای طیفی نشان دهند.

شکل (۱) دود ناشی از آتش‌سوزی بخـش‌هـای خشـک شـده از تـالاب هـورالعظیم در منـاطق مـرزی میـان کشـورهای ایـران و عـراق را در تصـاویر مـاهواره‌ای سنتینل-۲ نشان می‌دهد. ناحیه آلـوده بـه دود در ایـن تصـاویر بـا کـادر قرمـز مشـخص شـده‌انـد.



شکل ۱: نحوهٔ رخداد دود حاصل از آتش‌سوزی تالاب هورالعظیم در باندهای طیفی سنجندهٔ فضایی سنتینل-۲ (ناحیهٔ آلوده به دود در این تصاویر با کادر قرمز رنگ مشخص شده‌اند.)

همانطور که در شکل(۱) پیداسـت، بانـدهای طیفـی بـا طول‌موج‌های کوتاهتر اثرپذیری بیشتری نسبت بـه دود ناشی از آتش‌سوزی داشته و در طول موج‌هـای بلنـدتـر این اثرپذیری کاهش یافته و یا بطور کامل از بین رفتـه است. یکی از راهکارهای کاهش نویز در تصاویر چند/ابر طیفـی، بکـارگیری تبـدیلات خطـی اسـت. روش‌هـای مبتنی بر تحلیل مولفه‌های اصلی، دسته‌ای از تبـدیلات پرکاربرد خطی محسوب شده که تاکنون با هدف حـذف یـا کـاهش نـویز در تصـاویر چنـدطیفی و یـا ابرطیفـی استفاده شده‌اند. در این روش‌ها، بزرگی نگاشـت خطـی (ضرب داخلی) نمونه‌های واقع در فضای ویژگی (پس از انتقال به مرکز ثقـل) بـه راسـتاهایی بـا جهـات معلـوم به‌عنوان شدت نویز تعبیر شده و اصلاح اثر نویز با حذف مولفه‌های هم‌جهت با راستا(ها)ی نویز به اجرا می‌رسـد. در این روش‌ها، راستای نویز به کمـک بردارهـای ویـژه ماتریس‌های متقارن و مثبت معین مستخرج از تصـاویر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

چند/ابر طیفی تعیین می‌شوند[۲۱]. استفاده از مدل‌های رگرسیونی نیز در زمره روش‌هایی تلقی شده که در براورد نویز تصاویر سنجش از دوری استفاده شده‌اند [۲۱ و۲۲]. براورد هر باند طیفی به‌کمک ترکیب خطی از سایر باندهای طیفی، بصورت مجزا برای خوشه‌های فضای ویژگی و یا بصورت سراسری، راهکارهای تخمین نویز در روش‌های رگرسیونی هستند. در این روش‌ها با منطبق‌ساختن توزیع نمونه‌های فضای ویژگی بر مکان هندسی یک ابرصفحه، تصاویر عاری از نویز تولید می‌شود.

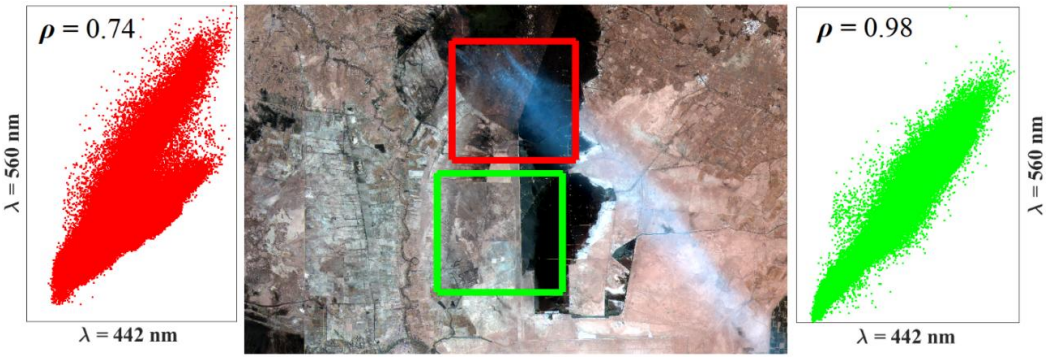
در این مقاله با مبنا قرار دادن مدل‌های رگرسیونی خطی، روشی به منظور کاهش اثر دودهای رقیق بصورت محلی پیشنهاد شده است. دود رقیق با ماهیت پراکنده‌کنندهٔ نور، شار بازتابی رسیده به سنجنده را افزایش می‌دهد. مطابق با رابطهٔ (۱)، شدت نور رسیده به سنجنده (Φ_s) در این شرایط ترکیبی از شدت نور بازتابی از سطح زمین (Φ_e)، نور پخش شده توسط دود رقیق (Φ_{ds}) و نویز (r) بوده که همه این عوامل وابسته به طول موج (λ) خواهند بود.

رابطه(۱) $$\Phi_s(\lambda) = \Phi_e(\lambda) + \Phi_{ds}(\lambda) + r(\lambda)$$

نویز در رابطه(۱)، (r) شامل تمامی عوامل مربوط به سنجنده و محیط تلقی شده که برهم‌زننده موازنه‌ی شار بازتابی رسیده به سنجنده با مجموع شار بازتابی سطح و نور پراکنده شده توسط دود رقیق باشند. عواملی همچون رفتار غیرخطی آشکارساز، نسبت سیگنال به نویز و سایر اختلالات جوی ناشی از جذب و پراکندگی نور در مسیر دریافت آن توسط سنجنده می‌باشند. در مدل‌های رگرسیونی یک باند طیفی (بعنوان مثال λ_i) به‌کمک ترکیبی خطی از سایر باندهای طیفی ($\lambda_j,\ j \neq i$) توسط رابطه(۲) برآورد می‌شود.

رابطه(۲) $$\Phi_s(\lambda_i) = a_0 + \Sigma_{j \neq i}\, a_j\, \Phi_s(\lambda_j)$$

در رابطهٔ (۲)، ضرایب مدل رگرسیون خطی با a نمایش یافته است. در صورت وجود مجاورت طیفی بالا بین باندهای طیفی، همبستگی بین باندی افزایش یافته و مدل‌های رگرسیونی تخمین‌های دقیق‌تری را تامین می‌سازند. نویز و سایر عوامل مخربی که همبستگی باندهای طیفی مجاور را مخدوش سازند، باقیمانده‌های بزرگتری را در روند تخمین رگرسیونی بوجود می‌آورند. شکل(۲) نمودار پراکندگی درجات خاکستری دو باند طیفی ۴۴۲ و ۵۶۰ نانومتر در دو منطقهٔ آلوده به دود و پاک را نشان می‌دهد.



شکل ۲: توزیع درجات خاکستری در باندهای طیفی ۴۴۲ و ۵۶۰ نانومتر در دو منطقهٔ پاک (کادر سبز) و آلوده به دود (کادر قرمز)

کاهش همبستگی خطی (ρ) در منطقهٔ آلوده به دود در مقایسه با ناحیهٔ پاک نشانه‌ای از کاهش توان رگرسیون‌های خطی در پیش‌بینی محتوای رادیومتریکی این مناطق است. این موضوع در این تحقیق دست‌مایه طراحی راهکار اصلاح رادیومتریکی مناطق آلوده به دودهای رقیق در باندهای طیفی متاثر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

از آن شده است.

اصلاح یک باند طیفی از طریق باقیمانده‌های تخمین زده شده در مدل‌های رگرسیونی خطی هنگام بکارگیری سایر باندهای طیفی، باعث انطباق یافتن توزیع تمامی نمونه‌های موجود در فضای ویژگی بر مکان هندسی یک ابرصفحه می‌گردد. از این رو، پس از اصلاح یک باند طیفی، تکرار این راهکار برای سایر باندهای طیفی منجر به براورد بردار باقیمانده‌ها نخواهد شد. از سوی دیگر، اثرپذیری مشابه باندهای طیفی مجاور از دودهای رقیق باعث شده که روند اصلاحی مذکور قادر به حذف یا کاهش محسوس اثرات دود نباشد. در این شرایط، سهمی از دود بواسطهٔ رخداد آن در باندهای طیفی مجاور بازسازی خواهد شد. چالش دیگر آنکه، افتراق طیفی بیشتر در سنجنده‌های چندطیفی در قیاس با سنجنده‌های ابرطیفی، با کاهش همبستگی باندهای طیفی مجاور، عدم قطعیت‌های بیشتری را در مدل‌های رگرسیونی بهمراه دارد. این موضوع احتمال بروز اصلاحات رادیومتریکی نامناسب را در نواحی پاک تصویر بهمراه خواهد داشت. با در نظر گرفتن چالش‌های ذکر شده، راهکار پیشنهادی می‌بایست از سه ویژگی: ۱- اصلاح محتوای رادیومتریکی در نواحی محتمل به آلودگی، ۲- عدم مشارکت نواحی محتمل به آلودگی در براورد ضرایب مدل‌های رگرسیونی و ۳- حفظ توزیع اولیه نمونه‌های فضای ویژگی در مناطق پاک، برخوردار باشد. با این سه ویژگی انتظار می‌رود که آسیب حداقلی به نواحی پاک تصویر تحمیل شده و قابلیت اصلاح رادیومتریکی بیش از یک باند طیفی در روند اعمال باقیمانده‌های بدست آمده از مدل‌های رگرسیونی فراهم آید.

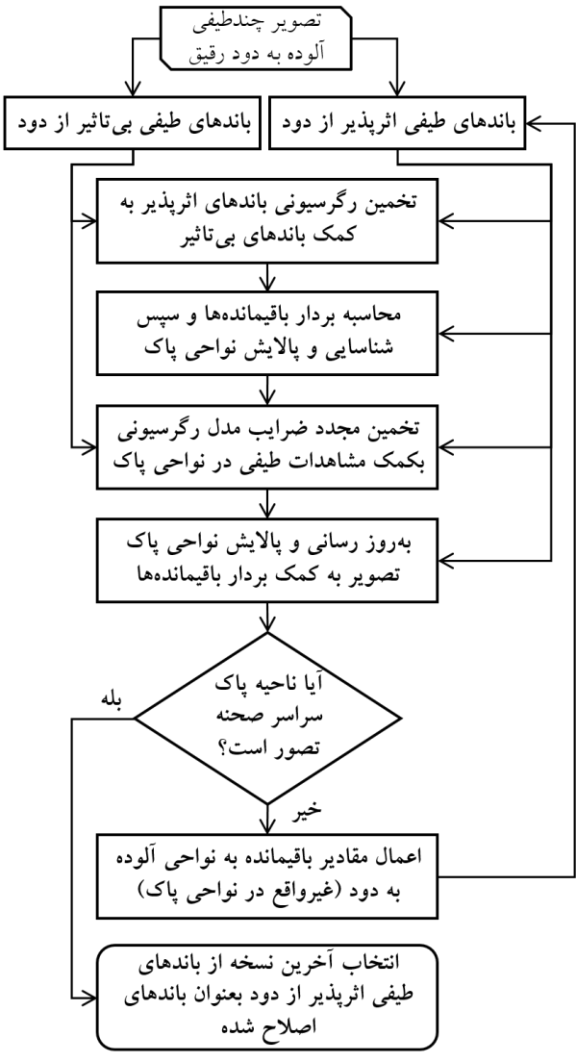
در روش پیشنهادی تلاش شده تا مناطق محتمل به دود بوسیلهٔ بزرگی باقیمانده‌های تخمین رگرسیونی باندهای متاثر از دود توسط باندهای طیفی با تاثیرپذیری اندک از دود شناسایی گردند. سپس با حذف این نواحی از روند براورد مجدد ضرایب مدل رگرسیونی، باقیمانده‌های محاسبه‌شده به این نواحی اعمال می‌گردند. این روند مانع از انطباق سراسری نمونه‌های فضای ویژگی به مکان هندسی یک ابرصفحه شده و صرفاً موقعیت نمونه‌های محتمل به دود را اصلاح می‌سازد. روندنمای ارائه شده در شکل (۳) شمای کلی از گام‌های اجرای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مطابق با روندنمای ارائه شده در شکل (۳)، روش پیشنهادی ماهیتی تکراری داشته و در هر مرحله، محتوای رادیومتریکی مناطق محتمل به آلودگی در باندهای اثرپذیر از دود شناسایی و اصلاح می‌شوند. این روند تا زمان عدم شناسایی مناطق محتمل به آلودگی تکرار می‌گردد. مطابق با این روندنما، باندهای طیفی به دو دستهٔ باندهای تاثیرپذیر و بی‌تاثیر از دود تفکیک شده و در ادامه محتوای رادیومتریکی هر باند اثرپذیر توسط ترکیبی خطی از باندهای بی‌تاثیر تخمین زده می‌شود. بزرگی باقیمانده‌های مربوط به تخمین باندهای اثرپذیر، مبنای تفکیک اولیه از نواحی پاک و آلوده به دود بوده که به‌کمک آستانه‌گذاری شناسایی می‌شوند. به منظور ایجاد شرایط تخمین پایدار، در هر تکرار از روش پیشنهادی مجدداً ضرایب رگرسونی پس از حذف مناطق محتمل بر دود براورد شده تا اثر این نواحی در تخمین آنها کمتر گردد. پس از آستانه‌گذاری مجدد بر مقادیر نرمال‌شده از باقیمانده‌ها، نواحی محتمل بر آلودگی بر اساس بزرگی باقیمانده‌ها شناسایی و مقادیر باقیمانده‌ها به محتوای رادیومتریکی این نواحی اعمال می‌گردد. پالایش نواحی پاک تصویر یکی از مهمترین بخش‌های روند پیشنهادی محسوب شده که به کمک عملگر ریخت‌شناسی بستن[1] اعمال می‌گردد. به‌عبارت بهتر، در هر مرحله از آستانه‌گذاری مقادیر باقیمانده‌های تخمین رگرسیونی یک تصویر باینری تولید شده که قطعات کوچک و غیرمتصل در آن هنگام اعمال عملگر ریخت‌شناسی بستن حذف می‌گردند.

[1] *Closing Morphological Operator*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]



شکل ۳: روندنمای روش پیشنهادی به‌منظور کاهش اثر دودهای رقیق در تصاویر چندطیفی

ماهیت بهم‌پیوسته و گسترده دود دلیل حذف قطعات تصویری کوچک در روند آستانه‌گذاری بوده‌اند. در ادامهٔ این بخش با هدف تبیین دقیق‌تر از روند اجرای روش پیشنهادی، شبه‌کد مربوط به گام‌های اجرایی این روش با هدف تسهیل در پیاده‌سازی مجدد آن در الگوریتم(۱) گزارش شده است.

داده‌های ورودی به این الگوریتم: ۱- تصویر چندطیفی ($[M]_{n\times b}$) که باندهای طیفی آن به شکل بردارهای ستونی مرتب شده ($[m_1,\ m_2,\ ...,\ m_b]$)، ۲- ابعاد ماتریس تصویر (سطرها و ستون‌ها) جهت بازیابی مجدد چیدمان اولیه تصویر، ۳- شماره باندهای طیفی متاثر از دود (بعنوان مثال باندهای طیفی شماره ۱، ۲ و ۳) در قالب مجموعه $\{A\}$ و ۴- شماره باندهای طیفی با اثرپذیری اندک نسبت به دود (بعنوان مثال باندهای طیفی (۴، ۵ تا b) در قالب مجموعهٔ $\{B\}$ هستند. شماره‌گذاری باندها متناسب با ترتیب چیدمان آنها در ساختار ماتریس M می‌باشند. خروجی روش پیشنهادی نیز باندهای طیفی اصلاح شده خواهند بود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

الگوریتم ۱: شبه‌کد مربوط به روش تکراری کاهش اثر دود از محتوای رادیومتریکی باندهای طیفی متاثر از آن

Inputs:

Multispectral image contaminated with dilute smokes $([M]_{n\times b} = [m_1, m_2, \ldots, m_b])$
Multispectral image size {(row, column) | row × column = n}
Spectral band numbers affected by smoke $A = \{1, 2, \ldots\}$
Spectral band numbers not affected by smokes $B = \{5, 6, \ldots, b\}$

Outputs:

Refined affected bands

FOR i in all {A} members
| $[M^B] \leftarrow$ *multispectral image bands corresponding to the B set*
| *BEGIN*
| | $V_i = [\mathbf{1}, [M^B]] \times ([\mathbf{1}, [M^B]]^T \times [\mathbf{1}, [M^B]])^{-1} \times [\mathbf{1}\ [M^B]]^T \times m_i - m_i$
| | $CleanMask_i \leftarrow V_i <$ *estimated threshold via the standard Otsu method*
| | *Refine the* $CleanMask_i$ *with the closing morphological operator*
| | $[M^B]^c \leftarrow$ *Non affected spectral bands located in the* $CleanMask_i$
| | $m_i^c \leftarrow i^{th}$ *band of {A} located in the* $CleanMask_i$
| | $\Delta = ([\mathbf{1}^c, [M^B]^c]^T \times [\mathbf{1}^c, [M^B]^c])^{-1} \times [\mathbf{1}\ [M^B]^c]^T \times m_i^c$
| | $V_i = [\mathbf{1}, [M^B]] \times \Delta - m_i$
| | $CleanMask_i = CleanMask_i \cup V_i <$ *estimated threshold via the standard Otsu method*
| | *Refine the* $CleanMask_i$ *with the closing morphological operator*
| | $m_i^{c*} \leftarrow i^{th}$ *band of {A} that are not located in the* $CleanMask_i$
| | $V_i^{c*} \leftarrow V_i$ *elements that are not located in the* $CleanMask_i$
| | $m_i^{c*} = m_i^{c*} + V_i^{c*}$
| | *Update M by* m_i^{c*}
| *DO UNTIL* $CleanMask_i = [\mathbf{1}]_{n\times 1}$
END

در الگوریتم (۱)، روند تکراری حدفاصل خطوط ۳ تا ۱۸ تا زمان عدم شناسایی مناطق محتمل به دود بـرای هـر باند طیفی انتخاب شده در مجموعهٔ A ادامـه مـی‌یابـد. اعضای مجموعهٔ A، شماره باندهای متاثر از دود بوده که در هر تکرار از روند پیشنهادی بخش‌هـای محتمـل بـه دود در آنها از طریق باقیمانـده‌هـای محاسـبه شـده در مدل‌های رگرسیونی اصلاح مـی‌شـوند. در هـر تکـرار از الگوریتم و در یک روند متوالی، ابتدا بردار باقیمانده‌های براورد شده برای هر باند طیفی از مجموعهٔ A به کمـک یک تخمین خطی از سایر باندهای طیفی (مجموعـه B) محاسـبه مـی‌شـود (خـط ۵). سـپس از طریـق یـک آسـتانه‌گـذاری خودکـار (روش اتسـو) باقیمانـده‌هـای کوچکتر از آستانه بعنوان مجموعهٔ مناطق اولیـه و پـاک تصـویر (*CleanMask*) شناسـایی مـی‌شـوند (خـط ۶). بدیهی اسـت کـه مکمـل مجموعـه‌هـای *CleanMask*، منـاطق بـا احتمـال وجـود دود تلقـی خواهنـد شـد. از آنجاییکه دود ماهیتی بهم پیوسـته را برخـوردار اسـت، پیکسل‌های شناسایی شده بعنوان مناطق پاک به کمک عملگر ریخت‌شناسی بستن[1]ترمیم شده و بـدین ترتیـب نواحی کوچک شناسایی شده بعنوان منـاطق آلـوده بـه دود به مجموعهٔ *CleanMask* الحاق می‌شوند (خـط ۷). این اقدام رویکردی سخت‌گیرانه با هدف آسیب کمتر به محتوای رادیومتریکی در نواحی غیرمحتمل به آلـودگی خواهد بود. برای اجرای عملگـر ریخـت‌شناسـی بسـتن، بردار *CleanMask* به شکل ماتریس تصـویری بـازآرایی شده و پس از اجرای عملگر مورد نظر، مجدداً به شـکل بـرداری بـاز مـی‌گـردد. $CleanMask_i$ در خـط ۸ و ۹ پیکسل‌های احتمالی فاقد دود (پـاک) را بـه ترتیـب در ماتریس $[M^B]$ و باند طیفی iام از مجموعهٔ A مشخص و جدا می‌سازد. در ادامه ضرایب رگرسیون خطـی مجـدداً براورد می‌شوند (خط ۱۰). انتظـار مـی‌رود کـه ضـرایب

[1] *Closing*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

جدید براورد شده متاثر از نواحی آلوده بـه دود نبـوده و از این رو بتواند باقیمانده‌های بهتـری را در ایـن نـواحی براورد سازد. در ادامه، به کمـک ضـرایب جدیـد بـراورد شده در مدل‌های رگرسیونی، بردار باقیمانده‌هـا مجـدداً براورد شده (خـط ۱۱) و مجموعـهٔ *CleanMask* بـه‌روز رسانی می‌شود. اجتماع نـواحی جدیـد شناسـایی شـده بعنوان مناطق پاک به مجموعهٔ اولیه (خط ۱۲) و اعمال مجدد عملگـر ریخـت‌شناسـی بسـتن، گـام‌هـای بـه‌روز رسانی مجموعهٔ *CleanMask* هستند (خط ۱۳). خطوط ۱۴ تا ۱۷ از شبه‌کد نیز به اعمال باقیمانده‌هـای بـراورد شده بـه موقعیـت‌هـای قرارگرفتـه در مجموعـهٔ مکمـل *CleanMask* اختصاص دارد. در این خطوط، m_i^{c*} و V_i^{c*} به‌ترتیب محتوای رادیومتریکی و باقیمانـده‌هـای بـراورد شده در مجموعهٔ مکمل $CleanMask_i$ برای باند طیفـی iام از مجموعـهٔ A هسـتند. پـس از اصـلاح مقـادیر رادیومتریکی در مناطق محتمل بر آلودگی، این مقـادیر در ماتریس تصویر M جاگـذاری مـی‌شـوند. خـط ۱۸ از شبه‌کد شرط خاتمهٔ روند تکراری را برای اصلاح هر باند طیفی بررسـی مـی‌کنـد. در ایـن شـرط، تـا قرارگیـری سراسر باند طیفی iام در مجموعـهٔ $CleanMask_i$ منجـر به تکرار خطوط ۳ تا ۱۸ می‌گردد. در این شبه‌کـد، ***[1]*** و $[1^c]$ به ترتیب بردارهایی ستونی یک با طولی معـادل با n و تعداد نمونه‌های شناسـایی شـده در *CleanMask* می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی کفایـت روش پیشـنهاد شـده در ایـن مقاله از شش تصویر ماهواره‌ای چنـد طیفـی مطـابق بـا مشخصات جدول(۱) استفاده شـده اسـت. بـه ازای هـر تصویر آلوده به دود، یک تصویر از همان منطقه در زمان عـدم وجـود دود انتخـاب شـده اسـت. ایـن تصـاویر در کوتاه‌ترین زمان ممکن از زمان وقوع دود و یـا در فصـل مشـابه در سـال مجـاور اخـذ شـده‌انـد. در جـدول(۱) جزئیات مربوط به هر تصویر گزارش شده و در شکل(۴) نیز نمایی از این تصاویر در قالـب ترکیـب رنگـی مرئـی نمایش یافته است.

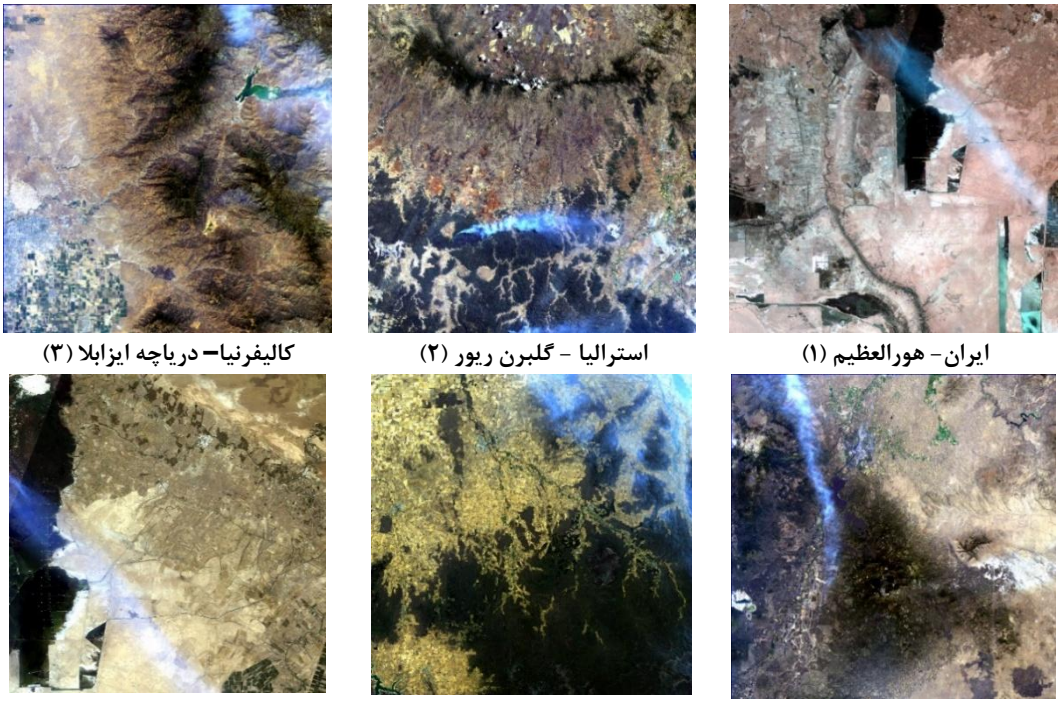
در اولین گـام از رونـد ارزیـابی روش پیشـنهادی نتـایج کسـب شـده پـس از اعمـال الگـوریتم (۱) بـه تصـاویر جدول(۱) در قالب ترکیب رنگـی مشـابه بـا شـکل (۴) تولیـد و ایـن نتـایج در شـکل (۵) ارائـه شـده اسـت.

جدول ۱: مشخصات تصاویر چندطیفی مورد استفاده در ارزیابی روش پیشنهادی

ردیف	نام منطقه	موقعیت جغرافیایی	وسعت (km^2)	سنجنده	تاریخ اخذ	وضعیت رخداد دود
۱	ایران- هورالعظیم	$\varphi = 31^\circ 10'$ $\lambda = 47^\circ 37'$	۱۲۰۰۰	سنتینل -۲	۱۰-جولای-۲۰۱۸ ۱۰-جولای-۲۰۱۷	دارد ندارد
۲	استرالیا-گلبرن ریور	$\varphi = -32^\circ 16'$ $\lambda = 150^\circ 22'$	۴۶۰۰	سنتینل-۲	۶-دسامبر-۲۰۱۹ ۱-دسامبر-۲۰۱۸	دارد ندارد
۳	ایالت کالیفرنیا – دریاچه ایزابلا	$\varphi = 35^\circ 40'$ $\lambda = -118^\circ 35'$	۵۱۵۰	سنتینل-۲	۲۶-آگوست-۲۰۲۰ ۱-آگوست-۲۰۲۰	دارد ندارد
۴	ایالت اورگان- شهر بند	$\varphi = 43^\circ 50$ $\lambda = -121^\circ 11'$	۸۱۰۰	سنتینل-۲	۳۰-آگوست-۲۰۲۰ ۱۰-آگوست-۲۰۲۰	دارد ندارد
۵	استرالیا-وانگراتا	$\varphi = -36^\circ 36'$ $\lambda = 146^\circ 28'$	۱۲۰۰۰	سنتینل-۲	۲۴-دسامبر-۲۰۱۹ ۲۴-دسامبر-۲۰۱۸	دارد ندارد
۶	ایران- هورالعظیم	$\varphi = 31^\circ 10'$ $\lambda = 47^\circ 37'$	۴۱۰۰	لندست-۸	۱۰-جولای-۲۰۱۸ ۱۰-جولای-۲۰۱۷	دارد ندارد

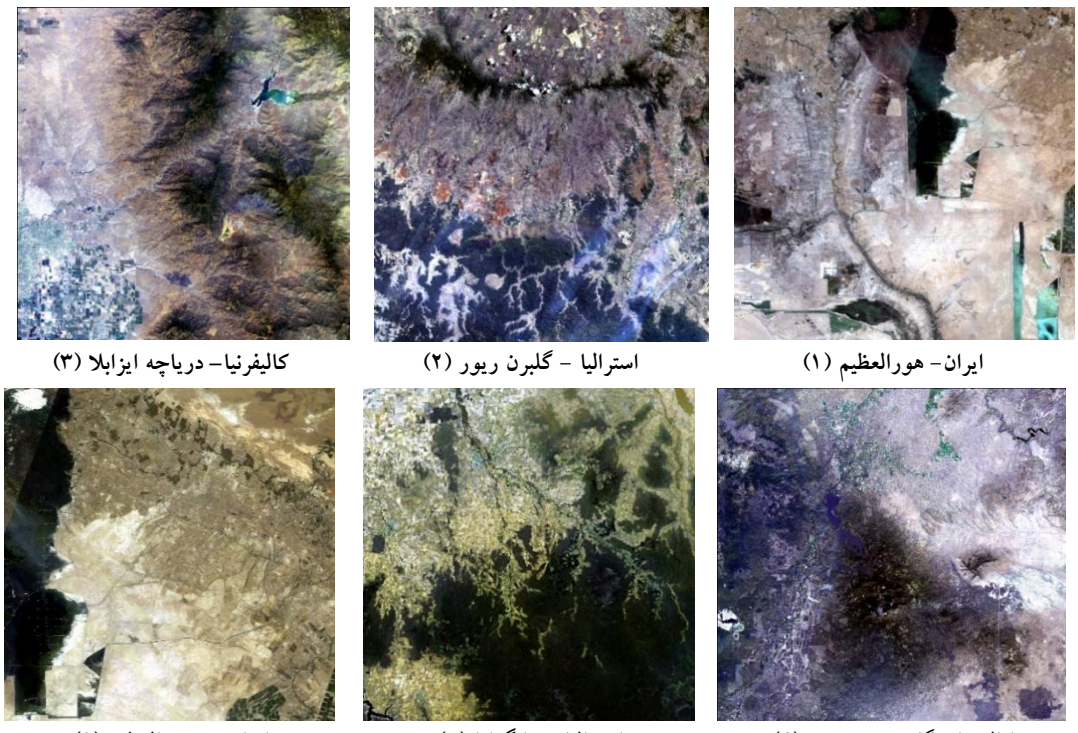
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]



ایران- هورالعظیم (۱) | استرالیا - گلبرن ریور (۲) | کالیفرنیا– دریاچه ایزابلا (۳)
ایالت اورگان- شهر بِند (۴) | استرالیا - وانگراتا (۵) | ایران - هورالعظیم (۶)

شکل ۴: ترکیب رنگی مرئی تصاویر چندطیفی مورد استفاده در روند پیاده‌سازی روش پیشنهادی



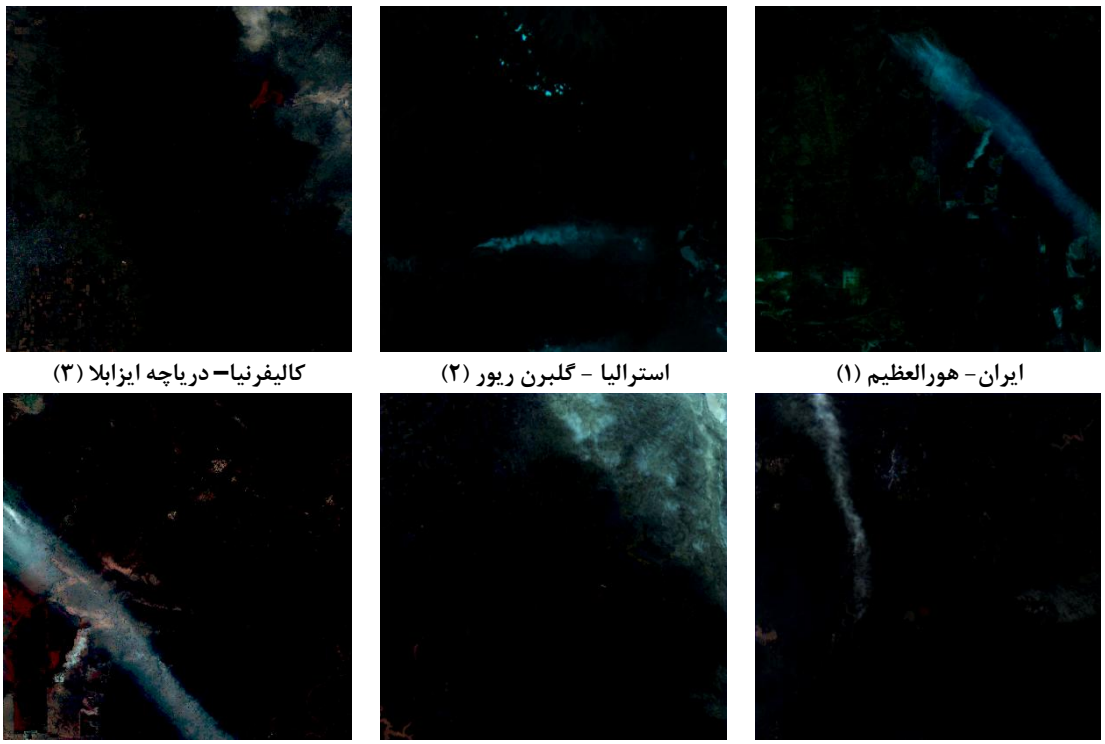
ایران- هورالعظیم (۱) | استرالیا - گلبرن ریور (۲) | کالیفرنیا- دریاچه ایزابلا (۳)
ایالت اورگان- شهر بِند (۴) | استرالیا - وانگراتا (۵) | ایران – هور العظیم (۶)

شکل ۵: نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در تصاویر مورد آزمون (ترکیب رنگی مشابه با تصاویر شکل(۳) انتخاب شده است.)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود، اعمال روش پیشنهادی برای کاهش اثر دود در تصاویر منتخب موجب بهبود وضوح سطح زمین در نواحی آلوده به دود شده است. هر چند که تصاویر مورد استفاده بر اساس گزارشات مربوط به وقوع آتش‌سوزی انتخاب شده‌اند اما به نظر می‌رسد در مورد حداقل یکی از این تصاویر (استرالیا- وانگراتا) آثار موجود در تصویر مربوط به ابرهای نازک و رقیق باشد. از این رو، با توجه به رخنمون پدیده‌های دیگری همچون غبار صبحگاهی و مه رقیق با دودهای رقیق به نظر می‌رسد که سازوکار پیشنهادی قابل تعمیم به چنین اختلالات جوی نیز باشد.

شکل (۶) ترکیب رنگی از بزرگی بردارهای باقیمانده اعمال شده به هر تصویر را بصورت بارزسازی شده نمایش می‌دهد. در این ترکیب رنگی، باقیمانده‌های مربوط به باندهای آبی، سبز و قرمز به کانال‌های رنگی هم‌رنگ متصل شده‌اند.



ایران- هورالعظیم (۱) | استرالیا - گلبرن ریور (۲) | کالیفرنیا– دریاچه ایزابلا (۳)
ایالت اورگان- شهر بِند (۴) | استرالیا - وانگراتا (۵) | ایران- هورالعظیم (۶)

شکل ۶: تصویر بزرگی باقیمانده‌های اعمال شده به باندهای متاثر از دود در روند اجرای روش پیشنهادی

رنگ غالب در نتایج ارائه شدهٔ شکل (۶) نشان از تصحیحات بیشتر در باند طیفی آبی است. این موضوع با ماهیت اثرپذیری بیشتر باند طیفی آبی از دودهای رقیق همگونی معنایی دارد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، اصلاح رادیومتریکی به بخش‌های زیادی از تصاویر اعمال نشده و این موضوع ضامن حفظ محتوای اصلی رادیومتریکی در این نواحی می‌باشد. جدول(۲) نحوه انتخاب باندهای طیفی در دو مجموعه A و B (الگوریتم(۱)) برای تصاویر مورد آزمون گزارش شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

جدول ۲: دسته‌بندی باندهای طیفی متاثر از دود (مجموعه *A*) و با اثرپذیری اندک (مجموعه *B*) در مورد تصاویر مورد ارزیابی

ردیف	باندهای طیفی متاثر (نانومتر)	باندهای طیفی کم اثر (نانومتر)
۱	۴۴۳، ۴۹۰	۵۶۰، ۶۶۵، ۷۰۵، ۷۴۰، ۷۸۳، ۸۴۲، ۸۶۵، ۹۴۰، ۱۶۱۰ و ۲۱۹۰
۲	۴۴۳، ۴۹۰ و ۵۶۰	۷۰۵، ۷۴۰، ۷۸۳، ۸۴۲، ۸۶۵، ۹۴۰، ۱۶۱۰ و ۲۱۹۰
۳	۴۴۳، ۴۹۰ و ۵۶۰	۷۰۵، ۷۴۰، ۷۸۳، ۸۴۲، ۸۶۵، ۹۴۰، ۱۶۱۰ و ۲۱۹۰
۴	۴۴۳، ۴۹۰ و ۵۶۰	۷۰۵، ۷۴۰، ۷۸۳، ۸۴۲، ۸۶۵، ۹۴۰، ۱۶۱۰ و ۲۱۹۰
۵	۴۴۳، ۴۹۰ و ۵۶۰	۷۰۵، ۷۴۰، ۷۸۳، ۸۴۲، ۸۶۵، ۹۴۰، ۱۶۱۰ و ۲۱۹۰
۶	۴۴۳ و ۴۸۲	۵۶۲، ۶۷۵، ۸۶۵، ۱۶۱۰ و ۲۲۰۰

انتخاب تعداد باندهای تاثیرپذیر در جدول (۲) بصورت تجربی و از طریق تفسیر بصری تصاویر صورت گرفته است. مطابق با این جدول، در تصویر مربوط به منطقه هورالعظیم صرفاً دو باند طیفی اول (۴۴۳ نانومتر) و دوم (۴۹۰ نانومتر) از سنجندهٔ سنتینل-۲ بیشترین اثرپذیری را از خود نشان داده و اصلاح شده‌اند. در سایر تصاویر نیز به دلیل غلظت بیشتر دود، تعداد باندهای طیفی منتخب جهت اصلاح به سه باند افزایش یافته است.

در ادامه به منظور ارزیابی کمی نتایج بدست آمده، از رویکردهای مرسوم مبتنی بر سنجش همبستگی پیرسون در بین باندهای طیفی استفاده شده است. این همبستگی به دو شکل داخلی (بین تصویر اصلاح شده و آلوده به دود) و خارجی (تصویر اصلاح شده و پاک) مبنای ارزیابی قرار گرفته است. در روند ارزیابی داخلی به ازای هر تصویر از جدول (۱) دو ناحیه متفاوت در منطقهٔ آلوده به دود و منطقهٔ عاری از آن (همانند پنجره‌های قرمز و سبز در شکل(۲)) در فضای تصویر انتخاب می‌شوند. در انتخاب این نواحی تلاش می‌شود تا پدیدهای مشابهی در هر دو پنجره وجود داشته باشند. سپس همبستگی باندهای متاثر از دود با یک باند کم تاثیر از دود در این دو پنجره اندازه‌گیری می‌شود. در صورتیکه W_{λ}^{clean} محتوای رادیومتریکی باند طیفی λ در پنجرهٔ واقع در ناحیه پاک از تصویر آلوده به دود، W_{λ}^{smoke} محتوای رادیومتریکی باند طیفی λ در پنجرهٔ واقع در ناحیه دود از تصویر آلوده، $\hat{W}_{\lambda}^{clean}$ محتوای رادیومتریکی باند طیفی λ در پنجرهٔ واقع در ناحیه پاک از تصویر اصلاح شده و $\hat{W}_{\lambda}^{smoke}$ نیز محتوای رادیومتریکی باند طیفی λ در پنجرهٔ واقع در ناحیه دود از تصویر اصلاح شده باشد؛ شاخص ارائه شده در رابطهٔ(۳) بمنظور ارزیابی داخلی تصاویر اصلاح شده استفاده شده است. در رابطهٔ (۳)، $\rho(x, y)$ نماد محاسبهٔ ضریب همبستگی خطی پیرسون بین دو متغیر x و y بوده و λ_s و λ_c نیز به ترتیب باندهای طیفی متاثر از دود و بدون اثرپذیری از آن هستند. این شاخص از مجموع دو جمله محاسبه می‌شود. جملهٔ اول میزان همبستگی تصویر اصلاح شده و تصویر آلوده به دود را در نواحی فاقد دود اندازه‌گیری می‌کند. نزدیک بودن این جمله به ۱ گویای حفظ محتوای رادیومتریکی در نواحی پاک تصویر است. جمله دوم نیز میزان بهبود در همبستگی نواحی آلوده به دود را در مقایسه با نواحی پاک تصویر پس از حذف اثر دود نمایش می‌دهد. مقادیرمثبت در جملهٔ دوم شاخص بهبود داخلی، نشان از افزایش همبستگی خطی تصویر اصلاح شده با باندهای بدون تاثیر از دود بوده و مقادیر منفی در این جمله گزارشگر کاهش همبستگی خطی پس از اصلاح تصویر خواهد بود. در روند ارزیابی خارجی نیز ضریب همبستگی باندهای طیفی تصاویر آلوده و اصلاح شده با تصویر پاک محاسبه شده و اختلاف این دو مقدار میزان بهبود همبستگی باندهای طیفی مشابه را نشان می‌دهد (رابطه(۴)).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

$$Internal_Improvement = \rho(\hat{W}^{clean}_{\lambda_S}, W^{clean}_{\lambda_S}) + \frac{\rho(\hat{W}^{smoke}_{\lambda_S}, W^{smoke}_{\lambda_C}) - \rho(W^{smoke}_{\lambda_S}, W^{smoke}_{\lambda_C})}{\rho(W^{clean}_{\lambda_S}, W^{clean}_{\lambda_S})}$$ رابطه(۳)

$$External_Improvement = \rho(\hat{m}^{smoke}_{\lambda}, m^{clear}_{\lambda}) - \rho(m^{smoke}_{\lambda}, m^{clear}_{\lambda})$$ رابطه(۴)

در رابطهٔ (۴)، $\hat{m}^{smoke}_{\lambda}$ محتوای باند طیفی λ در تصویر اصلاح شده، m^{smoke}_{λ} محتوای باند طیفی λ در تصویر آلوده به دود و m^{clear}_{λ} محتوای باند طیفی λ در تصویر پاک می‌باشند.

به منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های توسعه‌یافتهٔ پیشین از دو روش ۱- بکارگیری تناظریابی هیستوگرام میان تصویر پاک و تصویر آلوده به دود [۱۲] و ۲- بازسازی کامل باندهای آلوده به دود توسط باندهای مادن قرمز نزدیک از تصاویر پاک *[۷]* بعنوان روش‌های مقایسه‌ای استفاده شده است. نتایج کسب شده از شاخص‌های بهبود داخلی و خارجی مربوط تصاویر منتخب در این تحقیق در جدول (۳) گزارش شده‌اند.

جدول ۳: مقادیر شاخص‌های بهبود داخلی و خارجی برای نتایج روش‌های مقایسه‌ای و روش پیشنهادی

نام منطقه	روش	شاخص بهبود داخلی			شاخص بهبود خارجی		
		باند طیفی ۱	باند طیفی ۲	باند طیفی ۳	باند طیفی ۱	باند طیفی ۲	باند طیفی ۳
ایران- هورالعظیم (۱)	روش مقایسه‌ای اول	۱٫۰۰	۱٫۰۰	--	۰٫۰۰	-۰٫۰۱	--
	روش مقایسه‌ای دوم	۱٫۱۳	۱٫۰۲	--	**۰٫۰۴**	**۰٫۰۴**	--
	روش پیشنهادی	**۱٫۱۵**	**۱٫۰۵**	--	**۰٫۰۴**	۰٫۰۲	--
استرالیا-گلبرن ریور(۲)	روش مقایسه‌ای اول	۰٫۹۶	۰٫۹۵	۰٫۹۸	-۰٫۰۳	-۰٫۰۲	-۰٫۰۴
	روش مقایسه‌ای دوم	۰٫۹۷	۱٫۰۱	۱٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۱	-۰٫۰۶
	روش پیشنهادی	**۱٫۱۹**	**۱٫۰۷**	**۱٫۱۶**	**۰٫۱۰**	**۰٫۰۴**	**۰٫۰۳**
ایالت کالیفرنیا – دریاچه ایزابلا (۳)	روش مقایسه‌ای اول	۰٫۹۳	۰٫۹۹	۰٫۹۹	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	۰٫۰۰
	روش مقایسه‌ای دوم	۰٫۹۵	۱٫۰۲	۰٫۹۵	-۰٫۱۲	-۰٫۰۶	-۰٫۱۰
	روش پیشنهادی	**۱٫۱۴**	**۱٫۱۰**	**۱٫۰۴**	**۰٫۰۲**	**۰٫۰۲**	**۰٫۰۱**
ایالت اورگان- شهر بِند (۴)	روش مقایسه‌ای اول	۰٫۹۸	۰٫۹۶	۰٫۹۹	۰٫۰۰	-۰٫۰۳	-۰٫۰۴
	روش مقایسه‌ای دوم	۱٫۰۷	۱٫۰۴	۱٫۱۲	**۰٫۱۵**	۰٫۰۹	۰٫۰۵
	روش پیشنهادی	**۱٫۲۲**	**۱٫۰۸**	**۱٫۱۸**	۰٫۱۳	**۰٫۱۲**	**۰٫۰۷**
استرالیا-وانگراتا (۵)	روش مقایسه‌ای اول	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۰	-۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰
	روش مقایسه‌ای دوم	۱٫۲۹	۱٫۱۶	۱٫۱۰	۰٫۳۲	۰٫۱۴	**۰٫۰۴**
	روش پیشنهادی	**۱٫۳۸**	**۱٫۲۳**	**۱٫۱۵**	**۰٫۳۳**	**۰٫۱۵**	**۰٫۰۴**
ایران-هوراعظیم (۶)	روش مقایسه‌ای اول	۰٫۹۹	۰٫۹۸	--	۰٫۰۰	-۰٫۰۲	--
	روش مقایسه‌ای دوم	۱٫۰۹	**۱٫۰۳**	--	۰٫۰۳	**۰٫۰۱**	--
	روش پیشنهادی	**۱٫۱۲**	۱٫۰۱	--	**۰٫۰۴**	**۰٫۰۱**	--

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

مطابق با نتایج مندرج در جدول (۳)، روش پیشـنهادی در هر دو شاخص بهبود داخلی و خارجی عملکرد قابـل قبولی را نشان داده است. هر دو روش مقایسه‌ای نیاز به تصویر در زمان فقدان آلودگی هستند. این موضوع یـک محدودیت در اجرای روش‌های اصلاح تصویر تلقی شده که حتی کسب نتایج رقـابتی بـا روش پیشـنهادی را بـا کاهش انگیـزه‌هـای اجرایـی روبـرو مـی‌سـازد. در روش مقایسـه‌ای اول، هیسـتوگرام تصـویر آلـوده بـه دود در نواحی آلوده با هیستوگرام تصـویر فاقـد دود تناظریـابی می‌گردد. این روش بـا اعمـال یـک رونـد بارزسـازی در نواحی آلوده به دود صرفاً توزیع درجـات خاکسـتری در این نواحی را به توزیع روشنی تصویر عاری از دود شبیه می‌سازد. ارتباط نسبی درجات روشـنی تصـویر تـا حـد زیادی در این روند پایدار مانده و این موضوع منجـر بـه حذف محسوس اثر دود در تصاویر نمی‌گـردد. در مـورد روش مقایسه‌ای دوم نیز ضرایب یـک مـدل رگرسـیونی بین باندهای مادون قرمز (بعنوان متغیرهـای مسـتقل و کم اثر از دودهای رقیق) و باندهای متاثر از دود (بعنوان متغیرهای وابسته) در تصاویر عاری از دود محاسـبه و از این ضرایب برای بازسازی باندهای طیفـی متـاثر از دود در تصویر آلـوده بـه دود اسـتفاده شـده اسـت. تعمـیم ضرایب مدل رگرسیونی براورد شده در تصـویر عـاری از دود به تصویر آلوده به دود با افـزایش تمـایزات ایـن دو تصـــویر ناشـــی از اخـــتلاف زمـــانی یکـــی دیگـــر از محدودیت‌های ایـن رویکـرد نیـز تلقـی مـی‌شـود. ایـن موضوع در زمان وجود تمایزات رادیومتریکی در تصـاویر دو مقطـع زمـانی شـاخص ارزیـابی خـارجی را تخریـب می‌سـازد. بعبـارت بهتـر نمـی‌تـوان انتظـار داشـت کـه رویکردهای وابسته به تصـاویر عـاری از دود بتواننـد در زمان بروز تغییـر در دو مقطـع زمـانی راهکـار مناسـبی بمنظور اصلاح اثرات جوی و یا دود تلقی شوند.

از دیگر نتایج تجربی کسب شده در رونـد اجـرای روش پیشنهادی می‌توان به موارد مطرح شده در ادامه اشـاره داشت. ۱- وجود باندهای طیفـی اثرپـذیر از دود و مـه رقیق بعنوان متغیرهای مستقل در روند برآورد ضـرایب مدل‌هـای رگرسـیونی منجـر بـه کـاهش عملکـرد ایـن روش‌ها در اصلاح اثرات دود و مه می‌گـردد. وجـود اثـر دود در این باندها همواره موجب بازسـازی ایـن اثـر در تخمـین سـایر باندهای اثرپـذیر از دود مـی‌گـردد. ۲- باندهای طیفی مـادون قرمـز نقـش مهمـی در کیفیـت بازسازی تصاویر در باندهای مرئی داشته و عـدم حضـور آنها نتایج را مخدوش می‌سـازد. ۳- رویکـرد جداکننـدۀ باقیمانده‌ها می‌تواند در حفظ محتوای رادیـومتریکی در نواحی پاک تصویر مـوثر باشـد و عـدم بکـارگیری ایـن راهکار منجر به تخمین مقادیر اصلاح شـده در منـاطق پاک تصویر می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله راهکاری بمنظور کاهش اثر دودهای رقیق از تصاویر چندطیفی پیشـنهاد شـد. دودهـای رقیـق در باندهای طیفی با طول‌موج‌های کوتـاه‌تـر (آبـی و سـبز) قابل رؤیت بوده و به‌تدریج اثرات آنها در باندهای طیفی بـا طـول‌مـوج‌هـای بلنـدتـر (قرمـز و بعـد از آن) محـو می‌گردد. ایدۀ اولیه راهکـار پیشـنهادی، احتمـال بـروز باقیمانده‌های بزرگ در تخمین‌هـای رگرسـیونی هنگـام وجود ناهنجاری‌های جوی در تصـاویر چنـدطیفی بـوده است. برهمکنش متمایز نور بـا چنـین پدیـده‌هـایی در طول‌موج‌های مختلـف، کـاهش دقـت در تخمـین‌هـای رگرسیونی را بوجود می‌آورد. راهکار پیشـنهادی مبتنـی بر اعمـال باقیمانـده‌هـای مربـوط بـه تخمـین بانـدهای اثرپذیر از دود هنگام برآورد از طریق تخمین رگرسیونی توســط بانــدهای بــی‌تــاثیر بــود. اصــلاح محتــوای رادیومتریکی در باندهای اثرپذیر از دود بصـورت محلـی صــورت پذیرفتــه و ایــن موضــوع احتمــال تخریــب رادیومتریکی سایر بخش‌های تصویر را کاهش می‌دهـد. راهکار پیشنهادی صرفاً در مـورد دودهـایی قابـل اجـرا بـوده کـه ماهیـت پراکنـده‌کننـده داشـته و محتـوای پس‌زمینۀ آنها قابل رؤیت باشند. به نظر می‌رسد که این راهکار قابل تعمیم به کاهش اثرات جـوی دیگـری نیـز همچون مه، ابرهای نازک و غبـار رقیـق باشـد. در ایـن روش باندهای طیفی مرئی در طول‌مـوج‌هـای کوتـاهتر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

محور اصلاح قرار دارند. راهکار پیشنهاد شده در شش تصویر ماهواره‌ای چندطیفی از موقعیت‌های آلوده به دود و مه مورد استفاده قرار گرفته که نتایج حاکی از عملکرد مطلوب آن در کاهش این اثرات می‌باشد. روش پیشنهادی ضمن بازیابی محتوای رادیومتریکی در مناطق آلوده به دود می‌تواند اطلاعاتی را از رفتار طیفی این پدیده‌ها در باندهای متاثر از آن‌ها فراهم آورد. این موضوع می‌تواند در تحقیقات آتی در مدلسازی اثرات پخش نور در غلظت‌های مختلف دود مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] L. Zhao, J. Liu, S. Peters, J. Li, S. Oliver and N. Mueller, "Investigating the Impact of Using IR Bands on Early Fire Smoke Detection from Landsat Imagery with a Lightweight CNN Model", Remote Sensing, Vol. 14(3047), 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/rs14133047.

[2] S. Miao, H. Lin, H. Gao and L. Dong, "Strip Smoke and Cloud Recognition in Satellite Image", 2016 9th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Datong, China, 2016, pp. 303-307, DOI: 10.1109/CISP-BMEI.2016.7852726.

[3] X. Li, J. Wang, W. Song, J. Ma, L. Telesca, and Y. Zhang, "Automatic smoke detection in MODIS satellite data based on K-means clustering and fisher linear discrimination". PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 80(10), pp. 971-982, 2014, DOI: https://doi.org/10.14358/PERS.80.10.971.

[4] N. Pahlevan, A. Mangin, S. V. Balasubramanian, B. Smith, K. Alikas, K. Arai, C. Barbosa, S. Bélanger, C. Binding, M. Bresciani, C. Giardino, D. Gurlin, Y. Fan, T. Harmel, P. Hunter, J. Ishikaza, S. Kratzer, M. K. Lehmann, M. Ligi, R. Ma, F. R. Martin-Lauzer, L. Olmanson, N. Oppelt, Y. Pan, S. Peters, N. Reynaud, L. A. de Carvalho, S. Simis, E. Spyrakos, F. Steinmetz, K. Stelzer, S. Sterckx, Th. Tormos, A. Tyler, Q. Vanhellemont and M. Warren, "ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters." Remote Sensing of Environment, 258, 112366, 2021, DOI; https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366.

[5] A. S., Mahiny and B. J., Turner, "A comparison of four common atmospheric correction methods," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 73(4), pp. 361-368, 2007. DOI: https://doi.org/10.14358/PERS.73.4.361.

[6] M. Xu, X. Jia, M. Pickering and D. Roberts, "Spectral unmixing for fire smoke detection and removal," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016, pp. 806-808, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729203.

[7] S. Khetkeeree, B. Petchthaweetham, S. Liangrocapart and S. Srisuk, "Sentinel-2 Image Dehazing using Correlation between Visible and Infrared Bands," 2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chiang Mai, Thailand, 2020, pp. 1-4, DOI: 10.1109/iEECON48109.2020.229585.

[8] A. Makarau, R. Richter, R. Müller and P. Reinartz, "Haze Detection and Removal in Remotely Sensed Multispectral Imagery," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 9, pp. 5895-5905, Sept. 2014, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2293662.

[9] T.-P, Zhao, S. Ackerman, and W. Guo. "Dust and Smoke Detection for Multi-Channel Imagers," Remote Sensing, vol. 2, no. 10, pp. 2347-2368, 2010, DOI: 10.3390/rs2102347.

[10] J. Li, B.E. Carlson, Y.L. Yung, D. Lv, J. Hansen, J. E. Penner, H. Liao, V. Ramaswamy, R. A. Kahn, P. Zhang, O. Dubovik, A. Ding, A. A. Lacis, L. Zhang

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

and Y. Dong, "Scattering and absorbing aerosols in the climate system," Nature Reviews Earth & Environment, Vol. 3, pp. 363–379, 2022, DOI: https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7.

[11] K. N. Liou and Y. Takano, "Light scattering by nonspherical particles: remote sensing and climatic implications". Atmospheric Research, Vol. 31(4), pp. 271-298, 1994, DOI: https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)90004-3.

[12] R. Richter, "Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region," Computers & Geosciences, vol. 22, no. 6, pp. 675-681, 1996,DOI: 10.1016/0098-3004(96)00010-6

[13] S. Liang, H. Fang and M. Chen, "Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 11, pp. 2490-2498, Nov. 2001, DOI: 10.1109/36.964986.

[14] C. -L. C. Huang and T. Munasinghe, "Exploring Various Applicable Techniques to Detect Smoke on the Satellite Images," 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Atlanta, GA, USA, 2020, pp. 5703-5705, DOI: 10.1109/BigData50022.2020.9378466.

[15] AAA. Alkhatib, "A Review on Forest Fire Detection Techniques," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 10, no. 3, 2014, DOI:10.1155/2014/597368.

[16] M. Xu, X. Jia and M. Pickering, "Cloud effects removal via sparse representation," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2015, pp. 605-608, 2015, DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325836.

[17] M. Fathi, M. Mokhtar Zade, A.R. Safdarinezhad, "An Automatic Detection of the Fire Smoke Through Multispectral Images," JGST, vol. 10, no. 1, pp. 145-157, 2020, URL: http://jgst.issge.ir/article-1-892-fa.html.

[18] I. C. Neagoe, C. Vaduva, C. and Datcu, M., "Haze and Smoke Removal for Visualization of Multispectral Images: A DNN Physics Aware Architecture," In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, pp. 2102-2105, July, 2021, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553735.

[19] H. Liu, J. Li, J. Du, B. Zhao, Y. Hu, D. Li, and Yu, W., "Identification of Smoke from Straw Burning in Remote Sensing Images with the Improved YOLOv5s Algorithm," Atmosphere, Vol. 13(6), 925, 2022, DOI: https://doi.org/10.3390/atmos13060925.

[20] A. Dewangan, Y. Pande, H. W. Braun, F. Vernon, I. Perez, I. Altintas, G. W. Cottrell and M.H. Nguyen, "FIgLib & SmokeyNet: Dataset and deep learning model for real-time wildland fire smoke detection. Remote Sensing, 14(4), 1007, 2022, DOI: https://doi.org/10.3390/rs14041007.

[21] B. Rasti, P. Scheunders, P. Ghamisi, G. Licciardi, and J. Chanussot, "Noise Reduction in Hyperspectral Imagery: Overview and Application," Remote Sensing, vol. 10, no. 3(482), 2018, DOI: 10.3390/rs10030482

[22] L. Gao, Q. Du, B. Zhang, W. Yang and Y. Wu, "A Comparative Study on Linear Regression-Based Noise Estimation for Hyperspectral Imagery," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 6, no. 2, pp. 488-498, April 2013, DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2227245.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.11, No.4, Winter 2024

Research Paper

Widespread Dilute Smoke Reduction in the Multispectral Images through Iteratively Applying the Regression Estimated Residuals to Spectral Bands

Reza Qalavand [1], Alireza Safdarinezhad [2*], Behzad Behnabian [2]

1- MSc student of photogrammetry, Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran
2- Assistant professor, Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh,Iran

Abstract

Widespread wildfires and the resulting smoke are common occurrences in various regions of the earth's surface. Identification of the contaminated areas and crisis management require the classification of the areas affected by smoke. On the other hand, the visible spectral bands in the satellite images are affected by such phenomena, which blur the clarity of these images. The elimination of the smoke trace from the multispectral images is a common way to increase the clarity of the images in this regions. To address this issue, a repetitive regression-based method is proposed in order to reduce the impact of the dilute smoke on multispectral images. The occurrence of large residuals when the affected bands are estimated with the non-affected bands, is the motivation for designing this method. The method involves iteratively applying the residuals from the regression models to the probable smoke areas after refinement and localization, which corrects the spectral observations in the affected bands. This method is an iterative one and in each iteration it eliminates a part of the smoke trace. This solution maintains radiometric content in clean image areas and significantly improves the image clarity in smoke-contaminated areas. The results show a quantitative improvement in the correlation between the corrected images and the smoke-free ones in the most affected spectral bands, on average 14.2 percent. This method can only be used for the dilute smoke with a visible background.

Key words: *Linear Regression, Dilute smokes, Multispectral Images, Scattering of light, Atmosphere, Residuals Vector.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.37]

Correspondence Address: *Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, 39518-79611, Iran.*
Tel : *+989123258852*
Email*: safdarinezhad@tafreshu.ac.ir*