

بررسی روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح ناشی از فعالیت معدن مس سونگون با تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی

محمد کریمی فیروزجایی - دانشجوی دکتری گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران
امیر صدیقی - دانشجوی دکتری گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران
مجید کیاورز* - استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۲

چکیده

تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین یکی از مهم‌ترین اثرهای منفی فعالیت‌های انسانی است. هدف از پژوهش حاضر تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای بررسی و پایش روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح منطقه معدن مس سونگون ناشی از فعالیت‌های معدنی طی سه دهه گذشته است. بدین منظور، از مجموعه داده‌های انعکاسی و حرارتی تصاویر ماهواره‌ای، ایستگاه‌های هواشناسی، و بازدید زمینی استفاده شده است. در این پژوهش، برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از الگوریتم طبقه‌بندی بیشترین شباهت، محاسبه دمای سطح از الگوریتم تک‌کاناله و مدل‌سازی خصوصیات بیوفیزیکی روشنایی، سبزی‌نگی، و رطوبت سطح بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ به ترتیب از پارامترهای آلبدو، NDVI، و NDWI استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که بر اثر گسترش و توسعه فعالیت‌های معدنی مساحت جنگل‌ها از ۹۹۵۹۴ هکتار به ۵۹۴۲۷ هکتار کاهش یافته است. طی بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ مقدار میانگین پارامترهای آلبدو، NDVI، و NDWI به ترتیب ۰/۱ افزایش، ۰/۰۸ کاهش، و ۰/۱۲ افزایش یافته است. همچنین، تغییر کاربری جنگل به معدن به صورت میانگین سبب افزایش ۵/۸ درجه کلون دمای سطح شده است. نتایج پژوهش حاکی از کارایی بسیار بالای تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای پایش و مدیریت پدیده‌های مختلف انسانی، محیطی، و طبیعی است.

واژگان کلیدی: خصوصیات بیوفیزیکی، سنجش از دور انعکاسی، سنجش از دور حرارتی، معدن مس سونگون.

مقدمه

کاربری زمین همواره یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که انسان از طریق آن محیط زیست خود را تحت تأثیر قرار داده است. کاربری فعالیتی کلیدی است که انسان از طریق مصرف منابع طبیعی موجبات رشد و توسعه اجتماعی-اقتصادی خود را فراهم می‌کند و، در عین حال، ساختارها و فرایندهای موجود در محیط زیست را تغییر می‌دهد (هلمینگ، ۲۰۰۸). طی دهه‌های گذشته، مهم‌ترین تغییر کاربری اراضی توسط انسان از میان بردن جنگل‌ها و تبدیل آن‌ها به اراضی ساخته شده بوده است (لاوسچ و هرزوغ، ۲۰۰۲).

امروزه، یکی از فعالیت‌های انسانی مؤثر بر تغییر کاربری اراضی فعالیت‌های معدن کاری است. معدن کار فرآوری مواد معدنی است و عملیات وابسته به آن‌ها جزو فعالیت‌هایی با قابلیت آسیب‌رسانی شدید به محیط طبیعی محسوب می‌شود. معدن کاری در ارتباط مستقیم با طبیعت و محیط اطراف است. بنابراین، اثرهای قابل ملاحظه‌ای بر محیط خواهد داشت (بی آر جی ام، ۲۰۰۱).

تأثیر منفی عملیات معدن‌کاری بر محیط طبیعی اطراف در مراحل فعالیت‌های مختلف انجام می‌گیرد: اکتشاف، استخراج، و فرآوری. اثرهای منفی فعالیت‌های معدن‌کاری از جمله تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح همچون سبزیگی، رطوبت، روشنایی، و دمای سطح زمین^۱ بسته به نوع ماده معدنی، موقعیت منطقه، روش استخراج، و سایر پارامترها متفاوت است. در حال حاضر، داده‌های ماهواره‌ای به لحاظ ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود همانند چندزمانه بودن، چندطیفی بودن، و وسعت منطقه تحت پوشش اطلاعات مفیدی برای مطالعه پدیده‌های دینامیکی ارائه می‌دهند. فناوری سنجش از دور اطلاعات ارزشمندی برای درک، فهم، و پایش الگوها و فرایندهای توسعه زمین، تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین، و ایجاد مجموعه‌ای از نقشه‌های پوشش و کاربری زمین فراهم می‌کند. از این داده‌ها می‌توان برای تعیین نوع، مقدار، و محل تغییر کاربری زمین و تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح استفاده کرد (مک لئود و کنگالتون، ۱۹۹۸). با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجش از دور با کمترین زمان و هزینه و بالاترین سرعت می‌توان به استخراج اطلاعات، خصوصیات بیوفیزیکی، و کاربری‌های اراضی مناطق در مقیاس‌های مختلف اقدام کرد. اطلاع از نسبت کاربری‌ها در یک محیط طبیعی و نحوه تغییرات آن در گذر زمان و همچنین تأثیر تغییر آن بر تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین یکی از مهم‌ترین موارد در برنامه‌ریزی محیطی است. مطالعات و بررسی‌های گوناگونی درباره اندازه‌گیری و پایش تغییرات خصوصیات مختلف سطح زمین در دوره‌های زمانی مختلف با استفاده از قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی انجام گرفته است (زانگ و زو، ۲۰۱۶؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ یو و همکاران، ۲۰۱۷).

معدن مس سونگون یک معدن بزرگ پورفیری است و روش استخراج آن روباز و به صورت پله‌ای است. یکی از مهم‌ترین آلودگی‌های زیست‌محیطی در این روش معدن‌کاری، تخریب زمین و چشم‌انداز منطقه، تولید انبوه باطله در اثر استخراج ماده معدنی، و از بین رفتن پوشش گیاهی اطراف است. مناطق تخریب‌شده در اثر فعالیت‌های معدن‌کاری در معدن مس سونگون مربوط به استخراج ماده معدنی، استخراج باطله و روباره معدن، احداث کارخانه و تأسیسات، ساخت سد باطله، تأمین آب مجتمع از سد ستارخان، و جاده‌های مربوط به طرح است که بخش عمده این تخریب در مرحله ساخت اتفاق افتاده است. در مرحله باطله‌برداری معدن مس سونگون باطله‌ها در دره‌های مجاور انباشته و پوشش گیاهی دره در زیر مواد باطله مدفون شده و، بدین ترتیب، سیمای طبیعی منطقه دگرگون شده است (سمیعی و همکاران، ۱۳۸۶). مهم‌ترین اثر تغییرات سیمای طبیعی تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح همچون سبزیگی، رطوبت، روشنایی، و دمای سطح است. از دیگر پیامدهای معدن‌کاری در منطقه می‌توان به افزایش فرسایش آبی و بادی اشاره کرد. از طرف دیگر، مواد مستخرج از این معدن، علاوه بر مس، حداقل عناصر آرسنیک، کبالت، جیوه، و نیکل را نیز همراه خود خواهند داشت که باعث می‌شود گیاهان اطراف منطقه معدن‌کاری با فلزات سنگین آلوده شوند و بخش وسیعی از منطقه عاری از پوشش گیاهی شود (سلماسی، ۱۳۸۶).

با توجه به اینکه قبل از شروع فعالیت‌های معدن‌کاری باید مطالعات اثرهای زیست‌محیطی انجام شود، در مورد مس سونگون، به‌رغم قرارگیری در یک منطقه جنگلی، مجاورت با مناطق حفاظت‌شده ارسباران و دیزمار، و همچنین وجود رودخانه‌های متعدد مطالعات اثرهای زیست‌محیطی بعد از شروع فعالیت‌های معدن‌کاری انجام گرفته است. بنابراین، مشکلات محیط‌زیستی در این منطقه وجود دارد. این شرایط هشدارهای متعدد کارشناسان محیط زیست نسبت به تخریب‌های گسترده فعالیت‌های معدن مس سونگون در رویشگاه جنگلی و مراتع ارسباران را در پی داشته است (رشیدی‌نژاد، ۱۳۸۱).

طی سال‌های گذشته مطالعاتی در زمینه اثرهای فعالیت‌های معدنی بر روی محیط طبیعی اطراف با استفاده از فناوری

سنجش از دور انعکاسی انجام شده است (سارما و کوشواها، ۲۰۰۵؛ جوشی و همکاران، ۲۰۰۶؛ چارو و همکاران، ۲۰۱۰؛ یاداو و بورانا، ۲۰۱۷؛ پادمنابان و همکاران، ۲۰۱۷). لطیفوویچ و همکاران (۲۰۰۵) با تهیه نقشه‌های پوشش اراضی از باندهای انعکاسی تصاویر ماهواره لندست سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۱، تغییرات پوشش گیاهی ناشی از توسعه فعالیت‌های وسیع معدن کاری سطحی در منطقه آتاباسکا^۱ در ایالت آلبرتا کانادا را بررسی کردند. مقایسه دو نقشه بیانگر تخریب ۷۱۵۰۹۴ هکتار از پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه بود. در نتیجه، پوشش گیاهی طبیعی منطقه در سال ۲۰۰۱، نسبت به سال ۱۹۹۲، حدود ۸۶۴ درصد کاهش یافته بود. همچنین، تونسند و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از داده‌های چندزمانه باندهای انعکاسی تصاویر ماهواره لندست سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۶، تغییرات میزان فعالیت‌های معدن کاری و بازسازی اراضی پس از آن را در منطقه کوهستان آپالاچی^۲ مرکزی در شرق ایالات متحده را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان بیانگر تخریب جنگل‌های منطقه در اثر فعالیت‌های معدنی به‌ویژه قبل از اجرای قانون کنترل و بازسازی سطوح سطحی در سال ۱۹۷۷ بود که در سال‌های بعدی تا سال ۲۰۰۶ روند تخریب جنگل‌ها و تغییر الگوی کاربری و پوشش اراضی منطقه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت.

رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۸۶)، زبردست و همکاران (۱۳۸۹)، رسولی و همکاران (۲۰۱۰) و پارسا و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعاتشان با استفاده از باندهای انعکاسی تصاویر ماهواره‌ای به بررسی روند تغییرات پوشش اراضی منطقه حفاظت‌شده ارسباران پرداختند. زبردست و همکاران (۱۳۸۹)، با استفاده از باندهای انعکاسی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سه سال ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸، به بررسی روند تغییرات پوشش اراضی منطقه حفاظت‌شده ارسباران پرداختند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که سرعت کاهش مساحت اراضی جنگلی حساس منطقه ارسباران برای بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ بیشتر از بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ بود؛ به‌نحوی که طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸، بیش از ۱۰ درصد از پوشش‌های جنگلی منطقه ارسباران از بین رفته است.

در سال‌های اخیر، برخی مطالعات در زمینه اثرهای فعالیت‌های معدن مس سونگون بر تغییرات کاربری اراضی اطراف آن انجام گرفته است (صدیقی و رسولی، ۱۳۹۲؛ رنجبر و فیضی‌زاده، ۱۳۹۴؛ رسولی و همکاران، ۱۳۹۴). صدیقی و رسولی (۱۳۹۲) در پژوهش خود برای ارزیابی تأثیرات معدن مس سونگون بر محیط اطراف به استخراج نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی اطراف معدن از باندهای انعکاسی تصاویر ماهواره لندست سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ اقدام کردند. در این پژوهش نشان داده شد که طی سال‌های گذشته مساحت مراتع و جنگل‌ها در این منطقه به‌شدت کاهش یافته؛ به‌طوری که مساحت جنگل‌ها از ۲۳ درصد در سال ۱۹۹۹ به ۱۹٫۷ درصد در سال ۲۰۱۱ کاهش یافته است.

با توجه به بررسی پیشینه تحقیقات خارجی و داخلی، تمرکز مطالعات در زمینه اثر فعالیت‌های معدنی در تغییرات کاربری اراضی اطراف معدن بوده است. در همه این مطالعات فقط از باندهای انعکاسی تصاویر ماهواره‌ای برای بررسی اثر فعالیت‌های معدنی استفاده شده است. تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح در طول زمان از مهم‌ترین اثرهای فعالیت‌های معدنی است که در مطالعات گذشته توجهی به آن نشده است. وجه تمایز و نوآوری بارز مطالعه حاضر نسبت به دیگر مطالعات در این زمینه بررسی کمی و کیفی تأثیر فعالیت‌های معدنی بر خصوصیات بیوفیزیکی سطح همچون سبزی‌نگی، رطوبت، روشنایی، و دمای سطح است. همچنین، در این مطالعه برای اولین بار قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای بررسی اثر فعالیت‌های معدنی بر محیط اطراف با یکدیگر تلفیق شده است. ذکر این نکته لازم است که در مطالعه حاضر برای اولین بار، برای بررسی میزان تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری

اراضی مقادیر دمای سطح به دست آمده از باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های مختلف ابتدا نسبت به تغییرات دمای هوا نرمال شده است.

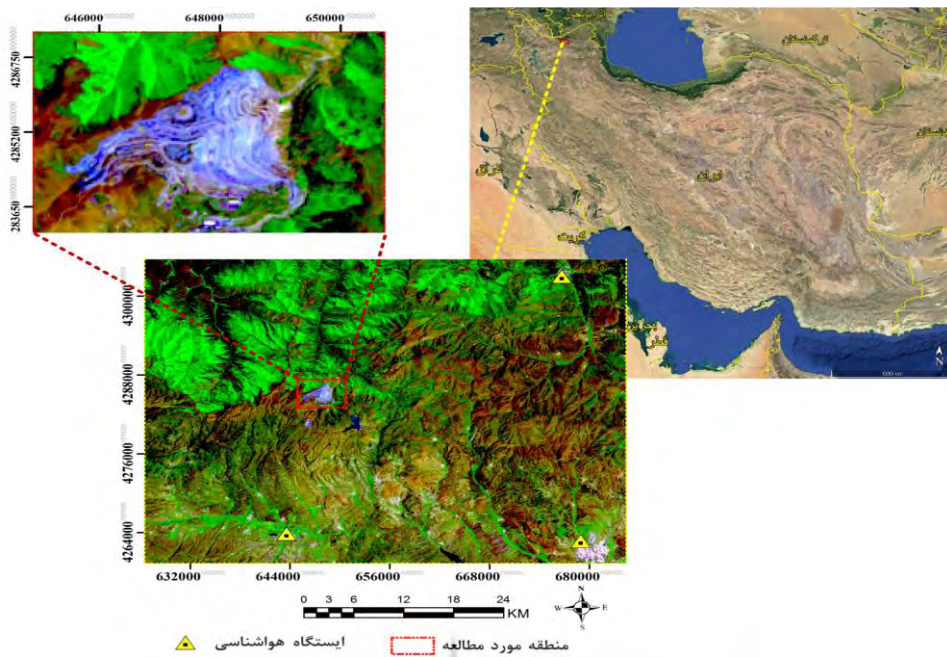
با توجه به موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون، این معدن در مجاورت جنگل‌های ارسباران و منطقه حفاظت‌شده دیزمار قرار گرفته است. به همین دلیل، فعالیت‌های این معدن از نظر زیست‌محیطی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. با توجه به این، هدف از مطالعه حاضر تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای بررسی و پایش روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح منطقه معدن مس سونگون ناشی از فعالیت‌های معدنی طی سه دهه گذشته است.

مواد و روش‌ها

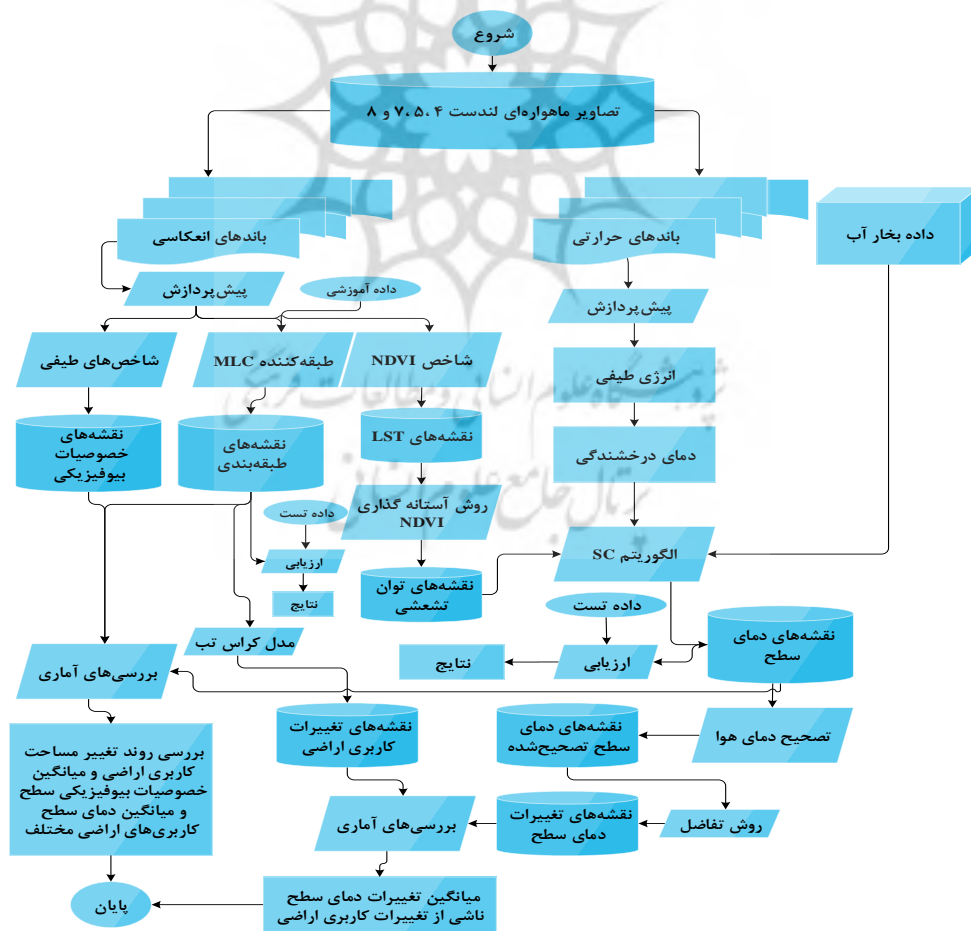
منطقه مورد مطالعه

معدن مس سونگون در شمال غرب ایران، در ۱۳۰ کیلومتری شمال تبریز مرکز استان آذربایجان شرقی، به فاصله ۷۵ کیلومتری شمال غرب شهر اهر و ۳۰ کیلومتری شمال شهر ورزقان واقع شده است. این معدن با رودخانه ارس (مرز بین ایران و جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان) ۲۵ کیلومتر فاصله دارد. این طرح در یک منطقه کوهستانی با متوسط ارتفاع ۲۰۰۰ متر بالای سطح دریا واقع شده؛ به گونه‌ای که در محدوده معدن بلندترین و مرتفع‌ترین نقطه ۲۴۶۰ متر و پست‌ترین نقطه ۱۷۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا دارد. بدین ترتیب، اختلاف ارتفاع در محدوده معدن حدود ۷۵۰ متر است که سبب ایجاد توپوگرافی شدید و دامنه‌های پُرشیب شده است (گزارش شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۰). به علت وجود مراتع، جنگل، و رودخانه در محدوده معدن و مجاورت با مناطق حفاظت‌شده ارسباران و دیزمار فعالیت‌های این معدن از نظر زیست‌محیطی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. مهم‌ترین و باارزش‌ترین زیستگاه طبیعی در منطقه منطقه حفاظت‌شده دیزمار است که زیستگاه اصلی گونه‌های جنگل ارسباران است. مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین ۴۶ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و بین ۳۸ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی است. مساحت این منطقه تقریباً برابر با ۲۴۷۴۵/۵ هکتار است. در مجاورت منطقه مورد مطالعه سه ایستگاه هواشناسی اهر، کلیبر، و ورزقان قرار دارد که از داده‌های آن‌ها در این پژوهش استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

هدف از این پژوهش تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای بررسی و پایش روند تغییرات کاربری اراضی و خصوصیات بیوفیزیکی سطح منطقه معدن مس سونگون ناشی از فعالیت‌های معدنی طی سه دهه گذشته است. بدین منظور، در گام اول، با استفاده از مجموعه باندهای انعکاسی تصاویر لندست، روند تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ استخراج و بررسی شده است. در گام دوم، روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح از جمله روشنایی، سبزی‌نگی، و رطوبت منطقه مورد مطالعه ناشی از فعالیت‌های معدنی بررسی شده است. در گام سوم، با تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی، نقشه‌های دمای سطح مربوط به سال‌های مختلف استخراج و روند تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شده است. شکل ۲ روند کلی پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. روند کلی اجرای پژوهش

داده‌ها

در مطالعه حاضر برای بررسی روند تغییرات کاربری اراضی و خصوصیات بیوفیزیکی سطح همچون سبزیگی، رطوبت، روشنایی، و دمای سطح از باندهای انعکاسی و حرارتی تصاویر ماهواره‌های لندست ۴، ۵، ۷، و ۸ استفاده شده است. این تصاویر زمین مرجع شده و در سیستم تصویر^۱ UTM در ناحیه^۲ ۳۹N قرار دارند. همه تصاویر لندست مورد استفاده در سایت زمین‌شناسی امریکا^۳ با مشخصات مسیر^۳ شماره ۳۳ و گذر^۴ شماره ۱۶۶ در دسترس‌اند. اختلاف زمان گذر ماهواره‌های لندست ۴، ۵، ۷، و ۸ برای منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۶۸-۱۳۹۶ به‌طور میانگین ۳۰ دقیقه است. در انتخاب تصاویر ماهواره‌ای در طول بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ شرایط فقدان پوشش ابر و عدم بارش بارندگی در دو روز قبل از گذر ماهواره لحاظ شده است.

برای تهیه داده‌های آموزشی مورد استفاده در عملیات طبقه‌بندی و ارزیابی دقت طبقه‌بندی از داده‌های جمع‌آوری شده طی بازدید میدانی (برای سال ۱۳۹۶)، تصاویر گوگل‌ارث، نقشه‌های توپوگرافی تهیه‌شده توسط سازمان نقشه‌برداری و تفسیر بصری ترکیب‌های رنگی مختلف استفاده شده است. همچنین، برای تکمیل پارامترهای ورودی و تهیه و ارزیابی نقشه دمای سطح از محصول بخار آب (MOD07)، محصول دمای سطح (MOD11) سنجنده مودیس ماهواره ترا و داده دمای هوای اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی اهر، کلیبر، و ورزقان استفاده شده است. شکل ۱ داده‌های مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱. تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی مورد استفاده

تاریخ	ماهواره (سنجنده)	نوع داده
۱۳۶۸/۰۴/۲۵	لندست ۴ (TM)	تصاویر ماهواره‌ای (روز)
۱۳۸۶/۰۵/۰۶، ۱۳۷۷/۰۳/۲۹، ۱۳۷۲/۰۵/۱۳	لندست ۵ (TM)	تصاویر ماهواره‌ای (روز)
۱۳۸۲/۰۵/۱۷	لندست ۷ (ETM+)	تصاویر ماهواره‌ای (روز)
۱۳۹۶/۰۴/۱۴، ۱۳۹۲/۰۴/۱۹	لندست ۸	تصویر ماهواره‌ای (روز)
۱۳۶۸-۱۳۹۶	ایستگاه زمینی	دمای هوا
۱۳۶۸-۱۳۹۶	مودیس/ ایستگاه زمینی	بخار آب
۱۳۹۶	GPS	داده‌های زمینی
-	سازمان نقشه‌برداری	نقشه توپوگرافی
۱۳۸۲-۱۳۹۶	مودیس (MOD11)	دمای سطح

روش پژوهش

در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی و بررسی تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح ناشی از فعالیت معدن سونگون از مجموعه‌ای از مدل‌ها و روش‌ها در زمینه سنجش از دور انعکاسی و حرارتی استفاده شده است.

طبقه‌بندی کاربری اراضی

در این پژوهش برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده شد. پیش از طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر، باید داده‌های آموزشی به‌دقت انتخاب شود. هدف از عملیات آموزشی آن است که یک مجموعه

1. Universal Transverse Mercator

2. <http://www.usgs.gov>

3. Row

4. Path

آماری، که بیانگر الگوی طیفی پوشش زمینی باشد، حاصل شود. تعریف نادرست کلاس‌های موردنیاز توسط داده‌های آموزشی بر کل روند طبقه‌بندی نظارت‌شده تأثیر گذاشته و موجب طبقه‌بندی اشتباه تصویر می‌شود (اوتاکا و بلاسکه، ۲۰۱۰). در این مرحله، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده طی بازدید میدانی، تصاویر گوگل‌ارث، نقشه‌های توپوگرافی تهیه‌شده توسط سازمان نقشه‌برداری، و تفسیر بصری ترکیب‌های رنگی مختلف به تهیه داده‌های آموزشی و تست همهٔ طبقات کاربری اراضی برای استفاده در عملیات طبقه‌بندی و ارزیابی دقت اقدام شد.

در این تحقیق، از روش بیشترین شباهت برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده شد. در این روش، پس از ارزیابی احتمالات در هر کلاس، پیکسل‌ها به کلاس‌هایی که بیشترین احتمال را دارند اختصاص می‌یابند (اوتاکا و بلاسکه، ۲۰۱۰). پس از پایان عملیات طبقه‌بندی کاربری اراضی، دقت طبقه‌بندی با استفاده از مجموعه داده‌های تست و براساس پارامترهای دقت کلی و ضریب کاپا ارزیابی شده است. درنهایت، پس از ارزیابی دقت طبقه‌بندی و تأیید معنی‌دار بودن خطاها، نقشه‌های کاربری اراضی و مساحت مربوط به کاربری‌ها در تاریخ‌های مختلف استخراج شد.

محاسبهٔ دمای سطح زمین

محاسبهٔ گسیلندگی سطح زمین

گسیلندگی سطح زمین^۱ (LSE) یکی از ویژگی‌های مهم پدیده‌ها و مواد است. این پارامتر بیانگر توانایی ساطع کردن انرژی یک جسم واقعی نسبت به جسم سیاه در دمای یکسان است. یکی از مهم‌ترین روش‌های محاسبهٔ LSE روش مبتنی بر شاخص تفاضلی نرمال‌شدهٔ پوشش گیاهی^۲ (NDVI) است. این روش در پژوهش سوبرینو و رایسونی (۲۰۰۰) و والور و کاسیلیس (۱۹۹۶) ارائه شده است. در این روش، LSE با آستانه‌گذاری بر NDVI و کسر پوشش گیاهی^۳ (FVC) حاصل می‌شود. برای محاسبهٔ NDVI از رابطهٔ ۱ استفاده می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمز و همکاران، ۲۰۱۴).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

در رابطهٔ ۱، ρ_{Red} و ρ_{NIR} به ترتیب بازتاب زمینی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌باشند. مقادیر این شاخص بین -۱ و +۱ متغیر است. برای محاسبهٔ FVC از رابطهٔ ۲ استفاده می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمز و همکاران، ۲۰۱۴).

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2 \quad (2)$$

در رابطهٔ ۲، NDVI_V مربوط به پوشش گیاهی متراکم و NDVI_S مربوط به خاک خشک است. با به‌دست‌آوردن کسر پوشش گیاهی، برای محاسبهٔ LSE باندهای حرارتی لندست ۴، ۵، ۷، و ۸ از رابطهٔ ۳ استفاده می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمز و همکاران، ۲۰۱۴).

$$\begin{aligned} FVC < 0 \quad LSE &= a + b\rho_{Red} \\ 0 < FVC \leq 1 \quad LSE &= \varepsilon_S (1 - FVC) + \varepsilon_S \\ NDVI < 0 \quad LSE &= \text{Emissivity Water} \end{aligned} \quad (3)$$

1. Land Surface Emissivity (LSE)
2. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
3. Fraction of Vegetation Cover (FVC)

در رابطه ۳، ρ_{Red} بازتاب زمینی تصحیح‌شده باند قرمز و FVC کسر پوشش گیاهی، a و b ضرایب همبستگی خطی بین بازتاب باند قرمز با LSE، ϵ_s ضریب گسیلندگی خاک، و ϵ_v ضریب گسیلندگی پوشش گیاهی (استخراج‌شده از کتابخانه طیفی ASTER) است.

الگوریتم تک‌کاناله

از الگوریتم تک‌کاناله^۱ (SC) برای محاسبه دمای سطح در مطالعات متعددی استفاده شده است (جیمنز و همکاران، ۲۰۰۹؛ جیمنز و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمنز و سوبرینو، ۲۰۰۳؛ سوبرینو و همکاران، ۲۰۰۴؛ یو و همکاران، ۲۰۱۴). مدل کلی برای محاسبه LST با استفاده از این الگوریتم به صورت رابطه ۴ است.

$$LST = \gamma \left(\frac{1}{LSE} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right) + \delta \quad (4)$$

در رابطه ۴، L_{sen} میزان انرژی ثبت‌شده در سنجنده برای باند حرارتی، LSE میزان ضریب گسیلندگی مربوط به طول موج باند حرارتی مورد استفاده، و γ و δ پارامترهای وابسته به تابع پلانک هستند که به صورت رابطه‌های ۵، ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمنز و همکاران، ۲۰۱۴).

$$\gamma = \frac{T_{sen}^{\tau}}{b_{\lambda} L_{sen}} \quad \text{لندست ۸} \quad (5)$$

$$\gamma = \left(\frac{C_2 L_{sen}}{T_{sen}^{\tau}} \left(\frac{\lambda^{\epsilon}}{C_1} \times L_{sen} + \lambda^{-1} \right) \right)^{-1} \quad \text{لندست ۴، ۵ و ۷} \quad (6)$$

$$\delta = -\gamma \times L_{sen} + T_{sen} \quad (7)$$

در رابطه‌های ۵، ۶ و ۷، T_{sen} دمای درخشندگی ثبت‌شده در سنجنده، L_{sen} میزان انرژی ثبت‌شده در سنجنده برای باند حرارتی ۱۰، b_{λ} ضریب ثابتی است که برای باند ۱۰ لندست ۸ برابر با ۱۳۲۴ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود، C_1 و C_2 ضرایب ثابت‌اند که برای لندست ۴، ۵ و ۷ به ترتیب 1.04×10^4 و $1.4387/7$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، λ_1 ، λ_2 و λ_3 توابع اتمسفری هستند که طبق رابطه‌های ۸ تا ۱۰ محاسبه می‌شوند (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمنز و همکاران، ۲۰۱۴).

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (8)$$

$$\psi_2 = -Ld - \frac{Lu}{\tau} \quad (9)$$

$$\psi_3 = Ld \quad (10)$$

در رابطه‌های ۸ تا ۱۰، τ قابلیت انتقال اتمسفری، Ld تابش رو به پایین اتمسفری، و Lu تابش رو به بالای اتمسفری است. برای مناطقی که داده‌های مربوط به انتقال تابش در دسترس نباشد از رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ برای محاسبه توابع اتمسفری استفاده می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ جیمنز و همکاران، ۲۰۱۴).

$$\begin{cases} \psi_1 = 0.04019w^2 + 0.02916w + 1.01523 \\ \psi_2 = -0.38333w^2 - 1.50294w - 0.20324 \\ \psi_3 = 0.00918w^2 + 1.36072w - 0.27514 \end{cases} \quad \text{لندست ۸} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \psi_1 = 0.14714w^2 - 0.15583w + 1.1234 \\ \psi_2 = -1.1836w^2 - 0.37607w - 0.53894 \\ \psi_3 = 0.04554w^2 + 1.8719w - 0.39071 \end{cases} \quad \text{لندست ۴، ۵ و ۷} \quad (12)$$

در رابطه‌های ۱۱ و ۱۲، w میزان بخار آب موجود در اتمسفر است که از محصول بخار آب MODIS و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی به‌دست می‌آید. درنهایت، از دمای محصول MOD11 مادیس برای ارزیابی دقت دمای سطح محاسبه‌شده استفاده شده است.

استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح

تغییرات کاربری اراضی ناشی از فعالیت‌های انسانی سبب تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح از جمله روشنایی، سبزیگی، و رطوبت می‌شود (زانچتا و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، با تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح، LST نیز تغییر می‌کند. برای استخراج خصوصیات سطح از جمله روشنایی، سبزیگی، و رطوبت مدل‌های مختلفی در مطالعات گذشته ارائه شده است. در این بین، پارامترهای آلبیدو، شاخص تفاضلی آب نرمال‌شده (NDWI) و NDVI با استفاده از باندهای انعکاسی تصاویر- اطلاعات مفید و مؤثری از خصوصیات بیوفیزیکی را از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌کنند (امینه و همکاران، ۲۰۱۲). اطلاعات مربوط به روشنایی، سبزیگی، و رطوبت سه جزء اصلی اطلاعات استخراج‌شده از این پارامترها می‌باشند. آلبیدوی سطح نشان‌دهنده اطلاعات روشنایی شامل درصد سطوح نفوذناپذیر از جمله اراضی بایر و ساخته‌شده، NDVI نشان‌دهنده اطلاعات سبزیگی از جمله پوشش گیاهی، و شاخص NDWI نشان‌دهنده اطلاعات رطوبت شامل خصوصیات عوارض مرتبط با آب، رطوبت خاک، گیاه، و اراضی ساخته‌شده است. رابطه NDWI برای تصاویر لندست به‌صورت رابطه ۱۳ نشان داده شده است (مک فیتز، ۲۰۱۳).

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، ρ_{Green} و ρ_{NIR} به‌ترتیب بازتاب باندهای مادون قرمز نزدیک و سبز می‌باشند. برای محاسبه آلبیدوی سطح از ترکیب خطی براساس باندهای انعکاسی استفاده شد (هی و همکاران، ۲۰۱۸).

بررسی روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی و دمای سطح

در مطالعه حاضر برای بررسی روند تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در بازه‌های زمانی مختلف از مدل کراس تب استفاده شده است. در این مدل هم محاسبه تعداد پیکسل‌هایی که در بین دو تاریخ تصویربرداری تغییر یافته امکان‌پذیر است هم می‌توان ماهیت تغییرات اراضی را مشخص کرد (ال-هاتب، ۲۰۱۶).

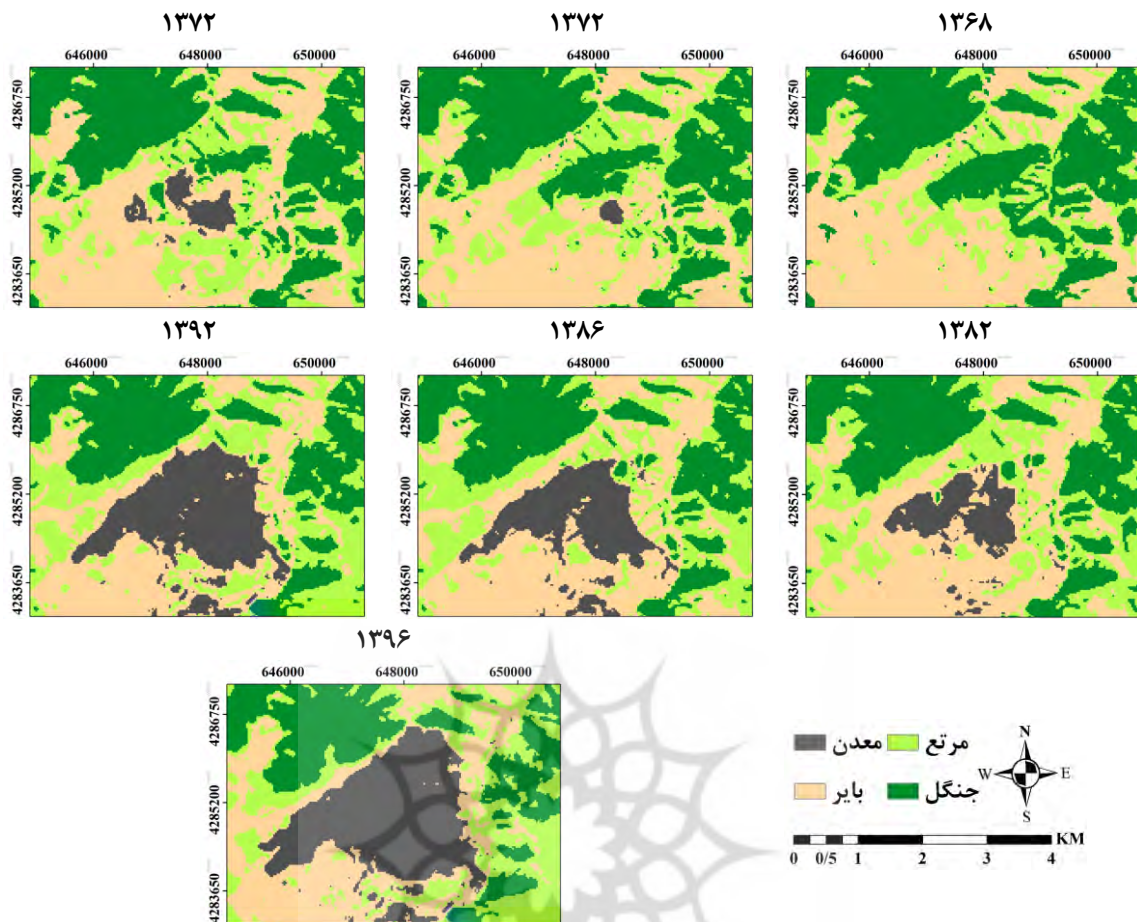
برای بررسی روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی روشنایی، رطوبت، و سبزیگی، میانگین مقادیر پارامترهای آلبیدو، NDWI و NDVI برای سال‌های مختلف در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ بررسی شده است. همچنین، برای بررسی روند

تغییرات دمای سطح و بررسی تأثیر هر نوع تغییرات کاربری اراضی بر تغییر دمای سطح سه گام انجام شده است. در گام اول، دمای سطح محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه در سال‌های مختلف نسبت به تغییرات دمای هوا در سال‌های مختلف نرمال شده است. هدف از نرمال‌سازی تغییرات دمای هوا محاسبه تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی بوده است. بدین منظور، نخست مقدار دمای هوا برای لحظه گذر ماهواره در ایستگاه‌های هواشناسی اهر، کلیبر، و ورزقان بررسی شده است. میانگین مقادیر دمای سه ایستگاه هواشناسی محاسبه شده است. میانگین مقادیر دمای سطح پیکسل‌های خاص با مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶۵ (جنگل متراکم) برای هر سال محاسبه شده است (پیکسل‌هایی انتخاب شده‌اند که در همه سال‌های مورد مطالعه مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ داشته باشند). سپس، مقدار متوسط میانگین مقادیر دمای سطح پیکسل‌های خاص با مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶۵ سال‌های مختلف محاسبه شده است. مقدار اختلاف بین میانگین مقادیر دمای سطح پیکسل‌های خاص با مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶۵ در هر سال با مقدار متوسط میانگین مقادیر دمای سطح پیکسل‌های خاص با مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶۵ سال‌های مختلف، مقدار تصحیح دمای سطح ناشی از تفاوت دمای سطح را بیان می‌کند. مقدار این اختلاف به صورت جداگانه بر دمای سطح محاسبه شده برای هر تاریخ اعمال شده است. برای اثبات کارایی این روش، ضریب همبستگی بین مقادیر میانگین دمای هوا و میانگین مقادیر دمای سطح پیکسل‌های خاص با مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶۵ در سال‌های مختلف بررسی شده است. در گام دوم، اختلاف مقادیر دمای سطح بین سال‌های مختلف با استفاده از روش تفاضل محاسبه شده است. در گام سوم، با استفاده از تحلیل مکانی آماری زونال^۱، میانگین تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی بررسی شده است.

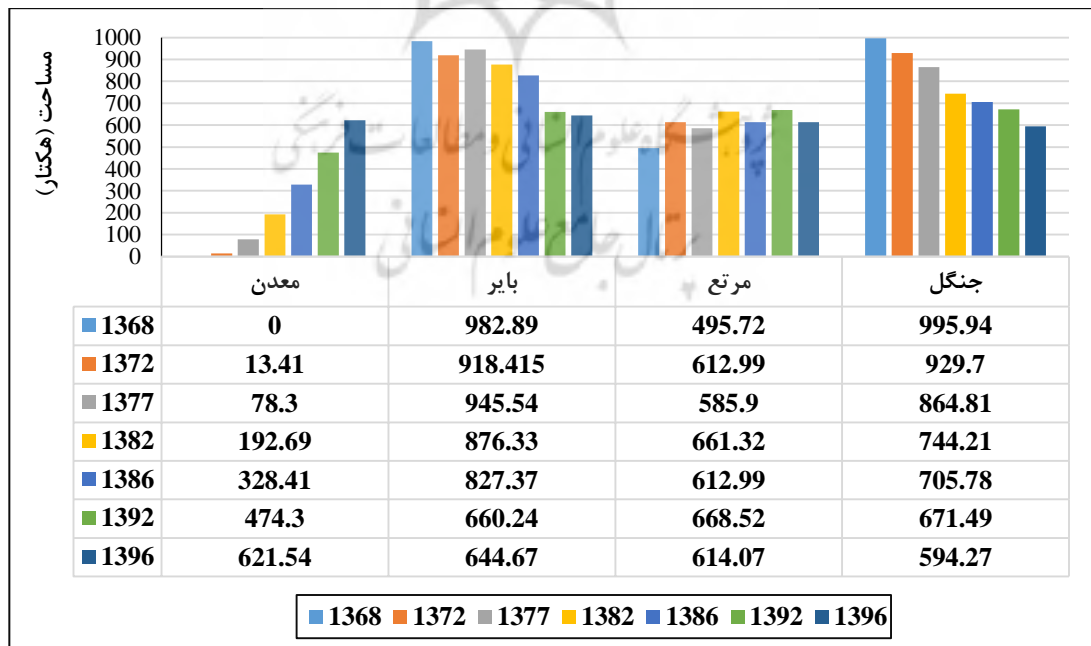
یافته‌های پژوهش

به‌طور کلی، با توجه به شرایط خاص اکولوژیکی و آب و هوایی مساعد منطقه مورد مطالعه، علاوه بر کاربری بایر (ذکر این نکته لازم است که مراتع ضعیف هم در این کلاس گنجانده شده‌اند)، اراضی مرتع و جنگل نیز در این منطقه وجود دارند. در سال ۱۳۷۲، به دلیل توسعه فعالیت‌های معدن مس سنگون در منطقه مورد مطالعه، کاربری معدن نیز به دیگر کاربری‌های موجود در منطقه افزوده شده است. طی دو دهه گذشته، با افزایش فعالیت معدن سنگون، مساحت این کاربری در این منطقه افزایش چشم‌گیری داشته است. نقشه‌های کاربری اراضی به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی بیشترین شباهت برای سال‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. میانگین مقادیر پارامترهای ضریب کاپا و دقت کلی نقشه‌های کاربری اراضی براساس مجموعه داده تست به ترتیب ۰/۹۱ و ۹۲ درصد است که نشان‌دهنده دقت مناسب نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده است.

بررسی بصری نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۶ رشد و توسعه فیزیکی بیش از حد کاربری معدن در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در مرحله باطله‌برداری معدن مس سنگون چندین میلیون تن خاک جابه‌جا شده و باطله‌ها در دره‌های مجاور انباشت شده است؛ به گونه‌ای که پوشش گیاهی دره‌های مجاور در زیر مواد باطله مدفون و سیمای طبیعی منطقه دگرگون شده است. همچنین، چندین هکتار از اراضی منطقه در اثر جاده‌کشی تخریب شده است. مهم‌ترین اثرهای تغییرات کاربری اراضی در کلاس‌های جنگل و معدن قابل مشاهده است. شکل ۴ مساحت طبقات مختلف کاربری اراضی در طول بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ را نشان می‌دهد.

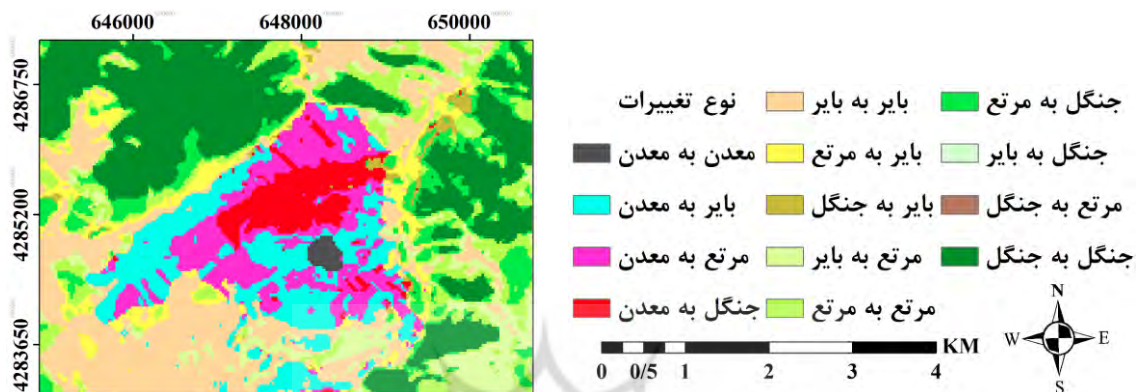


شکل ۳. نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶



شکل ۴. مساحت کاربری‌های اراضی برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ (هکتار)

بررسی نتایج شکل ۴ نشان‌دهنده افزایش مساحت کاربری معدن از ۱۳/۴۱ هکتار در سال ۱۳۷۲ به ۶۲۱/۵۴ هکتار در سال ۱۳۹۶ است. در طی همین دوره مطالعاتی، بر اثر گسترش و توسعه فعالیت‌های معدنی، مساحت جنگل‌ها از ۹۹۵/۹۴ هکتار به ۵۹۴/۲۷ هکتار کاهش یافته است. روند افزایش مساحت کاربری معدن و کاهش مساحت اراضی جنگل طی این سال‌ها روندی نگران‌کننده را نشان می‌دهد. افزایش میزان تخریب منابع طبیعی در این منطقه حاکی از گسترش فعالیت‌های انسانی است، که اصلی‌ترین علت تغییرات کاربری جنگل است. میزان تغییرات کاربری اراضی برای بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۹۶ به صورت شکل ۵ و جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵. نقشه تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۶

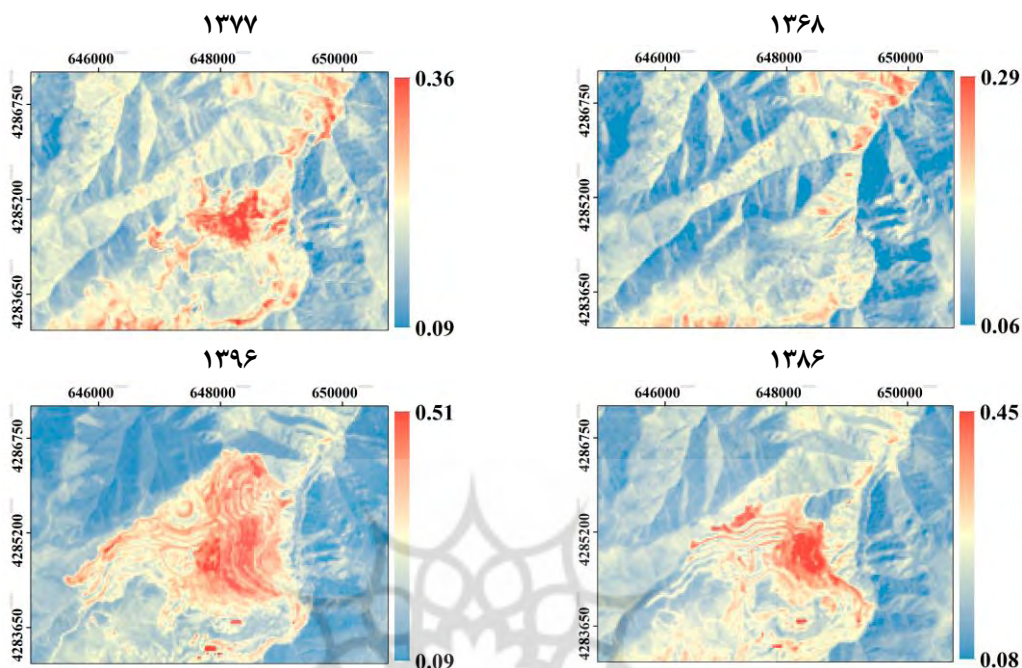
جدول ۲. مقدار تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۶ (هکتار)

	معدن	بایر	مرتع	جنگل	مجموع
۱۳۷۲-۱۳۹۶					
معدن	۱۳۴/۱	۱۳۴/۱	۲۶۳۲/۵	۲۲۹۵	۱۱۵۳/۸
بایر	۰	۴۸۰۰/۶	۱۳۶۴/۴	۲۸۱/۷	۶۴۴۶/۷
مرتع	۰	۱۷۵۰/۵	۲۴۶۹/۶	۱۹۲۰/۶	۶۱۴۰/۷
جنگل	۰	۰/۹	۰/۹	۵۹۴۰/۹	۵۹۴۲/۷
مجموع	۱۳۴/۱	۹۱۸۴/۵	۶۱۲۹/۹	۹۲۹۷/۰	۲۴۷۴۵/۵

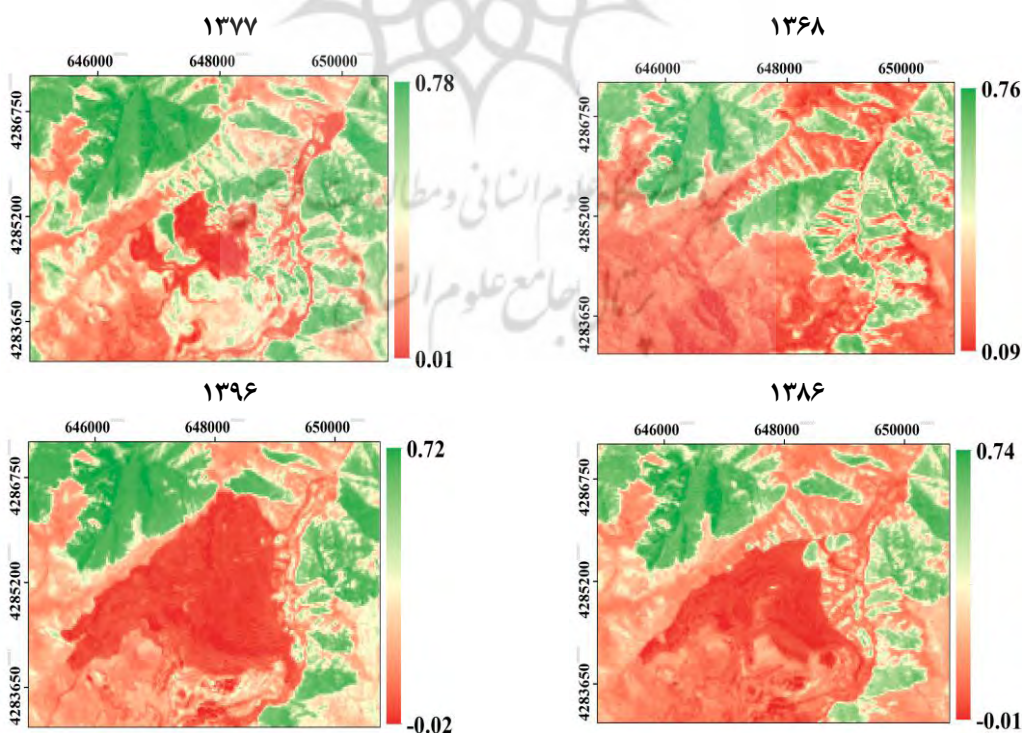
نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در بازه زمانی مورد مطالعه، ۲۲۹۵ هکتار از مساحت جنگل به کاربری معدن تبدیل شده است. همچنین، بیش از ۲۶۳۲ هکتار از اراضی مرتع به کاربری معدن تبدیل شده است. اثرهای گسترش فعالیت معدن طی سال‌های گذشته بر جنگل‌های اطراف را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: ۱. اثرهای مستقیم؛ ۲. اثرهای غیرمستقیم. اثرهای مستقیم مربوط به تبدیل مناطق با کاربری جنگل به کاربری معدن به دلیل افزایش مساحت فیزیکی معدن است. از طرف دیگر، مواد معدنی مستخرج از معدن سونگون، علاوه بر مس، حداقل عناصر آرسنیک، کبالت، جیوه، و نیکل را نیز همراه خود دارند. در نتیجه، خاک‌های سطحی مجاور تحت تأثیر زه‌آب اسیدی معدن و نشت آلاینده‌ها قرار می‌گیرند که باعث می‌شود گیاهان و درختان جنگل اطراف منطقه معدن کاری با فلزات سنگین و زه‌آب اسیدی آلوده شوند و بخش وسیعی از منطقه عاری از پوشش جنگل شود (سلماسی، ۱۳۸۶). وجود آبراهه‌های متعدد، رودخانه‌های سونگون چای در شرق و پخیر در شمال معدن، و عبور این رودخانه‌ها از نزدیکی و مجاورت جنگل سبب تشدید اثرهای منفی غیرمستقیم فعالیت‌های معدنی بر اراضی جنگلی در این مناطق می‌شود.

به صورت کلی، تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه ناشی از افزایش فعالیت معدنی طی سال‌های گذشته سبب اثرهای منفی بسیاری در این منطقه شده است. برای بررسی اثرهای منفی افزایش فعالیت معدنی بر خصوصیات

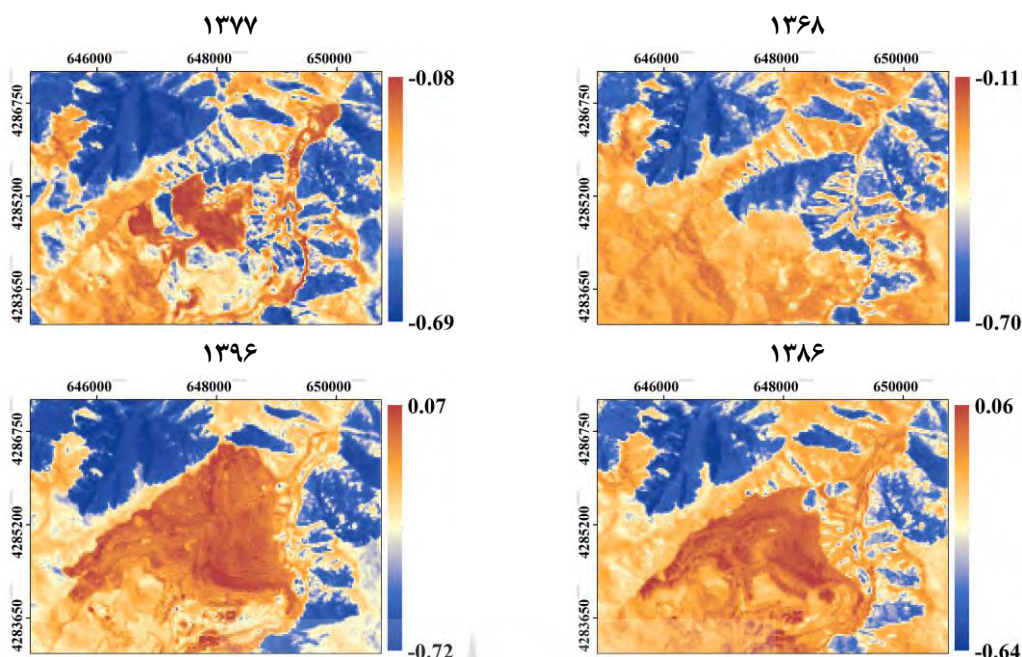
بیوفیزیکی سطح منطقه، مقادیر پارامترهای آلبیدو، NDVI، و NDWI، که به ترتیب نشان‌دهنده روشنایی، سبزیگی، و رطوبت‌اند، برای سال‌های مختلف محاسبه شده است. نمونه‌ای از نقشه‌های پارامترهای آلبیدو، NDVI، و NDWI به ترتیب به صورت شکل‌های ۶، ۷، و ۸ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمونه‌ای از نقشه‌های پارامتر آلبیدو برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶

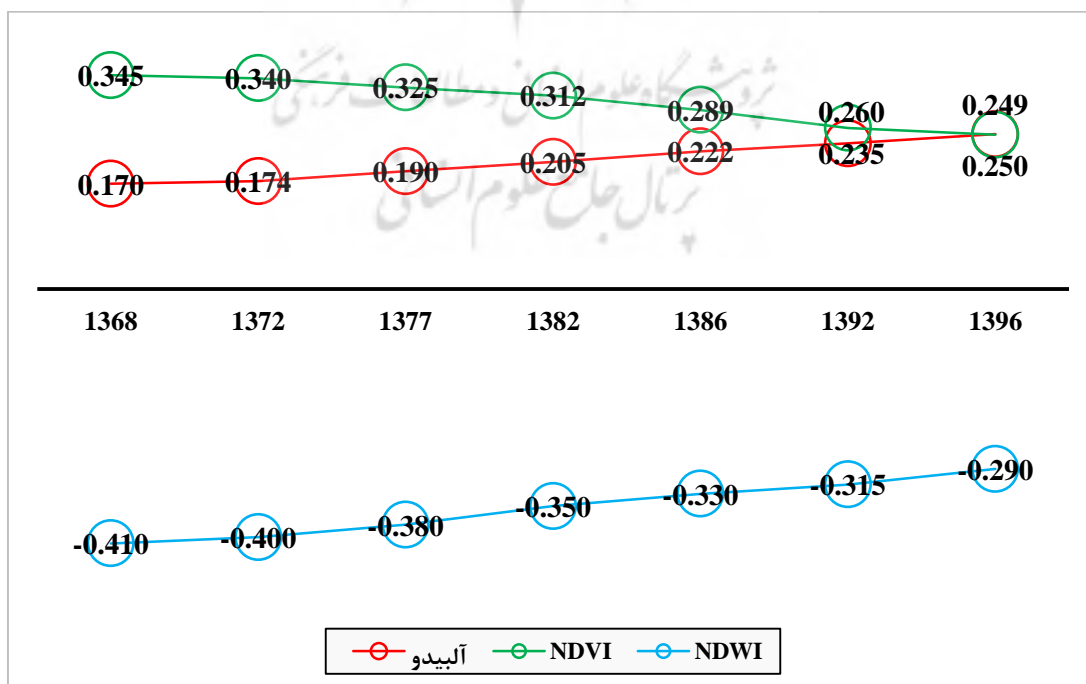


شکل ۷. نمونه‌ای از نقشه‌های NDVI برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶



شکل ۸. نمونه‌ای از نقشه‌های NDWI برای بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶

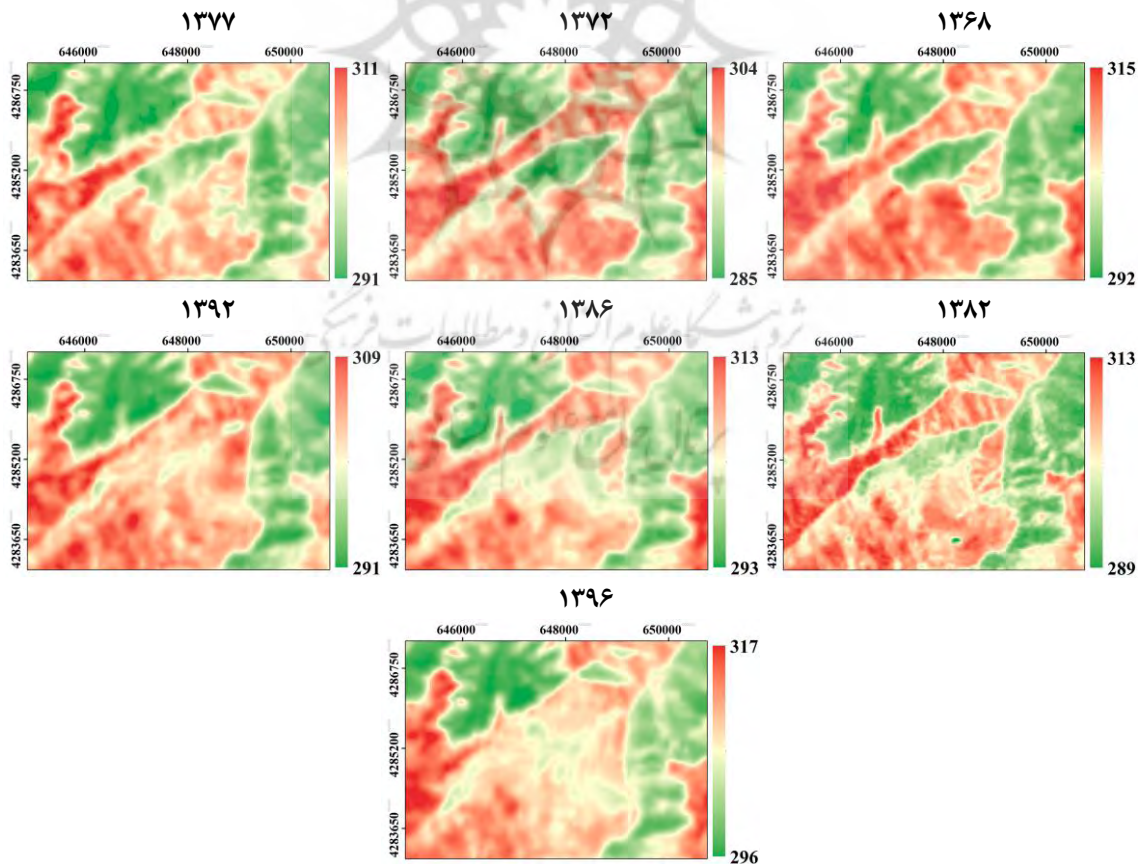
بررسی بصری شکل‌های ۶ تا ۸ نشان می‌دهد که، با گسترش فیزیکی کاربری معدن، مقادیر خصوصیات بیوفیزیکی سطح تغییرات فراوانی داشته است. با افزایش مساحت کاربری معدن، مساحت مناطق با مقادیر بالای پارامتر آلبدو افزایش یافته، مساحت مناطق با مقادیر پایین پارامتر NDVI افزایش یافته، و همچنین مساحت مناطق با مقادیر بالای پارامتر NDWI افزایش قابل توجهی یافته است. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی روشنائی، سبزینگی، و رطوبت ناشی از افزایش فعالیت معدنی، میانگین مقادیر هر یک از شاخص‌های آلبدو، NDVI، و NDWI برای سال‌های مختلف محاسبه و به‌صورت شکل ۹ نشان داده شده است.



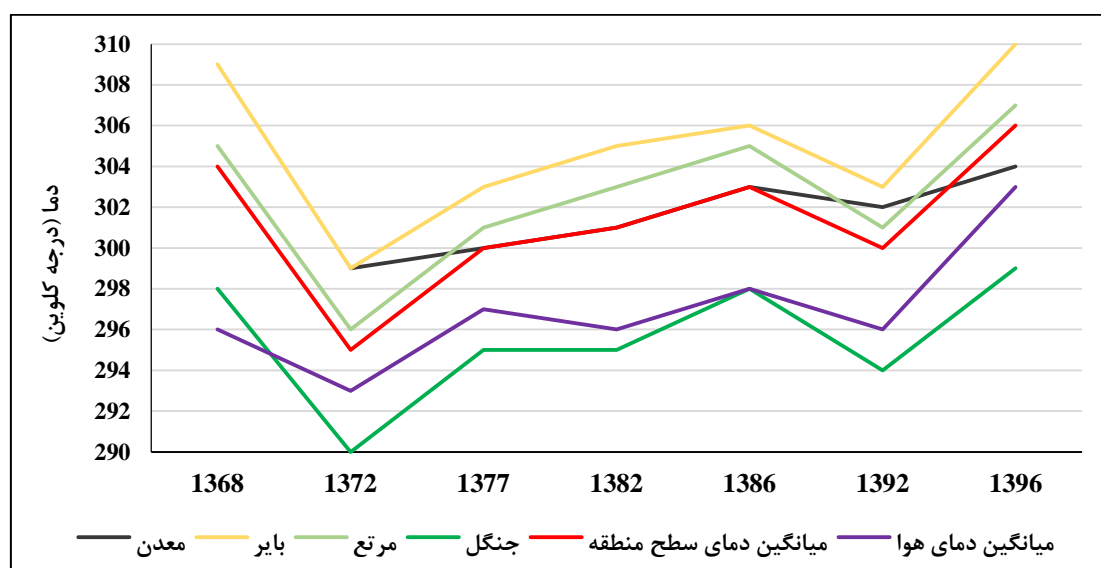
شکل ۹. میانگین مقادیر هر یک از شاخص‌های آلبدو، NDVI، و NDWI برای سال‌های مختلف

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که طی بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۶ مقدار میانگین پارامترهای آلبیدو، NDVI، و NDWI به ترتیب افزایش، کاهش، و افزایش یافته است. میانگین مقادیر آلبیدوی سطح برای منطقه مورد مطالعه از ۰/۱۷ در سال ۱۳۶۸ به ۰/۲۵ در سال ۱۳۹۶ رسیده است. همچنین، مقدار میانگین شاخص NDVI در طول بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ تقریباً ۰/۰۹ کاهش یافته است. دلیل کاهش میانگین مقادیر NDVI کاهش مساحت اراضی جنگلی و تبدیل آن به اراضی معدن و مرتع طی سال‌های گذشته است. مهم‌ترین تأثیر منفی تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح تغییرات دمای سطح است. مقادیر دمای سطح برای منطقه مورد مطالعه در زمان‌های مختلف مورد بررسی با استفاده از الگوریتم تک‌کاناله محاسبه شده است. RMSE بین میانگین دمای سطح به دست آمده از تصاویر لندست و محصول MOD11 منطقه مورد مطالعه کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده دقت مناسب دمای سطح محاسبه شده با الگوریتم تک‌کاناله و تصاویر لندست است. شکل ۱۰ نقشه‌های دمای سطح برای زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

بررسی بصری شکل ۱۰ نشان می‌دهد که توزیع مکانی مقادیر دمای سطح در منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۶ تغییر کرده است. با افزایش فعالیت معدنی طی دو دهه گذشته، خوشه حرارتی با دمای پایین در مرکز تصویر به منطقه با دمای متوسط نسبت به دیگر مناطق تغییر کرده است. میانگین دمای سطح منطقه مورد مطالعه، میانگین دمای هوای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی، و میانگین دمای سطح هر یک از کاربری‌های خاص محاسبه و به صورت شکل ۱۱ نشان داده شده است.

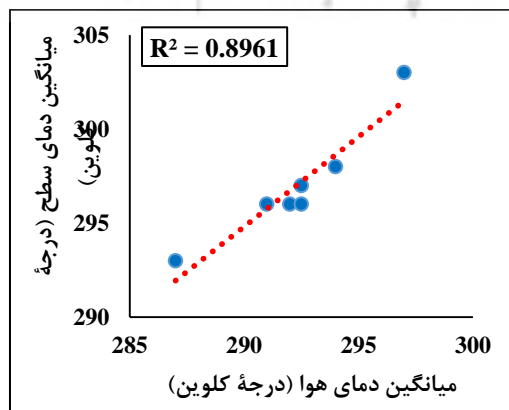


شکل ۱۰. نقشه‌های دمای سطح منطقه مورد مطالعه برای زمان‌های مختلف (درجه کلونین)



شکل ۱۱. میانگین مقادیر دمای سطح منطقه مورد مطالعه، دمای هوای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی، و دمای سطح انواع کاربری‌ها در سال‌های مختلف (درجه کلوین)

در همه تاریخ‌ها، پایین‌ترین و بالاترین میانگین دمای سطح به ترتیب برای کاربری‌های جنگل و باير بوده است. در این سال‌ها، میانگین دمای سطح جنگل به صورت متوسط $۶/۳۳$ درجه پایین‌تر از مقدار میانگین دمای سطح کاربری معدن است. روند تغییرات میانگین دمای هوای ایستگاه‌های هواشناسی و اراضی جنگل نیز بسیار حائز اهمیت است. اختلاف زیاد میانگین دمای سطح اراضی جنگل و معدن اهمیت زیست‌محیطی تأثیر تغییر جنگل به معدن بر افزایش دمای سطح را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱، میانگین دمای سطح جنگل طی بازه زمانی مورد مطالعه تغییرات زیادی داشته است. با توجه به یکسان بودن روند تغییرات میانگین دمای هوا و میانگین دمای سطح جنگل، می‌توان نتیجه گرفت که علت اصلی تغییرات زیاد دمای سطح جنگل طی این تاریخ‌ها تغییرات دمای هوا و شرایط جوی بوده است. در این مطالعه، برای بررسی دقیق تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تغییر دمای سطح، نخست، دمای سطح برای تاریخ‌های مختلف نسبت به دمای هوا نرمال شده است. بدین منظور، در گام اول ارتباط بین مقدار میانگین دمای هوا ثبت شده در سه ایستگاه هواشناسی و میانگین دمای سطح مناطقی از منطقه مورد مطالعه، که در همه سال‌ها مقدار NDVI بالاتر از $۰/۶۵$ داشته‌اند، بررسی و نتایج به صورت شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. ارتباط بین میانگین دمای هوا و میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از $۰/۶۵$ در سال‌های مختلف

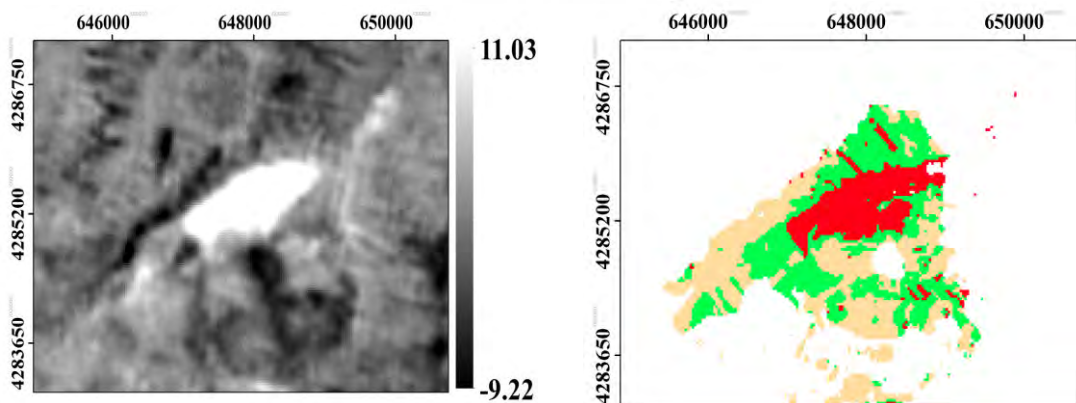
ضریب همبستگی ارتباط بین میانگین دمای هوای ثبت‌شده در سه ایستگاه هواشناسی و میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ در همه سال‌ها ۰/۸۹ است. متوسط مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ در همه سال‌ها ۲۹۲/۲ درجه کلوین است. برای تصحیح اثر تغییر دمای هوا بر تغییر دمای سطح منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی مورد مطالعه اختلاف بین متوسط مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ و هر یک از مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ محاسبه و بر روی دمای سطح مربوط به هر تاریخ اعمال شده است. نتایج مربوط به اختلاف بین متوسط مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ و هر یک از مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ در جدول ۳ نشان داده شده است.

پس از تصحیح اثر تغییر دمای هوا بر تغییر دمای سطح، با استفاده از تفریق تصاویر دمای سطح زمان‌های مختلف، تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی برای بازه‌های زمانی مختلف محاسبه شده است. برای نمونه، نقشه تغییرات دمای سطح و تبدیل دیگر کاربری‌ها به معدن برای بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۹۶ به صورت شکل ۱۳ نشان داده شده است.

بررسی نتایج شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه در طول بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۹۶ بیشترین تغییرات دمای سطح (مناطق با رنگ سفید) از نظر مکانی منطبق بر مناطقی است که در طول این بازه زمانی از کاربری جنگل تبدیل به معدن شده‌اند. با آنالیز و بررسی همه نقشه‌های تغییرات دمای سطح ممکن (۱۵ حالت مختلف) با نقشه تغییرات کاربری اراضی متناظر با آن (به‌عنوان مثال: نقشه تغییرات دمای سطح و نقشه تغییرات کاربری اراضی برای بازه زمانی ۱۳۸۲-۱۳۸۶) میانگین تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که به صورت میانگین تغییر کاربری‌های جنگل به معدن، مرتع به معدن، جنگل به مرتع، جنگل به بایر، و مرتع به بایر به ترتیب ۵/۸، -۰/۱، -۱/۴، ۱/۶، ۳/۳، و ۰/۹ تغییر دمای سطح ایجاد کرده‌اند.

جدول ۳. اختلاف بین متوسط مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵ و هر یک از مقادیر میانگین دمای سطح مناطقی با مقدار NDVI بالاتر از ۰/۶۵

سال	۱۳۶۸	۱۳۷۲	۱۳۷۷	۱۳۸۲	۱۳۸۶	۱۳۹۲	۱۳۹۶
مقدار اختلاف	-۱/۴	-۵/۴	۰/۱	-۰/۴	۱/۶	۰/۱	۴/۶



شکل ۱۳. نقشه‌های تغییرات دمای سطح و تبدیل دیگر کاربری‌ها به معدن برای بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۹۶

بحث و نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین اثرهای منفی فعالیت‌های انسانی تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین است. تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین سبب تغییر در بسیاری از فرایندها و چرخه‌های طبیعی زمین از جمله چرخه بیلان انرژی می‌شود. طی دهه‌های گذشته، به دلیل مزایای اقتصادی، فعالیت معدن‌کاری توسط انسان در سراسر جهان افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. معدن‌کاری در ارتباط مستقیم با طبیعت و محیط اطراف است. بنابراین، اثرهای قابل ملاحظه‌ای بر محیط طبیعی دارد. هدف از پژوهش حاضر تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای بررسی و پایش روند تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح منطقه معدن مس سونگون ناشی از فعالیت‌های معدنی طی سه دهه گذشته است. وجه تمایز و نوآوری بارز مطالعه حاضر نسبت به دیگر مطالعات در این زمینه بررسی کمی و کیفی تأثیر فعالیت‌های معدنی بر خصوصیات بیوفیزیکی سطح همچون سبزی‌نگی، رطوبت، روشنایی، و دمای سطح زمین است. همچنین، در این مطالعه از تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای بررسی اثر فعالیت‌های معدنی بر محیط اطراف استفاده شد. در مطالعه حاضر برای اولین بار، برای بررسی میزان تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی مقادیر دمای سطح به دست آمده از باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های مختلف ابتدا نسبت به تغییرات دمای هوا نرمال شده است. نتایج پژوهش نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه و منفی افزایش فعالیت معدن سونگون بر محیط طبیعی اطراف است. در طی دهه‌های گذشته، به سبب افزایش فعالیت معدنی، مساحت کاربری جنگل منطقه مورد مطالعه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. افزایش فعالیت معدنی و در نتیجه کاهش مساحت اراضی جنگلی در منطقه مورد مطالعه سبب کاهش قابل ملاحظه مقادیر پارامترهای بیوفیزیکی سبزی‌نگی و رطوبت و افزایش قابل ملاحظه پارامترهای آلیبدو و دمای سطح شده است. بیشترین تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی مربوط به تغییر کاربری جنگل به معدن است. نتایج پژوهش حاضر هشدار بزرگ و مهم به مسئولان محیط زیست برای ارائه برنامه‌ها و راهکارهای مناسب برای کاهش اثرهای منفی افزایش فعالیت‌های معدنی مس سونگون است. همچنین، نتایج پژوهش سودمندی و کارایی بسیار بالای تلفیق قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی برای پایش و مدیریت پدیده‌های مختلف انسانی، محیطی، و طبیعی را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی روند تغییرات کاربری اراضی و خصوصیات بیوفیزیکی سطح از جمله تغییرات دمای سطح ناشی از تغییرات کاربری اراضی ناشی از فعالیت معدن برای سال‌های آتی و آینده پیش‌بینی شود.

منابع

رسولی، ع.؛ احمدی، م.؛ حسین‌زاده، م. و قنبری، ا. (۱۳۹۴). ارزیابی و برآورد زمانی- مکانی تغییرات پوشش/ کاربری اراضی اطراف معدن مس سونگون با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجش از دور، اولین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی پاک، اردبیل.

رشیدی‌نژاد، ف. (۱۳۸۱). ارزیابی اثرات زیست‌محیطی طرح مس سونگون، اندیشه، گزارش فصلی امور تحقیقات و مجتمع مس سرچشمه، ۲۴: ۱۸-۲۷.

رضایی بنفشه، م.؛ رستم‌زاده، ه. و فیضی‌زاده، ب. (۱۳۸۶). بررسی و ارزیابی روند تغییر سطوح جنگل با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی جنگل‌های ارسباران)، پژوهش‌های جغرافیایی، ۶۲: ۱۴۳-۱۵۹.

رنجبر، ف. و فیضی‌زاده، ب. (۱۳۹۴). بررسی روند توسعه معدن مس سونگون و اثر آن در کاهش جنگل‌های ارسباران با استفاده از سنجش از دور و GIS، اولین کنگره پژوهشی کاربرد علوم نوین در مطالعات جغرافیایی ایران، مشهد.

زبردست، ل.؛ جعفری، ح.؛ باده‌یان، ض. و عاشق معلا، م. (۱۳۸۹). ارزیابی روند تغییرات پوشش اراضی منطقه حفاظت‌شده ارسباران در فاصله زمانی ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، و ۲۰۰۸ میلادی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، پژوهش‌های محیط زیست، ۱: ۲۳-۳۳.

سلماسی، ر. (۱۳۸۶). بررسی تأثیرات معدن مس سونگون بر محیط زیست، مجموعه مقالات اولین همایش زمین‌شناسی زیست‌محیطی و پزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

سمیعی، ع.؛ آقازاده، و. و خدادادی، ا. (۱۳۸۶). بررسی اثرات زیست‌محیطی معدن مس سونگون، مجموعه مقالات بیست‌وششمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

شرکت ملی صنایع مس ایران (۱۳۸۰). گزارش تکمیلی ارزیابی اجمالی اثرات زیست‌محیطی طرح باطله‌برداری معدن مس سونگون.

صدیقی، ا. و رسولی، ع. (۱۳۹۲). ارزیابی و پیش‌بینی زمانی- مکانی اثرات معدن مس سونگون بر تغییرات پوشش/ کاربری اراضی اطراف با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجش از دور، مدل‌های LCM و CA-Markov، پایان‌نامه ارشد، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز.

Amine, R.M. and Hadria, F.I. (2012). Integration of NDVI indices from the tasseled CAP transformation for change detection in satellite images, *International Journal of Computer Science*, 9(2): 1694-0814.

Charou, E.; Stefouli, M.; Dimitrakopoulos, D.; Vasilioiu, E. and Mavrantza, O.D. (2010). Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources, *Mine Water and the Environment*, 29(1): 45-52.

El-Hattab, M.M. (2016). Applying post classification change detection technique to monitor an Egyptian coastal zone (Abu Qir Bay), *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(1): 23-36.

Hantson, S. and Chuvieco, E. (2011). Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5): 691-700.

He, T.; Liang, S.; Wang, D.; Cao, Y.; Gao, F.; Yu, Y. and Feng, M. (2018). Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+, and OLI data based on the unified direct estimation approach, *Remote Sensing of Environment*, 204: 181-196.

Helming, K. (2008). *Sustainability Impact Assessment of Land use Changes*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

- Jiménez-Muñoz, J.C. and Sobrino, J.A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(22): 45-69.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Cristóbal, J.; Sobrino, J.A.; Sòria, G.; Ninyerola, M. and Pons, X. (2009). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 47(1): 339-349.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Sobrino, J.A.; Skoković, D.; Mattar, C. and Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10): 1840-1843.
- Joshi, P.K.; Kumar, M.; Midha, N.; Yanand, V. and Wal, A.P. (2006). Assessing areas deforested by coal mining activities through satellite remote sensing images and GIS in parts of Korba, Chattisgarh, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 34(4): 415-430.
- Latifovic, R.; Fytas, K.; Chen, J. and Paraszcak, J. (2005). Assessing land cover change resulting from large surface mining development, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7: 29-48.
- Lausch, A. and Herzog, F. (2002). Applicability of Landscape Metrics for the Monitoring of Landscape Change: Issues of Scale, Resolution and Interpretability, *Ecological Indicator*, PP. 3-15.
- Macleod, R.S. and Congalton R.G. (1998). A quantitative comparison of change detection algorithms for monitoring grass from remotely sensed data, *Photogrammetric and Engineering Remote Sensing*, 64(3): 207-216.
- McFeeters, S.K. (2013). Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach, *Remote Sensing*, 5(7): 3544-3561.
- National Copper Industries Corporation (2001). Supplementary Report on the Environmental Impact Assessment of the Sungun Copper Mine Waste Disposal Project.
- Otukei, J.R. and Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12: 27-S31.
- Padmanaban, R.; Bhowmik, A.K. and Cabral, P. (2017). A Remote Sensing Approach to Environmental Monitoring in a Reclaimed Mine Area, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12): 401-415.
- Parsa, V.A.; Yavari, A. and Nejadi, A. (2016). Spatio-temporal analysis of land use/land cover pattern changes in Arasbaran Biosphere Reserve: Iran, *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4): 178-193.
- Ranjbar, F. and Feizizadeh, B. (2015). A Study on the Development Process of Sungun Copper Mine and its Effect on Reduction of Arasbara forests using Remote Sensing and GIS, *The 1-st International Congress on Use of Modern Science in the Studies of Geography of Iran*, Mashhad.
- Rashidinejad, F. (2002). Assessment of the environmental im-pacts of Süngün Copper project, *Andisheh Journal*, 24: 18-27.
- Rasouli, A.K.; Ahmad, M.; Hosseinzadeh, M. and Ghanbari, E. (2015). Assessment and Spatial-Temporal Estimation of cover/ Land Use Change Surrounding Sungun Mine Using Remote Sensing Multi-temporal Data, *The 1st International Congress on Earth, Space & Clean Energy*, Ardabil.
- Rasuly, A.; Naghdifar, R. and Rasoli, M. (2010). Detecting of Arasbaran forest changes applying image processing procedures and GIS techniques, *Procedia Environmental Sciences*, 2: 454-464.

- Rezaei Banafsheh, M.; Rostamzadeh, H. and Feizizadeh, B. (2008). The Study and Evaluation of the Trend of Forest Surface Change Using the Remote Sensing and GIS: A Case Study of Arasbaran Forests (1987-2005), *Geographical Research*, 40(1): 143-159.
- Salmasi, R. (2008). Investigating the Effects of Copper Mine on the Environment, Proceedings of the first environmental and medical geology conference, Shahid Beheshti University, Tehran.
- Samiei, A.; Aghazadeh, V. and Khodadadi, A. (2007). Study of environmental effects of Süngün Copper Mine, Proceedings of the 26th annual Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Sarma, K. and Kushwaha, S.P.S. (2005). Coal mining impact on land use/land cover in jointia hills district of Meghalaya, India using remote sensing and GIS technique, In Conference Proceeding of National Conference on Geospatial Technologies, *Geomatrix*, 9: 28-43.
- Sedighi, A. and Rasuli, A.K. (2013). Assessment and Spatio-temporal Prediction Impacts of Süngün Copper Mine on Land use/cover By Processing of Remote Sensing Multi-Temporal Images and LCM and CA-Markov Models, M.Sc.Thesis, Faculty of Geography and Planning, Tabriz University, Tabriz.
- Sobrino, J.A. and Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco, *International journal of remote sensing*, 21(2): 353-366.
- Sobrino, J.A.; Jiménez-Muñoz, J.C. and Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of environment*, 90(4): 434-440.
- Townsend, P.A.; Helters, D.P.; Kingdon, C.C.; McNeil, B.E.; De Beurs, K.M. and Eshleman, K.N. (2009). Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976–2006 Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 62-72.
- Valor, E. and Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas, *Remote sensing of Environment*, 57(3): 167-184.
- Wang, Z.; Schaaf, C.B.; Sun, Q.; Kim, J.; Erb, A.M.; Gao, F. ... and Masek, J.G. (2017). Monitoring land surface albedo and vegetation dynamics using high spatial and temporal resolution synthetic time series from landsat and the MODIS BRDF/NBAR/ALBEDO product, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 59: 104-117.
- Yadav, S.K. and Borana, S.L. (2017). Monitoring and Temporal Study of Mining Area of Jodhpur City Using Remote Sensing and GIS, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(10): 45-64.
- Yue, X.; Guo, X. and Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS— Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method, *Remote Sensing*, 6(10): 9829-9852.
- Yue, X.; Zhao, J.; Li, Z.; Zhang, M.; Fan, J.; Wang, L. and Wang, P. (2017). Spatial and temporal variations of the surface albedo and other factors influencing Urumqi Glacier No. 1 in Tien Shan, China, *Journal of Glaciology*, 63(241): 899-911.
- Zanchetta, A.; Bitelli, G. and Karnieli, A. (2016). Monitoring desertification by remote sensing using the Tasseled Cap transform for long-term change detection, *Natural Hazards*, 83(1): 223-237.
- Zebardast, L.; Jafari, H.; badehyan, Z. and asheghmoala, M. (2011). Assessment of the Trend of Changes in Land Cover of Arasbaran Protected Area Using Satellite Images of 2002, 2006 and 2008, *Environmental Researches*, 1(1): 23-33.
- Zhang, D. and Zhou, G. (2016). Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review, *Sensors*, 16(8): 1308-1325.