



شماره ۱۰۸، پاییز ۱۳۹۴

ژئوشیمی آبخیزداری

(پژوهش و سازندگی)

مدل سازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین بر روی تولید رسوب با استفاده از شبکه خودکار مارکف (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز چالوس رود)

• وجیهه قربان نیا خیبری

دانش آموخته کارشناسی ارشد محیط زیست از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (نویسنده مسئول)

• عبدالرسول سلمان ماهینی

دانشیار گروه محیط زیست دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

• علی نجفی نژاد

دانشیار گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

• مرجان محمدزاده

دانشیار گروه محیط زیست دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

• محسن آرمین

استادیار گروه آبخیزداری دانشگاه یاسوج

Email: Ghorbannia2008@gmail.com

چکیده

یکی از پیامدها و مشکلات زیست محیطی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین فرسایش خاک است که به طور جدی منابع آب و خاک حوزه‌های آبخیز را تهدید می‌کند. بنابراین، نیاز است که ابعاد مکانی کاربری اراضی و پوشش زمین و اثرات آن روی فرایندهای حوزه آبخیز مرتباً شناسایی شوند تا سیاست‌گذاران و محققان بتوانند تصمیمات لازم را اتخاذ کنند. در سال‌های اخیر، با دسترسی آسان به داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل سازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین و پیش بینی آن در آینده بسیار رایج شده است. مطالعه حاضر با هدف بررسی تغییرات پوشش زمین و کاربری اراضی حوزه آبخیز چالوس رود در استان مازندران با استفاده از شبکه خودکار مارکف و مدل سازی این تغییرات روی تولید رسوب انجام شده است. برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از نتایج تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین و مدل تجربی EPM انجام شده است. نتایج نشان داد که میزان تغییرات سطوح جنگل در ۲۰ سال گذشته و ۲۰ سال آینده به ترتیب ۵۱۰۰ و ۴۲۰۰ هکتار است. نتایج رگرسیون لجستیک با Pseudo R² حدود ۰/۳ و ROC حدود ۰/۹ نشان دهنده توافق نسبی مدل بدست آمده با تغییرات واقعی و توانایی مناسب مدل در برآورد تغییرات جنگل در ۲۰ سال گذشته است. نتایج مربوط به شبیه‌سازی نقشه پوشش زمین سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ نشان داد که شبکه خودکار مارکف توانایی و قابلیت بالایی در مدل سازی تغییرات پوشش زمین دارد و در این مطالعه صحت و درستی نقشه‌های پوشش زمین بدست آمده حدود ۸۰ درصد بود. نتایج همچنین نشان داد که ضریب شدت فرسایش در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۳۸ و ۰/۳۹ است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضریب فرسایش افزایشی است اما از آنجائی که علاوه بر ضریب فرسایش درجه حرارت و بارندگی سالیانه نیز بر فرسایش مؤثر است، میزان فرسایش ویژه حوزه در این سال‌ها به ترتیب ۴۰۰/۹، ۴۰۰/۹، ۳۶۳/۶ متر مکعب در کیلومتر مربع در سال است، یعنی سال ۲۰۰۷ با داشتن ضریب فرسایش بیشتر فرسایش ویژه کمتری داشته است چون در واقع بارندگی کمتری داشته است.

کلمات کلیدی: مدل سازی، تغییر کاربری اراضی، تولید رسوب، شبکه خودکار مارکف، تصاویر ماهواره‌ای، حوزه آبخیز چالوس رود.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 108 pp: 111-128

Modeling changes in land use and land cover on sediment yield using Cellular Automata and Markov Chain (CA-Markov) (Case study: A part of Chaloos River Watershed)

By: V. Ghorbannia kheybari: M.Sc. graduated student of Environmental science, Gorgan University of agricultural sciences and natural resource. (Corresponding Author). A. Salman Mahiny: Associate professor of environmental science department, Gorgan University of agricultural sciences and natural resource. A. Najafinejad: Associate professor of watershed management department, Gorgan University of agricultural sciences and natural resource. M. Mohammadzadeh: Assistant professor of environmental science department, Gorgan University of agricultural sciences and natural resource. M. Armin: Assistant professor of watershed management department, University of Yasuj.

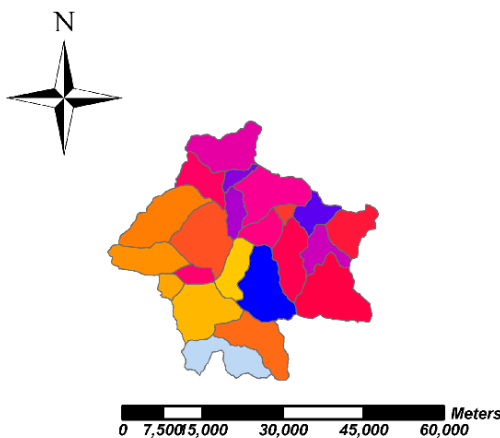
One of the consequences and environmental problem of changes in land use and land cover is soil erosion that threaten soil and water resources of watershed seriously. Therefore it is necessary that the spatial dimensions of land use and land cover are identified regularly so that the policy makers and researched able to take the necessary decisions. In recent years, due to easy access to satellite imagery and capabilities of GIS, land use and land cover changes modeling and prediction is very common. This study has been done to investigate the land use and land cover changes in Chaloos river watershed in Mazandaran province using CA-Markov and modeling of these changes on sediment yield. Estimation of erosion and sediment has been done using the results of land use and land cover changes and EPM model. Results showed that the rate of forest changes in the last 20 years and coming 20 years are 5100 and 4200 respectively. Results of logistic regression with Pseudo R² 0.3 and ROC about 0.9 represents the relative agreement of the model with actual changes and the appropriate ability of the model for estimating changes in forest area in last 20 years. Results about simulation of land cover map in 2001 and 2007 showed that CA-Markov has a high ability and capability in land cover changes modeling which in this study the accuracy of resulting land cover map was 80%. The results also show that the rate of erosion in 1987, 2001 and 2007 are 0.36, 0.38 and 0.39 respectively. It is observed that the trend of erosion is increasingly, but since beside the erosion rate, the temperature and rainfall also affects erosion, the rate of specific erosion in these years are 400.9, 400.9 and 363.6 cubic meter per square kilometer per year respectively, hence the the year of 2007 with further erosion rate has less specific erosion because the rainfall is less.

مقدمه

به منظور حفظ ثروت‌های ارزشمند طبیعی امری حیاتی به شمار می‌رود (Morgan, ۱۹۸۹). نوع بهره‌برداری از اراضی عامل بسیار مهمی در فرسایش و تولید رسوب حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود (Kassas, ۱۹۸۳). در کشور ایران به دلیل عدم توجه به مسئله قابلیت و تناسب کاربری زمین، بیشتر اراضی به صورت نامناسب و نامعقول استفاده می‌شوند که این استفاده نادرست، به شدت فرسایش و رسوب حوزه‌های آبخیز را افزایش می‌دهد. به دلیل اختلاف در ساز و کارهای تلفات آب و خاک در انواع و ترکیب‌های گوناگون کاربری اراضی، می‌توان با تعدیل و تنظیم ترکیب کاربری اراضی، میزان تلفات آب و خاک را کاهش داد (Rai and Sharma, ۱۹۹۷; Kusumandari and Mitchell, ۱۹۹۸; Sanchez, Ataroff and Lopez, ۲۰۰۲). Ye و Bai (۲۰۰۸) تغییر کاربری اراضی ایالت نانجینگ چین را در دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۰ با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی

تغییر پوشش زمین اثرات مستقیمی بر کارکردها و فرایندهای بوم‌شناختی سیمای سرزمین و منابع طبیعی دارد. تخریب جنگل، فرایندهای حوزه آبخیز و چرخه‌های زیست شیمیایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به فرسایش خاک و کمبود آب می‌شود. اطلاعات مربوط به کاربری اراضی و پوشش زمین و امکان استفاده بهینه از آنها برای انتخاب، برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های کاربری اراضی به منظور دست یافتن به تقاضاهای در حال افزایش نیازهای اساسی انسان و رفاه اجتماعی ضروری است. تغییر کاربری اراضی نسبت به تحولات دیگر مثل تغییرات اقلیم، خاک، پوشش گیاهی و فعالیت انسان نقش مهمتری در فرسایش خاک و تولید رسوب دارد (Walling, ۱۹۹۹; Verstraeten, Carroll, Merton and Burgerm, ۲۰۰۰; Van Rompaey and Poeson, ۲۰۰۳). برای تشکیل یک سانتی‌متر خاک بیش از سیصد سال زمان لازم است (Triphati, ۲۰۰۱). از این نظر، جلوگیری از فرسایش خاک

حداقل ارتفاع حوزه آبخیز چالوس رود به ترتیب ۴۲۶۰ و ۱۵۸ متر از سطح دریا است. این حوزه منطقه‌های کوهستانی و پرشیب و دارای جهت کلی شمالی است. از نظر آب و هوایی عمده‌ترین اقلیم حاکم بر منطقه نیمه مرطوب سرد تا مرطوب سرد شناسایی شده است. میزان بارندگی آن از ۲۸۸/۳ میلیمتر تا ۱۵۳۸/۲ میلی‌متر متغیر است. موقعیت کلی این محدوده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

پردازش داده‌های ماهواره‌ای

در این مطالعه برای بررسی تغییر کاربری برای دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۰۷ و پیش‌بینی این تغییرات در سال ۲۰۲۷ از داده سنجنده *TM* ماهواره لندست ۵ سال ۱۹۸۷، داده ماهواره لندست ۵ سنجنده *TM* سال ۱۹۹۰، داده سنجنده *ETM+* ماهواره لندست ۷ سال ۲۰۰۱ و داده ماهواره *IRS* سال ۲۰۰۷ استفاده شد. سایر داده‌های مورد نیاز در مطالعه شامل نقشه توپوگرافی، نقشه شبکه آبراهه‌ها، نقشه‌های موضوعی راه‌ها، روستاها و جنگل‌ها با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از اداره منابع طبیعی واحد نوشهر تهیه گردید. ابتدا به منظور کنترل خطای مکانی و انتخاب سیستم مرجع مناسب برای تصویر، با استفاده از روش نمونه‌برداری مجدد^۳ تصاویر زمین مرجع شد و منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد. به منظور تشخیص هر چه بهتر عوارض بر روی تصاویر، با استفاده از سه روش ترکیب رنگی، بسط کنتراست و نسبت‌گیری طیفی، تصاویر آشکارسازی شدند. چنانچه پیش‌تر نیز گفته شد در این مطالعه از تصاویر ماهواره *IRS* و تصاویر سنجنده‌های *TM* و *ETM+* ماهواره لندست استفاده شده است. با توجه به اینکه تصاویر این دو ماهواره و حتی تصاویر سنجنده‌های ماهواره لندست از نظر قدرت تفکیک طیفی^۴ و قدرت تفکیک مکانی^۵ دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند و در واقع اساس تفسیر بصری و جداسازی پدیده‌ها نیز وابسته به این دو ویژگی تصاویر است، ذکر این نکته در اینجا ضروری است که در روش ترکیب رنگی برای آشکارسازی تصاویر برای سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۹۰ از ترکیبات رنگی ۳۴۷، ۷۴۳، ۲۳۵، ۲۳۴ و برای سال ۲۰۰۱ از ترکیبات رنگی

و سنجش از دور بررسی کردند. سپس با استفاده از شبکه خودکار مارکف^۱ کاربری اراضی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۳۰ را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که در دوره زمانی مورد مطالعه کاربری جنگل روند کاهشی و کاربری اراضی کشاورزی روند افزایشی داشته است. *Xiaobo* و همکاران (۲۰۰۸) اثرات تغییرات پوشش زمین روی تولید رواناب و رسوب را در حوزه آبخیز سیدار کریک^۲ در ایالات متحده بررسی کردند. نتایج نشان داد که رابطه معنی‌داری بین مساحت اراضی کشاورزی و تغییرات رواناب و رسوب وجود دارد. *Xiaoming* و همکاران (۲۰۰۸) اثرات تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین را روی دبی رواناب و رسوب در یک حوزه آبخیز معرف در شمال غرب چین بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر کاربری اراضی و پوشش زمین روی مقدار سالانه دبی رسوب معنی‌دار بود.

Falathkar و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای برای تهیه نقشه‌های پوشش اراضی شهر اصفهان و اراضی اطراف آن استفاده کردند و از شبکه خودکار مارکف نیز برای پیش‌بینی تغییرات پوشش اراضی در ۲۴ سال آینده بهره گرفتند. نتایج نشان داد که در صورت ثابت ماندن فرایندهای تغییرات پوشش اراضی در منطقه، شبکه خودکار مارکف قادر است تغییرات کاربری اراضی را در ۲۴ سال آینده با اعتباری کمتر از ۷۰ درصد پیش‌بینی کند.

به منظور پایش تغییرات در الگوی بهره‌برداری از زمین و اطمینان از برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای در هر منطقه، تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش زمین در سال‌های مختلف بویژه برای آینده امری ضروری است. بر همین اساس و با توجه به اینکه مطالعات مربوط به پوشش زمین در ایران اغلب شامل تهیه نقشه پوشش زمین در دو یا چند سال و در نهایت بررسی میزان و روند تغییرات در دوره زمانی مورد مطالعه و عمدتاً در گذشته است و همچنین مطالعات محدودی راجع به پیش‌بینی پوشش زمین در آینده انجام گرفته است، مطالعه حاضر با هدف بررسی روند تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین حوزه آبخیز چالوس رود در گذشته و استفاده از الگوی تغییرات صورت گرفته به منظور پیش‌بینی تغییرات آینده با استفاده از شبکه خودکار مارکف و اثر این تغییرات روی تولید رسوب انجام گرفته است. بنابراین با داشتن اطلاعات کاربری اراضی و تیپ پوشش زمین و روند تغییرات آنها در آینده می‌توان فعالیت‌های مختلف مدیریتی، اهداف سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با سطح زمین را به درستی انجام داد به این صورت که به اقتضای شرایط و وضعیت کاربری اراضی در آینده باید تغییراتی در استراتژی‌های حفاظتی، برنامه‌های مدیریتی و توسعه‌ای انجام داد.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز رودخانه چالوس بخشی از حوزه آبخیز بزرگ چالوس می‌باشد که با وسعتی برابر با ۱۰۲ هزار هکتار در موقعیت جغرافیایی ۳۶°۳۶'۰۱" تا ۳۶°۰۸'۵۶" طول شرقی و ۵۰°۵۸'۲۲" تا ۵۱°۴۰'۲۵" عرض شمالی در استان مازندران واقع شده است. این حوزه بخشی از حوزه آبخیز دریای خزر و دارای ۱۸ زیرحوضه است. حداکثر و

۱۹۸۷-۲۰۰۱ و ۱۹۸۷-۲۰۰۷ استخراج شد. سپس تصاویر احتمال شرطی استخراج شده از مدل مارکف به عنوان ورودی وارد ماژول *STCHOICE* شد. در واقع نتایج *STCHOICE* مشکل مدل تصادفی مارکف را نشان می‌دهد. ماژول *STCHOICE* با استفاده از یک توزیع همگن، برای هر سلول یک ارزش تصادفی بین صفر و ۱ ایجاد می‌کند. سپس برای هر سلول، به طور مکرر احتمالات شرطی را به ترتیب فایل گروهی احتمالات شرطی اضافه می‌کند تا اینکه از ارزش تصادفی بیشتر گردد. طبقه‌ای که واجد ارزش تصادفی بیشتری شود، پوشش زمین بیش‌بینی شده برای آن موقعیت مکانی در دوره زمانی آینده خواهد بود. خروجی ماژول *STCHOICE* به صورت یک تصویر دانه‌دانه است که اگر چه در این تصویر احتمالات انتقال در هر کاربری دارای دقت زیادی است، اما اطلاعاتی از توزیع مکانی مربوط به کاربری‌ها وجود ندارد. بنابراین، مدل تصادفی مارکف فاقد هر گونه اطلاعات وابستگی مکانی است (*Salman Mahiny and Kamiab, 2010*). به همین دلیل از ترکیب شبکه خودکار و زنجیره مارکف (شبکه خودکار مارکف) برای ایجاد نتایج وابسته به مکان استفاده گردید. طبق تعریف، یک شبکه خودکار عاملی است که توانایی تغییر وضعیتش را بر اساس به کارگیری قانونی که وضعیت جدید را مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت همسایگانش نشان می‌دهد دارا است. از فیلتر شبکه خودکار برای توسعه یک فاکتور وزن دهی - مجاورت مکانی برای تغییر وضعیت سلول‌ها بر اساس وضعیت همسایه‌اش استفاده خواهد شد. لذا، به وضعیت جغرافیایی اهمیت بیشتری داده می‌شود (*Salman Mahiny and Kamiab, 2010*). شبکه خودکار از خروجی تحلیل زنجیره مارکف بویژه فایل سطوح انتقال برای اعمال فیلتر همسایگی به منظور تعیین تغییرات کاربری اراضی از دوره زمانی دوم به دوره زمانی بعدی استفاده می‌کند. در حقیقت، شبکه خودکار یک فاکتور وزن‌دهی ساده مکانی را توسعه می‌دهد که وزن بیشتر به مناطقی که نزدیک به کاربری زمین کنونی هستند داده می‌شود. این کار موجب می‌شود که تغییرات کاربری اراضی در نزدیکی طبقه‌های کاربری زمین مشابه کنونی ایجاد گردد و کاملاً به طور تصادفی نباشد (*Salman Mahiny and Kamiab, 2010*).

پس از اجرای مدل مارکف برای پیش‌بینی نقشه پوشش زمین سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۷ از شبکه خودکار مارکف استفاده شد که در واقع تصاویر پیش‌بینی شده برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ به منظور بررسی اعتبار مدل تهیه شده است.

برای اجرا شبکه خودکار مارکف به یک سری پارامتر نیاز است که شامل:

۱. تصویر پوشش زمین مبنا که در این مطالعه تصویر طبقه‌بندی شده سال ۱۹۸۷ است.
۲. فایل ماتریس سطوح انتقال که از خروجی‌های مدل مارکف است.
۳. تصاویر مطلوبیت، مطلوبیت در واقع شایستگی یک سلول برای یک پوشش زمین خاص است. به عنوان مثال تصویر مطلوبیت برای کاربری جنگل ممکن است شامل معیارهایی از قبیل فاصله از جاده، شیب زمین و غیره باشد.

۱۳۴، ۲۳۴، ۳۴۵، ۷۴۳ و ۱۴۷ و برای سال ۲۰۰۷ از ترکیبات رنگی ۲۳۴، ۲۳۵، ۲۴۵ و ۳۴۵ استفاده شد به طوری که تشخیص هر کدام از عوارض در روی یکی از این ترکیبات رنگی بهتر امکان‌پذیر بود. پس از آشکارسازی تصاویر اقدام به طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از دو روش طبقه‌بندی نظارت نشده و نظارت شده گردید که طبقه‌بندی نظارت نشده به روش *ISOCLUST* و طبقه‌بندی نظارت شده به روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال^۶ انجام شد. در طبقه‌بندی نظارت نشده، هر کدام از تصاویر به صورت یک تصویر ۲۴ کلاسه طبقه‌بندی شد. در طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از مراحل هفت‌گانه زیر کاربری‌ها و تیپ پوششی بر روی تصویر شناسایی و طبقه‌بندی انجام شد.

۱. تعیین نمونه‌های تعلیمی و رقومی کردن محدوده آنها، ۲. استخراج نشان طیفی ویژه هر یک از کاربری‌ها از طیف‌های تصویر، ۳. بررسی قابلیت جداسازی نشان‌های طیفی کاربری‌ها و پوشش، ۴. انتخاب یک طبقه‌بندی کننده و یا قاعده تصمیم‌گیری، ۵. طبقه‌بندی تصویر، ۶. بررسی گزارش درستی طبقه‌بندی و ۷. ارزیابی صحت طبقه‌بندی.

برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی از طریق مشاهدات صحرایی و با استفاده از نرم افزار *Google earth* برای هر کدام از طبقات به صورت تصادفی نمونه‌های آموزشی از سطح منطقه تهیه شد و پس از پیاده‌سازی نمونه‌های آموزشی بر روی تصویر، ماتریس خطای طبقه‌بندی استخراج شد. در این ماتریس مشخصات آماری شامل درستی تولید کننده، درستی مصرف کننده، درستی کل و شاخص کاپا برای هر یک از طبقات نمایش داده می‌شود. به این ترتیب تمام داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده به دو روش نظارت شده و نظارت نشده طبقه‌بندی شد.

تعیین تغییرات پوشش زمین

با استفاده از ماژول *CROSSTAB* تغییرات پوشش زمین در دوره‌های زمانی ۱۹۹۰-۱۹۸۷، ۲۰۰۱-۱۹۸۷ و ۲۰۰۷-۱۹۸۷ بررسی شد. مسئله مهم در تعیین تغییرات این است که مشخص شود تغییر در چه طبقه‌ای از کاربری اتفاق افتاده و به چه کاربری تبدیل شده است که به همین منظور از تحلیل زنجیره مارکف استفاده شد. هنگامی که تشریح و توصیف تغییرات و فرایندها در سیمای سرزمین مشکل باشد، آنالیز زنجیره مارکف یک ابزار مناسب و کارآمد برای مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی است. در یک فرایند مارکفی وضعیت آینده یک سیستم صرفاً بر اساس نزدیک‌ترین وضعیت پیشین مدل‌سازی می‌شود. آنالیز زنجیره مارکف تغییرات کاربری اراضی را از یک دوره به دوره دیگر تشریح می‌کند و از این‌گویی تغییرات به عنوان مبنایی برای تغییرات آینده اکوسیستم استفاده می‌کند. این عمل با توسعه ماتریس احتمال انتقال تغییر کاربری اراضی از یک زمان به زمان دیگر امکان‌پذیر است که نشان دهنده ماهیت تغییرات است و از آن برای ترسیم تغییرات در دوره‌های زمانی بعد استفاده می‌شود. در این مطالعه پس از تهیه نقشه کاربری اراضی سال‌های مذکور، با استفاده از تحلیل زنجیره مارکف، تصاویر احتمال شرطی، ماتریس احتمال انتقال و ماتریس سطوح انتقال برای دوره‌های زمانی ۱۹۹۰-۱۹۸۷،

اساس کمیت و موقعیت پیکسل‌ها در هر طبقه با مقایسه شاخص‌های کاپای توافق مختلف ارزیابی می‌شود. در این روش به دو سؤال زیر پاسخ داده می‌شود:

- چه مقدار توافق بین یک جفت نقشه از نظر کمیت پیکسل‌ها در هر طبقه وجود دارد؟
- چه مقدار توافق بین یک جفت نقشه از نظر موقعیت پیکسل‌ها در هر طبقه وجود دارد؟

پس از اجرای مدل خودکار مارکف، این مدل با استفاده از ماژول *VALIDATE* و قرار دادن نقشه‌های پوشش زمین طبقه‌بندی شده سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ به عنوان نقشه‌های مرجع و نقشه‌های پوشش زمین پیش‌بینی شده برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ به عنوان نقشه‌های مقایسه‌ای، اعتبارسنجی شد.

بررسی میزان فرسایش خاک و تولید رسوب هر زیر حوضه با استفاده از مدل تجربی *EPM*

آگاهی از وضعیت فرسایش و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز نیاز به مطالعه و بررسی عوامل مؤثر در این فرآیند پیچیده دارد. به دلیل پیچیدگی این فرآیندها و کمبود آمار مناسب و فقدان ایستگاه‌های اندازه‌گیری رسوب در کشور، چنین مطالعاتی با استفاده از روش‌ها و مدل‌هایی که در سایر کشورها توسعه یافته‌اند، انجام می‌گیرد. در این مدل عوامل مؤثر در فرسایش خاک عبارتند از: وضعیت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، نحوه استفاده از اراضی و عوامل اقلیمی.

در این روش شدت فرسایش خاک از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = X * Y(\phi + I^{0.5})$$

که:

Z : ضریب شدت فرسایش

X : ضریب استفاده از زمین

Y : ضریب حساسیت خاک به فرسایش

ϕ : ضریب فرسایش و

I : شیب متوسط حوزه بر حسب درصد است.

با استفاده از جداول ارائه شده در این مدل، به هر یک از عوامل امتیازی داده می‌شود و ضریب شدت فرسایش و کلاس فرسایش مشخص می‌گردد که در ادامه به بررسی دقیق‌تر هر یک از عوامل پرداخته می‌شود.

الف) ضریب استفاده از زمین
امتیاز این عامل بین ۰/۱ تا ۱ متغیر است. با استفاده از نقشه کاربری اراضی تولید شده برای سال‌های مورد مطالعه و شرایط استفاده از زمین به هر یک از کاربری‌ها (جنگل، مرتع، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی) امتیازی اختصاص داده شد و سپس با استفاده از مساحت

در مطالعه حاضر جهت تهیه تصاویر مطلوبیت از معیارهای زیر استفاده شد:

- متغیرهای فیزیکی شامل: ارتفاع، شیب و جهت که از مدل رقومی ارتفاع استخراج شدند.

- خصوصیات توپوگرافی: به منظور بررسی اثرات احتمالی مکان کاربری‌ها روی فرایندهای تغییرات پوشش زمین دو مؤلفه از خصوصیات توپوگرافی شامل قله و خط الرأس نیز از لایه مدل رقومی ارتفاع استخراج شد.

- نقشه زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی)

- سنج‌های سیمای منظر^۷: در مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف ثابت شده که معیارهای فاصله نقش و اهمیت زیادی در تغییر پوشش گیاهی دارند (*Salman Mahiny, 2006*)، از این رو فاصله از جاده، فاصله از روستا و فاصله از شبکه زهکشی سطحی نیز در تهیه تصاویر مطلوبیت مورد استفاده قرار گرفتند.

- از بین پارامترهای تصویر ماهواره‌ای از شاخص تغییرات پوشش گیاهی نرمال شده برای تهیه تصاویر مطلوبیت استفاده شد.

برای تهیه نقشه‌های مطلوبیت از رگرسیون لجستیک استفاده شد. رگرسیون لجستیک روشی آماری است که ارتباط بین مجموعه‌ای از

متغیرهای مستقل و پیوسته و یک متغیر وابسته دوتایی را ارزیابی کرده و آن را به صورت مدل بیان می‌کند. رگرسیون لجستیک از روش

برآورد حداکثر احتمال (*MLE*) برای پیدا کردن بهترین مجموعه پارامترهایی که مدل را بهتر برازش می‌کنند، استفاده می‌کند. در

این مرحله نقشه تغییرات هر یک از کاربری‌ها در دوره‌های زمانی مختلف به عنوان متغیر وابسته و نقشه‌های پنج معیار مطلوبیت به

عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل شد که حاصل این فرآیند تولید نقشه مطلوبیت هر یک از کاربری‌ها در دوره‌های زمانی مختلف

است. برای بررسی صحت در مدل‌سازی رگرسیون لجستیک از آماره های *Pseudo R²* و *ROC* (مشخصه نسبی اجرایی) استفاده

شد. *Pseudo R²* برابر ۰/۲ به عنوان برازش خوب در نظر گرفته می‌شود (*Clark and Hosking, 1989*). *ROC* آماره مناسبی

برای ارزیابی اعتبار مدل است و می‌توان از آن برای مقایسه تصویر پیش‌بینی شده با تصویر واقعی استفاده کرد. ارزش یک نشان دهنده

توافق مکانی کامل و ارزش ۰/۵ نشان دهنده توافق کم مدل با واقعیت است (*Pantiusjr and Spencer, 2005*). بعد از تهیه نقشه

معیارهای مطلوبیت، با استفاده از ماژول *RECLASS* نقشه تغییرات هر کدام از کاربری‌ها به صورت جداگانه در دوره‌های زمانی ۱۹۸۷-۱۹۹۰، ۱۹۸۷-۲۰۰۱ و ۱۹۸۷-۲۰۰۷ تهیه شد.

اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شبکه خودکار مارکف با استفاده از الگوریتم‌های آماری برای اندازه‌گیری توافق بین نقشه‌های پوشش زمین طبقه‌بندی شده به عنوان نقشه مرجع و نقشه‌های پوشش زمین پیش‌بینی شده به عنوان نقشه مقایسه‌ای انجام گرفت (*Pontius, 2002*). در این روش توافق بین یک جفت نقشه بر

سناریوهای در نظر گرفته شده، برآورد گردید. همانطوری که در بالا توضیح داده شد عوامل مؤثر بر فرسایش در مدل EPM شامل ضریب استفاده از زمین، ضریب حساسیت خاک نسبت به فرسایش، ضریب فرسایش و درصد شیب هر زیر حوضه است که برای برآورد فرسایش سال ۲۰۲۷، ضریب استفاده از زمین بر اساس نقشه کاربری اراضی شبیه‌سازی شده در این سال محاسبه گردید.

ضریب حساسیت خاک نسبت به فرسایش که بر اساس نقشه سنگ‌شناسی منطقه محاسبه می‌شود و همچنین درصد شیب هر زیر حوضه نیز همان ضرایب لحاظ شده برای سال‌های ۱۹۷۸، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ در نظر گرفته شده‌اند.

اما با توجه به اینکه ویژگی‌های فرسایش هر زیر حوضه در طول زمان متغیر است برای ضریب فرسایش سناریوهای زیر در نظر گرفته شد و در نهایت میزان متوسط وزنی عامل ضریب فرسایش هر زیر حوضه محاسبه گردید، این سناریوها شامل:

- سناریوی اول: سطح وسیعی از منطقه دارای فرسایش سطحی است اما آثاری از فرسایش شدید مشاهده نمی‌شود.

جدول ۱- آمار بارندگی و درجه حرارت ۲۰ ساله در حوزه آبخیز چالوس رود

شاخص آماری	درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر در سال)
حداکثر	۱۵/۶	۵۲۶/۵
میانگین	۱۴/۸	۳۴۱/۵

- سناریوی دوم: سطح وسیعی از منطقه دارای فرسایش سطحی و به مقدار کم فرسایش خندقی و شیاری است.

- سناریوی سوم: حدود ۵۰ درصد از منطقه دارای فرسایش خندقی و شیاری است.

بر اساس جداول موجود در مدل EPM برای شرایط فرسایش سناریوی اول نمره ۰/۶، سناریوی دوم نمره ۰/۷ و سناریوی سوم نمره ۰/۸ لحاظ شده است که سناریوی اول در واقع همان شرایط فرسایش در سال ۲۰۰۷ است.

همانگونه که مشاهده می‌شود در معادله فرسایش ویژه مدل EPM دو عامل بارندگی و درجه حرارت نیز متغیراند لذا برای این دو عامل نیز سناریوهایی در نظر گرفته شد، به این صورت که آمار ۲۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۰۷) مقادیر درجه حرارت و بارندگی بررسی شد و مقادیر حداکثر، میانگین و حداقل درجه حرارت و بارندگی به عنوان سه سناریوی بارندگی و درجه حرارت لحاظ شده‌اند. در جدول ۱ حداکثر، میانگین و حداقل آمار بارندگی و درجه حرارت ۲۰ ساله در حوزه مورد مطالعه نشان داده شده است.

اشغال شده توسط هر کاربری در هر زیر حوضه، میزان متوسط وزنی ضریب استفاده از زمین در هر زیر حوضه محاسبه گردید.

ب) ضریب حساسیت خاک نسبت به فرسایش
امتیاز این عامل بین ۰/۲۵ تا ۲ متغیر است و بسته به مقاومت سنگ در مقابل فرسایش درجات مختلف به آن تعلق می‌گیرد. بدین ترتیب میزان امتیاز ضریب حساسیت خاک نسبت به فرسایش هر یک از سازندهای موجود در سطح حوضه از طریق جداول مربوطه تعیین گردید و سپس با توجه به وزن فرسایشی هر سازند و مساحت اشغال شده توسط آن در هر زیر حوضه، میزان متوسط وزنی ضریب حساسیت خاک نسبت به فرسایش در هر زیر حوضه محاسبه گردید.

ج) ضریب فرسایش
امتیاز این عامل بین ۰/۱ تا ۱ متغیر است. با استفاده از نقشه کاربری اراضی تولید شده برای سال‌های مورد مطالعه و ویژگی‌های فرسایش هر کاربری، به هر یک از کاربری‌ها امتیازی اختصاص داده شد و سپس با استفاده از مساحت اشغال شده توسط هر کاربری در هر زیر حوضه، میزان متوسط وزنی ضریب فرسایش در هر زیر حوضه محاسبه گردید.

د) شیب متوسط زیر حوضه
نقشه شیب حوضه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاع استخراج شد و سپس شیب متوسط هر زیر حوضه محاسبه گردید. در مدل EPM فرسایش ویژه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T = \left(\frac{t}{10} + 0.1 \right)^{0.5}$$

که:

Wsp : فرسایش ویژه سالیانه بر حسب متر مکعب در کیلومتر مربع در سال

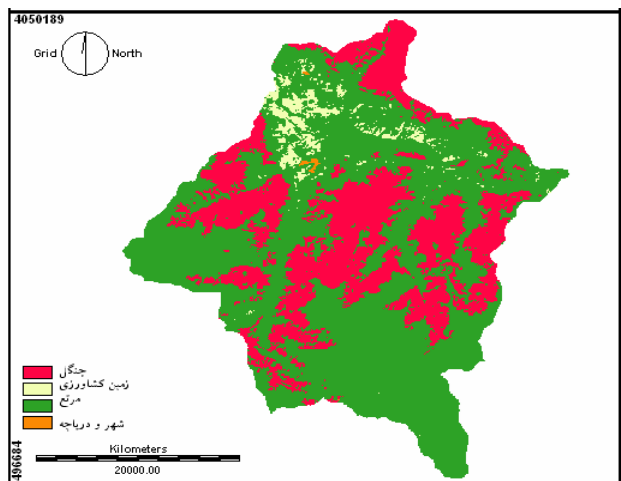
H : متوسط مقدار بارندگی سالیانه بر حسب میلی‌متر و

Z : ضریب شدت فرسایش است.

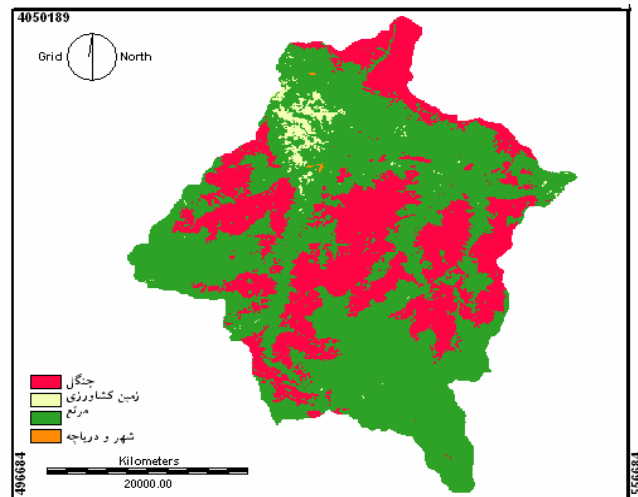
T : ضریب درجه دما که از معادله زیر بدست می‌آید:

که در آن:

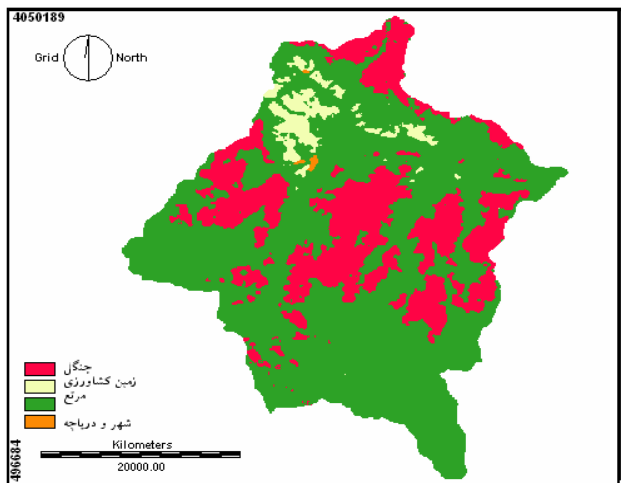
t میانگین سالیانه دما بر حسب درجه سانتیگراد است.
پس از بدست آوردن ضریب شدت فرسایش و ضریب دما و لحاظ کردن متوسط بارندگی سالیانه، مقدار فرسایش ویژه هر زیر حوضه بدست می‌آید. بدین ترتیب میزان فرسایش ویژه سالیانه هر زیر حوضه برای سال‌های ۱۹۷۸، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ برآورد گردید.
در این تحقیق کاربری اراضی سال ۲۰۲۷ با استفاده از مدل شبکه خودکار مارکف شبیه‌سازی گردید که به منظور برآورد فرسایش این سال، برای عواملی از مدل EPM که در طول زمان متغیراند، چندین سناریو در نظر گرفته شد و میزان فرسایش هر زیر حوضه بر اساس



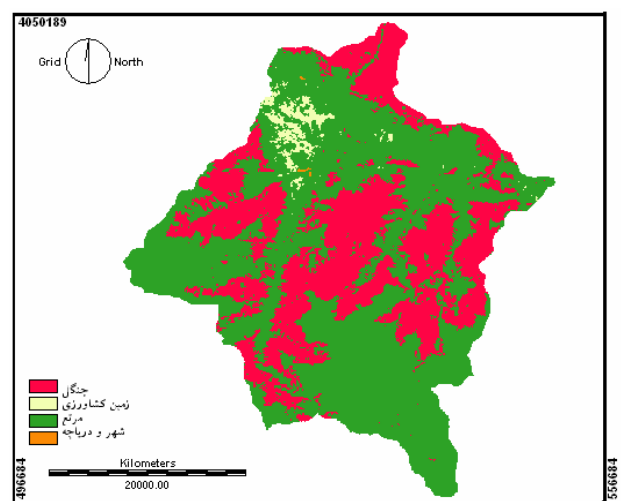
شکل ۵- نقشه پوشش زمین سال ۲۰۰۷



شکل ۲- نقشه پوشش زمین سال ۱۹۸۷



شکل ۶- نقشه پوشش زمین سال ۲۰۲۷

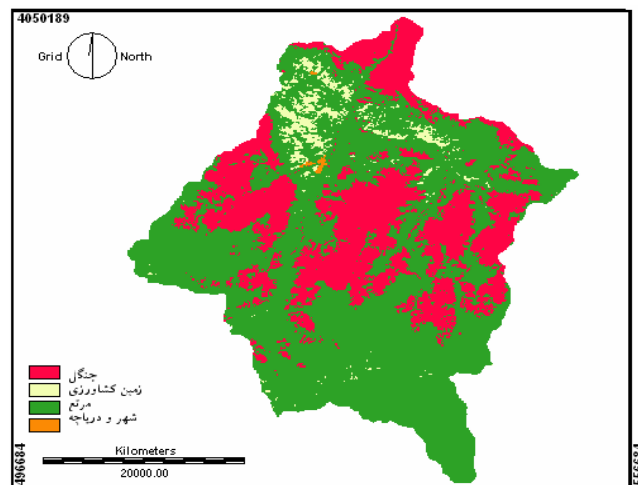


شکل ۳- نقشه پوشش زمین سال ۱۹۹۰

به این ترتیب میزان فرسایش خاک سال ۲۰۲۷ برای ۲۷ شرایط مختلف از نظر ضریب فرسایش (سناریوی اول، سناریوی دوم و سناریوی سوم)، بارندگی (حداکثر، میانگین و حداقل) و درجه حرارت (حداکثر، میانگین و حداقل) برآورد شد.

نتایج

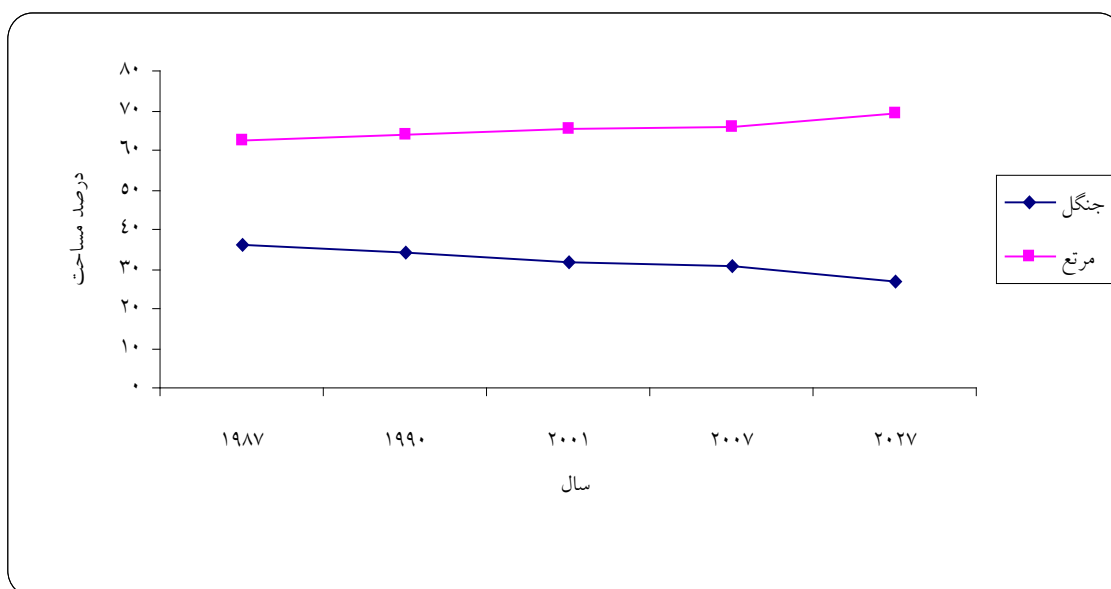
در شکل‌های ۲ تا ۶ نقشه پوشش زمین سال‌های ۱۹۸۷، ۱۹۹۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۷ به ترتیب نشان داده شده است. چنانچه در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در تمامی سال‌های مورد مطالعه بیشترین طبقه پوشش زمین مربوط به مرتع و کمترین آن مربوط به مناطق مسکونی و محیط‌های آبی است. در شکل ۷ نمودار درصد تغییرات طبقات پوشش زمین جنگل و مرتع و در شکل ۸ نمودار درصد طبقات اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی نشان داده شده است.



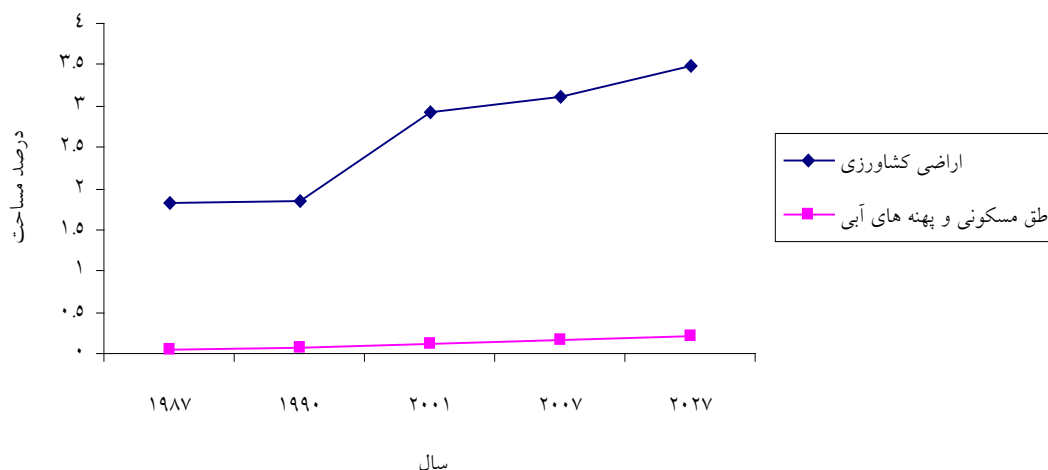
شکل ۴- نقشه پوشش زمین سال ۲۰۰۱

جدول ۲- مساحت اختصاص یافته به هر طبقه پوشش زمین در سال‌های مختلف

سال	کاربری	مساحت (هکتار)
۱۹۸۷	جنگل	۳۷۲۵۳/۰۳
	مرتع	۶۴۵۹۷/۷۵
	اراضی کشاورزی	۱۹۰۵/۰۵
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۵۹/۹۴
۱۹۹۰	جنگل	۳۵۳۲۲/۰۴
	مرتع	۶۶۵۱۰/۸۵
	اراضی کشاورزی	۱۹۱۸/۲۱
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۶۱/۴۱
۲۰۰۱	جنگل	۳۲۸۴۴/۲۲
	مرتع	۶۷۸۰۷/۶۹
	اراضی کشاورزی	۳۰۳۹/۶
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۱۲۵/۷۴
۲۰۰۷	جنگل	۳۲۰۹۷/۸۵
	مرتع	۶۸۳۱۲/۸۲
	اراضی کشاورزی	۳۲۳۵/۵۲
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۱۶۶/۶۷
۲۰۲۷	جنگل	۲۷۸۸۲/۷۶
	مرتع	۷۱۹۷۲/۶۵
	اراضی کشاورزی	۳۶۱۷/۱۱
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۲۰۷/۴۱



شکل ۷ - نمودار درصد مساحت جنگل و مرتع در سال‌های مورد مطالعه



شکل ۸ - نمودار درصد مساحت اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و پهنه های آبی در سال‌های مورد مطالعه

مصرف کننده است. علت این امر این است که درستی تولید کننده بر اساس پیکسل‌هایی است که به عنوان آزمایشی گرفته شده ولی درستی مصرف کننده بر اساس کل تصویر است.

در این مطالعه نقشه پوشش زمین سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۷ با استفاده از شبکه خودکار مارکف پیش‌بینی شده است که نقشه سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ برای بررسی صحت و اعتبارسنجی شبکه خودکار مارکف تهیه شده است، اما نقشه سال ۲۰۲۷ برای بررسی چگونگی تغییرات طبقات پوشش زمین در ۲۰ سال آینده پیش‌بینی شده است. نتایج این بخش خود به دو قسمت تقسیم می‌شود. در قسمت اول، نتایج انجام رگرسیون لجستیک که در واقع پیش‌نیاز

چنانچه در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، در تمامی دوره‌های مورد مطالعه روند تغییرات جنگل به صورت کاهشی ولی روند تغییرات مرتع، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی به صورت افزایشی بوده است. در جدول ۳ مساحت و درصد تغییرات طبقات پوشش زمین در دوره‌های زمانی ۱۹۸۷-۲۰۰۱، ۲۰۰۱-۲۰۰۷، ۲۰۰۷-۲۰۲۷ و ۱۹۸۷-۲۰۲۷ نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، طبقه‌بندی برای سال‌های ۱۹۸۷، ۱۹۹۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ با درستی کل حدود ۹۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۹ صورت گرفته که نشان دهنده دقت بالای طبقه‌بندی است. همچنین مشاهده می‌شود که درستی تولید کننده بیشتر از درستی

جدول ۳- مساحت و درصد تغییرات طبقات پوشش زمین در دوره‌های زمانی مختلف

دوره زمانی	کاربری	مساحت تغییرات (هکتار)	درصد تغییرات	روند تغییرات
۲۰۰۱-۱۹۸۷	جنگل	۴۴۰۸/۸۱	۴/۲۵	کاهشی
	مرتع	۳۲۰۹/۹۴	۳/۰۹	افزایشی
	اراضی کشاورزی	۱۱۳۴/۵۵	۱/۰۹	افزایشی
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۶۵/۸	۰/۰۶	افزایشی
۲۰۰۷-۲۰۰۱	جنگل	۷۴۶/۳۷	۰/۷۲	کاهشی
	مرتع	۵۰۵/۱۳	۰/۴۹	افزایشی
	اراضی کشاورزی	۱۹۵/۹۲	۰/۱۹	افزایشی
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۴۰/۹۳	۰/۰۴	افزایشی
۲۰ سال آینده (۲۰۲۷-۲۰۰۷)	جنگل	۴۲۱۵/۰۹	۴/۰۳	کاهشی
	مرتع	۳۶۵۹/۸۳	۳/۶	افزایشی
	اراضی کشاورزی	۳۸۱/۵۹	۰/۳۷	افزایشی
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۴۰/۷۴	۰/۰۴	افزایشی
۲۰ سال گذشته (۲۰۰۷-۱۹۸۷)	جنگل	۵۱۵۵/۱۸	۴/۹۶	کاهشی
	مرتع	۳۷۱۵/۰۷	۳/۵۸	افزایشی
	اراضی کشاورزی	۱۳۳۰/۴۷	۱/۲۸	افزایشی
	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	۱۰۶/۷۳	۰/۱	افزایشی

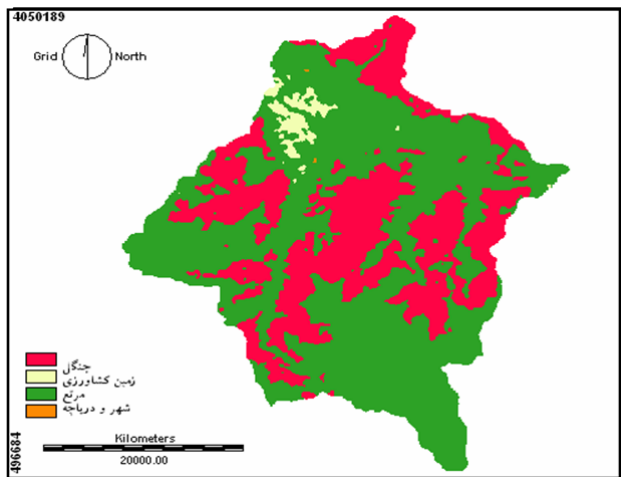
جدول ۴- جدول صحت طبقه‌بندی

تصاویر	درستی کل (درصد)	ضریب کاپا	طبقات کاربری	درستی تولید کننده (درصد)	درستی مصرف کننده (درصد)
۱۹۸۷	۹۹/۸۷	۰/۹۹	جنگل	۹۹/۹۵	۹۹/۶۴
			مرتع	۹۸/۰۱	۷۷/۶۵
			کشاورزی	۹۸/۶	۹۸/۳
			مناطق مسکونی و پهنه های آبی	۱۰۰	۹۹/۵۱
۱۹۹۰	۹۹/۸۶	۰/۹۹	جنگل	۹۹/۹۷	۹۹/۲۹
			مرتع	۹۶/۸۵	۷۷/۳۳
			کشاورزی	۹۸/۳۹	۹۸/۳۷
			مناطق مسکونی و پهنه های آبی	۱۰۰	۹۲/۰۶
۲۰۰۱	۹۹/۷۸	۰/۹۹	جنگل	۱۰۰	۹۹
			مرتع	۹۵/۸۵	۹۰/۳۲
			کشاورزی	۹۸/۶۰	۹۸/۵
			مناطق مسکونی و پهنه های آبی	۱۰۰	۹۹/۵۲
۲۰۰۷	۹۹/۶۷	۰/۹۹	جنگل	۹۹/۹۶	۹۹/۸۷
			مرتع	۹۰	۷۴/۸۷
			کشاورزی	۹۹/۵۶	۹۸/۳۷
			مناطق مسکونی و پهنه های آبی	۱۰۰	۹۸/۵۲

جدول ۵- ابزارهای ارزیابی صحت رگرسیون لجستیک (ابزارهای سنجش نکویی برازش)

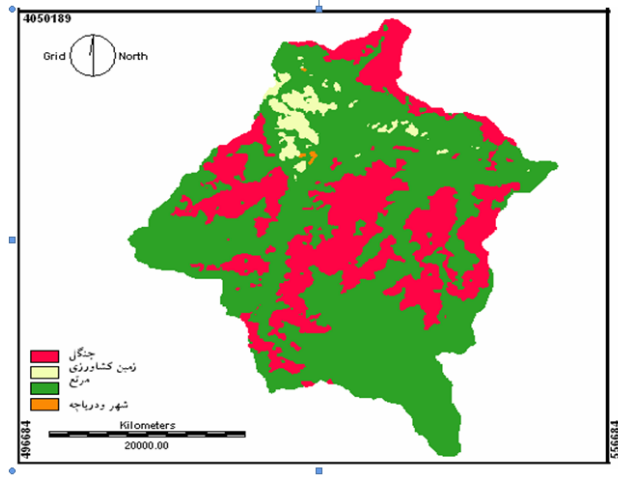
آماره‌های ارزیابی صحت مدل رگرسیون لجستیک		کاربری	دوره زمانی
Pseudo-R ²	مشخصه نسبی اجرایی (ROC)		
۰/۱۸	۰/۸۲	جنگل	۱۹۹۰-۱۹۸۷
۰/۳۱	۰/۸۴	مرتع	
۰/۳۶	۰/۸۸	اراضی کشاورزی	
۰/۳۲	۰/۸۷	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	
۰/۲۶	۰/۸۵	جنگل	۲۰۰۱-۱۹۸۷
۰/۲۸	۰/۸۳	مرتع	
۰/۴۲	۰/۹	اراضی کشاورزی	
۰/۱۸	۰/۷۸	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	
۰/۲۹	۰/۸۵	جنگل	۲۰۰۷-۱۹۸۷
۰/۳۷	۰/۸۸	مرتع	
۰/۴۹	۰/۹۱	اراضی کشاورزی	
۰/۱۹	۰/۷۶	مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی	

چنانچه در جدول ۵ مشاهده می‌شود آماره‌های سنجش نکویی برازش رگرسیون لجستیک برای هر طبقه پوشش زمین و برای سه دوره زمانی ۱۹۸۷-۱۹۹۰، ۱۹۸۷-۲۰۰۱ و ۲۰۰۷-۲۰۲۷ ارائه شده است. اعداد



شکل ۱۰- نقشه پوشش زمین پیش‌بینی شده سال ۲۰۰۷

اجرای مدل شبکه خودکار مارکف است، ارائه شده و در قسمت دوم نتایج صحت و اعتبار نقشه‌های پیش‌بینی شده ارائه می‌شود. در جدول ۵ آماره‌های ارزیابی صحت رگرسیون لجستیک نشان داده شده است.



شکل ۹- نقشه پوشش زمین پیش‌بینی شده سال ۲۰۰۱

شبکه خودکار مارکف، از نقشه سال ۲۰۲۷ برای بررسی میزان و روند تغییرات پوشش زمین در ۲۰ سال آینده استفاده شد و از نقشه‌های سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ برای ارزیابی صحت شبیه‌سازی شبکه خودکار مارکف استفاده گردید. در واقع، برای ارزیابی صحت مدل نقشه‌های

جدول ۵ همگی بیان‌کننده صحت مدل‌سازی رگرسیون لجستیک است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نقشه پیش‌گویی شده سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ نشان داده شده است. بعد از پیش‌بینی نقشه‌های سال ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۷ با استفاده از

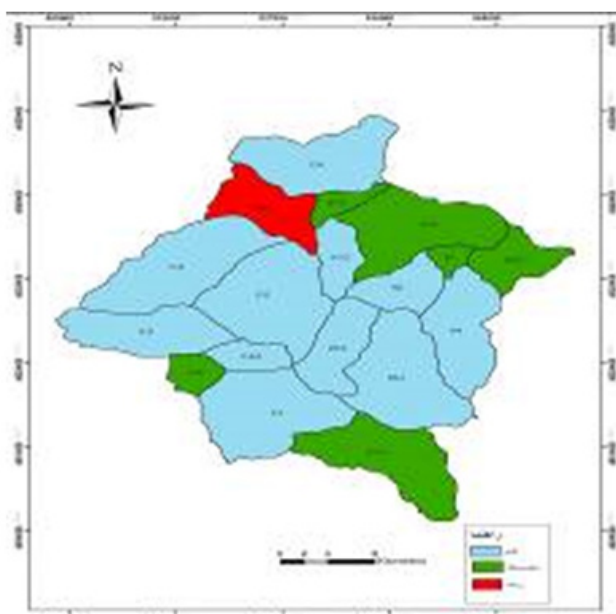
جدول ۶- شاخص‌های اعتبارسنجی مدل شبکه خودکار مارکف

شاخص‌های اعتبارسنجی مدل شبکه خودکار مارکف (Pontius, ۲۰۰۰)

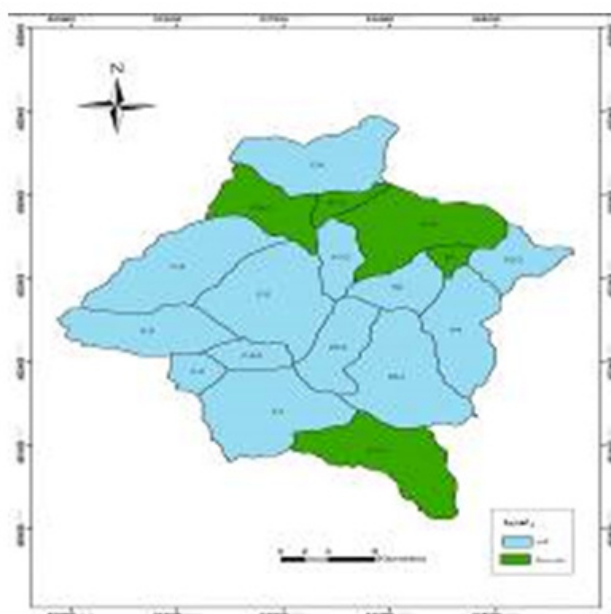
شاخص حجم داده‌های درست ^۸	شاخص مکان درست کاربری‌ها ^۹	شاخص طبقه درست کاربری‌ها ^{۱۰}	شاخص معمولی کاپا ^{۱۱}	سال
۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۵	۰/۸۲	۲۰۰۱
۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۴۶	۰/۷۳	۲۰۰۷

نقشه پیش‌گویی شده در مکان واقعی خود (مکان آنها در نقشه پوشش زمین واقعی) قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار این شاخص در سال ۲۰۰۱، ۰/۸۷ و در سال ۲۰۰۷، ۰/۷۴ است. شاخص طبقه درست کاربری‌ها، نشان می‌دهد که تا چه اندازه سلول‌های نقشه پیش‌بینی شده در طبقه کاربری مربوط به خود قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار این شاخص در سال ۲۰۰۱، ۰/۵ و در سال ۲۰۰۷، ۰/۴۶ است. بخش سوم نتایج: در ابتدا نتایج مربوط به ضریب فرسایش و تعیین شدت فرسایش

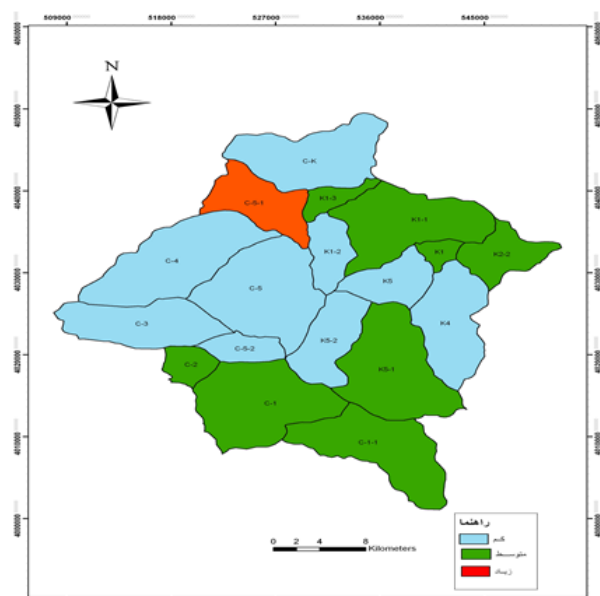
پیش‌بینی شده سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ با نقشه‌های واقعی حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای مقایسه شده‌اند که نتیجه آن در قالب چهار شاخص کاپا در جدول ۶ ارائه شده است. شاخص‌های کاپا در جدول ۶ همگی بیان‌کننده صحت و اعتبار بالای شبیه‌سازی شبکه خودکار مارکف در این مطالعه است. در جدول ۶ مقدار ۰/۸۹ و ۰/۸۴ شاخص حجم داده‌های درست به ترتیب در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ نشان می‌دهد که روش به شکل هدفمند و به دور از شرایط تصادفی مدل را ارائه نموده است. در جدول ۶ شاخص مکان درست کاربری‌ها، نشان می‌دهد که تا چه اندازه سلول‌های



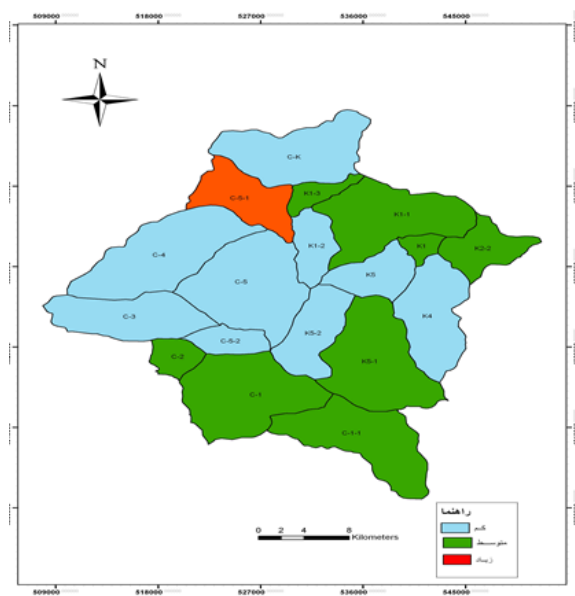
شکل ۱۲- شدت فرسایش سال ۲۰۰۱



شکل ۱۱- شدت فرسایش سال ۱۹۸۷



شکل ۱۴- شدت فرسایش سال ۲۰۲۷



شکل ۱۳- شدت فرسایش سال ۲۰۰۷

در سال ۲۰۰۱ شدت فرسایش در ۱۱ زیر حوضه کم، در ۶ زیر حوضه متوسط و در ۱ زیر حوضه شدید است به عبارت دیگر ۷۱/۵ درصد از کل حوضه دارای شدت فرسایش کم، ۲۳/۸ درصد دارای شدت فرسایش متوسط و ۴/۷ نیز دارای شدت فرسایش شدید است. زیر حوضه K-۲-۲ و C-۲ در سال ۱۹۸۷ دارای شدت فرسایش کم اما در سال ۲۰۰۱ دارای شدت فرسایش متوسط هستند. زیر حوضه C-۵-۱ در سال ۱۹۸۷ دارای شدت فرسایش متوسط اما در سال ۲۰۰۱ دارای شدت فرسایش شدید است. در سال ۲۰۰۷ شدت فرسایش در ۹ زیر

در هر زیر حوضه در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۷ ارائه می‌شود. این نتایج در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ ارائه شده است. در ادامه این بخش ضریب فرسایش، میزان و روند تغییرات آن در کل حوضه در سال‌ها و دوره‌های زمانی مورد مطالعه نشان داده می‌شود. چنانچه در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ مشاهده می‌شود در سال ۱۹۸۷، ۵ زیر حوضه دارای شدت فرسایش متوسط و ۱۳ زیر حوضه دارای شدت فرسایش کم هستند به عبارت دیگر ۷۶/۶ درصد از کل حوضه دارای شدت فرسایش کم و ۲۳/۴ درصد دارای شدت فرسایش متوسط است.

فرسایش متوسط هستند. وضعیت فرسایش زیر حوضه‌ها از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۷ هیچ‌گونه تغییری نداشته است به عبارت دیگر درصد اختصاص یافته به هر یک از وضعیت‌های شدت فرسایش در سال ۲۰۲۷ همانند سال ۲۰۰۷ است. همچنین وضعیت شدت فرسایش در هر سه سناریوی فرسایشی

حوضه کم، ۸ زیر حوضه متوسط و ۱ زیر حوضه دارای شدت فرسایش شدید است به عبارت دیگر ۵۲/۸ درصد از کل حوضه دارای شدت فرسایش کم، ۴۲/۵ درصد دارای شدت فرسایش متوسط و ۴/۷ درصد دارای شدت فرسایش شدید است. زیر حوضه‌های $K-5-1$ و $C-1$ در سال ۲۰۰۱ دارای شدت فرسایش کم اما در سال ۲۰۰۷ دارای شدت

جدول ۷- ضریب شدت فرسایش در کل حوضه در سال‌های مورد مطالعه

سال	ضریب شدت فرسایش	دوره زمانی	میزان تغییرات	روند تغییرات
۱۹۸۷	۰/۳۶۸			
۲۰۰۱	۰/۳۸۸	۲۰۰۱-۱۹۸۷	۰/۰۲	افزایشی
۲۰۰۷	۰/۳۹۲	۲۰۰۷-۲۰۰۱	۰/۰۰۴	افزایشی
سناریوی اول	۰/۴۰۷	شرایط فرسایش سناریوی اول	۰/۰۱۵	افزایشی
۲۰۲۷	۰/۴۰۹	۲۰۲۷-۲۰۰۷	۰/۰۱۷	افزایشی
شرایط فرسایش		شرایط فرسایش سناریوی دوم		
سناریوی دوم شرایط فرسایش	۰/۴۱۱	شرایط فرسایش سناریوی سوم	۰/۰۱۹	افزایشی

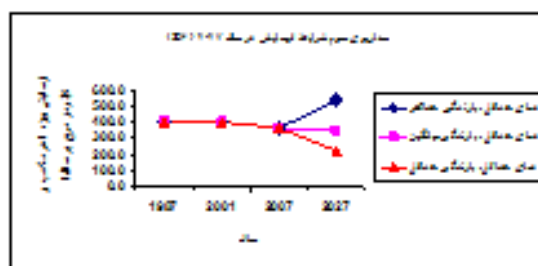
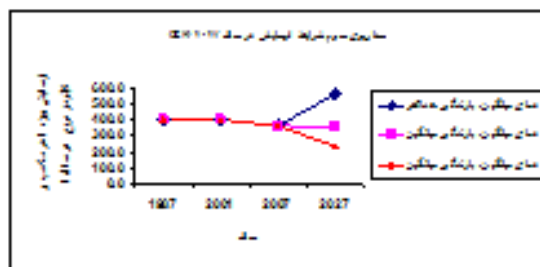
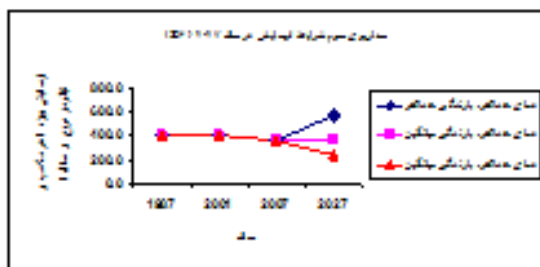
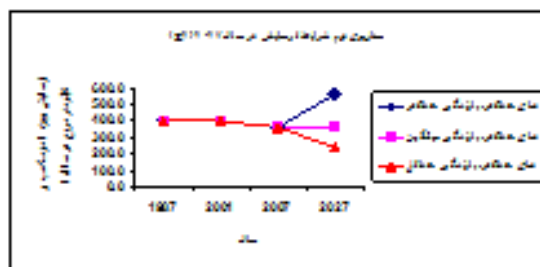
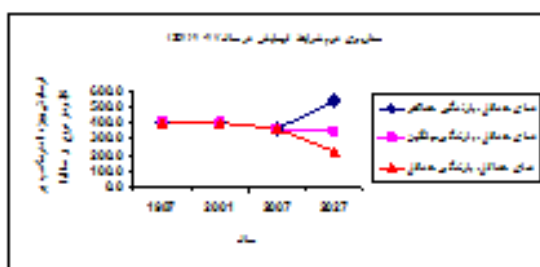
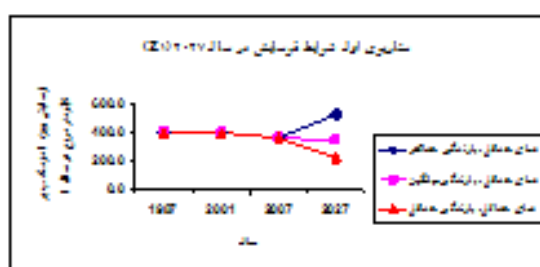
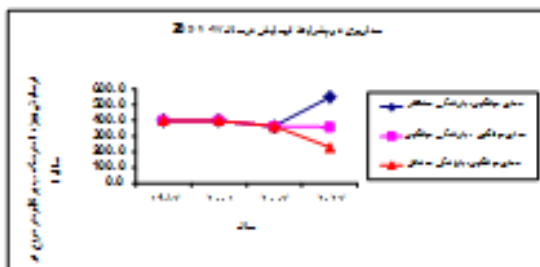
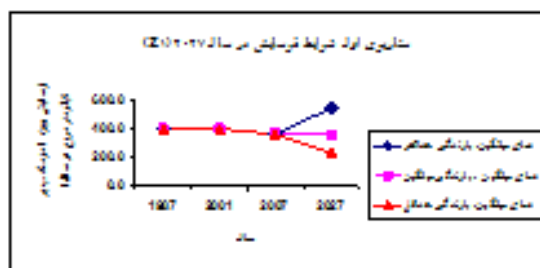
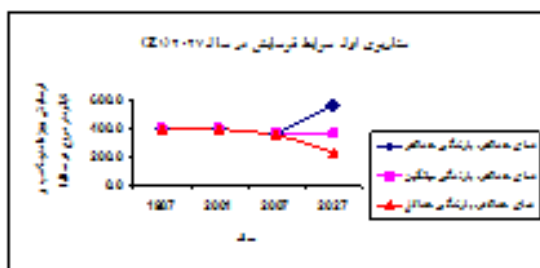
در آینده ($Z1$ ، $Z2$ و $Z3$)، سه درجه حرارت (حداکثر، میانگین و حداقل بیست سال گذشته) و سه بارندگی (حداکثر، میانگین و حداقل بیست سال گذشته) میزان فرسایش ویژه و فرسایش کل حوضه برای ۲۷ شرایط مختلف برآورد شده است. نتایج مربوط به فرسایش ویژه در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۱، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۷ (با احتساب ۲۷ شرایط مختلف از نظر ضریب فرسایش، درجه حرارت و بارندگی) در قالب نمودار ارائه می‌شود. این نمودارها در شکل ۱۵ ارائه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف آشکارسازی تغییرات پوشش زمین در ۲۰ سال گذشته و شبیه‌سازی این تغییرات در ۲۰ سال آینده و اثرات آن روی تولید رسوب انجام شده است. نتایج طبقه‌بندی تصاویر در این بررسی همانند دیگر تحقیقات صورت گرفته، بیانگر قابلیت تصاویر ماهواره‌ای در تهیه نقشه پوشش زمین است. استفاده از تصاویر چند زمانه با بازه‌های زمانی معین، می‌تواند به مدیران، در پایش منابع طبیعی و تصمیم‌گیری درباره آینده کمک کند.

در نظر گرفته برای سال ۲۰۲۷ نیز یکسان بوده است. بعد از محاسبه ضریب فرسایش در هر زیر حوضه، با استفاده از مساحت هر زیر حوضه میزان متوسط وزنی ضریب شدت فرسایش در کل حوضه محاسبه شد. در جدول ۷ ضریب شدت فرسایش کل حوضه در هر سال و همچنین میزان و روند تغییرات ضریب شدت فرسایش در دوره‌های زمانی مورد مطالعه نشان داده شده است. چنانچه در جداول و شکل‌های مربوط به ضریب شدت فرسایش نشان داده شده در حوضه مورد مطالعه با گذشت زمان ضریب شدت فرسایش افزایش پیدا کرده است.

در ادامه بخش سوم نتایج، نتایج مربوط به فرسایش ویژه حوضه در سال‌های مختلف ارائه می‌شود. برای محاسبه فرسایش ویژه در معادله EPM علاوه بر پارامتر ضریب شدت فرسایش، به پارامترهای متوسط درجه حرارت و بارندگی سالیانه نیز نیاز است که برای سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ این پارامترها از آمار موجود استخراج شده‌اند اما برای سال ۲۰۲۷ از آنجائی که به طور قطع نمی‌توان گفت که درجه حرارت و بارندگی سالیانه چه میزان است، آمار ۲۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۰۷) موجود در حوضه بررسی شده و حداکثر، میانگین و حداقل آنها انتخاب شده است. سپس با احتساب سه شرایط مختلف فرسایش



شکل ۱۵- فرسایش ویژه حوزه آبخیز چالوس رود در سناریوی اول، دوم و سوم فرسایش در سال‌های مختلف

سال ۲۰۲۷ مشاهده شده که در شرایطی که بارندگی و درجه حرارت این سال برابر با حداکثر بارندگی و درجه حرارت در دوره زمانی ۲۰ سال گذشته باشد میزان فرسایش ویژه آن به میزان زیادی نسبت به سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ افزایش می‌یابد. در شرایطی که درجه حرارت و بارندگی سال ۲۰۲۷ برابر با متوسط درجه حرارت و بارندگی در دوره زمانی ۲۰ سال گذشته باشد میزان فرسایش ویژه آن تقریباً برابر با سال ۲۰۰۷ است. در شرایطی که درجه حرارت و بارندگی سال ۲۰۲۷ برابر با حداقل درجه حرارت و بارندگی در دوره زمانی ۲۰ سال گذشته باشد میزان فرسایش ویژه آن به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از سال ۲۰۰۷ است. از آنجایی که نقشه‌های شدت فرسایش ارائه شده با فرض کارا بودن مدل *EPM* در حوضه مورد مطالعه ارائه شده‌اند، بنابراین لازم است که استفاده‌کنندگان از این نقشه‌ها این موضوع را مد نظر داشته باشند که صحت این نقشه‌ها و کارایی مدل *EPM* در این تحقیق بررسی نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که کارایی مدل *EPM* در این منطقه بررسی و سپس رابطه نتایج کالیبره شده آن، با نتایج داده‌های کاربری و پوشش زمین شبکه خودکار بررسی شود.

پاورقی‌ها

- 1-CA-Markov
- 2-Cedar Creek
- 3-Resampling
- 4-Spectral Resolution
- 5-Spatial Resolution
- 6-Maximum Likelihood
- 7-Landscape Metric
- 8-Kappa for no information (kno)
- 9-Kappa for location (klocation)
- 10-Kappa for location strata
- 11-Kappa standard (kstandard)

منابع مورد استفاده

- Araya, Y.H. and Cabral, P.* (۲۰۱۰). *Analysis and modeling of urban land cover change in Setubal and Sesimbra, Portugal. Remote Sensing, Vol, ۲, pp: ۱۵۴۳-۱۵۴۹.*
- Carroll, C. Merton, L. and Burger, P.* (۲۰۰۰). *Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion and water quality for field plots on a range of soil and spoil material on central Queensland coal mines. Journal of Soil Resource, Vol, ۳۸, pp: ۳۲۷-۳۱۳.*
- Clark, W.A. and Hosking, P.L.* (۱۹۸۶). *Statistical methods for geographers (Chapter ۱۳), New York. John Wiley and Sons, ۵۲۸ p.*

نقشه‌های پوشش زمین تهیه شده از منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که درصد مساحت جنگل، مرتع، اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی در سال ۱۹۸۷ به ترتیب ۳۵/۸، ۶۲/۲، ۱/۸ و ۰/۰۶ بوده که در سال ۲۰۰۷ به ترتیب به ۳۰/۹، ۶۵/۸، ۳/۱ و ۰/۱۶ رسیده و در سال ۲۰۲۷ به ترتیب به ۶۹/۲۶، ۴/۹ و ۳/۵ و ۰/۲ می‌رسد. به عبارت دیگر، در ۲۰ سال گذشته (۱۹۸۷-۲۰۰۷) حدود ۵۱۰۰ هکتار از مساحت جنگل‌ها کاسته شده که حدود ۳۷۰۰ هکتار آن تبدیل به مرتع، ۱۳۰۰ هکتار آن به تبدیل به اراضی کشاورزی و ۱۶۰ هکتار آن به شهر تبدیل شده است. در صورت ثابت ماندن فرایندهای تغییرات پوشش اراضی در ۲۰ سال آینده نیز مساحت جنگل‌ها حدود ۴۲۰۰ هکتار کاهش پیدا می‌کند. ملاحظه می‌شود که میزان تغییرات مساحت جنگل‌ها در ۲۰ سال گذشته و ۲۰ سال آینده تفاوت معنی‌دار و قابل ملاحظه‌ای با هم ندارد. درصد کاهش مساحت جنگل در دوره‌های زمانی ۱۹۸۷-۲۰۰۱، ۲۰۰۱-۲۰۰۷ و ۲۰۰۷-۲۰۲۷ به ترتیب ۴/۳، ۰/۷۲ و ۴ درصد است. سرعت رشد مناطق مسکونی در حوزه مورد مطالعه بسیار کم است.

نتایج رگرسیون لجستیک با *Pseudo R2* حدود ۰/۳ و *ROC* حدود ۰/۹ نشان دهنده توافق نسبی مدل بدست آمده با تغییرات واقعی و توانایی مناسب مدل در برآورد تغییرات جنگل در ۲۰ سال گذشته است.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی نقشه پوشش زمین سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ نشان داد که شبکه خودکار مارکف توانایی و قابلیت بالایی در مدل‌سازی تغییرات پوشش زمین دارد که در این مطالعه صحت و درستی نقشه‌های پوشش زمین حاصله حدود ۸۰ درصد بوده است. به عبارت دیگر شبکه خودکار مارکف قادر است تغییرات پوشش زمین حوزه آبخیز چالوس رود در ۲۰ سال آینده را با اطمینان حدود ۸۰ درصد پیش‌بینی کند. این نتیجه با یافته *Cabral* و *Araya* (۲۰۱۰) و *Falahatkar* و همکاران (۲۰۱۰) همخوانی دارد.

بررسی کاربری اراضی و پوشش زمین سال‌های مختلف در هر زیر حوضه نشان داد که تغییرات صورت گرفته عموماً به صورت کاهش سطح جنگل و افزایش مساحت اراضی کشاورزی است که این یافته با نتایج *Ye* و *Bai* (۲۰۰۸) همخوانی دارد. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عامل اصلی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین در حوزه آبخیز چالوس رود دخالت‌های انسانی است که وجود ۱۱۸ روستا به صورت پراکنده در سراسر حوزه مؤید این مطلب است. نتایج نشان داد که ضریب شدت فرسایش در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۷ به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۳۸ و ۰/۳۹ است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضریب فرسایش افزایشی است اما از آنجایی که علاوه بر ضریب فرسایش درجه حرارت و بارندگی سالیانه نیز بر فرسایش مؤثر است، میزان فرسایش ویژه حوضه در این سال‌ها به ترتیب ۴۰/۹، ۴۰/۹، ۳۶۳/۶ متر مکعب در کیلومتر مربع در سال است، یعنی سال ۲۰۰۷ با داشتن ضریب فرسایش بیشتر فرسایش ویژه کمتری داشته است چون در واقع بارندگی کمتری داشته است.

ضریب شدت فرسایش در سال ۲۰۲۷ در سناریوی اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۴۰۷، ۰/۴۰۹ و ۰/۴۱۱ است. با محاسبه فرسایش ویژه

- Protection of Golestan province, unit of marine environment.*
- Sanchez, L.A. Ataroff, M. and Lopez, R. (۲۰۰۲). Soil erosion under different vegetative covers in the Venezuela Andes. *Environmentalist*, Vol, ۲۲, pp: ۱۷۲-۱۶۱.
- Triphai, R.P. (۲۰۰۱). *Soil Erosion and Conservation*, New Age International Ltd, Publishers, ۳۵۰ p.
- Verstraeten, G. Van Rompaey, A. and Poeson, J. (۲۰۰۳). Evaluating the impact of watershed management scenarios on changes in sediment delivery to rivers. *Hydrobiology*, Vol, ۴۹۴, pp: -۱۵۳ ۱۵۸.
- Walling, D.E. (۱۹۹۹). Linking land use, erosion and sediment yield in river basins. *Hydrobiology*, Vol, ۴۱۰, pp: ۲۴۰-۲۲۳.
- Xiaoming, Z. Xinxiao, Y. Sihong, W. and Wenhong, C. (۲۰۰۸). Effects of changes in land use and land cover on sediment discharge of runoff in a typical watershed in the hill and gully loess region of northwest China. *Front. For. China*, Vol, ۳, No, ۳, pp: ۳۴۱ -۳۳۴.
- Xiaobo, J. Huang, C. H. Ruan, F. (۲۰۰۸). Impacts of land cover changes on runoff and sediment in the Cedar Creek watershed, St. Joseph River, Indiana, United States. *International. Mt. Sci.* Vol, ۵, pp: ۱۲۱-۱۱۳.
- Ye, B. and Bai, Z. (۲۰۰۸). Simulating land use/cover changes of Nanjing county based on Ca-Markov model. In *IFIP international federation for information processing*, Vol, ۱, pp: ۳۲۹-۳۲۱.
- Falahatkar, S. Sefyanian, A. Khajedin, J. and Zeyaei, H.R. (۲۰۱۰). The ability of CA-Markov in predicting land cover map, A case study: city of Isfahan. *Geomatics conference of Mapping Organization*, ۲۰ to ۲۱ May, Tehran.
- Kassas, M. ۱۹۸۳. *The Global Biosphere: Conservation for Survival*. Mazingira, ۱۳-۲ : (۲) ۷.
- Kusumandari, A. and Mitchell, B. (۱۹۹۷). Soil erosion and sediment yield in forest agro forestry area in West Java, Indonesia. *Journal of Soil Water Conserve*, Vol, ۴۰, No, ۲, pp: ۲۹۷-۲۸۹.
- Morgan, R. P. C. ۱۹۸۹. *Erosion and soil conservation*. ۳۴۱ pp.
- Pantiusjr, R.G. and Spencer, J. (۲۰۰۵). Uncertainty in extrapolations of predictive land cover models. *Environment and planning and design*, Vol, ۳۳, pp: ۲۳۰-۲۱۱.
- Pontius, G.R. (۲۰۰۰). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogramm. Engineering Remote Sensing*, Vol, ۶۶, pp: ۱۰۱۶-۱۰۱۱.
- Rai, S.C. and Sharma, E. (۱۹۹۸). Comparative assessment of runoff characteristics under different land use patterns within a Himalayan watershed. *Hydrology process*, Vol, ۵۳, No, ۲, pp: ۲۲۴۸-۲۲۳۵.
- Salman Mahiny, A. (۲۰۰۶). Refining of training samples in supervised classification of satellite imagery. A case study: Gorgan and suburbs. *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*. unpublished paper. ۱۴ p.
- Salman Mahiny, A. and Kamiab, H. (۲۰۱۰). *Remote Sensing and Geographic Information Systems using IDRISI software*. Office of Environmental

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■