

## بررسی اثرات تغییر پوشش زمین بر روی عرضه خدمات اکوسیستمی منتخب (منطقه مورد مطالعه: شرق استان گیلان)

مهديس سادات، اسماعيل صالحی\*، محمدجواد امیری

گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران ایران

**سابقه و هدف:** از آنجایی که نگرانی‌ها پیرامون اثرات مختلف برنامه‌ریزی رو به افزایش است، بسیاری از محققان در تلاش هستند تا بررسی کنند که چگونه تغییرات کاربری زمین و مدیریت پوشش زمین بر عرضه خدمات اکوسیستمی تأثیر می‌گذارد. با توجه به ارتباط تغییر کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی، انجام مطالعات در زمینه اثرات تغییر کاربری در برنامه‌ریزی‌ها بر روی کمیت خدمات ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌ها به منظور برنامه‌ریزی مکانی بهتر کاربری اراضی و اطمینان از عرضه پایدار خدمات اکوسیستم ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین پژوهش حاضر بر این اساس و با هدف مقایسه میزان عرضه خدمات منتخب اکوسیستم در دو سناریوی مختلف تغییر کاربری اراضی و در بخشی از استان گیلان انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه دو سناریو برای برنامه‌ریزی پوشش زمین در بخشی از شرق استان گیلان مورد نظر قرار گرفت. سناریوی اول بر مبنای روند تاریخی تغییر پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل CA-Markov، و سناریوی دوم بر مبنای نیاز به مساحت هر کاربری بر اساس طرح آمایش منطقه و لحاظ معیارهای محیط زیستی به عنوان برنامه‌ریزی حفاظتی پوشش زمین با استفاده از مدل Mola در نرم‌افزار Idrisi ساخته شد. در گام دوم به منظور مقایسه نتایج دو سناریوی تغییر پوشش زمین بر روی میزان خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده توسط منطقه مورد مطالعه، کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی ترسیب کربن، نگهداشت خاک و جلوگیری از سیلاب به وسیله مدل‌های مربوطه در نرم‌افزار InVEST انجام شد.

**نتایج و بحث:** بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده با ادامه روند گذشته تا سال ۲۰۲۰، میزان ذخیره کربن در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۲۰، تقریباً ۴ میلیون تن کاهش خواهد یافت. بر اساس برنامه‌ریزی پوشش زمین صورت گرفته در سناریوی دوم، میزان مجموع کربن ذخیره‌شده در مقایسه با سال ۲۰۲۰ در حدود ۹۸۵۰۰۰۰ تن افزایش و نسبت به سناریوی اول در حدود ۱۴ میلیون تن افزایش یافته

\* Corresponding Author Email Address: tehransaleh@ut.ac.ir

است. همچنین در سناریوی اول شاخص خدمت اکوسیستمی نگهداشت رواناب به ۰/۳۶ و حجم آن به ۱۴۸۸۱۹۲۰۹ مترمکعب در کل حوضه خواهد رسید. در سناریوی دوم پژوهش نیز پتانسیل حجم سیلاب در حوضه مورد مطالعه برابر با ۱۴۱۶۷۳۳۰۷/۸۹ مترمکعب می‌باشد و نسبت به سال ۲۰۲۰، تقریباً ۳ درصد کاهش یافته است. همچنین شاخص ارائه این خدمت در منطقه برابر است با ۰/۳۸ و حجم آن ۹۰۲۲۹۳۶۳ مترمکعب می‌باشد. میزان خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک در سناریوی اول نسبت به سال ۲۰۲۰ با کاهشی ۵۲۸۵۷۶ تنی همراه خواهد بود. در سناریوی دوم پژوهش نیز نسبت به سناریوی اول، ۷۶۵۴۴۴ تن افزایش یافته است که خود حاکی از افزایش ارائه این خدمت توسط اکوسیستم می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به‌طور کلی روند تغییرات میزان خدمات اکوسیستمی منتخب ارائه‌شده توسط حوضه، در سناریوهای اول و دوم به ترتیب کاهشی و افزایشی خواهد بود. این کاهش در سناریوی اول عمدتاً ناشی از تخریب جنگل‌ها به‌عنوان اساسی‌ترین رکن تولید خدمات مورد نظر در منطقه مورد مطالعه و رشد شدید شهرها به‌عنوان کاربری‌هایی با کمترین سطح تأمین آن‌ها است. و علت اصلی افزایش خدمات در سناریوی دوم توجه به دیدگاه حفاظتی در کنار پاسخگویی به نیازهای ساکنین منطقه در تعیین مساحت اختصاص داده‌شده به هر کاربری می‌باشد که این مسئله روند برنامه‌ریزی بر اساس توسعه پایدار را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** ترسیب کربن، جلوگیری از سیلاب، خدمات اکوسیستمی، پوشش زمین، نگهداشت خاک

## مقدمه

ساختار و عملکرد اکوسیستم خدمات متنوعی را ارائه می‌دهد که به‌عنوان خدمات اکوسیستمی برای حمایت و حفظ بقای زندگی انسان شناخته‌شده است (MEA, 2005). خدمات ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌ها تحت تأثیر عوامل و شرایط مختلف فیزیکی، بیولوژیکی و اجتماعی قرار دارند (Lü *et al.*, 2012). به‌گونه‌ای که مطالعات و پژوهش‌های جهانی نشان می‌دهد که فعالیت‌های انسانی در سال‌های اخیر خدمات اکوسیستمی را تا ۶۰ درصد کاهش داده است (MEA, 2005). از دست دادن این خدمات نگرانی خاصی دارد، زیرا ممکن است انعطاف‌پذیری آن را درازمدت به خطر بیندازد و منجر به تغییرات ناگهانی شود (Steffen *et al.*, 2015). بنابراین در سال‌های اخیر، آگاهی رو به رشدی وجود دارد که تغییر کاربری زمین یکی از عوامل اساسی برای تأثیرگذاری بر خدمات اکوسیستمی است. (Li *et al.*, 2017; Sharp *et al.*, 2018). نوع کاربری و پوشش اراضی، الگوهای مکانی چینش انواع طبقات پوشش زمین در یک منطقه و تغییرات در سیمای سرزمین می‌توانند ظرفیت ارائه خدمات اکوسیستمی منطقه را تغییر دهند؛ زیرا تغییر در هریک از این مؤلفه‌ها، فرآیندهای اکولوژیک عمده (تبادل انرژی، چرخه آب

و چرخه زیست‌زمین‌شیمیایی و به تبع آن عرضه خدمات اکوسیستم) را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Qiu, 2019; Zhu *et al.*, 2021; Yohannes *et al.*, 2021). به‌طور کلی در اکوسیستم‌های طبیعی با حداقل آشفتگی‌های انسان‌ساز، میزان عرضه خدمات فراهم‌سازی ضعیف‌تر و درعین‌حال خدمات تنظیمی و حمایتی بیشتری تولید می‌شود. هرچند، زمانی که آشفتگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌اندازه کافی قوی باشد و به تخریب سرزمین منجر شود، عرضه تمام خدمات اکوسیستم شدیداً تهدید می‌شود (Braat *et al.*, 2008). بنابراین مطالعات پیرامون خدمات اکوسیستمی نفوذ خود را به برنامه‌ریزی گسترش داده است. تاکنون مطالعات زیادی با هدف مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی مختلف از جمله کاهش خطر سیل، ذخیره کربن، تولید آب، تولید ماده اولیه، کیفیت زیستگاه و تولید غذا، با نرم‌افزار InVEST در جهان انجام شده است (He *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2020). همچنین مطالعات مختلفی هم در رابطه با اثرات تغییر کاربری و پیاده‌سازی سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی پوشش زمین بر روی کمیت ارائه خدمات توسط اکوسیستم‌های مختلف انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

Zhu و همکاران در سال ۲۰۲۱، در تحقیقی تغییرات کاربری زمین در منطقه‌ای خشک در شمال غرب چین را مدل‌سازی نمودند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مناطق با ارزش ذخیره‌سازی کربن در مناطق خشک عمدتاً در مراتع، جنگل‌ها و زمین‌های کشاورزی و مناطق کم‌ارزش ذخیره‌سازی کربن عمدتاً در مناطق بیابانی متمرکز شده‌اند. همچنین ارائه خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در مناطق خشک روند نزولی داشته که اصلی‌ترین دلیل آن تخریب مراتع در مناطق خشک بوده است. و در نهایت ذخیره‌سازی کربن زمین‌های کشاورزی در منطقه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته Sadat و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش زمین شهری و خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن در قائم‌شهر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین میزان کربن ذخیره‌شده در مناطق جنگلی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند فعلی، میزان کربن ذخیره‌شده تا سال ۲۰۲۷ به میزان ۳۲۲۱۶/۶۸ مگا گرم کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این کاهش مربوط به کاهش بیوماس گیاهی و خاک تحت تأثیر این اکوسیستم است که به دلیل افزایش مساحت ساخته‌شده در منطقه و جنگل‌زدایی در سال‌های اخیر بوده است.

Srichaichana و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی سناریوهای مختلف پوشش زمین با هدف افزایش خدمات اکوسیستمی تولید آب و نگهداشت خاک در یک حوضه آبخیز در کشور تایلند پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ادغام فناوری

سنجش از دور با روش‌های طبقه‌بندی پیشرفته و مدل‌های مکانی می‌تواند به‌عنوان ابزاری ماهر برای ارائه داده‌های مکانی در مورد عملکرد آب و خدمات اکوسیستم نگهداری رسوب از سناریوهای مختلف استفاده شود.

Clerici و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثرات تجمعی تغییرات آب‌وهوایی و تغییر پوشش زمین بر روی خدمات اکوسیستمی در منطقه بوگاتو در کشور کلمبیا پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سناریوهای تغییر اقلیمی نسبت به تغییر کاربری اثر بیشتری بر روی خدمت تولید آب در این منطقه داشته است. با این وجود ترسیب کربن در مناطق جنگلی و بوته‌زارهای دورتر از عرصه شهری بیشتر بوده است.

در ایران نیز چند مطالعه پیرامون اندازه‌گیری خدمات اکوسیستمی و ارتباط آن‌ها تغییر پوشش زمین انجام شده است که عبارتند از:

Asadolahi و همکاران در سال ۲۰۱۵ در تحقیقی به مدل‌سازی خدمت نگهداشت خاک با نرم‌افزار InVEST در بخش شرقی حوضه آبخیز گرگانود پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مناطق با پتانسیل فرسایش بالا عمدتاً در مسیر آبراهه‌ها و مناطق جنگلی مرتفع با شیب بالا قرار دارند. همچنین زیرحوضه‌ها با پوشش غالب جنگلی بیشترین نگهداشت خاک و اراضی کشاورزی پایین‌دست حوضه کمترین میزان این خدمت را ارائه می‌دهند.

Adelisardou در بخشی از رساله دکتری خود در سال ۲۰۲۱ نیز در چهارچوبی مفهومی به بررسی تأثیرات تغییرات پوشش زمین ناشی از فعالیت‌های کشاورزی بر روی مقدار تولید سایر خدمات اکوسیستمی و روابط میان آن‌ها در طول زمان در دشت جیرفت پرداختند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده اثرات مستقیم تغییر پوشش زمین بر روی خدمات اکوسیستمی در منطقه مورد مطالعه بوده است. همچنین این تحقیق نشان می‌دهد که روابط و بده - بستان‌های میان خدمات اکوسیستمی در طول زمان تغییر می‌کند.

Ebadi Ghajari در سال ۲۰۱۷ در تحقیقی به بررسی جایگاه خدمات اکوسیستمی در برنامه‌ریزی پوشش زمین پرداخت. در این تحقیق ضمن تعریف مفاهیم مرتبط، به تشریح رابطه‌ی بین آن‌ها پرداخته می‌شود. از این رو، روش‌های قابل‌استفاده جهت هماهنگ‌سازی خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی کاربری زمین معرفی شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های SEA، IES و GI اشاره کرد. سپس، با ارائه نمونه‌های مطالعاتی در چین، هاوایی و بریتانیا که با استفاده از خدمات اکوسیستمی به برنامه‌ریزی کاربری زمین پرداخته‌اند، جایگاه خدمات یکپارچه اکوسیستم در برنامه‌ریزی کاربری زمین مشخص شده است. در نهایت، سعی شده است تا اصولی جهت یکپارچه‌سازی خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی کاربری زمین استخراج شود.

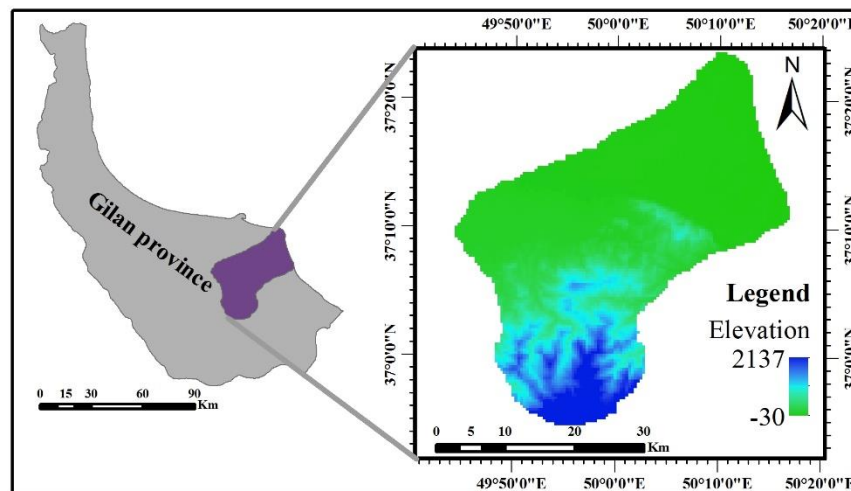
Balist در سال ۲۰۲۲ در رساله دکتری خود به طراحی ساختاری مبتنی بر استفاده از مفهوم خدمات اکوسیستمی به عنوان یک مفهوم نوین در فرآیند برنامه ریزی استفاده از سرزمین در مقیاس حوضه آبریز پرداخت. نتایج این مطالعه نشان می دهد که به کارگیری مفهوم خدمات اکوسیستمی در تلفیق با فرآیند برنامه ریزی استفاده از سرزمین روش مناسبی باشد و اطلاعات کمی و کیفی مناسبی در اختیار برنامه ریزان و تصمیم گیران قرار دهد.

با توجه به ارتباط تغییر کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی، انجام مطالعات در زمینه اثرات تغییر کاربری در برنامه ریزی ها بر روی کمیت خدمات ارائه شده توسط اکوسیستم ها به منظور برنامه ریزی مکانی بهتر کاربری اراضی و اطمینان از عرضه پایدار خدمات اکوسیستم ضروری به نظر می رسد. بنابراین پژوهش حاضر بر این اساس و با هدف مقایسه میزان عرضه خدمات منتخب اکوسیستم در دو سناریوی مختلف تغییر کاربری اراضی و در بخشی از استان گیلان انجام شد.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش دربرگیرنده بخش هایی از دو حوضه آبخیز لاهیجان چابکسر و آستانه-کوچصفهان، به ترتیب در شرق و مرکز استان گیلان قرار دارد (شکل ۱). حوضه آستانه-کوچصفهان با مساحت ۱۱۰۰ کیلومتر مربع، بر روی مخروط خزر و دلتاهای رودخانه سفیدرود تشکیل شده است. طول جغرافیایی این حوضه از  $12^{\circ} 49'$  تا  $5^{\circ} 50'$  عرض شرقی و  $37^{\circ} 07'$  تا  $37^{\circ} 25'$  طول شمالی نوسان دارد. این حوضه دربرگیرنده بخش هایی از شهرستان های آستانه، رشت، سیاهکل، رودبار و لاهیجان می باشد. حوضه آبخیز لاهیجان چابکسر با مساحت ۳۰ کیلومتر مربع بین  $21^{\circ} 50'$  تا  $26^{\circ} 50'$  عرض شرقی و  $37^{\circ} 02'$  تا  $37^{\circ} 06'$  طول شمالی قرار گرفته است. این حوضه نیز دربرگیرنده بخش هایی از شهرستان های لاهیجان، لنگرود، املش، رودسر، سیاهکل و بخش های کمی از رودبار می باشد (شکل ۱).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Fig. 1- Study area

این پژوهش شامل ۶ گام کلی می‌باشد. در ابتدا طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ میلادی صورت گرفت. سپس با استفاده از مدل CA-Markov نقشه پوشش زمین در سال ۲۰۴۰ بر مبنای روندهای تاریخی تغییر پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه مدل‌سازی گردید. در گام بعدی سناریوی دوم بر مبنای نیاز به مساحت هر کاربری بر اساس طرح آمایش منطقه و لحاظ معیارهای محیط زیستی به‌عنوان برنامه‌ریزی حفاظتی پوشش زمین با استفاده از مدل Mola در نرم‌افزار Idrisi تعریف شد. در نهایت مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی ترسیب کربن، نگهداشت خاک و جلوگیری از سیلاب به‌عنوان سه تا از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده توسط منطقه مورد مطالعه، در سال ۲۰۲۰ میلادی و دو سناریوی تعریف‌شده، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در ذیل توضیحات تکمیلی نسبت به مراحل این پژوهش بیان‌شده است.

### طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با چالش‌هایی پیش رو است. از جمله اطمینان از کیفیت ابرناکی تصاویر که در برخی از مناطق مانند استان‌های شمالی به‌شدت فراوان است. برای مقابله با این چالش‌ها در این پژوهش از سامانه Google Earth Engine برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده گردید. کاربران Earth Engine می‌توانند با دسترسی و تجزیه تحلیل داده‌های موجود در دستورالعمل‌های عمومی و شخصی موجود در اپراتورها به کار و پردازش بپردازند. بخش عمده‌ای از این دستورالعمل‌ها از تصاویر سنجنش‌ازدور اخذشده از زمین، شامل کل بایگانی لندست و همچنین بایگانی کامل از داده‌های Sentinel-1 و Sentinel-2

2 تشکیل شده است (Fuentes et al., 2018). به علاوه شامل پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی، داده‌های مربوط به پوشش زمین و بسیاری از مجموعه داده‌های زیست‌محیطی، ژئوفیزیکی و اقتصادی - اجتماعی می‌باشد (Gorelick et al., 2017). تصاویر دریافت شده در Earth Engine برای سهولت دسترسی سریع و کارآمد از قبل پردازش می‌شوند (Kumar and Mutango, 2018; Venter et al., 2020). با توجه به موارد ذکر شده برای طبقه‌بندی پوشش زمین در این مطالعه از مجموع تصاویر لندست ۸ در بازه زمانی ۲۰۲۰/۰۱/۰۱ الی ۲۰۲۰/۱۲/۳۱، مجموع تصاویر لندست ۷ در بازه زمانی ۲۰۱۰/۰۱/۰۱ الی ۲۰۱۰/۱۲/۳۱ و مجموع تصاویر لندست ۵ در بازه زمانی ۲۰۰۰/۰۱/۰۱ الی ۲۰۰۰/۱۲/۳۱ که دارای ابرناکی زیر ۱۰ درصد بودند، استفاده گردید. سپس با استفاده از محصولات و دستورالعمل‌های شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده مربوط به چهار فصل، اراضی شهری، پوشش درختی برای شناسایی مناطق جنگلی با درختان بالای ۳۰ متر و در نهایت داده‌های تعلیمی برداشته شده از زمین و وارد شده به سامانه توسط کاربر، پوشش زمین به هفت طبقه جنگل، فضای باز، مرتع، اراضی کشاورزی، اراضی کشت چای، باغات و اراضی انسان‌ساخت شامل جاده‌ها و شهرها طبقه‌بندی گردید. نتایج حاصل از این بخش به‌عنوان پوشش زمین در بخش بعدی، مورد استفاده قرار گرفت.

### تعیین سناریوهای آینده برای برنامه‌ریزی پوشش زمین

#### پیش‌بینی پوشش زمین در سال ۲۰۴۰ (سناریوی اول)

به‌منظور محاسبه ماتریس احتمال انتقال طبقات پوشش اراضی در سال ۲۰۲۰، از مدل زنجیره مارکوف استفاده شد. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار IDRISI Selva نقشه‌های پوشش زمین مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ در نرم‌افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا ماتریس احتمال انتقال پوشش زمین استخراج گردد. در این مرحله خطای نسبی نقشه‌های مورد استفاده در تحلیل برای سال ۲۰۲۰، ۱۷٪ با ضریب کاپا ۰/۸۳ بود. به‌منظور ارائه الگوی مکانی توزیع، مدل سلول خودکار استفاده گردید. به این منظور از ماژول سلول خودکار - زنجیره مارکوف در نرم‌افزار IDRISI Selva استفاده شده است. در این مدل، نقشه پوشش پایه برای شبیه‌سازی تغییرات در سال ۲۰۲۰، همان نقشه انتهای دوره زمانی است که تحلیل زنجیره مارکوف بر روی آن اجرا و ماتریس تغییرات محاسبه شد. در این مرحله از ماتریس احتمال انتقال و تصاویر احتمال شرطی به‌دست‌آمده از تحلیل زنجیره مارکوف در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ استفاده می‌شود. از مقایسه دو نقشه، ماتریس خطا تشکیل و آماره‌های صحت کلی و ضریب کاپا برای کل منطقه برابر با ۰/۷۹ برآورد گردید. بهترین ضریب مشاهداتی در تفکیک طبقه جنگل با ۰/۸۳ و کمترین آن مربوط به طبقه شهری با ۰/۷۳ محاسبه شد. به‌منظور محاسبه ماتریس احتمال

انتقال طبقات پوشش اراضی در سال ۲۰۴۰، نقشه‌های پوشش زمین مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ در نرم‌افزار ادریسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا ماتریس احتمال انتقال پوشش زمین در ۲۰ سال بعدی استخراج گردد. در این پیش‌بینی خطای نسبی نقشه‌های مورد استفاده در تحلیل مارکوف، ۱۵ درصد می‌باشد. بنابراین در این مقاله سناریوی اول برای پیش‌بینی آینده بر مبنای روندهای تاریخی تغییر پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه که بدون دخالت سیاست، حاصل شد.

### برنامه‌ریزی حفاظتی پوشش زمین (ساخت سناریوی دوم)

جهت تعریف سناریوی دوم در این پژوهش، از رویه MOLA استفاده شد. این رویه پشتیبان تصمیم‌گیری در نرم‌افزار idrisi است که به دنبال دستیابی به تخصیص بهینه کاربری‌ها بر اساس توان اکولوژیک سرزمین برای کاربری‌های مورد نظر و به حداکثر رساندن میزان تناسب بین آن‌ها است. یک مسئله بهینه‌سازی، یافتن بهترین راه‌حل از میان همه راه‌حل‌های عملی است (Aerts, 2002). روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان حل نسبتاً کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. روش MOLA یکی از روش‌های الگوریتم‌های تقریبی است.

در سناریوی دوم در این پژوهش جهت اختصاص مکان بهینه با هدف یافتن راه‌حل بهینه به طبقات مورد نظر پوشش زمین، شرایط و معیارهایی بر روند برنامه‌ریزی اعمال شد. در واقع در این مسیر، تصاویر احتمال شرطی با ارزیابی مشتق شده MCE مدنظر قرار گرفته شد. بنابراین مسیر برنامه‌ریزی با اعمال محدودیت‌هایی شامل محدودیت‌های فیزیکی و اکولوژیکی همراه بوده است. روش MCE چندین معیار را در پاسخ به یک هدف خاص ارزیابی می‌نماید. با توجه به عملیات بولی و وزن‌دار ترکیبات خطی، خروجی MCE به شکل یک نقشه تناسب زمین می‌باشد که لایه محدودیت در نهایت از آن کسر گردیده است. همچنین در این سناریو، حداقل مساحت مورد نیاز برای هر کاربری از طرح آمایش استان گیلان استخراج گردیده و پس از بررسی‌های دقیق به عنوان مساحت مورد نیاز هر طبقه، وارد مدل گردیده است (جدول ۱).

جدول ۱- مساحت مورد نیاز و درصد تغییر نسبت به سال ۲۰۲۰ برای هر یک از کاربری

Table 1. Required area and percentage change compared to 2020 for each land use

توسعه شهری و روستایی	چای	مرتع	کشاورزی	جنگل	کاربری
Buit-up area	Tea land	Rang land	Agriculture	Forest	Land use
1433325	1112550	440609	44936	55503	مساحت مورد نیاز
					Required area



اجرای روش MOLA شامل مراحل زیر است:

- ۱- ارزیابی توان اکولوژیک با روش MCE و تهیه نقشه‌های مطلوبیت بر ای هریک از طبقات
- ۲- ایجاد نقشه‌های رتبه‌بندی شده صعودی از هر یک از نقشه‌های مطلوبیت با رویه رتبه دهی در نرم‌افزار ایدریسی. این رویه با توجه به ارزش پیکسل‌ها در نقشه مطلوبیت، ترتیب رتبه‌ها را مشخص می‌کند.
- ۳- اجرای رویه MOLA عملیاتی تکرارشونده را برای ترکیب نقشه‌های رتبه‌بندی شده بر اساس وزن هر یک از آنها انجام می‌دهد که نتیجه آن تولید نقشه نهایی تخصیص کاربری اراضی است که در آن شرط مساحت‌های از پیش تعیین شده برای هر گزینه کاربری اعمال شده است.

### مدل سازی خدمت اکوسیستمی

در این مرحله در جهت بررسی همیق تر تبعات و نتایج اکولوژیکی سناریوهای تغییر کاربری در نظر گرفته شده، از بررسی مدل سازی خدمات اکوسیستمی ترسیب کربن، نگهداشت خاک و جلوگیری از سیلاب استفاده شده است.

### خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن

ذخیره کربن در یک قطعه زمین تا حد زیادی به اندازه چهار مخزن کربن زیست توده بالای زمین، زیست توده زیرزمینی، خاک و مواد آلی مرده بستگی دارد. مدل ذخیره سازی و ترسیب کربن (InVEST)، مقدار کربن ذخیره شده در این مخازن را بر اساس نقشه‌های کاربری زمین و طبقه بندی‌های ارائه شده توسط کاربر، جمع آوری می‌کند. زیست توده روی زمین شامل تمام مواد گیاهی زنده بالای خاک (به عنوان مثال پوست، تنه، شاخ و برگ درختان) است. زیست توده زیرزمینی شامل سیستم های ریشه زنده و زیست توده زیرزمینی می‌شود. ماده آلی خاک جزء آلی خاک است و بزرگ ترین مخزن کربن زمینی را نشان می‌دهد. مواد آلی مرده شامل بستر و همچنین چوب مرده خوابیده و ایستاده است. این مدل با استفاده از نقشه های کاربری زمین و انواع پوشش زمین و مقدار کربن ذخیره شده در مخازن کربن، مقدار خالص کربن ذخیره شده در یک قطعه زمین را در طول زمان و ارزش بازار کربن ذخیره شده در موجودی باقیمانده را تخمین می‌زند. همچنین قادر است تراکم ذخیره سازی کربن را به رسترهای کاربری زمین / پوشش زمین ترسیم می‌کند. (فرمول ۱):

$$C_i = C_{i \text{ above}} + C_{i \text{ below}} + C_{i \text{ soil}} + C_{i \text{ dead}} \quad (1)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i$$

در این فرمول‌ها  $i$  نشان‌دهنده نوع کاربری زمین است.  $C_i$  نشان‌دهنده تراکم کربن کل خاک و موجودات از نوع زمین  $i$  است.  $C_i$ -above به چگالی کربن موجودات کاربری نوع  $i$  اشاره دارد.  $C_i$ -below به چگالی کربن موجودات زیرزمینی کاربری نوع  $i$  اشاره دارد.  $C_i$ -dead به چگالی کربن ماده آلی بستر زمین نوع  $i$  اشاره دارد.  $C_i$ -soil به چگالی کربن ماده آلی خاک در لایه خاک طبقه  $i$  زمین در عمق معینی (۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر در این مطالعه) اشاره دارد.  $C_{total}$  نشان‌دهنده کل ذخیره کربن است.  $S_i$  نشان‌دهنده مساحت کل کاربری زمین نوع  $i$  است.  $n$  تعداد کل انواع کاربری زمین را نشان می‌دهد (Zhu et al., 2021).

### مدل سازی خدمت اکوسیستمی نگهداشت رسوب

برای محاسبه از مدل «نسبت تحویل رسوب» از آخرین نسخه نرم‌افزار InVEST 3.11 استفاده شد. فرمول محاسبه به شرح زیر است:

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (2)$$

در فرمول شماره ۲  $USLE_i$  میانگین هدر رفت خاک،  $R_i$  فاکتور فرساینده‌گی باران،  $K_i$  عامل فرسایش پذیری خاک،  $L_i$  فاکتور طول شیب،  $S_i$  ضریب شیب،  $C_i$  عامل پوشش و پوشش زمین و  $P_i$  عامل اقدامات مدیریتی در پیکسل  $i$  است. برای استخراج هر یک داده‌های موردنیاز به‌عنوان ورودی مدل به مقاله سادات و همکاران (۱۴۰۱) مراجعه نمایید.

### خدمت اکوسیستمی جلوگیری از سیلاب

در نرم‌افزار InVEST، مدل کاهش خطر سیل، مقدار رواناب باقی‌مانده در هر پیکسل را در مقایسه با حجم طوفان برای محاسبه این خدمت اکوسیستمی محاسبه می‌کند. رواناب  $Q$  (mm) با روش میزان رواناب برای پیکسل  $i$  که با نوع کاربری زمین و ویژگی‌های خاک تعریف می‌شود، تخمین زده می‌شود (فرمول ۳):

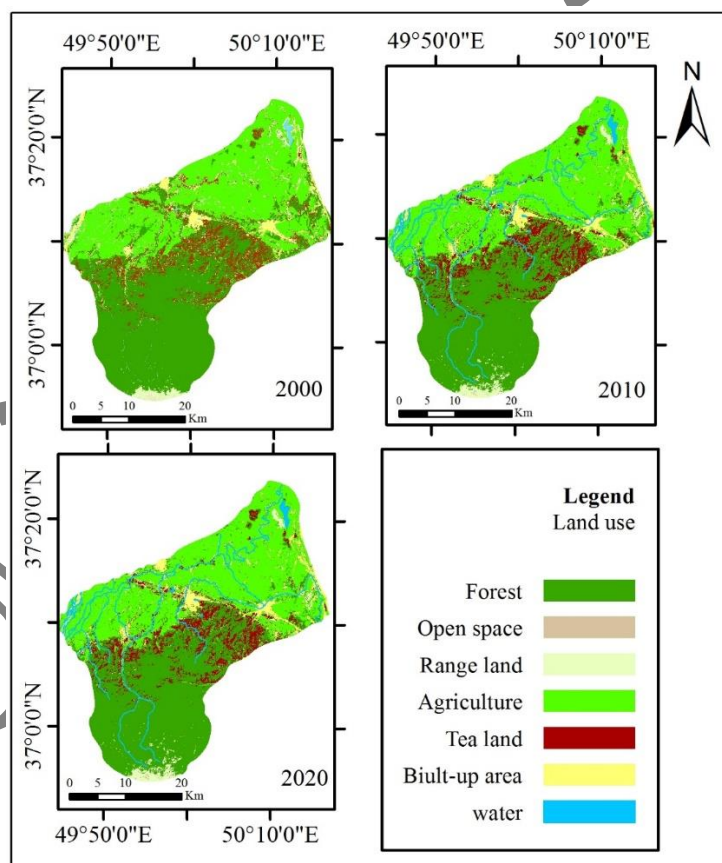
$$Q_{p,i} = \begin{cases} \frac{(P - \lambda S_{max,i})^2}{P + (1 - \lambda) S_{max,i}} \\ 0 \text{ Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

در جایی که  $P$  عمق طوفان طراحی شده برحسب میلی‌متر است،  $S_{max,i}$  میزان احتباس پتانسیل برحسب میلی‌متر است، و  $\lambda S_{max}$  عمق بارندگی موردنیاز برای شروع رواناب است ( $\lambda=0.2$  برای ساده‌سازی) (Sharp et al., 2018).

### نتایج و بحث

#### مدل سازی پوشش زمین

بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، ۱۳۶۱ و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، میزان ۷۰۱۳ هکتار به مساحت اراضی انسان‌ساخت افزوده شده است. این در حالی است که مقایسه مدل‌سازی پوشش زمین طی سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که در این بازه ۶۳۰۳ هکتار به مساحت زمین‌های کشاورزی افزوده شده اما تا سال ۲۰۲۰ ۴۱۴۷ هکتار از مساحت آن کاسته شده است. اما مساحت زمین‌های تحت کشت چای، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، ۳۳۶۳ هکتار و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، ۶۴۱ هکتار کاهش یافته است. که دلیل آن تقسیم زمین‌ها و عدم بازده اقتصادی کشت چای در پی کوچک شدن زمین‌ها است (شکل ۲). نتیجه بررسی تغییرات کاربری و تبدیل آن‌ها به یکدیگر نشان می‌دهد که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، ۱۵۱ هکتار از اراضی جنگلی به زمین‌های ساخته شده و ۲۹۴ هکتار از آن به زمین‌های کشاورزی تبدیل شده است. در بازه زمانی ده‌ساله بعد ۲۰۹ هکتار از اراضی جنگلی به زمین‌های کشاورزی و ۱۶۶ هکتار به اراضی شهری و روستایی تغییر کاربری داده است (جدول ۲).



شکل ۲- تغییرات زمانی- مکانی پوشش زمین در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ میلادی در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2- Spatial-temporal changes of land use in 2000, 2010 and 2020 in the study area

جدول ۲- مساحت انواع کاربری و درصد سهم هریک از طبقات پوشش زمین در حوضه آبخیز در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۰۰ و

۲۰۲۰ میلادی

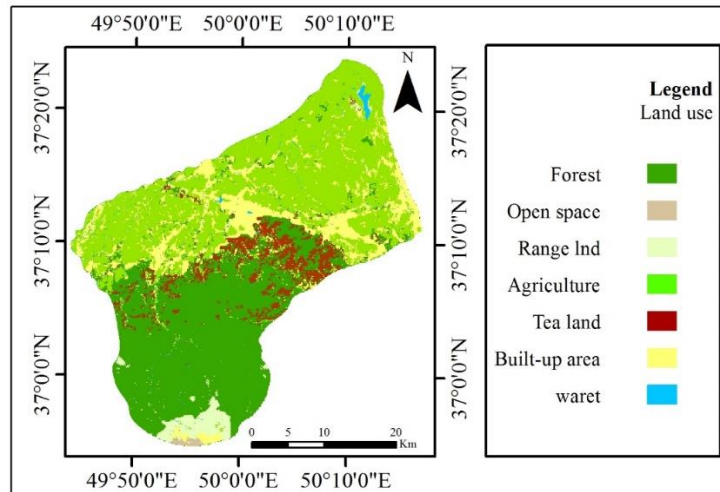
Table 2. The area of land use types and the percentage in each land use class in the watershed in 2000, 2010 and 2020

مساحت (هکتار) Area (Ha)			پوشش زمین Land use
2020	2010	2000	جنگل Forest
39.86%(51761)	42.09%(54659)	42.3%(54999)	اراضی باز Open space
0.39%(509)	0.07%(92)	0.36%(468)	اراضی ساخته شده Buit-up area
10.9%(14157)	5.5%(7144)	4.44%(5783)	مرتع Range land
3.25%(4229)	3.06%(3982)	5.91%(7691)	کشاورزی Agriculture
37.45%(48622)	40.64%(52769)	35.75%(46466)	زمین‌های چای Tealand

### مدل‌سازی سناریوی اول پژوهش

در ادامه همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، سناریوی نویسی اول پژوهش با استفاده از نرم‌افزار idrisi و مدل CA-MARKOV، انجام شد. نتایج اعتبار سنجی مدل با استفاده از آماره‌های صحت کلی، ضریب کاپای کل ۰/۷۹ درصد می‌باشد بنابراین مدل از اعتبار مناسبی برای مدل‌سازی سناریوی اول پژوهش برخوردار است. بررسی نتایج پیش‌بینی پوشش زمین در سال ۲۰۴۰، روند کاهشی مساحت جنگل‌های هیرکانی تا ۴۸۱۲۳ هکتار را نشان می‌دهد. اگرچه مساحت زمین‌های ساخته شده و اراضی کشاورزی به ترتیب به ۱۸۱۵۷ و ۵۱۲۸۶ افزایش خواهد یافت. در نتیجه در سال ۲۰۴۰ برخلاف سایر بازه‌های زمانی مورد بررسی، پوشش غالب منطقه را اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهد. بیشترین زمین‌هایی که به زمین‌های کشاورزی و شهرها تبدیل می‌شوند، مراتع (۱۵۷۰ هکتار) و جنگل‌ها (۲۶۰۱ هکتار) هستند. البته باید توجه کرد که از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۴۰

اراضی کشاورزی حاشیه شهرها و سکونتگاه‌های انسانی، به اراضی انسان‌ساخت تبدیل شده و مراتع و جنگل‌ها تبدیل به اراضی کشاورزی شده‌اند. در نتیجه این افزایش مساحت با تخریب منابع سبز و طبیعی همراه می‌باشد (شکل ۳).



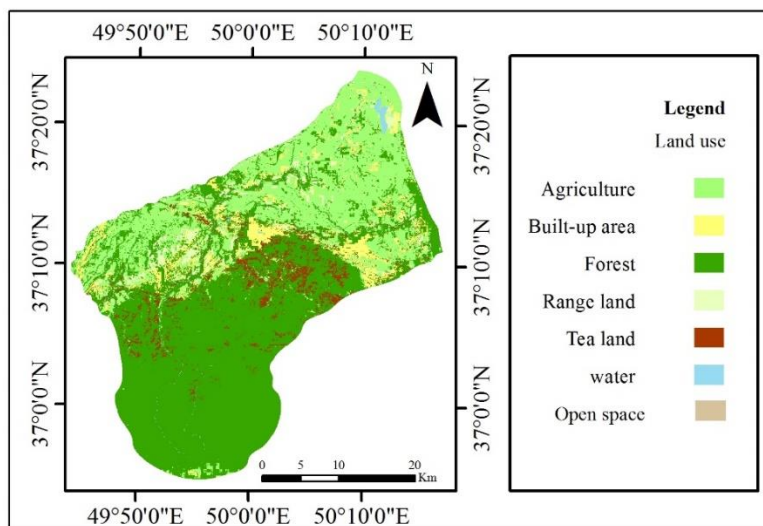
شکل ۳- نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۴۰ میلادی بر اساس سناریوی اول پژوهش

**Fig. 3- Land use map of the studied area in 2040 based on the first scenario**

نکته مهم در این بین روند صعودی اراضی کشاورزی با ادامه روند تاریخی است به گونه‌ای که پس از یک دوره افزایش اراضی کشاورزی در سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۰، شاهد کاهش این اراضی و تغییر کاربری آن‌ها تا سال ۲۰۲۰ بوده‌ایم. اما با ادامه شرایط گذشته تغییر کاربری جنگل‌ها و مراتع به این زمین‌ها افزایش یافته و در سال ۲۰۴۰ با افزایش زمین‌های کشاورزی روبه‌رو خواهیم بود.

### مدل‌سازی سناریوی دوم پژوهش

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، جهت برنامه‌ریزی اختصاص کاربری‌های چندگانه بر اساس تناسب اراضی، روش MOLA برحسب نقشه‌های فازی تناسب اراضی و با دادن مساحت در نظر گرفته‌شده برای هر کاربری استفاده گردید (شکل ۴).



شکل ۴- نقشه برنامه‌ریزی حفاظتی پوشش زمین به روش MOLA در منطقه مورد مطالعه

Fig. 4- Land use protection planning map by MOLA method in the studied area

جدول شماره ۳ تغییرات مساحت هر طبقه از پوشش زمین را در سال ۲۰۲۰، سناریوی اول و سناریوی دوم نشان می‌دهد. در برنامه‌ریزی حفاظتی پوشش زمین، علاوه بر اینکه جنگل‌های هیرکانی حفظ شده و دچار تغییر کاربری نشده‌اند، بلکه تقریباً ۷ درصد به مساحت آن‌ها افزوده و در راستای احیای آن‌ها گام برداشته شده است تا عملکرد اکولوژیکی خود را افزایش دهند. اما در سناریوی اول که نشان‌دهنده چیره شدن روند تاریخی حوضه بر آن می‌باشد، نه تنها این جنگل‌ها از تغییر کاربری مصون نمی‌مانند، بلکه تقریباً ۷ درصد نیز از مساحت آن‌ها کاسته می‌شود. این در حالی است که مراتع نیز طبق پیش‌بینی‌ها در سال ۲۰۴۰ دستخوش تغییر شده و تقریباً ۱۶ درصد از مساحتشان را از دست می‌دهند. در حالی که در برنامه‌ریزی حفاظتی پیشنهادی نه تنها دچار تغییر کاربری نشده بلکه حدود یک درصد نیز به مساحت آن‌ها افزوده می‌شود. پیرامون اراضی اختصاص داده شده به مناطق شهری و روستایی طبق برآوردهای انجام شده در سال ۲۰۴۰ با غالب شدن روند تاریخی منطقه، تقریباً ۳۰ درصد به مساحتشان افزوده می‌شود. در حالی که بر اساس برنامه‌ریزی حفاظتی با در نظر گرفتن نیاز جمعیتی منطقه تنها ۱/۲۴ درصد به مساحتشان افزوده خواهد شد. از سوی دیگر در برنامه‌ریزی حفاظتی بجای افزایش مساحت زمین‌های کشاورزی، اصل بر افزایش راندمان این زمین‌هاست. به گونه‌ای که حدود ۷/۵ درصد از این زمین‌ها در راستای احیای جنگل‌ها به کاربری جنگلی و مرتع تغییر کاربری می‌دهند.

جدول ۳- تغییرات مساحت هر طبقه از پوشش زمین را در سال ۲۰۲۰، سناریوی اول و سناریوی دوم در منطقه

مورد مطالعه

Table 3. Changes in the area of each class of land use in 2020, the first scenario and the second scenario in the studied area

تغییر مساحت			مساحت		پوشش زمین Land use
Area changes			Area		
۲۰۲۰_ سناریوی دوم	۲۰۲۰_ سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی اول	۲۰۲۰	
2020- Second scenario	2020- First scenario	Second scenario	First scenario	2020	
+7.48	-7.22	55503	48019	51761	جنگل
-7.58	+5.79	44936	51286	48622	کشاورزی
+0.54	-16.07	4206	3549	4229	مرتع
+1.24	+28.25	14333	18157	14157	اراضی ساخته شده
-39.29	-20.03	300	457	509	اراضی باز
0	0	1129	1129	1129	بدنه آبی
0	-2.7	10552	8262	10552	مزارع چای

بررسی خدمات اکوسیستمی در سناریوهای اول و دوم پژوهش

ترسیب کربن

در سال ۲۰۲۰ الگوی توزیع فضایی ذخایر کربن در منطقه مورد مطالعه به طور کلی در نیمه جنوبی منطقه بیشترین غلظت را دارند که علت آن وجود پوشش متراکم جنگل‌های هیرکانی در این بخش می‌باشد. سپس بالاترین ذخیره کربن به ترتیب در مراتع و زمین‌های کشاورزی و کمترین میزان آن در اراضی ساخته شده و منابع آبی موجود در منطقه برآورد گردیده است. نتایج این بخش از پژوهش با مطالعات Sadat و همکاران در سال ۲۰۱۸ در بخشی از استان مازندران و Asadolahi و همکاران در سال ۲۰۱۸ در بخشی از استان گلستان همخوانی دارد (Sadat et al., 2018; Adadolahi et al., 2018). در مجموع میزان ذخیره کربن در این سال در منطقه برابر با ۱۱۳۷۹۷۸۹۳ تن می‌باشد. میزان ذخیره کل کربن در سال ۲۰۴۰ به مقدار ۱۰۹۸۱۳۶۳۳/۸۱ تن می‌رسد یعنی با ادامه روند گذشته تا سال ۲۰۲۰، میزان ذخیره کربن در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۲۰، تقریباً ۴ میلیون تن کاهش خواهد یافت. علت این امر را می‌توان در افزایش مساحت اراضی ساخته شده به عنوان کاربری‌هایی با کمترین میزان ارائه خدمت مورد نظر و کاهش سطح جنگل‌ها و اراضی کشاورزی به عنوان پربازده‌ترین اراضی در ترسیب کربن دانست. این مسأله در نتایج مطالعات Sun و همکاران در سال ۲۰۱۸ و Cleric و همکاران در سال ۲۰۱۹

نیز نشان داده شده است (Sun et al., 2018; Cleric et al., 2019). بر اساس برنامه‌ریزی پوشش زمین صورت گرفته در سناریوی دوم، میزان مجموع کربن ذخیره شده در این حالت برابر است با  $123636428/17$  تن که این رقم در مقایسه با سال ۲۰۲۰ در حدود  $9850000$  تن افزایش و نسبت به سناریوی اول در حدود ۱۴ میلیون تن افزایش یافته است. علت این امر را در وهله اول می‌توان در افزایش ۵ هزار هکتاری جنگل‌ها در این برنامه و جلوگیری از رشد بی‌رویه شهرها نسبت به روند تاریخی حاکم بر حوضه دانست.

### جلوگیری از سیلاب

شاخص نگهداشت رواناب در سال ۲۰۲۰ برابر با  $0/37$  می‌باشد. در مجموع حجم رواناب نگهداری شده توسط حوزه آبخیز مورد بررسی در سال  $2020 \times 86122378$  مترمکعب می‌باشد. از سوی دیگر پتانسیل حجم سیلاب ایجاد شده در این منطقه نیز در سال ۲۰۲۰ میلادی برابر با  $145891044$  مترمکعب می‌باشد. در سناریوی اول طبق پیش‌بینی صورت گرفته تا سال ۲۰۴۰، پتانسیل حجم سیلاب در حوضه به  $148819209$  مترمکعب خواهد رسید. به علاوه شاخص خدمت اکوسیستمی نگهداشت رواناب به  $0/36$  و حجم آن با کاهش  $2298785$  مترمکعبی نسبت به سال ۲۰۲۰، به  $148819209$  مترمکعب در کل حوضه خواهد رسید. در سناریوی دوم پژوهش نیز بر اساس خروجی نرم‌افزار InVEST، با احتساب برنامه‌ریزی صورت گرفته پتانسیل حجم سیلاب در حوضه مورد مطالعه برابر با  $141673307$  مترمکعب می‌باشد که نسبت به سال ۲۰۲۰، تقریباً ۳ درصد کاهش یافته است. همچنین شاخص ارائه این خدمت در منطقه برابر است با  $0/38$  و حجم آن  $90229363$  مترمکعب می‌باشد که نسبت به سال ۲۰۲۰،  $4106985$  مترمکعب افزایش یافته است که خود حاکی از افزایش ارائه این خدمت توسط اکوسیستم می‌باشد.

### نگهداشت خاک

مقادیر شاخص فرسایش‌پذیری خاک از  $0$  تا  $3625$  در منطقه متغیر می‌باشد. عامل C نیز که بر اساس NDVI منطقه مورد مطالعه تهیه شده است، در منطقه مورد مطالعه بین  $0$  تا  $0/52$  متغیر است. بیشترین مقدار این پارامتر در مناطق فاقد پوشش گیاهی و کمترین مقدار آن در مناطق متراکم جنگل‌های هیرکانی، است. بر اساس نتایج به دست آمده مجموع پتانسیل هدر رفت خاک در سال ۲۰۲۰، برابر است با  $11955304$  تن در سال می‌باشد. این در حالی است بررسی نتایج مجموع خروجی رسوب نیز در حوضه آبخیز نشان می‌دهد که این فاکتور در سال ۲۰۲۰ به  $398241$  تن بر هکتار در سال افزایش یابد. البته لازم به ذکر است که حدود ۹۰ درصد از مناطق، دارای پتانسیلی کمتر از  $50$  تن بر هکتار می‌باشند. مسیر آبراهه‌ها در



بخش‌های جنوبی منطقه و مناطق جنگلی با ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ و شیب بالاتر از ۵۰ درصد، بیشترین پتانسیل را برای از دست دادن و فرسایش خاک و خروج رسوب دارند. اگرچه فرسایش‌دگی بالا در این مناطق نسبت به نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه، کمتر است اما شیب زیاد سبب قدرت تخریب بیشتر خاک می‌گردد. لازم به ذکر است که کمترین میزان پتانسیل فرسایش خاک نیز در مناطقی با شیب کمتر از ۱۰ درصد ثبت مشاهده می‌شود. نتایج این بخش از مطالعه با پژوهش Mirghaed و همکاران در سال ۲۰۱۸ هم‌راستا می‌باشد (Mirghaed *et al.*, 2018). با ادامه روند سال‌های گذشته، میزان هدر رفت خاک در سناریوی اول به ۱۹۹۱۵۷۸۴ تن افزایش می‌یابد یافت (جدول ۴).

جدول ۴- میزان پتانسیل از دست دادن خاک، نگهداشت آن و خروج رسوب در حوضه آبخیز

Table 4. The amount of usle potential, Sediment retention and sediment export in the watershed

۲۰۲۰ 2020	سناریوی اول First senario	سناریوی دوم Second senario	
11955304	19915784	7179683	میزان از دست دادن خاک (تن) USLE (ton)
398241	926822	161084	خروج رسوب (تن) Sediment export (ton)
104474288	103945712	104711456	نگهداشت خاک (تن) Sediment retention (ton)

میزان نگهداشت سالانه خاک نیز در سال ۲۰۲۰ برابر با ۱۰۴۴۷۴۲۸۸ تن در کل حوضه آبخیز بوده است. بیشترین میزان ارائه این خدمت در مناطق جنگلی با تراکم بالا و حاشیه آبراهه‌ها و کمترین میزان آن در اراضی کشاورزی و اراضی ساخته‌شده پایین دست حوضه ثبت شده‌اند. بر اساس پیش‌بینی صورت گرفته میزان خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک در سناریوی اول به ۱۰۳۹۴۵۷۱۲ تن در کل حوضه، کاهش یابد که نسبت به سال ۲۰۲۰ با کاهشی ۵۲۸۵۷۶ تنی همراه خواهد بود. در سناریوی دوم پژوهش نیز، میزان خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک در حوضه مورد مطالعه برابر با ۱۰۴۷۱۱۴۵۶ تن می‌باشد که نسبت به سناریوی اول، ۷۶۵۴۴۴ تن افزایش یافته است، که خود حاکی از افزایش ارائه این خدمت توسط اکوسیستم می‌باشد. در مجموع می‌توان بیان کرد که ظرفیت ذخیره کربن، نگهداری سیل و ظرفیت نگهداری رسوب در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۸، ۶ و ۱۴ درصد طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۰ کاهش یافته است. پیش‌بینی می‌شود که این روند کاهشی با ادامه

روند فعلی در بیست سال گذشته ادامه یابد. بنابراین ترسیب کربن، کاهش سیل و کاهش رسوب در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۰۰ به ترتیب ۱۳، ۱۰ و ۰/۶ درصد کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی در کلام پایانی می‌توان بیان داشت که نتایج مطالعات Asadolahi و همکاران در سال ۲۰۱۸ و Feng و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی پوشش زمین بر اساس اصول توسعه پایدار و لحاظ معیارهای اکولوژیکی می‌تواند باعث افزایش خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌ها گردد (Asadolahi et al., 2018; Feng et al., 2020).

### نتیجه‌گیری

با توجه به ماهیت موضوع و نتایج تحقیق مشخص شد که خدمات اکوسیستمی به‌طور کلی و خدمات ترسیب کربن، نگهداشت خاک و کنترل سیلاب به‌عنوان خدمات خرد در تعیین پتانسیل‌ها و ضعف‌های یک اکوسیستم به‌ویژه در مقیاس حوضه‌های آبخیز قابلیت بالایی دارند و می‌توانند تغییرات را به‌خوبی منعکس کنند. بنابراین مدل‌سازی و کمی‌سازی این خدمات می‌تواند در برنامه‌ریزی پوشش زمین این حوضه‌ها نقش به‌مزایی داشته باشند. جایگاه خدمات اکوسیستمی در برنامه‌ریزی بر اساس ساختار تبیین شده در این پژوهش بدین‌صورت است که از آنجایی تغییرات خدمات از نظر کمی و مکانی، منعکس‌کننده تغییرات عملکرد می‌باشد و تغییرات پوشش زمین مهم‌ترین عامل در تغییر آن است، تغییرات پوشش زمین طی سال‌های گذشته مورد ارزیابی قرار گرفت. روند تغییرات میزان خدمات ارائه‌شده توسط حوضه، در سناریوهای اول و دوم به ترتیب کاهشی و افزایشی خواهد بود. این کاهش در سناریوی اول عمدتاً ناشی از تخریب جنگل‌ها به‌عنوان اساسی‌ترین رکن تولید خدمات موردنظر در منطقه مورد مطالعه و رشد شدید شهرها به‌عنوان کاربری‌هایی با کمترین سطح تأمین آن‌ها است. و علت اصلی افزایش خدمات در سناریوی دوم بحث توجه به دیدگاه حفاظتی در کنار پاسخگویی به نیازهای ساکنین منطقه در تعیین مساحت اختصاص داده‌شده به هر کاربری می‌باشد که این مسأله روند برنامه‌ریزی بر اساس توسعه پایدار را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به اهمیت استان‌های شمالی به‌عنوان مناطق اصلی ارائه‌دهنده خدمات موردنظر در کشور و افزایش نیاز به زمین در این مناطق با توجه به روند رو به رشد جمعیت و سوداگری زمین در استان‌های شمالی، لزوم ارائه برنامه‌ریزی‌های حفاظتی با توجه به طرح‌های آمایش استان‌ها ضروری است. این مطالعه روشی است در مورد چگونگی سهولت و نظام‌مند کردن دیدگاه برنامه‌ریزان برای آگاهی از عواقب و پیامدهای تصمیمات خود بر روی خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده در حوضه‌ها آبخیز از طریق استفاده از مدل‌سازی، GIS و ابزار سنجش‌از‌دور ارائه می‌دهد.

## References

## منابع

- Abdollahi, S., and Dadashpoor, H., 2020. Analysis and prediction of land use changes: the case study of coastal areas of Gilan Province. *Environmental Sciences*. 17(3), 121-136. (In Persian with English abstract).
- Adelisardou, F., 2021. Management of water resources in the agricultural sector: the approach of ecosystem services and virtual water. PhD thesis. University of Teran, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract).
- Aerts, J.C.J.H., 2002. Spatial decision support for resource allocation. Integration of optimization, uncertainty analysis and visualization. PhD thesis. University of Amsterdam, Amsterdam, Netherland.
- Asadolahi, Z, Salmanmahiny, A. and Mirkarimi, H., 2015. Modeling the Supply of Sediment Retention Ecosystem Service (Case study: Eastern Part of Gorgan-Rud Watershed). *E.E.R.* 5 (3), 61-75. (In Persian with English abstract).
- Balist, J., 2022. Land Use Planning in Watersheds Considering the Ecosystem Services Potentials (Case Study: Sirvan Boundary Watershed). PhD thesis. University of Teran, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract).
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K., and Villegas, J. C., 2019. Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*. 685, 1181-1192.
- Eastman, J.R., 2003. *IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing*. Worcester: Clark Labs. Clark University.
- EbadiGhajari, S., 2017. The place of ecosystem services in land use planning. *Environment*. 60, 29-48. (In Persian with English abstract).
- Feng, Q., Zhao, W., Hu, X. and et al., 2020. Trading-off ecosystem services for better ecological restoration: A case study in the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*. 257, 1-17.
- Fuentes, M., Millard, K., and Laurin, E., 2020. Big geospatial data analysis for Canada's Air Pollutant Emissions Inventory (APEI): using google earth engine to estimate particulate matter from exposed mine disturbance areas. *GIS science & Remote Sensing*. 57(2), 245-257.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M. and et al., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*. 202, 18-27.
- Jiang, C., Li, D., Wang, D. and et al., 2016. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change. *Ecological Indicators*. 66, 199-211.
- Li, H.L., Peng, J., Liu Y.X. and et al. 2017. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: a spatial heterogeneity perspective. *Ecol. Indic.* 82, 50–60.
- Li, X. and Xiao, R., 2017. Analyzing network topological characteristics of eco-industrial parks from the perspective of resilience: a case study. *Ecological Indicator*. 74 (3), 403–413.
- Lü, Y., Fu, B., Feng, X. and et al., 2012. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PloS one*. 7(2), 1-10.

Millennium Ecosystem Assessment., 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. A report of the millennium ecosystem assessment. Island Press. USA.

Sadat, M., Salehi, E. and Amiri, M. J., 2023. Quantitative Modeling of Spatiotemporal Changes in Soil Erosion and Retention Potential and Sediment Production (Case Study: Lahijan-Chabaksar and Astana-Kochsefhan Watersheds). *Journal of Environmental Studies*. 48(4), 577-596. (In Persian with English abstract).

Sadat, M., Zoghi, M. & Malekmohammadi, B., 2020. Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: case study in Qaem Shahr County, Iran. *Environment, Development and Sustainability*. 22(8), 8135-8158.

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T. and et al., 2018. InVEST 3.5.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, niversity ofMinnesota, The Nature Conservancy and World Wildlife Fund.

Srichaichana, J., Trisurat, Y. and Ongsomwang, S., 2020. Land use and land cover scenarios for optimum water yield and sediment retention ecosystem services in Klong U-Tapao Watershed, Songkhla, Thailand. *Sustainability*. 11(10), 1-22.

Statistical Center of Iran., 2016. Report of General Population and Housing Census. Available online at: <https://www.amar.org.ir/%D8%B3%D8%B1%D8%B4%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%D8%B9%D9%85%D9%88%D9%85%DB%8C-%D9%86%D9%81%D9%88%D8%B3-%D9%88-%D9%85%D8%B3%DA%A9%D9%86/%D9%86%D8%AA%D8%A7%DB%8C%D8%AC-%D8%B3%D8%B1%D8%B4%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C>

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M. and et al., 2015. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*. 347, 1259855.

Venter, Z. S., Aunan, K., Chowdhury, S. and et al., 2020. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(32), 18984-18990.

Venter, Z. S., Aunan, K., Chowdhury, S. and et al., 2020. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(32), 18984-18990.

Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L. T. H., McInnes, J. and Roberts, A. M., 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*. 138(1), 74-88.

Zare, M., Teimurian, T. and Jouri, M. H. 2017. Monitoring of land use/cover changes using change drastically, degree of dynamic and post classification comparison. *Natural Ecosystems of Iran*. 8(1), 123-136.

Zhu G, Qiu D, Zhang Z. and et al., 2021. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China. *Ecological Indicators*. 127: 1-10.

Zhu, G., Qiu, D., Zhang, Z. and et al., 2021. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region. China. *Ecological Indicators*. 127, 1-10.

## Original Article

# Investigating the Effects of Different Land Use Planning Scenarios on the Supply of Selected Ecosystem Services

Mahdis Sadat, Esmail Salehi,<sup>†</sup> Javad Amiri

Department of Environmental Planning, Management and Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

**Introduction:** As concerns about the various effects of land use planning and management are increasing, many researchers are trying to investigate how land use changes affect service processes. Considering the relationship between land use change and ecosystem services, conducting studies on the effects of land use change in planning on the quantity of services provided by ecosystems in order to plan a better location of land use and ensure the sustainable supply of ecosystem services seems necessary. Therefore, the current research was conducted on this basis and with the aim of comparing the supply of selected ecosystem services in two different scenarios of land use change and in a part of Gilan province.

**Material and Methods:** In this study, two scenarios were considered for land use planning in the eastern part of Gilan province. The first scenario was based on the historical process of land career change in the study area using the CA-Markov model, and the second scenario was based on land use conservation planning using the Mola model in Idrisi software. In the second step, in order to compare the results of two land use change scenarios on the amount of ecosystem services provided by the study area, the quantification of the ecosystem services of carbon sequestration, soil retention and flood prevention was done using the relevant models in the InVEST software.

**Results and Discussion:** According to the forecast, with the continuation of the past trend until 2020, the amount of carbon storage in 2040 will decrease by approximately 4 million tons compared to 2020. Based on the land use planning carried out in the second scenario, the total amount of carbon stored compared to 2020 has increased by about 9,850,000 tons and compared to the first scenario by about 14 million tons. Also, in the first scenario, the flood volume potential in the basin will reach 148819209 cubic meters. In addition, the ecosystem service index of runoff maintenance will reach 0.36 and its volume will reach 148819209 cubic meters in the entire basin. In the second scenario of the research, the flood volume potential in the studied basin is equal to 141673307.89 cubic meters and it has decreased by approximately 3% compared to 2020. Also, the index of providing this service in the region is equal to 0.38 and its volume is 90229363 cubic meters. The amount of ecosystem service of soil maintenance in the first scenario will be accompanied by a decrease of

---

<sup>†</sup> Corresponding Author Email Address: [tehransaleh@ut.ac.ir](mailto:tehransaleh@ut.ac.ir)

528,576 tons compared to 2020. In the second scenario of the research, compared to the first scenario, 765,444 tons have increased, which indicates an increase in the provision of this service by the ecosystem.

**Conclusions:** The results of this study show that, in general, the trend of changes in the amount of selected services provided by the basin will be decreasing and increasing respectively in the first and second scenarios. This reduction in the first scenario is mainly due to the destruction of forests as the most basic pillar of the desired service production in the studied area and the intense growth of cities as land uses with the lowest level of their supply. And the main reason for the increase in services in the second scenario is to pay attention to the protection point of view in addition to responding to the needs of the residents of the region in determining the area allocated to each user, which shows the process of planning based on sustainable development.

**Keywords:** Carbon sequestration, Ecosystem services, Flood mitigation, Land use, Sediment retention