

## نقش سنج‌های سیمای سرزمین و فرایندهای مکانی تغییر در ارزیابی کارایی مدل ژئومد (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نکارود)

شریف جورابیان شوشتری - دانشجوی دکتری محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران  
کامران شایسته\* - استادیار ارزیابی محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران  
مهدی غلامعلی فرد - استادیار ارزیابی محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
محمود آذری - استادیار آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
خوان ایگناسیو لویز مورنو - محقق هیدرولوژی، مؤسسه تحقیقات ملی، ساراگوسا، اسپانیا

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۱

وصول: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

### چکیده

ارزیابی کارایی مدل پیش‌بینی تغییرات پوشش سرزمین، بخش مهمی جهت اطمینان از صحت نتایج حاصل است. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی کارایی مدل ژئومد با استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین و فرایندهای مکانی تغییر جهت پیش‌بینی تغییرات جنگل در حوضه آبخیز نکارود، شمال ایران است. جهت انجام این کار، از نقشه‌های پوشش سرزمین سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ به عنوان نقشه‌های واقعیت زمینی استفاده شد. نقشه شایستگی انتقال از جنگل به غیرجنگل با استفاده از ترکیب خطی وزن داده شده، تولید شد. از توابع عضویت فازی برای استانداردسازی و از تحلیل سلسله‌مراتبی نیز به منظور وزن‌دهی معیارها استفاده شد. سنج‌های سیمای سرزمین شامل مساحت کل، تراکم لکه، تراکم حاشیه، چین‌خوردگی ابعاد، دایره محدودکننده، سوراخ‌شدگی (مشبک‌شدگی)، پراکندگی و مجاورت با استفاده از نرم‌افزار کمی‌کردن الگوی سیمای سرزمین (فرگستنس) و فرایندهای مکانی تغییر با استفاده از درخت تصمیم‌گیری در محیط مدل‌ساز تغییر سرزمین محاسبه شدند. بیشترین میزان خطای نسبی حاصل از مقایسه نقشه واقعیت زمینی با نقشه پیش‌بینی شده برای سنج‌های تراکم لکه، دایره محدودکننده و سوراخ‌شدگی به دست آمد؛ در صورتی که مدل توانست با دقت بالایی مساحت، پیچیدگی اشکال، تکه‌تکه‌شدگی، فشردگی و ناهمگنی مکانی لکه‌های جنگلی را پیش‌بینی کند؛ همچنین فرایند مکانی تغییر حذف طی سال‌های مورد مطالعه با توجه به کاهش مساحت و تعداد لکه‌ها اتفاق افتاد که مدل نیز به درستی همین فرایند را پیش‌بینی کرد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد این روش با کارایی بالایی می‌تواند درک جامع و کاملی از عدم قطعیت صحت نتایج تولیدشده ارائه دهد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی تغییرات پوشش سرزمین، ژئومد، ارزیابی صحت، سنج‌های سیمای سرزمین، فرایندهای مکانی تغییر.

## مقدمه

تغییرات پوشش سرزمین به عنوان محرک اصلی در تغییرات اکوسیستم جهانی و همچنین به عنوان فاکتور کلیدی در تغییرات اقلیم جهانی تشخیص داده شده‌اند (تیان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). به منظور تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی این تغییرات، پژوهشگران، انواع مختلفی از مدل‌ها را طراحی کرده‌اند. این مدل‌ها، به‌ویژه از نظر فرضیات نظیر تعداد کلاس‌ها (به عنوان مثال ۲ کلاس جنگل و غیرجنگل یا بیشتر)، انواع انتقال (فقط کاهش، فقط افزایش، کاهش و افزایش)، وابستگی مکانی، پویا و دینامیک بودن، بازخورد و دیتاهای مورد نیاز متفاوت هستند (پونتوس و مالانسون<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵). چندین منبع عدم قطعیت در مدل‌های شبیه‌سازی وجود دارد که می‌توان آنها را به ۳ دسته داده‌ها، مدل و فرایند تغییرات در آینده تقسیم کرد (پونتوس و نیٹی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۰). مدل‌های زیادی جهت پیش‌بینی تغییرات پوشش سرزمین تولید شده‌اند که از آن جمله می‌توان به کلو-اس<sup>۴</sup> (وربورگ<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۹۹۹)، دینامیکا<sup>۶</sup> (سوارس-فیلهو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۲)، مدل‌ساز تغییر سرزمین<sup>۸</sup> (ایستمن<sup>۹</sup>، ۲۰۰۶)، سلول خودکار - زنجیره مارکف<sup>۱۰</sup> (ایستمن، ۲۰۰۶) و ژئومد<sup>۱۱</sup> (پونتوس و همکاران، ۲۰۰۱) اشاره کرد. مدل ژئومد به طور گسترده برای پیش‌بینی تغییرات در سرزمین‌هایی با افزایش یک طرفه در یک کلاس پوشش سرزمین استفاده می‌شود (چن و پونتوس<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۱).

ژئومد، مدلی مبنی بر پایه سیستم اطلاعات مکانی<sup>۱۳</sup> است که می‌تواند موقعیت مناطق جنگل‌زدایی را با استفاده از مشخصات زیست - جغرافیایی و اقتصادی - اجتماعی به‌علاوه داده‌های مکانی پوشش جنگل در دوره‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی کند. پیش‌بینی این مدل، می‌تواند با تخمین تست میزان و وسعت جنگل در آینده ارتقا یابد. از مزایای ژئومد در مقایسه با مدل‌های پیچیده می‌توان به این نکته اشاره کرد که به داده‌های زیاد برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی نیاز ندارد (اچوریا<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۷)؛ از این رو، از این مدل در مطالعات زیادی به منظور شبیه‌سازی تغییرات استفاده شده است. این مدل، برای شبیه‌سازی کاهش گستره جنگل در ماساچوست (اشنایدر و پونتوس<sup>۱۵</sup>، ۲۰۰۱)، کاستاریکا (پونتوس، ۲۰۰۲؛ هال<sup>۱۶</sup>، ۲۰۰۰)، هندوستان (جیریراج<sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸) و بولیوی (کیم<sup>۱۸</sup>، ۲۰۱۰) به کار برده شد. مطالعات متعددی توانایی بالای مدل ژئومد را با توجه به تطابق بالا بین نقشه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با نقشه واقعیتهای زمینی در مدل‌سازی تغییرات جنگل برای بهبود استراتژی‌های پوشش سرزمین به منظور حفاظت تنوع زیستی در گاتس<sup>۱۹</sup> (منون و باوا<sup>۲۰</sup>، ۱۹۹۷)، پیش‌بینی تغییرات کاهش

- 1- Tian
- 2- Pontius & Malanson
- 3- Neeti
- 4- CLUE-S
- 5- Verburg
- 6-DINAMICA
- 7- Soares-Filho
- 8- Land Change Modeler
- 9- Eastman
- 10- CA-Markov
- 11- GEOMOD
- 12- Chen & Pontius
- 13- GIS
- 14- Echeverria
- 15- Schneider & Pontius
- 16- Hall
- 17- Giriraj
- 18- Kim
- 19- Ghats
- 20- Menon & Bawa

جنگل در جنوب شرقی مینه سوتا<sup>۱</sup> (پادال و یان<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲)، مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در منطقه گرگان (گلدوی، ۱۳۹۰) و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه حفاظت‌شده بیجار (مراتی‌فر، ۱۳۹۳) را گزارش کردند.

سنج‌های سیمای سرزمین می‌توانند به عنوان شاخص‌های کمی که ساختار و الگوی سیمای سرزمین را توصیف می‌کنند، تعریف شوند. کاربرد مهم سنج‌های سیمای سرزمین، شامل تجزیه و تحلیل الگوی سیمای سرزمین، تنوع زیستی، تکه‌تکه‌شدن زیستگاه، توصیف تغییرات در سیمای سرزمین و بررسی اثر مقیاس در توصیف ساختار سرزمین است (هرولد<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۲). از طرفی، سنج‌های مکانی سیمای سرزمین به طور گسترده برای کمی کردن شکل و الگوی تغییرات گیاهان طی زمان‌های مختلف استفاده می‌شوند (هرولد و همکاران، ۲۰۰۵). که می‌توانند در درک بهتر ساختارهای مکانی، پویایی و مدل‌سازی کمک کنند. این سنج‌ها، شامل مساحت، تراکم لکه و اندازه، حاشیه، شکل، نزدیک‌ترین همسایگی، تنوع و پراکندگی هستند (آپان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۲)؛ همچنین همراه با تغییر در مساحت، محیط و تعداد لکه‌های سیمای سرزمین، فرایندهای مکانی تغییر مختلفی نیز در سرزمین رخ می‌دهند. سنج‌های سیمای سرزمین می‌توانند منجر به افزایش تفسیر و ارزیابی بهتر نتایج مدل‌سازی تغییرات پوشش سرزمین شوند. در همین راستا، مقایسه بین داده‌های شبیه‌سازی و واقعیت زمینی در شاخص تعداد لکه تفاوت زیادی را نشان داد (وو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۹؛ ساکیه و سلمان ماهینی، ۲۰۱۶؛ دژکام و همکاران، ۲۰۱۷). سنج بزرگ‌ترین اندازه لکه نیز تفاوت اندکی را بین مجموعه داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی آشکار کرد (وو و همکاران، ۲۰۰۹؛ ساکیه و سلمان ماهینی، ۲۰۱۶). تفاوت کم در این سنج، بین نقشه‌های واقعیت زمینی و مدل‌سازی شده نشان‌دهنده انطباق خوب در ساختار سیمای سرزمین است. خطای نسبی شاخص میانگین اقلیدسی فاصله نزدیک‌ترین همسایه بین دو مجموعه داده، نتایج متفاوتی را در شبیه‌سازی کاربری مسکونی سال ۲۰۱۱ در مطالعه ساکیه و سلمان ماهینی (۲۰۱۶) و دژکام و همکاران (۲۰۱۷)، نشان داد. اختلاف میان نقشه شبیه‌سازی و مشاهداتی برای شاخص چین‌خوردگی ابعاد در مطالعه وو و همکاران (۲۰۰۹)، بیشتر از پژوهش گوان<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش شد. این تفاوت‌ها می‌تواند به علت اختلاف در ساختار مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی باشد. جمع‌بندی مرور منابع نشان داد، با وجود تعدد و کثرت روش‌های ارزیابی مدل‌ها، سنج‌های سیمای سرزمین می‌توانند مقایسه جامع و کاملی از روند تغییرات الگو و ساختار سیمای سرزمین بین داده‌های واقعیت زمینی و شبیه‌سازی ارائه دهند و مطالعات بسیار اندکی از این سنج‌ها به منظور ارزیابی کارایی مدل بهره برده‌اند؛ لذا اهداف پژوهش حاضر، عبارتند از: ۱- شبیه‌سازی تغییرات گستره جنگل‌های هیرکانی حوضه آبخیز نکارود با استفاده از مدل ژئومد؛ ۲- ارزیابی کارایی مدل ژئومد در پیش‌بینی تغییرات اراضی جنگلی با استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین و فرایندهای مکانی تغییر.

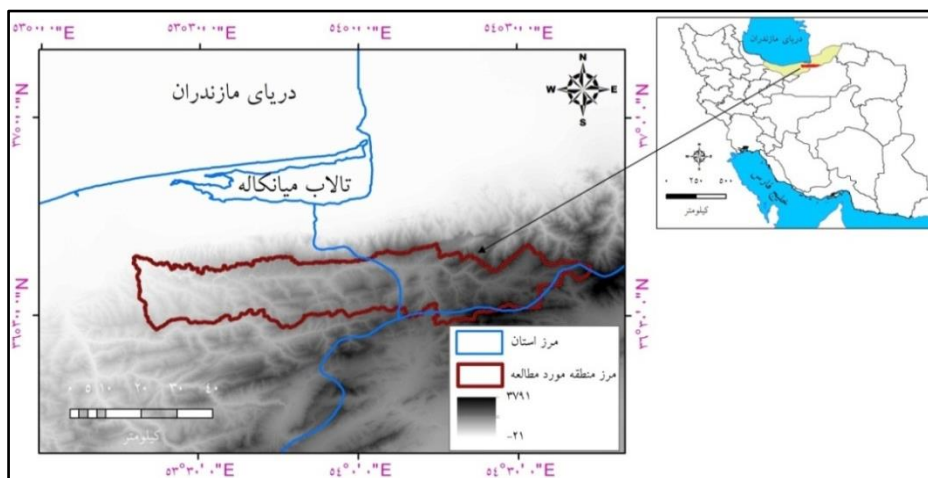
## مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز نکارود با وسعت ۱۸۷۱ کیلومتر مربع و بین مختصات جغرافیایی ۱۷ ۵۳ تا ۴۴ ۵۴ طول شرقی و ۲۷ ۳۶ تا ۴۱ ۳۶ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). رودخانه نکا از جنوب شهر نکا عبور و به دریای مازندران

1- Minnesota  
2- Paudal & Yuan  
3- Herold  
4- Apan  
5- Wu  
6- Guan

می‌ریزد. اقلیم منطقه با توجه به منحنی آمبروترمیک، نیمه‌مرطوب معتدل و نیمه‌مرطوب سرد و کمترین و بیشترین بارندگی به ترتیب، در تابستان و پاییز رخ می‌دهد. میانگین سالانه بارش، ۶۰۰ میلی‌متر و حداقل و حداکثر دما نیز ۷/۵ و ۲۶ درجه سانتی‌گراد است (قنبرپور و همکاران، ۲۰۱۴). این حوضه، مستعد سیل است که از آن جمله می‌توان به سیل مرداد ماه سال ۱۳۷۸ که خسارات جانی و مالی زیادی به بار آورد اشاره کرد (جورابیان شوشتری و همکاران، ۲۰۱۲).

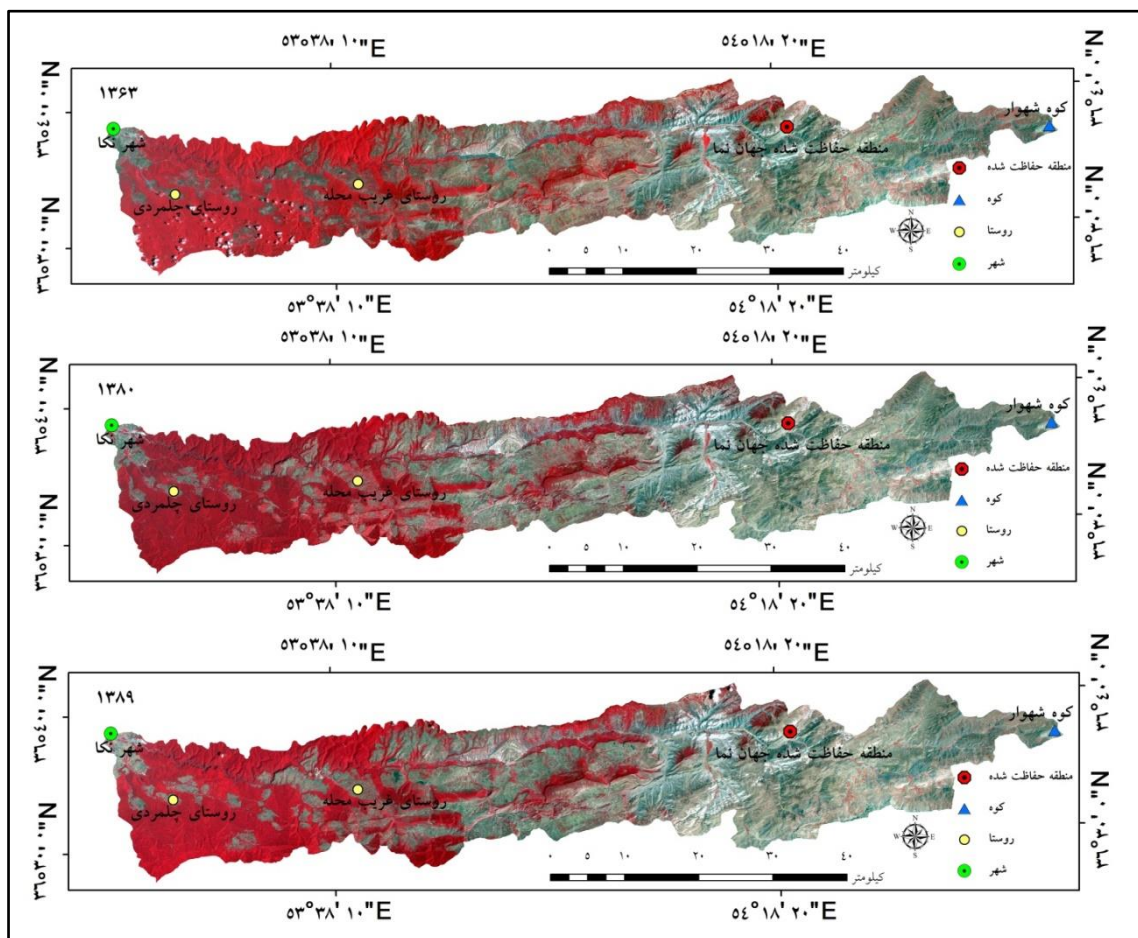
ژئومد، یک مدل تغییر کاربری زمین است که تخصیص مکانی سرزمین را برای انتقال از یک وضعیت (در این پژوهش جنگل) به وضعیتی دیگر (غیرجنگل) شبیه‌سازی می‌کند (پونتیس و همکاران، ۲۰۰۱). این مدل، در اصل به منظور مدل‌سازی کاهش جنگل‌های تروپیکال و تخمین انتشار کربن در اثر جنگل‌زدایی طراحی شد (پونتیس، ۱۹۹۴). مدل برای شبیه‌سازی به ورودی‌های ذیل نیاز دارد: ۱- زمان شروع؛ ۲- زمان پایان؛ ۳- مراحل زمانی برای شبیه‌سازی؛ ۴- نقشه‌ای که موقعیت پوشش سرزمین را در وضعیت ۱ (جنگل) به وضعیت ۲ (غیرجنگل) در زمان شروع نشان دهد؛ و ۵- نقشه شایستگی (پادال و یان، ۲۰۱۲). در این مطالعه، از نقشه‌های پوشش سرزمین حوضه آبخیز نکارود متعلق به سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ به عنوان نقشه‌های واقعیت زمینی استفاده شد. تصاویر ترکیب رنگی کاذب ماهواره لندست منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۶۳-۱۳۸۹ به منظور مقایسه در بافت، شکل و فرم پوشش جنگلی نشان داده شده است (شکل ۲). ژئومد، به منظور پیش‌بینی الگوی تغییرات جنگل برای سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ اجرا شد (زیرا نقشه‌های واقعیت زمینی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ برای مقایسه با خروجی مدل موجود بود). همچنین پس از اطمینان از صحت مدل، پیش‌بینی تغییرات جنگل برای سال ۱۴۰۹ تولید شد. مدل ژئومد، مکان‌هایی را که دارای بیشترین احتمال برای تغییرات پوشش سرزمین در آینده هستند، با استفاده از ۴ قانون تصمیم‌گیری انتخاب می‌کند. اولین قانون تصمیم‌گیری مربوط به پایداری در سرزمین می‌شود. مدل می‌تواند در یک زمان، تغییر یک‌طرفه‌ای نظیر مدل‌های تغییر کاربری دیگر مانند اسلوس را شبیه‌سازی کند؛ به عنوان مثال، اگر کاربر افزایش را در تعداد سلول‌های کاربری‌های توسعه‌یافته (مناطق مسکونی) مشخص کند، مدل تغییرات را از مناطق توسعه‌نیافته به مناطق توسعه‌یافته شبیه‌سازی می‌کند. قانون دوم، مربوط به اشکوب‌بندی منطقه‌ای (نظیر مرز سیاسی شهرها) است بدین صورت که مدل می‌تواند تغییرات را درون یک سری مناطق به نام استراتا<sup>۱</sup> شبیه‌سازی کند.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز نکارود در ایران

قانون سوم، مبنی بر مفهوم نزدیک‌ترین همسایگی است که به موجب آن، ژئومد تغییرات سرزمین را در هر یک از مراحل زمانی به سلول‌هایی که روی حاشیه جنگل و غیرجنگل واقع شده‌اند، منحصر می‌کند. اندازه این پنجره جستجو که کمترین آن ۳\*۳ است، به وسیله کاربر مشخص می‌شود. تعریف حاشیه در هر مرحله زمانی به‌روز می‌شود. قانون چهارم، نقشه شایستگی را در نظر می‌گیرد که پیکسل‌ها با ارزش زیاد شایستگی را برای تبدیل به وضعیت ۲ نشان می‌دهند. ژئومد می‌تواند این نقشه را با استفاده از متغیرها (که معمولاً زمین - فیزیکی هستند) و نقشه پوشش سرزمین در زمان شروع تولید کند و همچنین می‌توان این نقشه را با استفاده از ارزیابی چندمعیاره تولید و به مدل معرفی کرد (پونتیسوس و چن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶؛ اچوریا و همکاران، ۲۰۰۷؛ جیریراج و همکاران، ۲۰۰۸؛ ساکیه و سلمان ماهینی، ۲۰۱۶).

در پژوهش حاضر، از رویه ارزیابی چندمعیاره جهت تولید نقشه شایستگی انتقال از وضعیت جنگل به غیرجنگل استفاده شد. ارزیابی چند معیاره شامل سه رویه اصلی است که عبارتند از: روی هم‌گذاری بولین، ترکیب خطی وزن داده‌شده<sup>۲</sup> و میانگین وزن داده‌شده مرتب. در پژوهش حاضر، از ترکیب خطی وزن داده‌شده برای ترکیب فاکتورها و محدودیت‌ها استفاده شد (شکل ۳). این روش، در فضای استراتژی تصمیم در نقطه میانی خطر و نهایت جبران قرار دارد.



شکل ۲. تصاویر ترکیب رنگی کاذب حوضه آبخیز نکارود طی سال‌های ۱۳۶۳-۱۳۸۹

معیارها در سامانه اطلاعات مکانی با استفاده از توابع عضویت فازی، استانداردسازی شدند. توابع فازی احتمال هر پیکسل متعلق به یک مجموعه فازی را با سنجش سری مجموعه توابع عضویت فازی ارزیابی می‌کنند (ایستمن، ۲۰۰۶؛ معین‌الدینی و همکاران، ۲۰۱۰). استانداردسازی در دامنه ۰ تا ۲۵۵ انجام پذیرفت که ۰ و ۲۵۵، به ترتیب کمترین و بیشترین شایستگی را در هر فاکتور نشان دادند. فاکتورهای فازی شده در مطالعه حاضر عبارتند از: فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از زمین‌های کشاورزی، فاصله از مراتع، فاصله از جاده، ارتفاع و شیب. شکل ۳، نوع و شکل توابع عضویت فازی به کار رفته در پژوهش حاضر را ارائه کرده است؛ به عنوان مثال، پیکسل‌های با فاصله ۵۰ متر از جاده، حداکثر شایستگی را برای تغییر از جنگل به غیرجنگل دارند و سپس تا فاصله ۱۰۰۰ متر شایستگی به صورت خطی کاهش می‌یابد تا به صفر برسد (شکل ۳)؛ همچنین لایه‌های رودخانه، جاده، مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی، بایر، مراتع، منابع آبی، ارتفاع بیش از ۲۵۰۰ متر و شیب‌های بیش از ۵۵٪ به عنوان محدودیت در نظر گرفته شدند.

به منظور وزن‌دهی معیارها، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی یا دو به دو (دویی قضاوت) استفاده شد. در این پژوهش، سه معیار اصلی فیزیوگرافی، کاربری‌های انسان‌ساخت و طبیعی و ۶ زیرمعیار برای وزن‌دهی در نظر گرفته شدند (شکل ۴). اهمیت نسبی بین معیارها و زیرمعیارها با استفاده از نظرات کارشناسان متخصص و ویژگی‌های منطقه به دست آمدند. مقادیر ترجیحات برای مقایسات زوجی در این روش بین ۱ تا ۹ است؛ به طور مثال، یک معیار نسبت به معیار دیگر می‌تواند ارزش کمی بهتر (۳)، بهتر (۵)، و یا کمی ضعیف‌تر (۱/۳)، ضعیف‌تر (۱/۵) و... داشته باشد؛ همچنین می‌تواند ارزش بین این مقادیر (۲، ۴، ۶، ۸) را دارا باشد (جدول ۱) (ساعتی<sup>۱</sup>، ۱۹۷۷).

سازگاری ماتریس قضاوت باید با محاسبه شاخص سازگاری<sup>۲</sup> طبق رابطه<sup>۱</sup> سنجیده شود:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه،  $\lambda_{\max}$ : میزان ویژه اصلی ماتریس قضاوت و  $n$ : ترتیب آن است؛ سپس ضریب سازگاری<sup>۳</sup> از فرمول<sup>۲</sup> محاسبه شد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه ۲}$$

که  $RI$ : شاخص تصادفی است. میزان کمتر از ۰/۱ برای ضریب سازگاری قابل قبول است (آیدی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶).

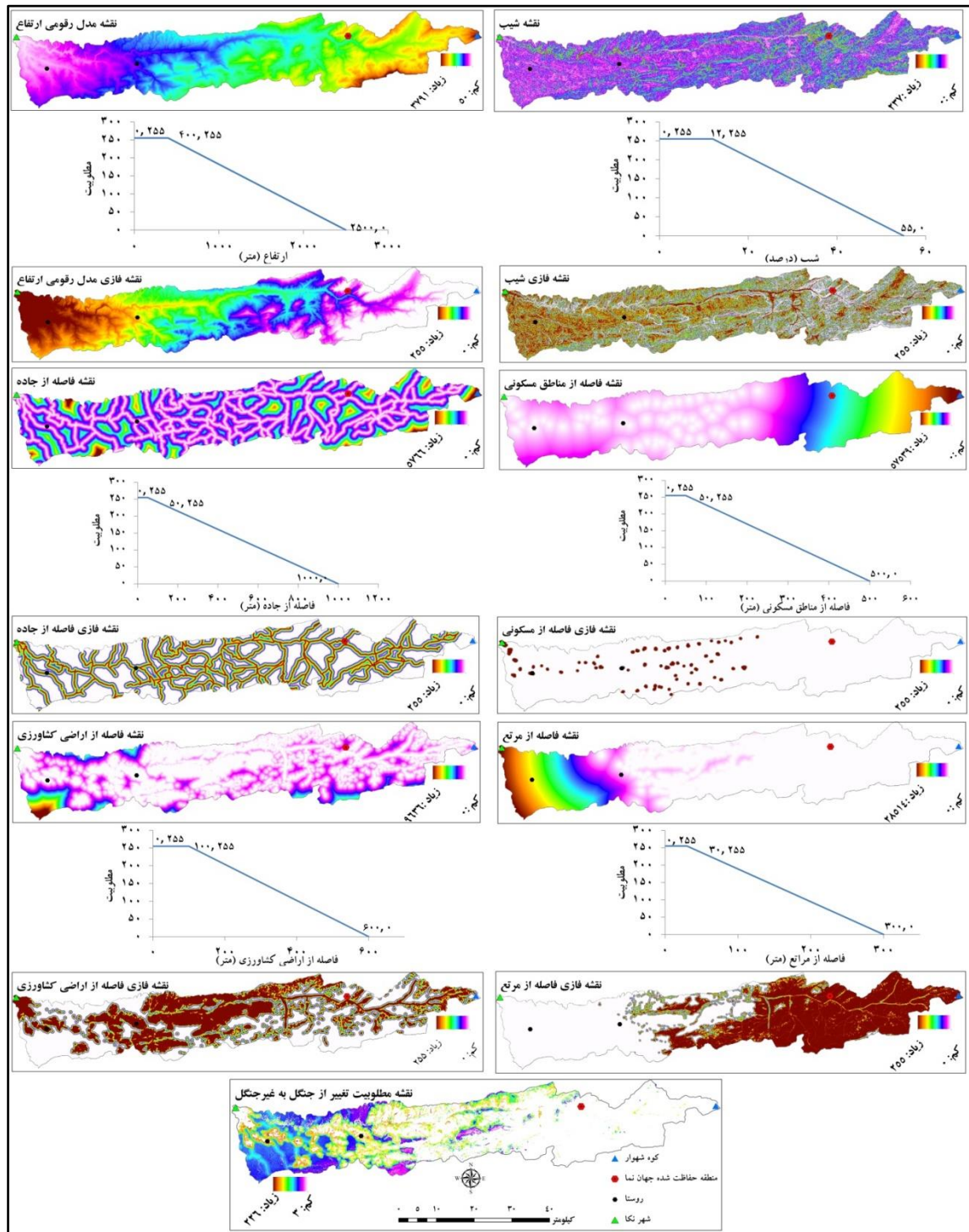
سنجه‌های سیمای سرزمین، الگوی سرزمین را کمی‌سازی کردند و به عنوان ابزاری مفید در توصیف ویژگی‌های متفاوت کارایی مدل‌ها شناسایی شدند (جعفرنژاد و همکاران، ۲۰۱۵). در پژوهش حاضر، ۷ سنجه سیمای سرزمین به منظور ارزیابی مدل با استفاده از فرگستنس<sup>۵</sup> (مک‌گاریگال<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۲) محاسبه شدند (جدول ۲). به منظور کمی‌کردن اختلاف بین سنجه‌های سیمای سرزمین حاصل از تصویر واقعیت زمینی و تصویر پیش‌بینی شده، درصد خطای نسبی محاسبه شد (ساکیه و سلمان ماهینی، ۲۰۱۶).

- 1- Saaty
- 2- Consistency Index
- 3- Consistency Ratio
- 4- Aydi
- 5- Fragstats
- 6- McGarigal



جدول ۱. مقیاس مقایسه در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

۱/۹	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱	۳	۵	۷	۹
کاملاً ضعیف‌تر	خیلی ضعیف‌تر	ضعیف‌تر	کمی ضعیف‌تر	ارزش یکسان	کمی بهتر	بهتر	خیلی بهتر	کاملاً بهتر



شکل ۳. نقشه مطلوبیت تولیدشده از جنگل به غیرجنگل با ارزیابی چندمعیاره به همراه نوع و شکل تابع عضویت فازی زیرمعیارهای استفاده‌شده

جدول ۲. سنجه‌های استفاده‌شده به منظور ارزیابی کارایی مدل (مک‌گاریگال و همکاران، ۲۰۰۲)

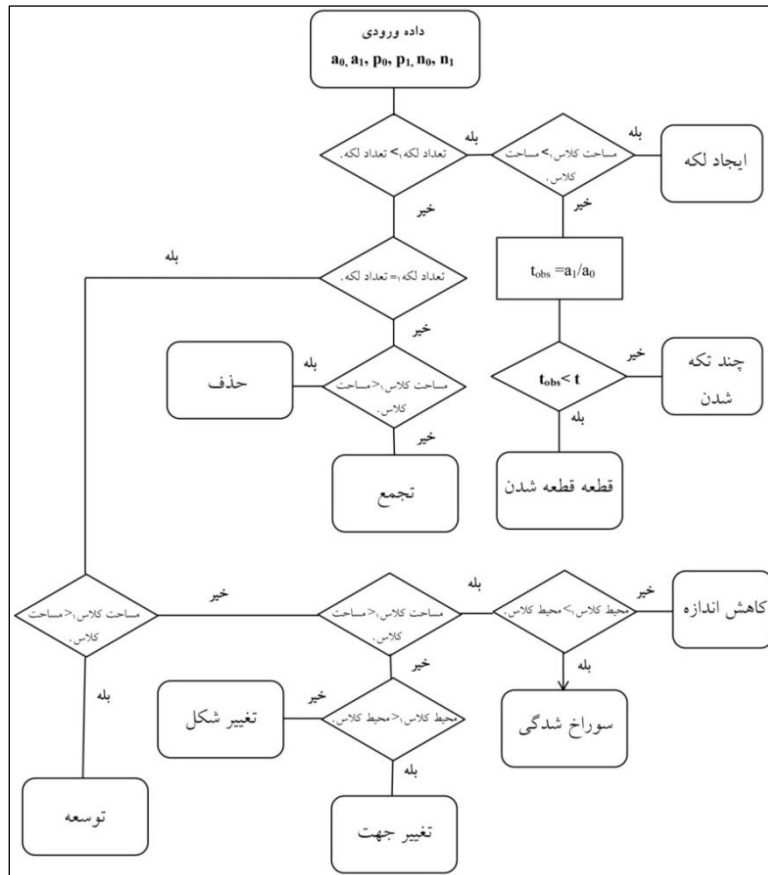
نام فارسی سنجه	توضیح	واحد	فرمول
مساحت کلاس <sup>۱</sup>	مساحت لکه (برحسب متر مربع) تقسیم به ۱۰۰۰ برای تبدیل به هکتار	هکتار	$CA = \sum_{i=1}^n a_{ij} \left( \frac{1}{10000} \right)$
تراکم لکه <sup>۲</sup>	نشان‌دهندی تعداد لکه‌ها در واحد سطح و فراهم‌کردن امکان مقایسه بین مساحت‌های مختلف	تعداد در ۱۰۰ هکتار	$PD = \frac{ni}{A}$
تراکم حاشیه <sup>۳</sup>	بیانگر طول حاشیه در واحد سطح	متر/هکتار	$ED = \frac{\sum_{k=1}^m e_{ik} (10000)}{A}$
شاخص چین‌خوردگی ابعاد <sup>۴</sup>	پیچیدگی اشکال و تکه‌تکه‌شدن لکه‌ها در سیمای سرزمین	ندارد	$FRAC = \frac{2 \ln(25 p_{ij})}{\ln a_{ij}}$
پراکندگی و مجاورت <sup>۵</sup>	اندازه‌گیری متراکم و یا غیرمتراکم‌شدن لکه‌ها	درصد	$IJI = - \frac{\sum_{k=1}^m \left( \frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \ln \left( \frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right)}{\ln(m-1)} (100)$
اندازه سوراخ (مشبک) شدگی <sup>۶</sup>	احتمال ارتباط بین دو نقطه تصادفی در یک کلاس	هکتار	$MESH = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \left( \frac{1}{10000} \right)}{A}$
دایره محدودکننده <sup>۷</sup>	بیانگر شکل دایره‌ای و یا کشیدگی ابعاد لکه‌ها	ندارد	$CIRCLE = 1 - \left[ \frac{a_{ij}}{a_{ij}^s} \right]$

افزون بر سنجه‌های سیمای سرزمین، تجزیه و تحلیل فرایندهای مکانی تغییر سرزمین نیز به منظور ارزیابی کارایی مدل با استفاده از فرایند درخت تصمیم‌گیری در محیط مدل‌ساز تغییر سرزمین محاسبه شدند (شکل ۴). این آنالیز، روشی است مقایسه‌ای بین دو مجموعه داده زمان‌های مختلف که نوع تبدیل را درون هر کلاس پوشش سرزمین بین دو دوره زمانی مختلف محاسبه می‌کند. این فرایندها، روی الگوی تغییرات مکانی تأثیر می‌گذارند و به درک فرایندهای اصلی در منطقه کمک خواهند کرد (بگائرت<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ مانسی<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). این ۱۰ فرایند تغییر عبارتند از: تغییر شکل<sup>۱۰</sup>: شکل و فرم در حال تغییر است؛ تغییر جهت<sup>۱۱</sup>: موقعیت مکانی در حال تغییر است؛ سوراخ‌شدگی<sup>۱۲</sup>: تعداد لکه‌ها ثابت بوده ولی مساحت آنها در حال کاهش است؛ کاهش اندازه<sup>۱۳</sup>: مساحت و محیط در حال کاهش بوده ولی تعداد لکه‌ها ثابت است؛ توسعه<sup>۱۴</sup>: تعداد لکه‌ها ثابت بوده ولی مساحت آنها در حال افزایش است؛ حذف<sup>۱۵</sup>: تعداد و مساحت لکه‌ها در حال کاهش است؛ تجمع<sup>۱۶</sup>: تعداد لکه‌ها در حال کاهش بوده ولی مساحت آنها ثابت باقی مانده یا افزایش می‌یابد؛ ایجاد لکه<sup>۱۷</sup>: تعداد لکه‌ها و مساحت آنها در حال افزایش است؛ چند تکه‌شدن<sup>۱۸</sup>: تعداد لکه‌ها افزایش یافته در حالی که مساحت آنها کاهش می‌یابد؛ قطعه‌قطعه‌شدن<sup>۱۹</sup>: تعداد

- 1- Total Class Area
- 2- Patch Density
- 3- Edge Density
- 4- Mean Fractal Dimension Index
- 5- Interspersion and Juxtaposition Index
- 6- Effective Mesh Size
- 7- Mean Related Circumscribing Circle
- 8- Bogaert
- 9- Munsu
- 10- Deformation
- 11- Shift
- 12- Perforation
- 13- Shrinkage
- 14- Enlargement
- 15- Attrition
- 16- Aggregation
- 17- Creation
- 18- Dissection
- 19- Fragmentation

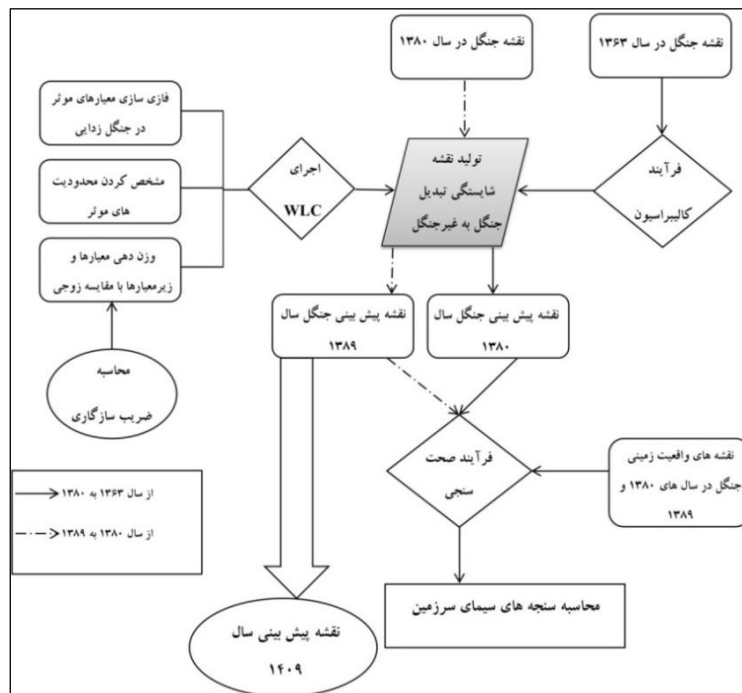


افزایش یافته و مساحت شدیداً کاهش می‌یابد. دیاگرام مراحل انجام پژوهش نیز در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴. درخت تصمیم‌گیری برای فرایندهای تغییر سیمای سرزمین ( $n$  = تعداد لکه‌ها؛  $a$  = مساحت کلاس‌ها،  $p$  = محیط کلاس‌ها،

$0 =$  سال قبلی،  $1 =$  سال بعدی)



شکل ۵. دیاگرام مراحل روش کار

## نتایج

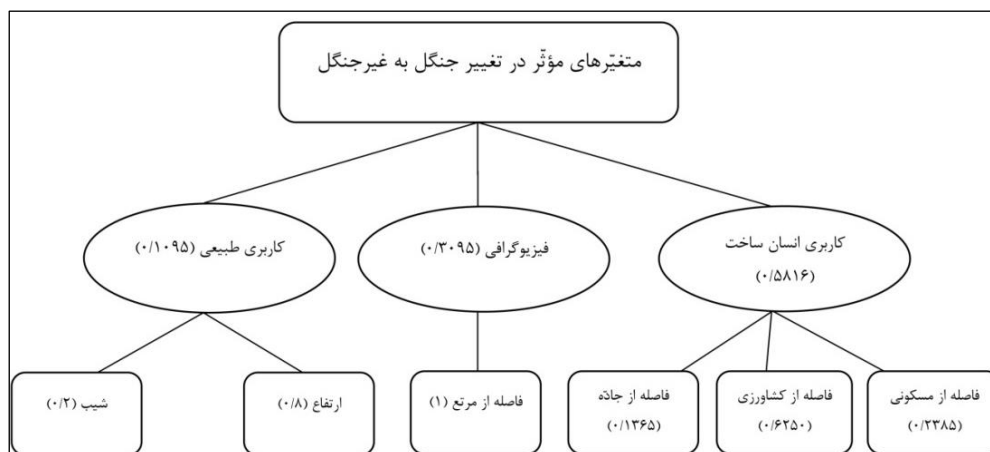
بررسی تغییرات در طبقه جنگل، نشان از کاهش این طبقه به میزان ۳۰۰۰ هکتار (۴/۱٪ مساحت جنگل و ۱/۱۶٪ مساحت کل منطقه) طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۶۳ داشت؛ همچنین این طبقه کاربری از ۶۹۱۶۹ به ۶۷۱۹۸ هکتار (۲/۸٪ مساحت جنگل و ۱/۱٪ مساحت کل منطقه) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ کاهش یافت (جدول ۳). اغلب مناطق کاهش جنگل در اطراف و نزدیک به اراضی کشاورزی اتفاق افتاده است.

معیار کاربری انسان ساخت، بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و در این معیار نیز فاصله از زمین‌های کشاورزی، بالاترین وزن را داشت (شکل ۶). ضریب سازگاری در همه مقایسات قابل قبول بود. نتایج مدل‌سازی برای سال ۱۴۰۹ نشان داد که ۴۲۲۵ هکتار کاهش در این کاربری خواهیم داشت (شکل ۷).

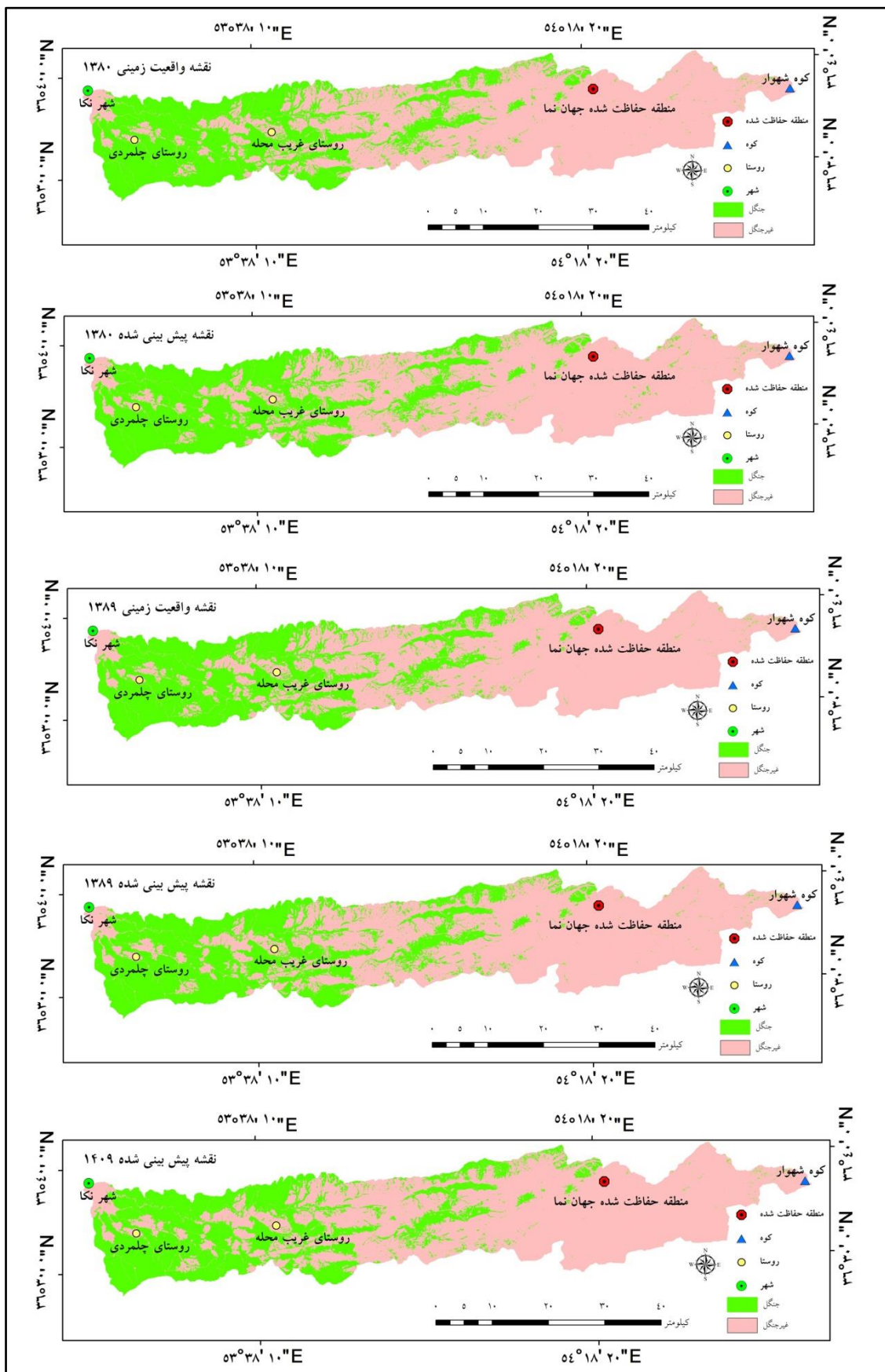
مساحت کاربری جنگل، روند کاهشی را طی دوره زمانی ۱۳۸۹-۱۳۸۰ نشان داد و مدل نیز سازگاری بسیار خوبی بین میزان مساحت‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با درصد خطای نسبی صفر نشان داد (شکل ۸). تصاویر واقعیت زمینی طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۶۳ برای سنجه تراکم لکه در کاربری جنگل روند کاهشی (از ۱/۵ به ۱/۳) را نشان دادند (جدول ۴) که به معنی تجزیه شدن این کلاس، طی زمان مورد مطالعه است. مدل ژنومد نیز توانست این روند کاهشی را برای این سنجه پیش‌بینی کند، البته، در سال ۱۳۸۹، اختلاف بین تصویر مشاهداتی و مدل‌سازی شده بیش از سال ۱۳۸۰ بود و مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی تعداد لکه‌ها نبود. مدل، میزان این سنجه را برای سال ۱۳۸۰ کمتر از واقعیت زمینی (خطای نسبی برابر ۰/۲) و برای سال ۱۳۸۹، بیشتر از مقدار آن در داده‌های واقعی پیش‌بینی کرد (خطای نسبی برابر ۰/۶). بررسی نتایج حاصل از سنجه تراکم حاشیه که شاخص مهمی در تجزیه شدن منطقه است، حاکی از کاهش میزان این سنجه طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۹ (از ۱۴/۷ به ۱۲/۹ متر بر هکتار) در داده‌های واقعیت زمینی است. نتایج مدل نیز روند کاهشی را با سازگاری خوب و خطای نسبی کمتر از ۱ در هر دو سال برای این سنجه نشان داد (جدول ۴).

جدول ۳. مساحت طبقات پوشش سرزمین در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ در حوضه آبخیز نکارود

۱۳۸۹		۱۳۸۰		۱۳۶۳		طبقه پوشش سرزمین
مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	
۳۵/۹	۶۷۱۹۸/۵	۳۷/۰	۶۹۱۶۹/۱	۳۸/۶	۷۲۱۶۸/۸	جنگل
۶۴/۱	۱۱۹۹۱۳/۸	۶۳	۱۱۷۹۴۳/۲	۶۱/۴	۱۱۴۹۴۳/۵	غیر جنگل



شکل ۶. معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در تولید نقشه شایستگی تبدیل جنگل به غیر جنگل به همراه وزن به دست آمده حاصل از مقایسه زوجی



شکل ۷. نقشه‌های واقعیت زمینی در مقایسه با نقشه‌های پیش‌بینی شده با استفاده از ژئومد

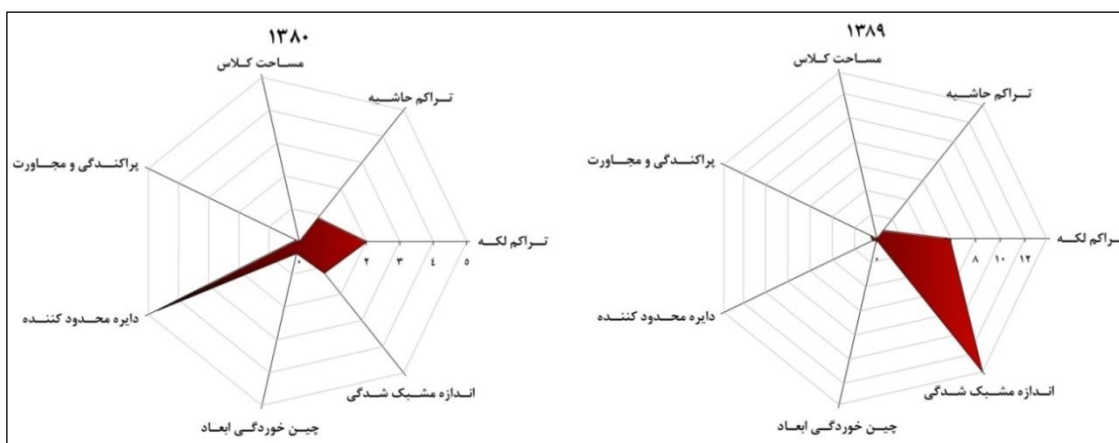
سنجۀ میانگین شاخص چین خوردگی ابعاد، نشان دهنده پیچیدگی شکل لگه‌ها است. چنانچه میزان این سنجه نزدیک به ۱ باشد، به این معنی است که لگه‌ها، شکل ساده و مربعی دارند و با افزایش میزان این سنجه به سمت ۲، شکل‌های با پیچیدگی بیشتر را بیان می‌کند (مک‌گاریگال و همکاران، ۲۰۰۲). با توجه به نتایج این سنجه، کاربری جنگل در منطقه مورد مطالعه ساده‌تر شدن شکل را طی ۲۳ سال نشان داد (جدول ۴) و مدل ژئومد نیز به خوبی این روند کاهش پیچیدگی و دنداندار بودن شکل لگه‌ها را پیش‌بینی کرد، ولی اختلاف بین داده‌های واقعیت زمینی و شبیه‌سازی در سال ۱۳۸۰ (خطای نسبی ۰/۴٪) بیش از ۱۳۸۹ (خطای نسبی ۰/۱٪) بود. در این مطالعه، افزون بر سنجۀ چین خوردگی ابعاد، شاخص میانگین دایره محدودکننده که از نتایج آن برای مقایسه شکل لگه با دایره کامل و کشیدگی ابعاد لگه‌ها استفاده می‌گردد، نیز محاسبه شد (اشنایدلر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). دامنه این سنجه بین ۰ و ۱ است که لگه‌های دایره‌ای، مقدار ۰ دارند و با افزایش میزان این سنجه، کشیدگی لگه‌ها بیشتر می‌شود. داده‌های مشاهداتی برای این سنجه روند کاهش (از ۰/۳۳ به ۰/۳۰) را طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۶۳ نشان دادند که به معنی کشیدگی کمتر لگه‌ها طی دوره مورد مطالعه است. مدل نیز سازگاری خوبی برای این سنجه در سال ۱۳۸۹ نشان داد (میزان خطای نسبی ۰/۴٪) ولی تفاوت در سال ۱۳۸۰ بین تصویر مشاهداتی با پیش‌بینی بیشتر بود (میزان خطای نسبی در سال ۱۳۸۰ برابر ۵٪ به دست آمد).

میزان سنجۀ پراکندگی و مجاورت بین ۰ و ۱۰۰ است و مخلوط شدن انواع متفاوت لگه‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر کم این سنجه، توزیع لگه‌های با حالت کپه‌ای و مقادیر زیاد لگه‌های متفاوت سرزمین را که کاملاً مجاور هم قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. نتایج خروجی مدل برای این سنجه، بسیار با نقشه واقعیت زمینی سازگار بود (شکل ۸). شاخص سوراخ (مشبک) شدگی احتمال ارتباط بین دو نقطه در سیمای سرزمین را که با یک مانع جدا نشده‌اند، مشخص می‌کند و نشان‌دهنده قطع ارتباط کلاس مد نظر است. این شاخص، مبنی بر احتمالی است که دو نقطه انتخابی تصادفی می‌توانند به هم متصل باشند (جعفری و همکاران، ۲۰۱۶). رفتار این سنجه در سال ۱۳۸۰ بسیار مشابه میزان آن در نقشه واقعیت زمینی بود (خطای نسبی برابر ۰/۱٪) ولی در سال ۱۳۸۹، تفاوتی بین میزان این سنجه در دو مجموعه داده مشاهده شد (خطای نسبی برابر ۰/۱۴٪) (شکل ۸).

فرایند تغییر مکانی حذف طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۶۳ به علت کاهش تعداد لگه در واحد سطح (از ۱/۵۰ به ۱/۴۳) و کاهش مساحت (از ۷۲۱۶۸ به ۶۹۱۶۹ هکتار) در داده‌های واقعیت زمینی مشاهده شد؛ همچنین بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ به علت کاهش تعداد و کاهش مساحت فرایند تغییر حذف در حوضه آبخیز نکارود مشاهده شد. نتایج به دست آمده با مدل نیز همین فرایند تغییر را طی دو دوره زمانی نشان داد؛ یعنی بین سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۹ تعداد و مساحت لگه‌های جنگلی در نقشه‌های پیش‌بینی شده با ژئومد در حال کاهش است.

جدول ۴. میزان هر سنجه در نقشه‌های واقعیت زمینی و پیش‌بینی با ژئومد

شبیه‌سازی		واقعیت زمینی			سنجه
۱۳۸۹	۱۳۸۰	۱۳۸۹	۱۳۸۰	۱۳۶۳	
۶۷۱۹۸/۴۹	۶۹۱۶۹/۱۷	۶۷۱۹۸/۵	۶۹۱۶۹/۱	۷۲۱۶۸/۸	مساحت کلاس
۱۲/۸۳	۱۳/۵۹	۱۲/۹۴	۱۳/۴۷	۱۴/۷۶	تراکم حاشیه
۱/۳۸	۱/۴۰	۱/۳۰	۱/۴۳	۱/۵۰	تراکم لگه
۱/۰۲۸	۱/۰۲۲	۱/۰۲۷	۱/۰۲۸	۱/۰۳۲	شاخص چین خوردگی ابعاد
۲۶/۵۰	۲۵/۶۰	۲۶/۳۴	۲۵/۶۳	۲۴/۲۳	پراکندگی و مجاورت
۵۹۳۵/۸۳	۷۱۴۵/۵۴	۶۸۸۲/۱۵	۷۰۶۰/۲۹	۷۶۸۷/۴۴	اندازه سوراخ (مشبک) شدگی
۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۳	دایره محدودکننده



شکل ۸. میزان خطای نسبی برای هر سنجه در دو سال ۱۳۸۹ و ۱۳۸۰. سطح قرمز رنگ، میزان خطای نسبی را به صورت درصد نشان می‌دهد.

### بحث

تگه‌تگه شدن زیستگاه و کاهش جنگل به عنوان تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌ها در سراسر جهان شناخته شدند. این دو فرایند، اثرات منفی روی تنوع زیستی، افزایش جدا افتادگی زیستگاه‌ها، گونه‌های در معرض خطر و پویایی جمعیت گونه‌های اصلاح‌شده دارند. تگه‌تگه شدن می‌تواند اثرات منفی روی غنای گونه‌ها با کاهش احتمال موفقیت پراکنش و کاهش ظرفیت لگه‌های زیستگاه به منظور نگهداری جمعیت مقیم داشته باشد (اچوربا و همکاران، ۲۰۰۶)؛ از طرفی با توجه به غنای بالای تنوع زیستی و اهمیت منحصر به فرد اکوسیستم شکننده جنگل‌های هیرکانی شمال کشور، ضروری است که اطلاعات جامعی از روند و پیش‌بینی تغییرات آنها در آینده به دست آید. یکی از مشکلات، عدم قطعیت در ارزیابی صحت نتایج پیش‌بینی تغییرات کاهش جنگل با استفاده از مدل‌های مختلف است. پژوهشگران، روش‌های مختلفی را برای ارزیابی صحت نتایج مدل‌سازی پیشنهاد کرده‌اند؛ به عنوان مثال، کاماچو اولمدو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، از روی هم‌گذاری نقشه‌ها و آماره‌های موفقیت<sup>۲</sup>، خطا<sup>۳</sup> و هشدار خطا<sup>۴</sup>، به منظور ارزیابی مدل‌سازی استفاده کردند.

موفقیت بدین معنی است که داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی هر دو تغییر کرده‌اند. خطا، یعنی داده‌های مشاهداتی تغییر کرده‌اند، اما پیش‌بینی ثابت است و هشدار خطا یعنی داده‌های مشاهداتی ثابت، اما پیش‌بینی تغییر را نشان دادند. ویولت<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، آماره کاپای شبیه‌سازی را که مشابه آماره کاپا است ولی در عوض یک مدل مناسب‌تر تصادفی از تخصیص تصادفی انتقال‌های کلاس نسبت به نقشه اولیه را به کار می‌برد، به منظور ارزیابی صحت معرفی کردند. پونتیس و همکاران (۲۰۰۸)، شاخص شایستگی را که نسبت اشتراک<sup>۶</sup> تغییرات مشاهداتی و تغییرات پیش‌بینی به اتحاد<sup>۷</sup> تغییرات مشاهداتی و پیش‌بینی است، برای ارزیابی صحت معرفی کردند. ارزیابی پویایی سرزمین با سنج‌های ترکیب و آرایش مکانی سیمای سرزمین به مشخص شدن روند و کمی کردن تغییرات سرزمین طی زمان، کمک شایان توجهی می‌کند (ایمبرنون و برانتوم<sup>۸</sup>، ۲۰۰۱)؛ هرچند مطالعات اندکی، به

1- Camacho Olmedo

2- Hit

3- Miss

4- False Alarm

5- Vliet

6- Intersection

7- Union

8- Imbernon & Branthomme

ارزیابی کارایی مدل سازی تغییرات پوشش سرزمین، با سنج‌های سیمای سرزمین پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر، سنج‌های مساحت کلاس، تراکم حاشیه، میانگین شاخص چین خوردگی ابعاد و شاخص پراکندگی و مجاورت میزان خطای نسبی کمی را گزارش کردند. این بدین معنی است که مدل به خوبی توانسته مساحت، ساده‌تر شدن شکل و مجاورت کاربری جنگل با سایر کاربری‌های منطقه را در هر دو سال ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ پیش‌بینی کند. کاهش سنج‌ تراکم حاشیه در داده‌های واقعیت زمینی و پیش‌بینی‌شده، بیانگر کاهش ناهمگنی مکانی و تبدیل بعضی از لکه‌های جنگل به طبقه غیرجنگل است (مانسی و همکاران، ۲۰۱۰).

میزان خطای نسبی برای هر دو شاخص چین خوردگی، ابعاد و میانگین دایره محدودکننده در سال ۱۳۸۰ بیش از ۱۳۸۹ بود. سنج‌ تراکم لکه میزان خطای نسبی به ترتیب ۲ و ۶٪ برای سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۹ را نشان داد. در حقیقت، مدل به خوبی نتوانست میزان لکه‌ها در واحد سطح را پیش‌بینی کند، اما سازگاری بالای میزان مساحت جنگل در هر دو سال (خطای نسبی صفر)، بدین معنی است که مدل، میزان مساحت و پراکنش بزرگ‌ترین لکه‌ها را به خوبی پیش‌بینی کرده است. مطابق این نتایج نیز در مطالعه ساکیه و سلمان ماهینی (۲۰۱۶)، گزارش شد که سنج‌ تعداد لکه، بیشترین میزان خطای نسبی را نسبت به سایر سنج‌ها نشان داد و مدل، با صحت کمتری موفق به شبیه‌سازی لکه‌های کوچک و پراکنده شهری شده بود؛ اما سازگاری بالایی بین شبیه‌سازی الگوی مکانی بزرگ‌ترین لکه با داده‌های مشاهداتی حاصل شد. سنج‌ سوراخ (مشبک) شدگی نیز اختلاف زیادی در سال ۱۳۸۹ با خطای نسبی ۱۴٪ نشان داد و مدل قادر به پیش‌بینی با صحت بالای احتمال پیوستگی بین دو نقطه انتخابی تصادفی نبوده است. فرایند تغییر سیمای سرزمین حذف برای هر دو دوره مورد مطالعه نشان داده شد و مدل نیز به خوبی همین فرایند تغییر مکانی را برای هر دو دوره نشان داد.

در این پژوهش، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی به منظور مقایسه زوجی اهمیت نسبی بین عناصر سلسله‌مراتبی گروه‌بندی شده معیارهای فیزیوگرافی، کاربری‌های انسان‌ساخت و طبیعی استفاده شد. روش تحلیل سلسله‌مراتبی، یکی از محبوبترین روش‌های مورد استفاده برای به دست آوردن وزن معیارها در تصمیم‌سازی‌های چندمعیاره است (چن<sup>۱</sup> و پونتیسوس، ۲۰۱۱). این روش، یک تکنیک تصمیم‌سازی جهت تجزیه و تحلیل و حمایت چندین تصمیم و مقایسه بین اهداف است که برای انجام این کار، یک مشکل پیچیده به چندین مشکل ساده در فرم سلسله‌مراتب تصمیم تقسیم می‌شود (آیدی و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش حاضر، بیشترین وزن در تخریب جنگل به زیرمعیارهای فاصله از زمین‌های کشاورزی و پس از آن، ارتفاع اختصاص یافت. جورابیان شوشتری و غلامعلی‌فرد (۲۰۱۵) نیز گزارش کردند در حوضه آبخیز نکارود، بیشترین تخریب جنگل در حاشیه زمین‌های کشاورزی به علت دسترسی آسان تر رخ داده است؛ همچنین، عبدالله و ناکاگوشی<sup>۲</sup> (۲۰۰۶)، فعالیت‌های کشاورزی را بیشتر به عنوان متغیر اصلی در پویایی سرزمین معرفی کردند. افزون بر عوامل انسانی، عوامل طبیعی نظیر ارتفاع نیز می‌توانند در میزان تخریب جنگل بسیار مؤثر باشند. مانسی و همکاران (۲۰۱۲)، ارتفاع را به عنوان متغیر مهمی در مدل‌سازی تغییرات جنگل بخش دهرادون<sup>۳</sup> هندوستان گزارش کردند.

منطق فازی شکلی از محاسبات مورد استفاده در محاسبات نرم به منظور حل مشکلات پیچیده است که حل کردن آنها با راه‌حل‌های معمول مشکل است (آیدی و همکاران، ۲۰۱۶). در مقایسه با مقیاس‌گذاری خطی، استانداردهای فازی با استفاده از مجموعه عضویت فازی ارتباط ویژه‌ای را میان فاکتورها، محدودیت‌ها و مجموعه

1- Chen

2- Abdullah &amp; Nakagoshi

3- Dehradun

تصمیم<sup>۱</sup> بیان می‌کند (جیانگ و ایستمن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰). در این مطالعه، ۶ فاکتور با استفاده از منطق فازی‌سازی و ۹ لایه محدودیت در مطالعه جهت تولید نقشه مطلوبیت جنگل‌زدایی در نظر گرفته شد.

### نتیجه‌گیری

در مدل‌سازی تغییرات پوشش سرزمین، سنج‌های سیمای سرزمین منجر به افزایش و بهبود تفسیر و ارزیابی نتایج مدل‌سازی خواهند شد. نوع و تعداد سنج‌های استفاده‌شده در مطالعات مختلف متفاوت است و سنج‌های متفاوت در ارزیابی توصیف ویژگی‌های مختلف مدل مفید و مؤثر شناخته شده‌اند. در پژوهش حاضر، ۷ سنج جهت ارزیابی کارایی مدل برحسب تغییرات الگوی جنگل استفاده شدند. با توجه به نتایج، این سنج‌ها پتانسیل بالاتری برای ارزیابی کارایی مدل با در نظر گرفتن ویژگی‌های شکل، تراکم، تجمع، پراکندگی و مجاورت لکه‌های سرزمین نسبت به روش‌های قدیمی نظیر آماره کاپا دارا هستند. انتخاب سنج‌ها در هر مطالعه بسته به مدل مورد استفاده برای پیش‌بینی تغییرات پوشش سرزمین و نظر پژوهشگران می‌تواند متفاوت باشد. همچنین نتایج مطالعه حاضر نشان داد، فرایندهای مکانی تغییر نیز ابزارهای مفیدی جهت ارزیابی کارایی مدل هستند؛ همچنین پیشنهاد می‌شود جهت انتخاب مدل مناسب‌تر برای پیش‌بینی تغییر پوشش سرزمین در حوضه آبخیز نکارود نتایج مدل ژئومد با مدل‌های تغییر پوشش سرزمین دیگری نظیر مدل‌ساز تغییر سرزمین با استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین مقایسه گردد.

### سپاسگزاری

نگارش حاضر بخشی از نتایج رساله دکتری نویسنده اول است. بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی از دانشگاه ملایر به دلیل حمایت مالی و فراهم کردن زمینه و بستر لازم برای انجام این پژوهش ابراز می‌گردد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از مرکز تحقیقات ملی کشور اسپانیا<sup>۳</sup> به خاطر پذیرش نویسنده اول به عنوان محقق مهمان، همچنین وزارت علوم، تحقیقات و فناوری به خاطر حمایت‌های مالی طی این دوره، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

### منابع

گلدوی، سمیه (۱۳۹۰) مقایسه عملکرد روش‌های رگرسیون لجستیک و Geomod جهت مدل‌سازی تغییرات کاربری زمین و پوشش گیاهی و بررسی اثرات تغییرات بر آب‌های سطحی (مطالعه موردی: منطقه گرگان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: مرجان محمدزاده، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده شیلات و محیط زیست.

مراتی‌فر، مهدی (۱۳۹۳) اعتبارسنجی مدل‌های CA-Markov و GEOMOD برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه حفاظت‌شده بیجار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: جمیل امان‌الهی، شهرام کبودوندپور، دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی.

Abdullah, S. A., Nakagoshi, N. (2006) Changes in Landscape Spatial Pattern in the Highly Developing State of Selangor, peninsular Malaysia, **Landscape and Urban Planning**, 77 (3), pp. 263-275.

Apan, A. A., Raine, S. R., Paterson, M. S. (2002) Mapping and Analysis of Changes in the Riparian Landscape Structure of the Lockyer Valley Catchment, Queensland, Australia, **Landscape and Urban Planning**, 59 (1), pp. 43-57.



- Aydi, A., Abichou, T., Nasr, I. H., Louati, M., Zairi, M. (2016) Assessment of Land Suitability for Olive Mill Wastewater Disposal Site Selection by Integrating Fuzzy Logic, AHP, and WLC in a GIS, **Environmental Monitoring and Assessment**, 188: 59.
- Bogaert, J., Ceulemans, R., Eysenrode, D. S. (2004) Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes in Landscape Transformation, **Environmental Management**, 33 (1), pp. 62-73.
- Camacho Olmedo, M. T., Pontius Jr. R. J., Paegelow, M., Mas, J. F. (2015) Comparison of Simulation Models in Terms of Quantity and Allocation of Land Change, **Environmental Modelling & Software**, 69, pp. 214-221.
- Chen, H., Pontius Jr. R. G. (2011) Sensitivity of a Land Change Model to Pixel Resolution and Precision of the Independent Variable, **Environmental modeling & Assessment**, 16 (1), pp. 37-52.
- Dezhkam, S., Jabbarian Amiri, B., Darvishsefat, A. A., Sakieh, Y. (2017) Performance Evaluation of Land Change Simulation Models Using Landscape Metrics, **Geocarto International**, 32 (6), pp. 655-677.
- Eastman, J. R. (2006) **IDRISI Andes**, Clark University, Worcester, MA.
- Echeverria, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., Newton, A. (2006) Rapid Deforestation and Fragmentation of Chilean Temperate Forests, **Biological Conservation**, 130 (4), pp. 481-494.
- Echeverria, C., Coomes, D. A., Hall, M., Newton, A. C. (2007) Spatially Explicit Models to Analyze Forest Loss and Fragmentation between 1976 and 2020 in Southern Chile, **Ecological Modeling**, 212 (3-4), pp. 439-449.
- Ghanbarpour, M. R., Mohseni Saravi, H., Salimi, S. (2014) Floodplain Inundation Analysis Combined with Contingent Valuation: Implications for Sustainable Flood Risk Management, **Water Resources Management**, 28 (9), pp. 2491-2505.
- Giriraj, A., Irfan-Ullah, M., Murthy, M. S., Beierkuhnlein, C. (2008) Modelling Spatial and Temporal Forest Cover Change Patterns (1973-2020): A Case Study from South Western Ghats (India), **Sensors**, 8 (10), pp. 6132-6153.
- Guan, D., Li, H. F., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., Hokao, K. (2011) Modeling urban land use change by integration of cellular automata and Markov model, **Ecological Modeling**, 222 (20-22), pp. 3761-3772.
- Hall, C. A. S. (Ed.), (2000) **Quantifying sustainable development: the future of tropical economies**, Academic Press, San Diego, CA.
- Herold, M., Couclelis, H., Clarke, K. C. (2005) The Role of Spatial Metrics in the Analysis and Modeling of Urban Land use Change, **Computers, Environment and Urban Systems**, 29 (4), pp. 369-399.
- Herold, M., Scepan, J., Clarke, K. (2002) The Use of Remote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses, **Environment and Planning**, 34 (8), pp. 1443-1458.
- Imbernon, J., Branthomme, A. (2001) Characterization of Landscape Patterns of Deforestation in Tropical Rain Forests, **International Journal of Remote Sensing**, 22 (9), pp. 1753-1765.
- Jaafari, S., Sakieh, Y., Alizadeh Shabani, A., Danehkar, A., Nazarisamani, A. (2016) Landscape Change Assessment of Reservation Areas Using Remote Sensing and Landscape Metrics (Case Study: Jajroud Reservation, Iran), **Environment, Development and Sustainability**, 18 (6), pp. 1701-1717.
- Jafarnejhad, J., Salmanmahiny, A., Sakieh, Y. (2015) Subjectivity Versus Objectivity: Comparative Study between Brute Force Method and Genetic Algorithm for Calibrating the SLEUTH Urban Growth Model, **Urban Planning and Development**, 142 (3), pp. 1-13.
- Jiang, H., Eastman, J. R. (2000) Application of Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation in GIS, **International Journal of Geographical Information Science**, 14 (2), pp. 173-184.
- Joorabian Shooshtari, S., Gholamalifard, M. (2015) Scenario-Based Land Cover Change Modeling and its Implications for Landscape Pattern Analysis in the Neka Watershed, Iran, **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 1, pp. 1-19.

- Joorabian Shooshtari, S., Hosseini, S. M., Esmaili-Sari, A., Gholamalifard, M. (2012) Monitoring Land Cover Change, Degradation, and Restoration of the Hyrcanian Forests in Northern Iran (1977-2010), **International Journal of Environmental Sciences**, 3 (3), pp. 1038-1056.
- Kim, O. S. (2010) An Assessment of Deforestation Models for Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD), **Transaction of GIS**, 14 (5), pp. 631-654.
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel M. C., Ene, E. (2002) **FRAGSTATSv3: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps**. Computer Software Program Produced by the Authors at the University of Massachusetts, Amherst, Available at the Following Website: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- Memon, S., Bawa, K. (1997) Application of Geographic Information Systems, Remote Sensing, and a Landscape Ecology Approach to Biodiversity Conservation in the Western Ghats, **Current Science**, 73 (2), pp. 134-145.
- Moeinaddini, M., Khorasani, N., Danehkar, A., Darvishsefat, A. A., Zienalyan, M. (2010) Siting MSW Landfill Using Weighted Linear Combination and Analytical Hierarchy Process (AHP) Methodology in GIS Environment (Case Study: Karaj), **Waste Management**, 30 (5), pp. 912-920.
- Munsi, M., Areendran, G., Ghosh, A., Joshi, P. K. (2010) Landscape Characterisation of the Forests of Himalayan Foothills, **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 38 (3), pp. 441-452.
- Munsi, M., Areendran, G., Loshi, P. K. (2012) Modeling Spatio-Temporal Change Patterns of Forest Cover: A Case Study from the Himalayan Foothills (India), **Regional Environmental Change**, 12 (3), pp. 619-632.
- Paudel, S., Yuan, F. (2012) Assessing Landscape Changes and Dynamics Using Patch Analysis and GIS Modeling, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 16, pp. 66-76.
- Pontius Jr. R. G. (2002) Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions, **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 68 (10), pp. 1041-1049.
- Pontius Jr. R. G., Boersma, W., Castella, J. C., Clarke, K., de Nijs, T., Dietzel, C., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C. D., McConnell, W., Pijanowski, B., Pithadia, S., Sood, A. M., Sweeney, S., Trung, T. N., Veldkamp, A. T., Verburg, P. H. (2008) Comparing the Input, Output, and Validation Maps for Several Models of Land Change, **Annals of Regional Science**, 42 (1), pp. 11-47.
- Pontius Jr. R. G., Chen, H. (2006) **Land Change Modeling with GEOMOD**, Clark University.
- Pontius Jr. R. G., Cornell, J., Hall, C. A. S. (2001) Modeling the Spatial Pattern of Land-Use Change with GEOMOD2: Application and Validation for Costa Rica, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 85 (1-3), pp. 191-203.
- Pontius Jr. R. G., Malanson, J. (2005) Comparison of the structure and accuracy of two land change models, **International Journal of Geographical Information Science**, 19 (2), pp. 243-265.
- Pontius Jr. R. G., Neeti, N. (2010) Uncertainty in the difference between maps of future land change scenarios, **Sustainability Science**, 5, pp. 39-50.
- Pontius, J. R. R. G. (1994) **Modeling Tropical Land Use Change and Assessing Policies to Reduce Carbon Dioxide release from Africa**. Graduate Program in Environmental Science, Syracuse: SUNY-ESF, 177 p.
- Saaty, T. L. (1977) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, **Mathematical Psychology**, 15 (3), pp. 234-281.
- Sakieh, Y., Salmanmahiny, A. (2016) Performance Assessment of Geospatial Simulation Models of Land-Use Change—A Landscape Metric-Based Approach, **Environmental Monitoring and Assessment**, 188: 169, pp. 1-16.
- Schindler, S., Poirazidis, K., Wrba, T. (2008) Towards a Core Set of Landscape Metrics for Biodiversity Assessments: A Case Study from Dardia National Park, Greece, **Ecological Indicators**, 8 (5), pp. 502-514.
- Schneider, L. C., Pontius Jr. R. G. (2001) Modeling Land-Use Change in the Ipswich Watershed, Massachusetts, USA, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 85 (1-3), pp. 83-94.

- Soares-Filho, B. S., Goutinho Cerqueira, G., Lopes Pennachin, C. (2002) DINAMICA—a Stochastic Cellular Automata Model Designed to Simulate the Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier, **Ecological Modelling**, 154 (3), pp. 217-235.
- Tchir, T. L., Johnson, E. A., Miyanishi, K. (2004) A Model of Fragmentation in the Canadian Boreal Forest, **Canadian Journal of Forest Research**, 34 (11), pp. 2248-2262.
- Tian, G., Ouyang, Y., Quan, Q., Wu, J. (2011) Simulating Spatiotemporal Dynamics of Urbanization with Multi-Agent Systems—A Case Study of the Phoenix Metropolitan Region, USA, **Ecological Modelling**, 222 (5), pp. 1129-1138.
- Verburg, P. H., DeKoning, G. H. J., Kok, K., Veldkamp, A., Bouma, J. (1999) A Spatial Explicit Location Procedure for Modeling the Pattern of Land Use Change Based on Actual Land Use, **Ecological Modelling**, 116 (1), pp. 45-61.
- Vliet, J. V., Bregt, A. K., Hagen-Zanker, A. (2011) Revisiting Kappa to Account for Change in the Accuracy Assessment of Land-Use Change Models, **Ecological Modelling**, 222 (8), pp. 1367-1375.
- Wu, X., Hu, Y., He, H., Bu, R., Onsted, J., Xi, F. (2009) Performance Evaluation of the SLEUTH Model in the Shenyang Metropolitan Area of Northeastern China, **Environmental Modeling and Assessment**, 14 (2), pp. 221-230.