فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷

۱۱۱-۱۳۲

مدل‌سازی سناریویی برای پیش‌بینی تغییرات آتی پوشش/کاربری زمین با استفاده از نرم‌افزار (InVEST) بررسی موردی: سیمای سرزمین جنگلی دوهزار و سه‌هزار

اردوان زرندیان[۱]*، رویا موسی‌زاده[۲]، جلیل بادام فیروز[۲] و علیرضا رحمتی[۱]

[۱] گروه ارزیابی و مخاطرات محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

[۲] گروه اقتصاد محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶

زرندیان، ا.، ر. موسی‌زاده، ج. بادام فیروز و ع. رحمتی. ۱۳۹۷. مدل‌سازی سناریویی برای پیش‌بینی تغییرات آتی پوشش/کاربری زمین با استفاده از نرم‌افزار (InVEST). فصلنامه علوم محیطی. ۱۶ (۲): ۱۳۲-۱۱۱.

سابقه و هدف: تغییرات در پوشش/کاربری زمین با عوامل اقتصادی-اجتماعی و فیزیکی-محیطی متعددی در ارتباط است. با توجه به تعدد و تنوع متغیرهای دخیل و همچنین گوناگونی محرکه‌هایی که موجب بروز تغییرات پوشش/کاربری زمین می‌شوند، پیش‌بینی شرایط آتی آن، پیچیده و با عدم‌قطعیت‌های زیادی مواجه است. این در حالی است که برنامه‌ریزان محیط زیست و توسعه، باید به‌طور شفافی در نظر بگیرند که چگونه تصمیمات امروزشان ممکن است به آینده سرزمین شکل بدهد. ازاین‌رو، در فرایند سیاست‌گذاری و طرح‌ریزی، همواره این سؤال مطرح است که چگونه می‌توان تغییرات پوشش/کاربری زمین را در زمان آینده پیش‌بینی کرد؟ در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های حاصل‌شده در دانش سنجش از دور و تولید داده‌های فضایی تولیدشده از تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از این داده‌ها در فرایندهای در حال تکامل مدل‌سازی، امکان شبیه‌سازی نظام‌های پیچیده طبیعی و ساده‌سازی آنها با تأکید بر متغیرهای مهم‌تر، فراهم شده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با انتخاب یک سیمای سرزمینی پایلوت از منطقه رویشی هیرکانی در استان مازندران، ضمن بررسی روند گذشته تا حال تغییرات پوشش/کاربری در دوره زمانی ۹۵-۱۳۶۳، شرایط آینده سیمای سرزمین در افق زمانی ۱۴۲۷ بر اساس روش مدل‌سازی سناریویی با استفاده از مدل نرم‌افزاری (InVEST) پیش‌بینی و تحلیل شد. برای انجام فرایند مدل‌سازی در این تحقیق دو سناریوی محتمل آتی با عنوان‌های «ادامه روند موجود» به مفهوم عدم دخالت مدیریتی و تداوم تغییرات جاری پوشش/کاربری تا افق آتی موردنظر و «توسعه متوازن» به مفهوم مداخله دولت از طریق حفاظت و احیاء پوشش جنگلی همراه با اجرای برنامه کنترلی توسعه سکونتگاه‌های انسانی برای متوقف کردن روند جاری تغییرات پوشش/کاربری تعریف شد و سپس با تهیه داده‌های ورودی موردنیاز مدل، شرایط آینده سیمای سرزمین تحت هر یک از دو سناریوی مذکور شبیه‌سازی و مقایسه شد.

*Corresponding Author. *E-mail Address*: azarandian@rcesd.ac.ir

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که در صورت تحقق سناریوی ادامه وضع موجود، تغییرات شدیدی در ساختار سیمای سرزمین مورد بررسی روی خواهد داد که درمجموع به ائتلاف چشمگیر پوشش طبیعی جنگل و از بین رفتن زمین‌های زراعی و جایگزینی آنها با بافت سکونتگاهی منجر خواهد شد. برعکس، سناریوی توسعه متوازن، نشان داد که چگونه مدیریت زمین از طریق اجرای سیاست‌های حفاظت و احیاء جنگل و تعدیل تبدیل زمین برای توسعه سکونتگاه‌ها می‌تواند به یک راهبرد برد-برد برای توسعه متعادل آن مبدل شود. در این صورت، اجرای همزمان سیاست‌های احیاء جنگل و توسعه کنترل‌شده سکونتگاه‌ها، علاوه بر حفظ یکپارچگی ساختاری سیمای سرزمین مورد بررسی، شرایط را برای ارتقا شرایط فعلی پوشش جنگلی نیز مهیا کرد. در این پژوهش همچنین مدل سناریوسازی (InVEST) با برخی از مدل‌های دیگر که برای شبیه‌سازی پوشش/کاربری مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مقایسه شد و مزیت ها و محدودیت‌های آن مورد بحث قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: شبیه‌سازی سناریویی با روشی که در این پژوهش معرفی شد، می‌تواند در بررسی‌های گوناگون ازجمله انواع ارزیابی‌های محیط زیستی، ارزش‌گذاری اقتصادی و نظایر آن به کار گرفته شود تا نتیجه پیش‌بینی‌های آتی را دقیق‌تر کند. ضمن آنکه این نوع مدل‌سازی می‌تواند راهنمایی برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران توسعه، محیط زیست و برنامه‌ریزی کاربری زمین باشد تا برنامه‌ریزی‌های آتی مبتنی برفرض‌های منطقی و با عدم قطعیت کمتری انجام پذیرد.

واژه‌های کلیدی: پوشش/کاربری زمین، مدل‌سازی، (InVEST)، منطقه جنگلی دوهزار و سه هزار.

مقدمه

تغییرات ساختاری پوشش/کاربری زمین در طول زمان توسط انسان و به دلیل نیاز به تولید غذا، ایجاد سرپناه و توسعه اقتصادی/صنعتی، یکی از محرکه‌های اصلی تغییر در شرایط طبیعی یک سرزمین و کارکردهای اکوسیستمی آن محسوب می‌شود. پوشش زمین شامل کلیه عوارض طبیعی و کاربری‌ها شامل کلیه عوارضی است که توسط انسان ایجاد شده باشد. به‌عنوان مثال، تبدیل پوشش طبیعی سرزمین‌های جنگلی از درخت‌زار به سکونتگاه‌های انسانی، مزارع کشاورزی، جاده، باغ و سایر کاربری‌های انسان-ساخت، دارای اثرات مستقیم و غیرمستقیم زیادی بر شرایط طبیعی و کارکردهای اکولوژیکی بالادست و پایین‌دست جنگل، مانند تغییر در کمیت و کیفیت آب، تغییر در جریان رودخانه‌ها، وضعیت اقلیمی، کیفیت زیستگاهی و نظایر آن است (Paudyal *et al*., 2017; Tolessa *et al*., 2017). از این‌رو، با افزایش تقاضا برای تبدیل زمین و بروز تغییرات ساختاری در سرزمین که همراه با نقصان در کیفیت اکوسیستم‌های طبیعی است، تمرکز تحقیقاتی فزاینده‌ای بر روی این موضوع مهم به وجود آمده است (Bélair *et al*., 2010; Power, 2010)، به‌طوری‌که در حال حاضر کاربری زمین و تغییرات آن یک موضوع مهم جهانی محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های حاصل‌شده در دانش سنجش از دور و تولید داده‌های فضایی تولیدشده از تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از این داده‌ها در فرایندهای در حال تکامل مدل‌سازی، امکان شبیه‌سازی نظام‌های پیچیده طبیعی و ساده‌سازی آنها با تأکید بر متغیرهای مهم‌تر که در یک تحقیق مدنظر هستند، فراهم شده است. یکی از روش‌های در حال تکامل که با هدف تصویرسازی از رویدادهای توأم با عدم قطعیت آتی ابداع شده و اخیراً به یکی از مهم‌ترین بخش‌های ارزیابی‌های یکپارچه محیط زیستی ازجمله ارزیابی‌هایی که توسط پانل بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) و ارزیابی زیست‌بوم هزاره مبدل شده، روش مدل‌سازی سناریویی است (Pickard *et al*., 2017; Zarandian *et al*., 2017). مدل‌سازی سناریویی درواقع یک نگاه به آینده تحت یک روش سامانمند است. سناریوها توصیفاتی برای تجسم رویدادها و شرحی از آینده محتمل هستند و بینشی را درباره زمان آتی ایجاد می‌کنند. هدف برنامه‌ریزی سناریویی این است که انواعی از آینده‌های ممکن را که بازتاب‌دهنده عدم‌قطعیت‌های مهم است، به‌جای تمرکز بر یک پیش‌بینی دقیق درباره یک برون‌داد انفرادی در نظر بگیرد (Van der Heijden, 2011). در پژوهشی در کشور برزیل، از قابلیت‌های مدل

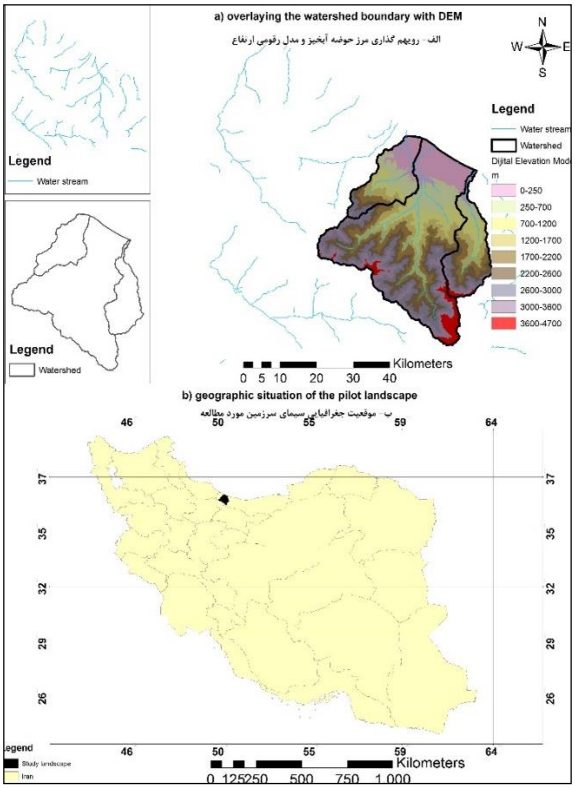
هیدرولوژیک[1](SWAT) برای شبیه‌سازی اثرات تغییر در کاربری زمین بر فرایندهای مربوط به جریان‌های آبی و رسوب‌گذاری استفاده شده است (Blainski *et al*., 2017). در پژوهشی دیگر که اخیراً در پاکستان انجام شده است (Samie *et al*., 2017)، الگوهای تغییرات آتی کاربری زمین در استان پنجاب این کشور، تحت سه سناریوی ادامه وضع موجود، رشد سریع اقتصادی و سناریوی توسعه‌ای مبتنی بر پایداری محیط زیستی و با استفاده از مدل DLS [2]، برای سال ۲۰۳۰ و در پاسخ به محرکه‌های تغییر موجود، شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از این پژوهش به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار کاربری زمین در استان مذکور قرار گرفته است. در کره جنوبی پژوهشی انجام شده است (Han *et al*., 2015) که آینده کاربری زمین را در مقیاس حوضه آبریز با استفاده از مدل تخصیص فضایی (SLEUTH) (Jantz et al., 2010) و مبتنی بر سناریوهای تغییر اقلیم (IPCC) شبیه‌سازی کرده است. نتایج این پژوهش نشان داد که تفاوت‌های اساسی در تقاضا و الگوهای تبدیل زمین تحت سناریوهای مختلف وجود خواهد داشت که می‌تواند به الگوهای توسعه‌ای متراکم تا پراکنده منجر شود. در ایران، اگرچه بررسی‌های فراوانی برای تحلیل تغییرات پوشش/کاربری در مناطق مختلف کشور انجام شده است، اما دوره زمانی انجام این بررسی‌ها عمدتاً متمرکز به اتفاقات رخداده از زمان گذشته تا حال است و بررسی‌های انگشت‌شماری وجود دارند که از روش‌های مدل‌سازی برای پیش‌بینی شرایط آینده پوشش/کاربری زمین استفاده کرده باشند. به‌عنوان مثال، اسکندری در سال ۱۳۹۲، کار مدل‌سازی تغییر کاربری اراضی برای دوره ۲۶ ساله آینده را با استفاده از نرم‌افزار (CLUE-S) با هدف کاربرد آن در برنامه‌ریزی منطقه‌ای در استان گلستان انجام داده است (Eskandari, 2014). بر اساس نتایج این پژوهش، در تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده، مساحت اراضی جنگلی کاسته و به مساحت کاربری‌های شهر و روستا، کشاورزی و مرتع افزوده خواهد شد. در پژوهش دیگری که توسط آذین‌مهر و دیگران انجام شده است (Azinmehr *et al*., 2013) از مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی (WetSpa) برای بررسی تغییرات کاربری زمین و برآورد کمیت تغییرات و سنجش اثرات آن روی هیدروگراف خروجی حوضه آبریز دینور در استان کرمانشاه استفاده شده است. در این پژوهش، تلاش شده است با استفاده از مدل سناریوسازی (InVEST)[3] وضعیت آتی سیمای سرزمین جنگلی دوهزار و سه‌هزار به‌عنوان سیمای سرزمین پایلوت از منطقه رویشی هیرکانی واقع در استان مازندران شبیه‌سازی شد. این مدل نخستین‌بار به‌عنوان یک ابزار پشتیبان توسط پروژه جهانی سرمایه طبیعی[4] (www.naturalcapitalproject.org) که با همکاری دانشگاه‌های استنفورد و مینسوتای ایالات‌متحده آمریکا، صندوق جهانی حیات‌وحش (WWF) و اتحادیه حفاظت طبیعت (IUCN) و چندین شریک بین‌المللی دیگر در حال اجراست، معرفی شد. درواقع سری مدل‌های (InVEST) خروجی کلیدی پروژه مذکور است و اخیراً در گستره جهانی در حال کاربرد و اعتبارسنجی است. این مدل‌ها می‌توانند برای تحلیل اثرات کاربری‌های مختلف زمین و سناریوهای مدیریتی بر روی تولید و تدارک خدمات اکوسیستمی مختلف و زیستگاه‌های واجد تنوع زیستی مورد استفاده قرار گیرند (Polasky *et al*., 2011). رویکرد چندمقیاسی (قابلیت اجرا در مقیاس‌های خرد تا کلان اکوسیستمی، آبخیزی و...)، تفکیک فضایی انعطاف‌پذیر، ترکیبی از مدل‌های بیوفیزیکی و اقتصادی-اجتماعی، امکان مدل‌سازی سناریویی و به‌روزرسانی مستمر این مدل، جزو ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که آن را از سایر مدل‌ها متمایز کرده است.

مواد و روش‌ها

مرزبندی سیمای سرزمین مورد بررسی

محدوده مورد بررسی این تحقیق بخشی از منطقه رویشی جنگل هیرکانی در شمال ایران به نام دوهزار و

سه‌هزار است. ابتدا به‌منظور تعریف مقیاس فضایی مناسب برای انجام مدل‌سازی تغییرات پوشش/کاربری، یک واحد سیمای سرزمین پایلوت تعریف شد که از این به بعد به‌عنوان سیمای سرزمین جنگلی دوهزار و سه‌هزار نامیده می‌شود. تعریف واحد سیمای سرزمین از آن رو بود که سیمای سرزمین، حضور توأمان پوشش‌های طبیعی زمین و کاربری‌های انسان-ساخت، امکان بررسی فشارهای ناشی از محرکه‌های انسانی مانند تغییرات کاربری را بر شرایط اکولوژیکی به نحو ملموس‌تری فراهم می‌سازد. (Baral *et al*., 2013, Baral *et al*., 2014a, Baral *et al*., 2014b, Burkhard *et al*., 2009, Cordingley *et al*., 2016, Iverson *et al*., 2014, Jackson *et al*., 2013). ضمن آنکه منطقه موردنظر طی سال‌های اخیر به‌طور ملموس و چشمگیری با تغییرات پوشش/کاربری از طریق تبدیل زمین‌های جنگلی و زراعی به سکونتگاه‌های انسانی مواجه بوده است. تعریف مرز سیمای سرزمین پایلوت با در نظر گرفتن پارامترهای محیطی چون ارتفاع، وجود آبراهه‌های اصلی و نوع پوشش درختی جنگلی از طریق روی‌هم‌گذاری نقشه مرز حوضه آبخیز و مدل رقومی ارتفاع و استخراج واحدهای هیدرولوژیک در محیط نرم‌افزار (Arc GIS) انجام شد. در نهایت با در نظر گرفتن خطالراس آبراهه‌های اصلی موجود در حوضه آبخیز، سیمای سرزمین پایلوت به‌صورتی تعریف شد که هم دربرگیرنده زمین‌های مرتفع جنگلی در بالادست به‌عنوان اجزای طبیعی سیمای سرزمین و هم جلگه‌های سیلابی پایین‌دست که عمدتاً محل استقرار سکونتگاه‌های انسانی و سایر کاربری‌های انسان‌ساخت است، باشد. شکل ۱ فرایند مرزبندی سیمای سرزمین و موقعیت جغرافیایی سیمای سرزمین جنگلی دوهزار و سه‌هزار را در شمال ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱- سیمای سرزمین مورد بررسی. (الف) روی‌هم‌گذاری مرز حوضه آبخیز و مدل رقومی ارتفاع. (ب) موقعیت جغرافیایی سیمای سرزمین مورد بررسی در استان مازندران در شمال ایران.

Fig. 1- Landscape unit under study (a) overlaying the boundary map of the study area with DEM and (b) geographic situation of the pilot landscape unit in Mazandaran Province, northern Iran

تهیه نقشه‌های پایه پوشش/کاربری زمین

به‌منظور تعیین روند تغییرات ساختاری سرزمین از گذشته تا حال، تهیه نقشه پوشش/کاربری سیمای سرزمین مورد بررسی به‌عنوان یکی از اولین داده‌های موردنیاز برای دو دوره زمانی پایه (سال ۱۹۸۴) و جاری (سال ۲۰۱۶)، در دستور کار قرار گرفت. برای تولید نقشه پوشش/کاربری پایه، از تصاویر ماهواره‌ای سال ۱۹۸۴ میلادی ماهواره لندست با قدرت تفکیک ۳۰×۳۰ متر و مربوط به سنجنده های ETM[۵] و OLI[۶] استفاده شد. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای از سایت تسهیلات جهانی پوشش زمین GLCF[۷] (http://glcf.umd.edu/) و پیمایش زمینی ایالات‌متحده آمریکا *USGS*[۸] (http://www.usgs.gov/) دانلود شد؛ و پس از انجام پردازش‌های لازم و تصحیحات فنی تبدیل به نقشه پایه پوشش/کاربری زمین شد. با توجه به اینکه در این پژوهش تعیین روند تغییرات ساختاری پوشش/کاربری محدوده مورد بررسی از گذشته تا حال و پیش‌بینی شرایط آن در مقطع زمانی آینده مدنظر بوده است، فرض بر این است که در شرایط پایه سیمای سرزمین شرایط بهینه اکولوژیکی و حداقل دست‌اندازی‌های انسانی برای تغییر ساختار آن وجود داشته است. به همین ترتیب با استفاده از داده‌های دورسنجی برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۶ لندست ۸ (سنسورهای OLI و TIRS) با قدرت تفکیک ۱۵ متر، نقشه پوشش/کاربری وضعیت جاری (موجود) محدوده تهیه و پس از انجام تطبیق میدانی به‌منظور کسب اطمینان از صحت نقشه و انجام اصلاحات اندک، نهایی شد. بررسی صحت نقشه از طریق انتخاب تصادفی ۱۱۳ نقطه در سطح نقشه و بررسی تطابق آنها با موقعیت واقعی نقاط روی زمین با استفاده از پایگاه داده‌های Google Earth انجام شد. بدین منظور با استفاده از ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا برای نقشه کاربری زمین با استفاده از نمونه های واقعی تعیین شد. طبق نقاط ارزیابی‌شده نمونه، نقشه طبقه‌بندی‌شده دارای صحت کلی ۹۲ درصد و ضریب کاپا برابر با ۸۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده قابل‌قبول بودن صحت نقشه تهیه شده است. این نقشه نشان‌دهنده تغییرات ساختاری است که طی دوره زمانی ۲۰۱۶-۱۹۸۴ در پوشش/کاربری سیمای سرزمین جنگلی دوهزار و سه‌هزار به وقوع پیوسته است.

این پژوهش به لحاظ روش‌شناختی بر سه گام اصلی استوار است: (الف) بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری سیمای سرزمین مورد بررسی بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره‌ای در محیط (GIS) و با استفاده از نرم‌افزار 10.3 (Arc Map) در دوره زمانی ۹۵- ۱۳۶۳ (ب) تعریف سناریوهای محتمل آتی شامل دو سناریوی ادامه روند موجود (BAU) و سناریوی توسعه متوازن (BD) (ج) شبیه‌سازی شرایط پوشش/کاربری سیمای سرزمین مورد بررسی در افق آتی سال ۱۴۲۷ تحت شرایط رخداد هر یک از دو سناریوی مورد نظر با استفاده از مدل سناریوسازی (InVEST) و مقایسه نتایج. بر این اساس، توضیحات لازم برای شفاف‌سازی هر یک از گام‌های روش‌شناختی اصلی پژوهش در ذیل ارائه می‌شود.

روش تحلیل تغییرات پوشش کاربری در دوره‌های زمانی مختلف

انجام این مرحله به‌سادگی از طریق تعیین طبقات مختلف پوشش/کاربری و محاسبه مساحت (هکتار) و درصد تحت پوشش آنها در کل محدوده سیمای سرزمین و تعیین کمیت‌های افزایشی یا کاهشی آنها طی دوره‌های زمانی پایه تا حال و محتمل آتی و مقایسه نتایج حاصله صورت پذیرفت.

تعریف سناریوهای محتمل آتی

در این پژوهش دو سناریوی محتمل آتی تعریف شد. در سناریوی اول این‌طور فرض شد که روند تغییرات آتی سرزمین از همان روند حاکم بر دوره‌های زمانی

گذشته تا حال و بدون دخالت‌های مدیریتی برای پیشگیری از تداوم تغییرات، پیروی نماید. به چنین سناریویی اصطلاحاً تداوم روند موجود (BAU)[9] گفته می‌شود. سناریوی دوم به‌عنوان سناریوی توسعه متوازن (BD)[10] تعریف شد که بر اساس آن فرض شد با مداخله دولت و نهادهای حفاظتی، یک سیاست مدیریتی برای حفاظت و احیاء پوشش جنگلی همراه با اجرای برنامه کنترلی توسعه سکونتگاه‌های انسانی با یک کمیت تعدیل‌شده نسبت به روند موجود تدوین و اجرا شود.

معرفی مدل سناریوسازی (InVEST)

مدل ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستمی و تضادهای آنها (InVEST) شامل سری ابزارها و مدل‌هایی است که اخیراً در گستره جهانی در حال کاربرد و اعتبارسنجی است و برای تحلیل اثرات کاربری‌های مختلف زمین و سناریوهای مدیریتی بر روی تولید و تدارک خدمات اکوسیستمی مختلف و زیستگاه‌های واجد تنوع زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابزار سناریوساز (InVEST) (Sharp, 2014) که از سال ۲۰۱۴ به‌عنوان یک ابزار پشتیبان برای برنامه‌ریزی سناریویی به این سری مدل اضافه شده است، مبتنی بر یک روش ساده برای تعیین استعداد زمین (Malczewski, 2004) در تخصیص به کاربری‌های مختلف است و بر پایه این اصل کار می‌کند که تغییرات در پوشش/کاربری زمین، احتمالاً در جاهایی اتفاق می‌افتد که به‌طور نسبی مستعدتر هستند. بدین منظور، داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای این مدل از سوی کاربر برای محدوده مورد بررسی تهیه می‌شود. مهم‌ترین داده‌های موردنیاز شامل نقشه پوشش/کاربری زمین در وضعیت موجود و یک سری داده‌های اقتصادی-اجتماعی و فیزیکی-محیطی است. مهم‌ترین داده‌های اقتصادی-اجتماعی مورد نیاز شامل تعیین کمیت‌های تغییر کاربری‌ها بر اساس میزان تقاضای زمین (بر اساس درصد)، تعیین احتمالات تغییر انواع پوشش/کاربری‌ها به همدیگر با توجه به شرایط و واقعیت‌های موجود در یک منطقه و اولویت یا وزن هر یک از طبقات پوشش/کاربری از نگاه کارشناسی است. ابزار برای اولویت‌بندی کاربری‌ها از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده می‌کند. همچنین فاکتورهای فیزیکی-محیطی مورد استفاده در مدل‌سازی بسته به شرایط هر منطقه، می‌تواند شامل مواردی چون شیب، ارتفاع، نوع خاک، دور و نزدیکی به جاده، موانع و اثرات همجواری باشد. برای وزن‌دهی فاکتورهای فیزیکی-محیطی و اقتصادی-اجتماعی نسبت به همدیگر و تعیین میزان اثرگذاری هر یک از آنها بر تغییرات آتی پوشش/کاربری، ابزار از روش ارزشیابی چندمعیاره (MCA) بهره می‌جوید.

فرایند مدل‌سازی پوشش/کاربری زمین در سیمای سرزمین مورد بررسی

برای تصویرسازی سناریوی آتی تغییرات در پوشش/کاربری زمین در محدوده مورد بررسی دوهزار و سه‌هزار با استفاده از مدل مذکور گام‌های عملیاتی ذیل دنبال شد:

تعیین کمیت تغییر در پوشش/کاربری زمین

کمیت تغییر بستگی به تقاضای محلی برای زمین دارد. در این پژوهش کمیت تغییر پوشش/کاربری‌ها برای سناریوی (BAU) بر اساس آنچه از مقایسه کمیت‌های تغییریافته انواع پوشش/کاربری از گذشته تا حال یعنی از سال ۱۳۶۳ تا سال ۱۳۹۵ به دست آمد. همچنین کمیت تغییرات مربوط به سناریوی (BD) به‌صورت فرضی و بر اساس تعدیل در کمیت‌های سناریوی (BAU) تعیین شد. جدول ۱ فرضیات هر یک از دو سناریوی فوق‌الذکر را نشان می‌دهد.

ارزش عددی که برای وقوع تغییرات مشخص می‌شود به‌عنوان هدف (کاربری) توسط ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرد و همه سلول‌های رستری مستعد به ترتیب

اولویت تبدیل می‌شوند تا هدف موردنظر محقق شود. کمیت تغییر به‌صورت عددی و با واحد درصد بیان می‌شود. بر اساس هدف یا اهداف تعیین‌شده، کاربری‌هایی که بخشی از مساحت خود را از دست می‌دهند باید ارزش منفی و آنهایی که مساحت‌شان اضافه می‌شود باید ارزش مثبت دریافت کنند.

جدول ۱- سناریوی ممکن آتی شامل سناریوی تداوم روند موجود (BAU) و سناریوی سیاستی توسعه متوازن (BD)
Table 1. Possible future BAU and BD scenarios

سناریوی BAU	سناریوی BD
افزایش شدید سکونتگاه‌های انسانی با نرخ رشد ۸۰٪ Significant increase of the human settlements with a growth rate of 80%	توسعه کنترل‌شده سکونتگاه‌های انسانی بر اساس طرح‌های جامع هادی روستایی و با نرخ رشد ۳۰٪ Controlled development of human settlements based on comprehensive rural master plans with a growth rate of 30%
افزایش نسبتاً شدید جنگل نیمه‌متراکم با نرخ رشد ۶۳٪ A relatively high increase in semi-dense forest with a growth rate of 63%	تبدیل جنگل نیمه‌متراکم به متراکم با نرخ رشد ۳۰٪ مبتنی بر اجرای طرح‌های مدیریت پایدار جنگل Conversion of semi-dense forest to dense forest with a growth rate of 30% based on sustainable forest management plans
افزایش نسبی باغ با نرخ رشد ۱۵٪ relative increase of the orchard with a growth rate of 15%	تبدیل جنگل کم‌تراکم به نیمه‌متراکم با نرخ رشد ۲۵٪ از طریق جنگل‌کاری دست‌کاشت و پروژه‌های احیای جنگل Converting low dense forest to semi dense with a growth rate of 25% through planting and forest restoration projects
افزایش ملایم مرتع با نرخ رشد ۹٪ Mild increase of the grassland with a growth rate of 9%	افزایش مرز حفاظت جنگل از طریق الحاق منطقه شکار مجاور به منطقه حفاظت‌شده بلس‌کوه Extending of the forest conservation boundary through incorporation of the adjacent hunting area to the Beles Kouh protected area
کاهش نسبی جنگل متراکم با نرخ منفی ۱۸٪- relative decrease of the dense forest by a negative rate of 18%	
کاهش نسبتاً شدید جنگل کم‌تراکم با نرخ منفی ۵۵٪ Relatively high decrease of the low-density forest at a negative rate of 55%	
کاهش نسبی اراضی زراعی با نرخ ۲۰٪- A relative decrease of the farmland by a rate of 20%	

تعیین احتمالات تغییر

احتمال تغییر یک پارسل معین از یک نوع کاربری/پوشش به نوع دیگر آن نیز بر اساس تفسیر چشمی تغییرات در نقشه‌های پوشش/کاربری زمین در دوره‌های زمانی گذشته و حال قابل‌تعیین است. کاربر مدل با توجه به تحولات رخ‌داده در دوره زمانی موردنظر که به‌وضوح از روی نقشه‌ها قابل‌رؤیت است، ممکن است این احتمال را در نظر بگیرد که اراضی زراعی به سکونتگاه تبدیل می‌شود. ارزش عددی احتمال تغییر یک نوع کاربری/پوشش به نوع دیگر در یک طیف صفر تا ۱۰ تعیین می‌شود که صفر به مفهوم عدم احتمال و ۱۰ به معنی بالاترین احتمال تغییر است. در این تحقیق با توجه به طبقات کاربری‌های موجود در نقشه جاری پوشش/کاربری در حوضه آبخیز دوهزار و سه‌هزار و در نظر گرفتن روندهای گذشته تاکنون، احتمالات تغییر یک پوشش/کاربری به سایر طبقات آن به شرح ذیل در نظر گرفته شد:

- احتمال رشد جنگل نیمه‌متراکم از جنگل متراکم (تبدیل جنگل متراکم به نیمه‌متراکم): ۱۰
- احتمال رشد جنگل کم‌تراکم از جنگل‌های نیمه‌متراکم و متراکم (تبدیل جنگل‌های نیمه‌متراکم و متراکم به کم‌تراکم) به ترتیب: ۷ و ۳
- احتمال رشد سکونتگاه از مزارع، باغ، جنگل کم‌تراکم، جنگل نیمه‌متراکم و جنگل متراکم (ساخت‌وساز در این طبقات کاربری) به ترتیب: ۱۰، ۹، ۷، ۶ و ۵
- احتمال رشد مزرعه از جنگل نیمه‌متراکم و مرتع به ترتیب ۲ و ۱
- احتمال رشد باغ از مزرعه، جنگل کم‌تراکم، جنگل نیمه‌متراکم، جنگل متراکم و مرتع به ترتیب: ۸، ۸، ۷، ۶ و ۲
- احتمال رشد جاده از مزرعه، باغ، مرتع، جنگل کم‌تراکم، جنگل نیمه‌متراکم و جنگل متراکم به

ترتیب: ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶ و ۵

- احتمال رشد مرتع از جنگل کم‌تراکم، جنگل نیمه‌متراکم و جنگل متراکم به ترتیب: ۱۰، ۴ و ۳
- احتمال تبدیل سایر کاربری‌ها به همدیگر: ۰

اولویت‌بندی پوشش/کاربری‌ها

انواع پوشش کاربری‌ها باید با توجه به اهمیت آنها رتبه‌بندی شود تا بعداً توسط مدل وزن‌دهی شوند. اهمیت کاربری‌ها بستگی به شرایط محیط زیستی منطقه مورد بررسی و یا نظر ذینفعان برای تغییرات ساختاری سرزمین دارد. مثلاً به لحاظ محیط زیستی جنگل متراکم و رودخانه‌ها از اهمیت بیشتری در مقایسه با سایر انواع کاربری‌ها دارند. یا در مورد کاربری‌های انسانی بسته به اینکه تقاضا برای ایجاد کدام نوع از توسعه بیشتر باشد ممکن است اهمیت سکونتگاه بیشتر از مزرعه باشد. وقتی چندین هدف (کاربری) برای یک پارسل واحد رقابت می‌کنند (یک پیکسل) آنکه وزن بیشتری دارد در فرایند تبدیل پیروز می‌شود. رتبه‌بندی طبقات پوشش/کاربری نسبت به همدیگر به دلیل تنوع و تعدد آنها مشکل است لذا در این مدل یک ابزار تدارک دیده شده تا با استفاده از یک ماتریس امکان مقایسه دو کاربری در یک زمان در چارچوب تحلیل سلسه مراتبی (AHP) فراهم شود. در این تحقیق به‌منظور اولویت‌بندی پوشش/کاربری‌ها از روش ماتریس تعیین اولویت با استفاده از مقیاس ۹ امتیازی (Saaty, 1977)، استفاده شد. جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهنده نحوه امتیازدهی برای اولویت‌بندی پوشش و کاربری‌ها و ماتریس اولویت‌بندی کاربری‌ها برای محدوده مورد بررسی این تحقیق هستند:

جدول ۲- نحوه امتیازدهی بر اساس مقیاس ۹ امتیازی Saaty

Table 2. Score based on a 9-point Saaty scale

1	**اهمیت معادل** **Equal importance**	دو کاربری که به‌اندازه مساوی در تحقق یک هدف سهم دارند. Two land uses contribute equally to the objective
2	**اهمیت ضعیف** **Weak or slight**	
3	**اهمیت متوسط** **Moderate importance**	اثبات تجربی اینکه یک کاربری نسبت به کاربری دیگر تا حدی ترجیح داده می‌شود. Experience and Judgment slightly favor one land use over another.
4	**اهمیت بیشتر از متوسط** **Moderate plus**	
5	**اهمیت قوی** **Strong importance**	اثبات تجربی اینکه یک کاربری نسبت به کاربری دیگر تا حد زیادی ترجیح داده می‌شود. Experience and Judgment strongly favor one land use over another.
6	**اهمیت بیشتر از قوی** **Strong plus**	
7	**اهمیت خیلی قوی** **Very strong importance**	اثبات تجربی اینکه یک کاربری نسبت به کاربری دیگر تا حد خیلی زیادی ترجیح داده می‌شود؛ و در عمل این‌طور اثبات‌شده است. An land use is favored very strongly over another, its dominance demonstrated in practice
8	**اهمیت خیلی خیلی قوی** **Very very strong**	
9	**اهمیت شدید** **Extreme importance**	شواهدی موجود است که نشان می‌دهد یک کاربری نسبت به کاربری دیگر به‌صورت قطعی اولویت دارد. The evidence favoring one land use over another is of the highest possible order of affirmation.

جدول ۳- ماتریس اولویت‌بندی کاربری‌ها نسبت به همدیگر در حوضه آبخیز دوهزار و سه‌هزار
Table 3. Priority matrix of uses relative to each other in the watershed of Dohezar and Sehezar

کد کاربری Land use code	نام کاربری Land use type	جنگل متراکم Dense forest	جنگل نیمه‌متراکم Semi-dense forest	جنگل کم‌تراکم Low-dense forest	سکونتگاه انسانی Human settlements	مزارع کشاورزی Farmland	باغ مرکبات Citrus orchard	رودخانه River	پهنه آبی Water body	شبکه جاده Road network	مراتع grassland
1	جنگل متراکم Dense forest										
2	جنگل نیمه‌متراکم Semi-dense forest	8.9	1								
3	جنگل کم‌تراکم Low-dense forest	7.9	7.8	1							
4	سکونتگاه انسانی Human settlements	5.9	5.8	5.7	1						
5	مزارع کشاورزی Farmland	3.9	3.8	3.7	2.8	1					
6	باغ مرکبات Citrus orchard	4.9	4.8	4.7	3.8	5.2	1				
7	رودخانه River	1	1	9.7	9.4	9.2	9.3	1			
8	پهنه آبی Water body	4.9	4.8	4.7	4.5	4.3	4.5	4.9	1		
9	شبکه جاده Road network	5.7	5.8	4.9	7.6	7.5	7.5	4.9	7.5	1	
10	مراتع grassland	6.9	5.8	5.7	6.5	7.4	5.3	6.9	6.5	6.4	1

بر اساس ماتریس بالا چند مثال از نحوه اولویت‌بندی کاربری‌ها به‌صورت مقایسه زوجی با همدیگر به شرح زیر است:

- جنگل نیمه‌متراکم دارای اهمیت خیلی خیلی قوی (۸) نسبت به جنگل متراکم که دارای اهمیت شدید (۹) است.
- سکونتگاه انسانی دارای اهمیت قوی (۵) نسبت به جنگل کم‌تراکم با اهمیت خیلی قوی (۷) است.
- رودخانه دارای اهمیت معادل (۱) با جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم است.
- شبکه جاده دارای اهمیت بیشتر از متوسط (۴) نسبت به رودخانه با اهمیت شدید (۹) است (اهمیت رودخانه به‌مراتب بیشتر از جاده است که نشان‌دهنده اهمیت محیط زیستی رودخانه است).
- باغ مرکبات دارای اهمیت متوسط (۳) نسبت به سکونتگاه که دارای اهمیت خیلی خیلی قوی (۸) است (با توجه به تقاضای اجتماعی برای ساخت‌وساز اهمیت سکونتگاه از نظر ذینفعان محلی باانگیزه‌های اقتصادی به‌مراتب بیشتر از باغ است).

فاکتورهای محیطی و فیزیکی

پارامترهایی که تاکنون مطرح شد بازتاب‌دهنده شرایط محلی و اجتماعی بودند. بااین‌حال، یک سری فاکتورهای فیزیکی و محیطی نیز وجود دارند که تعیین‌کننده استعداد زمین برای تبدیل به کاربری‌های مختلف هستند. چند مثال ازاین نوع فاکتورها شامل فاصله از جاده، انواع خاک، فاصله تا شهر، ارتفاع، شیب و جهت جغرافیایی هستند. ابزار سناریوسازی مورد استفاده این اجازه را می‌دهد تا این نوع فاکتورها نیز در تعیین استعداد سرزمین برای تغییر لحاظ شوند. اثر این فاکتورها بر

اهداف (کاربری‌ها) متفاوت است بنابراین کاربر می‌تواند برای هر نوع کاربری یکسری از فاکتورها را تعریف کند. ادغام این فاکتورها در تعیین اینکه کدام کاربری مستعدتر است مستلزم ارزش‌یابی چندمعیاری است. کاربر لایه‌های رستری برای هر یک از فاکتورها تعریف می‌کند و استعداد پیکسل را بر اساس طیف ارزش ۰ (نامستعد) تا ۱۰۰ (شدیداً مستعد) مشخص می‌کند. سپس فاکتورها نسبت به همدیگر وزن‌دهی می‌شوند (مثل پارامتر قبلی). به تعداد انواع پوشش/کاربری، لایه‌های استعداد زمین تهیه می‌شود پیکسل‌هایی که ارزش‌های نزدیک‌تر به ۱۰ دارند اول تبدیل می‌شوند. در این تحقیق سه نوع کاربری سکونتگاه انسانی، شبکه جاده و باغ به‌عنوان مهم‌ترین محرکه‌های توسعه انسانی که در تغییرات آتی پوشش طبیعی حوضه آبخیز مورد بررسی نقش دارند، در نظر گرفته شدند. جدول ۴، عوامل محیطی مؤثر (شیب، ارتفاع، فاصله تا جاده)، ارزش عددی تعیین‌کننده استعداد سرزمین و وزن هریک از عوامل موردنظر را برای هر یک از این کاربری‌های هدف نشان می‌دهد.

جدول ۴- عوامل محیطی مؤثر بر توزیع کاربری‌های انسانی در شرایط محتمل آتی

Table 4. Environmental factors affecting the distribution of human uses in future probable situations

نوع کاربری درحال‌توسعه Developing land use type	کد کاربری Land use code	عوامل محیطی مؤثر Effective environmental factors		استعداد Capability (0–100)	وزن عامل Factor weight (0–1)
سکونتگاه انسانی Human settlements	4	ارتفاع (متر) Elevation (m)	1200≤	95	0.8
			1200-1800	40	
			بیشتر از 1800 ≥1800	0	
		شیب (درصد) Slope(%)	≤8	100	0.9
			8-15	50	
			≥15	0	
		فاصله تا جاده Distance to road	فاصله کمتر Less distance	مستعد Capable	0.7
شبکه جاده Road network	9	مانند سکونتگاه انسانی All factors are the same as human settlement			
باغ orchard	6	شیب (درصد) Slope (%)	15 ≤	100	0.6
			15-30	50	
			≥30	20	
		فاصله تا جاده Distance to road	فاصله کمتر Less distance	0	0.5

همجواری (قرابت)

پیکسل‌های نزدیک به یک نوع پوشش/کاربری، با احتمال بیشتری به همان نوع پوشش/کاربری تبدیل می‌شوند. مثلاً اگر یک پارسل به کاربری باغ نزدیک باشد اگر مستعد برای باغ هم باشد به‌احتمال بیشتر به باغ تبدیل می‌شود. برای تأثیر دادن فاکتور هم‌جواری، فاصله هر سلول نسبت به پوشش/کاربری که تحت ارزیابی قرار می‌گیرد محاسبه می‌شود و نسبت به حداکثر فاصله که توسط کاربر تعریف می‌شود نقصان می‌یابد. سلولی که نزدیک‌ترین فاصله تا کاربری موردنظر را دارد ارزش ۱۰۰ و سلولی که حداکثر فاصله را دارد ارزش ۱ می‌گیرد. در این ابزار حداکثر تأثیر فاکتور همجواری ۳۰٪ تعریف شده است. در این تحقیق با توجه به شواهد موجود در محدوده مورد بررسی دوهزار و سه‌هزار، حداکثر فاصله همجواری مؤثر برای کاربری‌های جنگلی، زراعی و باغی ۵۰۰۰ متر، سکونتگاهی ۲۰۰۰ متر و جاده‌ای ۳۰۰ متر در نظر گرفته‌شده است.

موانع

فاکتورهایی هستند که مانع شکل‌گیری کاربری‌های موردنظر انسان می‌شوند. یک مثال در این زمینه وجود منطقه حفاظت‌شده است. کاربر می‌تواند تعریف کند که چقدر مانع تأثیر دارد. ابزار این اجازه را می‌دهد که یک ارزش عددی دسترسی که نشان‌دهنده میزان اثرگذاری منطقه حفاظت‌شده در پیشگیری از تبدیل زمین است در فرایند مدل‌سازی وارد شود. مثلاً ارزش دسترسی صفر برای پیکسل‌هایی که شدیداً حفاظت‌شده هستند و دارای بیشترین اثر بازدارنده هستند و ارزش ۱ برای جاهایی که حفاظت هیچ تأثیر بازدارنده‌ای در تغییر کاربری‌ها ندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش با توجه به قرار گرفتن منطقه حفاظت‌شده بلس‌کوه در درون مرز و در قلب حوضه آبخیز دوهزار و سه‌هزار، این منطقه به‌عنوان مانعی برای تبدیل کاربری‌ها و پوشش در درون مرز تحت حفاظت در نظر گرفته شد. این بدان مفهوم است که در نقشه پوشش/کاربری سناریو که توسط مدل ساخته می‌شود، به لحاظ ساختاری هیچ تغییری در داخل مرز محدوده حفاظت‌شده اتفاق نخواهد افتاد.

تهیه داده‌های ورودی مدل

جدول ۵ ورودی‌های (داده‌های) لازم برای اجرای مدل سناریوساز (InVEST) را که برای محدوده مورد بررسی این تحقیق تهیه و مورد استفاده قرار گرفت نشان می‌دهد:

جدول ۵- داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل سناریوساز InVEST در محدوده مورد بررسی
Table 5. Required data to run InVEST scenario-building model in the study area

داده‌های ورودی Input Data	توضیحات Description
نقشه پوشش/کاربری زمین در وضع موجود (جاری) Cover / Land Use map in the existing state (Current)	یک نقشه با فرمت رستری و دارای کدهای عددی مربوط به طبقه‌بندی انواع پوشش/کاربری برای هر سلول A map with Raster format and numeric codes for categorizing the types of cover / land use for each cell
جدول پوشش/کاربری انتقالی Cover table / transitional land use	با فرمت dbf و CSV محتوی احتمالات انتقال (تغییر)، اولویت (وزن) هر کاربری، درصد تغییر کاربری‌ها، فاصله هم‌جواری In dbf and CSV format, containing transition likelihoods (change), priority (weight) of each land use, percentage of land use change, neighborhood distance
جدول فاکتورهای استعداد زمین Table of factors for land Capability	با فرمت dbf و CSV محتوی نام فاکتورها، پوشش/کاربری تحت‌تأثیر، فاصله اثر هر فاکتور، ارزش استعداد در طیف ۰(نامستعد) تا ۱۰۰ (خیلی مستعد)، وزن فاکتور. In dbf and CSV format, containing the name of the factors, the cover / land use affected, the effective distance of each factor, the capability value in the range of 0 (incapable) to 100 (very capable), the weight of the factor.
ماتریس اولویت (وزن) فاکتورها Priority matrix (Weight) factors	وزن فاکتورها با استفاده از رویکرد تحلیل چندمعیاری و با استفاده از یک فرایند مقایسه دودویی تحت فرایند تحلیل سلسله مراتبی موردمحاسبه قرار می‌گیرد. The weight of the factors is calculated using a multi-criteria analysis approach using a binary comparison process under the hierarchical analysis process.
لایه موانع Constraint layer	یک لایه پلی‌گونی که نشان‌دهنده بخش‌هایی است از یک سیمای سرزمین که حفاظت‌شده هستند یا دارای موانعی برای تغییر کاربری هستند. A polygon layer that represents parts of a landscape that is protected or has barriers to land use change.

روش محاسبه تبدیل کاربری‌ها توسط مدل سناریوساز (InVEST)

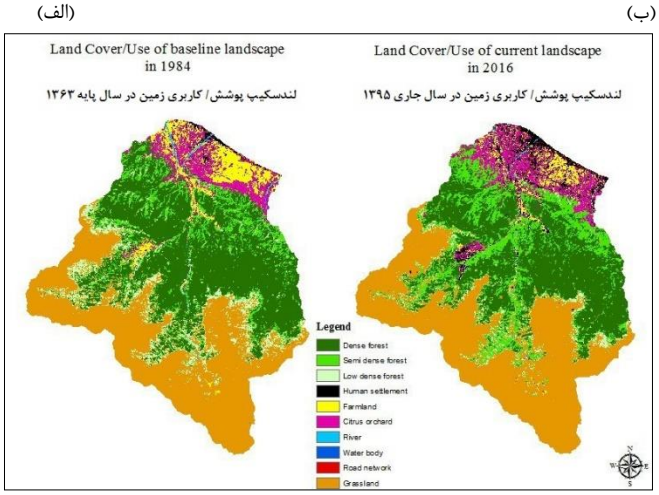
گام نهایی، تبدیل شبکه‌ها در نقشه رستری (تخصیص زمین) است. این ابزار تبدیل کاربری‌ها با تبدیل هر یک از لایه‌های رستری بر اساس ارزش‌های استعداد هر پیکسل انجام می‌دهد. کار با نوع کاربری که بالاترین اولویت را دارد آغاز می‌شود. هدف (٪ تغییر) خوانده می‌شود و پیکسل‌ها با بیشترین استعداد شروع به تبدیل می‌کنند. بعد از اینکه هر کاربری پردازش شد، پیکسل‌های تبدیل‌شده ماسک می‌شوند تا دوباره تبدیل نشوند. در

زمانی که تعداد بیشتری پیکسل با استعداد یکسان در دسترس باشند ابزار به‌صورت تصادفی از میان پیکسل‌های موجود انتخاب می‌کند.

نتایج و بحث

مقایسه کمیت‌های تغییریافته انواع پوشش/کاربری از گذشته تا حال

روند تغییرات پوشش/کاربری زمین از سال ۱۳۶۳ تا سال ۱۳۹۵ بر اساس اطلاعات حاصل از تهیه و مقایسه دو نقشه پایه و جاری پوشش کاربری زمین (شکل ۲- الف و ب)، تعیین شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۲- تغییرات پوشش/کاربری زمین طی زمان. (الف): پوشش/کاربری پایه (سال ۱۳۶۳)، (ب): پوشش/کاربری جاری (سال ۱۳۹۵)

Fig. 2- LULC changes over time: (a) LULC map of the base year (1984) and (b) LULC map of the current year (2016)

جدول ۶- مقایسه تغییرات کمی طبقات پوشش/کاربری زمین در دو وضعیت پایه و جاری

Table 6. A comparison of LULC changing trends in the base and current years

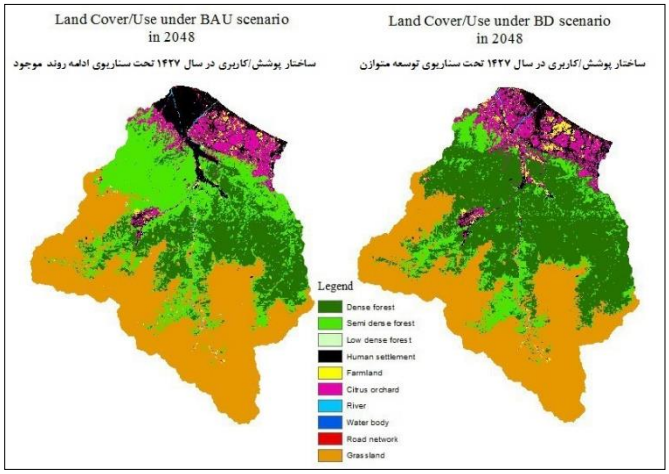
ردیف NO.	نوع کاربری Land use type	مساحت (هکتار) Area (Ha)		تغییرات (هکتار) Converted area (Ha)		روند Trend
		پایه (1363) (1984)Base year	جاری (1395) Current (2016)	افزایش Increased	کاهش Decreased	
1	جنگل متراکم Dense forest	54272.49	44786.35	-	9486.14	
2	جنگل نیمه‌متراکم Semi-dense forest	14178.70	23060.20	8851.5	-	
3	جنگل کم‌تراکم Low-dense forest	12317.09	5479.54	-	6837/55	
4	سکونتگاه انسانی Human settlements	1436.85	5565.48	4128.63	-	
5	مزارع کشاورزی Farmland	8045.38	4853.90	-	3191.48	
6	باغ مرکبات Citrus orchard	8112.09	10257.05	2144.96	-	
7	رودخانه River	614.60	395.16	-	219.44	
8	پهنه آبی Water body	7.53	4.81	-	2.72	
9	شبکه جاده Road network	62.36	173.23	110.87	-	
10	مراتع Grassland	53451.84	57923.04	4471.2	-	

بر این اساس، در سال ۱۳۹۵ پس از طی یک دوره زمانی ۳۲ ساله، جنگل متراکم در محدوده مورد بررسی حدود ۱۸٪ کاهش داشته است. جنگل نیمه‌متراکم در همین دوره زمانی حدود ۶۳٪ افزایش یافته است. با توجه به اینکه مجموع مساحت تحت پوشش هر دو جنگل متراکم و نیمه‌متراکم طی این دوره زمانی تفاوت چندانی ندارد (۶۸۴۵۰ هکتار در سال ۱۳۶۳ و ۶۷۸۵۰ هکتار در سال ۱۳۹۵)، این تغییرات می‌تواند به مفهوم کاهش شدید کیفیت جنگل متراکم و شدت گرفتن تخریب آن تفسیر شود. در همین حال، جنگل کم‌تراکم که در اراضی بالادست مرتفع و هم‌جوار با اراضی مرتعی واقع شده بود، کاهش شدید ۵۵٪ را در سال ۱۳۹۵ نشان می‌دهد یعنی بیش از نیمی از این طبقه کاربری طی این دوره زمانی از بین رفته است. با توجه به اینکه پوشش مرتعی حدود ۹٪ نسبت به سال ۱۳۶۳ در سال ۱۳۹۵ افزایش یافته است، می‌توان تفسیر کرد که به دلیل سیر تخریبی جنگل در این حوضه آبخیز، به‌تدریج جنگل کم‌تراکم تحلیل رفته و به اراضی مرتعی تبدیل شده است. به لحاظ تغییرات در کاربری‌های انسان‌ساخت همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌شود، مساحت تحت پوشش کاربری زراعی در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۶۳ به نحو بارزی کاهش‌یافته و در مقابل سکونتگاه‌های انسانی در همین دوره زمانی افزایش یافته است. مساحت تحت پوشش سکونتگاه‌های انسانی تقریباً سه برابر شده است. همچنین اراضی باغی در سال ۱۳۹۵ حدود ۲۷٪ نسبت به سال ۱۳۶۳ افزایش یافته است. همان‌طور که در نقشه پیداست به لحاظ توزیع جغرافیایی، اراضی حاصل‌خیز زراعی پایین‌دست و در مناطق جلگه‌ای حوضه آبخیز با سرعت فزاینده‌ای در حال جایگزینی با ساخت‌وسازهاست و در اطراف سکونتگاه‌ها نیز به دنبال خانه‌سازی، باغ ایجاد شده است.

پیش‌بینی تغییرات پوشش/کاربری تحت سناریوهای محتمل آتی

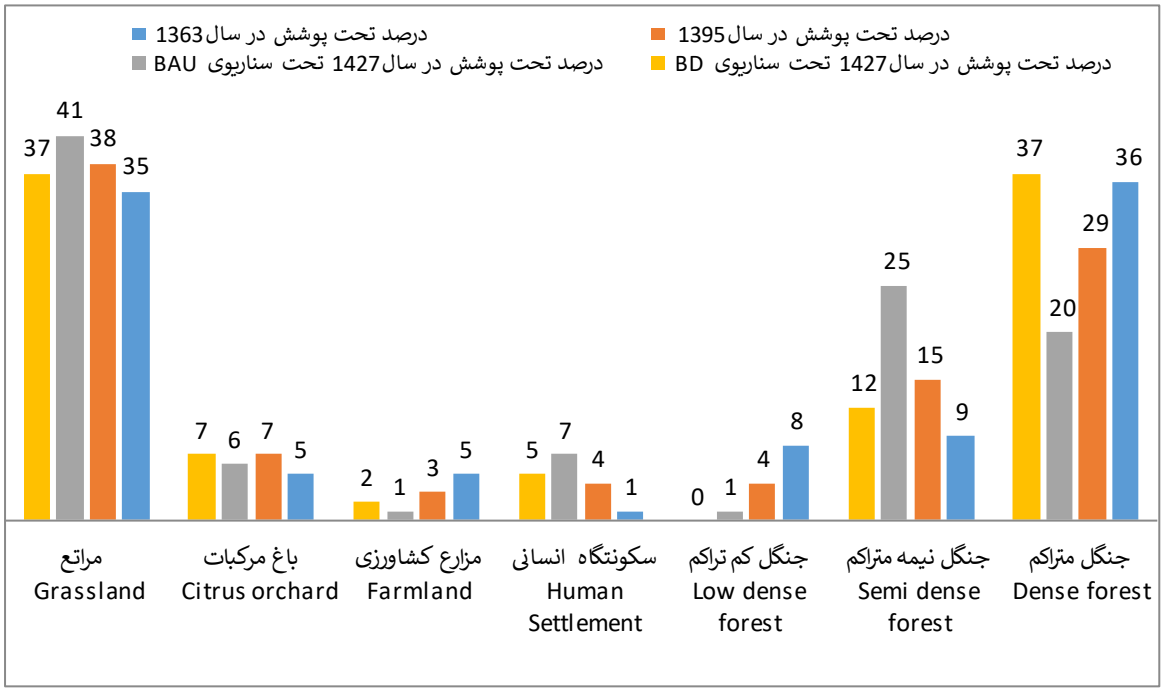
مهم‌ترین خروجی حاصل از اجرای نرم‌افزار سناریوساز InVEST، نقشه‌های پوشش/کاربری پیش‌بینی‌شده تحت دو سناریوی محتمل BAU و BD (جدول ۱) در زمان آینده است. ساختار بصری سیمای سرزمین که بر اساس فرایند مدل‌سازی سناریویی پوشش/کاربری و با لحاظ دو سناریوی موردنظر، تولید شد، در شکل ۳ (الف و ب) نشان داده شده و نتایج کمیت‌های تغییرات آن بر اساس شکل ۴ مقایسه شد.

(الف) (ب)



شکل ۳- پیش‌بینی و مقایسه وضعیت تغییرات پوشش کاربری زمین در سال ۱۴۲۷ بر اساس فرایند مدل‌سازی سناریویی. (الف): شرایط سیمای سرزمین تحت سناریوی ادامه وضع موجود (BAU)، (ب): شرایط سیمای سرزمین تحت سناریوی توسعه متوازن (BD)

Fig. 3- Projected LULC changes by the year 2040 based on scenario modelling (a) landscape conditions under the BAU scenario and (b) landscape conditions under the BD scenario



شکل ۴- مقایسه درصد تحت پوشش هر یک از طبقات پوشش/کاربری طی زمان و تحت هر یک از دو سناریوی BAU و BD

Fig. 4- Comparison of the area (%) covered by each of the LULC classes over time and under the BAU and BD scenarios

ادامه وضع موجود (سناریوی BAU)

بر اساس این سناریو، در سال ۱۴۲۷ درصد تحت پوشش جنگل متراکم از ۲۹ در سال ۱۳۹۵ به ۲۰ در سال ۱۴۲۷ کاهش خواهد یافت. جنگل نیمه‌متراکم در همین دوره زمانی طی یک روند صعودی از ۱۵ در سال ۱۳۹۵ به ۲۵٪ خواهد رسید که چنین روندی به‌طور حتم حاکی از تخریب کیفی جنگل متراکم هم‌زمان با سیر نزولی کمیت آن است. درواقع به دلیل وجود سیر قهقرایی تخریب جنگل به‌تدریج و با گذشت زمان جنگل متراکم در حال جایگزینی با جنگل نیمه‌متراکم است. در همین حال، جنگل کم‌تراکم از ۴٪ در سال ۹۵ به کمتر از ۱٪ در سال ۱۴۲۷ نقصان خواهد یافت. این رویداد حاکی از روند تخریبی بسیار شدید در این طبقه کاربری به دلیل تنک شدن بیشتر از حد پوشش درختی و کاهش مقاومت آن در مقابل اختلالات طبیعی و انسانی و جایگزینی آن با سایر انواع پوشش کاربری به‌ویژه پوشش مرتعی است. به لحاظ تغییرات در کاربری‌های انسان‌ساخت همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌شود، مساحت تحت پوشش کاربری زراعی طی سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۹۵ و ۱۴۲۷ به ترتیب ۵٪، ۳٪ و ۱٪ (رنگ زرد) است. دلیل این امر آن است که با توجه به توسعه بی‌رویه ساخت‌وسازهای انسانی، به‌طورمعمول زمین‌های زراعی نخستین محدوده‌های قابل‌دسترس برای تبدیل کاربری و احداث سکونتگاه هستند و به لحاظ پارامترهای محیطی مانند شیب و ارتفاع و نزدیکی به جاده در شرایط مساعدی قرار دارند. در عوض سکونتگاه‌های انسانی (رنگ سیاه) در این دوره زمانی از ۱٪ در سال ۱۳۶۳ به ۴٪ در سال ۱۳۹۵ افزایش‌یافته است و در صورت تداوم روند موجود به ۷٪ در سال ۱۴۲۷ افزایش خواهد یافت. همچنین اراضی باغی در سال ۱۳۹۵ حدود ۷٪ از محدوده را پوشش می‌دهند که نسبت به سال ۱۳۶۳ (با پوشش ۵٪) روند افزایشی داشته است؛ اما پیش‌بینی می‌شود که در سال ۱۴۲۷ با کاهشی یک‌درصدی به ۶٪ برسد. این روند برگشت نزولی نیز به این دلیل خواهد بود که در دوره زمانی آتی با توجه به اینکه دیگر مزارع زراعی در داخل محدوده وجود نخواهد داشت بنابراین ساکنان نسبت به جایگزینی باغ‌های

موجود با سکونتگاه انسانی اقدام خواهند کرد.

سناریوی توسعه متوازن (BD)

در شرایط به وقوع پیوستن سناریوی BD، اراضی تحت پوشش جنگل متراکم با افزایش ۱۷ درصدی در مقایسه با سناریوی BAU به ۳۷٪ در سال ۱۴۲۷ افزایش خواهد یافت. درصد تحت پوشش جنگل نیمه‌متراکم نیز با ۱۳ درصد کاهش نسبت به سناریوی BAU، به ۱۲٪ خواهد رسید. بدیهی است که چنین تغییراتی به دلیل اجرای همزمان طرح‌های مدیریتی توسعه کنترل‌شده سکونتگاه‌ها و حفاظت و احیاء جنگل است. چنین رویدادی می‌تواند به لحاظ افزایش کیفیت پوشش جنگلی، حتی بهتر از شرایط موجود آن در سال ۱۳۹۵ باشد و با معکوس کردن روند تخریب جنگل، آن را به وضعیت بهینه آنکه در سال ۱۳۶۳ داشت، بازگرداند. زمین‌های تحت پوشش مزرعه تحت سناریوی BD به ۲٪ در وضعیت آتی خواهد رسید که این مقدار اگرچه حاکی از تداوم روند کاهشی این کاربری است اما در مقایسه با سناریوی BAU به حفظ مقدار قابل‌توجهی از کاربری مزرعه منجر خواهد شد. اراضی تحت پوشش سکونتگاه نیز تحت سناریوی BD ٪۵ خواهد بود که نشان‌دهنده افزایش متعادل سکونتگاه‌های انسانی است، درحالی‌که کیفیت جنگل نیز حفظ و حتی ارتقا یافته است. سایر پوشش/کاربری‌ها نیز تغییرات محسوسی نخواهند داشت.

روش مدل‌سازی به‌کاررفته در این پژوهش، از زوایای گوناگونی با تحقیقات مشابه پیشین، قابل‌مقایسه است. در پژوهش Houet *et al* (2006) که با استفاده از روش ماشین‌های سلولی انجام شد، مفهوم تکامل فضایی، به‌عنوان مبنای شبیه‌سازی پوشش/کاربری زمین در دوره زمانی آینده در نظر گرفته‌شده بود. درحالی‌که در این پژوهش، مبنای پیش‌بینی آینده پوشش/کاربری زمین، تحلیل استعداد زمین است که دارای کاربرد بیشتری در ارزیابی‌های مرتبط با مدیریت محیط‌زیست است. درواقع روش ماشین‌های سلولی، اگرچه به‌عنوان یکی از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (Malczewski, 2004) به‌صورت متعدد در فرایندهای مدل‌سازی پوشش/کاربری زمین به‌کار رفته است، اما این روش و سایر روش‌های مشابه آن ازجمله منطق فازی، شبکه عصبی و خوارزمیک ژنتیک، به دلیل ماهیت جعبه سیاهی آنها که درک آنها را برای غیرمدل‌سازان دشوار می‌کند، همواره مورد انتقاد بوده‌اند و به همین دلیل پذیرش آنها از سوی تصمیم‌گیران با مشکل مواجه شده است. همچنین در روش ماشین‌های سلولی، تعیین احتمالات تغییر تنها بر مبنای دانش و تجربه فردی و بدون درک کمیت‌های تغییر در کاربری زمین و ارتباط آن با محرکه‌های اقتصادی–اجتماعی انجام می‌شود که می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را با ابهام مواجه کند (Verburg *et al*., 2002). در مقابل تحلیل استعداد زمین در که با نقشه‌سازی‌های دستی شروع شده بود، در طول سال‌ها توسعه پیدا کرده و هم‌اکنون با استفاده از مدل معرفی‌شده در این پژوهش، به نقشه‌سازی‌های پیشرفته با بهره‌گیری از روش‌های همپوشانی، ارزشیابی چندمعیاری و تحلیل سلسله مراتبی انجامیده است. در مقایسه با کار Samie *et al*. (2017) در پاکستان که با استفاده از مدل دینامیک سیستم زمین (LSD) (Deng *et al*., 2008) کار مدل‌سازی را انجام دادند، باید گفت که مدل آنان اگرچه ازنظر لحاظ فاکتورهای اقتصادی–اجتماعی، محرکه‌های تغییر و سایر پارامترهای دخیل در تغییرات پوشش/کاربری مدل جامعی است، اما به لحاظ مقیاس، نتایج آن در دو مقیاس متفاوت قابل تفسیر است. این مدل، در مقیاس منطقه‌ای، مدل کار شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین را بر اساس تقاضای زمین تحت شرایط توسعه اقتصادی–اجتماعی انجام می‌دهد. در مقیاس سلول (پیکسل) در فرم نقشه رستری نیز، روابط بین انواع پوشش/کاربری و فاکتورهای محرکه تغییر (فاکتورهای ژئوفیزیکی و همجواری) برآورد می‌شود. وجه تمایز مدل InVEST که در این پژوهش به کار رفت، چندمقیاسه‌ای بودن آن است. بدین معنی که خروجی

مدل دارای فرمت رستری است، اما بسته به داده‌های ورودی قابلیت تفکیک مقیاس فضایی در هنگام اجرا وجود دارد و تفاوت مقیاس در تفسیر نتایج به‌نحوی‌که در مدل LSD بیان شد، وجود ندارد. مقایسه مدل سناریوسازی InVEST با سایر مدل‌هایی که در بررسی‌های دیگر و ازجمله مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SWAT در کار Blainski و دیگران در برزیل (Blainski *et al.*, 2017)، مدل‌سازی با نرم‌افزار WetSpa در حوضه آبخیز دینور در کرمانشاه (Azinmehr *et al.*, 2013) و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار CLUE-S در کردکوی استان گلستان (Eskandari, 2014)، درمجموع حاکی از این نکته است که اولا نرم‌افزارهای SWAT و WetSpa که از خانواده نرم‌افزارهای هیدرولوژیکی هستند، مشخصاً برای انجام مدل‌سازی‌های تغییرات پوشش/کاربری زمین تعبیه نشده‌اند، هرچند که به‌صورت بالقوه این قابلیت را دارند تا ارتباطات میان کارکردهای آبی اکوسیستم با پوشش/کاربری زمین را مورد بررسی قرار دهند. در مورد نرم‌افزار CLUE-S، با وجود کاربردی بودن آن بر سیاست‌گذاری و شبیه‌سازی برنامه‌ریزی کاربری زمین، علاوه بر کاربست نرم‌افزار به دلیل جامع نبودن کارکردهای آن استفاده از ابزارهای جانبی برای تحلیل‌های آماری و تحلیل زنجیره مارکوف برای سناریوسازی لازم است. این در حالی است که مدل سناریوساز InVEST مشخصاً به‌عنوان یک ابزار پشتیبان برای سناریوسازی پوشش/کاربری زمین طراحی شده است و به دلیل تجهیز آن به فرایندهای تحلیل سلسله مراتبی و ارزشیابی چندمعیاره، به‌طور مستقل و بی‌نیاز از سایر ابزارهای جانبی، دارای قابلیت تحلیل فضایی-زمانی انواع پوشش/کاربری‌ها با خروجی‌های متنوع نقشه‌ای و آماری است.

مجموع مباحث فوق‌الذکر و توسعه فزاینده استفاده از نرم‌افزار سناریوساز InVEST حاکی از این است که نرم‌افزار مذکور با دارا بودن مزیت‌هایی چون قابلیت تحلیل همزمان فضایی و زمانی، انعطاف‌پذیری برای اجرا در مقیاس‌های مختلف و پذیرش داده‌های ورودی با قدرت تفکیک متفاوت و امکان تلفیق داده‌های اقتصادی-اجتماعی و فیزیکی-محیطی تحت یک مدل یکپارچه، از قابلیت متمایز و بالایی برای شبیه‌سازی تغییرات پوشش/کاربری زمین و تسهیل تحلیل‌های مربوط به آن برخوردار است. بااین‌حال، این مدل نیز مانند سایر ابزارهای تولید بشر، با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها عبارت است از اینکه مدل فرض می‌کند یک نوع پوشش/کاربری یا در حال رشد و یا در حال نقصان است و امکان اینکه هر دو حالت مذکور برای یک طبقه پوشش/کاربری به‌طور همزمان لحاظ شود وجود ندارد. این در حالی است که در دنیای حقیقی، تبدیل زمین بسته به شرایط زمانی و مکانی ممکن است در هر دو جهت اتفاق بیفتد. با این حال، برای ساده نگه‌داشتن مدل، طراحان آن چنین فرضی را مدنظر قرار داده‌اند. همچنین خروجی مدل به‌صورت یک‌مرحله‌ای و نه گام‌به‌گام تولید می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر یک دوره زمانی سی‌ساله مدنظر باشد، خروجی نهایی مدل تنها سال سی‌ام را نشان می‌دهد. درحالی‌که فرایند تبدیل زمین گام‌به‌گام است و در فاصله زمانی بین دو دوره تغییراتی رخ می‌دهد که با زمان انتهایی دوره موردنظر متفاوت است. ازاین‌رو با توجه به اینکه پیش‌بینی آینده بر اساس روندهای موجود، برای آینده نزدیک قابل‌اتکا است و در طولانی‌مدت ممکن است با تغییر شرایط همراه باشد، پیشنهاد می‌شود، در تعریف سناریوها دوره زمانی مورد پیش‌بینی خیلی طولانی نباشد. با این تفسیر یک دوره زمانی نهایتاً سی‌ساله می‌تواند برای پیش‌بینی و تحلیل تغییرات آتی سرزمین بر مبنای واقعیت‌های جاری امروز، تحلیل منطقی باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییرات پوشش/کاربری زمین در

دوره زمانی آینده تحت دو سناریوی مختلف ادامه وضع موجود (BAU) و توسعه متوازن (BD)، با استفاده از مدل InVEST شبیه‌سازی و مورد پیش‌بینی قرار گرفت. بر اساس این مشخص شد که در صورت تحقق سناریوی BAU تغییرات شدیدی در ساختار سیمای سرزمین مورد بررسی روی خواهد داد که درمجموع به اتلاف چشمگیر پوشش طبیعی جنگل و از بین رفتن زمین‌های زراعی و جایگزینی آنها با بافت سکونتگاهی منجر خواهد شد.

برعکس، سناریوی BD نشان داد که چگونه مدیریت زمین از طریق اجرای سیاست‌های حفاظت و احیاء جنگل و تعدیل تبدیل زمین برای توسعه سکونتگاه‌ها می‌تواند مخاطرات آتی تخریب ساختار اکولوژیکی سیمای سرزمین را کاهش داده و حتی به یک راهبرد برد-برد برای توسعه متعادل آن مبدل شود به‌نحوی‌که بتوان با اجرای همزمان سیاست‌های احیاء جنگل و توسعه کنترل‌شده سکونتگاه‌ها، علاوه بر حفظ یکپارچگی ساختاری سیمای سرزمین مورد بررسی، شرایط را برای ارتقا وضعیت دارایی‌های طبیعی جنگلی نیز مهیا کرد. بر اساس نتیجه این بررسی، سناریوی توسعه متوازن، می‌تواند به‌عنوان یک الگو برای سیاست‌گذاران توسعه و محیط زیست مبتنی بر پیش‌بینی‌های منطقی از آینده پوشش/کاربری زمین در منطقه رویشی هیرکانی مدنظر قرار گیرد. تمرکز ما در این پژوهش تنها روی پیش‌بینی تغییرات آتی زمین بوده است، اما اثرات این تغییرات مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به اینکه خروجی‌های حاصل از مدل سناریوساز InVEST می‌تواند به‌عنوان ورودی در سایر مدل‌های اکوسیستمی InVEST و مدل‌های مشابه دیگر استفاده شود، در بررسی‌های آتی امکان سنجش اثرات تغییرات پوشش/کاربری بر سایر کارکردهای طبیعی اکوسیستم مانند کارکردهای هیدرولوژیک، اقلیمی، زیستگاهی و ... امکان‌پذیر خواهد بود. سرانجام اینکه، شبیه‌سازی سناریویی با روشی که در این پژوهش معرفی شد، می‌تواند در بررسی‌های گوناگون ازجمله انواع ارزیابی‌های محیط زیستی، ارزش‌گذاری اقتصادی و نظایر آن به کار گرفته شود تا نتیجه پیش‌بینی‌های آتی را دقیق‌تر کند. ضمن آنکه این نوع مدل‌سازی می‌تواند راهنمایی برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران توسعه، محیط زیست و برنامه‌ریزی کاربری زمین باشد تا برنامه‌ریزی‌های آتی مبتنی بر فرض‌های منطقی و با عدم‌قطعیت کمتری انجام پذیرد.

پی‌نوشت‌ها

[1] The Soil and Water Assessment Tool
[2] Dynamic of Land System
[3] Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs
[4] Natural Capital Project
[5] Enhanced thematic mapper
[6] Operational land imager
[7] Global land cover facility
[8] U.S. Geological survey
[9] Business As Usual
[10] Balanced Development

منابع

Azinmehr, M., Bahremand, A. and Kabir, A., 2013. Simulating the effects of landuse change scenarios on flow hydograph using the spatially distributed hydrological model, WetSpa, in the Dinvar Watershed, Karkheh, Iran. Journal of Watershed Engineering and Management. 7, 500-510. (In Persian with English abstract).

Baral, H., Keenan, R.J., Fox, J.C., Stork, N.E. and Kasel, S., 2013. Spatial assessment of ecosystem goods and services in complex production landscapes: A case study from south-eastern Australia. Ecol. Complex. 13, 35–45.

Baral, H., Keenan, R.J., Sharma, S.K., Stork, N.E. and Kasel, S. 2014a. Spatial assessment and mapping of biodiversity and conservation priorities in a heavily modified and fragmented production landscape in north-central Victoria, Australia. Ecological Indicators. 36, 552-562.

Baral, H., Keenan, R.J., Stork, N.E. and Kasel, S. 2014b. Measuring and managing ecosystem goods and services in changing landscapes: a south-east Australian perspective. Journal of Environmental Planning and Management. 57, 961-983.

Belair, C., Ichikawa, K., Wong, B. and Mulongoy, K. ,2010. Sustainable use of biological diversity in socio-ecological production landscapes. Background to the 'Satoyama Initiative for the benefit of biodiversity and human well-being.'Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Techni-cal Series.

Blainski, É., Porras, E.A.A., Garbossa, L.H.P. and Pinheiro, A., 2017. Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. RBRH, 22.

Burkhard, B., Kroll, F., Muller, F. and Windhorst, W. 2009. Landscapes' capacities to provide ecosystem services–a concept for land-cover based assessments. Landscape online. 15, 22.

Cordingley, J.E., Newton, A.C., Rose, R.J., Clarke, R.T. and Bullock, J.M., 2016. Can landscape-scale approaches to conservation management resolve biodiversity–ecosystem service trade-offs? Journal of applied ecology. 53, 96-105.

Deng, X., Su, H. and Zhan, J., 2008. Integration of multiple data sources to simulate the dynamics of land systems. Sensors. 8, 620-634.

Eskandari, B., 2014. Modeling of land use change using CLUE-S software and its application in regional planning, Case study: Cities of Gorgan, Aliabad and Kordkouy. Master of Science, Gorgan university of agricultural sciences and natural resources. (In Persian with English abstract).

Han, H., Hwang, Y., Ha, S.R. and Kim, B.S., 2015. Modeling future land use scenarios in South Korea: Applying the IPCC special report on emissions scenarios and the SLEUTH model on a local scale. Environmental management. 55, 1064-1079.

Houet, T. and Hubert-Moy, L., 2006. Modeling and projecting land-use and land-cover changes with Cellular Automaton in considering landscape trajectories. EARSeL eProceedings. 5, 63-76.

Iverson, L., Echeverria, C., Nahuelhual, L. and Luque, S., 2014. Ecosystem services in changing landscapes: an introduction. Springer.

Jackson, B., Pagella, T., Sinclair, F., Orellana, B., Henshaw, A., Reynolds, B., Mcintyre, N., Wheater, H. and Eycott, A., 2013. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. Landscape and Urban Planning. 112, 74-88.

Jantz, C.A., Goetz, S.J., Donato, D. and Claggett, P., 2010. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. Computers, Environment and Urban Systems. 34, 1-16.

Malczewski, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in planning. 62, 3-65.

Paudyal, K., Baral, H., Putzel, L., Bhandari, S. and Keenan, R. 2017. Change In Land Use And Ecosystem Services Delivery From Community-Based Forest Landscape Restoration In The Phewa Lake Watershed, Nepal. International Forestry Review. 19, 88-101.

Pickard, B.R., Van Berkel, D., Petrasova, A. and Meentemeyer, R.K., 2017. Forecasts Of Urbanization Scenarios Reveal Trade-Offs Between Landscape Change And Ecosystem Services. Landscape Ecology. 32, 617-634.

Polasky, S., Nelson, E., Pennington, D. and

Johnson, K.A., 2011. The Impact Of Land-Use Change On Ecosystem Services, Biodiversity And Returns To Landowners: A Case Study In The State Of Minnesota. Environmental And Resource Economics. 48, 219-242.

Power, A.G., 2010. Ecosystem Services And Agriculture: Tradeoffs And Synergies. Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London B: Biological Sciences. 365, 959-2971.

Saaty, T.L., 1977. A Scaling Method For Priorities In Hierarchical Structures. Journal Of Mathematical Psychology. 15, 234-281.

Samie, A., Deng, X., Jia, S. and Chen, D., 2017. Scenario-Based Simulation On Dynamics Of Land-Use-Land-Cover Change In Punjab Province, Pakistan. Sustainability. 9, 1285.

Azinmehr, M., Bahremand, A. and Kabir, A., 2013. Simulating The Effects Of Landuse Change Scenarios On Flow Hydograph Using The Spatially Distributed Hydrological Model, Wetspa, In The Dinvar Watershed, Karkheh, Iran. Journal Of Watershed Engineering And Management. 7, 500-510.

Blainski, É., Porras, E.A.A., Garbossa, L.H.P. and Pinheiro, A., 2017. Simulation Of Land Use Scenarios In The Camboriú River Basin Using The SWAT Model. RBRH. 22.

Eskandari, B., 2014. Modeling of land use change using CLUE-S software and its application in regional planning, Case study: Cities of Gorgan, Aliabad and Kordkouy. Master of Science, Gorgan university of agricultural sciences and natural resources.

Han, H., Hwang, Y., Ha, S.R. and Kim, B.S., 2015. Modeling future land use scenarios in South Korea: Applying the IPCC special report on emissions scenarios and the SLEUTH model on a local scale. Environmental management. 55, 1064-1079.

Samie, A., Deng, X., Jia, S. and Chen, D., 2017. Scenario-Based Simulation on Dynamics of Land-Use-Land-Cover Change in Punjab Province, Pakistan. Sustainability. 9, 1285.

Sharp, R., 2014. InVEST 3.0. 1 user guide. The Natural Capital Project. Stanford, CA. Available from http://ncp-dev. stanford. edu/~ dataportal/invest-releases/documentation/current_release/(accessed August 2014).

Tolessa, T., Senbeta, F. and Kidane, M., 2017. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. Ecosystem services. 23, 47-54.

Van der heijden, K., 2011. Scenarios: the art of strategic conversation, John Wiley & Sons.

Veldkamp, A. and Lambin, E.F., 2001. Predicting land-use change. Agriculture, Ecosystems & Environment. 85, 1-6.

Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and Mastura, S.S., 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. Environmental Management. 30, 391-405.

Zarandian, A., Baral, H., Stork, N.E., Ling, M.A., Yavari, A.R., Jafari, H.R. and Amirnejad, H., 2017. Modeling of ecosystem services informs spatial planning in lands adjacent to the Sarvelat and Javaherdasht protected area in northern Iran. Land Use Policy. 61, 487-500.

Environmental Sciences Vol.16 / No.2 / Summer 2018

111-132

Scenario modelling to predict future changes in land cover and/or land use, using InVEST software (Case study: Dohezar and Sehezar forested landscape)

Ardavan Zarandian[1*] , Roya Mousazadeh[2], Jalil Badamfirooz[2] and Alireza Rahmati[1]

[1] Department of Environment, Research Group of Environmental Assessment and Risks, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Tehran, Iran

[2] Department of Environment, Research Group of Environmental Economics, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD),Tehran, Iran

Received: 2017.11.11 **Accepted:** 2018.05.27

Zarandian, A., Mousazadeh, R., Badamfirooz, J. and Rahmati, A., 2018. Scenario modelling to predict future changes in land cover and/or land use, using InVEST software (Case study: Dohezar and Sehezar forested landscape). Environmental Sciences. 16 (2), 111-132.

Introduction: Changes in land use and/or land cover (LULC) are associated with many socio-economic and physical environmental factors. Due to the multiplicity and diversity of variables involved and drivers that cause changes, the prediction of future conditions of LULC patterns is complex and faces many uncertainties. Meanwhile, environmental and development planners need to consider clearly how their current decisions may shape the future structure of the landscape. Therefore, in the policy-making and planning process, there is always the question of how to predict future LULC changes. In recent years, thanks to advances in remote sensing knowledge and spatial data generated from satellite imagery as well as evolving modelling tools, it has been possible to simulate complex natural systems and simplify them with a specific emphasis on more important variables depending on the issues being investigated.

Materials and methods: With this in mind, the present study was conducted in a pilot forested landscape of the Hycanian vegetative region located in Mazandaran Province in northern Iran to detect the changing trends of LULC over the period of 1984-2016 as well as to project and analyze the plausible future shape of the landscape by the year 2040 using InVest scenario-generator software model (Sharp, 2014). To conduct this modelling process, two plausible future scenarios were defined entitled Business As Usual (BAU), which reflected the continuation of current LULC changes with no management intervention, and Balanced Development (BD) involving governmental intervention to prevent current changes through conservation and restoring forest cover along with an adjusted developmental policy for human settlements. Then, the input data required to run the model was provided and the future landscapes under both scenarios were simulated and compared.

[*] Corresponding Author. *E-mail Address*: azarandian@rcesd.ac.ir

Results and discussion: The results showed that, under the BAU scenario, there will be dramatic changes in the landscape structure which will lead to a significant loss in the natural forest cover, destruction of farmlands and its replacement with human settlements. Conversely, the BD scenario showed how land management through forest conservation and restoration policies, simultaneously with adjusted land conversion for settlement construction, can be transformed into a win-win strategy for a balanced development strategy. Also, in this study, the InVEST scenario generator model was compared with some other models (Azinmehr *et al.*, 2013; Blainski *et al.*, 2017; Eskandari, 2014; Han *et al*., 2015; Samie *et al.*, 2017) used to simulate LULC, and its advantages and limitations were discussed.

Conclusion: Finally, the scenario simulation with the method introduced here can be used in different studies (including various environmental assessments, economic valuations, etc.) to make the predictions more accurate. Moreover, this kind of modelling can make insight for planners and decision makers in the fields of development, conservation and land use planning, so that future plans are based on logical assumptions with less uncertainty.

Keywords: Land cover/land use, Modelling, InVEST, Dohezar and Sehezar forested landscape.

Acknowledgement: The authors of this article would like to thank Mr. Majid Ramezani Mehrian, who has played an invaluable role in providing the basic data. This study was sponsored as an Internal Research Project by the Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), affiliated with Iran's Department of Environment.