

## پیش‌بینی رشد مکانی و توسعه پراکنده شهر ساری با به‌کارگیری مدل سلول‌های خودکار- مارکوف و شاخص آنتروپی شانون

علی عسگریان، بهمن جباریان امیری\*، افشین علیزاده شعبانی و جهانگیر فقهی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵)

### چکیده

امروزه شهرها با نرخ رشد بسیار بالا در حال توسعه و گسترش می‌باشند. این مسأله مدیریت رشد شهرها را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن ۲۱ تبدیل کرده است. در این بین، تهیه اطلاعات مکانی- زمانی مرتبط با الگو و میزان رشد شهرها برای درک بهتر فرآیند رشد شهری و اخذ سیاست‌های مدیریتی بسیار حایز اهمیت است. پژوهش حاضر نیز در این راستا به بررسی روند گسترش و میزان توسعه پراکنده شهر ساری پرداخته است. بدین منظور در ابتدا نقشه‌های کاربری/ پوشش سرزمین شهر ساری با پردازش تصاویر چندزمانه ماهواره‌اندست در سال‌های ۱۳۷۱، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۹ تهیه گردید. هم‌چنین با تلفیق روش ارزیابی چندمعیاره و مدل سلول‌های خودکار- مارکوف، رشد این شهر در سال ۱۳۸۹ با شاخص کاپای کلی ۸۳/۸۰ درصد و ROC برابر با ۰/۶۹ پیش‌بینی شد. سپس این مدل برای شبیه‌سازی رشد شهر در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ اجرا گردید. پس از تکمیل دوره مورد مطالعه، روند گسترش افقی شهر ساری با استفاده از شاخص آنتروپی شانون و نیز مساحت کاربری سکونتگاهی به ازای هر فرد مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از آشکارسازی و شبیه‌سازی تغییرات شهر ساری، وسعت کاربری مسکونی این شهر از سال ۱۳۷۱ همسو با رشد جمعیت افزایش یافته و به گسترش خود تا سال ۱۴۱۰ و عبور از مرز ۲۸۰۰ هکتار ادامه خواهد داد. هم‌چنین نتایج حاصل از مقادیر نسبی شاخص آنتروپی شانون نشان از افزایش میزان پراکندگی شهر ساری دارد. اگرچه شهر ساری هنوز به‌طور کامل با پدیده توسعه پراکنده شهری مواجه نشده است، اما عدم وجود موانع فیزیکی محدودکننده در پیرامون این شهر مسأله مدیریت شهری را ملزم به اتخاذ رویکردی جامع در مدیریت بر محدوده شهر، کنترل گسترش افقی آن و جلوگیری از مشکلات محیط‌زیستی این پدیده در آینده خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، مدل سلول‌های خودکار- مارکوف، شاخص آنتروپی شانون، پراکنده‌روی شهری، شهر ساری

۱. گروه محیط زیست، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: jabbarian@ut.ac.ir

## مقدمه

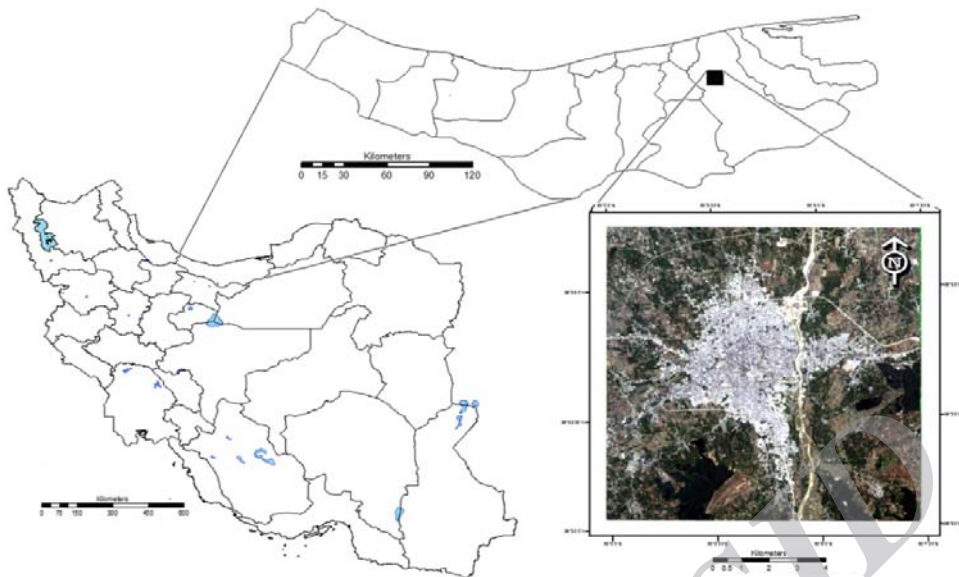
اگر چه شهرها تنها ۳ درصد از سطح کره زمین را اشغال کرده‌اند (۲۷) ولی با نرخ و مقیاس غیر قابل تصویری در سراسر جهان (۳۱) و خصوصاً در کشورهای در حال توسعه (۱۸) در حال رشد و گسترش هستند. رشد شهرها (Urban growth) دارای دو بعد جمعیت‌شناختی و مکانی است، بدین معنی که با افزایش جمعیت در شهرها نیاز برای سکونتگاه افزایش می‌یابد و شهرها با رشد مکانی مواجه می‌شوند (۲۸). در بسیاری از موارد پدیده رشد شهر با عنوان توسعه پراکنده شهری (Urban sprawl) شناخته می‌شود (۳۱). توسعه پراکنده شهری به توسعه بی‌رویه و بی‌برنامه شهرها اطلاق می‌شود که نه تنها باعث تخریب فضای پیرامون شده بلکه موجب توسعه نامتوازن و بی‌قواره شهرها می‌شود (۷ و ۳۱). این پدیده دارای اثرات متعددی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی است که از جمله این اثرات می‌توان به افزایش آلودگی منابع آب، خاک و هوا، افزایش مصرف انرژی و تشدید پدیده جزایر حرارت شهری، تغییر اقلیم، تخریب پوشش گیاهی، زمین‌های کشاورزی و همچنین اثرات منفی بر سلامت روحی و جسمی ساکنان شهرها اشاره کرد (۱۴، ۲۶ و ۳۳).

تاکنون تلاش‌های بسیاری در زمینه بررسی و کمی کردن توسعه پراکنده شهرها صورت گرفته است. به‌عنوان مثال نلسون (۲۲) و هانسون و فریهاگ (۱۵) شاخص‌های متعددی مانند تغییرات دوره‌ای جمعیت ساکنین شهر، میزان مصرف انرژی، محاسبه امور مالیاتی (Fiscal measures)، عبور و مرور وسایط نقلیه در سطح شهر را پیشنهاد و از آنها برای بررسی و توصیف این پدیده استفاده کردند. علاوه بر شاخص‌های مذکور، در مطالعات بسیاری با کاربرد فنون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی به بررسی پدیده توسعه پراکنده شهری، به‌خصوص تغییرات آن در طول زمان پرداخته‌اند (۱۷ و ۳۲). به‌عنوان مثال سفیانیان و همکاران (۲۹) با به‌کارگیری این فنون به بررسی توسعه پراکنده شهر اصفهان پرداختند. سروستانی و همکاران (۲۷) نیز علاوه بر استفاده از فنون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی از شاخص آنتروپی

شانون برای بررسی توسعه پراکنده شهر شیراز استفاده کردند. مطالعات متعددی از جمله (۱۶ و ۳۰) نیز توانستند از رهیافت اکولوژی سیمای سرزمین برای بررسی توسعه پراکنده شهری استفاده کنند. در این بین توسعه و ابداع سنجه‌های جدید سیمای سرزمین مانند سنجه LAI (۲۸) و سنجه R (۳۱) ابعاد ویژه‌ای در مطالعه توسعه پراکنده شهرها با استفاده از رهیافت اکولوژی سیمای سرزمین به‌وجود آوردند.

از سویی دیگر پیشرفت‌های اخیر در زمینه علوم کامپیوتر و کاربرد آن در برنامه‌ریزی شهری به‌خصوص از اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی، رویکردی جدید در مدل‌سازی تغییرات مکانی را به همراه داشت (۳ و ۱۰). از آن زمان تاکنون مدل‌های دینامیکی و آماری بسیاری برای شبیه‌سازی رشد شهر ابداع شده‌اند (۱۳). در بین مدل‌های دینامیکی، مدل سلول‌های خودکار-مارکوف (Cellular automata-Markov) با تعیین احتمال تغییرات کاربری/پوشش سرزمین در فرآیند زنجیره مارکوف (Markov chain) و نیز شبیه‌سازی تغییرات مکانی آن از راه تعیین قوانین محلی با استفاده فیلتر مکانی سلول‌های خودکار و نقشه‌های شایستگی کاربری‌ها به مدل‌سازی دینامیک تغییرات زمانی و مکانی کاربری/پوشش سرزمین می‌پردازد (۳).

امروزه تحلیل پراکنش مکانی، ویژگی‌های ساختاری شهرها و نیز مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات زمانی-مکانی آنها به یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی تبدیل شده است (۱۹ و ۲۵). در این مورد، طراحان و برنامه‌ریزان شهری جهت درک بهتر فرآیند رشد شهری و اخذ سیاست‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی مؤثر نیازمند اطلاعات مکانی و زمانی مرتبط با الگو و میزان رشد شهرها، می‌باشند (۱). لذا در این مطالعه سعی بر آن است تا با پردازش تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای و همچنین با تلفیق روش ارزیابی چند معیاره و مدل سلول‌های خودکار-مارکوف، تصویری از رشد گذشته و آینده شهر ساری ترسیم گردد تا در نهایت براساس اطلاعات به‌دست آمده از گستره شهر ساری، روند توسعه پراکنده آن با استفاده از شاخص آنتروپی و نیز تغییرات وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد مشخص گردد.



شکل ۱. تصویر رنگی حقیقی ماهواره لندست از منطقه مورد مطالعه

۱۳۷۱، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۹ جهت تهیه نقشه‌های کاربری/ پوشش سرزمین شهر ساری و بخشی از حومه آن شهر استفاده شد. هم‌چنین به منظور انجام تصحیحات هندسی تصاویر و ارزیابی صحت نقشه‌های حاصل، از نقشه توپوگرافی تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس‌های ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ و نیز نقاط برداشت شده توسط دستگاه موقعیت‌یاب جهانی در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۸۳ استفاده شد (جدول ۱).

## روش کار

### پردازش تصاویر ماهواره‌ای

به‌عنوان اولین گام در این پژوهش به پردازش تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شد. بدین منظور با کاربرد معادله خطی درجه اول و روش نمونه‌گیری نزدیک‌ترین همسایه، تصویر سال ۱۳۸۹ با استفاده از نقاط با مختصات معلوم بر روی زمین و سایر تصاویر با استفاده از روش تصویر به تصویر (استفاده از نقاط مشخص در تصاویر مانند تقاطع جاده‌ها) زمین مرجع شدند. با استفاده از روابط ارائه شده توسط چاندر و همکاران (۱۱)، ارزش سلول‌های تصاویر به مقادیر بازتاب زمینی تبدیل

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شهر ساری به‌عنوان مرکز شهرستان ساری و هم‌چنین مرکز استان مازندران دارای جمعیتی بیش از ۲۷۰ هزار نفر و نرخ رشد سالانه برابر با ۲/۸۸ درصد است (۵) که در طول کلیه دوره‌های سرشماری عمومی نفوس و مسکن به‌عنوان پرجمعیت‌ترین شهر استان مازندران شناخته شده است (۲). این شهر از سمت شرق به شهر نکا، از غرب به شهر قائمشهر، از جنوب به رشته‌کوه البرز و از شمال به دریای خزر می‌رسد. هم‌چنین رودخانه تجن از میان این شهر می‌گذرد. دمای متوسط سالانه شهر ساری ۱۸/۹ درجه سانتی‌گراد است (۴). مجموع بارندگی سالانه آن بیش از ۵۰۰ میلی‌متر و اقلیم آن براساس روش دومارتن مدیترانه‌ایی می‌باشد (۴). شکل ۱ موقعیت شهر ساری را نشان می‌دهد.

### داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر سنجنده‌های TM و ETM+ ماهواره لندست به شماره ردیف و گذر ۳۵-۱۶۳ در سه مقطع زمانی

جدول ۱. تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی مورد استفاده

نوع داده	ماهواره (سنجنده)	قدرت تفکیک/ مقیاس	تاریخ (شمسی)
تصویر ماهواره‌ای	لندست ۴ (TM)	۳۰ متر	۱۳۸۹
	لندست ۷ (ETM+)	۳۰ متر	۱۳۸۱
	لندست ۵ (TM)	۳۰ متر	۱۳۷۱
نقشه توپوگرافی	---	۱:۵۰۰۰۰	۱۳۷۸
	---	۱:۲۵۰۰۰	۱۳۷۳

جدول ۲. توصیف طبقات کاربردی / پوشش سرزمین

طبقات کاربردی / پوشش	توصیف طبقات
سکونتگاه	شامل کلیه زمین‌های مسکونی ساخته شده
پوشش سبز	شامل پارک‌های شهری، زمین‌های تحت کشت و زمین‌های آیش
بایر	شامل بستر رودخانه تچن و زمین‌های بدون پوشش سبز
آب	شامل آبندها و پوشش‌های آبی موجود در محدوده شهر

بیانگر نوع سلول‌ها است، ۳) یک مجموعه از قوانین انتقال، که توصیفی ریاضی از نحوه تغییر حالت سلول‌ها نسبت به یکدیگر است و ۴) خود آمیزشی (Self-reproductive) سلول‌ها که در آن یک سلول براساس قوانین انتقال به سلول‌هایی با حالت دیگر تغییر می‌کند، می‌باشد (۲۱). برای انجام مدل سلول‌های خودکار- مارکوف به ورودی‌هایی شامل نقشه مبنا (Initial states)، نقشه‌های شایستگی حاصل از روش ارزیابی چند معیاره (Multi-criteria decision making) و ماتریس احتمال انتقال سرزمین (Markov transition matrix)، و هم‌چنین پارامترهایی از جمله تعداد تکرار (بیانگر تعداد سال-های مدل‌سازی) و فیلتر مجاورت (برای اختصاص رتبه‌های پایین شایستگی به سلول‌های منفرد) نیاز است که در ادامه به شرح آنها پرداخته شده است.

#### ماتریس احتمال انتقال سرزمین

این ماتریس یک ماتریس  $m \times m$  شامل  $m$  نوع طبقه کاربردی / پوشش زمین است. هر جز این ماتریس نسبت سلول‌هایی که از هر

شدند تا تصحیحات رادیومتریک نیز انجام شود (۱۱). سپس براساس سطح اول طبقه‌بندی اندرسون و همکاران (۸)، تعداد ۴ طبقه کاربردی / پوشش سرزمین شامل مناطق مسکونی، پوشش سبز، بایر و آب در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد (جدول ۲). پس از تهیه نمونه‌های آموزشی حاصل از پیمایش میدانی و کاربرد روش‌های شناسایی پدیده، با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (Maximum likelihood) (۶)، نقشه‌های کاربردی / پوشش سرزمین برای سال‌های ۱۳۷۱، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۹ تهیه گردیدند.

#### مدل‌سازی رشد شهر

به منظور تکمیل دوره مورد مطالعه از ترکیب روش ارزیابی چندمعیاره و مدل سلول‌های خودکار- مارکوف استفاده شد (۱۲) تا رشد شهر ساری برای سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ شبیه‌سازی گردد. مدل سلول‌های خودکار براساس فعل و انفعال چندین جز شامل: ۱) محیط سلولی (Grid or lattice) در یک فضای ۱، ۲ و یا چند بعدی، ۲) حالت سلول (Cell state) که

۲۵۵-۰ استفاده شد. هم‌چنین محدودیت‌هایی شامل بستر رودخانه تجن، کاربری سکونتگاهی موجود و پوشش‌های آب با استفاده از منطق بولین تبدیل به نقشه شدند. در تعیین محدودیت‌های رشد شهری سعی شد تا آن‌جا که ممکن است پوشش‌های سبز و زمین‌های بایر عمومی مانند پارک‌های شهری، زمین‌های خاکی ورزشی و غیره شناسایی و از فضای شبیه‌سازی رشد شهر خارج شوند. لازم به ذکر است که برای سایر طبقات کاربری/ پوشش سرزمین تنها فاکتور نوع کاربری سرزمین در تهیه نقشه‌های شایستگی به‌کار گرفته شد. در نهایت مدل ارزیابی چندمعیاره با مشارکت محدودیت‌ها و فاکتورهای وزن‌دهی شده اجرا گردید تا نقشه شایستگی کاربری مسکونی حاصل گردد. هم‌چنین نقشه‌های شایستگی برای پوشش سبز، آب و زمین‌های بایر نیز تنها براساس محدودیت‌های هر پوشش تهیه گردید.

#### اجرای مدل

با اختصاص ماتریس احتمال انتقال سرزمین در سال ۱۳۸۹، نقشه‌های شایستگی سیمای سرزمین و نقشه مبنا (نقشه کاربری سال ۱۳۸۱)، پیش‌بینی کاربری سکونتگاهی برای سال ۱۳۸۹ انجام شد. تعداد تکرارها در این مدل برابر تعداد سال‌های بین نقشه مبنا و سال مورد پیش‌بینی مدل (از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹، برابر با ۸ سال) انتخاب شد. (۱۲).

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی صورت گرفته در این مطالعه از شاخص کاپا و شاخص ROC (Relative Operating Characteristic) برای ارزیابی صحت مدل‌های کاربری پوشش زمین استفاده گردید. شاخص کاپا، صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی (حالتی که یک تصویر کاملاً به‌صورت تصادفی طبقه‌بندی شده باشد) محاسبه می‌کند (۲۳) و شاخص ROC نموداری از حدود آستانه‌های احتمالی متفاوت است که در آن پیکسل‌هایی که به درستی به‌عنوان کاربری مورد مطالعه پیش‌بینی شده‌اند در برابر پیکسل‌هایی که نادرست شبیه‌سازی شده‌اند قرار می‌گیرند و سطح زیر منحنی رسم شده براساس

کاربری/ پوشش زمین به کاربری/ پوشش زمین دیگر در بازه زمانی مورد نظر تغییر می‌کند را نشان می‌دهد. هم‌چنین اعداد قطری در این ماتریس نسبت سلول‌هایی که در طول زمان بدون تغییر می‌ماند را نشان می‌دهد (۲۰). بدین منظور با اختصاص نقشه‌های کاربری/ پوشش زمین پردازش شده در سال‌های ۱۳۷۱ و ۱۳۸۱ در ماژول Markov chain موجود در نرم‌افزار Idrisi Kilimanjaro (۱۲) ماتریس احتمال انتقال سرزمین برای کالیبراسیون مدل در سال ۱۳۸۹ و با اختصاص مجدد نقشه‌های کاربری/ پوشش سرزمین در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۹، ماتریس احتمال انتقال سرزمین برای شبیه‌سازی رشد شهر در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ به‌دست آمد.

#### نقشه‌های شایستگی سرزمین

از آنجا که ماتریس احتمال انتقال سرزمین مکان تغییرات کاربری/ پوشش زمین به یکدیگر را مشخص نمی‌کند؛ لذا از روش ارزیابی چند معیاره استفاده شد تا نقشه‌های شایستگی برای هر طبقه کاربری/ پوشش زمین براساس مجموعه‌ای از قوانین انتقال تهیه گردد (۱۲). ارزیابی چند معیاره مجموعه‌ای از فاکتورهای وزن‌دار شده و محدودیت‌هایی است که به‌ترتیب توسط توابع عضویت فازی و منطق بولین تبدیل به نقشه می‌شوند. برای تهیه نقشه شایستگی کاربری سکونتگاهی، در بخش فاکتورها، سه فاکتور نزدیکی به راه‌های اصلی، نزدیکی به مراکز اقتصادی- تجاری شهر و کاربری‌هایی که احتمال شهری شدن آنها زیاد است شناسایی شدند. پس تهیه نقشه‌های پایه هر کدام از آنها عمل مقیاس‌گذاری توسط توابع عضویت فازی انجام شد و اهمیت نسبی هر یک از این آنها با اختصاص وزن نسبی به هر جفت فاکتورها طی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Analytical Hierarchy Process (AHP)) تعیین گردید. برای فاکتور نزدیکی به جاده از تابع جی شکل معکوس، برای فاکتور نزدیکی به مراکز اقتصادی- تجاری شهر از تابع خطی معکوس و برای نوع کاربری از مقیاس‌گذاری توسط ماتریس احتمال انتقال و استانداردسازی اعداد آن در محدوده

کاربری سکونتگاهی حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و نیز دو نقشه حاصل از پیش‌بینی رشد شهر محاسبه گردید. براساس نظر یه و لی (۳۴)، ناحیه‌های تعریف شده برای بررسی میزان پراکندگی باید به صورت حلقه‌هایی نسبت مرکز شهر (مانند رویکرد مورد استفاده در این تحقیق) یا نسبت به جاده‌های اصلی قرار گرفته باشند، به طوری که با مشخص کردن مساحت هر ناحیه براساس نظر کارشناس، کل محدوده شهر را در بر بگیرد. هم‌چنین علاوه بر آن سعی شد تا میزان پراکنده‌روی شهر ساری با مقایسه وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد در طول دوره مورد مطالعه نیز بررسی گردد. براساس نظر بارنس (۹) چنانچه وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد در طول زمان افزایش یابد، شهر با توسعه پراکنده مواجه شده است.

شکل ۳ نشان‌دهنده مدل مفهومی مراحل انجام کار است. کلیه پردازش‌های انجام گرفته به منظور اجرای هر یک از مراحل پردازش تصاویر، مدل‌سازی رشد شهر و محاسبه شاخص آنتروپی شانون با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI 4.8، ArcGIS 9.3 و Idrisi kilimanjaro صورت گرفت.

## نتایج

### پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در ابتدا به منظور پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تصحیحات هندسی و رادیومتریک بر روی تصاویر صورت گرفت که در نتیجه آن کلیه تصاویر با RMSE کمتر از ۰/۳۸، زمین مرجع و مقادیر ارزش سلول‌های تصویر به مقادیر بازتاب تبدیل شدند. سپس با کاربرد روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال نقشه‌های کاربری/ پوشش زمین تهیه گردیدند (شکل ۴). در این بین تصویر سال ۱۳۸۹ با ضریب کاپا ۹۰ و صحت کلی ۹۴ و تصویر سال ۱۳۸۱ با ضریب کاپا ۸۶ و صحت کلی ۸۹ به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین صحت پردازش تصاویر را نشان دادند (جدول ۳). با استناد به تصاویر حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، وسعت کاربری مسکونی در منطقه مورد مطالعه در

آن، به‌عنوان شاخصی از کارایی مدل قلمداد می‌شود (۲۴). هم‌چنین برای تکمیل دوره مورد مطالعه، مدل سلول‌های خودکار- مارکوف جهت پیش‌بینی رشد مکانی شهر ساری در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ نیز مورد استفاده قرار گرفت.

### بررسی توسعه پراکنده

پس از تکمیل دوره مطالعه به منظور بررسی رشد افقی و میزان توسعه پراکنده شهر ساری از شاخص آنتروپی شانون و تحلیل وسعت کاربری مسکونی به ازای هر فرد استفاده شد. آنتروپی شانون، شاخصی برای بیان رشد فشرده یا پراکنده شهری است که از آن می‌توان در تمام موقعیت‌های جغرافیایی استفاده کرد (۲۷). در این شاخص فرض بر آن است که شهر به  $n$  ناحیه تقسیم‌بندی شده است و متغیر  $X$  در هر ناحیه  $\{i \in 1, 2, \dots, n\}$  مقدار  $X_i$  را شامل می‌شود (رابطه ۱).

$$H_n = -\sum_i^n P_i \log(1/P_i) \quad [1]$$

$H_n$ : شاخص آنتروپی مطلق شانون

$P_i$ : احتمال (یا نسبت) حضور متغیر  $X$  در ناحیه  $i$  یا به عبارت دیگر، نسبت مناطق ساخته شده در ناحیه  $i$  به کل مناطق ساخته شده است که از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

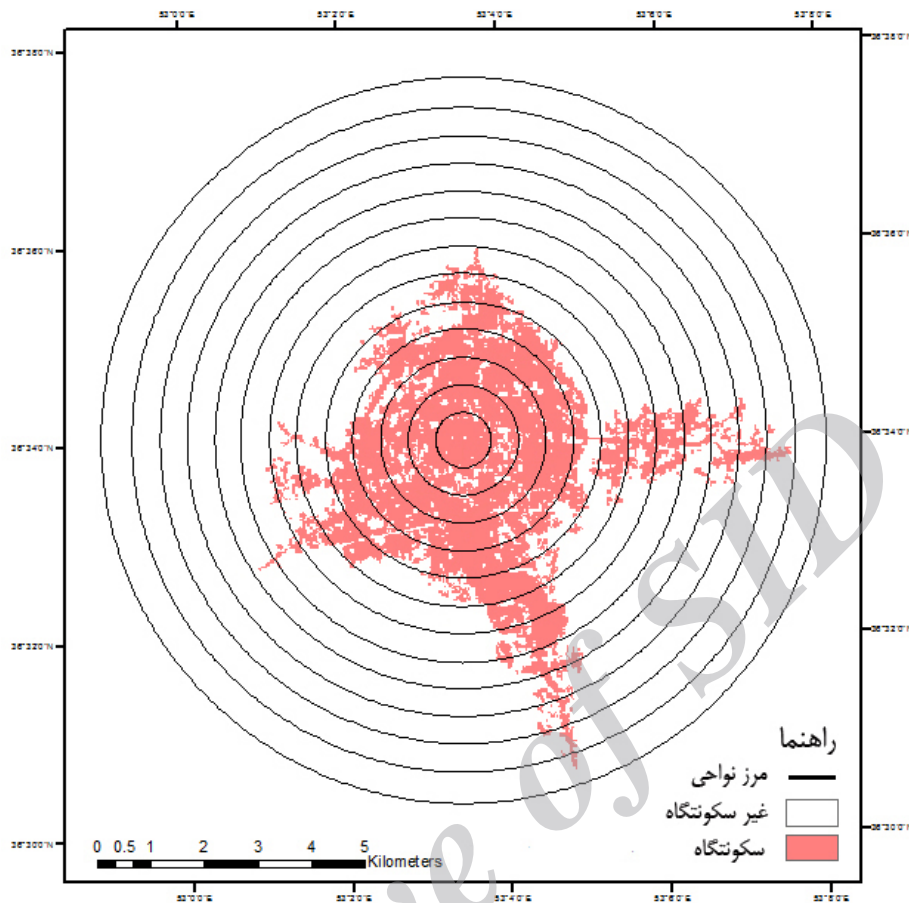
$$P_i = X_i / \sum_k^n X_k \quad [2]$$

هرچه مقادیر شاخص آنتروپی مطلق شانون به عدد صفر نزدیک گردد، به معنی فشرده‌گی بیشتر در رشد شهری است که در آن جمعیت و تراکم در گروه‌های داخلی شهر متمرکز می‌شوند (۱ و ۷). هم‌چنین اگر مقادیر این شاخص بر لگاریتم تعداد ناحیه‌های تعریف شده ( $\log n$ ) تقسیم شود، مقدار آنتروپی نسبی شانون به دست می‌آید (۲۷) که در این صورت مقادیر مربوط به این شاخص بین صفر تا یک تغییر خواهد کرد (رابطه ۳).

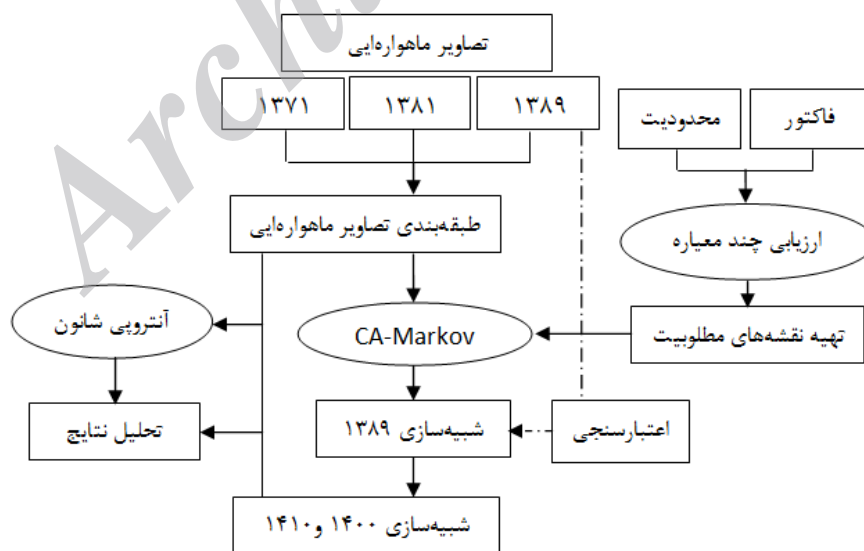
$$H_n = \sum_i^n P_i \log(1/P_i) / \log(n) \quad [3]$$

$H_n$ : شاخص آنتروپی نسبی شانون

به منظور محاسبه شاخص آنتروپی شانون تعداد ۱۳ حلقه متحدالمرکز با نقطه کانونی واقع بر مرکز شهر ساری به عرض ۵۰۰ متر ایجاد (شکل ۲) و شاخص مذکور برای هر سه نقشه

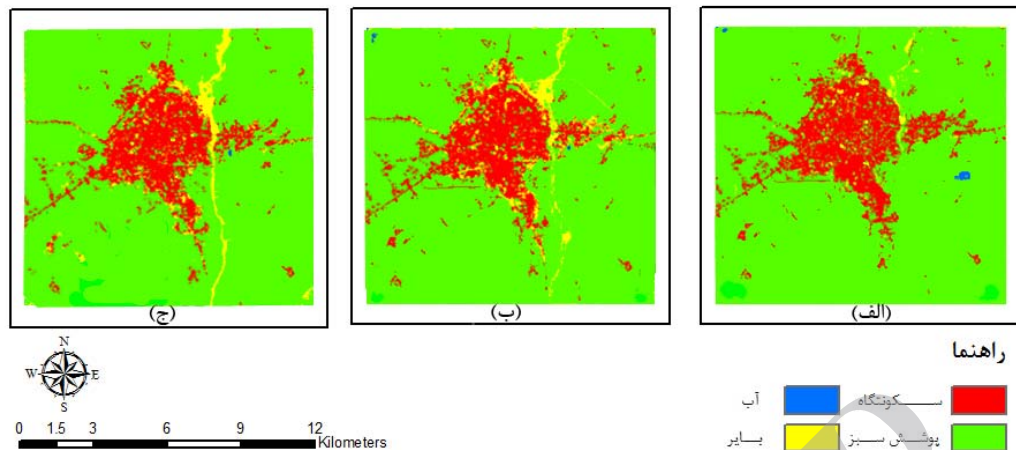


شکل ۲. نحوه قرارگیری حلقه‌ها جهت محاسبه شاخص آنتروپی شانون



شکل ۳. مدل مفهومی مراحل انجام تحقیق





شکل ۴. نقشه‌های کاربری/ پوشش سرزمین در سال الف (۱۳۸۹، ب) ۱۳۸۱ و ج) ۱۳۷۱

جدول ۳. مساحت کاربری/ پوشش سرزمین و نتایج ارزیابی صحت آنها

سال	مساحت (هکتار)					ارزیابی صحت
	مسکونی	پوشش سبز	آب	بایر	ضریب کاپا	
۱۳۷۱	۱۴۴۰	۱۵۲۶۹	۲۸	۲۶۳	۸۶	صحت کلی ۸۹
۱۳۸۱	۱۸۵۳	۱۴۸۳۱	۳۲	۲۸۴	۸۷	۹۱
۱۳۸۹	۲۱۴۷	۱۴۷۱۳	۵۶	۸۴	۹۰	۹۴

در نهایت با پیش‌بینی نقشه کاربری/ پوشش سرزمین برای سال ۱۳۸۹ و با مقایسه آن با نقشه واقعی حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در همان سال، میزان شاخص کاپای کلی ۸۳/۸۰ درصد و ROC برابر با ۰/۶۹ به‌دست آمد. با استناد به مقادیر صحت پیش‌بینی به‌دست آمده، نقشه کاربری مسکونی برای سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ نیز پیش‌بینی گردید که براساس آن وسعت کاربری مسکونی شهر ساری در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ به‌ترتیب به ۲۵۵۰ و ۲۸۹۱ هکتار خواهد رسید. شکل ۶ صحت مکانی پیش‌بینی مدل سلول‌های خودکار- مارکوف در سال ۱۳۸۹ را نشان می‌دهد.

#### تعیین گسترش افقی و میزان توسعه پراکنده شهر

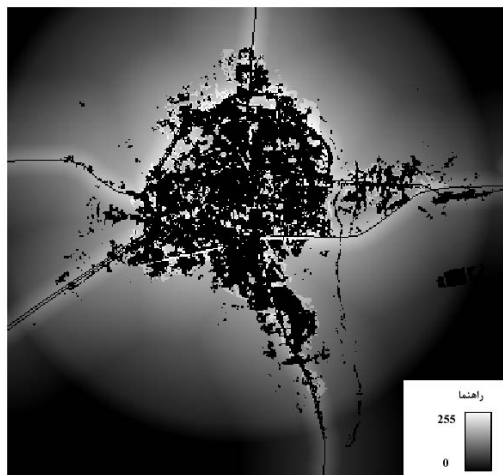
پس از پیش‌بینی رشد کاربری مسکونی از شاخص آنتروپی شانون استفاده شد تا گسترش افقی شهر ساری در طول ۱۸ سال

مدت زمان مورد تحقیق روندی افزایشی داشته و وسعت آن از حدود ۱۴۰۰ هکتار در سال ۱۳۷۱ به بیش از ۲۰۰۰ هکتار در سال ۱۳۸۹ رسیده است (جدول ۳).

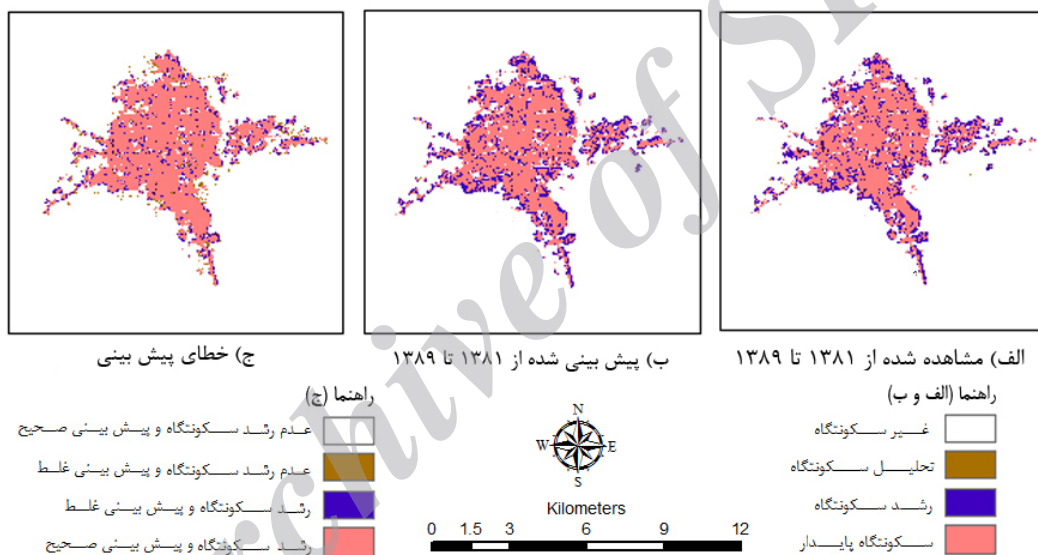
#### پیش‌بینی رشد مکانی شهر ساری

به منظور اجرای مدل سلول‌های خودکار- مارکوف، ابتدا ماتریس احتمال انتقال سرزمین تهیه گردید. پس از آن سه فاکتور شناسایی شده با مقایسه‌گذاری توسط توابع عضویت فازی استاندارد شدند و وزن هر یک از آنها در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مشخص گردید که براساس آن فاکتور نزدیکی به مراکز اقتصادی- تجاری شهر با مقدار عددی ۰/۴۳ و فاکتور نوع کاربری زمین با مقدار عددی ۰/۱۳ به‌ترتیب بیشترین و کمترین وزن را به خود اختصاص دادند. شکل ۵ نشان‌دهنده نقشه شایستگی کاربری سکونتگاهی است.





شکل ۵. نقشه شایستگی کاربری سکونتگاهی



شکل ۶. صحت مکانی پیش‌بینی مدل سلول‌های خودکار- مارکوف

و مطلق آنتروپی شانون است. هم‌چنین نتایج حاصل از بررسی‌های جمعیتی نشان داد که وسعت کاربری مسکونی برحسب هکتار به ازای هر فرد بدون بین مقادیر ۶۸ (در سال ۱۳۴۱) تا ۷۳ (در سال ۱۳۸۱) در حال نوسان است (جدول ۵).

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی توسعه پراکنده شهر ساری با کاربرد

تحقیق و هم‌چنین ۲۱ سال پیش‌بینی شده تعیین گردد. براساس مقادیر به‌دست آمده از شاخص آنتروپی شانون، مقادیر این شاخص در سال‌های گذشته و آینده به‌دلیل افزایش وسعت کاربری سکونتگاهی با سیر صعودی همراه است. مقادیر نسبی این شاخص در سال ۱۳۷۱ برابر با ۰/۷۸ بوده و براساس مدل‌سازی صورت گرفته به بیش از ۰/۸۵ در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید. جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر به‌دست آمده از شاخص نسبی

جدول ۴. مقادیر مطلق و نسبی شاخص آنتروپی شانون

سال	آنتروپی مطلق شانون	آنتروپی نسبی شانون
۱۳۷۱	۰/۸۷۲۴۲۳	۰/۷۸۳۱۸۵
۱۳۸۱	۰/۸۸۱۵۵۳	۰/۷۹۱۳۸۰
۱۳۸۹	۰/۸۹۲۳۴۵	۰/۸۰۱۰۶۹
۱۴۰۰	۰/۹۳۵۲۲۶	۰/۸۳۹۵۶۳
۱۴۱۰	۰/۹۴۸۴۸۲	۰/۸۵۱۴۶۳

جدول ۵. وسعت سکونتگاه به ازای هر فرد

سال	سال				
	۱۳۷۱	۱۳۸۱	۱۳۸۹	۱۴۰۰	۱۴۱۰
مساحت کاربری مسکونی (Ha)	۱۲۶۸/۴۰	۱۷۳۸/۵۳	۲۰۲۱/۸۵	۲۵۵۰/۳۹	۲۸۹۱/۱۶
جمعیت (فرد)*	۱۷۳۹۹۴	۲۳۵۱۲۸	۲۹۳۲۱۲	۳۵۹۴۰۹	۴۲۴۸۲۰
سکونتگاه به ازای هر فرد (فرد/m <sup>2</sup> )	۷۲/۸۹	۷۳/۹	۶۸/۹	۷۰/۹۶	۶۸/۰۵

\*: جمعیت در سال‌های مذکور براساس میان‌یابی اطلاعات مرکز آمار ایران به‌دست آمد.

از آن‌جا که بررسی میزان توسعه پراکنده شهری بدون بررسی روند تغییر جمعیت آن منجر به بررسی دقیق این پدیده نخواهد شد (۱۰) لذا با در اختیار داشتن جمعیت شهر ساری در سال‌های گذشته امکان بررسی و مقایسه وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد در طول زمان مورد مطالعه نیز فراهم گردید. وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد در شهر ساری به‌طور متوسط برابر با ۷۰ مترمربع به‌دست آمد. در مقایسه با سایر مطالعه صورت گرفته، سروسستانی و همکاران مقدار وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد را به‌طور متوسط برابر با ۱۲۰ مترمربع به‌دست آوردند. با این حال در مطالعه سفیانیان و همکاران مقادیر شاخص مذکور در طول زمان روندی صعودی را از خود نشان داد از حدود ۷۷ مترمربع در سال ۱۹۵۶ به بیش از ۱۲۰ مترمربع در سال ۲۰۰۶ رسید. نتایج این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات مشابه حاکی از تمرکز بیشتر جمعیت شهر ساری در داخل گروه‌های شهری نسبت به سایر شهرهای مورد مقایسه است.

فنون سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و نیز شاخص‌های ابداع شده برای این منظور پرداخته شد. استفاده از شاخص‌های مختلف توسعه یافته مانند شاخص آنتروپی شانون و پایش تغییرات آن در طول زمان، می‌تواند در فهم بهتر ما از پدیده توسعه پراکنده شهری مفید واقع شوند. شاخص آنتروپی شانون (به گونه‌ای که در قسمت مواد و روش‌ها توصیف شد)، برای اولین بار در ایران توسط سروسستانی و همکاران (۲۷) در بررسی توسعه پراکنده شهر شیراز و سپس در مطالعه حاضر در شهر ساری مورد استفاده قرار گرفت. در این دو مطالعه، شاخص آنتروپی شانون به‌دلیل افزایش جمعیت و در نتیجه توسعه کاربری مسکونی روندی افزایشی را در طول زمان از خود نشان داد. در مطالعه حاضر، شاخص آنتروپی شانون در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹ مقدار سالیانه بیشتری از توسعه پراکنده بین سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۱ را از خود نشان داد که این امر که حاکی از شدت بروز سالیانه این پدیده در مقطع زمانی اول نسبت به مقطع زمانی دوم است.

از آنجایی که در پیرامون شهر ساری عوامل بارز و مشخصی که گسترش افقی شهر را محدود کننده وجود ندارد لذا اتخاذ سیاست‌هایی به منظور مدیریت و نظارت بر گسترش شهر ساری لازم و ضروری است. همچنین عدم وجود برنامه‌های جامع مدیریت و برنامه‌ریزی شهری برای حفاظت از پوشش‌های سبز، تأمین سکونتگاه و جلوگیری از توسعه پراکنده در این شهر به شدت احساس می‌شود. علاوه بر آن مطالعات دیگری نیز نیاز است تا علاوه بر استفاده از این فنون، از رهیافت اکولوژی سیمای سرزمین نیز در بررسی پدیده توسعه پراکنده استفاده کنند. کمی کردن ساختار الگوهای مکانی زمین با استفاده از سنججه‌های سیمای سرزمین در کنار سایر شاخص‌های توسعه یافته می‌تواند منجر به ایجاد چارچوبی مناسب برای بررسی میزان توسعه پراکنده شهری شوند.

### سپاسگزاری

بدین وسیله نگارندگان از خانم الناز رستگار لاری به‌خاطر همکاری‌های صمیمانه در تکمیل نسخه نهایی مقاله حاضر، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

علاوه بر موارد انجام شده در مطالعات مشابه، در پژوهش حاضر به مدلسازی توسعه شهر ساری و بررسی میزان پراکندگی آن در سال‌های آینده در دو مقطع زمانی در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ نیز پرداخته شد. براساس شبیه‌سازی صورت گرفته توسط مدل سلول‌های خودکار- مارکوف، میزان شاخص آنتروپی شانون در سال‌های آینده با شدت بیشتری افزایش خواهد یافت که براساس آن مقدار آنتروپی شانون در سال‌های بین ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ به بیشترین مقدار رشد سالیانه خود (به میزان ۴ برابر بیشتر از مقاطع زمانی دیگر) خواهد رسید. البته باید توجه داشت که بخشی از این میزان افزایش، به دلیل قدرت تفکیک سلول‌های تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده و نیز عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی صحیح تغییرات کاربری/ پوشش زمین است. با پیش‌بینی جمعیت شهر ساری براساس میزان نرخ کنونی رشد آن، وسعت کاربری سکونتگاهی با ازای هر فرد با تغییر محسوسی رو برو نخواهد بود. به‌طوری‌که از سال ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ با روند جزئی افزایشی و از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ با روند جزئی کاهشی مواجه خواهد شد البته باید توجه داشت که این پیش‌بینی‌ها با استناد بر ادامه روند کنونی، عدم تغییر معنی‌دار در نرخ رشد جمعیت و توسعه حال حاضر کاربری مسکونی در شهر ساری است.

### منابع مورد استفاده

۱. احدنژاد روشتی، م. و س. ا. حسینی. ۱۳۹۰. ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات و پراکنش افقی شهرها با استفاده از تصاویر چند زمانه ماهواره و سامانه اطلاعات جغرافیایی (نمونه موردی شهر تبریز در مقطع زمانی ۱۳۸۹-۱۳۶۳). پژوهش و برنامه‌ریزی شهری ۴: ۱-۲۰.
۲. تولایی، س. و اخزایی. ۱۳۸۵. الگوی توزیع فضایی جمعیت در نظام شهری استان مازندران. فصلنامه جغرافیا ۱۰ و ۱۱: ۱۲۵-۱۴۲.
۳. خوش‌گفتار، م. و م. طالعی. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی رشد شهری در تهران، با استفاده از مدل CA-Markov. سنجش از دور و GIS ایران ۲(۲): ۱۷-۳۳.
۴. سازمان آمار ایران، ۱۳۸۹. سالنامه آماری استان مازندران
۵. سازمان آمار ایران، ۱۳۹۰. گزیده نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن.
۶. علوی‌پناه، س. ک. ۱۳۸۲. کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران.
۷. وارثی، ح. و ع. رجایی جزین و م. قنبری. ۱۳۹۱. تحلیلی بر عوامل خزش شهری و رشد فیزیکی شهر گناباد با استفاده از مدل‌های آنتروپی و هلدرن. آمایش سرزمین ۶: ۷۹-۱۰۰.

8. Anderson, J. R., E. Hardey, J. Roach and R.E. Witmer. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. US geological survey professional paper, Washington, DC, 964, 28 pp.
9. Barnes, K.B., J.M. Morgan, M.C. Roberge and S. Lowe. 2001, Sprawl development: Its patterns, consequences, and measurement, Towson University, Available on [http://chesapeake.towson.edu/landscape/urbansprawl/download/Sprawl\\_white\\_paper.pdf](http://chesapeake.towson.edu/landscape/urbansprawl/download/Sprawl_white_paper.pdf), accessed September 2012.
10. Batty, M., Y. Xie and Z. Sun. 1999, Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems* 23( 3): 205-233.
11. Chander, C., B. Markham and D. Helder. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113(5): 893-903.
12. Eastman, J.R. 2006. Guide to GIS and image processing. Clark University, Worcester, MA. USA.
13. Feng, Y., Y. Liu, X. Tong, M. Liu and S. Deng. 2011. Modeling dynamic urban growth using cellular automata and particle swarm optimization rules. *Landscape and Urban Planning* 102: 188-196.
14. Frumkin, H. 2002. Urban sprawl and public health. *Public Health Report* 117( 3): 201-207.
15. Hanson, R. and J. Freihage. 2001. Is Maryland Growing Smart? A Growth Indicators and Reporting System for Measuring Achievement of the Goals of Maryland's Smart Growth Policy. Institute for Policy Analysis Research. University of Maryland, Baltimore County.
16. Herold, M., K.C. Clarke and J. Scepan. 2002. Remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban landuse. *Environment and planning* 34(8): 1443-1458.
17. Herold, M., N. Goldstein and K. Clarke. 2003. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment* 86(3): 286-302.
18. Karolien, V., V.R. Anton, L. Maarten, S. Eria and M. Paul. 2012. Urban growth of Kampala, Uganda: Pattern analysis and scenario development. *Landscape and Urban Planning* 106: 199-206.
19. Kong, F., H. Yin, N. Nakagoshi and P. James. 2012. Simulating urban growth processes incorporating a potential model with spatial metrics. *Ecological Indicators* 20: 81-92.
20. Leitão, A.B., J. Miller, J. Ahern and K. McGarigal. 2006. Measuring Landscapes: A Planner's Handbook. Island Press, New York, USA.
21. Mitsova, D., W. Shuster and X. Wang. 2011. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning* 99: 141-153.
22. Nelson, A. C. 1999. Comparing states With and without growth management analysis based on indicators With policy implications. *Land Use Policy* 16: 121-127.
23. Pontius, R.G. 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66: 1011-1016.
24. Pontius, R.G. and L.C. Schneider. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85: 239-248.
25. Rafiee, R., A. Salman Mahiny, N. Khorasani and A. Darvishsefat. 2009. Simulating urban growth in Mashhad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). *Cities* 26: 19-26.
26. Rafiee, R., A. Salman Mahiny and N. Khorasani. 2009. Assessment of changes in urban green spaces of Mashhad city using satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11: 431-438.
27. Sabet Sarvestani, M., A. Latifi Ibrahim and P. Kanaroglou. 2011. Three decades of urban growth in the city of Shiraz, Iran: A remote sensing and geographic information systems application. *Cities* 28(4) : 320-329.
28. Shi, Y., X. Sun, X. Zhu, Y. Li and L. Mei. 2012, Characterizing growth types and analyzing growth density distribution in response to urban growth patterns in peri-urban areas of Lianyungang City. *Landscape and Urban Planning* 105: 425-433.
29. Soffianian, A., M. A. Nadoushan, L. Yaghmaei and S. Falahatkar. 2010 Mapping and analyzing urban expansion using remotely sensed imagery in Isfahan, Iran, *World Applied Sciences Journal* 9(12): 1370-1378.
30. Sudhira, H., T. Ramachandra and K. Jagadish. 2004. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5: 29-39.
31. Sun, C., Z. Wu, Z., Lv, N.Yao and J. Wei. 2013. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 409-417.
32. Tang, J., L. Wang and Z. Yao. 2008. Analyses of urban landscape dynamics using multi-temporal satelliteimages: A comparison of two petroleum-oriented cities. *Landscape and Urban Planning* 87(4): 269-278.
33. Thapa, R.B. and Y. Murayama. 2012. Scenario based urban growth allocation in Kathmandu Valley, Nepal. *Landscape and Urban Planning* 105( 1-2): 140-148.
34. Yeh, A. G. and X. Li. 2001. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67: 83-90.