پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، دورهٔ ۳، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴
ص ۴۳۱-۴۴۶

ارزیابی و پیش‌بینی مسیر بهینهٔ گسترش شهری سنندج با استفاده از سلول‌های خودکار- مارکوف[۱]

ناصح عبدی، دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه پیام نور تهران
سعید زنگنه شهرکی*، استادیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران
نفیسه مرصوصی، دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه پیام نور تهران
شاه‌بخت رستمی، استادیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه پیام نور تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲ تأیید مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۷

چکیده

نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب، برنامه‌ریزان شهری را به ترکیب اطلاعات زمانی و مکانی برای شناخت و یافتن الگوها و مدل‌های رشد و پیش‌بینی شهری ترغیب کرده است. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی گسترش شهر سنندج، از ترکیب مدل سلول‌های خودکار، زنجیره‌ای مارکوف و رگرسیون لجستیک، استفاده شده است. سپس با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶ و همچنین عکس‌های ماهواره‌ای، گسترش شهر سنندج برای سال ۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. بر این اساس با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف و اعمال محدودیت‌ها و فاکتورهایی چون ظرفیت‌های توسعهٔ میان‌افزا، شیب، حریم و بستر رودخانه، زمین‌های کشاورزی و... توسعهٔ افقی آن برای سال ۲۰۲۲ پیش‌بینی شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی رشد کنونی شهر سنندج تا سال ۲۰۱۴، اراضی بایر و کوهستانی بیشترین مقدار (۶۵۵ هکتار) تبدیل به کاربری شهری را داشته‌اند. برای پیش‌بینی اراضی مورد نیاز توسعهٔ افقی، توسعهٔ میان‌افزا به عنوان اولویت اول، سپس زمین‌های خارج از محدودهٔ شهری در اولویت‌های بعدی در نظر گرفته شده است. پیش‌بینی می‌شود جهت غالب توسعهٔ افقی، جنوب غربی، شمال غربی و به مقدار محدودتر، در جهات دیگر باشد. در سال ۲۰۲۲ همچنان اراضی بایر و کوهستانی بیشترین تغییر را به اراضی شهری خواهند داشت. نتایج تحقیق حاکی از کارایی بالای مدل سلول‌های خودکار- زنجیره‌ای مارکوف در پایش روند توسعهٔ شهر در سال‌های گذشته و پیش‌بینی شهری برای سال‌های آتی بر اساس الگوی رشد سال‌های گذشته است.

کلیدواژه‌ها: سنندج، گسترش شهری، مدل سلول‌های خودکار- زنجیرهٔ مارکوف.

نویسندهٔ مسئول
* E- mail: Saeed.zanganeh@ut.ac.ir

۱. این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری ناصح عبدی در دانشگاه پیام نور مرکز تهران به راهنمایی دکتر سعید زنگنه شهرکی و دکتر نفیسه مرصوصی و مشاورهٔ دکتر شاه بخت رستمی است.

مقدمه

تحولات فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی قرون اخیر متأثر از مدرنیسم، گسترش سریع شهرها و پیدایش کلان‌شهرها را موجب شده و تغییرات بنیادی را در ساختار و سازمان فضایی- کالبدی آنها به‌وجود آورده است (زیاری، ۱۳۸۲: ۶). در اثر رشد فزایندهٔ شهرها، گسترش فیزیکی آنها هم‌زمان با در بر گرفتن فضاهای پیرامون با کاربری‌های غیرشهری است؛ این رشد شهری مشکلات بی‌شماری را که شامل سطوح بالای بیکاری در شهرها، تراکم ترافیکی، اضمحلال زیست‌محیطی و نارسایی‌های شدید در فراهم آوردن مسکن برای ساکنان جدید شهری می‌شود، به‌وجود آورده است (شوگیل، ۱۳۸۲: ۱۲).

توسعهٔ فیزیکی شهر، فرایندی پویا و مداوم است که در آن محدودهٔ شهر و فضای کالبدی آن در جهت‌های عمودی و افقی از حیث کمی و کیفی افزایش می‌یابد. در صورتی که این روند سریع و بی‌برنامه باشد، فضا و کالبد شهر را با مشکل مواجه خواهد کرد (خاکپور و همکاران، ۱۳۹۴: ۲) به همین دلیل، برنامه‌ریزی و مکان‌یابی بهینهٔ جهت‌های توسعهٔ فضایی- کالبدی شهر برای رشد آیندهٔ آن بسیار مهم است. یکی از پیش‌شرط‌های اصلی برای استفادهٔ بهینه از زمین، اطلاع از الگوهای کاربری اراضی و آگاهی از تغییرات هر کدام از کاربری‌ها در طول زمان است. بیشتر کشورهای دنیا سیاست‌های برنامه‌ریزی توسعه‌یافته‌ای را برای فائق آمدن بر مشکلات ناشی از رشد و توسعهٔ سریع و پراکندهٔ شهری به‌کار بسته‌اند؛ این سیاست‌های برنامه‌ریزی شامل پیش‌بینی تغییرات یا گرایش‌ها به سمت توسعه و گسترش در آینده، با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی شهری است (خوش‌گفتار و طالعی، ۱۳۸۹: ۳). رشد فیزیکی شهر سنندج همچون دیگر شهرهای ایران در طول دهه‌های اخیر دستخوش تغییرات بسیاری شده است. این تغییرات هم در میزان افزایش که در طول چهار دههٔ اخیر از ۳۹۷ هکتار به ۴۰۶۶ رسیده است و هم در جهت‌های پراکنش افقی، بدون برنامه‌ریزی و غیرهدفمند بوده است. مدل‌سازی مبتنی بر داده‌ها و اطلاعات زمانی و مکانی با استفاده از GIS و RS، شبیه‌سازی رشد شهر سنندج در مناطق شهری (توسعهٔ درونی) و غیرشهری با استفاده از مدل CA-Markov و همچنین تعیین مسیر بهینهٔ رشد و گسترش کالبدی شهر با تأکید بر استفاده از ظرفیت‌های موجود زمین و مسکن، هدف اصلی این پژوهش است.

ادبیات نظری و پیشینهٔ تحقیق

در فرایند شهرنشینی باید به همهٔ جنبه‌های زندگی شهری که می‌تواند شهر را به سمت پایداری سوق دهد، توجه شود. فرم و شکل شهر نیز یکی از ابعاد فیزیکی و فضایی زندگی شهری است که خواسته یا ناخواسته، مستقیم یا غیرمستقیم می‌تواند بر همهٔ ابعاد و جوانب زندگی شهری مؤثر باشد. علاوه بر آن، با رشد و گسترش سریع شهرنشینی در ایران، شهرداری و سازمان‌ها کمتر توانسته‌اند به چنین موضوعاتی بپردازند و الگوی رشد و توسعهٔ شهرها را به‌صورت مناسب پیش ببرند. به همین علت، امروزه بسیاری از شهرهای ایران، از جمله شهر سنندج دچار رشد و گسترش فضایی نامنسجم و کم‌تراکمی شده‌اند که در اصطلاح برنامه‌ریزی شهری از آن به اسپرال شهری یا گسترش افقی شهر نام می‌برند. توسعهٔ میان‌افزا، استراتژی معقولانه و منطقی برای جلوگیری از گسترش بدون برنامه و نامنظم شهرها است. این نوع توسعه به معنای استفاده از آن دسته از اراضی است که می‌توان به سهولت از آنها در خدمت تسهیلات و امکانات و تجهیزات

شهری استفاده کرد. این نوع از توسعه در داخل محدودهٔ موجود شهرها به عنوان یکی از مظاهر توسعهٔ فشرده، به‌صورت چندوجهی با ظرفیت‌سازی توسعه از درون شهرها، موجب صرفه‌جویی در مصرف زمین، استفادهٔ بهینه از زیرساخت‌ها و تأسیسات موجود شهری، استفاده از اراضی بایر، سبب استفادهٔ اقتصادی از زمین‌های شهری و ارتقای کیفیت کالبدی و اجتماعی در سطح محلات می‌گردد.

رشد سریع در تکنولوژی‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات مکانی و همچنین پیشرفت در علم رایانه و کاربرد آن در برنامه‌ریزی شهری سبب به‌وجود آمدن روش‌های مدل‌سازی مکانی جدیدی چون Cellular Automata (Clarke et al., 1997)، شبکه‌های عصبی هوشمند (Pijanowskia et al., 2002) و مدل‌های آماری (Cheng and masser, 2003) شده است. در سال‌های اخیر، علاقهٔ گسترده و فزاینده‌ای برای به‌کارگیری ابزارهای مرتبط با فناوری یا تکنولوژی اطلاعات، مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش از دور (RS) و مدل‌سازی رشد شهری از جمله استفاده از مدل سلول‌های خودکار (CA) به عنوان ابزارهای حامی تصمیم‌گیری در زمینهٔ برنامه‌ریزی و طراحی شهری، ایجاد شده است (Herold, 2008; Li, 2003; Yeh, Jat et al. 2005) و از آن به عنوان مؤثرترین روش در مدل‌سازی رشد شهری نام می‌برند (Torrens, 2000). این مدل‌ها قادرند یک ابزار کمی برای کمک به تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی‌های شهری و مدیریت قابلیت و تناسب اراضی برای توسعه ارائه دهند. طبق نظریهٔ سیستم‌های پیچیده، فعل و انفعالاتی که در سطح کوچک‌ترین اجزای یک سیستم رخ می‌دهد، اساس رفتار کل سیستم را شکل می‌دهد. در نتیجه، مدل‌های Urban-CA که شهرها را به‌صورت اجزای کوچک‌تری به نام پیکسل تقسیم می‌کنند و قوانین خاصی را برای تک‌تک این اجزا اعمال می‌کنند، می‌توانند به عنوان ابزاری برای ارزیابی توسعهٔ شهری به‌کار روند.

اصطلاح Automata را ریاضی‌دان انگلیسی، آلن تورینگ برای اولین بار در دههٔ ۱۹۳۰ ارائه کرد (Benenson and Torrens, 2004). Roger White در سال ۱۹۹۷ از این مدل استفاده کرد و بیان داشت که مدل سلول‌های خودکار، نمایشی از پویایی فضایی شهری را نشان می‌دهد که در نتیجهٔ آن پیش‌بینی واقع‌گرایانه‌ای دربارهٔ دگرگونی ساختارهای شهری بیان می‌شود. Kamusoko و همکاران وی با استفاده از روش CA-Markov و داده‌های ماهواره‌ای مربوط به چهار زمان مختلف، تغییرات کاربری زمین مناطق روستایی واقع در شمال شرقی ایالت مرکزی Mashonaland کشور زیمبابوه را شبیه‌سازی کرده‌اند. حبیبی در سال ۱۳۸۴ و در پایان‌نامهٔ دکتری خود، طرح جامع و تفصیلی شهر سنندج را تجزیه و تحلیل کرده است. او در این پژوهش برای تعیین اهمیت و وزن‌دهی به شاخص‌ها، از دو روش منطق Boolean و index averlay پس از وزن‌دهی به شاخص‌ها در لایه‌های اطلاعاتی مختلف و پایگاه آنها، برنامه‌ای به زبان Avenue در محیط Scrip و نرم‌افزار Arc view نوشته و در آن، مناطق جدیدی خارج از محدودهٔ شهری سنندج را پیش‌بینی کرده است. خوش‌گفتار و طالعی در سال ۱۳۸۹ با استفاده از مدل CA-Markov رشد شهری در تهران را شبیه‌سازی کرده‌اند. این پژوهش ضمن بررسی توسعهٔ شهری در دو دههٔ گذشتهٔ شهر تهران، رشد شهری با استفاده از داده‌های تاریخی از مجموعهٔ زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست را پیش‌بینی می‌کند. نتایج آن بیانگر رشد یازده درصدی منطقهٔ شهری تهران در طول دو دهه و پیش‌بینی رشد سه درصدی از ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ است. کیانی در رسالهٔ دکتری خود، با استفاده از مدل CA، تغییرات کاربری اراضی منطقهٔ ۵ را در فواصل سال‌های ۴۲ تا ۵۵ پیش‌بینی کرده است. Pontius

و Malanson با استفاده از مدل CA-Markov و ارزیابی چندمعیاره و به‌کار بردن داده‌های سه زمان مختلف که از نقشه‌های کاربری زمین موجود به‌دست آمده است و به‌صورت رستری تبدیل شده‌اند، تغییرات در ماساچوست مرکزی آمریکا را پیش‌بینی کرده است. بیشتر مطالعات انجام‌گرفته با استفاده از مدل سلول‌های خودکار، پیش‌بینی مناطق توسعهٔ فیزیکی را محدود به خارج از محدودهٔ شهری کرده‌اند و کمتر به استفاده از ظرفیت‌های موجود در داخل محدودهٔ شهری توجه داشته‌اند.

محدودهٔ تحت مطالعه

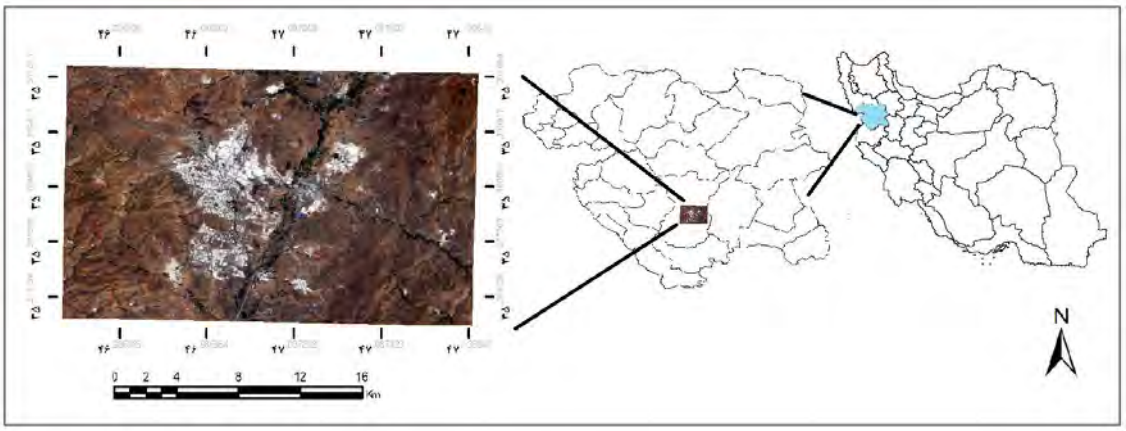
سنندج شهری در شمال غربی ایران و مرکز استان کردستان است. این شهر با موقعیت ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقهٔ عرض شمالی از استوا و ۴۶ درجه و ۵۹ دقیقه و ۴۵ ثانیهٔ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. ارتفاع متوسط آن ۱۳۵۰ متر از سطح دریا است (آمارنامهٔ سنندج، ۱۳۹۳: ۱۸). شهر سنندج از نظر طبیعی محصور بین تپه‌هایی است که در یک جام فضایی قرار گرفته است (مردوخ، ۱۳۵۱: ۸۱) وضعیت توپوگرافی شهر و کوه‌های اطراف آن باعث گردیده است که شهر به‌صورت طبیعی در یک درهٔ نسبتاً مسطح محصور شود و قطعاً شکل‌گیری و گسترش شهر به تبعیت از آن، در پاره‌ای از نقاط محدود شده است (گازرانی، ۱۳۷۸: ۴). مهاجرپذیری و مرکزیت شهر سنندج در استان کردستان، جمعیت آن را دستخوش تغییرات بسیاری در طول چهار دههٔ اخیر کرده است. در سال ۱۳۵۵ شهر سنندج دارای ۹۵۸۷۰ نفر جمعیت بوده است؛ این رقم در سال ۱۳۶۵ به ۲۰۴۳۸۴ نفر می‌رسد که نرخ رشدی ۷/۸ درصدی را تجربه می‌کند. هر چند در دو دههٔ بعدی از این نرخ کاسته شده است، ولی همچنان شهر سنندج به عنوان قطب مهاجرپذیر استان عمل کرده که جمعیت آن در سال ۱۳۹۰ به ۳۷۵۲۸۰ نفر رسیده است.

روش‌شناسی پژوهش

برای استخراج نقشه‌های کاربری/ پوشش زمین از تصاویر ماهواره‌ای TM لندست ۵ و OLI لندست ۸ با قدرت تفکیک ۳۰ متر، مربوط به سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ استفاده شد. اطلاعات مربوط به تصاویر در جدول زیر آمده است.

جدول ۱. مشخصات قدرت تفکیک مکانی، رادیومتریک سنجنده‌های TM و OLI/TIRS (منبع: USGS)

ماهواره/ سنجنده	تفکیک رادیومتریک	تفکیک مکانی باندهای حرارتی	تفکیک مکانی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی	تفکیک باند پن کروماتیک	تعداد باند	باندهای به‌کاررفته
لندست ۵ / TM	۸ بیت	۱۲۰ * ۱۲۰ متر	۳۰ * ۳۰ متر	ندارد	۷	۱–۵ و ۷
لندست ۸ / OLI/TIRS	۱۶ بیت	۱۰۰ * ۱۰۰ متر	۳۰ * ۳۰ متر	۱۵ * ۱۵ متر	۱۱	۱–۷



شکل ۱. موقعیت محدودهٔ تحت مطالعه

عوامل مؤثر بر گسترش شهر نیز با مرور مطالعات قبلی و با توجه به ویژگی‌های منطقه انتخاب شدند. این عوامل عبارتند از: فاصله از کاربری ساخته‌شدهٔ فعلی، فاصله از کاربری ساخته‌شدهٔ دورهٔ قبل، تراکم نواحی ساخته‌شده، فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از اراضی کشاورزی و نرخ تبدیل به کاربری شهری (Evidence Likelihood).

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی گسترش شهر سنندج از ترکیب مدل سلول‌های خودکار، زنجیرهٔ مارکوف و رگرسیون لجیستیک استفاده گردید. مدل سلول‌های خودکار از تحلیل زنجیره‌های مارکوف برای استخراج قوانین تبدیل کلی (ماتریس احتمال تبدیل) و از مدل رگرسیون لجستیک برای استخراج قوانین تبدیل محلی (نقشهٔ پتانسیل تغییر) استفاده می‌کند.

تحلیل زنجیره‌ای مارکوف (MC) برای برآورد میزان تغییر کاربری‌های مختلف استفاده شد. ماتریس انتقال مارکوف بر اساس فراوانی سلول‌های مربوط به یک طبقهٔ خاص که در طول دورهٔ شبیه‌سازی به طبقه‌ای دیگر تبدیل می‌شوند، بنا شده است.

از آنجا که روش زنجیره‌های مارکوف تعیین نمی‌کند که تبدیل کاربری در کجا اتفاق می‌افتد، مدل رگرسیون لجستیک برای تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل تغییر که در آن احتمال تغییر کاربری هر پیکسل تعیین شده است، به‌کار می‌رود. رگرسیون روشی است برای کشف ارتباط تجربی بین یک متغیر وابستهٔ باینری و چندین متغیر مستقل که بر متغیر وابسته تأثیر می‌گذارند (Jokar et al., 2013). در اینجا با استفاده از رگرسیون لجستیک ارتباط بین نقشهٔ تغییر به کاربری شهری (نقشهٔ بولین گسترش شهر در یک دوره) و عوامل مؤثر بر گسترش شهر بررسی و بر اساس آن، نقشهٔ پتانسیل تغییر استخراج شد. علاوه بر این، یک نقشهٔ محدودیت و تحریک با توجه به قوانین و ملاحظاتی نظیر شیب مناسب برای ساخت‌وساز، حریم رودخانه، محدوده و حریم فرودگاه، اراضی کشاورزی باغی، کاربری‌های ناسازگار و بافت‌های فرسوده برای بهینه کردن پیش‌بینی گسترش شهر استفاده شد. در واقع با تعیین ضرایبی برای مکان‌های مختلف و ضرب این نقشه در نقشهٔ پتانسیل تغییر، احتمال تغییر کاربری در این مکان‌ها کاهش یا افزایش می‌یابد.

با ترکیب مدل‌های ذکرشده و بر اساس داده‌های سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶، گسترش شهر سنندج برای سال ۲۰۱۴ شبیه‌سازی شد. برای ارزیابی صحت مدل، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی (نقشهٔ کاربری/ پوشش زمین استخراج شده

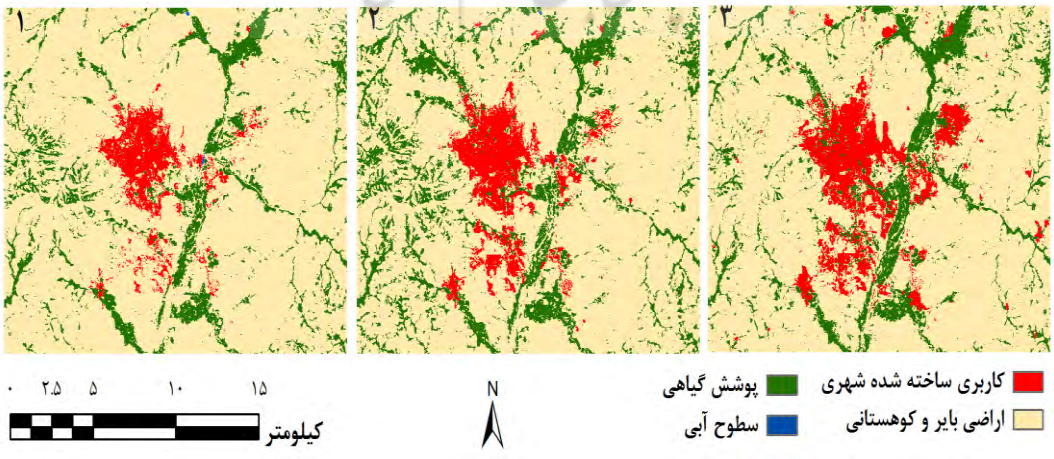
سال ۲۰۱۴) مقایسه و دقت مدل با استفاده از ضریب کاپا تعیین شد. در نهایت، گسترش شهر برای سال‌های ۲۰۲۲ و اساس داده‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ پیش‌بینی شد. نتیجهٔ نهایی به‌صورت دو نقشهٔ مجزا ترسیم شده که یکی از آن‌ها پیش‌بینی مسیر بهینه، با تأثیر عوامل و فاکتورها و دیگری بدون در نظر گرفتن آنها است.

تحلیل یافته‌ها

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تغییرات کاربری زمین در سه دورهٔ مختلف (۱۹۹۸، ۲۰۰۶، ۲۰۱۴)، میزان تغییرات صورت‌گرفته در سطح کاربری‌ها تجزیه و تحلیل شده است. بر این اساس، کاربری‌های ساخته‌شدهٔ شهری در سال ۱۳۷۷، ۱۵۸۹ هکتار بوده است. در سال ۱۳۸۵ بیشترین اراضی تغییر کاربری داده شده به کاربری شهری در طول این دوره، اراضی بایر و کوهستانی، به میزان ۷۱۲ هکتار است که بیشترین تغییر کاربری‌های این دوره را شامل می‌شود. در مجموع در طول هشت سال، ۷۴۵ هکتار به کاربری‌های ساخته‌شدهٔ شهری اضافه شده است. در سال ۱۳۸۵، کاربری‌های ساخته‌شده به ۲۳۱۳ هکتار افزایش پیدا می‌کند. در طول دورهٔ بعدی و تا سال ۱۳۹۴ در مجموع ۸۸۲ هکتار به کاربری‌های ساخته‌شدهٔ شهری اضافه می‌شود و باز در این دوره، تبدیل اراضی بایر وکوهستانی به مساحت ۸۰۴ هکتار، بیشترین تغییر کاربری به اراضی شهری را داشته است (جدول ۲ و شکل ۲).

جدول ۲. تغییرات پوشش گیاهی و اراضی بایر و کوهستانی به کاربری ساخته‌شدهٔ شهری (هکتار)

	۱۳۷۷ – ۱۳۸۵	۱۳۸۵ ° ۱۳۹۴
کاربری ساخته‌شدهٔ شهری در ابتدای دوره	۱۵۸۹/۴۹	۲۳۱۳/۸۱
تغییر پوشش گیاهی به کاربری شهری	۳۳/۳۹	۷۸/۷۵
تغییر اراضی بایر و کوهستانی به کاربری شهری	۷۱۲/۴۴	۸۰۴
تغییر محدوده‌های آبی به کاربری شهری	۰/۰۹	۰/۰۹
مجموع مساحت اضافه‌شده	۷۴۵/۹۲	۸۸۲/۸۴
کاربری ساخته‌شدهٔ شهری در انتهای دوره	۲۳۴۵/۴۱	۳۱۹۶/۶۵



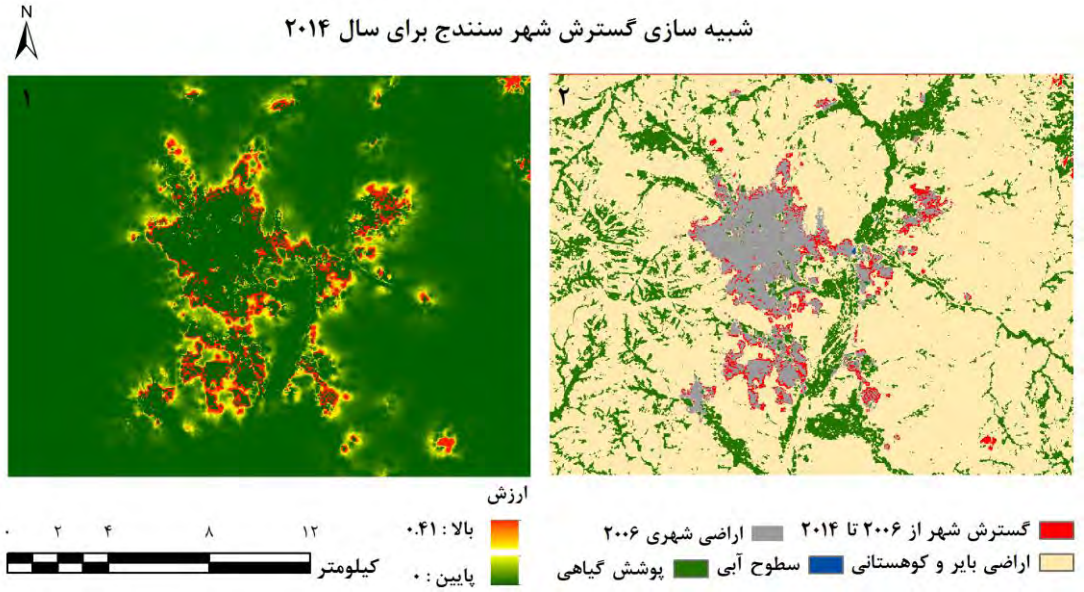
شکل ۲. طبقات پوشش و کاربری زمین شهر سنندج در سال های ۱۹۹۸، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴

بر اساس داده‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۶ و با استفاده از نتایج تحلیل زنجیره‌ای مارکوف، گسترش شهر سنندج برای سال ۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. نتایج صحت‌سنجی شبیه‌سازی سال ۲۰۱۴، بر اساس شاخص کاپا، ۰/۶۵ به‌دست آمده است. ضریب کاپا یکی از پارامترهای دقت است که از ماتریس خطا استخراج می‌شود و دقت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند (فاطمی و باقری، ۱۳۸۹: ۶۶). در این تحلیل متغیرهایی برای گسترش شهر در نظر گرفته شده است که عبارتند از: ۱. فاصله از کاربری ساخته‌شدهٔ فعلی، ۲. فاصله از کاربری ساخته‌شدهٔ دورهٔ قبل، ۳. تراکم نواحی ساخته‌شده، ۴. فاصله از راه‌های ارتباطی، ۵. فاصله از گسل، ۶. ارتفاع، ۷. شیب، ۸. فاصله از رودخانه، ۹. فاصله از اراضی کشاورزی و ۱۰. نرخ تبدیل به کاربری شهری (Evidence Likelihood). بر اساس تحلیل زنجیره‌ای مارکوف در سال ۲۰۱۴، ۴۶/۸ هکتار (۰/۰۰۷۸ درصد) از پوشش گیاهی، ۶۵۵/۶۵ هکتار (۰/۰۲۲۲ درصد) از اراضی بایر و کوهستانی و ۰/۰۹ هکتار (۰/۰۰۸۸درصد) از سطوح آبی به کاربری شهری تبدیل شده‌اند.

جدول ۳. نتایج تحلیل زنجیره‌های مارکوف ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴

ماتریس نواحی تبدیل (هکتار)				
	کاربری شهری	پوشش گیاهی	اراضی بایر و کوهستانی	سطوح آبی
کاربری شهری	۲۲۸۲/۴	۳۱/۴۱	۰	۰
پوشش گیاهی	۴۶/۸	۴۱۶۵/۲	۹۷۲/۳۶	۰/۶۳
اراضی بایر و کوهستانی	۶۵۵/۶۵	۲۰۱۶/۵۴	۲۲۸۴۲/۶۳	۱/۶۲
سطوح آبی	۰/۰۹	۱/۸	۱/۷۱	۴/۰۵
ماتریس احتمال تبدیل (درصد)				
	کاربری شهری	پوشش گیاهی	اراضی بایر و کوهستانی	سطوح آبی
کاربری شهری	۰/۹۸۶۴	۰/۰۱۳۶	۰	۰
پوشش گیاهی	۰/۰۰۷۸	۰/۸۰۳۳	۰/۱۸۷۵	۰/۰۰۰۱
اراضی بایر و کوهستانی	۰/۰۲۲۲	۰/۰۷۹	۰/۸۹۵۲	۰/۰۰۰۱
سطوح آبی	۰/۰۰۸۸	۰/۲۳۸۹	۰/۲۲۱۲	۰/۵۳۱

نقشهٔ پتانسیل تغییر ۱ که تناسب هر پیکسل را برای تغییر به کاربری شهری نشان می‌دهد، با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک تولید شد. در واقع با استفاده از رگرسیون لجستیک ارتباط بین نقشهٔ تغییر به کاربری شهری و عوامل مؤثر بر گسترش شهر بررسی و بر اساس آن، نقشهٔ پتانسیل تغییر تهیه می‌شود. ارزش بالا نشان‌دهندهٔ تناسب بیشتر هر پیکسل برای تغییر به کاربری شهری است، در صورتی که ارزش پایین نشان‌دهندهٔ تناسب و احتمال کمتر تغییر، برای هر پیکسل است. در اینجا (نقشهٔ پتانسیل ۱) پیکسل‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، تناسب بیشتری برای تغییر به کاربری شهری دارند.



شکل ۳. شبیه‌سازی گسترش شهر سنندج برای سال ۲۰۱۴ بر اساس داده‌های ۲۰۰۶ – ۱۹۹۸. ۱. نقشهٔ پتانسیل تغییر مستخرج رگرسیون لجستیک، ۲. نقشهٔ شبیه‌سازی گسترش شهر در سال ۲۰۱۴

نقشهٔ ۲ در شکل بالا، نتیجهٔ شبیه‌سازی گسترش شهر سنندج را برای سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. مطابق با آنچه در راهنمای نقشه آمده است، پیکسل‌های خاکستری رنگ، اراضی شهری در سال ۲۰۰۶ و پیکسل‌های قرمز رنگ، شبیه‌سازی گسترش شهر را تا سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهند. همان‌طور که در نقشه نمایان است، در نقشهٔ ۲، گسترش شهر در قسمت‌هایی که تناسب بیشتری برای تغییر (نقشهٔ ۱) داشته‌اند، اتفاق افتاده است. به عبارتی، در قطعات جنوبی و مرزهای شمال شرق شهر و همچنین در اطراف روستاهای متصل‌شده به شهر مانند نایسر، قار و دوشان، رشد بیشتری اتفاق افتاده است. برای ارزیابی صحت مدل، این نتایج برای سال ۲۰۱۴ با واقعیت (نقشهٔ کاربری زمین ۲۰۱۴ مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای) مقایسه شد. بر اساس شاخص کاپا، صحت شبیه‌سازی برای سال ۲۰۱۴، ۰/۶۵ به‌دست آمد.

با ادامهٔ رشد و گسترش کنونی شهر سنندج، فاصلهٔ شهر با معیارهای توسعهٔ پایدار و رشد هوشمندانهٔ شهر بیشتر شده و با گذشت زمان، برنامه‌پذیری شهر و برنامه‌ریزی مدیران شهری را با مشکلات جدیدی مواجه کرده است. فقط به فاصلهٔ هفت سال از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۹۲، به میزان ۲۵۱ هکتار به محدودهٔ شهری سنندج اضافه شده و در نهایت به ۴۰۶۶ هکتار رسیده است (آمارنامهٔ شهرداری سنندج، ۱۳۹۳) این امر بیانگر گسسته‌تر شدن بافت شهری در دوره‌های مختلف است. تاکنون اولین و شاید به اجبار، مهم‌ترین گزینهٔ پیش رو برای سامان‌دهی جمعیت، فضا و عملکرد شهر سنندج، الحاق اراضی اطراف شهر و پذیرش روستاهای آن به‌صورت نواحی منفصل شهری به محدودهٔ قانونی بوده است. در این چارچوب، علاوه بر در نظر گرفتن الحاق زمین‌های اطراف برای پراکنش افقی، امکان‌سنجی تحقق توسعهٔ میان‌افزای شهر سنندج در دو گزینهٔ زیر بررسی خواهد شد:

۱. بافت‌های فرسودهٔ شهری
۲. عرصه‌های ناکارآمد شهری (اراضی خاکستری/ قهوه‌ای Brownfield)

بافت فرسودهٔ شهری به عرصه‌هایی از محدودهٔ قانونی شهرها اطلاق می‌شود که به دلیل فرسودگی کالبدی، عدم برخورداری مناسب از دسترسی سواره، تأسیسات، خدمات و زیرساخت‌های شهری آسیب‌پذیر بوده و از ارزش مکانی – محیطی و اقتصادی برخوردارند (عبدی، ۱۳۸۹: ۵۸). این بافت‌ها با مشخصه‌هایی چون عمر ابنیه، ارزش بافت، دانه‌بندی و تعداد طبقات، موقعیت استقرار، نوع مصالح، دسترسی، سرانهٔ خدمات و زیرساخت‌های شهری از دیگر مناطق شهری مجزایند. بنا بر آخرین اصلاحیهٔ نقشهٔ بافت فرسوده در سال ۱۳۹۳، شهر سنندج در مجموع دارای ۶۸۹/۵ هکتار بافت فرسوده است که به سه نوع بافت فرسودهٔ تاریخی (مرکزی)، بافت فرسودهٔ قدیمی فاقد ارزش تاریخی (میانی) و بافت فرسودهٔ حاشیه‌ای (سکونتگاه غیررسمی) تقسیم می‌شود.

بافت فرسودهٔ تاریخی

این بافت به‌صورت محدوده‌ای متصل و یکپارچه در بخش مرکزی شهر سنندج، با مساحت ۱۸۱ هکتار واقع شده است. به لحاظ زمانی این بافت تا اواخر دورهٔ قاجار و اوایل پهلوی شکل گرفته است و در قالب هشت محلهٔ اصلی به نام‌های آغه زمان، قطارچیان، میان قلعه، قلاچوارلان، جورآباد بالا، جورآباد پایین، چهارباغ و سرتپوله شناخته می‌شود.

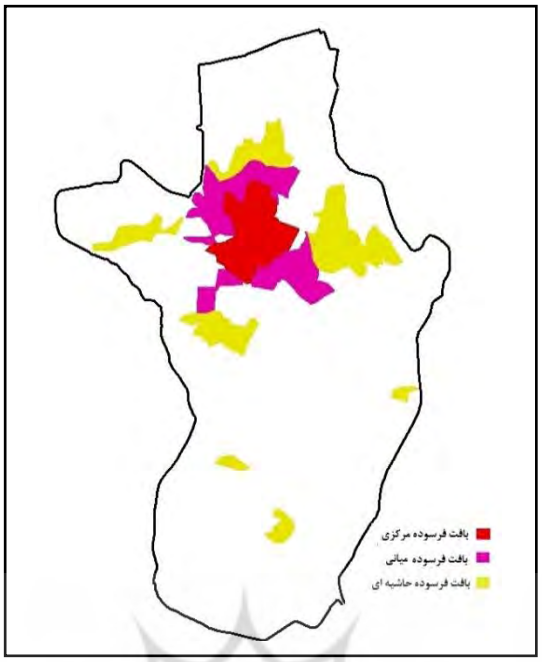
بافت فرسودهٔ قدیمی فاقد ارزش تاریخی (میانی)

سابقهٔ این بافت با مساحت ۱۸۲ هکتار، به لحاظ تاریخی و زمان شکل‌گیری، به سال‌های ۱۳۰۰ و اوایل دورهٔ پهلوی باز می‌گردد. در سطح شهر بیشتر منطبق بر محلات کارآموزی، اولیابگ، کلکه جار و صفری است.

بافت فرسودهٔ حاشیه‌ای (سکونتگاه غیررسمی)

این بافت عمدتاً در حاشیهٔ شهرها و کلان‌شهرها به‌صورت قارچی و خارج از برنامهٔ توسعهٔ شهری شکل گرفته است. به لحاظ تاریخی، دورهٔ شکل‌گیری این بافت مصادف با دورهٔ بعد از اصلاحات ارضی، به‌ویژه دورهٔ انقلاب و بعد از آن است. این محدوده با مساحت ۳۲۱/۵ هکتار، مشتمل بر ۱۳ محلهٔ حاشیه‌ای از جمله عباس‌آباد، گلشن، حاجی‌آباد، فرجه و... است.

با توجه به عدم امکان در نظر گرفتن کل بافت‌های فرسوده برای توسعهٔ درونی شهر سنندج، کیفیت ابنیه مبنایی برای برآورد مقدار استفاده از بافت فرسوده در راستای توسعهٔ میان‌افزا قرار گرفت. کیفیت ابنیهٔ بافت‌های فرسودهٔ شهر سنندج در پنج گروه قابل قبول، مرمتی، تخریبی، مخروبه و باارزش دسته‌بندی می‌گردد. ۵۳/۶ درصد از ابنیه قابل‌قبول، ۲۱/۴ درصد مرمتی، ۲۳/۱ درصد تخریبی، ۱/۶ درصد مخروبه و ۰/۰۳ درصد با ارزش محسوب می‌شوند (تدبیر شهر، ۱۳۹۰: ۴۱۷). از این میزان، ۲۴/۷ درصد از بافت فرسوده (۱۷۰ هکتار) که فقط بافت‌های تخریبی و مخروبه را شامل می‌شود، در پیش‌بینی توسعهٔ فیزیکی شهر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. محدوده بافت های فرسوده شهر سنندج

جدول ۴. مشخصات بافت فرسودهٔ سنندج به تفکیک مناطق و نوع بافت

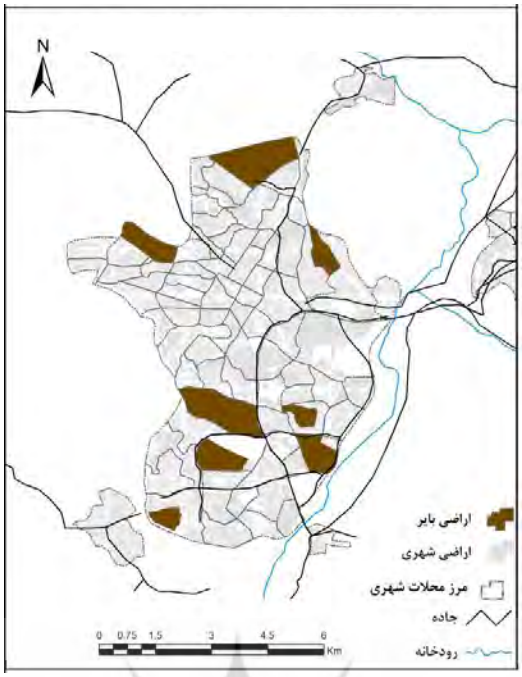
محدوده	منطقهٔ ۱	منطقهٔ ۲	منطقهٔ ۳	جمع کل (هکتار)
مساحت بافت فرسودهٔ تاریخی	۱۲۶/۶۲	۵۵/۳۰	۰	۱۸۱/۹۲
مساحت بافت فرسودهٔ میانی	۱۰۱/۰۸	۴۸/۹۷	۳۲/۷۷	۱۸۲/۸۲
مساحت بافت فرسودهٔ حاشیه‌ای	۹۳/۹۷	۱۲۹/۶۷	۱۰۱/۱۸	۳۲۴/۸۲
جمع کل(هکتار)	۳۲۱/۶۷	۲۳۳/۹۴	۱۳۳/۹۵	۶۸۹/۵۶

مأخذ: طرح تفصیلی سنندج، ۱۳۸۸. آمارنامهٔ شهرداری سنندج، ۱۳۹۳

عرصه‌های ناکارآمد شهری (اراضی خاکستری/ قهوه‌ای Brownfield)

این اراضی به دو دسته قابل تقسیم‌بندی‌اند. الف) اراضی بایر و فاقد کاربری (اراضی خاکستری). ب) اراضی دارای کاربری ناسازگار شهری (اراضی قهوه‌ای).

زمین‌های بایر مکان‌های خالی از ساخت‌وساز، یا فعالیت‌های شهری‌اند که در عین حال هم سبب گسیختگی کالبد شهر و هم موجب جدایی‌گزینی عملکردهای اجتماعی در شهر می‌شوند. از این زمین‌ها می‌توان به عنوان یکی از گزینه‌های توسعهٔ میان‌افزا نام برد و با هدایت توسعهٔ شهری به سمت این اراضی، می‌توان به شکلی یکپارچه از فرم کالبدی شهر دست یافت. در شهر سنندج این اراضی تحت تأثیر رشد لجام‌گسیختهٔ شهری در طی چند دههٔ اخیر سطح شایان توجهی را به خود اختصاص داده‌اند. مساحت این اراضی در شهر سنندج ۷۹۱ هکتار بوده است (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه اراضی بایر محدوده شهری سنندج

اراضی دارای کاربری ناسازگار (اراضی قهوه‌ای) غالباً کاربری‌های‌اند که در حالت کلی بـا ماهیـت شـهر و زنـدگی شـهری ناسازگارند و به منظور برقراری تعامل بهینه و سازگاری بین فعالیت‌های شهری، طبق قوانین شورای عالی شهرسازی و معماری ایران، باید از محدودهٔ شهر خارج و در حریم شهرها استقرار یابند. این قبیل اراضی را می‌توان به یازده دسته تقسیم‌بندی کرد: ۱. زندان، ۲. گورستان، ۳. کشتارگاه، ۴. مرکز دفع بهداشتی زباله، ۵. میدان و مرکز میوه و تره‌بار، ۶. حمل‌ونقل و انبار، ۷. انبارهـای اصلی کالا، ۸. فرودگاه، ۹. سیلو، ۱۰. سردخانه و ۱۱. باغ وحش (وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۱). محدودهٔ اراضی دارای کاربری ناسازگار شهر سنندج ۱۵۹/۴ هکتار است که در کل شهر پراکنده شده است (شکل ۶ و جدول ۵).

شکل ۶. نقشه کاربری‌های ناسازگار شهر سنندج

جدول ۵. فضاهای ناکارآمد شهر سنندج

	عنوان	مساحت (هکتار)	موقعیت
۱	قبرستان	۴۲	پراکنده
۲	انبار نفت	۹	جنوب
۳	شهرک صنعتی تعمیرکاران	۱۱	شرق
۴	کشتارگاه	۲۰	شرق
۵	پایانهٔ مسافربری و ماشین سنگین	۱۰	شرق
۶	پادگان نظامی	۳۵	جنوب
۷	زندان	۱۴	شمال
۸	میدان بار	۳	شرق
۹	سردخانه	۴/۸	شرق
۱۰	انبار	۱۰/۶	شرق
	جمع	۱۵۹/۴	

مأخذ: طرح تفصیلی شهر سنندج، ۱۳۸۶، Google Earth

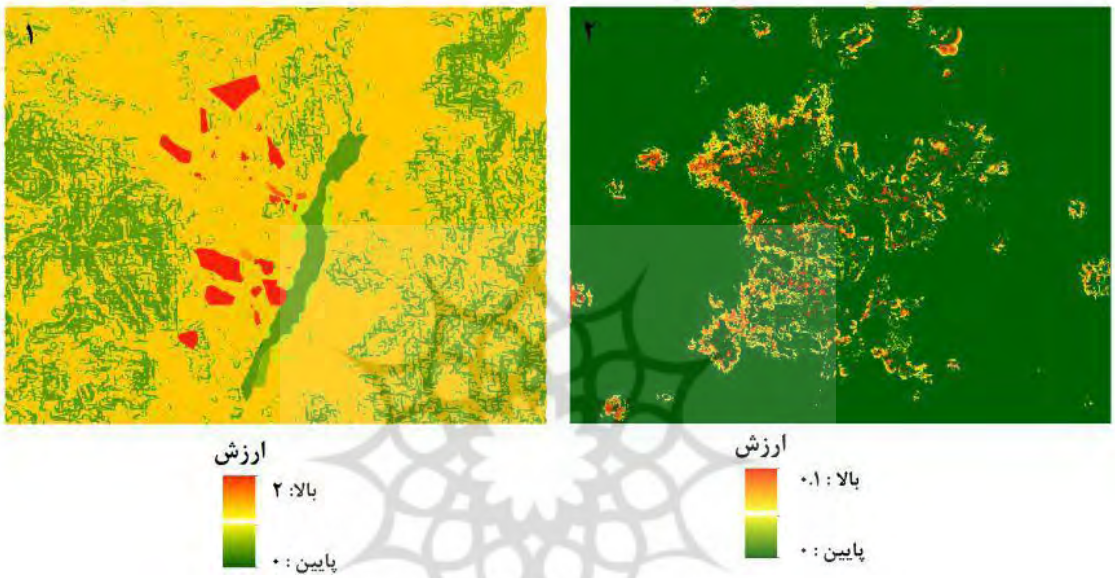
روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی گسترش و توسعهٔ افقی شهر وجود دارد. در پژوهش حاضر از تلفیق دو روش زنجیره‌ای مارکوف و سلول‌های خودکار برای پیش‌بینی سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. اساس این روش به این صورت است که یک زوج از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه‌شده برای دو مقطع زمانی مختلف، با همدیگر مقایسه می‌شوند. خروجی آن به‌صورت یک ماتریس احتمالاتی و تبدیل به مساحت است که نشان‌دهندهٔ میزان احتمال تغییرات در یک کاربری و نیز تبدیل آن به دیگر کاربری‌ها است. (Ahadnejad. et al., 2009: 6) قبل از پیش‌بینی توسعهٔ افقی خارج از محدوده، از ظرفیت‌های توسعهٔ درونی استفاده شده است.

نقشهٔ محدودیت و تحریک

ابتدا نقشهٔ محدودیت و تحریک با استفاده از نظر کارشناسان تهیه شده است. با اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک در فرایند پیش‌بینی، گسترش شهر به سمت مکان‌های مناسب‌تر هدایت می‌شود. در اینجا با در نظر گرفتن ضرایب مختلف برای مکان‌های حساس، می‌توان قوانینی در راستای بهینه‌تر کردن گسترش شهر تعریف کرد. در این مطالعه، قوانین و ملاحظاتی نظیر شیب مناسب برای ساخت‌وساز، حریم رودخانه، محدوده و حریم فرودگاه، اراضی کشاورزی و باغی، کاربری‌های ناسازگار، بافت‌های فرسوده و زمین‌های بایر برای تهیهٔ نقشهٔ محدودیت و تحریک و در نهایت بهینه کردن پیش‌بینی گسترش شهر به‌کار گرفته شد. ضرایب مورد نظر بین صفر تا ۲، بر اساس نظر کارشناس در نظر گرفته شد. ضریب ۱ به معنای عدم محدودیت یا تحریک، ضریب کمتر از یک به معنای تعیین محدودیت (صفر: محدودیت کامل) و ضریب بیشتر از ۱ به معنای تحریک مکان مورد نظر برای گسترش شهر است (جدول ۶). با ضرب این نقشه در نقشهٔ

پتانسیل تغییر مستخرج از رگرسیون لجستیک، امکان محدود کردن یا تحریک کردن نواحی خاص برای گسترش شهر فراهم می‌آید.

بافت‌های تخریبی و مخروبه (بافت‌های فرسوده)،کاربری‌های ناسازگار داخل شهر و زمین‌های بایر، ۱۱۲۰/۴ هکتار از اراضی ساخته‌شدهٔ داخل شهر را تشکیل می‌دهند. با در نظر گرفتن این اراضی برای گسترش شهر می‌توان از تبدیل همین میزان از اراضی به کاربری شهری جلوگیری کرد (شکل ۷).



شکل ۷. نقشهٔ محدودیت و تحریک، ۲. نقشهٔ پتانسیل تغییر مستخرج از رگرسیون لجستیک

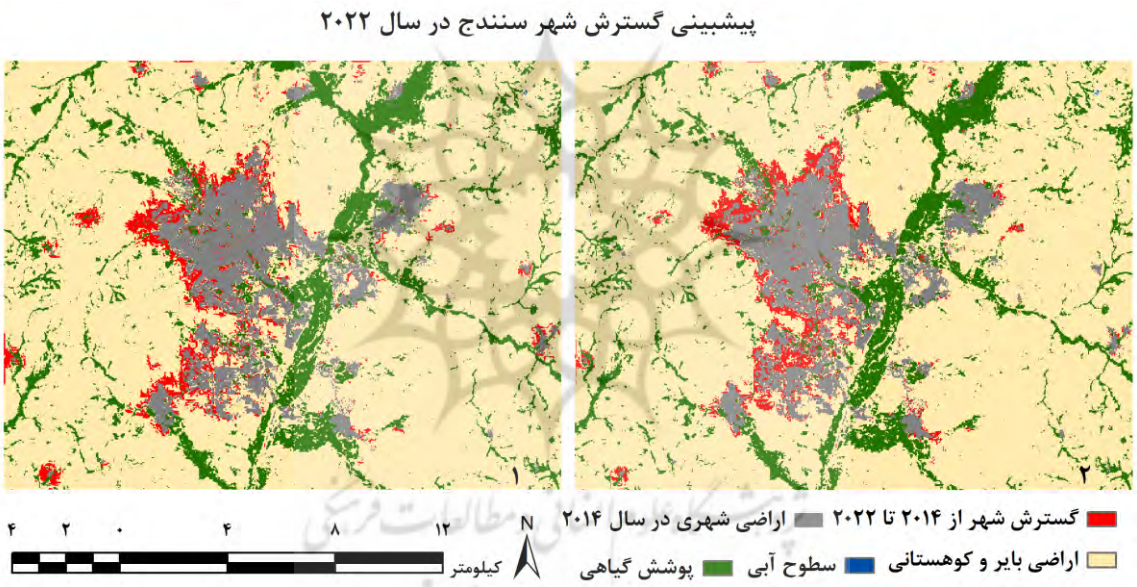
جدول ۶ : قوانین و ضرایب در نظر گرفته شده برای تهیه نقشه محدودیت و تحریک

کاربری / شاخص	ضریب	کاربری / شاخص	ضریب
انبار	1.8	پایانه مسافربری	1.2
مراکز نظامی	1.8	سردخانه	2
فرودگاه	0.2	شهرک تعمیر کاران	1.6
گورستان	2	زندان	2
حریم رودخانه	0	شیب صفر تا ۱۵ درجه	1
اراضی کشاورزی باغی	0.5	شیب ۱۵ تا ۲۰ درجه	0.5
کشتارگاه	2	شیب بیشتر از ۲۰ درجه	0
مخروبه	2	بقیه اراضی	1
میدان میوه و تره بار	1.2		

مأخذ: سرشماری عمومی نفوس و مسکن، مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰– ۱۳۵۵، نگارنده

در شکل ۷، نقشهٔ ۱، نقشهٔ محدودیت و تحریک را نشان می‌دهد. با ضرب این نقشه در نقشهٔ پتانسیل تغییر (نقشهٔ ۲)، نقشهٔ پتانسیل تغییر نهایی حاصل می‌شود که قوانین و ملاحظات مذکور در قالب نقشهٔ محدودیت و تحریک در آن اعمال شده است. با این عمل، احتمال تغییر پیکسل‌هایی که در نقشهٔ ۱ ضریب بالایی دارند، بیشتر شده و برعکس، احتمال تغییر پیکسل‌های با ضریب پایین کمتر می‌شود.

بر اساس داده‌های سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ و پیش‌بینی شبیه‌سازی مدل CA-Markov، گسترش افقی و درونی شهر سنندج پیش‌بینی شده است. بر این اساس ۶۲/۶۴ هکتار از اراضی با پوشش گیاهی و ۹۹۵/۸۵ هکتار از اراضی بایر و کوهستانی در سال ۲۰۲۲ به کاربری شهری تبدیل می‌شوند. در این مدت، سطوح آبی که به کاربری شهری تبدیل شود، وجود ندارد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و نیز مقادیر زیاد اراضی بایر موجود در داخل محدودهٔ شهری، اراضی بایر و کوهستانی بیشترین میزان تبدیل به کاربری‌های شهری را دارند. پیش‌بینی می‌شود که محدودهٔ شهری سنندج در سال ۲۰۲۲ به ۵۱۵۴ هکتار برسد (شکل ۸).



شکل ۸. نقشهٔ گسترش شهر در سال ۲۰۲۲ بدون اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک، ۲. نقشهٔ گسترش شهر در سال ۲۰۲۲ با اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک

شکل ۱ (سمت چپ) نقشهٔ پیش‌بینی گسترش شهر در سال ۲۰۲۲ را به‌صورت معمولی و بدون اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک نشان می‌دهد. در این حالت، گسترش شهر بیشتر در جهات شمال غرب و جنوب غرب و همچنین در روستاهای اطراف شهر پیش‌بینی شده است (مطابق با نقشهٔ پتانسیل تغییر در شکل قبل). شکل ۲ (سمت راست) گسترش شهر را در صورت اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک نشان می‌دهد. در این دو نقشه، گسترش شهر از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ با رنگ قرمز مشخص شده است. مقایسهٔ این دو نقشه، تفاوت بین پیش‌بینی گسترش شهر در حالت معمولی و در حالت اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نقشه‌ها مشاهده می‌گردد، با اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک (نقشهٔ ۲)، علاوه بر جهات شمال غرب و جنوب غرب، شهر در جهات شمال و جنوب

نیز رشد بیشتری خواهد داشت. این بخش‌ها شامل اراضی‌ای است که در نقشهٔ محدودیت و تحریک، ارزش بالاتری به خود اختصاص داده‌اند. از طرفی، روستاهای اطراف شهر به‌ویژه در غرب منطقه، رشد کمتری خواهند داشت.

در واقع با در نظر گرفتن قوانین و ملاحظات ذکرشده و اعمال نقشهٔ محدودیت و تحریک، حدود ۳۲۹ هکتار از اراضی بافت‌های فرسوده و کاربری‌های ناسازگار داخل شهر، مجدداً برای گسترش شهری در نظر گرفته شده است و در نتیجه از تبدیل همین مقدار از اراضی دیگر (کشاورزی و غیره) به کاربری شهری جلوگیری خواهد شد. همچنین با اولویت دادن به اراضی بایر موجود در داخل محدودهٔ شهر نسبت به دیگر اراضی بایر (خارج از حریم شهر) در نقشهٔ محدودیت و تحریک، از تبدیل اراضی خارج از حریم شهر به کاربری ساخته‌شده جلوگیری خواهد شد. تبدیل اراضی شمال و جنوب شهر به کاربری ساخته‌شده و جلوگیری از گسترش کاربری ساخته‌شده در روستاهای اطراف شهر در نقشهٔ ۲ این موضوع را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

شهر سنندج به عنوان یکی از کلان‌شهرهای غرب کشور در چهار دههٔ اخیر دارای رشد افقی ناموزون و غیرهوشمندی بوده است. در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های پوشش/ کاربری زمین که از تصاویر ماهواره‌ای (سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۶، ۲۰۱۴) به‌دست آمد، داده‌های فیزیکی، سلول‌های خودکار – مارکوف و همچنین رگرسیون لجستیک، رشد شهری و تغییرات کاربری زمین در شهر سنندج شبیه‌سازی شد. در این تحقیق مشخص شد که در طول سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴، ۵۶۶ هکتار به محدودهٔ شهر سنندج اضافه شده است که بیشترین آن اراضی بایر و کوهستانی بوده است. موفقیت کلی مدل در شبیه‌سازی، برای نقشهٔ کاربری زمین شبیه‌سازی‌شدهٔ سال ۲۰۱۴، ۶۵ درصد برآورد شده است. بر اساس سناریوی کالیبراسیون سال ۲۰۱۴، مدل CA-Markov رشد شهری و تغییرات کاربری زمین تا سال ۲۰۲۲ پیش‌بینی شد. همچنین قبل از در نظر گرفتن زمین‌های خارج از محدودهٔ شهری اطراف شهر سنندج، در این پژوهش تأکید بر توسعهٔ میان‌افزا بوده است. زمین‌های بایر، بافت‌های تخریبی و مخروبه (بافت فرسوده) و کاربری‌های ناسازگار شهر سنندج از جمله گزینه‌های مورد نظر برای توسعهٔ میان‌افزا است. علاوه بر آن، محدودیت‌ها و فاکتورهایی همچون شیب، ارتفاع، توپوگرافی، حریم و بستر رودخانه، زمین‌های کشاورزی و... نیز با ضرایب متفاوت در پیش‌بینی مسیر و مکان بهینه در نظر گرفته شده است. بر این اساس، در سال ۲۰۲۲، ۶۲/۴ هکتار از اراضی با پوشش گیاهی و ۹۹۵/۸ هکتار از اراضی بایر و کوهستانی به کاربری شهری تبدیل خواهند شد. جهات شمال، جنوب غربی و غرب بیشترین رشد را خواهند داشت. نقشهٔ شبیه‌سازی‌شده در این مطالعه بر اساس مفاهیم تصمیم‌سازی چندمعیاره، راه‌های استراتژی مناسبی برای برنامه‌ریزان شهری مهیا می‌کند.

منابع

آمارنامهٔ شهرداری سنندج، (۱۳۹۳). چاپ اول.

خاکپور، براتعلی و همکاران، (۱۳۹۴) ارزیابی و مکان‌یابی بهینهٔ جهت‌های توسعهٔ فضایی- کالبدی شهر بوکان، مجلهٔ پـژوهش‌هـای جغرافیای انسانی.

خوش‌گفتار، محمد مهدی؛ طالعی، محمد؛ (۱۳۸۹). شبیه‌سازی رشد شهری در تهـران بـا اسـتفاده از مـدل CA-Markov، مجلـهٔ سنجش از دور و GIS ایران، شمارهٔ دوم.

عبدی، محمدعلی؛ مهیدزادگان، سیما؛ (۱۳۸۹). توسعهٔ درونی شهری، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول.

فاطمی، سید باقرر؛ رضایی، یوسف؛ (۱۳۸۹). مبانی سنجش از دور، انتشارات آزاده، تهران.

گازرانی، فریدون؛ (۱۳۷۸). برنامه‌ریزی توسعهٔ متعادل بخش مرکزی شهر سنندج، رسالهٔ کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی.

مردخ، محمد؛ (۱۳۵۱). تاریخ کرد و کردستان، جلد دوم، انتشارات غریقی سنندج.

وزارت راه و شهرسازی، بخشنامهٔ ۱۳۹۱/۴/۱۳- ۲۱۳۳۹/۳۰۰/۹۱

Ahadnejad, M., Maruyama, Y., Yamazaki, F .2009. Evaluation and Forecast of Human Impacts based on Land Use Changes using Multi-Temporal Satellite Imagery and GIS: A Case study on Zanjan, Iran, J. Indian Soc. Remote Sensing, No: 37:659˚669.

Benenson, I. and P.M.Torrens (2004). Geosimulation, Automata-Based Modeling Of Urban Phenomena. England: John Wiley & Sons, Ltd.

Cheng, J.and Masser, I., 2003, Urban Growth Pattern Modeling: A Case Study of Wuhan City, PR China, Landscape & Urban Planning 62, 199˚217

Choguill, C.L., 2003, The Programmed Future of Civic Development in the Third- World: New Directions, Translated By: Mahdavi, Sh., Journal of Seven City, Vol. 3, No. 9 & 10, PP. 43-55.

Clarke, K.C., Hoppen, S. and Gaydos, L., 1997, A Self-modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area, Environment and Planning B: Planning & Design 24, 247˚261.

Li, H., & Reynolds, J.F., 1997, Modeling Effects of Spatial Pattern, Drought, and Grazing on Rates of Rangeland Degradation: . Urban Planning 62, 199˚217

Pijanowskia, B.C., Brown, D.G., Shellitoc, B.A. and Manikd, G.A., 2002, Using Neural Networks and GIS to Forecast Land Use Changes: A Land Transformation Model, Computers, Environment and Urban Systems 26(6), 553˚575.

Torrens, P.M., 2000, How Cellular Models of Urban Systems Work, CASA Working Paper 28, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis.

Torrens, P.M. (2003). Automata-based models of urban systems. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA). ESRI Press: 61-79.

Yeh, A.G.O., Li, X., 2003, Urban Simulation Using Neural Networks and Cellular Automata for Land Use Planning, ISPRS proceeding, symposium on geospatial theory, Ottawa.

Zayyari, K., 2003, Cultural- Asocial Transformations Caused By Industrial Revolutionary in Spatial Development of Tehran, Journal of Geography and Developing, Vol. 1, No. 1, PP. 151-164. (in Persian).