

## پیش‌بینی تغییرات ساخت و ساز شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مبتنی بر مدل سلول‌های خودکار مارکوف (مطالعه موردی شهر ساری)

علمی پژوهشی

سحاب بیدگلی کاشانی<sup>۱</sup>، مهران فدوی<sup>۲</sup>، ولی‌الله عزیزی‌فر<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹

صفحات: ۷۱-۸۲

### چکیده

به موازات افزایش روزافزون جمعیت شهرنشین، میزان ساخت و ساز در فضای شهر توسعه یافته است. توسعه ساخت و ساز در فضای افقی و بدون توجه به محدودیت‌های موجود منجر به بروز مشکلات محیطی، اقتصادی و حقوقی برای شهروندان شده است. دستیابی به میزان، شدت و جهت توسعه ساخت و ساز از گذشته تا کنون و پیش‌بینی وضعیت ساخت و ساز در آینده، نخستین گام در جهت مدیریت علمی و عملی توسعه فیزیکی ساخت و ساز شهری، و برنامه‌ریزی و ارائه راهکارهای مناسب به منظور ایجاد تناسب مابین تخصیص مکانی-فضایی ساخت و ساز و انواع ملاحظات حقوقی، اقتصادی و محیطی می‌باشد. داده‌ها و اطلاعات مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای ضمن نمایش تغییرات تاریخی ساخت و ساز شهری، به عنوان داده‌های ورودی اصلی، لازم و ضروری برای مدل‌های پیش‌بینی وضعیت آن در آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره لندست در بازه‌های زمانی ۲۰۰۷-۱۹۹۷ میلادی و ۲۰۱۷-۲۰۰۷ میلادی مربوط به شهر ساری مورد استفاده قرار گرفت. بعد از انجام تصحیحات هندسی، نقشه‌های محدوده شهر با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال تهیه شد. سپس با استفاده از پارامترهای مؤثر در تغییرات ساخت و ساز شهری، با استفاده از مدل سلول‌های خودکار مارکوف، میزان دقت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نهایتاً برای صحت سنجی، نقشه‌های شبیه‌سازی‌شده و نقشه واقعیت زمین با یکدیگر تطابق داده شدند. شبیه‌سازی روند توسعه ساخت و ساز در سال ۲۰۲۷ با استفاده از مدل سی ای مارکوف نشان داد که در صورت ادامه تجویزهای مدیریتی موجود، این محدوده از مساحت ۴۶۱۷/۹۰ هکتار در سال ۲۰۱۷ به ۴۳۵۷/۴۴ هکتار در سال ۲۰۲۷ کاهش خواهد یافت. لیکن بررسی نقشه‌های تغییرات و نقشه‌های پایداری نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۱۷ الی ۲۰۲۷ میلادی پهنه‌های جدیدی تحت ساخت و ساز قرار می‌گیرند که پیش از این عمدتاً کاربری کشاورزی و بایر داشته‌اند.

**واژگان کلیدی:** آشکارسازی تغییرات، پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات، سنجش از راه دور، ساخت و ساز شهری، مدل سلول‌های خودکار مارکوف

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران. (نویسنده مسئول)

۳- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر، ایران.



## مقدمه

سکونتگاه‌های جوامع انسانی به تدریج تکامل یافته و از ساختار ابتدایی و ساده روستایی به ساختار پیچیده شهرهای امروزی تغییر نموده‌اند (Barlow, ۲۰۱۴; Bhat et al., ۲۰۲۲; Qian et al., ۲۰۱۷; Wang et al., ۲۰۱۶). به موازات افزایش روزافزون جمعیت شهرنشین، میزان ساخت و ساز در فضای شهر توسعه یافته است. توسعه ساخت و ساز در فضای افقی و بدون توجه به محدودیت‌های موجود از جمله کمبود عرضه زمین منجر به بروز مشکلات محیطی، اقتصادی و حقوقی برای شهروندان شده است. از این رو مدیریت توسعه ساخت و ساز شهری امری لازم، ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌نماید (Hegazy & Kaloop, ۲۰۱۵; Matovnikov & Matovnikova, ۲۰۱۶). تصاویر ماهواره‌ای به عنوان پرکاربردترین و مناسب‌ترین ابزار جهت ارزیابی وضعیت کمی ساخت و ساز شهری در سنوات گذشته و بیان میزان، شدت و جهت تغییرات آن تاکنون هستند (Alavipanah, ۲۰۱۵). داده‌ها و اطلاعات مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای ضمن نمایش تغییرات تاریخی انواع کاربری‌ها، به عنوان داده‌های ورودی اصلی، لازم و ضروری برای مدل‌های پیش‌بینی وضعیت هر یک از انواع کاربری اراضی در آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند (Jat et al., ۲۰۱۷; Pontius & Malanson, ۲۰۰۵; Pontius Jr et al., ۲۰۰۱). به طور کلی پاره‌ای از مدل‌ها به پیش‌بینی وضعیت یک کاربری خاص و یا نوعی از کاربری‌ها با فرض تثبیت و تمدید تجویزهای مدیریتی حال حاضر پرداخته و پاره‌ای دیگر قادر به ارزیابی پارامترهای وابسته سیاسی،

اجتماعی و ... در جهت پیش‌بینی وضعیت آینده کاربری اراضی هستند (Jat et al., ۲۰۱۷; Pontius & Malanson, ۲۰۰۵). مدیریت توسعه کالبدی ساخت‌وساز شهری مستلزم برنامه‌ریزی مبتنی بر ارزیابی جمیع عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی مؤثر بر بعد مکانی-فضایی ساخت‌وساز شهری در زمان گذشته، حال و آینده است (پور et al., ۲۰۱۵).

## پیشینه تحقیق

میرزاپور و همکاران (۲۰۲۰) به منظور آشکارسازی تغییرات صورت گرفته در شهر خرم آباد، استان لرستان به مدلسازی تغییرات کاربری اراضی محدوده شهرستان پرداختند. در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده های TM<sup>+</sup>، ETM<sup>+</sup> و OLI ماهواره لندست مربوط به سه دهه ۱۳۷۴، ۱۳۸۴ و ۱۳۹۴ مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از پارامترهای مؤثر در توسعه شهری شامل؛ فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از روستا، شیب، جهت، ارتفاع و کاربری در سال پایه بودند، با استفاده از مدل ژنومد و الگوریتم‌های یادگیری برمبنای نمونه وزنی مشابهت و شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، میزان دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده مورد بررسی قرار گرفت. نهایتاً برای صحت‌سنجی، نقشه‌های شبیه‌سازی شده و نقشه واقعیت زمین با یکدیگر تطابق داده شدند. نتایج نشان داد مدل ژنومد، در شبیه‌سازی توسعه شهری شهر خرم‌آباد کارایی مناسبتری نسبت به دیگر مدل‌های مورد بررسی دارد (Mirzapour et al., ۲۰۲۰). محرمی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تلفیق دو مدل منطق فازی و AHP به موقعیت‌یابی مناسب جهت توسعه

بندی تصاویر به صورت نظارت شده و از روی تصاویر ادغام شده که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر بوده، با الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربری های اراضی جنگلی و کشاورزی در بازه زمانی ۱۴ سال در شهرستان تالش روند کاهشی داشته است و برعکس کاربری های انسان ساخت در حال افزایش است (امیرانتخابی *et al.*, ۲۰۱۷). پونتیس و مالانسون (۲۰۰۵) به مقایسه توان دو مدل سلول‌های خودکار مارکوف و ژنومد در پیش‌بینی تغییرات مکانی انواع کاربری اراضی تحت شرایط یکسان پرداختند. مدل سلول‌های خودکار مارکوف توانایی پیش‌بینی تغییرات دو سویه مابین هر یک از انواع کاربری اراضی به یکدیگر را داراست حال آنکه مدل ژنومد تنها قادر به پیش‌بینی تغییر یک سوبه یک نوع خاص از انواع کاربری اراضی به نوع خاص دیگر است. هر یک از مدل‌ها با استفاده از داده‌های کاربری اراضی سنوات ۱۹۷۱ الی ۱۹۸۵ میلادی کالیبره شدند و سپس برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۹۸۵ الی ۱۹۹۹ میلادی مورد استفاده قرار گرفتند. روش سنجش توان پیش‌بینی هر یک از مدل‌ها، اولاً فرآیند کالیبراسیون را از فرآیند اعتبارسنجی جدا می‌کند، ثانیاً صحت پیش‌بینی را در توان تفکیک‌های چندگانه ارزیابی می‌کند و ثالثاً به مقایسه مدل پیش‌بینی با مدل صفر می‌پردازد که پایداری خالص انواع کاربری اراضی را پیش‌بینی می‌کند. بنا بر نتایج حاصل از ۲۴ بار اجرای مدل‌های پیش‌بینی در میان ۲۴ اجرای مدل مشخص شد که هر یک از آن‌ها در توان تفکیک‌های بزرگتر از ۲ کیلومتر نسبت به مدل صفر دقیق‌تر و در توان تفکیک‌های کمتر

فیزیکی شهر با استفاده از مدل AHP و منطق فازی در محیط GIS در شهرکرد، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ۵/۱۶ درصد منطقه مورد مطالعه در کلاس بسیار مناسب قرار دارد و ۹ درصد از منطقه در کلاس بسیار نامناسب قرار می‌گیرد (محرمی *et al.*, ۲۰۱۹). خرسندی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی شاخص‌های کالبدی مسکن در توسعه سکونتگاه‌های شهری با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی در شهر سمنان پرداختند. در این پژوهش با استفاده از شاخص‌های مسکن به بررسی وضعیت مسکن شهر سمنان پرداخته شد. این پژوهش شاخص‌های منتخب شهر سمنان شامل ارزش منطقه-ای زمین، درصد جمعیت باسواد، میزان دسترسی به خدمات مسکونی، تراکم جمعیت، کیفیت ساختمان، قدمت ساختمان، نحوه تصرف، اسکلت ساختمانی، الگوی مسکن، نوع مصالح نمای ساختمان، عرض معبر، تعداد طبقات ساختمان، تراکم ساختمانی (با رویکرد کیفیت مسکن شهری را با استفاده از روش ارزیابی چند معیاره به منظور استخراج شاخص نهایی کیفیت مکان در محیط سیستم اطلاعات مکانی با هم تلفیق کرد. نتایج نشان می‌دهد ۳۱ درصد مناطق مورد مطالعه از نظر کیفیت مسکن خیلی مناسب، ۱۱ درصد مناسب‌تر، ۱۳ درصد مناسب و ۳ درصد نامناسب بودند (خرسندی *et al.*, ۲۰۱۹). امیرانتخابی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصویر ماهواره ای LANDSAT سنجنده ETM+ در سال ۱۳۸۲ و تصویر سنجنده OLI مربوط به سال ۱۳۹۶ به آشکارسازی روند تغییرات کاربری اراضی و تعیین عوامل موثر بر آن در شهرستان تالش پرداختند. طبقه

و ساز شهری در آینده به پرسش‌های پیرامون میزان تغییرات از گذشته تا کنون و گستره تغییرات در آینده پاسخ داده خواهد شد.

### مدل سلول‌های خودکار مارکوف<sup>۲</sup>

زنجیره مارکوف مدلی ریاضی است که برای شرح نوع خاصی از فرآیند که در گام‌های متوالی بین وضعیت‌های مختلف رخ می‌دهد، کاربرد دارد. فرضیه زنجیره مارکوف که به صورت کاربردی برای تغییرات کاربری زمین به کار گرفته می‌شود، آن است که کاربری زمین در گذشته می‌تواند برای پیش‌بینی آینده و همچنین وضعیت کنونی مؤثر باشد. به بیان دیگر احتمال شرطی تغییرات کاربری زمین در هر زمان، با در دسترس بودن تمام نقشه‌های کاربری در زمان‌های قبل، وابسته به نزدیک‌ترین کاربری به زمان موردنظر بوده و به زمان‌های دورتر مرتبط نیست. سازوکار اصلی زنجیره مارکوف احتمال است که نشان‌دهنده در دستنمایی انتقال یا حرکت از وضعیت  $i$  به وضعیت  $j$  در یک بازه زمانی مشخص است (Xu et al., ۲۰۲۲). مدل سلول‌های خودکار مارکوف مدلی است که از تلفیق دو مدل تحلیل زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار بهره می‌گیرد به دلیل کارآمدی این مدل‌هایی در پیش‌بینی تغییرات در آینده با به کارگیری اطلاعات گذشته در این پژوهش از مدل سلول‌های خودکار مارکوف جهت پیش‌بینی وضعیت کاربری ساخت و ساز در آینده استفاده شده است (Kisamba & Li, ۲۰۲۳). زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار هر دو در واقع مدل دینامیک گسسته در زمان و موقعیت

از یک کیلومتر نسبت به مدل صفر دارای صحت کمتری هستند (Pontius & Malanson, ۲۰۰۵). علاوه بر این، در پژوهش‌های گذشته، انواع متعددی از مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی الگوی واقعی ساخت و ساز شهری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آبوراس و همکاران (۲۰۱۶) با تشریح و طبقه‌بندی اصول مدل‌های رایج و شناسایی نقاط ضعف و قوت هر یک از آن‌ها، مبنایی برای انتخاب مدل مناسب فراهم آوردند. نتایج نشان داد که مدل سلول‌های خودکار به علت ساختار، سادگی و امکان تکامل، یکی از مدل‌های قدرتمند برای شبیه‌سازی الگوهای رشد ساخت و ساز شهری است و محدودیت‌های آن از جمله ضعف در کمی‌سازی تغییرات و عدم لحاظ نیروهای محرک رشد ساخت و ساز شهری در فرآیند شبیه‌سازی ممکن است به واسطه ادغام آن با مدل‌های کمی دیگر نظیر زنجیره مارکوف، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت تواتر به حداقل برسد. همچنین زمانیکه عوامل اقتصادی و اجتماعی و ابعاد زمانی-مکانی در فرآیند شبیه‌سازی بکارگرفته شود، نتایج واقعی حاصل می‌شود (Aburas et al., ۲۰۱۶). مطالعه جاری، پژوهشی توصیفی تحلیلی با هدف آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات ساخت و ساز شهری محیط پژوهش با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف و در شرایط تثبیت و تمديد تجویزهای مدیریتی جاری است. در این پژوهش با فرض کارآمدی تصاویر ماهواره‌ای در نقشه‌سازی ساخت و ساز شهری در سنوات مختلف و نیز کارآیی داده‌های مستخرج از تغییرات مکانی ساخت و ساز در سنوات پیشین جهت مدل‌سازی رشد ساخت

<sup>۲</sup> Markov-CA (Cellular Automata (CA) Markov)

مادون قرمز نزدیک و یک باند طیفی مادون قرمز میانی) برای پردازش مورد استفاده قرار گرفتند.

### روش شناسی

مدل‌سازی یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل پویایی نظام ساخت و ساز شهری است که با استفاده از آن چارچوب علمی تحلیل سیستم‌های تغییر کاربری اراضی از حالت توصیفی به سمت کمی تغییر پیدا می‌کند. مراحل پیاده‌سازی مدل پیشنهادی مطابق با فلوجارت ارائه شده در شکل ۱ در ادامه به صورت گام به گام تشریح شده است:

**گام اول:** در این گام، ابتدا تصاویر مربوط به محدوده مورد پژوهش از ماهواره لندست دریافت شد و عملیات پیش‌پردازش داده‌ها انجام شد. در این گام، انواع خطاهای ناشی از موقعیت خورشید و زاویه تابش انرژی الکترومغناطیس، شرایط اتمسفر و وضعیت پستی و بلندی زمین در تصویر هر یک از باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از داده‌های آماری بررسی شد. در این گام، تصویر هر یک از باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای، تبدیل فرمت و در محدوده مختصاتی محیط پردازش زیر مجموعه‌گیری شد. در ادامه، به منظور افزایش کیفیت بصری تصاویر هر یک از باندهای طیفی و نیز نمایش واضح‌تر پدیده‌های مورد نظر به منظور تفسیر چشمی، پاره‌ای از فرآیندهای بارزسازی بر روی تصاویر ماهواره‌ای سنواتی اعمال شد. پس از نیازسنجی و بنا به ضرورت، بسط تباین در تصویر هر یک از باندهای طیفی بر مبنای مقادیر حداقل و حداکثر بازتاب واقعی و حقیقی انجام شد.

هستند. مشکل زنجیره مارکوف این است که اطلاعات و موقعیت مکانی را در نظر نمی‌گیرد. احتمالات تبدیل ممکن است روی هر گروه پایه (هر کاربری) از صحت و دقت بالایی برخوردار باشد، اما فاقد دانش و آگاهی از توزیع مکانی تصادفی درون هر گروه کاربری زمین است و به عبارتی مؤلفه مکانی در خروجی مدل وجود ندارد. در مقابل در مدل سلول‌های خودکار عامل توانایی تغییر وضعیت جدیدش را بر اساس به کارگیری قانونی که وضعیت جدید را مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت همسایگانش نشان می‌دهد، دارا است. در مدل سلول خودکار مارکوف فرایند زنجیره مارکوف تغییرات زمانی را در میان کلاس کاربری زمین بر اساس احتمالات تبدیل کنترل می‌نماید و تغییرات مکانی به وسیله قوانین محلی تعیین شده از طریق فیلتر مکانی سلول خودکار یا نقش‌های شایستگی کنترل می‌شوند (Wang & Zheng, ۲۰۲۳).

### داده‌ها و روش‌ها

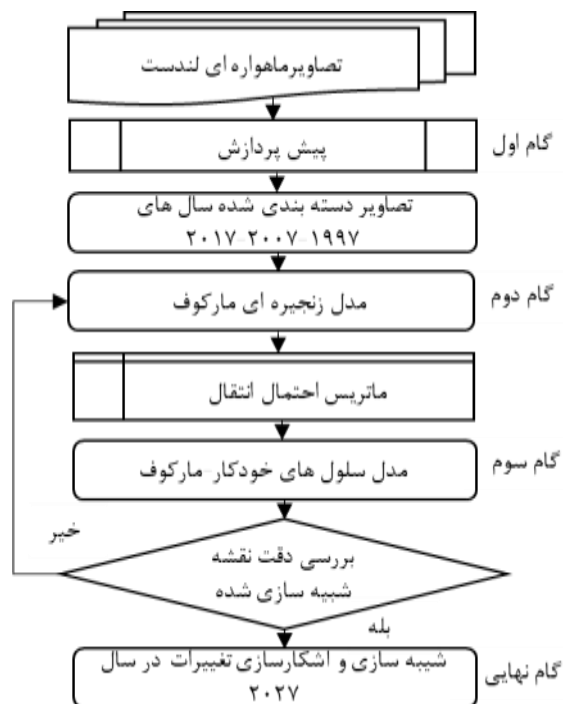
شهر ساری به عنوان مرکز استان مازندران با مساحت حدود ۲۸۵۲ هکتار در گستره طول جغرافیایی ۵۳ ۰۰ الی ۵۳ الی ۵۰ ۰۶ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ ۴۷ الی ۳۶ الی ۳۶ ۰۶ شمالی و در کشور ایران واقع شده است. در این مطالعه حریم ۷ کیلومتری از مرکز مختصات گستره شهر ساری به عنوان محیط پژوهش در نظر گرفته شد. داده‌های ماهواره‌ای شامل تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره Landsat از سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی می‌باشند. در این پژوهش تنها تصاویر شش باند طیفی از هر سنجنده (سه باند طیفی مرئی، دو باند طیفی

ماتریس مقادیر ویژه-بردارهای ویژه و ماتریس بارگذاری است. مقدار ویژه بیانگر واریانس هر مؤلفه و بردار ویژه بیانگر ضرایب تبدیل باندهای طیفی به مؤلفه‌های تصویری است. در این مرحله تحلیل مؤلفه‌های اصلی با استفاده از شش باند طیفی برای هر یک از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ انجام شد. در انتهای گام پیش پردازش، بر مبنای تفسیر بصری هر یک از مؤلفه‌های تصویری حاصل از فرآیند بارسازی، یک طرح طبقه‌بندی منبع-تطبیقی برای محیط پژوهش تهیه شد (جدول ۱).

جدول ۱: طرح طبقه‌بندی

علامت اختصاری	طبقه‌های اطلاعاتی			تصویر	مقیاس
	۲۰۱۷	۲۰۰۷	۱۹۹۷		
<b>C</b>	ساخت و ساز	ساخت و ساز	ساخت و ساز	سپرده‌های TM و ETM+	۱:۱۰۰۰۰
<b>G</b>	پوشش سبز	پوشش سبز	پوشش سبز		
<b>B</b>	اراضی بایر	اراضی بایر	اراضی بایر		
<b>W</b>	پهنه‌های آبی	پهنه‌های آبی	پهنه‌های آبی		

در نهایت در این گام نمونه‌های تعلیمی از طریق ترکیب نتایج حاصل از تفسیر بصری و ترفیع تصاویر برای هر یک از طبقات طرح طبقه‌بندی به روش ترسیم تهیه و طبقه‌بندی حداکثر احتمال با استفاده از سه باند طیفی آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک و نقشه‌های کاربری اراضی برای هر یک از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ تهیه شد.



شکل ۱: فلوچارت مدل پیشنهادی

سپس به منظور ایجاد تصاویر رنگی از سه باند طیفی در هر تصویر ماهواره‌ای نخست تعداد ترکیب‌های سه‌تایی از باندهای طیفی تحت بررسی محاسبه و ترتیب باندها در هر ترکیب مشخص شد. پس از آن فاکتور شاخص مطلوب برای هر ترکیب سه‌تایی و بر مبنای آماره‌های انحراف معیار و ضریب همبستگی محاسبه شد. پس از تعیین ترکیب با بیشترین میزان فاکتور شاخص مطلوب در هر تصویر ماهواره‌ای، سه باند طیفی منتخب در شش حالت به گام‌های رنگی قرمز، سبز و آبی اختصاص یافتند. از شش تصویر رنگی حاصل برای هر یک از سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷، تصویر رنگی با تباین بیشتر نسبت به سایر تصاویر بر مبنای نظر کارشناسی انتخاب شد. همچنین بر مبنای دو باند طیفی مادون قرمز نزدیک و قرمز، مؤلفه تصویری شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال برای هر یک از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ ایجاد شد. خروجی‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی عبارت از ماتریس واریانس-کوواریانس، ماتریس همبستگی،

واحدهای نمونه در هر سال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس (تصاویر گوگل ارث) و متناسب با گدهای موجود در طرح طبقه‌بندی گویا و نقشه واقعیت زمینی برای هر یک از سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ تولید شد. پس از تهیه نقشه واقعیت زمینی، هر یک از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ با نقشه‌های واقعیت زمینی هم‌سال مقایسه و ماتریس ابهام تشکیل و تکمیل شد. بر اساس داده‌های موجود در ماتریس ابهام به ترتیب پارامترهای صحت کلی و ضریب کاپا محاسبه شد. بعد از تایید دقت مدل پیشنهادی در پیش‌بینی نقشه‌های گذشته، آشکارسازی تغییرات ساخت و ساز با استفاده از نقشه‌های کاربری سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ در بازه‌های زمانی ۲۰۰۷-۱۹۹۷، ۲۰۱۷-۲۰۰۷ و ۲۰۱۷-۱۹۹۷ انجام و پیش‌بینی و شبیه‌سازی ساخت و ساز شهری در سال ۲۰۲۷ با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف صورت پذیرفت.

### یافته‌های تحقیق

در هر یک از سه بازه زمانی ۲۰۰۷-۱۹۹۷، ۲۰۱۷-۲۰۰۷ و ۲۰۱۷-۱۹۹۷ تغییر سطح خالص و ناخالص، نقشه تغییرات و نقشه پایداری کاربری‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تغییر ناخالص سطح کاربری‌ها مبین میزان افزایش و کاهش مساحت هر یک از انواع کاربری‌ها طی یک بازه زمانی معین می‌باشد. در این پژوهش افزایش و کاهش مساحت هر یک از انواع کاربری‌ها در بازه‌های زمانی مورد نظر بر حسب هکتار محاسبه شد (جدول ۲).

**گام دوم:** در این گام، تصاویر دسته بندی شده در طرح طبقه‌بندی خروجی مرحله گذشته به مدل زنجیره‌ای مارکوف داده شد. در مدل پیشنهادی تصاویر دسته بندی شده با اعمال مدل زنجیره‌ای مارکوف به داده‌ها، خروجی این گام ماتریس احتمال انتقال خواهد بود.

**گام سوم:** در گام سوم با استفاده از مدل سلول‌های خودکار مارکوف و به کمک ماتریس احتمال انتقال حاصل از گام قبل، فاز شبیه‌سازی ساخت و ساز شهری انجام خواهد شد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های سال‌های مورد بررسی مقایسه می‌شود. در صورتی که دقت مدل برای داده‌های آزمایشی قابل قبول نباشد، مراحل کار از گام دوم تکرار خواهد شد. در صورت برآوردن شرط و حصول دقت مورد انتظار، ادامه اجرای الگوریتم به گام نهایی خواهد رفت.

**گام نهایی:** بعد از تایید دقت مدل پیشنهادی در پیش‌بینی نقشه‌های گذشته، آشکارسازی تغییرات ساخت و ساز با استفاده از نقشه‌های کاربری سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ در بازه‌های زمانی ۲۰۰۷-۱۹۹۷، ۲۰۱۷-۲۰۰۷ و ۲۰۱۷-۱۹۹۷ انجام و پیش‌بینی و شبیه‌سازی ساخت و ساز شهری در سال ۲۰۲۷ با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف صورت پذیرفت.

برای انجام تجزیه و تحلیل‌ها از نرم‌افزار TerrSet Geospatial Monitoring and Modelling System نسخه ۲۰۲۰ استفاده شده است.

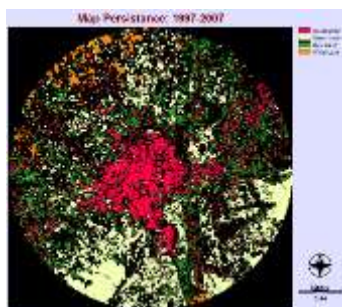
### ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی صحت نقشه‌های کاربری اراضی، نخست تعداد ۴۰ واحد نمونه در فضای نقشه کاربری اراضی هر سال و در قالب طرح تصادفی آشکوبی و به شکل سلولی پیاده‌سازی شدند. آنگاه هر یک از

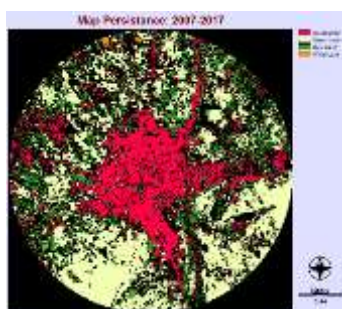


جدول ۲: تغییر سطح ناخالص کاربری‌ها

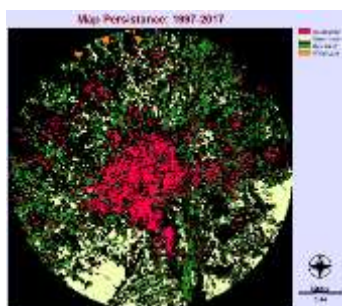
	۱۹۹۷-۲۰۱۷	۲۰۰۷-۲۰۱۷	۱۹۹۷-۲۰۰۷		
کاربری	کاهش (هکتار)	افزایش (هکتار)	کاهش (هکتار)	افزایش (هکتار)	کاهش (هکتار)
ساخت و ساز	۱۸۹۰	۳۱۸۷	۲۰۰۶	۲۰۵۳	۱۶۶۵
پوشش سبز	-	-	-	-	-
اراضی یاب	۱۲۷۳	۳۶۹۲	۲۵۰۸	۱۲۴۱	۴۲۹۶
پهنه‌های آبی	۴۱۲۲	۲۶۹۹	۱۶۵۴	۳۲۵۱	۴۷۳۰
	-	-	-	-	-
	۲۳۳۱	۳۷	-۴۳۰	۵۴	۱۹۸۶
	-	-	-	-	-



۱۹۹۷-۲۰۰۷



۲۰۰۷-۲۰۱۷



۱۹۹۷-۲۰۱۷

شکل ۲: نقشه حدود پایدار کاربری اراضی در بازه‌ها و دوره زمانی پژوهش

در روش سلول‌های خودکار مارکوف از احتمال تغییر تمام کاربری‌ها به یکدیگر در فاصله زمانی مورد نظر به منظور شبیه‌سازی کاربری‌ها در آینده استفاده شده است. بر این اساس نقشه کاربری اراضی در سال ۲۰۲۷ شبیه‌سازی شد (شکل ۳).

مساحت هر یک از کاربری‌های پیش‌بینی شده در سال ۲۰۲۷ میلادی با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف در جدول ۳ ارائه شده است.

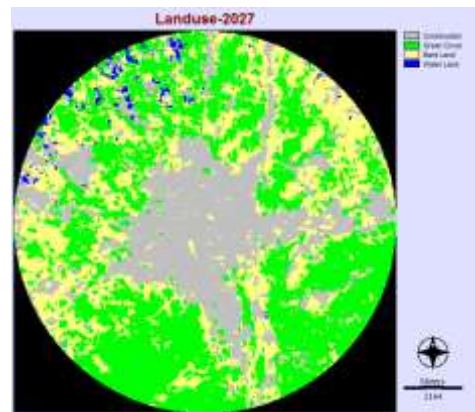
تغییر خالص سطح کاربری‌ها مبین میزان افزایش یا کاهش مساحت هر یک از انواع کاربری‌ها طی یک بازه زمانی معین می‌باشد. چنانچه تغییر خالص مبین کاهش مساحت کاربری در بازه زمانی معین باشد به صورت عددی منفی بیان می‌شود. نقشه پایداری کاربری اراضی نمایانگر حدود عدم تغییر هر یک از انواع کاربری اراضی است. در این پژوهش نقشه پایداری کاربری اراضی با استفاده از فن تفاضل تصویر در بازه‌های زمانی مورد نظر تولید شد (شکل ۲).

شبیه‌سازی توسعه ساخت و ساز بر مبنای نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی و با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف برای سال ۲۰۲۷ میلادی انجام شد.

علت این امر وجود اطلاعات یکسان و در نتیجه زائد در باندهای طیفی ترکیب‌های باندهای طیفی آبی-قرمز-مادون قرمز نزدیک تشخیص داده شد. به منظور حذف اطلاعات زائد، تصاویر باندهای طیفی بر مبنای میانگین، واریانس-کوواریانس و ضرایب همبستگی به مؤلفه‌های تصویری تبدیل شدند. درصد واریانس حاصل از فرآیند تحلیل مؤلفه‌های اصلی معیاری از اطلاعات موجود در مؤلفه‌ها است. بر این اساس مؤلفه‌های تصویری اول، دوم و سوم در هر یک از تصاویر سال‌های ۱۹۹۷ میلادی (۱۹۹۷ میلادی)، ۲۰۰۷ میلادی (۲۰۰۷ میلادی) و ۲۰۱۷ میلادی (۲۰۱۷ میلادی) به ترتیب حاوی ۹۹/۷۳، ۹۹/۷۴ و ۹۹/۷۱ درصد از اطلاعات موجود در باندهای طیفی هستند. لیکن تفسیر بصری نشان داد مؤلفه‌های تصویری چهارم، پنجم و ششم در مجموع با درصد واریانس کوچکتر از یک، علیرغم حجم اطلاعات بسیار کمتر از سه مؤلفه اول، حاوی اطلاعات مفیدی هستند. به طور کلی تنها دو مؤلفه تصویری دوم و پنجم حاوی تمایز قابل قبول یک عارضه از سایر عوارض موجود در صحنه هستند. مؤلفه تصویری دوم مبین تمایز قابل قبول اراضی بایر (در سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷) و پهناهای آبی (در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷) و مؤلفه تصویری پنجم مبین تمایز قابل قبول سکونتگاه‌ها (در سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷) از سایر عوارض موجود در صحنه تصویر هستند. بنابراین ایجاد تمایز مابین پوشش‌های سبز ضروری است. مؤلفه‌های تصویری حاصل از شاخص‌های پوشش گیاهی موجب تمایز پوشش‌های سبز از سایر عوارض می‌شوند. طرح طبقه‌بندی حاوی اطلاعات پیرامون نوع، علامت اختصاری و شناسه منحصر کاربری‌های موجود

جدول ۳: مساحت کاربری‌های پیش‌بینی شده در سال ۲۰۲۷ میلادی با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف

کاربری / پوشش	سال (میلادی)	۲۰۲۷
ساخت و ساز		۴۳۵۷/۴۴
پوشش سبز		۶۴۷۰/۱۰
اراضی بایر		۴۳۹۸/۴۸
پهنه‌های آبی		۱۶۶/۶۸



شکل ۳: کاربری‌های پیش‌بینی شده در سال ۲۰۲۷ میلادی

### نتایج و بحث

در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای بر مبنای تحلیل و جمع‌بندی معیارهای دوره زمانی آشکارسازی تغییرات، بازه‌های زمانی آشکارسازی تغییرات، محدودیت‌های پژوهش، پارامترهای فنی ماهواره و سنجنده و نیز زمان تصویربرداری (فصل، ماه و روز) انتخاب و باندهای طیفی انعکاسی برای تجزیه و تحلیل استفاده شدند. تفسیر بصری نشان داد تصاویر رنگی حاصل فاقد تمایز قابل انتظار مابین انواع عوارض موجود در صحنه تصویر می‌باشند.

در محیط پردازش بر اساس تصاویر سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی است. نوع کاربری‌ها بر اساس تفسیر بصری و رقومی تصاویر سال‌های مذکور تعیین شد. ارزیابی صحت نقشه‌های کاربری اراضی از طریق مقایسه با نقشه‌های واقعیت زمینی انجام و پارامترهای صحت کلی و ضریب کاپا تبیین شدند.

### نتیجه‌گیری

پس از اعتبار سنجی نتایج در فاز نهایی شبیه‌سازی و آشکارسازی تغییرات در سال ۲۰۲۷ به کمک مدل پیشنهادی انجام شد. نتایج تحقیق با استفاده از پارامترهای ارزیابی صحت کلی و همچنین دقت کاپا بررسی شد. نقشه‌های کاربری تولید شده از کلاس-بندی و پیش‌بینی شده از مدل‌ها در سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی مقایسه و صحت آن با استفاده از شاخص کاپا ارزیابی شد. صحت کلی برای هر یک از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی به ترتیب برابر با ۰/۹۰، ۰/۹۱ و ۰/۹۴ و مبین همخوانی قابل قبول نقشه‌های کاربری اراضی با واقعیت زمینی بود. همچنین دقت کاپا برای هر یک از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۹۲ و ۰/۹۱ و مبین همخوانی قابل قبول نقشه‌های کاربری اراضی با یکدیگر بود. آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی در بازه‌های زمانی ۲۰۰۷-۱۹۹۷ میلادی و ۲۰۱۷-۲۰۰۷ میلادی و نیز دوره زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۷ مبین تغییرات عمده هر یک از انواع کاربری/پوشش اراضی بود. میانگین صحت کلی برای هر یک از نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از مدل سی ای مارکوف برابر با ۰/۹۲ و مبین همخوانی قابل قبول نقشه‌های کاربری اراضی

با واقعیت زمینی بود. همچنین میانگین دقت کاپا برای هر یک از نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از مدل سی ای مارکوف نیز برابر با ۰/۹۲ و مبین همخوانی قابل قبول نقشه‌های کاربری اراضی با یکدیگر بود. شبیه‌سازی روند توسعه ساخت و ساز در سال ۲۰۲۷ با استفاده از روش سلول‌های خودکار مارکوف نیز نشان داد که در صورت ادامه تجویزهای مدیریتی موجود این محدوده از مساحت ۴۶۱۷/۹۰ هکتار در سال ۲۰۱۷ به ۴۳۵۷/۴۴ هکتار در سال ۲۰۲۷ کاهش خواهد یافت. لیکن بررسی نقشه‌های تغییرات و نقشه‌های پایداری نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۱۷ الی ۲۰۲۷ میلادی پهنه‌های جدیدی تحت ساخت و ساز قرار می‌گیرند که پیش از این کاربری دیگری که عمدتاً کشاورزی و بایر بوده، داشته‌اند.

## منابع

- Environment, ۶(۲), ۵۲۱-۵۱۳.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijlsbe.2017.10.003>
- Hegazy, I. R., & Kaloop, M. R. (۲۰۱۵). Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. *International Journal of Sustainable Built Environment*, ۴(۱), ۱۱۷-۱۲۴.
- Jat, M. K., Choudhary, M., & Saxena, A. (۲۰۱۷). Application of geo-spatial techniques and cellular automata for modelling urban growth of a heterogeneous urban fringe. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, ۲۰(۲), ۲۴۱-۲۲۳.
- Kisamba, F. C., & Li, F. (۲۰۲۳). Analysis and modelling urban growth of Dodoma urban district in Tanzania using an integrated CA-Markov model. *GeoJournal*, ۸۸(۱), ۵۳۲-۵۱۱.
- Matovnikov, S., & Matovnikova, N. (۲۰۱۶). Innovative urban planning methods for the urban landscape design in the Volgograd agglomeration. *Procedia Engineering*, ۱۵۰, ۱۹۷۱-۱۹۶۶.
- Mirzapour, H., Arshia, A., & Tahmasebipour, N. (۲۰۲۰). Evaluating the Performance of Geomod Model, SimWeight and MLP Algorithms in Urban Development Simulation (Case Study: Khorramabad County) [Tarviji]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, ۹(۳), ۲۰۱-۲۱۵. <http://jgst.issge.ir/article-۹۳۳-۱-fa.html>
- Pontius, G. R., & Malanson, J. (۲۰۰۵). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, ۱۹(۲), ۲۶۵-۲۴۳.
- Pontius Jr, R. G., Cornell, J. D., & Hall, C. A. (۲۰۰۱). Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD۲: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, ۸۵(۳-۱), ۱۹۱-۲۰۳.
- Qian, Y., Chakraborty, T., Li, J., Li, D., He, C., Sarangi, C., Chen, F., Yang, X., & Leung, L. R. (۲۰۲۲). Urbanization impact on regional climate and extreme weather: Current understanding, uncertainties, and future research directions. *Advances in Atmospheric Sciences*, ۳۹(۶), ۸۱۹-۸۶۰.
- امیرانتخابی, ش., جوان, ف., & حسنی مقدم, ح. (۲۰۱۷). آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مورد مطالعه: شهرستان تالش). کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه‌ریزی, ۸(۳), ۱-۱۱. <https://gisrs.semnan.iau.ir/article.pdf.0317e1dc2379ca1aca981811763b9>
- پور, د., هاشم, سالاریان, & فردیس. (۲۰۱۵). تحلیل تاثیر پراکنده‌روپی بر تغییر کاربری زمین در منطقه شهری ساری. پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری, ۳(۲), ۱۴۵-۱۶۳.
- خورسندی, آ., ارسطو, ب., & صنایعی, ر. (۲۰۱۹). بررسی شاخص‌های کالبدی مسکن در توسعه سکونتگاه‌های شهری با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (مطالعه موردی شهر سمنان). کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه‌ریزی, ۱۰(۳), ۵۳-۶۹. <https://gisrs.semnan.iau.ir/article.pdf1d0637d9da0394fe0094add3033e17>
- محریمی, م., خانی پردنجانی, ح., & رضایی, ع. (۲۰۱۹). موقعیت یابی مناسب جهت توسعه فیزیکی شهر با استفاده از مدل AHP و منطق فازی در محیط GIS (نمونه موردی: شهر شهرکرد). کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه‌ریزی, ۱۰(۲), ۷۲-۸۲. <https://gisrs.semnan.iau.ir/article.pdf9c3278fb2d0f13c2b7fe1376bf3fd00>
- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (۲۰۱۶). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, ۵۲, ۳۸۰-۳۸۹.
- Alavipanah, S. (۲۰۱۵). Principles of modern remote sensing and interpretation of satellite images and aerial photographs. In: Tehran: University of Tehran press.[Persian].
- Barlow, J. F. (۲۰۱۴). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, ۱۰, ۲۴-۲۱۶.
- Bhat, P. A., Shafiq, M. u., Mir, A. A., & Ahmed, P. (۲۰۱۷). Urban sprawl and its impact on landuse/land cover dynamics of Dehradun City, India. *International Journal of Sustainable Built*

- Wang, S., & Zheng, X. (۲۰۲۳). Dominant transition probability: Combining CA-Markov model to simulate land use change. *Environment, Development and Sustainability*, ۲۵(۷), ۶۸۴۷-۶۸۲۹
- Wang, Y., Akbari, H., & Chen, B. (۲۰۱۶). Urban geometry and environmental urban policy development. *Procedia Engineering*, ۱۶۹, ۳۰۸-۳۱۵
- Xu, T., Zhou, D., & Li, Y. (۲۰۲۲). Integrating ANNs and cellular automata-Markov chain to simulate urban expansion with annual land use data. *Land*, ۱۱(۷), ۱۰۷۴

## Prediction of Urban Construction Changes Using Satellite Images Based on CA-MARKOV Models (case study: Sari)

Sahab Bidgoli Kashani<sup>۱</sup>, Mehran Fadavi<sup>۲\*</sup>, Valiollah Azizifar<sup>۳</sup>

### Abstract

Along with the ever-increasing urban population, the amount of construction in the city space has been developed. The development of construction in the horizontal space and regardless of the existing restrictions has led to environmental, economic and legal problems for the citizens. Achieving the amount, intensity and direction of construction development from the past to the present and predicting the construction situation in the future is the first step towards the scientific and practical management of the physical development of urban construction, planning and providing suitable solutions in order to create a balance between allocation Spatial-spatial construction and all kinds of legal, economic and environmental considerations. Data and information extracted from satellite images, while showing the historical changes of urban construction, are used as the main, necessary and necessary input data for models to predict its future state. In this research, satellite images of TM, ETM+ and OLI sensors of Landsat satellite were used in the time periods of ۱۹۹۷-۲۰۰۷ and ۲۰۰۷-۲۰۱۷ related to the city of Sari. After performing geometrical corrections, city area maps were prepared. Then, by using the effective parameters in urban construction changes, using the Cellular Automata(CA) Markov Model, the accuracy of the simulations was checked. Finally, for validation, the simulated maps and the ground reality map were matched with each other. The simulation of the construction development process in ۲۰۲۷ using the CA-Markov model showed that if the existing management regulations continue, this area will decrease from ۴۶۱۷,۹۰ hectares in ۲۰۱۷ to ۴۳۰۷,۴۴ hectares in ۲۰۲۷. But the examination of change maps and stability maps showed that new areas will be under construction between ۲۰۱۷ and ۲۰۲۷, which were mainly used for agriculture and barren land.

**Key words:** Change Detection, Change Prediction and Simulation, Remote Sensing, Urban Construction, Cellular Automata(CA) Markov Model.

<sup>۱</sup>- Dep. of Engineering and Construction Management, Sari Branch, Islamic Azad university, Sari, Iran. sahab.kashani@iau.ac.ir

<sup>۲</sup>- Assistant Professor, Dep. of Civil Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad university, Gorgan, Iran. (Corresponding Author), mehran.fadavi@gorganiau.ac.ir

<sup>۳</sup>- Assistant Professor, Dep. of Environmental Science, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran. valiollahazizifar@gmail.com