فصلنامه اقتصاد فضا و توسعه روستایی، سال دوازدهم، شماره چهارم (پیاپی ۴۶)، زمستان ۱۴۰۲
شاپای چاپی ۲۱۳۱-۲۳۲۲ شاپای الکترونیکی ۴۷۶X- ۲۵۸۸
http://serd.khu.ac.ir
مقاله پژوهشی صفحات ۳۸-۲۱

مدل‌سازی توسعه شهری با الگوریتم بهینه‌یابی گرگ خاکستری و تغییر کاربری نواحی پیرامونی شهر مشهد

حامد بیدل؛ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
سیدسعیدرضا احمدی زاده*؛ دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
جواد طیبی؛ دانشیار، گروه ریاضی، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.
مهدی غلامعلیفرد؛ استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

چکیده

شهرها هرروز گسترده‌تر می‌شوند و نواحی پیرامون خود را با تغییر کاربری تحت تاثیر قرار می‌دهند درحالی‌که پیش‌بینی و یافتن عوامل مؤثر بر روند رشد شهری هرروز اهمیت بیشتری می‌یابند. به این منظور برنامه‌ریزی برای رشد شهری با مدلسازی و پیش بینی تغییر کاربری و توسع هشهری به‌منظور هدایت مدیریت‌شده و حفاظت از محیط‌زیست و کاربری‌ها نیازمند درک صحیح از علل و پیامدهای رشد شهری است. در این راستا مدل‌های توسعه شهری و تغییر کاربری توسعه می‌یابند تا درک بهتری از چگونگی رشد شهری به انسان بدهند. الگوریتم گرگ خاکستری(GWO) یک الگوریتم فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت برای بهینه‌سازی انتخاب در مسائل پیچیده است که بر اساس زندگی اجتماعی گرگ‌های خاکستری توسعه‌یافته است. در این پژوهش مدل سلول‌های خودکار شهری با الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان ابزار کالیبراسیون و بهینه‌یابی در مدل توسعه شهری مشهد تلفیق و تغییر کاربری نواحی پیرامونی شهر مشهد شبیه‌سازی شد. در این مدل نواحی روستایی شمال و شمال غرب مشهد بیش از سایر نواحی تحت تأثیر توسعه شهری قرار گرفته‌اند. مدل توسعه‌یافته در پژوهش حاضر موفق شد طی ۲۰ نسل به میزان ۷۲,۱۳ شاخص کاپا به‌عنوان تابع هدف دست یابد. مقادیر بهینه حاصل از اجرای الگوریتم گرگ خاکستری برای شهر مشهد ارائه‌شده است.

واژگان کلیدی: توسعه شهری، الگوریتم بهینه‌یابی، کاربری اراضی، نواحی پیرامونی، شهر مشهد.

* sahmadi@birjand.ac.ir

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

۱) مقدمه

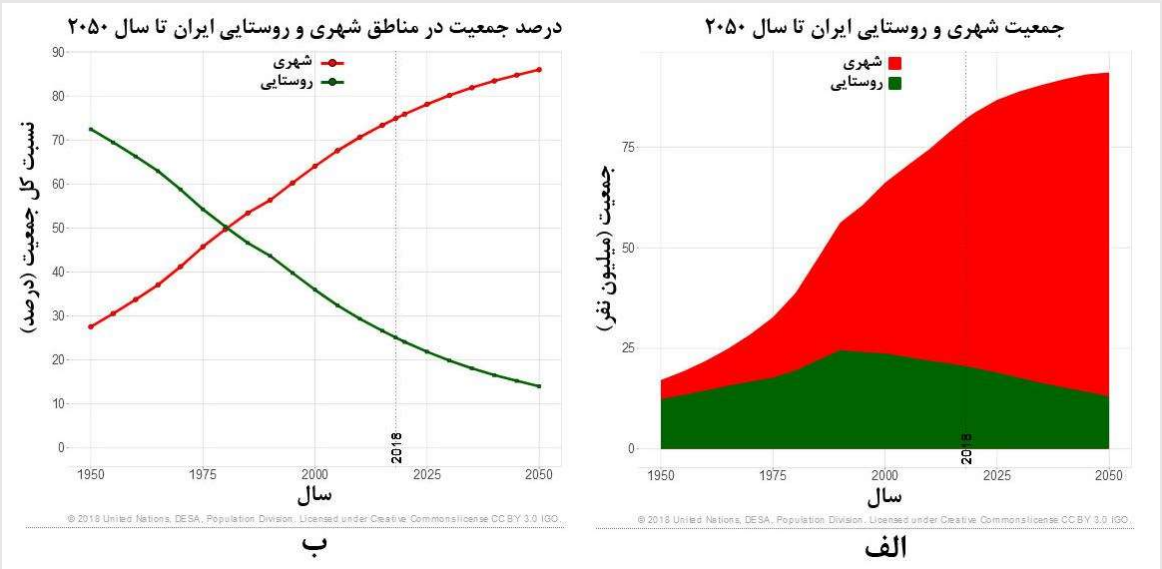
رشد و توسعه شهرها با توجه به روند رو به رشد جمعیت و تمرکز فعالیت‌ها در مناطق شهری امری گریزناپذیر است. توسعه شهرها مهم‌ترین نتیجه دخالت انسان در محیط‌زیست است و نه‌فقط در گذشته و حال، بلکه در آینده کاربری اراضی نیز نقشی اساسی دارد. بیشتر از ۶۸ درصد از جمعیت جهان (معادل ۹٫۸ میلیارد نفر) تا سال ۲۰۵۰ در شهرها سکونت خواهند داشت (UN-DESA, 2017)، درحالی‌که بیشتر جمعیت در کشورهای کمتر توسعه‌یافته خواهد بود (J. Li, Li, Zhu, Song, & Wu, 2013). شهرنشینی باعث جذب جمعیت به شهرها می‌شود و زیرساخت‌ها، شبکه‌های جاده‌ای، خدمات عمومی و تغییرات کاربری اراضی را افزایش می‌دهد. توسعه شهری باعث افزایش مناطق ساخته‌شده و کاهش فضای باز و سبز می‌شود (Singh, Kikon, & Verma, 2017; Zeng et al., 2019). توسعه شهری منجر به حذف مقدار قابل‌توجهی از زمین‌های کشاورزی، و حتی مناطق حساس محیط‌زیست، به‌ویژه در کلان‌شهرها و مناطق اطراف آن‌ها خواهد شد. یکی از راه‌های مبارزه با چالش‌های پیش روی شهرها، افزایش کارایی کاربری زمین شهری به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار است (Zhu, Zhang, Wei, Li, & Zhao, 2019). روش دیگر، تجزیه و تحلیل علل رشد شهری و تغییر کاربری اراضی برای مدیریت بهتر آینده کلان‌شهرها و اطراف آن‌ها است (Osman, Shaw, & Kenawy, 2018). بنابراین، مدیریت توسعه پایدار شهری منجر به توسعه مدل‌هایی برای توصیف و تحلیل فرآیندهای تغییر کاربری اراضی شهری و ارائه سناریوهای پیش‌بینی آینده شده است (Dang & Kawasaki, 2016). مدل‌های مکانی-زمانی، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور به درک ما از توسعه شهری و تغییر کاربری اراضی کمک می‌کنند (X.-X. Li & Norford, 2016; Simwanda & Murayama, 2018).

گسترش ساخت روزافزون و بی‌برنامه شهرها در حومه، مشکلات اجتماعی و معضلات ارائه خدمات شهری را به وجود می‌آورد و موجب از بین رفتن زمین‌های کشاورزی، آلودگی محیط زیست و تعدی به منابع طبیعی می‌شود. این روند مخاطره آمیز نیازمند برنامه‌ریزی برای توسعه به سمت مطلوب و تسهیل فراهم آوری امکانات شهری و همچنین کاهش آسیب به محیط‌زیست و منابع طبیعی است.

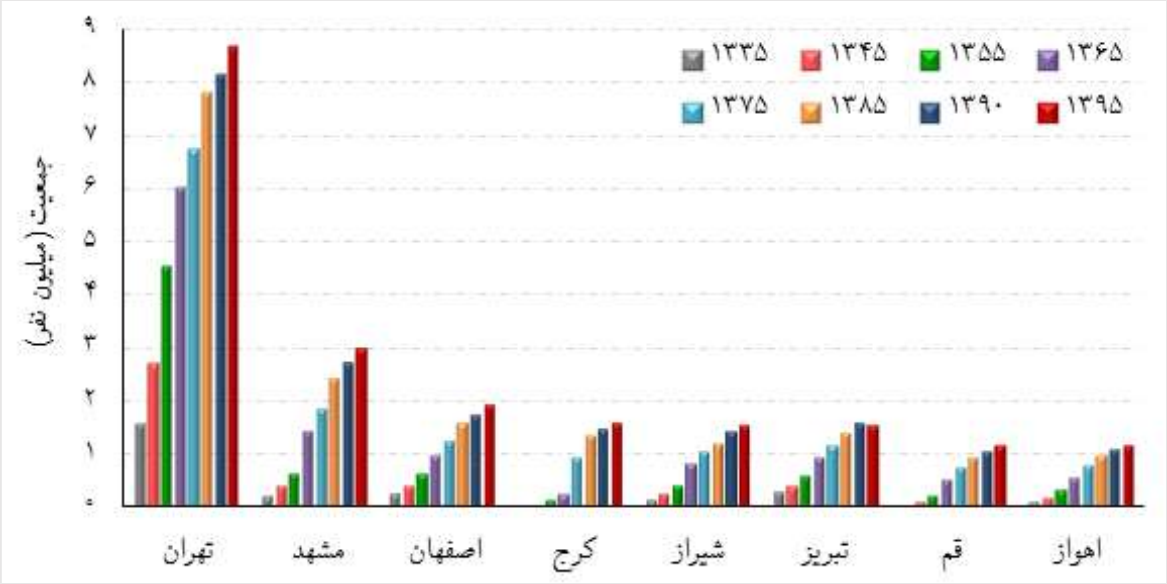
رشد جمعیت در کشور ایران نامتوازن است، به‌طوری‌که شهرها رشدی سریع دارند اما روستاها رشدی کند یا حتی منفی دارند (مرکز آمار ایران, ۱۳۹۸). شکل ۱ (الف و ب) پیش‌بینی جمعیت و نسبت جمعیت شهری و روستایی ایران تا سال ۲۰۵۰ (United Nations, 2018)و شکل ۲ جمعیت کلان‌شهرهای ایران از سال ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵(مرکز آمار ایران, ۱۳۹۸) را نشان می‌دهد. شهر مشهد پس از شهر تهران بیشترین رشد جمعیت را طی این دوره زمانی داشته است و به نظر می‌رسد این روند ادامه پیدا می‌کند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]



شکل ۱. الف) جمعیت شهری و روستایی ایران تا سال ۲۰۵۰ ب) درصد جمعیت در مناطق شهری و روستایی ایران تا سال ۲۰۵۰
(United Nations, 2018)



شکل ۲. جمعیت کلان‌شهرهای ایران از ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵ و جایگاه شهر مشهد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۸)

رشد شهرها بر متأثر از پارامترهای اثرگذار بر توسعه شهری، توسعه پیدا می‌کنند. در مطالعات مختلف به میزان و نحوه اثرگذاری این پارامترها در الگوی رشد شهرها پرداخته شده است. هر مطالعه بر اساس هدف و با توجه به دسترسی به داده‌ها میزان و جهت رشد شهری و تغییر کاربری‌ها اعم از کشاورزی، بایر، جنگل و مرتع به شهر را مورد تجزیه و تحلیل و ارزیابی قرار داده‌اند. برخی مطالعات مانند (Ren et al., 2019) با هدف مقایسه این مدل‌ها و روش‌ها انجام شده است. برنامه ریزان شهری تلاش می‌کنند تا از سویی مناطق مناسب گسترش کاربری‌های شهری را بیابند و از سویی دیگر شهر را به سمت و سوی دلخواه بر اساس سیاست‌ها ببرند. در این بین تغییر کاربری اراضی شهری یک سیستم پیچیده است که پیش‌بینی روند حقیقی گسترش آن کاری دشوار به شمار می‌رود (Batty, 2009).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

۲) مبانی نظری

مدل‌سازی گسترش کاربری شهری روشی مفید و ضروری برای ارزیابی و مشاهده مسیر حقیقی این گسترش و چاره اندیشی برای جهت دهی مطلوب آن است. به همین منظور به طور مداوم مدل‌های جدیدتر و متنوعی برای شبیه سازی توسعه اراضی شهری ارائه‌شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (Parker, Manson, Janssen, Hoffman, & Deadman, 2003). با اینحال تا کنون هیچ مدلی که بتواند یک شبیه سازی کاملاً دقیق و صددرصدی ارائه کند وجود ندارد. بنابراین پژوهش در این زمینه در جهت رفع کاستی مدل‌های موجود یا ارائه راهکارها و مدل‌های جدید ادامه دارد.

در جدول ۱ فهرستی از اولین مدل‌های توسعه شهری نوین ارائه‌شده است. منظور مدل‌های نوین، مدل‌هایی هستند که بخصوص در دهه ۱۹۹۰ میلادی با گسترش کاربرد داده‌های سنجش از دور، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و پیشرفت سخت افزارها و نرم افزارهای کامپیوتری بوجود آمدند. این فهرست شامل انواع مدل‌هایی از گسسته و پیوسته، مدل‌های اقتصادی، مدل‌های عامل مبنا، مدل‌های رگرسیونی و مدل‌های سلول مبنا است. برخی از این مدل‌ها مانند SLEUTH به مرور به رشد خود ادامه داده و کاربرد زیادی یافتند و در این جهت و در سال‌های اخیر از روش‌های بهینه‌یابی قدرتمندی مانند الگوریتم ژنتیک نیز برای ارتقا خود بهره برده‌اند.

جدول ۱. مدل‌های اولیه در مدل‌سازی نوین توسعه شهری

نام مدل	توضیح	مرجع
مدل سلول‌های خودکار* کلارک (SLEUTH†)	ارزیابی تغییر مناطق شهری در طول زمان، قابلیت ترکیب با الگوریتم‌های مختلف جهت کالیبراسیون؛ گسسته و پیوسته	(Clarke & Gaydos, 1998)
مدل‌های سری CLUE‡	مدل حالت محدود اما گسسته برای چند کاربری	(Veldkamp & Fresco, 1996)
مدل‌های لگاریتمی سطح مبنا§	استفاده از مدل logit چند جمله‌ای اصلاح‌شده، نسبت کاربری زمین را در سطح منطقه‌ای پیش‌بینی می‌کند	(Hardie & Parks, 1997)
مدل‌های پویای فضایی**	مکان‌های مورد استفاده را برای جابجایی زمین‌های زراعی از نظر توپوگرافی و نزدیکی به مراکز جمعیتی پیش‌بینی می‌کند	(Gilruth, Marsh, & Itami, 1995)
مدل‌های شهری کالیفرنیا††	یک مدل فرعی رشد جمعیت، بررسی واحدهای زمین قابل توسعه (DLU)، دارای مدل فرعی تخصیص فضایی، دارای مدل فرعی الحاق-پیوستگی	(Landis, 1995; Landis, Monzon, Reilly, & Cogan, 1998)
مدل فضایی Markov‡‡	شامل مدل‌های تغییرات زمانی و مکانی کاربری اراضی مارکوف	(Wood, Lewis, Tappan, & Lietzow, 1997)
مدل فضایی تصادفی§§	دارای سیستم تحلیل تغییر کاربری زمین شهری و غیرشهری به نام LUCAS	(Berry, Flamm, Hazen, & MacIntyre, 1996)

یکی از چالش‌های مهم کاربرد مدل‌های به کار رفته تا کنون میزان صحت و دقت مدل‌هاست که بر مبنای میزان مطابقت خروجی مدل با واقعیت زمینی محاسبه می‌شود. معیارهای ارزیابی دقت متنوع هستند. معیار یا شاخص کاپا (Cohen, 1960) و شاخص دقت کلی (Fitzgerald & Lees, 1994) جزو پرکاربردترین روش‌ها

* Cellular Automata Model
† Clarke SLEUTH Model
‡ CLUE Series Model
§ Area Base Model
* Spatial Dynamic Model *
† California Urban Models (CUF,†CURBA)
‡ Spatial Markov Model ‡
§ Spatial Stochastic Model §

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

بوده‌اند. به همین منظور و برای افزایش دقت مدل‌ها علاوه بر افزایش صحت و دقت در داده‌ها باید مدل‌های بکار رفته نیز دقیق و صحیح باشند. کاربرد معیارهای یکسان ارزیابی دقت مقایسه نتایج مدل‌سازی های متفاوت را ساده‌تر می‌کند.

مشهد شهری مذهبی با مرکزیت معنوی حرم امام رضا علیه السلام است. درحالی‌که عامل اصلی جذب جمعیت شهری مشهد وجود حرم امام رضا بوده است. با اینحال طی دوره‌های اخیر جهت الگوی رشد شهری مشهد از حالت حلقوی به حالت بال دار و عمدتاً به سمت غرب و شمال غربی بوده است. این رشد علاوه بر سیاست گذاری‌ها به صورت خودرو نیز صورت گرفته است به‌طوری‌که میزان تطابق توسعه شهری مشهد برنامه‌ریزی شده و پیش‌بینی شده در طرح جامع مشهد بسیار کم است (Rahnama, 2021). به همین منظور و با توجه به رشد روزافزون جمعیت شهری مشهد نیاز به شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه این شهر مهم هر به طور مداوم احساس می‌شود.

مدل‌سازی توسعه شهری با مدل سلول‌های خودکار که دارای ویژگی‌های پویا، غیرخطی، غیرمتمرکز، و پایین به بالا است، طی دهه‌های گذشته به وسیله پژوهشگران در مطالعات متعددی بکار گرفته شده است (Yeh & Li, 2006). جهت کالیبراسیون این مدل می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌یابی به طور سودمندی بهره برد. الگوریتم بهینه‌یابی گرگ خاکستری* یک الگوریتم فرا ابتکاری در هوش مصنوعی است که با الگو قرار دادن سلسله مراتب رهبری و رفتار گرگ خاکستری† در گله و شکار برای بهینه‌یابی در مسائل پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر الگوبرداری از سازمان‌های طبیعی برای حل مسائل بهینه‌یابی و پیچیده بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به‌طوری‌که در علوم متنوعی نظیر ارتباطات، جغرافیا، محیط‌زیست، عمران، ترابری از آن‌ها استفاده می‌شود (Sharma, Kumar, & Sharma, 2022). در این بین الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان ابزاری قوی در بین رویکردهای بهینه‌سازی ریاضی شناخته می‌شوند و کاربرد آن در ارتقا مدل‌های توسعه شهری نیز می‌تواند بسیار گارگشا باشد.

رویکردهای مدل‌سازی

مدل‌سازی توسعه شهری بر مبنای رویکردهای متنوعی اعم از استفاده از نرم‌افزارها بدون کدنویسی یا کدنویسی در رابط‌های کاربری برنامه‌نویسی مانند متلب، پایتون یا استفاده از روش‌های آماری به کمک نرم‌افزارهای آماری انجام می‌شود. در این بین کاربرد الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر کدنویسی که قابلیت اجرا در رابط‌های کاربری برنامه نویسی مختلف را پیدا کرده است و در علوم مختلف بدیل محبوبیت کاربرد وسیع یافته است (Johnvictor, Durgamahanthi, Pariti Venkata, & Jethi, 2022; Sharma et al., 2022)، با وجود ظرفیت‌های متنوع، زیاد و با قابلیت شخصی‌سازی، هنوز جهت کالیبراسیون مدل‌های توسعه شهری به کار گرفته نشده است.

الگوریتم گرگ خاکستری اولین بار توسط سید علی میرجلیلی در سال ۲۰۱۴ برای استفاده در مسائل بهینه‌یابی پیشنهاد شد (Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014). الگوریتم از رفتار گرگ خاکستری در هنگام شکار الگو گرفته شده است. در این الگوریتم گرگ‌های خاکستری به ۴ دسته‌های آلفا، بتا، دلتا، امگا تقسیم بندی می‌شوند در این دسته بندی گرگ‌های آلفا در بالاترین رده سلسله مراتب قرار دارد و گرگ‌های بتا بلافاصله بعد از

* Grey Wolf Optimizer (GWO)
† *Canis lupus*

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

گرگ‌های آلفا در بالاترین رده قرار دارد. گرگ‌های امگا پایین‌ترین مرتبه را در هرم سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری دارا می‌باشد و این درحالی‌است‌که گرگ‌های دلتا در فاصله بین گرگ‌های بتا و امگا قرار می‌گیرند. الگوریتم گرگ خاکستری بر خلاف الگوریتم‌های نظیر الگوریتم ژنتیک که از عملگرهای متنوع‌تری نظیر انتخاب، ادغام و جهش در برازش افراد جمعیت استفاده می‌کند فقط از یک عملگر ترکیبی برای برازش و تعیین موقعیت گرگها در گله استفاده می‌کند. در ادامه به طور خلاصه برخی کاربردهای الگوریتم بهینه‌یابی گرگ خاکستری و سپس برخی از مطالعات مدل‌سازی های توسعه شهری مرور شده است.

کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌یابی تکاملی مانند گرگ خاکستری و استفاده از رویکرد برنامه نویسی در علوم مختلف به کار گفته شده است که در زیر به پژوهش‌هایی از این دست اشاره می‌شود:

محمودی و پویان فر الگوریتم گرگ خاکستری را برای مسیریابی بهینه حمل و نقل دارو به کار برده‌اند (محمودی و پویان فر, ۱۳۹۹). آن‌ها در این پژوهش با در نظر گرفتن حساسیت مسیر، اقتصاد مقیاس و عدم قطعیت پنجره زمانی در حمل و نقل مواد دارویی یک مدل مفهومی تعریف و بر اساس آن یک مدل ریاضی خطی به‌منظور مسیریابی مواد دارویی معرفی کرده‌اند. از الگوریتم گرگ خاکستری همچنین در ارتقای سیستم توزیع آب شهری با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است (اعرابی, پیرزاده, و جعفری‌اصل, ۱۴۰۰). در پژوهشی دیگر با هدف بهره برداری بهینه از سیستم تک مخزنه یک سد از الگوریتم گرگ خاکستری با هدف تأمین نیاز آبی اراضی پایین دست، بر اساس شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده شده است(دنیایی, صراف, و احمدی, ۱۳۹۹).

همچنین مطالعات داخلی و خارجی زیادی پیرامون مدل‌سازی رشد شهرها با رویکردهای متفاوت و با استفاده از پارامترهای مختلف در سطح ایران و جهان انجام گرفته است. که می‌توان به پژوهش‌هایی از این دست اشاره کرد:

کاربرد تلفیق روش سلول‌های خودکار، شبکه عصبی مصنوعی و زنجیره مارکوو بخصوص از طریق رابط کاربری LCM در مطالعات داخلی و خارجی بسیار است به همین دلیل تنها به ذکر مهمترین مطالعات اخیر اکتفا می‌شود.

در تلاش برای مدل‌سازی روند توسعه شهری پارس‌آباد مغان، مؤذنی و پورمحمدی از مدل زنجیره مارکوف و تصاویر ماهواره‌ای لندست بهره بردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در سال ۱۴۰۷، طی سیزده سال آینده، مساحت کاربری مزارع و بایر اطراف شهر به شدت کاهش یافته و اراضی تولیدکننده محصولات زراعی به اراضی ساخته‌شده و مسکونی تبدیل می‌شوند. همچنین، توسعه شهر نیز در سال‌های آینده بیشتر در قسمت جنوب غربی شهر رخ خواهد داد(موذنی و پورمحمدی، ۱۳۹۹/۲۰۲۰).

کریم زاده و همکاران، با تلفیق مدل سلولی خودکار و زنجیره مارکوف و استفاده از تکنیک‌های پردازش شیءگرا، سعی کردند یک مدل مناسب برای فرایند رشد شهری ایجاد کنند و با استفاده از آن، به پیش‌بینی فرایند توسعه شهری بیرجند در دوره زمانی سال‌های مورد مطالعه بپردازند(کریم‌زاده مطلق, لطفی, پور منافی, و احمدی زاده، ۱۴۰۱/۲۰۲۲).

در شبیه‌سازی و پیش‌بینی توسعه شهری کردکوی شایسته و همکاران از پارامترهای ارتفاع، شیب، فاصله از جاده‌ها، فاصله از رودخانه‌ها، فاصله از لبه شهر، فاصله از اراضی جنگلی، فاصله از جنگل دستکاشت، فاصله از اراضی کشاورزی، فاصله از روستاها، فاصله از مرکز شهر، فاصله از مرکز شهر، فاصله از نواحی صنعتی استفاده کرده‌اند و از شاخص کاپا و دقت کلی برای ارزیابی مدل خود که تلفیقی از رگرسیون لجستیک و Geomod است استفاده کرده‌اند(شایسته, عابدیان, و گلدوی, ۲۰۱۸).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

در مدل‌سازی تغییرات ساختار شهر قائمشهر، جعفرزاده و همکاران در سال ۱۳۹۷ از مدل‌سازی نیروی انتقال با استفاده از پرسپترون چندلایه شبکه عصبی مصنوعی و ۱۱ متغیر استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است که کاربری‌های جاده، بایر، آموزشی، مذهبی، پهنه آبی، پارک و فضای سبز، صنعتی، ورزشی و مسکونی روند افزایشی داشته‌اند. اما کاربری کشاورزی روند کاهشی را نشان داده است. درنهایت، برای سال ۱۴۰۲، پیش‌بینی افزایش کاربری مسکونی و بایر و کاهش کاربری کشاورزی صورت گرفته است. (جعفرزاده, سبزقبایی, یوسفی, و سلطانیان, ۱۳۹۷/۲۰۱۸).

صداقتی و همکاران توسعه شهری بجنورد را با پارامترهای شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، زمین‌های کشاورزی، راه‌های اصلی، شبکه برق اصلی، مناطق ساخته‌شده و قیمت زمین شبیه سازی کردند. آن‌ها از ابزار شبکه عصبی مصنوعی در مدل تبدیل کاربری زمین استفاده کردند(صداقتی, مداحی, و طالب خواه, ۲۰۲۲).

برای شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری تبریز نیز محمودزاده و همکاران از شیب، فاصله از مراکز فرهنگی، اداری، آموزشی، تجاری، درمانی، رودخانه، گسل، جاده، مرکز شهر، کلاس زمین شناسی و تراکم جمعیت به‌عنوان پارامترهای مدل‌سازی و از خطای RMS برای ارزیابی مدل شبکه عصبی پرسپترون و GEE استفاده کرده‌اند (محمودزاده, مهدوی فرد, عزیز مرادی, و زنجانی ثانی, ۲۰۲۱).

زالی و همکاران گسترش اراضی شهری قزوین را با کاربرد فازی و الگوریتم ژنتیک و با سه معیار ارزش زمین، دسترسی و جذابیت شبیه‌سازی کرده و با شاخص کاپا و شاخص ناسازگاری دقت مدل را ارزیابی کردند (Zali, Alesheikh, & Hosseinali, 2018/1397)

اکبری و همکاران، با استفاده از مدل شبکه عصبی و سلول‌های خودکار و زنجیره مارکوف، تغییرات کاربری اراضی شهر رشت را در دوره زمانی بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ و ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داده که تغییرات مساحت در شهر رشت مثبت و در شالیزار و جنگل منفی است. همچنین، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، نقشه پیش‌بینی برای سال ۲۰۲۷ نیز ارائه‌شده است که تاکید بر افزایش کاربری شهری به مقدار ۱۴۱،۰۵ هکتار در سال‌های آینده را نشان می‌دهد (اکبری, مرادی زاده, و اکبری, ۱۳۹۸/۲۰۲۰).

همچنین محمدی و همکاران توسعه شهری تهران را به کمک الگوریتم بهینه‌یابی توده مدل‌سازی کردند. آن‌ها از ذرات فاصله از راه، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از گسل، تعداد سلول همسایگی شهری، فاصله از مرکز شهر، شیب به‌عنوان معیار استفاده نمودند و با معیار درصد تناظر سطوح و شاخص عامل نسبی مدل را ارزیابی کردند (محمدی, دلاور, ۲۰۱۵).

مدل‌های متنوعی برای شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به همین منظور جدول ۲ نشان دهنده نتایج مرور مطالعات مدل‌سازی توسعه شهری در ایران بر اساس پارامترهای مورد استفاده، تابع هدف مورد ارزیابی و نوع رویکرد مدل‌سازی در مطالعه است که در آن پارامترهای اصلی پژوهش‌ها، تابع هدف و نوع رویکرد مدل‌سازی ذکر شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

جدول ۲. پژوهش‌های انجام شده در حوزه مدل‌سازی توسعه شهری با آتوماتای سلولی

موضوع مسئله	پارامترهای اصلی	تابع هدف مورد استفاده	نوع رویکرد	نویسنده (نویسندگان)
شبیه سازی توسعه شهری (مشهد-مدل حاضر)	شیب، جهت، ارتفاع، فاصله از راه اصلی، تعداد سلول همسایگی شهری، مناطق مستثنی، مناطق شهری گذشته	شاخص کاپا	الگوریتم گرگ خاکستری (برنامه نویسی-فرا ابتکاری-پیوسته)	پژوهش حاضر
مدل‌سازی توسعه شهری تهران	فاصله از راه، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از گسل، تعداد سلول همسایگی شهری، فاصله از مرکز شهر، شیب	معیار درصد تناظر سطوح و شاخص عامل نسبی	الگوریتم بهینه‌یابی توده ذرات (برنامه نویسی-فرا ابتکاری-پیوسته)	(محمدی et al., 2015)
شبیه سازی گسترش اراضی شهری (قزوین)	سه معیار ارزش زمین، دسترسی و جذابیت	شاخص کاپا و شاخص ناسازگاری	فازی الگوریتم ژنتیک (برنامه نویسی-فرا ابتکاری-پیوسته)	Zali et al., (2018/1397)
شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری (نیشابور)	موقعیت غالب اجتماعی، مسیر دسترسی، عناصر مطلوب، کیفیت دسترسی به خدمات، حریم سبز و حریم مسیل و نوع کاربری	شاخص کاپا و دقت کلی	مدل عامل مبنا و زنجیره مارکو (نرم افزاری)	(محمودزاده و نقدبیشی, ۲۰۲۱)
شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری (کردکوی)	ارتفاع، شیب، فاصله از جاده‌ها، فاصله از رودخانه‌ها، فاصله از لبه شهر، فاصله از اراضی جنگلی، فاصله از جنگل دستکاشت،، فاصله از اراضی کشاورزی، فاصله از روستاها، فاصله از مرکز شهر، فاصله از مرکز شهر، فاصله از نواحی صنعتی	شاخص کاپا و دقت کلی	رگرسیون لجستیک و Geomod	(شایسته et al., 2018)
شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری (اهواز)	فاصله از جاده‌ها، فاصله از مرکز شهر، نوع و جنس خاک، خدمات شهری، اراضی مخاطراه آمیز، شیب، تراکم جمعیت	شاخص کاپا و دقت کلی	سلول خودکار فازی (برنامه نویسی-ابتکاری-پیوسته)	(زنگنه شهرکی, امیدی پور, تازش, و معین مهر, ۲۰۱۸)
شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری (بجنورد)	شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، زمینهای کشاورزی، راه‌های اصلی، شبکه برق اصلی، مناطق ساخته‌شده و قیمت زمین	شاخص کاپا و دقت کلی	شبکه عصبی مصنوعی (نرم‌افزاری-مدل تبدیل کاربری زمین)	(صداقتی et al., 2022)
شبیه سازی و پیش‌بینی توسعه شهری (بندرعباس)	شیب، فاصله از مراکز فرهنگی، اداری، آموزشی، تجاری، درمانی، رودخانه، گسل، جاده، مرکز شهر، کلاس زمین شناسی و تراکم جمعیت	RMS	شبکه عصبی پرسپترون و GEE	(محمودزاده et al., 2021)

در آخرین مطالعات خارجی لین و همکاران یک مدل جدید آنوماتای سلولی مبتنی بر لکه‌های کاربری ارائه کرده‌اند که می‌تواند به طور همزمان شباهت چشم‌انداز و توافق سلول به سلول را در نظر بگیرد. آن‌ها این مدل جدید را برای شبیه سازی و پیش‌بینی گسترش شهری گوانژو چین بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است امکان توصیف و تکرار الگوی منظر شهری برای کشف تأثیرات بالقوه گسترش شهری تحت سناریوهای مختلف در مدل مبتنی بر لکه وجود دارد. (Lin, Li, Wen, & He, 2023). وستگن و گوچ از یک مدل الگوگرا (POM) به‌عنوان رویکردی برای کالیبره کردن آتوماتای سلولی در شهرهای اروپایی ورشو، میلان و دوبلین استفاده کردند. آن‌ها از آماره خطای RMSE برای صحت سنجی مدل خود استفاده کردند به‌طوری‌که بیان کردند این مدل برای میلان و ورشو، نسبت به راه‌حل‌های کالیبراسیونی دوبلین به طور کلی بهتر عمل کرده است. آن‌ها میزان اهمیت اثر

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

همسایگی نسبت به زیرساخت‌ها و اثرات کاربری زمین، چند مرکزی بودن شهر و همچنین نوع پراکندگی را نیز بررسی کردند و مدل خود را برای کالیبراسیون مدل رشد شهری قابل‌اعتماد می‌دانند (Verstegen & Goch, 2022). ژانگ و وانگ برای اولین بار از مدل MaxEnt برای کالیبراسیون مدل توسعه شهری استفاده کردند و عملکرد آن را با SVM مقایسه کردند(Zhang & Wang, 2022). مؤمنی و آنتیپوا در مطالعه خود از شاخص نسبی شانون (SRI) به طور مستقیم در کالیبراسیون مدل CA توسعه شهری ممفیس و شلبی در تنسی آمریکا همراه با یک الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده کرده‌اند(Momeni & Antipova, 2020).

با این حال الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان یک الگوریتم تکاملی فرا ابتکاری و کارا هنوز در حل مسائل بهینه‌یابی محیط‌زیستی اعم از تغییر کاربری یا توسعه شهری مورد ارزیابی و استفاده قرار نگرفته است. در این مقاله جهت کالیبراسیون یک مدل سلولی زمانی-مکانی به‌منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای توسعه شهری مشهد از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است. کاربرد نتایج این پژوهش گزینه‌های بیشتری جهت دستیابی به سرعت و دقت بالاتر مدل‌های توسعه شهری و تغییر کاربری در اختیار پژوهشگران قرار خواهد داد.

۳) روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست از منطقه مورد مطالعه مربوط به سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۵ است که پس از طی فرآیند پیش پردازش و برش منطقه مورد مطالعه به نقشه طبقات کاربری اراضی منطقه شامل ۵ کاربری اصلی شهری، کشاورزی، پهنه آبی، اراضی بایر و اراضی دارای پوشش گیاهی تقسیم شد. سپس نقشه کاربری اراضی باز طبقه بندی شده و به دو کلاس شهری و غیرشهری تقسیم شد. همزمان پارامترهای مورد استفاده به‌عنوان عوامل مؤثر بر توسعه شهری نقشه سازی شده و سپس طبقه بندی شدند. این پارامترها شامل شیب، جهت، ارتفاع، مناطق مستثنی و راه‌ها هستند. لایه پارامترها همراه با لایه مناطق شهری به‌عنوان ورودی فرایند مدل‌سازی سلول‌های خودکار با اگوریتم گرگ خاکستری هستند. به‌طوری‌که مدل تلاش می‌کند با الگوریتم بهینه‌یابی گرگ خاکستری و به بهترین مقادیر مورد نیاز از هر پارامتر در جهت رسیدن به حداکثر شباهت بین تصویر واقعی سال هدف و تصویر شبیه سازی شده سال هدف دست یابد. در ادامه نحوه عملکرد روش بهینه‌یابی گرگ خاکستری ارائه‌شده است.

الگوریتم بهینه یابی گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری شامل سه مرحله اصلی جستجوی طعمه، محاصره طعمه و شکار طعمه می‌باشد (Mirjalili et al., 2014). گرگ‌های آلفا به‌عنوان رهبر گروه شناخته می‌شوند و تصمیم‌گیری درباره شکار زمان بیدار شدن مکان خواب برعهده گرگ‌های آلفا است تصمیمات گرگهای آلفا به تمام گله گرگ اعمال می‌شود.

گرگ‌های بتا در رده بندی در بلافاصله بعد از گرگ‌های آلفا هستند و بعد از مرگ گرگ‌های آلفا بهترین گزینه‌ها برای رهبری گله گرگها هستند. گرگ‌های بتا در تصمیم‌گیری و سایر فعالیت‌ها به گرگهای آلفا کمک می‌کند. گرگ‌های امگا در پایین‌ترین سطح هستند و نقش پیش مرگ دسته را در بخش‌های مختلف ایفا می‌کند و باید تا مطیع تمام گرگ‌های دیگر باشد اینها آخرین گرگ‌هایی هستند که در دسته غذا می‌خورد با وجود اینکه به نظر می‌رسد گرگ‌های امگا از اهمیت پایین‌تری در دسته گرگ‌ها برخوردارند اما از دست رفتن گرگ‌های امگا به معنی ایجاد مشکلات متعدد و جنگ داخلی در دسته گرگ‌ها خواهد بود. نوع چهارمی از گرگ‌ها در دسته به نام گرگ‌های دلتا نیز تحت فرمان گرگهای آلفا و بتا هستند و نسبت به گرگ‌های امگا برتری دارد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

در مدل بهینه‌یابی گرگ خاکستری در جستجوی اولیه گرگ‌ها برای یافتن و شکار طعمه هیچ پاسخی وجود ندارد. موقعیت طعمه در این الگوریتم به‌عنوان پاسخ و جواب بهینه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، جواب‌های اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شوند. در مدل ریاضی رفتار شکار گرگ خاکستری، فرض می‌شود که بهترین جواب‌های تولید شده به ترتیب نزدیکی به طعمه، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا هستند و بقیه جواب‌های ممکن گرگ‌های امگا هستند که سه جواب اول را دنبال می‌کنند. جواب‌های امگا موقعیت خود را با توجه به موقعیت بهترین جواب‌های جستجو به‌روز می‌کنند. به‌منظور نزدیک کردن گرگ‌ها به طعمه، فاصله گرگ‌ها از طعمه در هر مرحله زمانی t محاسبه شده و با کمک بردارهایی تصادفی، موقعیت آن‌ها در راستای نزدیک شدن به طعمه فرضی یعنی مناسبترین جواب مرحله t به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\vec{D} = |\vec{C}.\overrightarrow{X_p}(t) - \vec{X}(t)|$$ معادله (۱)

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_p}(t) - \vec{A}.\vec{D}$$ معادله (۲)

در معادله فوق t نشان دهنده تعداد تکرار، $\boldsymbol{A}$ و $\boldsymbol{C}$ بردارهای ضرایب و X_p بردار موقعیت طعمه و X بردار موقعیت یک گرگ خاکستری است. بردارهای ضرایب A و C به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\overrightarrow{r_1} - \vec{a}$$ معادله (۳)

$$\vec{C} = 2.\overrightarrow{r_2}$$ معادله (۴)

که در آن مؤلفه‌های a در طی تکرارها به صورت خطی از ۲ به ۰ کاهش یافته و r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازه [۰ و ۱] هستند. با معادلات فوق گرگ خاکستری در موقعیت (X,Y) می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت طعمه (X^*,Y^*) به روز کند.

درنهایت سه جواب برتر (آلفا، بتا، دلتا) نگهداری می‌شود و سایر گرگ‌ها (امگا) ملزم هستند موقعیت خود با توجه به موقعیت این سه گرگ تنظیم کنند. این شرایط به صورت معادله زیر ارائه‌شده است:

$$\overrightarrow{D_\alpha} = |\vec{C}_1.\overrightarrow{X_\alpha} - \vec{X}|, \overrightarrow{D_\beta} = |\vec{C}_2.\overrightarrow{X_\beta} - \vec{X}|, \overrightarrow{D_\delta} = |\overrightarrow{C_3}.\overrightarrow{X_\delta} - \vec{X}|$$ معادله (۵)

$$\overrightarrow{X_1} = \overrightarrow{X_\alpha} - \vec{A}_1.(\overrightarrow{D_\alpha}), \overrightarrow{X_2} = \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_2}.(\overrightarrow{D_\beta}), \overrightarrow{X_3} = \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3}.(\overrightarrow{D_\delta})$$ معادله (۶)

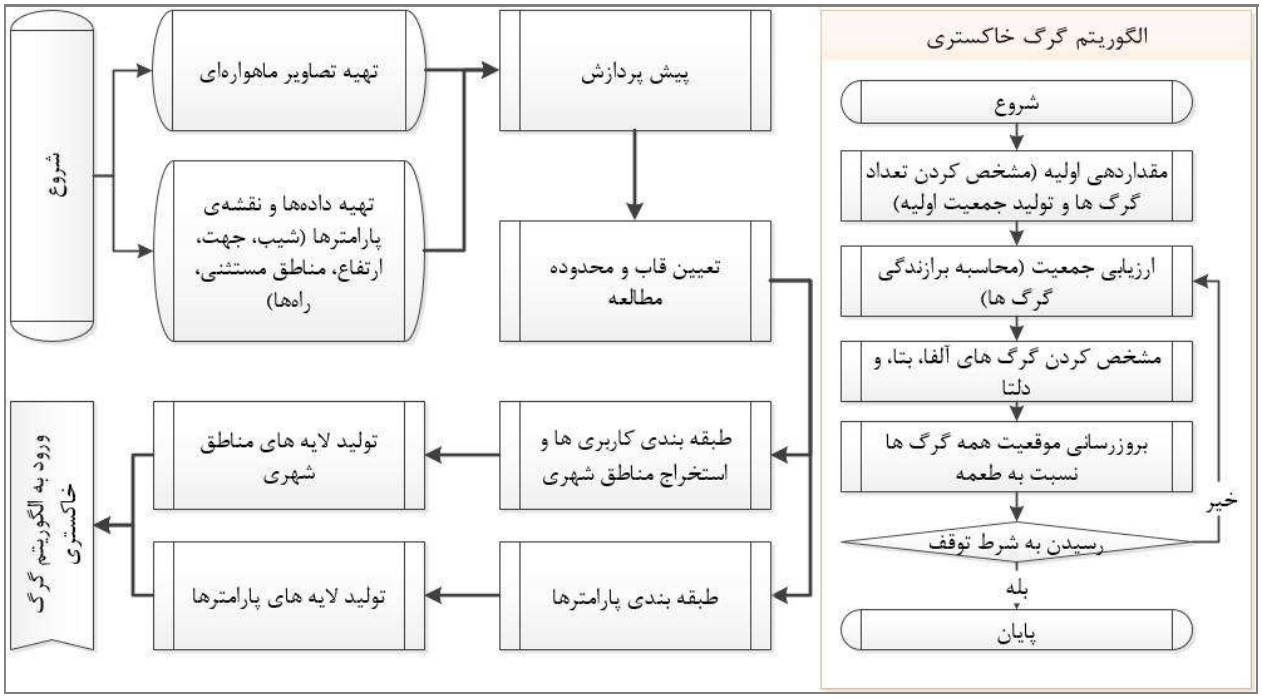
$$\vec{X}(t+1) = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3}$$ معادله (۷)

درنهایت گرگ‌های خاکستری طعمه را محاصره می‌کنند و وقتی طعمه توسط گرگ‌ها احاطه شده و از حرکت ایستاده، حمله به رهبری گرگ آلفا آغاز می‌شود. مرحله جستجو فرآیندی عکس فرایند حمله است. در هنگام جستجو گرگ‌ها از یکدیگر دور می‌شوند تا شکار را ردیابی کنند ($|A| < 1$)، حال آنکه پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در فاز حمله به یکدیگر نزدیک می‌شوند ($|A| > 1$). این پروسه واگرایی در جستجو و همگرایی در حمله عنوان می‌شود.

در زیر نمودار روند اجرای پژوهش حاضر به کمک الگوریتم گرگ خاکستری ارائه‌شده است. بر این اساس در بخش الگوریتم گرگ خاکستری‌ای این نمودار ابتدا مقداردهی اولیه و مشخص کردن تعداد گرگها و تولید جمعیت اولیه صورت می‌گیرد. سپس برازندگی هر کدام از گرگ‌ها ارزیابی می‌شود تا گرگ‌های آلفا بتا و دلتا مشخص شوند. سایر گرگ‌ها امگا خواهند بود. در طی روند انتخاب گرگ‌ها، در صورت محقق شدن شرط توقف، الگوریتم متوقف می‌شود. شرط توقف می‌تواند شامل یک یا چند تابع هدف باشد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

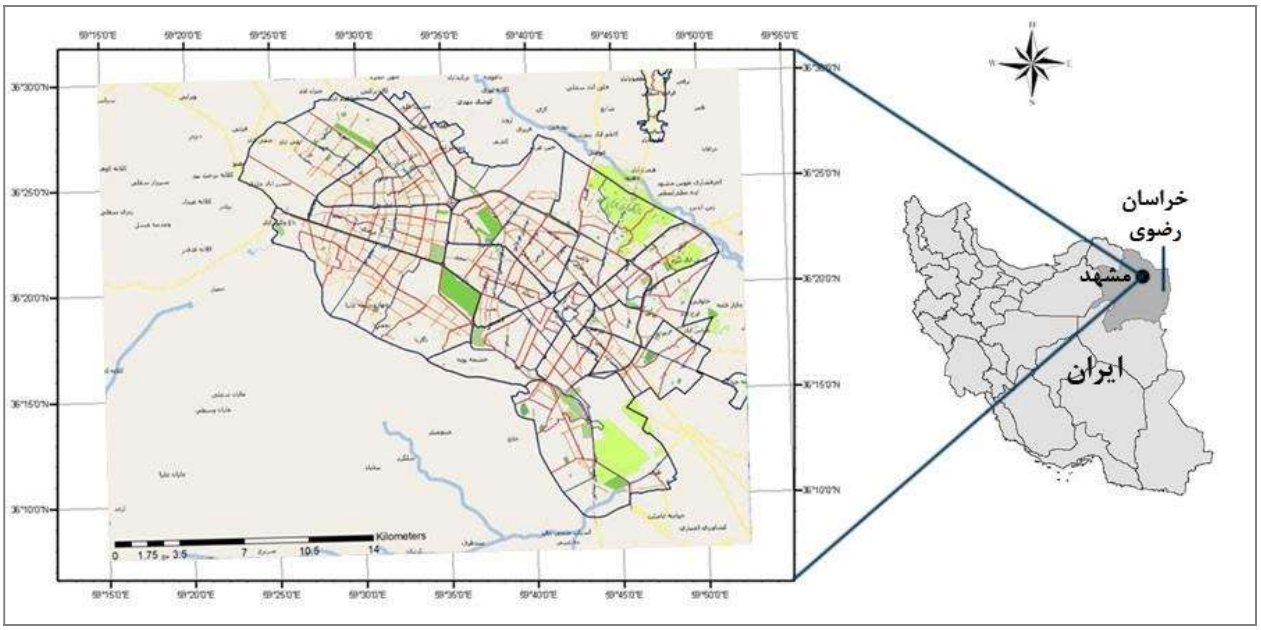


شکل ۳. نمودار روند اجرای بهینه‌یابی مدل توسعه شهری با الگوریتم گرگ خاکستری در تحقیق حاضر

جهت اجرای مدل از ۵ پارامتر شامل (ارتفاع، شیب، فاصله از راه اصلی، همسایگی سلول‌های شهری، مناطق مستثنی) که هر کدام به ۸ طبقه کلاس بندی شدند استفاده شد. به‌منظور یافتن مقادیر بهینه هر پارامتر جمعیتی از گرگ‌ها با ۲۰ عضو و تعداد تکرار ۲۰ در نظر گرفته شد. به این ترتیب ۴۰۰ حالت از مجموع تعداد حالات ممکن که ۳۲ هزار حالت می‌باشد توسط الگوریتم بهینه‌یابی گرگ خاکستری مورد ارزیابی قرار گرفت تا بیشترین دقت در کمترین زمان ممکن بدست آید.

شهر مشهد به‌عنوان دومین شهر پر جمعیت ایران طی سال‌ها روند توسعه شهری رو به رشد و سریعی داشته است. به‌طوری‌که نرخ رشد آن از میانگین شهرهای استان خراسان رضوی و کشور بالاتر است و پس از تهران بیشترین نرخ رشد جمعیت کشور را نیز دارا می‌باشد؛ جمعیت شهر مشهد از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ به ترتیب از ۲,۷۶۶,۲۵۸ به ۳,۰۰۱,۱۸۴ و درصد جمعیت این شهر از ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ به ترتیب از ۱۴,۲ به ۱۴,۵ افزایش یافته است(مرکز آمار ایران, ۱۳۹۸). بر همین اساس و دلیل بخاطر دامنه تغییرات زیاد رشد شهری، این شهر مورد مطالعه قرار گرفته است. شهر مشهد در حدفاصل ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۹ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی واقع است (شکل ۴). بیشترین و کمترین ارتفاع در محدوده شهرستان مشهد به ترتیب ۲۲۱ و ۳۲۲۵ متر از سطح دریا می‌باشد. دشت مشهد بین رشته‌های هزارمسجد در شمال و بینالود در جنوب واقع شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]



شکل ۴. نقشه منطقه مورد مطالعه؛ شهر مشهد.

۴) یافته‌های تحقیق

در این مطالعه توسعه شهری مشهد به کمک یک الگوریتم فرا ابتکاری مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل توسعه‌یافته نشان داد مدل در طی ۲۰ نسل از اجرای الگوریتم بهینه‌یابی با مقدار ۲,۸ تکرار و با مقدار بهینه ارتفاع ۴,۲، شیب ۳,۵، فاصله از راه ۰,۲۲ و تعداد همسایگی ۳ دست یافته است. جدول ۲ مقادیر بهینه‌یابی شده حاصل از تلفیق مدل سلول‌های خودکار با الگوریتم گرگ خاکستری برای شهر مشهد طی دوره زمانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همچنین مدل توسعه‌یافته به شاخص کاپا به میزان ۰,۷۲۱۳ دست یافت. بر اساس نتایج مقدار شاخص کاپا بالاتر از ۷۰ درصد قابل اطمینان است. این نتایج نشان می‌دهد که دقت مدل در برآورد توسعه صورت گرفته مناسب است. جدول ۳ مقادیر خروجی حاصل از بهینه‌یابی مدل توسعه‌یافته را نشان می‌دهد.

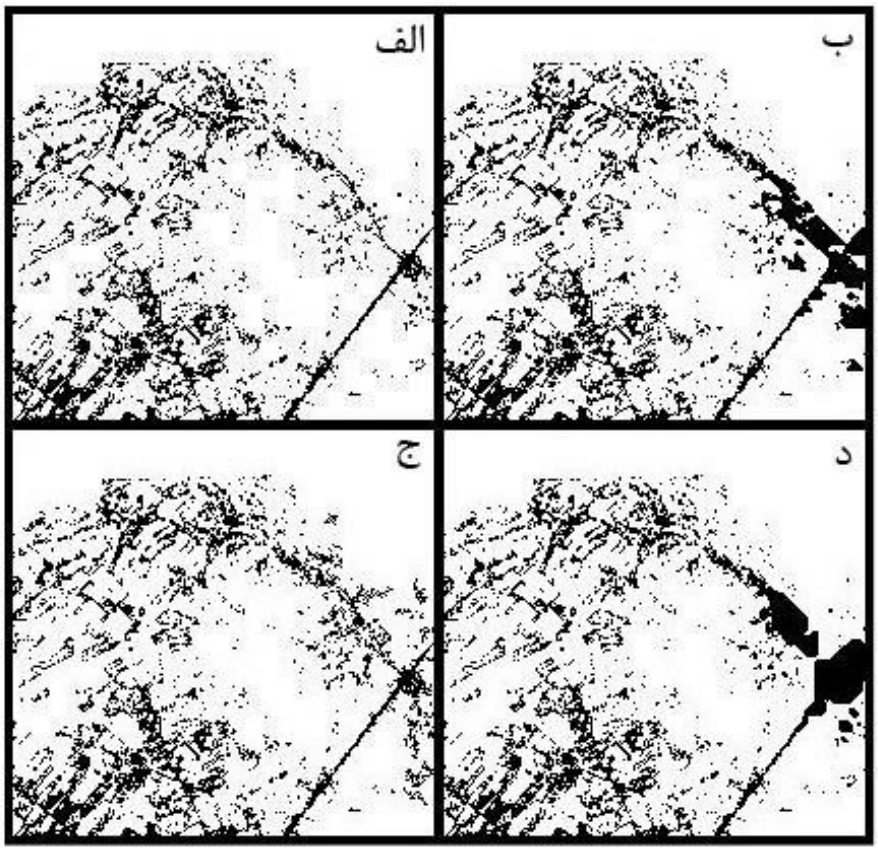
جدول ۳. مقادیر خروجی حاصل از بهینه‌یابی مدل سلول خودکار توسعه شهری مشهد با الگوریتم گرگ خاکستری.

شاخص کاپا	۰,۷۲۱۲۷۸
تعداد نسل	۲۰
تعداد تکرار سلول خودکار	۲,۸۳۲۲
ارتفاع	۴,۱۸۶۹
شیب	۳,۵۱۸۶
فاصله از راه	۰,۲۱۷۴
تعداد همسایگی	۳

شکل ۵ عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری را در سطح محلی نشان می‌دهد. شکل ۵-الف تصویر پایه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵-ب و ۵-د مشاهده می‌شود عامل همسایگی شهری بیش از سایر عوامل در سطح محلی تاثیرگذار بوده است. درحالی‌که شیب و ارتفاع کمترین اثر را داشته‌اند. در شکل ۵-ج پارامتر شیب بیش از

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

سایر عوامل اثرگذار بوده است. هرچند این اثر در سطح محلی چندان به چشم نمی‌آید. عامل ارتفاع نیز در سطح محلی در منطقه مورد مطالعه اثر ناچیزی دارد.

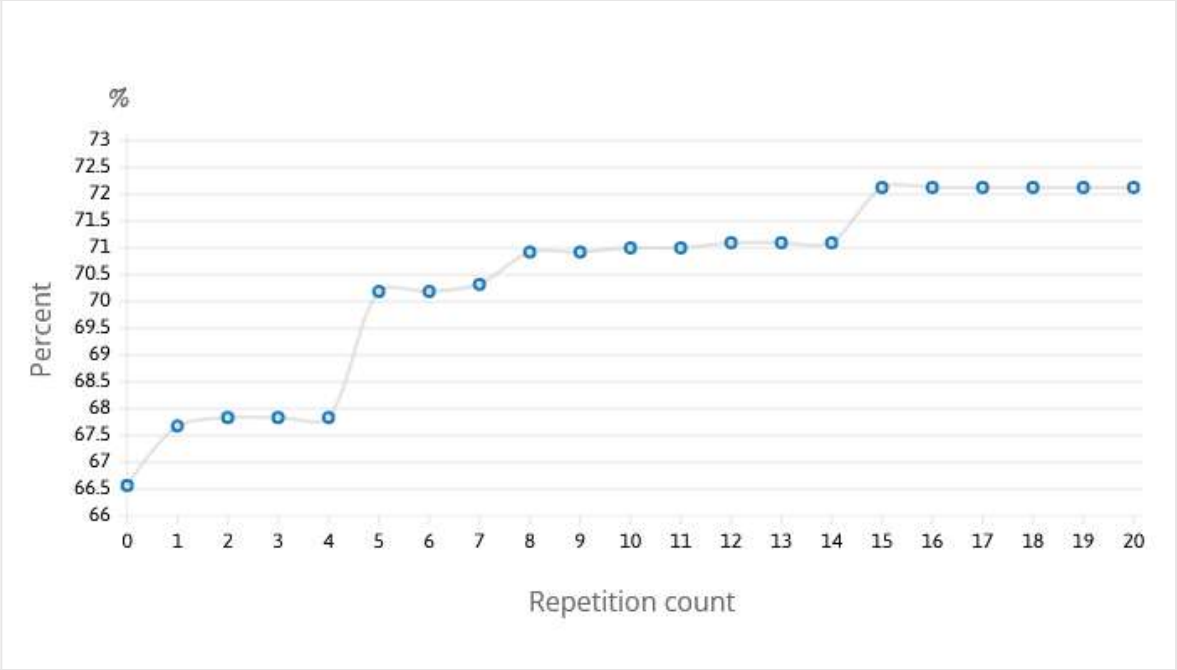


شکل ۵. تفاوت نتایج شبیه‌سازی ناشی از تغییر قانون انتقال سلول‌های خودکار طی بهینه‌یابی با الگوریتم گرگ خاکستری در سطح محلی (الف تصویر پایه؛ ب و ج و د نقشه شبیه‌سازی‌شده به ترتیب با ۱,۵، ۰,۶ و ۲,۳ درصد رشد شهری)

شکل ۶ روند افزایش دقت مدل توسعه شهری مشهد با الگوریتم گرگ خاکستری را نشان می‌دهد که بر اساس پارامترها بدست آمده است. در این نمودار الگوریتم بعد از نسل دوم و سوم با یافتن مکان‌های مناسب‌تر برای گرگ‌های خاکستری توانسته به طعمه که همان تابع هدف است نزدیک‌تر شود و در نسل پنجم به حداقل قابل قبول شاخص کاپا که ۷۰ درصد است دست یابد و پس از آن تا نسل ۸ و سپس ۱۵ این مقدار را افزایش دهد اما پس از آن ایجاد نسل جدید منجر به نزدیک‌تر شدن به تابع هدف نشده است.

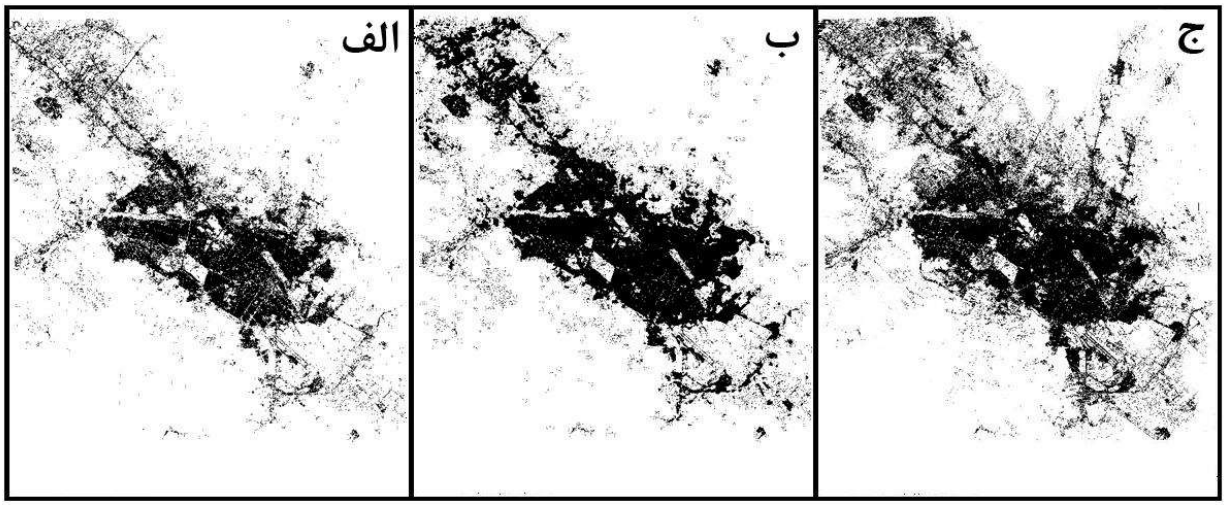
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]



شکل ۶. نمودار روند بهینه‌یابی طی الگوریتم گرگ خاکستری

در شکل ۷ تصویر واقعی شهر مشهد با تصویر شبیه‌سازی شده مقایسه شده است که نشان دهنده مقدار رشد شهری مشهد بر اساس پارامترهای مورد استفاده است. شکل ۷-الف تصویر سال پایه، شکل ۷-ب تصویر شبیه سازی شده، و شکل ۷-ج تصویر سال هدف را نشان می‌دهد. در این دوره تغییر مساحت اراضی شهری از ۱۹۹۶۵,۹۶ به ۳۸۴۵۲,۴۴ کیلومتر مربع رسیده است که مقدار قابل‌توجهی است.



شکل ۷: توسعه شهری مشهد: الف) تصویر واقعی سال ۱۳۸۰ ب) تصویر مدل‌سازی شده ۱۳۹۵ ج) تصویر واقعی سال ۱۳۹۵

در جدول ۴ نتیجه ارزیابی مدل توسعه‌یافته در پژوهش حاضر بوسیله شاخص کاپا با نتایج ارزیابی مدل‌های توسعه شهری انجام شده با سلول‌های خودکار تلفیق شده با روش‌ها و دیگر الگوریتم‌های بهینه‌یابی مقایسه شده است. مدل حاضر توانست به حداقل میزان قابل قبول کاپا دست یابد و حتی بهتر از الگوریتم ژنتیک عمل کند. در این مطالعه تلاش شده است از داده ها و نقشه‌های مورد استفاده تا حد امکان مربوط به سال‌های مشابه از منطقه

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

مورد مطالعه باشد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌تواند در جهت بهبود کاربرد مدل‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌یابی و به‌منظور شبیه سازی رشد شهری مورد استفاده قرا گیرد.

جدول ۴. مقایسه پاسخ حاصل از الگوریتم پیشنهادی

مدل و کالیبراسیون	مکان	کاپا	مرجع
آتوماتای سلولی و الگوریتم گرگ خاکستری	مشهد؛ ایران	۰,۷۲۱۲۷۸	پژوهش حاضر
آتوماتای سلولی و الگوریتم ژنتیک	مشهد؛ ایران	۰,۷۰۳۱۶۹	(بیدل و همکاران, ۱۳۹۳)

۵) نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از محاسبات الگوریتم‌های تکاملی روشی امیدوارکننده برای پیش‌بینی سناریوهای رشد شهری و آینده تغییر کاربری نواحی پیرامونی است. بر اساس نتایج مهم ترین عامل اثرگذار بر رشد شهری در اراضی تغییر یافته و نواحی پیرامونی بر اساس تحقیق عامل راه و فاصله از راه است به طوریکه بیشترین میزان رشد سلول های خودکار در اطراف راه ها صورت گرفته است. از طرفی عوامل توپوگرافی در نظر گرفته شده در مدل به عنوان عامل محدود کننده ای بر رشد شهری به سمت مناطق مرتفع‌تر و پر شیب جنوب شرقی شهر عمل کرده است. در مدل توسعه یافته عاملی که بتواند رشد سلول های شهری را بدون کمک سلول های همسایه پیش بینی کند وجود ندارد از طرفی توسعه چنین عملگری در مدل مستلزم طراحی ویژه و پیشرفته تری است. به همین منظور پیشنهاد می شود در مدل های آتی چنین عملگری توسعه یابد. بعلاوه این مدل سلولی خودکار می تواند با سایر الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری یا تکاملی تلفیق یا مقایسه شود تا دیدگاه کامل تری از کاربرد الگوریتم های تکاملی در مدلسازی توسعه شهری و تغییر کاربری به ما بدهد.

از آنجایی که الگوریتم‌های تکاملی در گذشته برای پیش‌بینی رشد و تکامل سیستم‌های خودسازمانده استفاده شده‌اند، محاسبات تکاملی را می‌توان برای بررسی رشد شهرها نیز به کار برد (Perez, Carballal, Rabuñal, Mures, & García-Vidaurrázaga, 2018) و در این تحقیق نیز این کاربرد ارزیابی شد. الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) یک الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت برای بهینه‌سازی انتخاب در مسائل پیچیده است که بر اساس زندگی اجتماعی گرگ‌های خاکستری توسعه‌یافته است که در این پژوهش به کاربرد الگوریتم گرگ خاکستری به‌عنوان ابزار کالیبراسیون و بهینه‌یابی در مدل تغییر کاربری و توسعه شهری مشهد پرداخته شد و این الگوریتم توانست نتیجه بهتری نسبت به مطالعه مشابه قبلی ارائه کند.

۶) منابع

- اعرابی, پ., پیرزاده, ب., و جعفری‌اصل, ج. (۱۴۰۰). **نوسازی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب شهری با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه (مطالعه موردی: بخشی از شبکه توزیع آب شهر زاهدان)**. مجله آب و فاضلاب, ۳۲(۱).
- اکبری, د., مرادی زاده, م., و اکبری, م. (۱۳۹۸/۲۰۲۰). **تغییرات کاربری اراضی و شبیه سازی رشد و توسعه شهری رشت با استفاده از مدل شبکه عصبی و سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف**. فصلنامه علمی و پژوهشی پژوهش و برنامه ریزی شهری, ۱۰(۳۹), ۱۷۰-۱۵۷.
- بیدل, ح. (۱۳۹۳). **مطالعه تغییر کاربری پوشش سرزمین و مدل سازی توسعه شهری با آتوماتای سلولی و الگوریتم ژنتیک در مشهد**. (کارشناسی ارشد), دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات, تهران.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

- جعفرزاده, ک., سبزقبایی, غ., یوسفی, ش., و سلطانیان, س. (۱۳۹۷/۲۰۱۸). **مدلسازی تغییرات ساختار شهری با رویکرد برنامه ریزی فضایی برای رسیدن به توسعه پایدار شهری – مطالعه موردی: شهرقائم شهر**. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی « سپهر», ۲۷(۱۰۷), ۲۲۲-۲۰۹. doi: 10.22131/sepehr.2018.3357
- دنیایی, ع., صراف, ا., و احمدی, ح. (۱۳۹۹). **بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی با استفاده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری، جستجوی کلاغ و نهنگ بر اساس حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی**. مجله علوم آب و خاک, ۲۴(۴), ۱۷۵-۱۵۹.
- زنگنه شهرکی, س., امیدی پور, م., تازش, ی., و معین مهر, آ. (۲۰۱۸). **شبیه سازی رشد و توسعه کالبدی شهرها با بکارگیری مدل سلول‌های خودکار فازی(FCA) مطالعه موردی: شهر اهواز**. جغرافیا و مطالعات محیطی, ۷(۲۷), ۹۲-۷۷.
- شایسته, ک., عابدیان, س., و گلدوی, س. (۲۰۱۸). **مدل‌سازی رشد شهری با استفاده از روش رگرسیون لجستیک مبتنی‌بر مدل Geomod مطالعهٔ موردی: شهر کردکوی**. نشریه جغرافیا و توسعه, ۱۶(۵۱), ۶۴-۴۳. doi: 10.22111/gdij.2018.3875
- صداقتی, ع., مداحی, ع., و طالب خواه, ح. (۲۰۲۲). **مدل سازی و پیش بینی روند گسترش و توسعه ی فیزیکی شهر بجنورد**. پژوهشهای جغرافیای انسانی, ۵۴(۴), ۱۵۸۵-۱۵۶۳. doi: 10.22059/jhgr.2021.329110.1008364
- کریم زاده مطلق, ز., لطفی, ع., پور منافی, س., و احمدی زاده, س. س. (۱۴۰۱/۲۰۲۲). **ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA_Markov**. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی, ۳۳(۲), ۸۰-۶۳. doi: gep.2022.130601.1458/10.22108
- محمدی, دلاور, و رضا, م. (۲۰۱۵). **مدل سازی توسعه شهری کلان شهر تهران با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی توده ای ذرات**. نشریه علمی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی, ۶(۳), ۸۲-۶۵.
- محمودزاده, ح., مهدوی فرد, م., عزیز مرادی, م., و زنجانی ثانی, م. (۲۰۲۱). **مدل سازی توسعه فیزیکی شهر با ترکیب قابلیت‌های گوگل ارث انجین (GEE) و شبکه عصبی مصنوعی (MLP) مطالعه موردی: شهر تبریز**. نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی, ۲۴(۷۴), ۲۳۲-۲۱۵. doi: 10.22034/gp.2021.10780
- محمودزاده, ح., و نقدبیشی, ا. (۲۰۲۱). **مطالعهٔ تطبیقی کارایی مدل توسعهٔ شهری عامل مبنا و سلول‌های خودکار زنجیرهٔ مارکوف در شبیه‌سازی توسعهٔ شهری نیشابور**. نشریه جغرافیا و توسعه, ۱۹(۶۴), ۳۱۴-۲۹۱. doi: 10.22111/j10.22111.2021.6352
- محمودی, ف., و پویان فر, ف. (۱۳۹۹). **طراحی شبکه لجستیک دارو بر اساس مسئله مسیریابی ناوگان حمل ونقل به کمک الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته**. فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق), ۱۵(۵۳), ۱۱۴-۹۶.
- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۸). **نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵**. م. ب. ر. و. ن. ر. ر. جمهوری (Ed.). تهران: مرکز آمار ایران.
- موذنی, م., و پورمحمدی, م. ر. (۱۳۹۹/۲۰۲۰). **مدل‌سازی زمانی-مکانی روند توسعه شهرها با تأکید بر تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل Markov-Ca (مطالعه موردی: شهر پارس‌آباد مغان)**. نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی, ۲۴(۷۳), ۳۷۷-۳۴۹. doi: 10.22034/gp.2020.10821
- Batty, M. (2009). **Urban modeling. International Encyclopedia of Human Geography**, Elsevier, Oxford .
- Berry, M. W., Flamm, R. O., Hazen, B. C., & MacIntyre, R. L. (1996). **LUCAS: a system for modeling land-use change.** Computing in Science and Engineering, 3 (1), 24-35.
- Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). L**oose-coupling a cellular automaton model and GIS:long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore**. International Journal of Geographical Information Sciences, 12(7), 699-714 .
- Cohen, J. (1960). **A Coefficient of Agreement for Nominal Scales**. Educational and Psychological Measurement, 20(1), 37-46. doi: 10.1177/001316446002000104

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

- Dang, A. N., & Kawasaki, A. (2016). **A Review of Methodological Integration in Land-Use Change Models** .International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS), 7(2), 1-25. doi: 10.4018/IJAEIS.2016040101
- Fitzgerald, R. W., & Lees, B. G. (1994). **Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data.** Remote Sensing of Environment, 47(3), 362-368. doi: https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90103-1
- Gilruth, P. T., Marsh, S. E., & Itami, R. (1995). **A dynamic spatial model of shifting cultivation in the highlands of Guinea, West Africa.** Ecological Modelling, 79(1–3), 179-197. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800(93)E0145-S
- Hardie, I. W., & Parks, P. J. (1997). **Land Use with Heterogeneous Land Quality: An Application of an Area Base Model.** American Journal of Agricultural Economics, 79(2), 299-310. doi: 10.2307/1244131
- Johnvictor, A. C., Durgamahanthi, V., Pariti Venkata, R. M., & Jethi, N. (2022). **Critical review of bio-inspired optimization techniques.** WIREs Computational Statistics, 14(1), e1528. doi: https://doi.org/10.1002/wics.1528
- Landis, J. D. (1995). **Imagining Land Use Futures: Applying the California Urban futures Model**. Journal of the American Planning Association, 61(4), 438-457. doi: 10.1080/01944369508975656
- Landis, J. D., Monzon, J. P., Reilly, M., & Cogan, C. (1998). **Development and Pilot Application of the California Urban and Biodiversity Analysis (CURBA) Model**.
- Li, J., Li, C., Zhu, F., Song, C., & Wu, J. (2013). **Spatiotemporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005**. Landscape Ecology, 28(8), 1545-1565. doi: 10.1007/s10980-013-9901-1
- Li, X.-X., & Norford, L. K. (2016). **Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore.** Urban Climate, 16, 59-74. doi: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.002
- Lin, J., Li, X., Wen, Y & ,.He, P. (2023). **Modeling urban land-use changes using a landscape-driven patch-based cellular automaton (LP-CA)**. Cities, 132, 103906. doi: https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103906
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). **Grey Wolf Optimizer.** Advances in Engineering Software, 69, 46-61. doi: https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
- Momeni, E., & Antipova, A. (2020). **Pattern-based calibration of cellular automata by genetic algorithm and Shannon relative entropy**. Transactions in GIS, 24(6), 1447-1463. doi: https://doi.org/10.1111/tgis.12646
- Osman, T., Shaw, D., & Kenawy, E. (2018). **An integrated land use change model to simulate and predict the future of greater Cairo metropolitan region.** Journal of Land Use Science, 13(6), 565-584 .doi: 10.1080/1747423X.2019.1581849
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffman, M. J., & Deadman, P. (2003). **Multi-agent systems for the simulation of land use and land cover change: A review**. Annals of the Association of American Geographers (93), 314-337.
- Perez, R. I. P., Carballal, A., Rabuñal, J. R., Mures, O. A., & García-Vidaurrázaga, M. D. (2018). **Predicting Vertical Urban Growth Using Genetic Evolutionary Algorithms in Tokyos Minato Ward**. Journal of Urban Planning and Development, 144(1), 04017024. doi: doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000413
- Rahnama, M. R. (2021). **Forecasting land-use changes in Mashhad Metropolitan area using Cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030.** Sustainable Cities and Society, 64, 102548. doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102548
- Ren, Y., Lü, Y., Comber, A., Fu, B., Harris, P., & Wu, L. (2019). **Spatially explicit simulation of land use/land cover changes: Current coverage and future prospects.** Earth-Science Reviews, 190, 398-415. doi: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.001
- Sharma, I., Kumar, V., & Sharma, S. (2022). **A Comprehensive Survey on Grey Wolf Optimization**. Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly: Recent Patents on Computer Science), 15(3), doi: 10.2174/2666255813999201007165454
- Simwanda, M., & Murayama, Y. (2018). **Spatiotemporal patterns of urban land use change in the rapidly growing city of Lusaka, Zambia: Implications for sustainable urban development**. Sustainable Cities and Society .۲۷۴-۲۶۲ ,۳۹ ,doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.039

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]

- Singh, P., Kikon, N., & Verma, P. (2017). **Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate**. Sustainable Cities and Society, 32, 100-114. doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018
- UN-DESA, P. D. o. t. U. N. D. o. E. a. S. A. (2017). **The 2017 Revision of World Population Prospects**.
- United Nations, D. o. E. a. S. A., Population Division. (2018). **World Urbanization Prospects The 2018 Revision**.
- Veldkamp, A., & Fresco, L. O. (1996). **CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects**. Ecological Modelling, 85(2–3), 253-270. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800(94)00151-0
- Verstegen, J. A & ,Goch, K. (2022). **Pattern-oriented calibration and validation of urban growth models: Case studies of Dublin, Milan and Warsaw**. Land Use Policy, 112, 105831. doi: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105831
- Wood, E. C., Lewis, J. E., Tappan, G. G & ,Lietzow, R. W. (1997). **The development of a land cover change model for southern Senegal**. Paper presented at the Land Use Modeling Workshop, June, Sioux Falls.
- Yeh, A. G.-O., & Li, X. (2006). **Errors and uncertainties in urban cellular automata**. Computers, Environment and Urban Systems, 30(1), 10-28. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007
- Zali, V., Alesheikh, A. A., & Hosseinali, F. (2018/1397). **Calibrating Fuzzy-Cellular Automata Model of Urban Expansion Using Genetic Algorithm.** Journal of Geomatics Science and Technology, 8(1), 163-180 .
- Zeng, C., Song, Y., Cai, D., Hu, P., Cui, H., Yang, J., & Zhang, H. (2019). **Exploration on the spatial spillover effect of infrastructure network on urbanization: A case study in Wuhan urban agglomeration.** Sustainable Cities and Society, 47, 101476. doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101476
- Zhang, B., & Wang, H. (2022). **Exploring the advantages of the maximum entropy model in calibrating cellular automata for urban growth simulation: a comparative study of four methods**. GIScience & Remote Sensing, 59(1), 71-95 .
- Zhu, X., Zhang, P., Wei, Y., Li, Y., & Zhao, H. (2019). **Measuring the efficiency and driving factors of urban land use based on the DEA method and the PLS-SEM model—A case study of 35 large and medium-sized cities in China.** Sustainable Cities and Society, 50, 101646. doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101646

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.61186/serd.12.46.21]