



مدل سازی و پیش بینی اثر الگوهای مختلف توسعه پیراشهری بر دمای سطح زمین (مورد: جلگه گیلان)

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

صفحات: ۱-۱۶

روشنک افراخته؛ دانشجوی دکتری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
عبدالرسول سلمان ماهینی؛ استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
مهدی معتق؛ استاد مرکز تحقیقات GFZ آلمان، دانشکده علوم زمین، پوتسدام، آلمان.
حمیدرضا کامیاب؛ استادیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

چکیده	واژه‌های کلیدی:
الگوهای مختلف توسعه سکونتگاهی اثر مستقیمی بر شکل‌گیری جزایر گرمایی شهری دارند و استفاده از مدل‌های مکانی نقش مهمی در بهبود درک این اثرات ایفا می‌کند. از این رو در مطالعه حاضر، از مدل سلول‌های خودکار برای پیش‌بینی توسعه مناطق سکونتگاهی آینده در شمال ایران (جلگه دشت گیلان) برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ تحت سه سناریوی رشد اقتصادی (BAU)، حفاظت از محیط زیست (ENV) و رشد فشرده (COM) استفاده شد. لایه‌های دمای سطح زمین مناطق سکونتگاهی از سه تصویر ماهواره لندست در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ با مقادیر میانگین ۳۳/۱۴، ۳۶/۳۸ و ۳۴/۷۸ درجه سانتی‌گراد بازمی‌یابی شد. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که قطعات طیفی مستخرج از تحلیل شی‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای، پیش‌بینی دقیق‌تری از میانگین دمای سطح زمین ارائه می‌دهند. با استفاده از مساحت قطعات طیفی و درصد مرز مشترک آن‌ها با قطعات مجاور، یک مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی دمای سطح زمین مناطق سکونتگاهی پیش‌بینی شده برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ ساخته شد ($R^2=0/617$). بالاترین میانگین دمای سطح زمین تحت سناریوی COM (۳۳/۸۸ درجه سانتی‌گراد) در سال ۲۰۵۰ به دست آمد، در حالی که کمترین مقدار میانگین دمای سطح زمین تحت سناریوی ENV در سال ۲۰۵۰ (۳۱/۲۳) درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. با توجه به نتایج این مطالعه، میانگین دمای سطح زمین مناطق سکونتگاهی به اندازه و پیکربندی فضایی قطعات طیفی سکونتگاهی در مقیاس محلی و الگوهای گسترش مناطق سکونتگاهی (سناریوها) در سطح منطقه‌ای وابسته است.	رگرسیون خطی، مدل سلول‌های خودکار، توسعه پیراشهری، مدل سازی دمای سطح زمین، گیلان

¹ E- Mail: mahini@gau.ac.ir

نحوه ارجاع به مقاله:

افراخته، روشنک، سلمان ماهینی، عبدالرسول، معتق، مهدی. ۱۴۰۳. مدل سازی و پیش بینی اثر الگوهای مختلف توسعه پیراشهری بر دمای سطح زمین (مورد: جلگه گیلان). مجله توسعه فضاهای پیراشهری.

۱۶-۱: (۱۱)۶



در بسیاری از مناطق جهان، مسئله گرمایش شهری به یک چالش مهم و مبرم تبدیل شده است. این امر به‌طور خاص در مناطق شهری پرجمعیت که به دلیل افزایش تمایل به شهرنشینی و رشد شدید جمعیت جهان، روزه‌روز در حال افزایش و توسعه فضاهای پیراشهری هستند، دیده می‌شود (Kong et al., 2020, Sun et al., 2019). فعالیت‌های انسانی یکی از عوامل اصلی تغییرات آب و هوایی است و در مناطق شهری که انرژی‌های فسیلی با نرخ بالایی مصرف می‌شوند و تقریباً تمام سطوح نفوذناپذیر از موادی با آلودگی پایین (جاذب تقریبی ۹۵٪ از تابش خورشید) ساخته می‌شوند، نمود پیدا می‌کند (Shamsaei et al., 2022). این پدیده از طریق مقایسه شدت و مقدار دمای هوا (با سطح زمین) بین محیط شهر و محیط اطراف آن بررسی شده و با عنوان جزیره گرمای شهری شناخته می‌شود (Kim and Brown, 2021).

جزیره حرارتی شهری سطحی یکی از رایج‌ترین اصطلاحات مورداستفاده در مطالعه ریزاقلم شهری و گرمایش شهری است. امروزه به دلیل پیشرفت‌های شگرف در سنجش از راه دور حرارتی، تخمین دقیق دمای سطح زمین به‌سادگی میسر شده است (Sekertekin and Zadbagher, 2021). باین‌حال باید توجه داشت که دمای سطح زمین، یک پارامتر به‌شدت پویا از خصوصیات از سطح زمین است که تابش زمینی ساطع شده از آن را منعکس می‌کند و اساساً به‌عنوان شاخص تبادل انرژی سطحی بین جو و بیوسفر عمل می‌کند (Mutiibwa et al., 2015). در نتیجه، دمای سطح زمین، بازتاب قابل توجهی از گوناگونی ویژگی‌های مختلف کاربری زمین را نشان می‌دهد، و این امکان را به وجود می‌آورد تا ادراک ارزشمندی از اثر توسعه فضاهای پیراشهری بر آب‌وهوای محلی و اثر جزیره حرارت شهری در اختیار محققین قرار گیرد (Mukherjee and Singh, 2020).

در حال حاضر شواهد علمی بسیاری حاکی از همبستگی قوی بین دمای سطح زمین و ویژگی‌های کاربری و پوشش آن در مقیاس سلولی است. به‌طور مثال، گوها و همکاران (۲۰۱۸) و فیروزجایی و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده‌اند که ارتباط مثبتی بین افزایش گستره سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین وجود دارد، درحالی‌که زیست‌توده سبز بالای زمین منجر به کاهش دمای سطح زمین در مقیاس سلولی خواهد شد. در بخش متفاوتی از این مطالعات، ویژگی‌های فضایی تکه‌های ساخته‌شده به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده دمای سطح زمین معرفی شده است به‌نحوی که ساختار تکه‌های سکونتگاهی در نهایت بر دمای سطح زمین اثرگذار خواهند بود (Yu et al., 2020). علاوه بر آن، پیکربندی سیما نیز در درک تغییرات دمای سطح زمین شهری در مقیاس‌های فضایی مختلف مؤثر بوده است. به‌عنوان مثال، مختاری و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که تکه‌های شهری بزرگ‌تر مقادیر دمای سطح زمین بالاتری را نشان می‌دهند (Mokhtari et al., 2023). افراخته و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان دادند که دمای سطح زمین شهری را می‌توان به‌صورت لگاریتمی به وسعت تکه‌ها مرتبط کرد. چن و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که تفاوت در پیکربندی و وسعت مناطق شهری می‌تواند منجر به تولید سیماهایی با شدت و توزیع دمای سطح زمین کاملاً متمایز منجر شود (Chen et al., 2021). همان‌طور که در این مطالعات نشان داده شده است، درک ما از ارتباطات مکانی-زمانی بین دمای سطح زمین و ویژگی‌های فضایی سیما تا حد زیادی به اثرات پارامترهای محلی وابسته است، که نشان می‌دهد شدت و توزیع مکانی دمای سطح زمین در مناظر سکونتگاهی، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل محدود به محل و مقیاس خرد قرار دارد (Bonafoni and Keeratikasikorn, 2018). بنابراین، دانش جامع در مورد تغییرات گذشته سیما و ارتباط

آن با تغییرات دمای سطح زمین و ویژگی‌های اقلیمی منطقه، برای اطلاع‌رسانی به مدیران شهری در مورد پیامدهای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری بر اقلیم محلی آینده بسیار مهم است. این امر به‌طور خاص در فضاهای پیراشهری که شاهد بیشترین تغییر در طبقات مختلف کاربری و پوشش زمین هستند، دارای اهمیت است (Yu et al., 2020). با توسعه فضاهای پیراشهری، مناطق طبیعی یا کشاورزی با سطوح غیرقابل نفوذ مانند بتن و آسفالت جایگزین شده و در نتیجه موجب جذب و حفظ گرما در سطح زمین می‌شود.

شمال ایران با رشد قابل توجه جمعیت و گسترش شهرها در سه دهه گذشته، شهرنشینی سریعی را تجربه کرده است (Dezhkam et al., 2014). این منطقه همچنین شاهد اثرات قابل توجهی از تغییرات آب‌وهوا و گرمایش شهری بوده است که در سال‌های اخیر، سلامت انسان را نیز تحت تأثیر قرار داده است (Borghai et al., 2020). در نتیجه، مطالعه آسایش حرارتی مناطق شهری در این مناطق با اقبال بسیار زیادی همراه بوده است. این امر به‌طور خاص در مناطق شمالی ایران مانند جلگه گیلان دارای اهمیت است که رشد شدید فضاهای پیراشهری و تغییر کاربری و پوشش زمین در آن، اثرات متعددی بر خصوصیات و فرآیندهای اکولوژیکی در پی داشته است. برای شناسایی این تغییرات بر خصوصیات دمای جلگه گیلان، از یک رویکرد مدل‌سازی ترکیبی برای استخراج الگوهای تاریخی گسترش سکونتگاهی و دمای سطح زمین طی سه مقطع زمانی ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲، از تصاویر بدون ابر لندست استفاده شده است. سپس با استفاده از مدل سلول‌های خودکار، توسعه آینده مناطق سکونتگاهی برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ تحت سه سناریو مختلف پیش‌بینی شده است. رابطه بین دمای سطح زمین و نواحی سکونتگاهی، برای شناسایی مؤثرترین مدل‌های رگرسیونی که تأثیر گسترش سکونتگاهی را بر میانگین دمای سطح زمین منطقه توضیح می‌دهند، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، از این مدل برای پیش‌بینی و مقایسه دمای سطح زمین آینده تحت هر سناریو تا سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ استفاده شده است. نتایج این مدل‌سازی می‌تواند اثر الگوهای متفاوت از توسعه فضاهای پیراشهری بر تغییرات دمای جلگه گیلان را شناسایی و کمی کند.

روش‌شناسی

استخراج نواحی سکونتگاهی و دمای سطح زمین

کلید تحلیل‌های سنجش‌ازدوری در این مطالعه بر روی تصاویر ماهواره لندست صورت گرفته است. منطقه مورد مطالعه دارای پوشش ابر پایدار در طول فصول مختلف سال است. از این رو برای کاهش تأثیر ابر، از سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد تا تصاویر ماهواره‌ای با درصد پوشش ابری بالاتر از ۱٪ شناسایی و حذف شوند. برای هر سال، یک فیلتر میانه برای تصاویر فصل تابستان اعمال شد و در نتیجه، سه تصویر بدون ابر مناسب برای تجزیه و تحلیل در سال‌های ۲۰۰۲ (ETM+)، ۲۰۱۲ (TM) و ۲۰۲۲ (OLI+) تولید شود. از تمام باندهای اپتیک این تصاویر برای طبقه‌بندی نواحی سکونتگاهی استفاده شده است و برای انجام این کار، از روش شی‌گرا با استفاده از چهار معیار فشردگی، شکل، مقیاس و وزن باند استفاده شد (Lopes et al., 2021). فشردگی و شکل برای تعیین اندازه تکه و همگنی شکل بر اساس مقادیر طیفی پیکسل از طریق آزمون و خطا تعیین گردید. وزن باند نزدیک به مادون قرمز دو برابر باندهای دیگر قرار داده شد تا پوشش غالب در منطقه را به‌خوبی از نواحی سکونتگاهی تفکیک کند. برای سال ۲۰۲۲،

قطعات (segment) مستخرج نیز برای طبقه‌بندی بدنه‌های آبی، خاک لخت، جنگل‌ها و زمین‌های کشاورزی، که برای پیش‌بینی توسعه سکونتگاه ضروری است، مورد استفاده قرار گرفتند. بازیابی دمای سطح زمین نیز با استفاده از روش معادله انتقال تابشی انجام شد (Sekertekin, 2019). برای این منظور از باند حرارتی شش تصاویر ETM+ (تفکیک مکانی ۱۰۰ متر) و TM (تفکیک مکانی ۱۲۰ متر) و باند ۱۰ (۱۰/۳۱-۱۲/۴۲ میکرومتر) تصویر سال ۲۰۲۲ استفاده شد.

مدل‌سازی توسعه نواحی سکونتگاهی

مدل‌سازی رشد شهری با استفاده از مدل سلول‌های خودکار - مارکوف انجام شد. برای این منظور از لایه‌های سکونتگاهی ۲۰۰۲ و ۲۰۱۲ برای آموزش مدل مارکوف و تخمین نسبت زمین تبدیل شده به مناطق ساخته شده تا سال ۲۰۲۲ و لایه‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ برای تعیین مساحت و احتمال تبدیل زمین تا سال ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ استفاده شد. روش ارزیابی چند معیاره نیز برای تعیین اولویت‌های تبدیل زمین و تدوین سناریوهای مختلف رشد (پیرا) شهری مورد استفاده قرار گرفت (Addae and Dragičević, 2022). برای این منظور، فاکتورهای روش ارزیابی چند معیاره شامل خاک، فرسایش، خطوط گسل، مجاورت تا جاده، مراکز استان‌ها و اندازه‌های مختلف مناطق شهری، و همچنین طبقات جنگل و کشاورزی بودند. محدودیت‌ها، که وابسته به هر سناریو بودند، بستر رودخانه (و مرزهای ۲۰۰ متری آن)، بدنه‌های آبی، سطوح غیر قابل نفوذ و مناطق جنگلی در نظر گرفته شدند. در نهایت از روش ترکیب خطی وزن‌دار (Hakimi et al., 2019) برای ادغام لایه‌های فاکتور و محدودیت و ایجاد لایه‌های مناسب برای هر سناریو شامل سناریوی رشد معمول اقتصادی (BAU) باهدف شبیه‌سازی رشد، رشد محیط زیستی (ENV) رشد متمرکز بر حفاظت از محیط‌زیست و رشد فشرده (COM) باهدف جلوگیری از تکه‌تکه‌شدگی زمین‌های کشاورزی استفاده شد. برای ادغام لایه‌ها از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Asadabadi et al., 2019) و برای تبدیل مقادیر هر لایه فاکتور و محدودیت به مقیاس مقایسه‌ای بدون بُعد به ترتیب از توابع عضویت فازی و منطق بولین استفاده شد (Tella and Balogun, 2020). با استناد بر میزان هم‌خوانی لایه سکونتگاه واقعی و پیش‌بینی شده سال ۲۰۲۲، از این مدل برای شبیه‌سازی تغییرات برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ استفاده شد. تفاوت بین پارامترها و مقادیر اختصاص یافته به هر لایه برای تدوین سناریوها در جدول شماره یک نشان داده شده است.

جدول ۱. انواع توابع عضویت فازی و وزن‌های اختصاص داده شده به هر لایه تحت هر سناریو

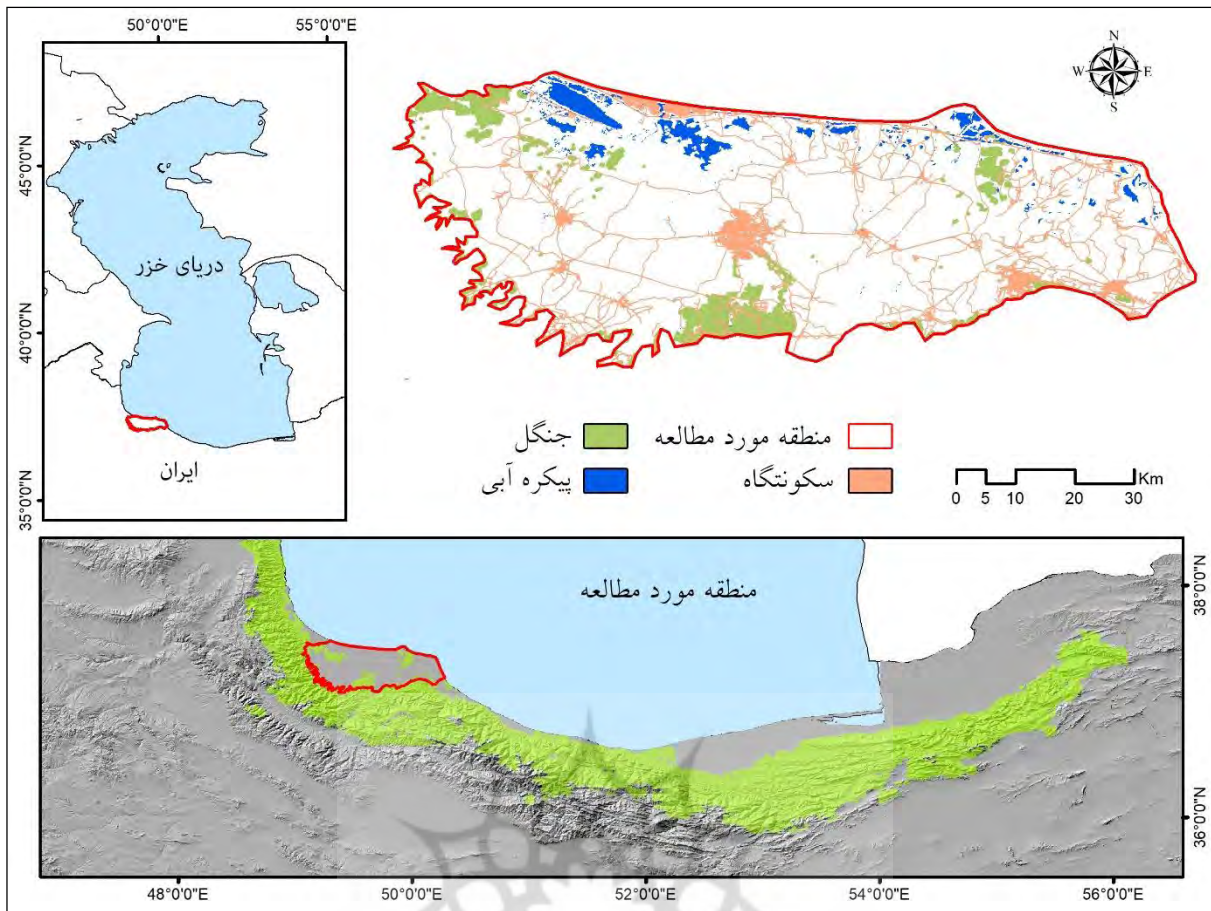
فاکتور	تابع عضویت فازی	اولویت‌های AHP	
		تاریخی	محیط زیستی
خاک	رتبه‌ای	۰/۰۳	۰/۱۰
فرسایش	رتبه‌ای	۰/۰۵	۰/۱۲
گسل	سیگموئیدال افزایشی	۰/۰۸	۰/۰۸
رودخانه و آبراهه	سیگموئیدال افزایشی	۰/۰۷	۰/۱
فاصله از جاده	سیگموئیدال کاهششی	۰/۱۴	۰/۰۹
فاصله از مرکز استان	رتبه‌ای	۰/۱۸	۰/۱۲
شهرهای با وسعت < ۲۰۰ هکتار	خطی کاهششی	۰/۱۵	۰/۱۰
شهرهای با وسعت بین ۲۰۰ تا ۵۰ هکتار	خطی کاهششی	۰/۱۳	۰/۰۸
سایر شهرها	خطی کاهششی	۰/۱۰	۰/۰۸
کاربری و پوشش زمین	رتبه‌ای	۰/۰۷	۰/۱۳
ضریب ناسازگاری	-	۸/۸	۹/۸

مدل سازی تغییرات دمای سطح زمین

برای مدل سازی دمای سطح زمین، از دو دیدگاه متمرکز بر ویژگی های فضایی آن ها شامل رویکرد تکه (patch) و قطعه (segment) استفاده شد. منظور از تکه، واحدهای مجزای شهری است. به طور مثال، شهر رشت یک تکه شهری است اما این شهر با استناد بر تحلیل شی گرا از قطعات طیفی کوچک تری تشکیل شده است. از این رو، مدل سازی با استناد به هر دو رویکرد صورت گرفته است. مرور منابع صورت گرفته (Mokhtari et al., 2023, Xiang et al., 2022) نشان داد که دمای سطح زمین هر تکه شهری تحت تأثیر عواملی مانند مساحت، نامنظمی شکل (شاخص شکل، SHI)، نسبت محیط به مساحت (PARA) و شاخص مساحت هسته مرکزی (CAI) هر سکونتگاه قرار دارد. این معیارهای ساختار فضایی، به همراه مساحت (Area) به عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفته اند.

همچنین از آنجا که دمای سطح زمین هر قطعه سکونتگاهی تحت تأثیر ویژگی های حرارتی تکه های همسایه قرار دارد از سنجای به نام "R" که توسط Sun و همکاران (۲۰۱۳) برای کمی سازی اثر همسایگی معرفی شده است، استفاده شد تا تأثیر بخش های همسایه بر مقادیر دمای سطح زمین اندازه گیری شود. این سنجه نشان دهنده درصد لبه های مشترک بین دو قطعه سکونتگاهی است که سطح اتصال میان آن ها را نشان می دهد. مقادیر این سنجه به همراه میانگین دمای سطح زمین و مساحت همسایه ها نیز به عنوان سه معیار همسایگی مورد استفاده قرار گرفته اند. در نهایت میانگین دمای سطح زمین هر قطعه سکونتگاه در هر رویکرد به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. برای هر رویکرد، یک مدل رگرسیون خطی با استناد بر پارامترهای ساختاری و همسایگی تولید شده است تا در نهایت، از مدل ساخته شده برای تعیین دمای سطح زمین نواحی شهری پیش بینی شده برای سال های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ در هر سناریو استفاده شود.

منطقه مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۳۸۲۰ کیلومتر مربع در جنوب غربی دریای خزر در قسمت کم ارتفاع جلگه ای استان گیلان واقع شده است. جمعیت منطقه بیش از ۲/۵۳ نفر تخمین زده می شود که طی دو دهه گذشته با نرخ رشد ۰/۷ رشد یافته است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). این منطقه یکی از پراکنده ترین الگوهای گسترش شهری را در ایران تجربه کرده است. رشت (با جمعیت ۰/۶۸۰ میلیون نفر و مساحت شهری ۵/۵۵ کیلومتر مربع) به عنوان مرکز استان، بزرگ ترین تراکم شهری منطقه را دارد و همراه با شهر ساحلی انزلی (۰/۱۲۰ میلیون نفر جمعیت و مساحت شهری ۳۳/۴۳ کیلومتر مربع) بیش از ۳۰ درصد جمعیت منطقه را در خود جای داده است. بر اساس سیستم طبقه بندی اقلیمی کوپن-گایگر، این منطقه دارای آب و هوای نیمه گرمسیری مرطوب، با تابستان های گرم و مرطوب بدون فصل خشک است (Aeinehvand et al., 2021). میانگین درازمدت حداقل و حداکثر دمای سالانه منطقه به ترتیب ۳ و ۳۸ درجه سانتی گراد است که در زمستان و تابستان اتفاق می افتد. میانگین بارندگی سالانه این منطقه بالای ۱۲۰۰ میلی متر است که در تمام فصول سال به وقوع می پیوندد. در تابستان ها به دلیل وجود شرایط جوی آرام، رطوبت نسبی از ۸۰ درصد فراتر می رود (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). شکل شماره یک منطقه مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه: بخش جلگه‌ای استان گیلان در شمال ایران، جنوب غربی دریای خزر

یافته‌های پژوهش

مقادیر و توزیع مکانی نواحی سکونتگاهی و دمای سطح زمین

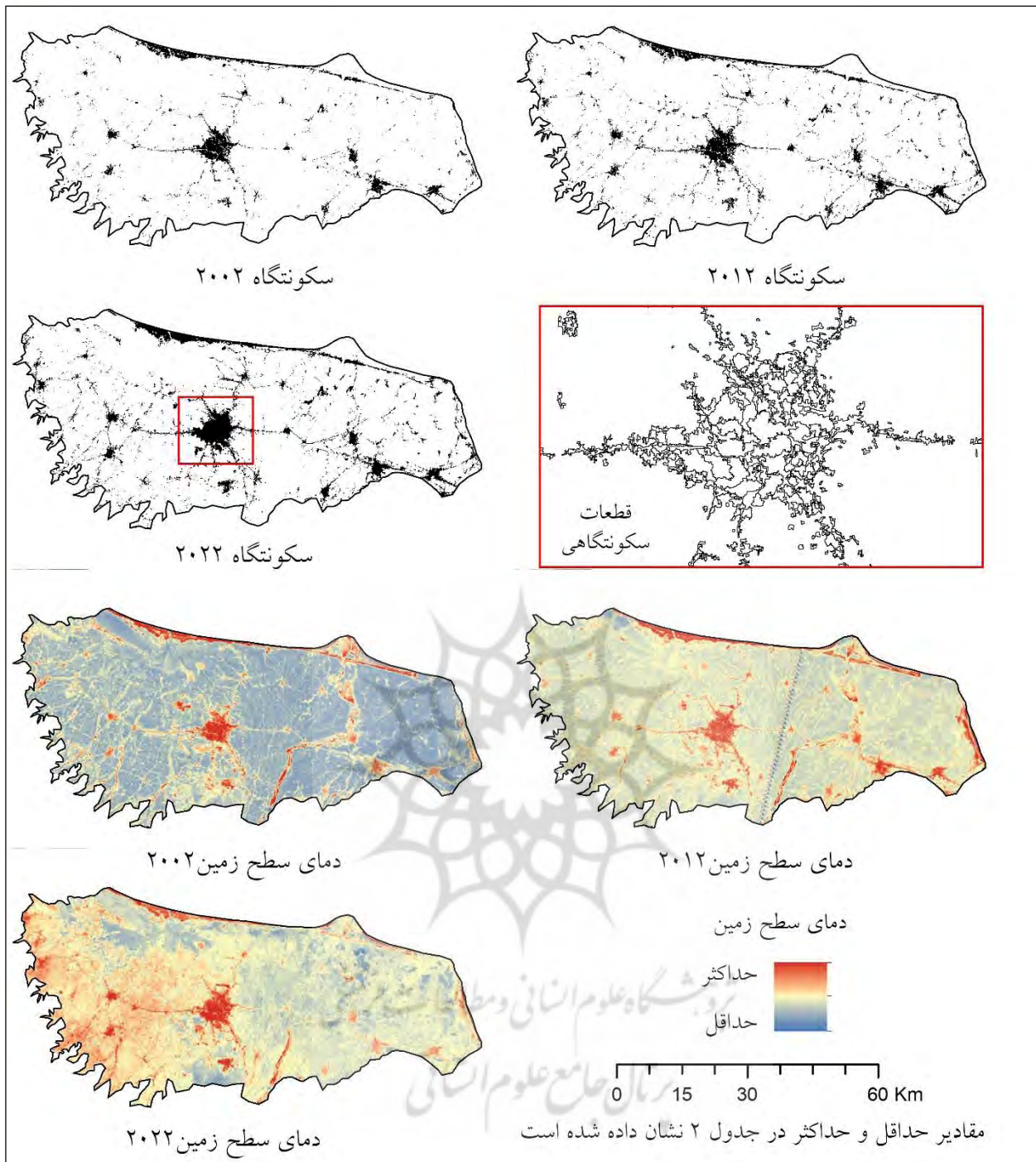
بهترین الگوی استقرار قطعات طیفی تصاویر که بر اساس تفسیر چشمی نتایج با اغلب بلوک‌های شهری مطابقت داشتند و همچنین به درستی تکه‌های کوچک سکونتگاهی را شناسایی کرده‌اند، به ترتیب با استفاده از رتبه‌های فشردگی و شکل ۰/۵ و ۰/۹ تولید شدند. مقیاس تقسیم‌بندی برابر ۲۰ تعیین شد. بر این اساس، میانگین مساحت قطعات طیفی در سال ۲۰۰۲ برابر ۱۹/۶۱ هکتار، در سال ۲۰۱۲ برابر با ۲۲/۱۸ هکتار و در سال ۲۰۲۲ برابر با ۲۱/۶۲ هکتار به دست آمد که نشان می‌دهد، فرآیند تقسیم‌بندی بخش‌های نسبتاً مشابهی از تصاویر در هر سال را جداسازی کرده است. مساحت مناطق سکونتگاهی در سال ۲۰۰۲، برابر با ۲۳۸۷۰ هکتار (۵/۹ درصد از سیمای مورد مطالعه) به دست آمد، که تا سال ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ به ترتیب به ۳۴۴۷۸ و ۴۴۱۶۹ هکتار افزایش یافته است (۸/۶ و ۱۱/۰ درصد از وسعت سیما) (جدول شماره دو).

به جز زمین‌هایی که طی سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۲۲ به مناطق ساخته شده تبدیل شده‌اند، اکثر زمین‌های کشاورزی، جنگلی و بایر بدون تغییر باقی مانده‌اند، که نشان می‌دهد گسترش نواحی سکونتگاهی عامل اصلی تغییر کاربری و پوشش زمین در منطقه بوده است. همان‌طور که در شکل شماره دو نشان داده شده است، بیشتر تکه‌های سکونتگاهی از الگوی رشد حاشیه‌ای لبه و در مجاورت لکه‌های بزرگ شهری مانند شهر رشت به وجود آمده‌اند. در شمال ایران از جمله منطقه

مورد مطالعه این تحقیق، افراخته و همکاران (۲۰۱۶) و مدانیان و همکاران (۲۰۱۸) همچنین نشان دادند که گسترش حاشیه‌ای مناطق سکونتگاهی ممکن است به‌عنوان سناریوی غالب توسعه زمین و به دلیل وابستگی زیاد مناطق سکونتگاهی به زمین‌های کشاورزی اطراف باقی بماند که این امر موجب افزایش دمای سطح زمین در این سناریو می‌شود. علاوه بر این، تکه‌های سکونتگاهی جدیدی که ممکن است هسته یک ناحیه شهری بزرگ را تشکیل دهند، مشاهده نشد. نتایج بازیابی دمای سطح زمین، دامنه‌های متفاوتی از دما را نشان داد اما در تمام مقاطع زمانی، بالاترین مقادیر دمای سطح زمین در نواحی سکونتگاهی مشاهده شد (شکل شماره دو). مطالعاتی از قبیل (Wesley and Brunzell, 2019) نیز نشان دادند که در سیمای شهر، بالاترین مقادیر دمای سطح زمین را می‌توان در نواحی شهری مشاهده کرد. به دلیل تفاوت در شرایط سطح زمین، بالاترین مقدار دمای سطح زمین با $۵۳/۰۴$ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۲ مشاهده شد در حالی که بیشترین مقدار دما در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ به ترتیب برابر با $۴۰/۸۳$ و $۴۳/۱۴$ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. بالاترین میانگین دمای سطح زمین کل سیما نیز در سال ۲۰۱۲ ($۳۰/۵۲$ درجه سانتی‌گراد) و کمترین آن در سال ۲۰۰۲ ($۲۲/۸۴$ درجه سانتی‌گراد) به دست آمد.

**جدول ۲. مساحت و دمای سطح زمین مناطق ساخته‌شده، کشاورزی، جنگل و طبقات زمین بایر استخراج‌شده از تصاویر ماهواره
لندست در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲**

پارامتر	سال		
	۲۰۲۲	۲۰۱۲	۲۰۰۲
مساحت ساخته‌شده (هکتار)	۴۴/۱۶۹	۳۴/۴۷۸	۲۳/۸۷۰
درصد ساخته‌شده	۱۱/۰	۸/۶	۵/۹
محدوده مناطق ساخته‌شده LST، (°C)	۴۳/۱۴ - ۲۹/۸۸	۵۳/۰۴ - ۲۷/۹۳	۴۰/۸۳ - ۲۶/۱۴
میانگین LST مناطق ساخته‌شده، (°C)	۳۴/۷۸ ± ۶/۱۸	۳۶/۳۸ ± ۷/۲۳	۳۳/۱۴ ± ۸/۶۲
میانگین LST (°C)	۲۶/۲۶ ± ۸/۸۶	۳۰/۵۲ ± ۱۸/۸۴	۲۲/۸۴ ± ۱۵/۳۳

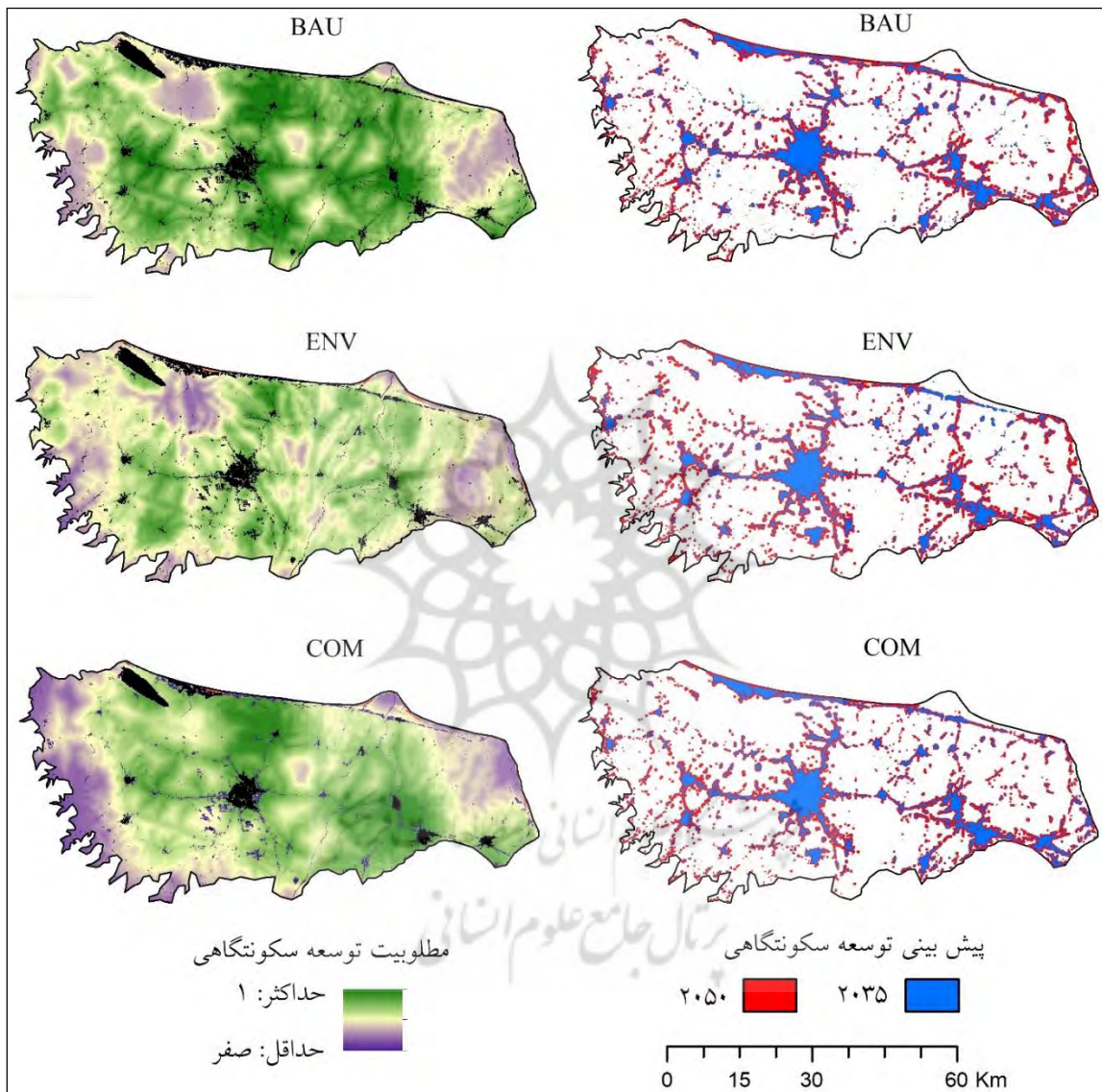


شکل ۲. توزیع مکانی نواحی سکونتگاهی و دمای سطح زمین در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲

نتایج مدل‌سازی توسعه سکونتگاهی

پیش‌بینی آینده توسعه سکونتگاهی در دو مرحله کالیبراسیون و شبیه‌سازی مبتنی بر سناریو انجام شد. در مرحله کالیبراسیون، درصد پیکسل‌های صحیح نسبت به پیش‌بینی نادرست برابر با صحت ۶۸/۷۸ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی آینده توسعه سکونتگاهی شده است. در سناریوی ENV، همان‌طور که در شکل شماره سه نشان داده شده است، مطلوبیت پایین زمین در طول شبکه آبراهه و رودخانه منطقه و همچنین گسل‌های منطقه

قابل توجه است. در سناریوی BAU، بالاترین مطلوبیت محدوده مرکز استان توزیع شده است، در حالی که در سناریوی COM، همه شهرهای متوسط و بزرگ به نحوی یکسان رشد کرده‌اند. در سال ۲۰۵۰ (شکل شماره سه)، نواحی سکونتگاهی در سناریوی ENV، الگوی توزیع بسیار متفاوتی نسبت به رشدهای BAU و COM نشان داده‌اند. بر این اساس، نواحی سکونتگاهی به ترتیب در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ تا ۵۴۳۸۸ و ۶۲۷۳۱ هکتار تحت سناریوی BAU، ۵۴۳۱۵ و ۶۲۱۵۸ هکتار تحت سناریوی COM و ۵۲۳۲۵ و ۶۱۵۰۴ هکتار تحت سناریوی ENV رشد کرده‌اند.



شکل ۳. لایه‌های مطلوبیت در سناریوی رشد تاریخی (BAU)، حفاظت از محیط‌زیست (ENV)، و رشد فشرده (COM) و توزیع نواحی سکونتگاهی پیش‌بینی‌شده در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ برای هر سناریو

نتایج مدل‌سازی دمای سطح زمین

مدل‌سازی مقادیر دمای سطح زمین در رویکرد تکه‌های سکونتگاهی، همبستگی غیر معنی‌داری بین دمای سطح زمین و وسعت تکه‌ها نشان داده است، در حالی که ارتباط مثبت معنی‌داری در رویکرد قطعات به دست آمده است (جدول شماره سه). برخلاف مطالعات قبلی که رابطه مستقیم و معناداری بین دما و تکه‌های مناطق سکونتگاهی به دست آوردند (Wesley and Brunzell, 2019, Zawadzka et al., 2021)، نتایج این تحقیق نشان داد که این همبستگی در مقیاس‌های کوچک‌تر ساختاری، معنی‌دار خواهد بود. به عبارت دیگر، بلوک‌های شهری به عنوان واحدهای سکونتگاهی مجزا عمل کرده و هر یک، دمای سطح زمین مخصوص به خود را دارند. با توجه به این نتایج، به نظر می‌رسد که مطالعه دمای سطح زمین سکونتگاهی در مقیاس بلوک، به‌ویژه در مناطق سکونتگاهی بزرگ‌تر و به هم پیوسته، از قابلیت بیشتری برای تخمین دمای سطح زمین برخوردار است.

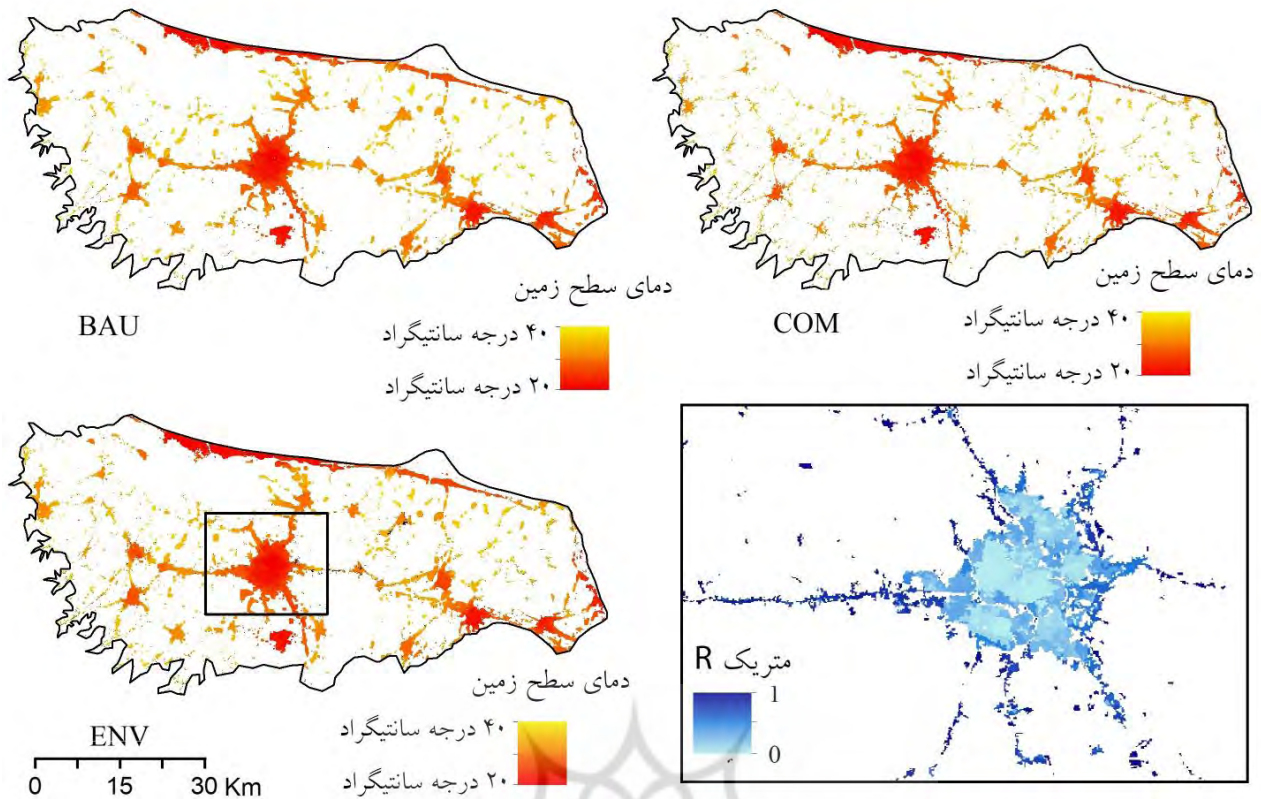
بالاترین همبستگی بین مساحت شی و میانگین دمای سطح زمین آن در سال ۲۰۰۲ به دست آمد ($p\text{-value} < 0/05$ ، $r = 0/786$). علی‌رغم معنی‌داری این همبستگی‌ها، هیچ‌یک از معیارهای ساختار فضایی شامل SHI، PARA و CAI ارتباط معنی‌داری با میانگین دمای سطح زمین نشان نداده‌اند. این نتیجه در تضاد با یافته‌های بسیاری از مطالعاتی است که بر اهمیت ویژگی‌های ساختاری قطعات شهری تأکید داشته‌اند (Lu et al., 2020, Yao et al., 2020) و ممکن است به دلیل تفاوت‌های بنیادی در ماهیت و جانمایی نواحی نفوذناپذیر و طبیعی باشد که ساختار درونی یک قطعه را تشکیل می‌دهد. بر این اساس، مساحت قطعات به عنوان تنها پیش‌بینی‌کننده مهم میانگین دمای سطح زمین شناسایی شد. متریک R، همان‌طور که در شکل شماره چهار نشان داده شده است، نسبت لبه مشترک بین هر شیء و همسایگان آن را محاسبه کرده است. میانگین نسبت R بین ۰ (عدم وجود همسایه) و ۱ (شیء کاملاً احاطه شده) با مقدار میانگین ۰/۳۴۱ در سال ۲۰۰۲، ۰/۴۰۲ در سال ۲۰۱۲ و ۰/۳۸۸ در سال ۲۰۲۲ به دست آمد که الگوی بسیار پراکنده گسترش نواحی سکونتگاهی در منطقه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول شماره سه نشان داده شده است، میانگین مساحت قطعات سکونتگاه همسایه تنها در سال ۲۰۰۲ ($r = 0/230$ ، $p\text{-value} < 0/05$) و ۲۰۱۲ ($r = 0/208$ ، $p\text{-value} < 0/05$) زمین نشان داده است. همچنین این مقدار برای متوسط دمای سطح زمین قطعات همسایه تنها در سال ۲۰۱۲ ($r = 0/258$ ، $p\text{-value} < 0/05$) و ۲۰۲۲ ($r = 0/730$ ، $p\text{-value} < 0/05$) معنی‌دار بود. از این رو، مساحت هر قطعه و مقادیر متریک R تنها متغیرهایی بودند که به‌طور معنی‌داری در تمام سال‌های مورد مطالعه توانستند به پیش‌بینی دمای سطح زمین بپردازند و از این رو در ساخت مدل رگرسیونی مورد استفاده (جدول شماره سه) برای پیش‌بینی دمای سطح زمین در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ تحت هر سناریو انتخاب شدند. با توجه به این نتایج این‌طور می‌توان نتیجه گرفت که پیکربندی کاربری و پوشش زمین نقش بسیار مهم‌تری در شکل‌گیری دمای سطح زمین سکونتگاهی در سیمای شمال کشور دارد. این مشاهدات با مطالعات قبلی مانند هو و استوک (۲۰۲۰) و راکوتو و همکاران (۲۰۲۱) نیز مطابقت دارد که بر اهمیت پیکربندی سیمای سرزمین مانند اثر کاربری‌های همسایه به عنوان یک عامل مهم در تغییر دمای سطح زمین تأکید کرده‌اند.

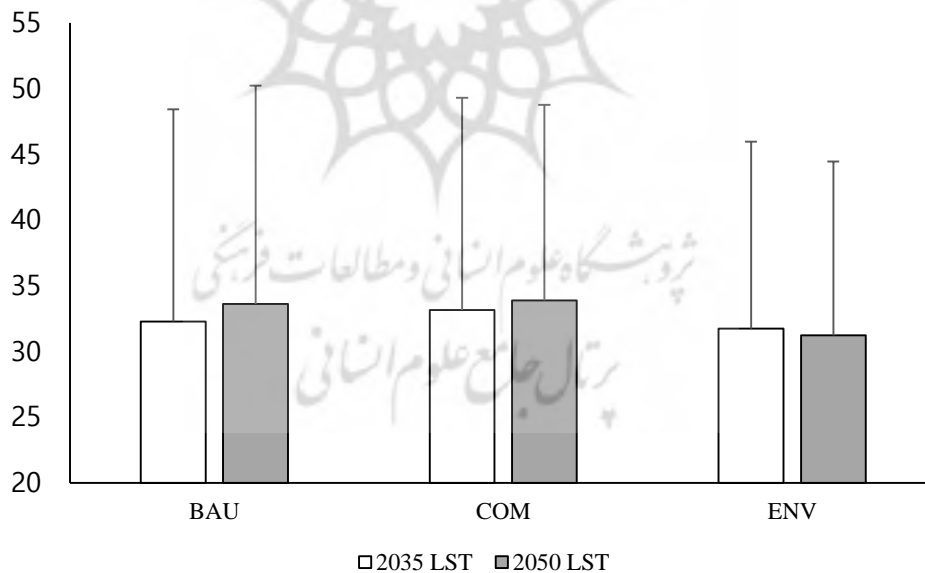
جدول ۳. مقادیر پارامترهای مورداستفاده در فرآیند مدل سازی دمای سطح زمین مناطق سکونتگاهی آینده در سناریوی رشد تاریخی (BAU)، حفاظت از محیط زیست (ENV)، و رشد فشرده (COM)

LST			متغیر	کلاس هر متغیر
۲۰۲۲	۲۰۱۲	۲۰۰۲		
۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	Patch	همبستگی با LST
*۰/۶۱۸	*۰/۳۸۲	*۰/۷۸۶	Segment	
-۰/۱۴۷	۰/۱۸۸	۰/۲۰۲	PARA	همبستگی قطعه با LST
۰/۰۰۵	۰/۱۸۹	۰/۰۱۴	SHI	
-۰/۰۳۵	۰/۰۹۱	-۰/۰۱۲	CAI	
*۰/۲۳۰	۰/۰۰۸	*۰/۲۰۸	Mean area	متغیرهای همسایگی
*۰/۷۳۰	*۰/۲۵۸	۰/۰۴۶	mean LST	
*۰/۶۱۲	*۰/۴۶۳	*۰/۴۴۵	R-metric	
Segment area+ R-metric	Segment area+ R-metric	Segment area+ R-metric	Input-variables	مدل رگرسیون
۲۴/۸۲(۰/۰۰)	۳۴/۱۲(۰/۰۰)	۱۹/۶۴ (۰/۰۰)	Sig. of Segment area (t-test- sig)	
۵۳/۴۶(۰/۰۰)	۴۰/۰۱(۰/۰۰)	۱۸/۳۸(۰/۰۰)	Sig. of R-metric (t- test)	
۰/۶۵۶	۰/۵۷۵	۰/۴۹۹	R-sq.	
)۰/۶۱۷ R-value (۳/۰۳۸ segment area + ۰/۰۰۸+ ۳۰/۷۸LST=			Eq (R-sq.)	مدل کلی

با استفاده از مدل های رگرسیونی ساخته شده، متوسط دمای سطح زمین قطعات سکونتگاهی پیش بینی شده در گسترش سکونتگاه تا سال ۲۰۵۰ پیش بینی شد (شکل شماره چهار). بالاترین میانگین دمای سطح زمین مناطق سکونتگاهی تحت سناریوی COM در سال ۲۰۵۰ برابر با $۱۴/۸۸ \pm ۳۳/۸۸$ درجه سانتی گراد به دست آمد درحالی که کمترین مقدار میانگین دمای سطح زمین تحت سناریوی ENVI در سال ۲۰۵۰ $۱۳/۲۳ \pm ۳۱/۲۳$ درجه سانتی گراد) مشاهده شد (شکل شماره پنج). بر اساس این نتایج این طور می توان نتیجه گرفت که به دلیل رشد متراکم و تشکیل بلوک های سکونتگاهی بزرگ که توسط مرزهای مشترک متعدد به هم متصل شده اند، امکان افزایش دمای سطح زمین سکونتگاهی منطقه تا $۳۳/۸$ درجه سانتی گراد نیز امکان پذیر است که نشان دهنده افزایش دمای $۲/۶۵$ درجه سانتی گراد در مقایسه با سناریوی محیط زیست است. از آنجا که افزایش دما به واسطه رشد فشرده و تاریخی در کل سیمای مورد مطالعه بررسی شد، این نتایج باید به عنوان معیاری برای تصمیم گیری در سطح کلان دمای سطح زمین سکونتگاهی مورداستفاده قرار بگیرد و در سطح محلی، عواملی مانند نوع پوشش زمین یا تراکم ساختمان نیز باید در کاهش دمای سطح زمین سکونتگاهی و شدت جزیره حرارتی در نظر گرفته شود.



شکل ۴. مقادیر دمای سطح زمین پیش‌بینی شده در قطعات سکونتگاهی پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰ و مرز مشترک قطعات سکونتگاهی اندازه‌گیری شده با استفاده از متریک R



شکل ۵. مقادیر میانگین دمای سطح زمین قطعات پیش‌بینی شده برای مناطق سکونتگاهی رشد یافته شهری در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰

نتیجه‌گیری

مطالعه دمای سطح زمین یکی از جنبه‌های اساسی در توسعه مناطق پیراشهری است، زیرا ساختار و پیکربندی‌های فضایی مختلف سکونتگاهی می‌تواند منجر به تشکیل جزایر حرارت شهری با شدت‌های مختلف شود. در این پژوهش از یک رویکرد مدل‌سازی برای بررسی تأثیر الگوهای مختلف توسعه مناطق پیراشهری در شمال ایران استفاده شده است. علی‌رغم استفاده از تصاویر متوسط ماه‌های فصل تابستان، تفاوت قابل توجهی در دمای سطح زمین بین سال‌های مورد مطالعه مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که دمای سطح زمین سکونتگاهی ممکن است به دلیل شرایط محلی زمین، نتواند به‌طور دقیق روند تغییرات تاریخی دمای سطح زمین را نشان دهد. بنابراین، مدل‌های مبتنی بر روابط بین دما و ویژگی‌های سطح زمین در سه دوره زمانی مختلف برای مدل‌سازی پیشنهاد گردید. وسعت قطعات سکونتگاهی ارتباط قوی آماری با میانگین دمای سطح زمین نشان دادند، درحالی‌که ویژگی‌های ساختاری آن نتوانستند مانند پارامترهای همسایگی، تغییرات دمای سطح زمین سکونتگاهی را پیش‌بینی کنند. بااینکه تفاوت عددی در دمای سطح زمین سکونتگاهی آینده بین سناریوها قابل توجه نبود، اما باید توجه داشت که حتی تغییرات کوچک ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد می‌تواند تأثیرات عمیقی بر خرد اقلیم سکونتگاهی در مقیاس بزرگ داشته باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود قبل از توسعه مناطق سکونتگاهی در منطقه مورد مطالعه، اثرات بالقوه عوامل دیگر مانند تراکم ساختمان و ویژگی‌های پوشش زمین بر دمای سطح زمین سکونتگاهی نیز مورد مطالعه قرار گیرد تا بهترین گزینه برای گسترش سکونتگاهی انتخاب شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تا از مدل‌های اقلیمی بخصوص در بخش تغییرات دمای هوا برای بررسی ارتباط آن با تغییرات دمای سطح زمین استفاده شود. استفاده از سناریوهای جمعیتی برای آموزش بهتر و دقیق‌تر مدل مارکوف و همچنین اجرای رگرسیونی تغییر کاربری مانند رگرسیون لجستیک برای تقویت نتایج پیشنهاد می‌شود. از طرفی باید توجه داشت که پیش‌بینی‌های ارائه شده در این تحقیق، معیاری از شرایط گذشته است و بروز هرگونه تغییراتی که مغایر با روند تاریخی داده‌ها باشد، صحت نتایج را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

منابع

- مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵. **سالنامه آماری گیلان**. تهران، ص ۸۶۴.
- Addae, B., Dragičević, S., 2022. **Integrating multi-criteria analysis and spherical cellular automata approach for modelling global urban land-use change**. Geocarto International, 2152498. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2152498>
 - Aeinehvand, R., Darvish, A., Baghaei Daemei, A., Barati, S., Jamali, A., Malekpour Ravasjan, V., 2021. **Proposing alternative solutions to enhance natural ventilation rates in residential buildings in the Cfa Climate Zone of Rasht**. Sustainability 13 (2), 679. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/679>.
 - Afrakhteh, R., Asgarian, A., Sakieh, Y., Soffianian, A., 2016. **Evaluating the strategy of integrated urban-rural planning system and analyzing its effects on land surface temperature in a rapidly developing region**. Habitat International 56, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.05.009>.
 - Asadabadi, M.R., Chang, E., Saberi, M., 2019. **Are MCDM methods useful? A critical review of analytic hierarchy process (AHP) and analytic network process (ANP)**. Cogent Engineering 6 (1), 1623153. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1623153>.

- Bonafoni, S., Keeratikasikorn, C., 2018. **Land surface temperature and urban density: Multiyear modeling and relationship analysis using MODIS and Landsat data.** Remote Sensing 10 (9), 1471. <https://doi.org/10.3390/rs10091471>.
- Borghei, Y., Moghadamnia, M.T., Sigaroudi, A.E., Ghanbari, A., 2020. **Association between climate variables (cold and hot weathers, humidity, atmospheric pressures) with out-of-hospital cardiac arrests in Rasht, Iran.** Journal of Thermal Biology 93, 102702. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2020.102702.
- Chen, Z., Zhang, H., Duan, H., Shi, C., 2021. **Improvement of thermal and optical responses of short-term aged thermochromic asphalt binder by warm-mix asphalt technology.** Journal of Cleaner Production 279, 123675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123675>.
- Dezhkam, S., Amiri, B.J., Darvishsefat, A.A., Sakieh, Y., 2014. **Simulating the urban growth dimensions and scenario prediction through sleuth model: a case study of Rasht County, Guilan, Iran.** GeoJournal 79, 591-604. DOI: [10.1007/s10708-013-9515-9](https://doi.org/10.1007/s10708-013-9515-9).
- Firozjaei, M.K., Alavipanah, S.K., Liu, H., Sedighi, A., Mijani, N., Kiavarz, M., Weng, Q., 2019. **A PCA-OLS model for assessing the impact of surface biophysical parameters on land surface temperature variations.** Remote Sensing 11 (18), 2094. <https://doi.org/10.3390/rs11182094>.
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., Gill, N., 2018. **Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy.** European Journal of Remote Sensing 51 (1), 667-678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>.
- Hakimi, H., Rezaadeh, Z., Askarnezhad, R., 2019. **An Analysis of Rural Terminal Locations in Cities using the Weighted Linear Combination (WLC) Technique and ELECTRE Model (Case Study: Meshkinshahr).** Geography and Urban Space Development 6 (1), 81-101. <https://doi.org/10.22067/gusd.v6i1.67423>.
- Hou, H., Estoque, R.C., 2020. **Detecting cooling effect of landscape from composition and configuration: An urban heat island study on Hangzhou.** Urban Forestry & Urban Greening 53, 126719. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126719>.
- Kim, S.W., Brown, R.D., 2021. **Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review.** Science of the Total Environment 779, 146389. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146389.
- Kong, D., Gu, X., Li, J., Ren, G., Liu, J., 2020. **Contributions of global warming and urbanization to the intensification of human perceived heatwaves over China.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres 125 (18), e2019JD032175. <https://doi.org/10.1029/2019JD032175>.
- Lopes, M.S., Saldanha, D.L., Veettil, B.K., 2021. **Object-oriented and fuzzy logic classification methods for mapping reforested areas with exotic species in Rio Canoas State Park—Santa Catarina, Brazil.** Environment, Development and Sustainability 23, 7791-7807. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00946-0>.
- Lu, L., Weng, Q., Xiao, D., Guo, H., Li, Q., Hui, W., 2020. **Spatiotemporal variation of surface urban heat islands in relation to land cover composition and configuration: A multi-scale case study of Xi'an, China.** Remote Sensing 12 (17), 2713. <https://doi.org/10.3390/rs12172713>.
- Madanian, M., Soffianian, A.R., Koupai, S.S., Pourmanafi, S., Momeni, M., 2018. **The study of thermal pattern changes using Landsat-derived land surface temperature in the central part of Isfahan province.** Sustainable cities and society 39, 650-661. DOI: [10.1016/j.scs.2018.03.018](https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.018).
- Mokhtari, Z., Amani-Beni, M., Asgarian, A., Russo, A., Qureshi, S., Karami, A., 2023. **Spatial prediction of the urban inter-annual land surface temperature variability: An integrated modeling approach in a rapidly urbanizing semi-arid region.** Sustainable Cities and Society 93, 104523. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104523>.

- Mukherjee, F., Singh, D., 2020. **Assessing land use–land cover change and its impact on land surface temperature using LANDSAT data: A comparison of two urban areas in India.** *Earth Systems and Environment* 4, 385-407. DOI:10.1007/s41748-020-00155-9.
- Mutibwa, D., Strachan, S., Albright, T., 2015. **Land surface temperature and surface air temperature in complex terrain.** *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8 (10), 4762-4774. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2468594.
- Rakoto, P.Y., Deilami, K., Hurley, J., Amati, M., Sun, Q.C., 2021. **Revisiting the cooling effects of urban greening: Planning implications of vegetation types and spatial configuration.** *Urban Forestry & Urban Greening* 64, 127266. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127266>.
- Sekertekin, A., 2019. **Validation of physical radiative transfer equation-based land surface temperature using Landsat 8 satellite imagery and SURFRAD in-situ measurements.** *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 196, 105161. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105161>.
- Sekertekin, A., Zadbagher, E., 2021. **Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area.** *Ecological Indicators* 122, 107230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107230>.
- Shamsaei, M., Carter, A., Vaillancourt, M., 2022. **A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods.** *Construction and Building Materials* 359, 129350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129350>.
- Sun, Y., Hu, T., Zhang, X., Li, C., Lu, C., Ren, G., Jiang, Z., 2019. **Contribution of global warming and urbanization to changes in temperature extremes in Eastern China.** *Geophysical Research Letters* 46 (20), 11426-11434. <https://doi.org/10.1029/2019GL084281>.
- Tella, A., Balogun, A.-L., 2020. **Ensemble fuzzy MCDM for spatial assessment of flood susceptibility in Ibadan, Nigeria.** *Natural Hazards* 104 (3), 2277-2306. DOI: 10.1007/s11069-020-04272-6.
- Wesley, E.J., Brunsell, N.A., 2019. **Greenspace pattern and the surface urban heat island: A biophysically-based approach to investigating the effects of urban landscape configuration.** *Remote Sensing* 11 (19), 2322. <https://doi.org/10.3390/rs11192322>.
- Xiang, Y., Ye, Y., Peng, C., Teng, M., Zhou, Z., 2022. **Seasonal variations for combined effects of landscape metrics on land surface temperature (LST) and aerosol optical depth (AOD).** *Ecological Indicators* 138, 108810. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108810>.
- Yao, L., Li, T., Xu, M., Xu, Y., 2020. **How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: An urban heat island study in Beijing, China.** *Urban Forestry & Urban Greening* 52, 126704. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126704.
- Yu, S., Chen, Z., Yu, B., Wang, L., Wu, B., Wu, J., Zhao, F., 2020. **Exploring the relationship between 2D/3D landscape pattern and land surface temperature based on explainable eXtreme Gradient Boosting tree: A case study of Shanghai, China.** *Science of the Total Environment* 725, 138229. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138229.
- Zawadzka, J., Harris, J.A., Corstanje, R., 2021. **A simple method for determination of fine resolution urban form patterns with distinct thermal properties using class-level landscape metrics.** *Landscape Ecology* 36, 1863-1876. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01156-9>.