

طبقه‌بندی و پیش‌بینی تغییرات مکانی-زمانی سطوح نفوذناپذیر شهری و اثرات آن بر شدت جزیره حرارتی

کیوان عزیزی^۱، حسین عقیقی^{۲*}، علی اکبر متکان^۳

- ۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مرکز سنجش از دور و GIS
- ۲- استادیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مرکز سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی
- ۳- استاد، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مرکز سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده:

پدیده جزایر حرارتی به‌عنوان یکی از مخاطرات، فعالیت‌ها و زندگی انسان در محیط‌های شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سطوح نفوذناپذیر شهری یکی از عوامل مهم در تغییرات جزیره حرارتی است. تصاویر سنجش‌از‌دور روشی ارزان، کارآمد و سریع در بررسی شدت جزایر حرارتی و تغییرات سطوح نفوذناپذیر در محیط‌های شهری محسوب می‌شود. لذا هدف از این تحقیق بررسی و ارتباط بین سطوح نفوذناپذیر و تغییرات شدت جزایر حرارتی است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شهر رشت است و از سری زمانی تصاویر لندست مربوط به سال ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۱۸ استفاده شده است. روش پژوهش بدین صورت است که ابتدا پیش‌پردازش اولیه بر روی تصاویر انجام گرفته و سپس با استفاده از شاخص *NDISI* به طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر شهری پرداخته شده است. برای تعیین حد آستانه تفکیک سطوح نفوذناپذیر (اراضی ساخته‌شده) از سطوح نفوذپذیر (اراضی ساخته نشده)، از روش آستانه‌گذاری *Otsu* استفاده شده است. دقت طبقه‌بندی با استفاده از نقاطی که به‌صورت تصادفی انتخاب شده بود، مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از مدل *CA- Markov* برای پیش‌بینی تغییرات آتی سطوح نفوذناپذیر شهری استفاده شده است و در نهایت ارتباط بین سطوح نفوذناپذیر شهری و تغییرات شدت جزیره حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش حاکی از دقت کلی ۸۴/۵ تا ۹۰ درصد برای روش *NDISI* بوده است. اختلاف نقشه پیش‌بینی *CA- Markov* با نقشه واقعیت کمتر از ۸ درصد بوده و نشان از قابل اعتماد بودن این مدل است. ارتباط بین سطوح نفوذناپذیر و جزایر حرارتی حاکی از همبستگی مثبت و قوی بین ۰/۶۹ تا ۰/۸۹ برای سال‌های مختلف بوده است. جهت تغییرات سطوح نفوذناپذیر شهری و تغییرات شدت جزیره حرارتی با یکدیگر منطبق بوده است.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، شدت جزیره حرارتی، شناسایی تغییرات، سطوح نفوذناپذیر شهری، مدل *CA- Markov*.

مقدمه

افزایش جمعیت جهان و علاقه مردم به شهرنشینی موجب ادامه روند توسعه در فضاهای شهری شده است و پیش‌بینی می‌شود که این روند تا سال ۲۱۰۰ ادامه خواهد یافت (Rosenzweig et al., 2011, Seto et al., 2012, Mushore et al., 2017). تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۰۸ میلادی، حدود ۵۰ درصد مردم جهان در محیط‌های شهری و مناطق اطراف آنها زندگی می‌کردند (Barata et al., 2011) و انتظار می‌رود که با رشد ۲۰ درصدی تا سال ۲۰۵۰، نرخ جمعیت شهرنشین به حدود ۷۰ درصد برسد (Blake et al., 2011, UN, 2014). این افزایش شدید در نرخ جمعیت شهرنشین معمولاً منجر به تغییر کاربری اراضی و سطوح غیرقابل نفوذ در شهرها می‌شود (Poelmans and Van Rompaey, 2009).

سطوح غیرقابل نفوذ یکی از شاخص‌های مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود (Arnold Jr and Gibbons, 1996) که از آن می‌توان به‌عنوان یک فاکتور کمی در ارزیابی میزان اثرات انسان بر محیط‌زیست استفاده کرد (Sutton et al., 2009). به‌طور مثال در سال ۲۰۱۴ حدود ۴۰۰ هزار کیلومتر مربع از نواحی سطح زمین تحت پوشش اراضی ساخته‌شده قرار داشته است (Jaeger and Schwick, 2014) و پیش‌بینی می‌شود که مقدار آن تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع افزایش یابد (Seto et al., 2012). سطوح نفوذناپذیر و اراضی ساخته‌شده به دو دسته انسان‌ساخت و طبیعی تقسیم می‌شوند (Weng, 2012). ازجمله این سطوح می‌توان به ساختمان‌ها، جاده‌ها، پیاده‌روها، پارکینگ‌ها و غیره اشاره کرد (Weng, 2012, Thanapura et al., 2007) که مانع از نفوذ آب به داخل خاک (Braun and Herold, 2004) و بالطبع باعث افزایش روان آب در محیط‌های شهری می‌شوند (Haase and Nussli, 2007). سطوح غیرقابل نفوذ همچنین باعث پوشانده شدن خاک‌های زیرین می‌شود که خود باعث افزایش انرژی ذخیره‌شده در طول روز و انتشار کندتر آن در شب می‌گردد. این شرایط منجر به

افزایش دمای شهر و در نتیجه ایجاد جزیره حرارتی در شهرها می‌شود (Morabito et al., 2016).

جزیره حرارتی شهری پدیده‌ای است که به‌موجب آن محیط‌های شهری دمای بالاتری از محیط‌های روستایی اطراف خود دارند (Liu and Zhang, 2011) و فعالیت‌های انسان باعث تقویت این پدیده در محیط‌های شهری می‌شود (Santamouris, 2013). جزایر حرارتی تأثیرات متفاوت اجتماعی و اقتصادی داشته و بر کیفیت زندگی مردم نیز تأثیر منفی می‌گذارند (Yue and Xu, 2013). بنابراین انتظار می‌رود که شدت جزایر حرارتی در آینده بیشتر شده و در نتیجه پیامدهای قابل توجهی بر شرایط زندگی شهری داشته باشند (Zullo et al., 2018).

با توجه به مطالب فوق‌الذکر، ما نیاز به داده‌ها و سنجنده‌هایی داریم که فعالیت‌های انسانی و اثرات متقابل آن با محیط را به‌صورت پیوسته به نمایش بگذارد، که در این بین داده‌های سنجش‌ازدوری به‌عنوان روشی معتبر برای ارزیابی تغییر و تحولات چشم‌اندازهای شهری و نمایش پیامدهای آن در محیط‌زیست شهری محسوب می‌شود (Mushore et al., 2017). به‌طور مثال شاخص‌های مختلفی برای استخراج اراضی ساخته‌شده یا سطوح نفوذناپذیر شهری توسعه داده‌شده‌اند (Ezimand et al., 2018) که هرکدام از آن‌ها از بخش‌های خاصی از طیف الکترومغناطیس استفاده کرده (Estoque and Murayama, 2015) و متناسب با نوع مناطق شهری مورد مطالعه، نتایج متفاوتی ارائه می‌کنند (Xu, 2010, Xu et al., 2013, Estoque and Murayama, 2015, Ezimand et al., 2018, Ezimand et al., 2021). بعلاوه، نتایج تحقیقات بسیار زیادی حاکی از آن است که از داده‌های سنجش‌ازدوری می‌توان به‌عنوان روشی مؤثر در اندازه‌گیری دمای سطحی عوارض پیچیده شهری و استخراج جزایر حرارتی شهری استفاده کرد (Shakiba et al., 2009, Kloog et al., 2012, Chakraborty et al., 2015). در ایران نیز مطالعات بسیاری در ارتباط با بازیابی دمای سطح زمین و استخراج جزایر حرارتی (صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱؛ متکان و همکاران، ۱۳۹۳). این گروه از روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی که بر مبنای استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی

ایم. و سپس اقدام به بازیابی دمای سطح زمین و بررسی تغییرات مکانی و زمانی شدت جزیره حرارتی متناسب با تغییرات اراضی ساخته شده محاسبه شده است.

داده‌ها و روش تحقیق

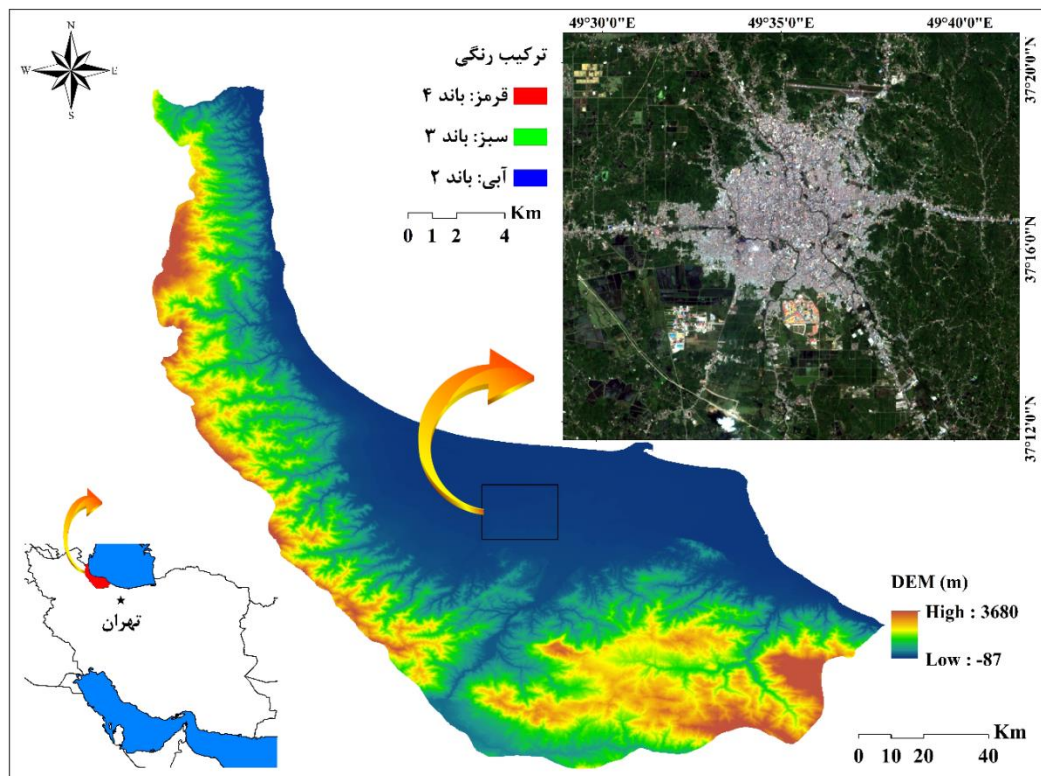
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل شهر رشت و حومه اطراف آن است. این منطقه در زون ۳۹ شمالی و به لحاظ موقعیت نسبی در شمال ایران و جنوب غرب دریای خزر قرار دارد (شکل ۱). رشت به عنوان بزرگ‌ترین منطقه شهری در حاشیه جنوبی دریای خزر، مرکز سیاسی - اداری استان گیلان محسوب می‌شود. ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریا ۵ متر و ویژگی‌های طبیعی، ارتباطی و گردشگری این شهر موجب بالا رفتن جمعیت و توسعه فیزیکی این شهر شده است. روند گسترش شهر رشت در دوره‌های زمانی متفاوت بوده است بدین صورت که تا سال ۱۳۵۰ گسترش آن در جهات شمال شرق، شرق، و از سال ۱۳۶۵-۱۳۵۰ در جهات شمال و شمال غرب، از سال ۱۳۶۵ تا زمان حال در جهت جنوب بیشترین گسترش رخ داده است. بیشترین کاربری‌هایی که در شهر رشت دچار تغییر شده مربوط به تبدیل باغات و زمین‌های کشاورزی به اراضی ساخته شده بوده‌اند. نرخ افزایش جمعیت در شهر رشت نیز متفاوت بوده، به طوری که از سال ۱۳۴۵ تا سال ۱۳۸۵ جمعیت آن از ۱۴۳۰۰۰ به ۵۲۰۰۰۰ نفر رسیده است (Alavi Moghadam et al., 2009)، و از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ نیز جمعیت آن ۸۵۶۹۷۱ نفر ثابت و جمعیت شناور آن نیز به ۱۲۰۰۰۰۰ نفر رسیده است.

است ارجحیت دارد زیرا این ایستگاه‌ها معمولاً به صورت پراکنده و نقطه‌ای در شهرها و حومه شهرها قرار داشته و لذا به خاطر پیچیدگی‌های محیط شهری، این ایستگاه‌ها نمی‌تواند معرف خوب و دقیقی برای درجه حرارت محیط شهری و تغییرات مکانی آن باشند (Morabito et al., 2015).

شهر رشت از جمله مراکز استانی است که در طی دهه‌های اخیر با افزایش جمعیت مواجه بوده است (Alavi Moghadam et al., 2009) و لذا بخش‌های زیادی از فضاها باز داخل شهری و پیرامون آن با ساخت‌وسازهای بدون نظارت روبرو شده که خود موجب تغییر در الگوی رشد شهری در رشت شده است (Shafizadeh Moghadam et al., 2017). به طور مثال تبدیل کاربری زمین‌های کشاورزی حاشیه شهر به کاربری‌های مسکونی، تجاری، صنعتی و ... باعث افزایش پیچیدگی و آشفته‌گی محیط شهری و در نتیجه باعث آشفته‌گی در الگوی حرارتی شهر شده است. لذا شناخت الگوی رشد شهری، افزایش اراضی ساخته شده و به طبع آن الگوی جزیره حرارتی را باید برای برنامه‌ریزی و انجام اقدامات مؤثر مدیریتی مورد بررسی قرار داد.

هدف از این مطالعه بررسی تغییرات شدت جزیره حرارتی به صورت مکانی-زمانی و استخراج اراضی ساخته شده با استفاده از شاخص طیفی در یک دوره ۲۹ ساله و پیش‌بینی آن برای یک دوره ۱۸ ساله با استفاده از زنجیره مارکوف در جهات مختلف جغرافیایی است. جهت نیل به اهداف این پژوهش، پس از پیش‌پردازش داده‌های سنجش از دور با استفاده از شاخص طبقه‌بندی اراضی ساخته شده و روش اتسو اقدام به استخراج اراضی ساخته شده شهر رشت کرده-



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

تغییر وضعیت و موقعیت سنجنده در لحظه اخذ تصویر سبب بروز خطاهایی می‌شود که عمدتاً به دلیل تغییر در ارتفاع و سرعت سکو، تغییر در سرعت اسکن و جاروب کردن میدان دید لحظه‌ای، جابجایی ارتفاعی و غیره هستند (Lillesand et al., 2014).

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاده در این تحقیق

لندست	سنجنده	تعداد باند	تعداد بیت	تاریخ
۵	TM	۷	۸	۱۹۸۹/۰۸/۰۲
۷	ETM+	۸	۸	۲۰۰۹/۰۷/۱۷
۸	OLI/TIRS	۱۱	۱۱	۲۰۱۸/۰۷/۱۰

معمولاً ضرورت دارد که تصاویر سنجنش‌ازدوری تصحیح هندسی شوند تا مطمئن شویم پیکسل‌های تصویر در جایگاه پلانیمتریک (X,Y) صحیح خود قرار گرفته‌اند (Jensen,

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل محصولات مستخرج از تصاویر سنجنده TM ماهواره لندست ۵، سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ و سنجنده OLI/TIRS ماهواره لندست ۸ است. این تصاویر در مسیر ۱۶۶ و ردیف ۳۵ از سیستم مرجع جهانی^۳ (WRS) قرار دارد و سطح تولید این تصاویر L1T است. سری‌های زمانی تصاویر لندست ۵ و ۸ به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که درصد پوشش ابری آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد باشد. این تصاویر از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا به آدرس تارنمای (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دانلود شده‌اند و تاریخ‌های برداشت و سایر اطلاعات مربوط به هریک از آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

پیش‌پردازش تصاویر

3 Worldwide Reference System (WRS)

پس از محاسبه رادیانس طیفی بالای اتمسفر، تصحیح اتمسفری با استفاده از روش FLAASH^۴ انجام شد. این روش تصاویر با طول‌موج‌های مرئی و طول‌موج‌های مادون‌قرمز تا ۳ میکرومتر را تصحیح می‌کند. ENVI (2009). پس از اعمال تصحیح اتمسفری با روش FLAASH نتایج به بازه ۰-۱ تغییر داده شد. ENVI (2009). در نهایت نتایج در عدد ۴۰۰ برای تولید تصاویر ۸ بیتی (۲۵۵-۰) ضرب شد (Xu, 2010). برای محاسبه دمای روشنایی باندهای حرارتی لندست ۵ (باند ۶) و لندست ۷ (باند ۶) و لندست ۸ (باند ۱۰) از رابطه ۳ استفاده شده است.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

TB دمای روشنایی سنجنده^۵ برحسب کلون، و K_2 و K_1 ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی سنجنده که به ترتیب برحسب کلون و $w/m^2 * sr * \mu m$ و در متادیتای تصاویر موجود است (Chander et al., 2009). در جدول ۲ ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی برای ماهواره لندست ۵ و ۷ باند ۶ (Chander et al., 2009) و ماهواره لندست ۸ باند ۱۰ نشان داده شده است.

طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر و تعیین حد آستانه مطلوب

در این تحقیق برای طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر از شاخص تفاضل نرمال شده سطوح نفوذناپذیر^۶ (NDISI) استفاده شده است. این شاخص در سال ۲۰۱۰ به‌عنوان یک تکنیک استخراج سطوح نفوذناپذیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پیشنهاد شد (Xu, 2010) که برای طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر از باندهای مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز موج‌کوتاه و باند حرارتی استفاده می‌کند (Ezimand et al., 2009).

در این پژوهش هم مختصات سازی تصاویر سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ از منطقه مورد مطالعه از طریق انتخاب نقاط کنترل انجام شد. ابتدا منطقه مورد مطالعه از تصویر سال ۱۹۸۹ با انتخاب ۱۵ نقطه کنترل زمینی از نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و با خطای کمتر از ۰/۵ پیکسل زمین مرجع گردید. نقاط کنترل زمینی در تقاطع خیابان‌ها و جاده‌ها و با پراکندگی مناسب در سطح تصویر انتخاب شده بودند و سپس سایر تصاویر نسبت به تصویر تصحیح هندسی شده سال ۱۹۸۹ هم مرجع شدند.

به‌طور کلی سنسورهای مشاهده‌گر زمین تحت تأثیر عوامل مختلف از قبیل شرایط روشنایی خورشیدی، زاویه دید و اختلاف ارتفاع زمین قرار می‌گیرند؛ بنابراین مقادیر خام پیکسل‌های تصویر نیاز به تصحیح رادیومتریکی دارند (Goward et al., 2003). مقادیر خام پیکسل‌ها برای تصاویر ماهواره‌های لندست ۵ و ۷ و همچنین لندست ۸، به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ به رادیانس طیفی بالای اتمسفر تبدیل شدند.

(۱)
$$L_\lambda(\text{landsat}_5, 7) = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIM_\lambda}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \right) (Qcal - Qcal_{min}) + LMIM_\lambda$$
 L_λ تابش طیفی دریافت شده توسط سنجنده برحسب $w/m^2 * sr * \mu m$ ، $Qcal$ مقادیر خام پیکسل (DN حد اقل مقدار پیکسل کوانتیزه شده ($DN = 0$ ، $Qcal_{min}$ حداکثر مقدار پیکسل کوانتیزه شده ($DN = 255$ ، $LMAX_\lambda$ و $LMIM_\lambda$ به ترتیب حداکثر و حداقل رادیانس طیفی سنجنده برحسب $w/m^2 * sr * \mu m$ است (Markham and Helder, 2012). داده‌های مورد نیاز از متادیتای تصاویر استخراج شده است.

(۲)
$$L_\lambda(\text{landsat}_8) = M_L * Qcal + A_L$$
 M_L و A_L به ترتیب فاکتور تبدیل ضربی و ضریب تبدیل جمعی است که از متادیتای تصاویر به دست می‌آید و $Qcal$ مقادیر پیکسل محصول استاندارد کوانتیزه شده و کالیبره شده (DN) است.

4 Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral (FLAASH)
5 at-sensor Brightness Temperature
6 Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI)

2018). روش محاسبه این شاخص در رابطه ۴ نشان

داده شده است.

جدول ۲- ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی (Chander et al., 2009)

ضریب	K_1	K_2
واحد	$(w/m^2 * sr * \mu m)$	Kelvin
لندست ۵	۶۰۷/۷۶	۱۲۶۰/۵۶
لندست ۷	۶۶۶/۰۹	۱۲۸۲/۷۱
لندست ۸	۷۷۴/۸۸۵۳	۱۳۲۱/۰۷۸۹

$$t = \text{ArgMax}_{0 \leq t \leq 255} \{P_{c_1} \times (M_{c_1} - M)^2 + P_{c_2} \times (M_{c_2} - M)^2\} \quad (5)$$

M مقدار میانگین تصویر شاخص است؛ P_{c_1} و P_{c_2} احتمال قرارگیری یک پیکسل در کلاس c_1 و c_2 و M_{c_1} و M_{c_2} مقدار میانگین پیکسل کلاس‌های c_1 و c_2 است. پس از تعیین حد آستانه مطلوب با استفاده از روش اتسو و جداسازی سطوح نفوذناپذیر از اراضی با سطوح نفوذپذیر، از دقت کلی^{۱۰} و شاخص کاپا^{۱۱} برای ارزیابی دقت نتیجه طبقه‌بندی استفاده شد. همان‌طور که در سایر مطالعات نیز بیان شده است، برای ارزیابی دقت می‌توان از چندین صد نقطه مرجع (Estoque and Murayama, 2013) تا چندین هزار نقطه مرجع (Du et al., 2014) استفاده نمود. البته در بعضی از مطالعات استفاده از ۵۰ الی ۱۰۰ نقطه برای هر کلاس نیز کافی اعلام شده است (Congalton, 1991). بنابراین در این مطالعه از ۳۰۰ نقطه مرجع که با روش نمونه‌برداری سیستماتیک تصادفی انتخاب شده بودند، برای ارزیابی دقت استفاده شده است. در این روش نمونه‌برداری برای هریک از کلاس‌ها تعداد ۱۵۰ نقطه به‌صورت مساوی برداشت شده است. این نقاط همانند مطالعات گذشته با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالای Google Earth تهیه شده‌اند (Du et al., 2014).

پیش‌بینی سطوح نفوذناپذیر شهری

در این مطالعه جهت پیش‌بینی تغییرات و گسترش سطوح نفوذناپذیر در آینده، از مدل سلول‌های خودکار - مارکوف^{۱۲}

$$NDISI = \frac{\rho_{TIR_1} - ((\rho_{Green} + \rho_{NIR} + \rho_{SWIR_1})/3)}{\rho_{TIR_1} + ((\rho_{Green} + \rho_{NIR} + \rho_{SWIR_1})/3)} \quad (4)$$

در معادله فوق ρ_{Green} ، ρ_{NIR} و ρ_{SWIR_1} مقدار بازتابندگی سطح تصحیح اتمسفری شده مربوط به باندهای ۲، ۴ و ۵ سنجنده TM ماهواره لندست ۵ و همچنین سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ است. باندهای متناسب با آن‌ها در سنجنده OLI/TIR ماهواره لندست ۸ به ترتیب عبارت‌اند از باندهای ۳، ۵ و ۶. ρ_{TIR_1} مقدار دمای روشنایی تصحیح‌شده اتمسفری (Xu, 2010) برای باند حرارتی ۶ ماهواره لندست ۵، ۷ و باند حرارتی ۱۰ ماهواره لندست ۸ است.

پس از اعمال این شاخص نیاز به تعیین یک حد آستانه برای جداسازی سطوح نفوذناپذیر (اراضی ساخته‌شده) از سطوح نفوذپذیر (اراضی ساخته نشده) است. تعیین حد آستانه در این مطالعه با استفاده از روش اتسو^۷ انجام شده است. این روش برای حد آستانه‌های باینری ارائه شد که در آن برای تشخیص پیش‌زمینه^۸ و پس‌زمینه^۹ در یک تصویر از به‌روزرآوری دو سطح با حداقل واریانس استفاده می‌کند (Otsu, 1979). هدف این الگوریتم یافتن نقطه‌ای است که کمترین ادغام بین دو کلاس را داشته باشد. در این روش پس از محاسبه واریانس کلاس‌ها (c_1 و c_2) و پارامترهای مطلوب مرتبط، با استفاده از رابطه ۵ به تعیین حد آستانه مطلوب بین کلاس‌ها می‌پردازد.

10. Overall Accuracy

11. Kappa Index

12. Markov chain and cellular automata

7 OTSU

8. Background

9. Foreground

استفاده شده است (Yang et al., 2012). این مدل شامل دو بخش اصلی است که عبارت‌اند از مدل زنجیره‌ی مارکوف و مدل سلول‌های خودکار. زنجیره‌های مارکوف کاربردهای گسترده‌ای در مدل‌سازی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین و پیش‌بینی آن دارد (Wu et al., 2006). این مدل برای تعیین احتمال تغییر، حداقل به دو نقشه کلاس پوشش زمین نیاز دارد که معمولاً با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید (Mitsova et al., 2011). بر اساس احتمال شرطی قانون بیز، پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی در مدل مارکوف با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود (Rajitha et al., 2010).

استفاده شده است (Yang et al., 2012). این مدل شامل دو بخش اصلی است که عبارت‌اند از مدل زنجیره‌ی مارکوف و مدل سلول‌های خودکار. زنجیره‌های مارکوف کاربردهای گسترده‌ای در مدل‌سازی تغییرات کلاس‌های پوشش زمین و پیش‌بینی آن دارد (Wu et al., 2006). این مدل برای تعیین احتمال تغییر، حداقل به دو نقشه کلاس پوشش زمین نیاز دارد که معمولاً با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید (Mitsova et al., 2011). بر اساس احتمال شرطی قانون بیز، پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی در مدل مارکوف با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود (Rajitha et al., 2010).

$$s(t+1) = p_{ij} \times s(t) \quad (6)$$

$s(t)$ و $s(t+1)$ حالت‌های سیستم در زمان t و $t+1$ هستند و p_{ij} ماتریس احتمال انتقال در یک حالت است که از طریق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$(0 \leq p_{ij} \leq 1 \text{ and } \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, (i, j=1, 2, \dots, n))$$

خروجی مدل نیز شامل احتمالات تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل‌شده هر کلاس و درنهایت تصاویر احتمالی شرطی برای تبدیل کاربری‌های مختلف است (Yang et al., 2012).

به دلیل عدم وجود اطلاعات وابستگی مکانی در مدل زنجیره مارکوف (Pontius, 2000)، از مدل شبکه خودکار برای اضافه کردن مشخصه مکانی به مدل استفاده می‌شود. شبکه خودکار، عاملی است که توانایی تغییر وضعیتش را بر اساس به‌کارگیری قانونی که وضعیت جدید را مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت همسایگانش نشان می‌دهد، داراست. از فیلتر شبکه خودکار برای توسعه یک فاکتور وزن‌دهی - مجاورت مکانی برای تغییر وضعیت سلول‌ها بر اساس وضعیت همسایه‌اش استفاده می‌شود (Firozjaei et al., 2018). بنابراین در مدل سلول‌های خودکار-مارکوف با استفاده از ماتریس انتقال مساحت، نقشه شبیه‌سازی‌شده کاربری اراضی برای آینده به دست خواهد آمد (Fan et

محاسبه دمای سطح زمین

برای محاسبه دمای سطح زمین روش‌های مختلفی همچون روش تک پنجره (Qin et al., 2001)، روش تک کانال (Jiménez- Muñoz and Sobrino, 2003) و روش انتقال تابشی (Sobrino et al., 2004) وجود دارد. بسیاری از این روش‌ها برای محاسبه دمای سطح زمین نیازمند پروفیل‌های جوی به هنگام عبور ماهواره هستند و بنابراین ما در این مطالعه از روشی استفاده کرده‌ایم که تنها نیازمند اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی و رادیانس طیفی بالای اتمسفر و دمای روشنایی باشد. این اطلاعات را به‌راحتی می‌توان از متادیتای تصاویر مربوط به ماهواره‌های لندست ۵ و ۷ (Chander et al., 2009) و لندست ۸ به دست آورد. برای محاسبه دمای سطح زمین از رابطه ۸ استفاده شده است.

$$LST = \frac{TB}{1 + (\lambda \times TB / \alpha) \ln(\varepsilon)} \quad (8)$$

در معادله فوق LST دمای سطح زمین، TB دمای روشنایی، λ مرکز طول موج باند مورد استفاده به متر، $\alpha = 1.438 \times 10^{-2}$ و ε توان تشعشعی است.

می‌شود (Amiri et al., 2009, Xunqiang et al., 2011, Xu et al., 2011, Haashemi et al., 2016).

$$NLST_i = \frac{LST_i - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، مقدار دمای سطح نرمال شده $NLST_i$ پیکسل i ، LST_i مقدار مطلق پیکسل i ، $LST_{\min}$ حداقل دمای هر تصویر است. سپس تصاویر نرمال شده با استفاده از مقدار میانگین و انحراف معیار خود به پنج طبقه دمایی طبقه‌بندی شدند (Han-qiu and Ben-qing, 2004, Xunqiang et al., 2014, Walawender et al., 2011). هدف اصلی از فرایند نرمال‌سازی و سپس طبقه‌بندی داده‌های دمای سطحی آن است که با استفاده از این روش آماری تغییرات به وقوع پیوسته در توزیع آماری داده‌های دما را شناسایی کرده و به‌واسطه آن نحوه تغییرات جزایر حرارتی را کمی نمود. در جدول (۳)، T_{mean} میانگین دمای هر یک از تصاویر نرمال شده و std نشان‌دهنده مقدار انحراف معیار هریک از تصاویر نرمال شده است.

TB در قسمت مربوط به پیش‌پردازش تصاویر و رابطه ۳ توضیح داده شده است. برای محاسبه توان تشعشعی بدین‌صورت عمل شده است که توان تشعشعی آب ($NDVI < 0$) معادل مقدار ۰/۹۹۲۵، توان تشعشعی سطوح نفوذناپذیر در شهر و یا خاک ($0 \leq NDVI < 0.15$) معادل مقدار ۰/۹۲۳ و توان تشعشعی پوشش گیاهی ($NDVI > 0.727$) را معادل مقدار ۰/۹۸۶ قرار داده شده است (Shen et al., 2016). برای محاسبه سایر مقادیر نیز از رابطه ۹ استفاده شده است.

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \quad (9)$$

در نهایت پس از محاسبه تمامی پارامترهای مربوط به رابطه ۸ و جایگذاری آن‌ها دمای سطح زمین برای تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ به دست آمد (Shen et al., 2016).

شدت جزیره حرارتی

جهت بررسی تغییرات مکانی-زمانی جزیره حرارتی، داده‌های دمای سطحی منطقه با روش‌های آماری تجزیه و تحلیل شدند. ابتدا نرمال‌سازی دمای سطحی با استفاده از رابطه ۱۰ انجام گرفت و همان‌طور که در رابطه ۱۰ مشاهده می‌شود برای این کار از دو پارامتر حداقل و حداکثر دما استفاده

جدول ۳- نحوه طبقه‌بندی دمای سطحی به پنج طبقه دمایی (Han-qiu and Ben-qing, 2004)

طبقه دما	دامنه مربوط به هر طبقه
دمای بسیار پایین	$T \leq T_{mean} - 1.5std$
دمای پایین	$T_{mean} - 1.5std < T \leq T_{mean} - std$
دمای متوسط	$T_{mean} - std < T \leq T_{mean} + std$
دمای بالا	$T_{mean} + std < T \leq T_{mean} + 1.5std$
دمای بسیار بالا	$T > T_{mean} + 1.5std$

استفاده از رابطه ۱۰ داده‌ها نرمال شوند، سپس شدت جزیره حرارتی از طریق رابطه ۱۱ محاسبه شود (Han-qiu and Ben-qing, 2004).

$$URI = \frac{1}{100m} \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (11)$$

جهت بررسی تغییرات شدت جزیره حرارتی منطقه بین سال‌های ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۱۸ از شاخص نسبت جزیره حرارتی استفاده می‌شود. استفاده از این شاخص مقایسه شدت جزیره حرارتی را با استفاده تصاویر چند زمانه با تفاوت ماهانه و فصلی را ممکن می‌کند (Han-qiu and Ben-qing, 2004). در این روش لازم است تا ابتدا با

دقت طبقه‌بندی نقشه‌های سطوح غیرقابل نفوذ پس از انتخاب ۳۰۰ نقطه مرجع با روش نمونه‌گیری تصادفی از تصاویر با قدرت تفکیک بالا که در Google Earth موجود است (McCoy, 2005)، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مربوط به ارزیابی دقت در جدول ۴ آمده است. جدول ۴ نشان می‌دهد که بیشترین دقت کلی طبقه‌بندی مربوط تصاویر لندست ۸ با ۹۰٪ درصد دقت در سال ۲۰۱۸ و کمترین دقت مربوط به تصاویر لندست ۷ با ۸۴/۵ درصد دقت در سال ۲۰۰۰ بوده است. همچنین در جدول ۴ ضریب کاپا نیز برای هریک از تصاویر مورد بررسی ارائه شده است. در رابطه با نتایج ضریب کاپا اشاره شده است که چنانچه ضریب کاپای محاسبه شده بین ۰/۶۱ تا ۰/۸۰ باشد به‌عنوان قابل قبول بودن کاپا و چنانچه ضریب کاپا بین ۰/۸۱ تا ۱ باشد به‌عنوان توافق کامل کاپا است (McHugh, 2012). نتایج ضرایب کاپای محاسبه شده در این پژوهش حاکی از قابل قبول نتایج طبقه‌بندی در تمامی سال‌ها است. در نهایت دقت مدل مارکوف برای پیش‌بینی سطوح نفوذناپذیر شهری نیز مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. روش ارزیابی دقت بدین صورت بوده است که با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی شده سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۹ به پیش‌بینی سطوح نفوذناپذیر در سال ۲۰۱۸ پرداخته شده است و سپس نتایج این پیش‌بینی با داده‌های مرجع زمینی سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مدل حاکی از دقت کلی ۸۳٪ است و چون نتایج آن با نقشه طبقه‌بندی واقعیت در سال ۲۰۱۸ دارای اختلاف کمتر از ۸ درصد بوده، بنابراین نتایج این مدل قابل قبول است.

در این رابطه URI شاخص نسبت جزیره حرارتی، m تعداد طبقات دمای نرمال شده، n تعداد طبقات دمایی که بالاتر از طبقه دمای متوسط قرار دارند. W_i مقدار وزن طبقات دمایی را نشان می‌دهد که بالاتر از نرمال بوده و با توجه به شماره طبقه وزن‌ها لحاظ می‌شود. P_i مقدار مساحت طبقات دمایی بالاتر از نرمال واقع در سطوح نفوذناپذیر به کل مساحت شهر را نشان می‌دهد.

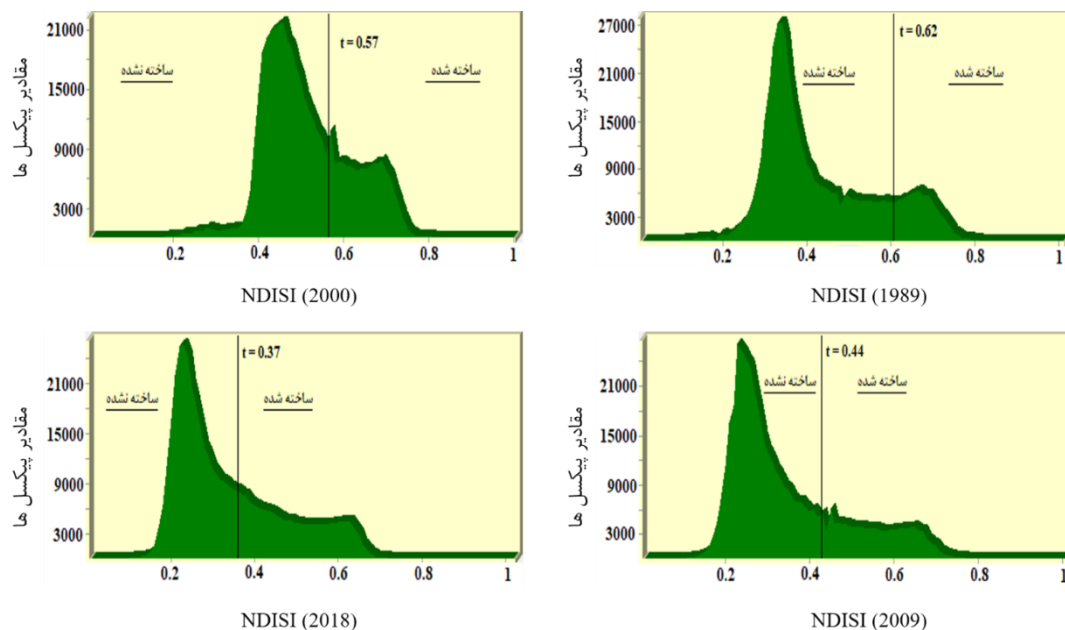
نتایج و بحث

طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر و تعیین حد آستانه

بهبینه

هیستوگرام شاخص طیفی NDISI برای سال‌های مختلف ترسیم شده است و نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این هیستوگرام‌ها مشاهده شود مقدار حد آستانه اتسو از سال ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۱۸ روند کاهشی داشته که ناشی از افزایش سطوح نفوذناپذیر بوده است. همواره در تصاویر سنجش‌ازدور چنانچه هیستوگرام‌ها به‌صورت کشیده باشند باعث افزایش کنتراست تصاویر و بهبود نمایش عوارض می‌شوند (Mather and Koch, 2011) بعلاوه با حذف نویز تصاویر، با طبقه‌بندی کردن تصاویر، کلاس‌ها می‌توانند به‌خوبی از یکدیگر تفکیک می‌شوند (Yu et al., 2011). در هیستوگرام مربوط به شاخص NDISI در سال‌های مختلف هیستوگرام‌های کشیده وجود داشته است و در طبقه‌بندی نیز دقت بالایی داشته‌اند (جدول ۴). همچنین در این مطالعه نیز همانند سایر مطالعات گذشته، روش اتسو در هیستوگرام‌هایی که دو قله مشخص داشته است نتایج بهتری نشان داده است (Liao et al., 2001, Sezgin and Sankur, 2004). در نهایت می‌توان گفت که روش اتسو به‌صورت اتوماتیک به‌خوبی توانسته است که دو کلاس اراضی ساخته شده و اراضی ساخته نشده را از هم تفکیک نماید (شکل ۲).

ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر



شکل ۲- هیستوگرام مربوط شاخص طیفی NDISI در سال‌های مختلف. خط عمودی اشاره به حد آستانه اتسو است

سال ۱۹۸۹ در حدود ۸/۲۲ درصد منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد که مقدار آن در سال ۲۰۱۸ به ۱۶/۹۷ درصد رسیده است و به عبارت دیگر در این دوره ۲۹ ساله، مقدار اراضی ساخته شده در منطقه مورد مطالعه، بیش از دو برابر شده است. نتایج حاصل از پیش‌بینی سطوح نفوذناپذیر شهری که در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است حاکی از این است که با این روند رشد اراضی ساخته شده، در ۱۸ ساله بعد، اراضی ساخته شده تا حدود دو برابر رشد خواهند داشت و مقدار آن به حدود ۳۳۹/۱۰ هکتار خواهد رسید که ۳۱/۳۵ درصد از وسعت منطقه مورد مطالعه را تشکیل خواهد داد. از طرف دیگر سطوح نفوذپذیر و یا اراضی ساخته نشده که شامل زمین‌های کشاورزی، شالیزارها، جنگل‌ها و ... می‌باشند تحت تأثیر فعالیت‌های انسان قرار گرفته و به سطوح نفوذناپذیر تبدیل شده‌اند. الگوی رشد سطوح نفوذناپذیر در سال‌های مختلف یکسان نبوده است، بدین صورت که بیشترین اراضی ساخته شده در بین سال‌های ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۰۰ تولید شده است..

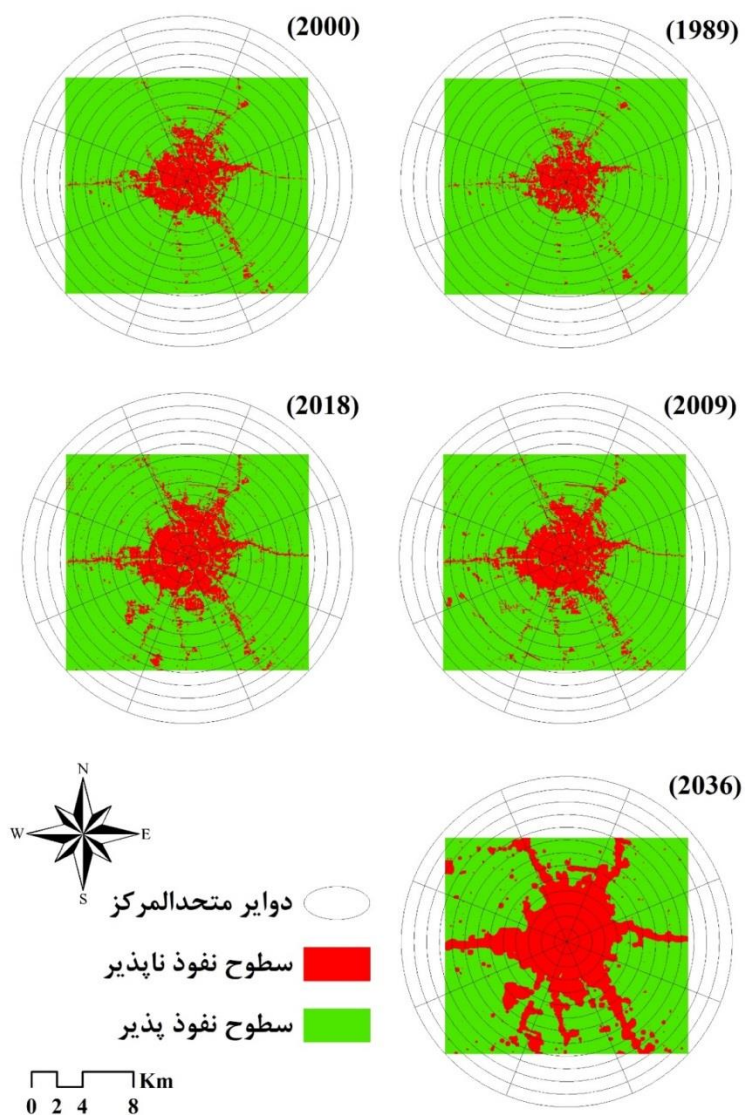
جدول ۴- نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی

سال	شاخص / مدل	دقت کلی (%)	ضریب کاپا
۱۹۸۹	NDISI	۸۸/۸	۰/۷۷
۲۰۰۰	NDISI	۸۴/۵	۰/۶۹
۲۰۰۹	NDISI	۸۸/۲	۰/۷۶
۲۰۱۸	NDISI	۹۰/۰	۰/۷۹
۲۰۱۸	CA-Markov	۸۳/۶	۰/۶۳

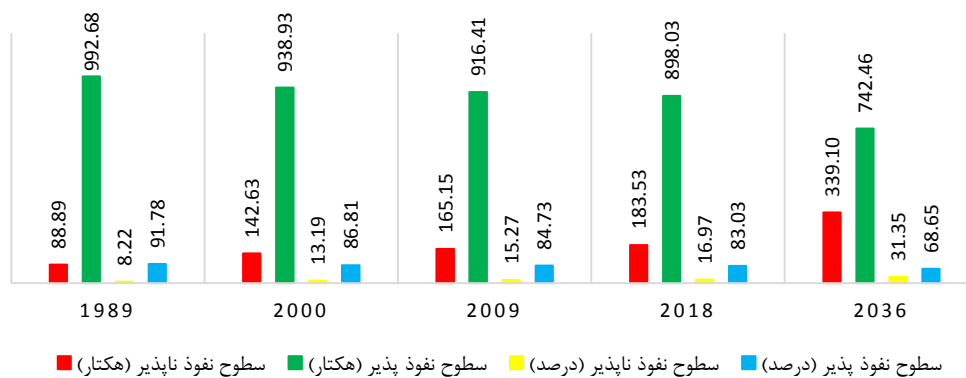
شناسایی تغییرات و پیش‌بینی سطوح نفوذناپذیر

شهری

بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره‌ای لندست، تغییرات قابل توجهی در سطوح نفوذناپذیر شهر اتفاق افتاده است. نتایج این تغییرات در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که سطوح نفوذناپذیر شهری از سال ۱۹۸۹ با ۸۸/۸۹ هکتار به ۱۸۳/۵۳ هکتار در سال ۲۰۱۸ رسیده که حاکی از افزایش ۹۴/۶۴ هکتار سطوح نفوذناپذیر و یا اراضی ساخته شده است. سطوح نفوذناپذیر شهری در



شکل ۳- رشد سطوح نفوذناپذیر شهری از سال ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۱۸



شکل ۴- تغییرات سطوح نفوذناپذیر از سال ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۳۶

به عبارت دیگر در آن محدوده زمانی، حدود ۵ درصد رشد سطوح نفوذناپذیر شهری در اراضی کشاورزی، شالیزارها، جنگل‌ها و ... حاشیه شهرها اتفاق افتاده است که علت آن را می‌توان در افزایش جمعیت، محدودیت در عرضه زمین‌های داخل شهری و در نتیجه تقاضای زمین‌های حاشیه‌ای شهر دانست (خاکپور و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج به‌دست‌آمده برای رشد سریع سطوح نفوذناپذیر شهری در سال ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۰۰ با نتایج مربوط به مطالعات جامع شهر رشت همخوانی دارد.

میزان سطوح نفوذناپذیر شهری در جهات مختلف جغرافیایی و همچنین فاصله تغییرات سطوح نفوذناپذیر شهری نسبت به مرکز شهر با استفاده از دوائر متحدالمرکز مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در جهات شمال و جنوب (شکل ۵ الف) شهر رشت بیشترین سطوح نفوذناپذیر شهری در فاصله ۴۰۰۰ متری جنوب و ۵۰۰۰ متری شمال قرار دارد. روند نزولی که از مرکز تا ۱۰۰۰ متری به سمت جنوب وجود دارد مربوط به پارک‌های شهری است که مدل مارکوف در پیش‌بینی، آن‌ها را به سطوح نفوذناپذیر تبدیل کرده است. البته باید توجه داشت که تغییرات این نوع کاربری‌ها بستگی به تصمیم‌گیری‌های کارشناسی در شهرداری داشته و احتمال دارد که با پیش‌بینی صورت گرفته مغایرت داشته باشد. سطوح نفوذناپذیر شهری در جهات شرق و غرب (شکل ۵ ب) نیز حاکی از بیشترین اراضی ساخته شده در فاصله ۶۰۰۰ متری از هر دو جهت است. شکل این نمودار نشان می‌دهد که میزان سطوح نفوذناپذیر در هر دو جهت شرق و غرب به صورت نزولی و تغییرات آن در سال‌های مختلف به صورت همگن نمود پیدا کرده است. سطوح نفوذناپذیر در جهات شمال شرق و جنوب غرب (شکل ۵ ج) بسیار ناهمگن و روند تغییرات آن نیز به صورت کامل نزولی نبوده است. همچنین تغییرات سطوح نفوذناپذیر شهری در فاصله‌های ۵۰۰۰ متری در شمال شرق تا ۷۰۰۰ متری در جنوب غرب متفاوت است. از شمال غرب به سمت جنوب شرق (شکل ۵ د) روند تغییرات سطوح نفوذناپذیر تا حدودی یکسان و فاصله

سطوح نفوذناپذیر نسبت به مرکز، بین فاصله ۴۰۰۰ متری در شمال غرب و ۵۰۰۰ متری در جنوب شرق قرار داشته است. به‌طور کلی می‌توان گفت که بیشترین سطوح نفوذناپذیری شهری به‌طور میانگین در فاصله‌های ۵۰۰۰ متری از مرکز شهر قرار گرفته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت علاوه بر رشد پراکنده‌ای که در حاشیه شهر اتفاق افتاده است، افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری که در فاصله کمی از مرکز شهر قرار گرفته‌اند می‌تواند به‌عنوان یک فاکتور مهم در افزایش شدت جزیره حرارتی شهر باشد.

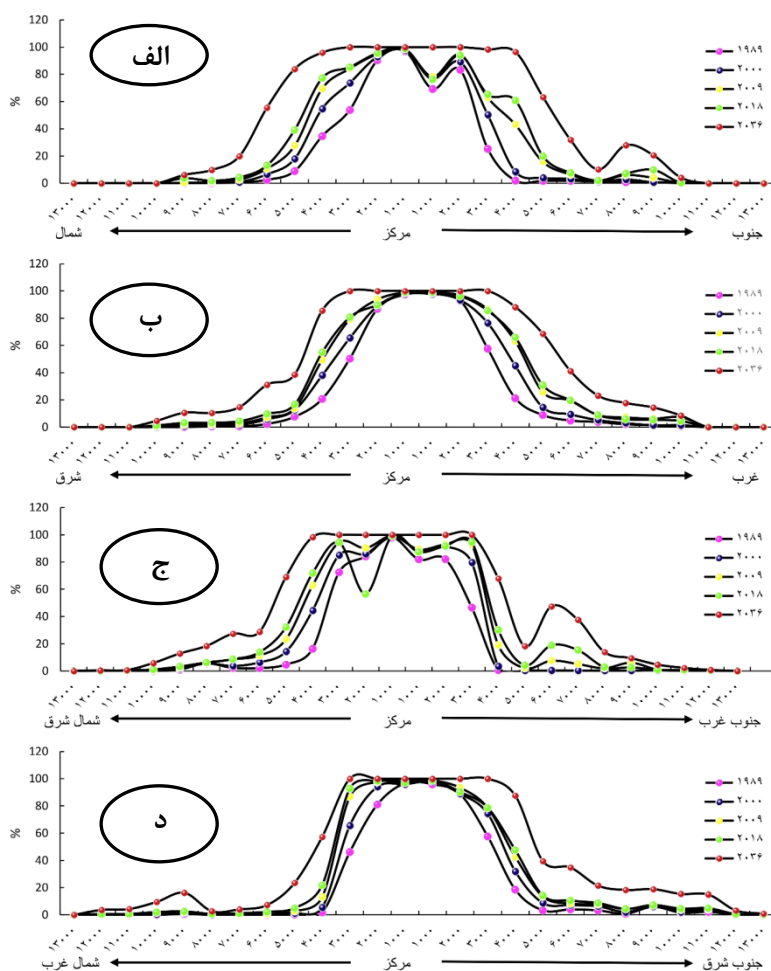
مسئله تغییرات جمعیت یکی از مهم‌ترین عواملی است که در افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری مؤثر است و باید در تفسیر نتایج به آن پرداخته شود. رشد جمعیت در شهر رشت در سال ۱۳۶۵ بالغ بر ۲۹۰۰۰۰ بوده است و این رشد جمعیتی همچنان ادامه داشته است و در سال ۱۳۸۵ به بیش از ۵۵۰۰۰۰ هزار نفر و در انتها در سال ۱۳۹۵ به بیش از ۸۵۰۰۰۰ نفر رسیده است. این رشد جمعیت به‌نوبه خود یکی از عوامل مؤثر در افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری در پی نیاز به ساختمان‌های مسکونی، شبکه حمل‌ونقل و ... بوده است. همان‌طور که در نتایج نشان داده است افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری در حاشیه شهری نیز اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده یک رشد اسپرال یا پراکنده شهری است. این رشد پراکنده در نتیجه اسکان‌های غیررسمی جمعیت، با حدود ۱۵ درصد جمعیت کل، در حاشیه شهری است که بیشتر آن‌ها اقشار با درآمد کم جمعیتی هستند و باعث تبدیل باغ‌های لبه شهری و زمین‌های شالیزار به سطوح نفوذناپذیر شهری شده‌اند (خاکپور و همکاران، ۱۳۹۵). مسئله بعدی در افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری ادغام روستاهای حاشیه‌ای در محدوده خدماتی شهر هستند که در پی اضافه شدن روستاهای اطراف باعث گسترش مساحت محدوده شهری و در پی آن رشد پراکنده شهری شده‌اند و بیشترین میزان اضافه شدن آن‌ها در بخش‌های جنوبی بوده است که با نتایج این مطالعه نیز همخوانی دارد (خاکپور و همکاران، ۱۳۹۵).

برآورد دمای سطح منطقه و ارتباط آن سطوح

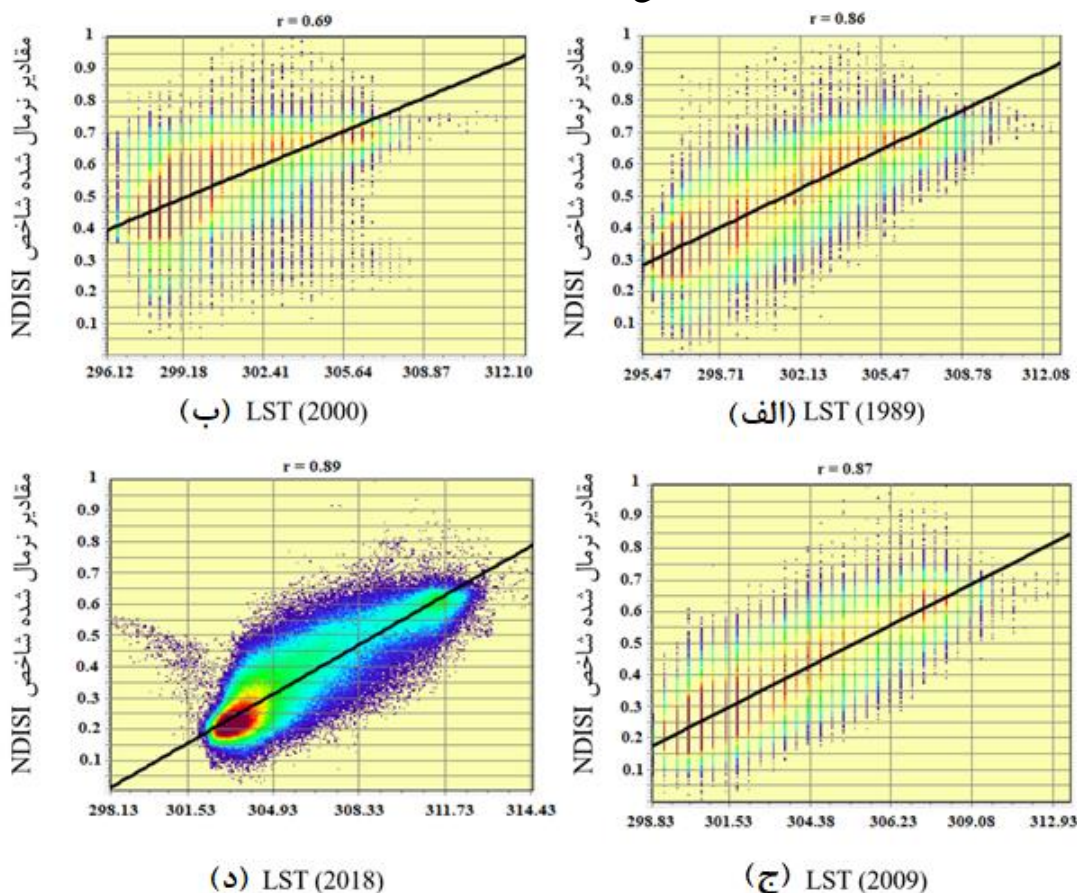
نفوذناپذیر شهری

هستند و در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود میزان همبستگی بین ۰/۶۹ تا ۰/۸۹ متغیر است و بیشترین میزان همبستگی برای سال ۲۰۱۸ و کمترین میزان همبستگی برای سال ۲۰۰۰ است. به صورت کلی نتایج این همبستگی‌ها حاکی از رابطه مستقیم، نسبتاً قوی و معنی‌دار بین سطوح نفوذناپذیر شهری و دمای سطح زمین است. با توجه به همبستگی بالا بین سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین و پیش‌بینی اراضی ساخته شده با استفاده از مدل مارکوف می‌توان نتیجه گرفت که اختلافات دمایی بین مقدار کمینه و بیشینه کمتر می‌شود و همچنین باعث افزایش میانگین دمایی خواهد شد. به منظور بررسی دقیق‌تر این نتیجه نیاز به بررسی شدت جزیره حرارتی و نمایش تغییرات زمانی و مکانی آن است که در ادامه به بررسی آن پرداخته شده است.

نقشه دمایی سطح منطقه با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد و ارتباط آن با سطوح نفوذناپذیر شهری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۶ و روی محور X ها مشاهده می‌شود، مقدار کمینه و بیشینه دما، با توجه به اینکه کاربری‌های مختلف در منطقه وجود دارد، متفاوت است. نتایج تغییرات دمایی در سطح منطقه نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف دمایی مربوط به سال ۱۹۸۹ (شکل ۶ الف) بوده (۱۷/۴۸) که با افزایش سال‌ها، میزان اختلاف دمایی کمینه و بیشینه (شکل ۶ د) در تصاویر کمتر شده است (۱۶/۳). این تغییرات می‌تواند ناشی از افزایش سطوح نفوذناپذیری شهری و کاهش پوشش گیاهی باشد. برای بررسی دقیق روند تغییرات زمانی و مکانی دمای سطح و مقایسه آن با سطوح نفوذناپذیر شهری، نتایج همبستگی بین سطوح نفوذناپذیر شهری و دمای سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن‌ها در سطح $P \leq 0.01$ معنادار



شکل ۵- تغییرات سطوح نفوذناپذیر در جهات مختلف جغرافیایی

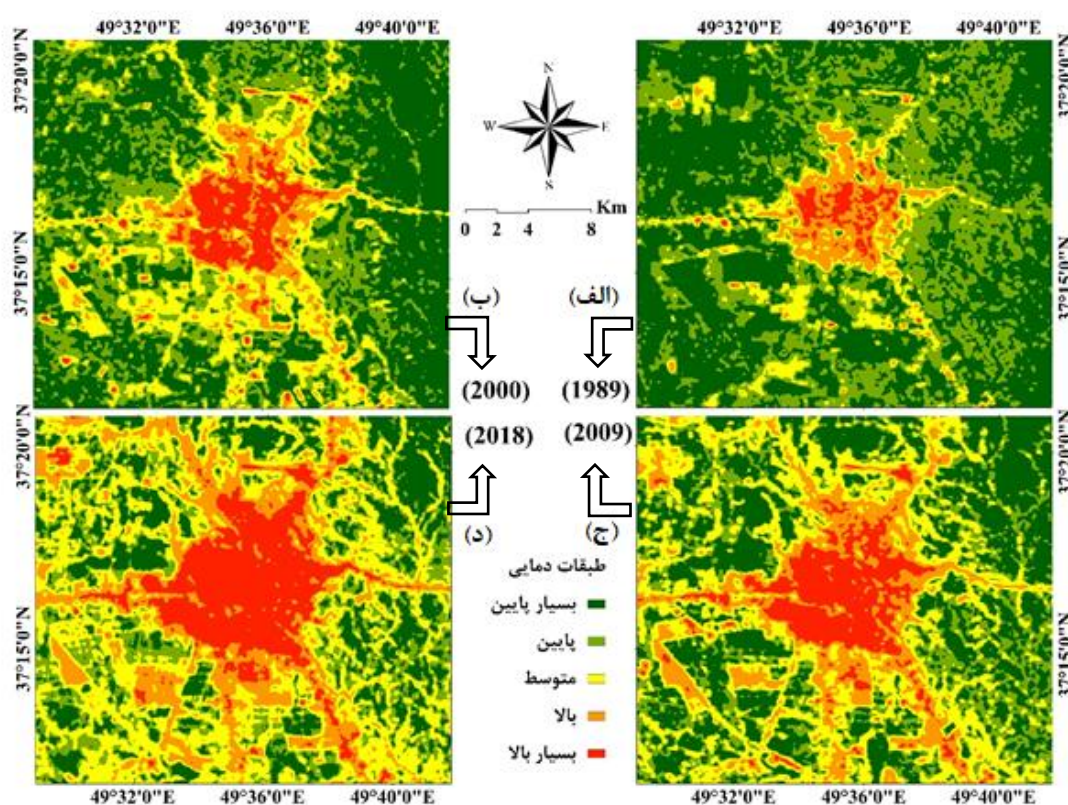


شکل ۶- نتایج همبستگی بین دمای سطح زمین و سطوح نفوذناپذیر شهری ($P \leq 0.01$)

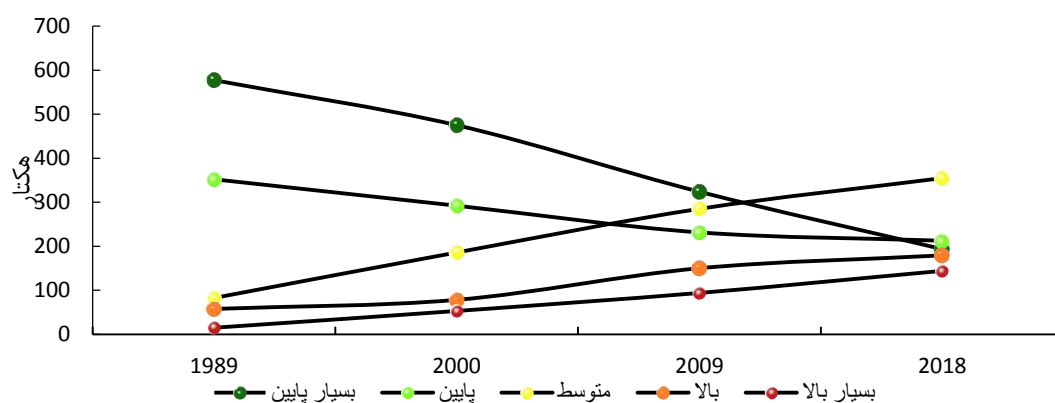
تغییرات مکانی و زمانی شدت جزیره حرارتی

جزیره حرارتی شهری که معمولاً در غالب شهرها مشاهده می‌شود بدین صورت است که همواره مراکز شهری از دمای بالاتری نسبت به حاشیه شهرها برخوردار است. یکی از عوامل مهم در این افزایش حرارت، تراکم سطوح نفوذناپذیر شهری در مرکز شهر است. برای بررسی شدت جزیره حرارتی، مقادیر حداکثر و حداقل دما در بازه بین ۰ و ۱۰ نرمال شده‌اند و سپس با استفاده از جدول ۳ و محاسبه پارامترهای مربوطه نقشه کلاس‌های دمایی تهیه شد. نقشه طبقات دمایی در شکل ۷ نشان داده شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات طبقات دمایی، میزان مساحت هر یک از کلاس‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. تغییرات کلاس‌های مختلف دمایی و به‌ویژه دو کلاس دمایی بالا و بسیار بالا متأثر از سطح نفوذناپذیر شهری است زیرا طبقات دمایی بالا و بسیار بالا منطبق با این سطوح هستند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود کلاس دمایی بالا و بسیار بالا متناسب با رشد سطوح نفوذناپذیر شهری افزایش پیدا کرده‌اند و بلعکس کلاس‌های دمایی پایین و بسیار پایین روند نزولی داشته‌اند.



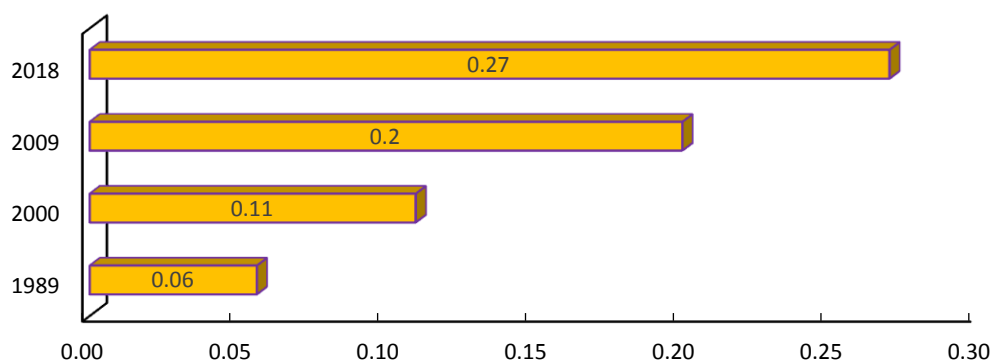
شکل ۷- تغییرات طبقات مکانی-زمانی دمایی از سال ۱۹۸۹ تا سال ۲۰۱۸



شکل ۸- تغییرات مساحت طبقات دمایی

زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ در شکل ۹ نشان می‌دهد که شدت جزیره حرارتی در این بازه ۲۹ ساله روند روبه رشدی داشته و مقدار آن از ۰/۰۶ به ۰/۲۷ رسیده است.

الگوی شدت جزیره حرارتی و اثرات سطوح نفوذناپذیر شهری بر روند شدت جزیره حرارتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مربوط شدت جزیره حرارتی در بازه



شکل ۹- تغییرات شدت جزیره حرارتی

نتیجه‌گیری

داشته‌اند در مرکز شهر تمرکز داشته‌اند که با کلاس سطوح نفوذناپذیر شهری انطباق دارند. همچنین تغییرات مربوط به شدت جزیره حرارتی نشان داده که کلاس‌های دمایی با میانگین کم کاهش داشته و بلعکس کلاس‌های دمایی با میانگین بالا رشد داشته‌اند. این نتایج تأییدی بر رشد و افزایش شدت جزیره حرارتی بوده‌اند که در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۱۸ از ۰/۰۶ به ۰/۲۷ رسیده است. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش سطح نفوذناپذیر شهری باعث افزایش شدت جزیره حرارتی شده است. با این حال در مطالعات آتی تأکید بر سایر کاربری‌ها برای بررسی دقیق‌تر این مطالعه نیز ضروری است و از طرف دیگر پیش‌بینی شدت جزیره حرارتی برای سال‌های آتی به‌منظور مقایسه با نتایج مدل مارکوف ضروری است. در نهایت توجه به پارامترهای مربوط به تراکم جمعیت، خصوصیات بیوفیزیکی و توجه به ریخت‌شناسی و مورفولوژی شهری که اثرات متفاوتی بر جزایر حرارتی می‌توانند داشته باشند نیز می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرند.

منابع

استفاده از سری‌های زمانی تصاویر لندست راهی مناسب برای یافتن تغییرات پدیده‌های طبیعی و انسانی و پیش‌بینی آینده است. تحلیل روند تغییرات سطوح نفوذناپذیر شهری و روند حرارتی شهر رشت، حاکی از رشد سطوح نفوذناپذیر و بالطبع افزایش جزیره حرارتی بوده است. بررسی دقیق شدت جزیره حرارتی که یکی از عوامل مؤثر بر آن سطوح نفوذناپذیر شهری است وابستگی زیادی به طبقه‌بندی و روش‌های استخراج سطوح نفوذناپذیر دارد. نتایج ارزیابی شاخص‌ها و مدل‌های بکار گرفته‌شده در این تحقیق، حاکی از دقت‌های بالا برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی سطوح نفوذناپذیر شهری بوده است. نتایج همبستگی بین سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین نشان‌دهنده همبستگی نسبتاً قوی، مثبت و معنادار بین این دو پارامتر بوده است. تجزیه و تحلیل تغییرات شدت جزیره حرارتی و سطوح نفوذناپذیر شهری نشان داده است که در سال‌های اولیه که مقدار سطوح نفوذناپذیر مساحت کمتری داشته است، اختلاف دمایی در تصاویر بیشتر بوده و با افزایش سطوح نفوذناپذیر اختلافات دمایی در تصویر کاهش داشته است. از طرف دیگر طبقات دمایی که دمای بالاتری از میانگین

1. Alavi Moghadam, M. R., Mokhtarani, N., Mokhtarani, B., (2009), Municipal Solid Waste Management In Rasht City, Iran. Waste Management, 29, 485-489.
2. Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A. Alavipanah, S. K., (2009), Spatial-

- Temporal Dynamics Of Land Surface Temperature In Relation To Fractional Vegetation Cover And Land Use/Cover In The Tabriz Urban Area, Iran. Remote Sensing Of Environment, 113, 2606-2617.
3. Arnold Jr, C. L. Gibbons, C. J., (1996), Impervious Surface Coverage: The

- Emergence Of A Key Environmental Indicator. *Journal Of The American Planning Association*, 62, 243-258.
4. Barata, M., Ligeti, E., De Simone, G., Dickinson, T., Jack, D., Penney, J., Rahman, M., Zimmerman, R., (2011), Climate Change And Human Health In Cities. *Climate Change And Cities: First Assessment Report Of The Urban Climate Change Research Network*, 179-213.
 5. Blake, R., Grimm, A., Ichinose, T., Horton, R., Gaffin, S., Jiong, S., Bader, D. Cecil, L., (2011), Urban Climate: Processes, Trends, And Projections. *Climate Change And Cities: First Assessment Report Of The Urban Climate Change Research Network*, 43-81.
 6. Braun, M. Herold, M., (2004), Mapping Imperviousness Using Ndvi And Linear Spectral Unmixing Of Aster Data In The Cologne-Bonn Region (Germany). *Remote Sensing For Environmental Monitoring ,Gis Applications, And Geology Iii, International Society For Optics And Photonics*, 274-285.
 7. Chakraborty, S. D., Kant, Y. Mitra, D., (2015), Assessment Of Land Surface Temperature And Heat Fluxes Over Delhi Using Remote Sensing Data. *Journal Of Environmental Management*, 148, 143-152.
 8. Chander, G., Markham, B. L. Helder, D. L., (2009), Summary Of Current Radiometric Calibration Coefficients For Landsat Mss, Tm, Etm+, And Eo-1 Ali Sensors. *Remote Sensing Of Environment*, 113, 893-903.
 9. Congalton, R. G., (1991), A Review Of Assessing The Accuracy Of Classifications Of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing Of Environment*, 37, 35-46.
 10. Du, Z., Li, W., Zhou, D., Tian, L., Ling, F., Wang, H., Gui, Y. Sun, B., (2014), Analysis Of Landsat-8 Oli Imagery For Land Surface Water Mapping. *Remote Sensing Letters*, 5, 672-681.
 11. Estoque, R. C. Murayama, Y., (2013), Landscape Pattern And Ecosystem Service Value Changes: Implications For Environmental Sustainability Planning For The Rapidly Urbanizing Summer Capital Of The Philippines. *Landscape And Urban Planning*, 116, 60-72.
 12. Estoque, R. C. Murayama, Y., (2015), Classification And Change Detection Of Built-Up Lands From Landsat-7 Etm+ And Landsat-8 Oli/Tirs Imageries: A Comparative Assessment Of Various Spectral Indices. *Ecological Indicators*, 56, 205-217.
 13. Ezimand, K., Chahardoli, M., Azadbakht, M., & Matkan, A. A. (2021) Spatiotemporal analysis of land surface temperature using multi-temporal and multi-sensor image fusion techniques. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102508.
 14. Ezimand, K., Kakroodi, A. A. Kiavarz, M., (2018), The Development Of Spectral Indices For Detecting Built-Up Land Areas And Their Relationship With Land-Surface Temperature. *International Journal Of Remote Sensing*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1488282>
 15. Fan, F., Wang, Y. Wang, Z., (2008), Temporal And Spatial Change Detecting (1998–2003) And Predicting Of Land Use And Land Cover In Core Corridor Of Pearl River Delta (China) By Using Tm And Etm+ Images. *Environmental Monitoring And Assessment*, 137, 127-147.
 16. Firozjaei, M. K., Kiavarz, M., Alavipanah, S. K., Lakes, T. Qureshi, S., (2018), Monitoring And Forecasting Heat Island Intensity Through Multi-Temporal Image Analysis And Cellular Automata-Markov Chain Modelling: A Case Of Babol City, Iran. *Ecological Indicators*, 91, 155-170.
 17. Goward, S. N., Davis, P. E., Fleming, D., Miller, L. Townshend, J. R., (2003), Empirical Comparison Of Landsat 7 And Ikonos Multispectral Measurements For Selected Earth Observation System (Eos) Validation Sites. *Remote Sensing Of Environment*, 88, 80-99.
 18. Haase, D. Nuissl, H., (2007), Does Urban Sprawl Drive Changes In The Water Balance And Policy?: The Case Of Leipzig (Germany) 1870–2003. *Landscape And Urban Planning*, 80, 1-13.
 19. Haashemi, S., Weng, Q., Darvishi, A. Alavipanah, S. K., (2016), Seasonal Variations Of The Surface Urban Heat Island In A Semi-Arid City. *Remote Sensing*, 8, 352-367.
 20. Han-Qiu, X. Ben-Qing, C., (2004), Remote Sensing Of The Urban Heat Island And Its Changes In Xiamen City Of Se China. *Journal Of Environmental Sciences*, 16, 276-281.
 21. Jaeger, J. A. Schwick, C., (2014), Improving The Measurement Of Urban

- Sprawl: Weighted Urban Proliferation (Wup) And Its Application To Switzerland. Ecological Indicators, 38, 294-308.
22. Jensen, J. R., (2009), Remote Sensing Of The Environment: An Earth Resource Perspective 2/E, Pearson Education India.
 23. Jimenez- Muñoz, J. C. Sobrino, J. A., (2003), A Generalized Single- Channel Method For Retrieving Land Surface Temperature From Remote Sensing Data. Journal Of Geophysical Research: Atmospheres, 108.
 24. Khakpoor, B.A., Rastgar, M., Vaisi, R., Mirjafari, R., & Ahmadi, S. (2016). Spatial analysis of factors affecting the unbalanced physical growth of Rasht city using geographic information system (GIS). Journal of Geography and Urban Space Development, 3 (1), 1-16.
 25. Kloog, I., Chudnovsky, A., Koutrakis, P. Schwartz, J., (2012), Temporal And Spatial Assessments Of Minimum Air Temperature Using Satellite Surface Temperature Measurements In Massachusetts, Usa. Science Of The Total Environment, 432, 85-92.
 26. Liao, P.-S., Chen, T.-S. Chung, P.-C., (2001), A Fast Algorithm For Multilevel Thresholding. J. Inf. Sci. Eng., 17, 713-727.
 27. Lillesand, T., Kiefer, R. W. Chipman, J., (2014), Remote Sensing And Image Interpretation, John Wiley Sons.
 28. Liu, L. Zhang, Y., (2011), Urban Heat Island Analysis Using The Landsat Tm Data And Aster Data: A Case Study In Hong Kong. Remote Sensing, 3, 1535-1552.
 29. Markham, B. L. Helder, D. L., (2012), Forty-Year Calibrated Record Of Earth-Reflected Radiance From Landsat: A Review. Remote Sensing Of Environment, 122, 30-40.
 30. Mather, P. M. Koch, M., (2011), Computer Processing Of Remotely-Sensed Images: An Introduction, John Wiley Sons.
 31. Matkan, A., Nohegar, A., Mirbagheri, B., Torkchin, N. (2014). Assessment relations of land use in heat islands using time series ASTER sensor data (Case study: Bandar Abbas city). Journal of RS and GIS for Natural Resources, 5(4), 1-14.
 32. McCoy, R. M., (2005), Field Methods In Remote Sensing, Guilford Press.
 33. Mchugh, M. L., (2012), Interrater Reliability: The Kappa Statistic. Biochemia Medica: Biochemia Medica, 22, 276-282.
 34. Mitsova, D., Shuster, W. Wang, X., (2011), A Cellular Automata Model Of Land Cover Change To Integrate Urban Growth With Open Space Conservation. Landscape And Urban Planning, 99, 141-153.
 35. Morabito, M., Crisci, A., Gioli, B., Gualtieri, G., Toscano, P., Di Stefano, V., Orlandini, S. Gensini, G. F., (2015), Urban-Hazard Risk Analysis: Mapping Of Heat-Related Risks In The Elderly In Major Italian Cities. Plos One, 10, E0127277.
 36. Morabito, M., Crisci, A., Messeri, A., Orlandini, S., Raschi, A., Maracchi, G. Munafò, M., (2016), The Impact Of Built-Up Surfaces On Land Surface Temperatures In Italian Urban Areas. Science Of The Total Environment, 551, 317-326.
 37. Mushore, T. D., Odindi, J., Dube, T., Matongera, T. N. Mutanga, O., (2017), Remote Sensing Applications In Monitoring Urban Growth Impacts On In-And-Out Door Thermal Conditions: A Review. Remote Sensing Applications: Society And Environment, 8, 83-93.
 38. Poelmans, L. Van Rompaey, A., (2009), Detecting And Modelling Spatial Patterns Of Urban Sprawl In Highly Fragmented Areas: A Case Study In The Flanders-Brussels Region. Landscape And Urban Planning, 93, 10-19.
 39. Pontius, R. G., (2000), Quantification Error Versus Location Error In Comparison Of Categorical Maps. Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, 66, 1011-1016.
 40. Qin, Z., Karnieli, A. Berliner, P., (2001), A Mono-Window Algorithm For Retrieving Land Surface Temperature From Landsat Tm Data And Its Application To The Israel-Egypt Border Region. International Journal Of Remote Sensing, 22, 3719-3746.
 41. Rajitha, K., Mukherjee, C., Vinu Chandran, R. Prakash Mohan, M., (2010), Land-Cover Change Dynamics And Coastal Aquaculture Development: A Case Study In The East Godavari Delta, Andhra Pradesh, India Using Multi-Temporal Satellite Data . International Journal Of Remote Sensing, 31, 4423-4442.

42. Rashmi, M. Lele, N., (2010), Spatial Modeling And Validation Of Forest Cover Change In Kanakapura Region Using Geomod. *Journal Of The Indian Society Of Remote Sensing*, 38, 45-54.
43. Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Hammer, S. A. Mehrotra, S., (2011), *Climate Change And Cities: First Assessment Report Of The Urban Climate Change Research Network*, Cambridge University Press.
44. SadeghiniaA., AlijaniB., & ZeaieanfiroozabadiP. (2013). Analysis of Spatial - Temporal Structure of the Urban Heat Island in Tehran through Remote Sensing and Geographical Information System. *Geography and environmental hazards*, 1 (4), 1-17.
45. Santamouris, M., (2013), Using Cool Pavements As A Mitigation Strategy To Fight Urban Heat Island—A Review Of The Actual Developments. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.
46. Seto, K. C., Guneralp, B. Hutyr, L. R., (2012), Global Forecasts Of Urban Expansion To 2030 And Direct Impacts On Biodiversity And Carbon Pools. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 109, 16083-16088.
47. Sezgin, M. Sankur, B., (2004), Survey Over Image Thresholding Techniques And Quantitative Performance Evaluation. *Journal Of Electronic Imaging*, 13, 146-166.
48. Shafizadeh-Moghadam, H., Tayyebi, A., Ahmadlou, M., Delavar, M. R. Hasanlou, M., (2017), Integration Of Genetic Algorithm And Multiple Kernel Support Vector Regression For Modeling Urban Growth. *Computers, Environment And Urban Systems*, 65, 28-40.
49. Shakiba, A., Firoozabadi, P., Ashourloo, D., Namdari, S., (2009), Analysis Of Relationship Between Land Use/Cover And Urban Heat Island, Using ETM+, *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 1(1), 39-56.
50. Shen, H., Huang, L., Zhang, L., Wu, P. Zeng, C., (2016), Long-Term And Fine-Scale Satellite Monitoring Of The Urban Heat Island Effect By The Fusion Of Multi-Temporal And Multi-Sensor Remote Sensed Data: A 26-Year Case Study Of The City Of Wuhan In China. *Remote Sensing Of Environment*, 172, 109-125.
51. Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C. Paolini, L., (2004), Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Tm. *Remote Sensing Of Environment*, 90, 434-440.
52. Sutton, P. C., Anderson, S. J., Elvidge, C. D., Tuttle, B. T. Ghosh, T., (2009), Paving The Planet: Impervious Surface As Proxy Measure Of The Human Ecological Footprint. *Progress In Physical Geography*, 33, 510-527.
53. Thanapura, P., Helder, D. L., Burckhard, S., Warmath, E., O'Neill, M. Galster, D., (2007), Mapping Urban Land Cover Using Quickbird Ndvi And Gis Spatial Modeling For Runoff Coefficient Determination. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 73, pp.57-65.
54. Un, (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision-Highlights*, Un.
55. Walawender, J. P., Szymanowski, M., Hajto, M. J. Bokwa, A., (2014), Land Surface Temperature Patterns In The Urban Agglomeration Of Krakow (Poland) Derived From Landsat-7/Etm+Data. *Pure And Applied Geophysics*, 171, 913-940.
56. Weng, Q., (2012), Remote Sensing Of Impervious Surfaces In The Urban Areas: Requirements, Methods, And Trends. *Remote Sensing Of Environment*, 117, 34-49.
57. Wu, Q., Li, H.-Q., Wang, R.-S., Paulussen, J., He, Y., Wang, M., Wang, B.-H. Wang, Z., (2006), Monitoring And Predicting Land Use Change In Beijing Using Remote Sensing And Gis. *Landscape And Urban Planning*, 78, 322-333.
58. Xu, H., (2010). Analysis Of Impervious Surface And Its Impact On Urban Heat Environment Using The Normalized Difference Impervious Surface Index (Ndisi). *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 76, 557-565.
59. Xu, H., Chen, Y., Dan, S. Qiu, W., (2011), Spatial And Temporal Analysis Of Urban Heat Island Effects In Chengdu City By Remote Sensing. *Geoinformatics*, 2011 19th International Conference On, 1-5.
60. Xu, H., Huang, S. Zhang, T., (2013), Built-Up Land Mapping Capabilities Of The Aster And Landsat Etm+ Sensors In Coastal Areas Of Southeastern China. *Advances In Space Research*, 52, 1437-1449.
61. Xunqiang, M., Chen, C., Fuqun, Z. Hongyuan, L. Study On Temporal And

- Spatial Variation Of The Urban Heat Island Based On Landsat Tm/Etm+ In Central City And Binhai New Area Of Tianjin. Multimedia Technology (Icmt), (2011) International Conference On, 2011. Ieee, 4616-4622.
62. Yang, X., Zheng, X.-Q. Lv, L.-N., (2012), A Spatiotemporal Model Of Land Use Change Based On Ant Colony Optimization, Markov Chain And Cellular Automata. Ecological Modelling, 233, 11-19.
63. Yu, B. Y., Elbukem, C., Ren, C. L. Huissoon, J. P., (2011), Image Processing And Classification Algorithm For Yeast Cell Morphology In A Microfluidic Chip. Journal Of Biomedical Optics, 16, 066008.
64. Yue, W. Xu, L., (2013), Thermal Environment Effect Of Urban Water Landscape. Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica, 33, 1852-1859.
65. Zullo, F., Fazio, G., Romano, B., Marucci, A. Fiorini, L., (2019), Effects Of Urban Growth Spatial Pattern (Ugsp) On The Land Surface Temperature (Lst): A Study In The Po Valley (Italy). Science Of The Total Environment, 650, 1740-1751.