

# تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک با پردازش تصاویر ماهواره‌ای و GIS

امیرحسین حلییان<sup>۱</sup>

نادر پروین<sup>۲</sup>

رویا نقیب زاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲

\*\*\*\*\*

## چکیده

امروزه افزایش درجه حرارت برخی از مناطق پرجمعیت شهری در مقایسه با محدوده روستایی اطراف، پدیده‌ای تحت عنوان جزیره گرمایی شهری را به وجود آورده و موجب بروز مشکلات فراوانی شده است. جزیره حرارتی شهری، سطحی از شهر است که به میزان قابل توجهی از مناطق روستایی اطراف گرم‌تر است. بدین منظور، ابتدا ۸ تصویر ماهواره‌ای دوره گرم سال شهر اراک، طی بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های سنجنده‌های (TM) لندست‌های ۴ و ۵، (ETM+) لندست ۷، (OLI/TIRS) لندست ۸ جمع‌آوری و استخراج گردید. بعد از پیش‌پردازش‌های لازم، شاخص‌های تفاضل پوشش گیاهی نرمال (NDVI)، دمای سطح زمین (LST) و شاخص پراکندگی عرصه حرارتی شهر با ارزیابی اکولوژیکی (UTFVI) محاسبه گردید. الگوریتم مورد استفاده برای استخراج درجه حرارت سطح زمین، الگوریتم تک پنجره (Mono\_Window) می‌باشد که گسیلمندی آن با استفاده از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به دست آمد. براساس نتایج حاصل از پردازش تصاویر، مکان‌های دارای جزیره حرارتی، چگونگی تغییرات دمایی شهر، ارتباط بین تغییرات دمای سطح زمین با پوشش سطحی بررسی و تحلیل گردید تا جزایر حرارتی شهری اراک شناسایی و تحلیل شوند. نتایج به‌کارگیری شاخص‌های (NDVI) و (LST) نشان داد که، بیشترین نمود جزایر حرارتی، در مناطق با کاربری صنعتی، مکان‌های پرتراکم و دارای آلودگی شدید هوا و تراکم بالای جمعیت، مناطق با پوشش گیاهی ضعیف، مناطق دارای بافت فشرده و فرسوده مشاهده گردید. تحلیل نقشه‌های دمایی نیز مشخص کرد که، کاربری‌های مسکونی به سرعت پیشرفت نموده‌اند و همچنین کاربری‌های صنعتی در حاشیه‌های شهر به‌ویژه در منطقه یک شهرداری باعث افزایش دما در آن مناطق شده است. تغییرات مقیاس زمانی الگوهای دمایی اراک نشان داد که، از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ در منطقه یک شهرداری (شرق و شمال‌شرقی اراک) حدود ۴/۳ درصد بر مساحت طبقه چهارم دمایی (۴۱ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد) افزوده شده و الگوهای حرارتی در منطقه مذکور بیشترین شدت دمایی را داشته است. در منطقه دو و سه شهرداری که جزء بافت قدیمی و با تراکم شدید کاربری‌های مسکونی مشخص و از نظر پوشش گیاهی فقیر هست نیز باعث تجمع دماهای نسبتاً بالا در این مناطق شده است. در منطقه چهار و پنج به دلیل وجود پوشش گیاهی انبوه، میزان تجمع جزایر حرارتی کم بوده و همواره دمای پایین‌تر ثبت داشته است. در حاشیه‌های شهری به دلیل کمربند شمالی و ترافیک و تردد ماشین‌های سنگین، جزایر حرارتی به صورت نواری تشکیل شده است. توسعه کاربری شهری در طول دوره مورد مطالعه، بسیار محسوس بوده است. به طوری که از سال ۲۰۰۲ به بعد، شاهد افزایش دما و کاهش مساحت پوشش گیاهی در سطح وسیعی از شهر اراک بودیم. براساس نتایج حاصل از شاخص (UTFVI)، در حاشیه‌های شهر، به علت وجود تجمع جزایر حرارتی، وضعیت دمای بحرانی آزاردهنده حاکم است. اما در مکان‌های با پوشش گیاهی و تعدیل دما، به‌ویژه منطقه ۴ و ۵ وضعیت بحرانی اندکی، حاکم بوده است.

واژه‌های کلیدی: جزایر حرارتی شهری (UHI)، لندست (Landsat)، شاخص‌های (LST)، (NDVI)، (UTFVI)، اراک.

\*\*\*\*\*

۱- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران halabian\_a@yahoo.com

۲- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران naderpn1353@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه پیام نور (نویسنده مسئول) roya.naghizade@gmail.com

## ۱- مقدمه

صادق‌نیا و همکاران (۱۳۹۲: ۱۵)، در تحقیقی با موضوع کاربرد فن‌های خودهمبستگی فضایی در تحلیل جزیره حرارتی شهر تهران، نشان دادند که بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ به علت از بین رفتن نیمی از پوشش گیاهی نواحی غرب و جنوب‌غربی تهران (مناطق ۲۲ و ۲۱ و ۱۹ و ۱۸) خوشه‌های خنک مستقر بر این نواحی کوچک یا ناپدید شده‌اند و خوشه‌های داغ جدیدی در این نواحی شکل گرفته‌اند. در نتیجه‌ی این تغییرات جزیره حرارتی که در سال ۱۹۸۶ بر روی فرودگاه مهرآباد (منطقه ۹) و بخش‌هایی از مناطق (۲۱ و ۲۲) حاکم بوده است، در طول این ۲۵ سال به سمت غرب و جنوب‌غرب گسترش یافته و مساحت بیشتری را اشغال کرده است. همچنین هسته‌های حرارتی کوچکی در جنوب و غرب منطقه ۱۹ ظهور یافته است. علاوه بر آن به علت تخریب و نابودی بخش مهمی از باغات مناطق شمال تهران (به‌خصوص شمیرانات) خوشه‌های خنک مستقر در این نواحی تضعیف شده‌اند. در تحقیقی مشابه، حجازی‌زاده و پروین (۱۳۸۸: ۵۴) تغییرات دما و بارش تهران را طی نیم قرن اخیر بررسی کردند و نتیجه گرفتند که دمای سطح شهر تهران افزایش معنی‌داری پیدا کرده است. سلطانی (۱۳۹۵: ۱۳۹) به شناسایی و تحلیل جزیره حرارتی در شهر شیراز با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور پرداخت. براساس نتایج حاصل از آن پژوهش، شاخص (NDVI)<sup>۲</sup> و (LST)<sup>۳</sup> اراضی بایر دارای بالاترین مقادیر دمایی و اراضی با پوشش گیاهی دارای کمترین دما بوده و بیشتر جزیره حرارتی در مناطق دارای اراضی با کاربری صنعتی، مکان‌های پرتراфик دارای آلودگی شدید هوا، اماکن دارای پوشش گیاهی ضعیف، مناطق دارای بافت فشرده و فرسوده مشاهده گردید و نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده توسعه کاربری شهری در طول دوره مطالعه به‌طور بسیار محسوس بوده به‌نحوی که از سال ۲۰۰۰ به بعد رشد بیشتری پیدا نموده است.

واژه جزیره حرارتی برای اولین بار حدود یک قرن قبل و در سال ۱۸۳۳ توسط هاوارد مطرح شد (Seok, 2004). جزیره حرارتی شهری (UHI)<sup>۱</sup> یک منطقه شهری یا کلان‌شهر است که به‌دلیل فعالیت‌های انسانی به‌طور قابل توجهی گرم‌تر از مناطق روستایی اطراف آن است. اختلاف دما معمولاً در شب بیشتر از روز است و بیشتر در هنگام کاهش سرعت باد آشکار می‌شود.

UHI بیشتر در تابستان‌ها و زمستان‌ها ظاهر شده و قابل توجه است. علت اصلی اثر جزیره گرمایی شهری، ایجاد تغییرات سطح زمین است (Solecki & et al, 2005: 39; United States Environmental Protection Agency, 2008: 7). پس از آن پژوهش‌های متعددی در خصوص شهرهای بزرگ و صنعتی جهان انجام گرفت که نتایج آن‌ها بیانگر این است که شهرنشینی موجب ایجاد تغییرات فراوان بر روی پارامترهای هواشناسی و ویژگی‌های سطح زمین شده و به‌تبع آن تغییرات زیادی در وضع هوا و اقلیم محلی به‌وجود آورده است (Atwater, 1974: 1069; Chanon, 1981: 89; Katen and Courier, 1995: 191; Bike and Chan, 1997: 475; Tomanov et al, 1999: 4180). در بررسی جزیره حرارتی شهر مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نظریه فرکتال دریافتند با توجه به نقشه اراضی کاربری زمین مناطق مسکونی در سال ۲۰۰۰ نسبت به سال ۱۹۹۲ توسعه یافته و بسیاری از پوشش‌های گیاهی از بین رفته و این مطلب توسط بعد فرکتالی محاسبه شده نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

نتایج حاصل از تحقیق موسوی بایگی و همکاران (۱۳۹۱: ۴۵) نشان داد که نیم‌رخ شمال‌غربی - جنوب شرقی به علت گسترش بیشتر شهر و عدم یکنواختی سطوح، نسبت به سایر نیم‌رخ‌ها بعد فرکتالی بیشتری دارد. همچنین دمای تابشی سطح مشهد به‌طور کلی در طی دهه ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ افزایش داشته است و این افزایش در مناطق مسکونی چشم‌گیرتر است.

2- Normalized Difference Vegetation Index

3- Land Surface Temperature

1- Urban Heat Island

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۳۳

و مقایسه نتیجه شاخص (LST) با شاخص توسعه مناطق مسکونی و شاخص پوشش گیاهی متوجه شدند که پوشش گیاهی سبب تضعیف اثرات جزیره حرارتی و توسعه مناطق مسکونی سبب گسترش جزیره گرمایی می‌شود، در نتیجه توجه فضای سبز می‌تواند در برنامه‌ریزی آینده شهر در دستور کار قرار گیرد.

مطالعه‌ای که با استفاده از شاخص دمای سطح زمین، توسط (Walawender & et al, 2014: 103) بر روی مناطق گرم و سرد شهر کراکوف لهستان انجام شد حاکی از آن بود که، در پیدایش جزایر حرارتی، نقش تراکم شهری و انتشار گرما به وسیله انسان، شکل ساختمان‌ها و تغییرات فصلی بسیار اساسی و تعیین‌کننده بوده است.

(Huang & Lu, 2015: 8787) شواهدی از تأثیر قابل توجه جزیره حرارتی شهری (UHI) بر گرم شدن آب و هوا بر اساس تجزیه و تحلیل تأثیرات نرخ شهرنشینی، جمعیت شهری و تغییرات کاربری زمین بر میزان گرم شدن متوسط روزانه، حداقل (شبانه) و حداکثر در مناطق ساخته شده دلتای رودخانه یانگ تسه هندوستان را ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که، همبستگی مثبت و معناداری بین میزان شهرنشینی، جمعیت، منطقه ساخته شده و میزان گرم شدن میانگین دمای هوا مشاهده می‌شود. میانگین نرخ گرم شدن متوسط دمای هوا قابل انتساب به شهرنشینی در تراکم شهری دلتای رودخانه یانگ تسه  $0.074 \pm 0.074$  درجه سانتی‌گراد در هر دهه است و شهرنشینی تأثیر قابل اندازه‌گیری در گرم شدن آب و هوای مشاهده شده در دلتای رودخانه یانگ تسه و تشدید گرم شدن آب و هوای جهانی دارد.

(Song & Wu, 2016: 107) در ایالت ویسکانسین آمریکا به بررسی تأثیر ترکیبی و فیزیکی شهری پرداختند که نتیجه کلی آنان نشان از، نقش بی‌چون و چرای سطوح غیرقابل نفوذ در پیدایش تنوع جزایر حرارتی در مناطق شهری بود.

کار مطالعاتی (Theeuwes & et al, 2017: 451) بر روی بررسی جنبه‌های مکانی و زمانی اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) در طی روزانه و فصلی شهر کانپور نشان داد که،

علیجانی و همکاران (۱۳۹۶: ۱۱۰) به محاسبه شدت جزیره حرارتی براساس هندسه شهری از معادله عددی - نظری در محله کوچه‌باغ شهر تبریز پرداختند. نتایج آن پژوهش نشان داد که هرچه بناها بلندمرتبه‌تر و عرض معابر کمتر باشد میزان شدت جزیره حرارتی بیشتر و هر قدر عکس این شرایط حاکم باشد، مقدار گرما نیز کمتر خواهد بود.

(Sin, 2004: 504-516 & Chan) بر روی جزایر گرمایی شهری بناگ<sup>۱</sup> در اجلاس جهانی بنگی محیط‌زیست مالزی، با اشاره به مطالعاتشان در طول دوره مرطوب و خشک به این نکته اشاره نمودند که جذب گرما در سطوح شهری بیشتر از اطراف آن هست و با استفاده زیاد مصرف انرژی در ساختمان‌ها توسط انسان می‌توان این گرما را افزایش داد و این افزایش دما در روز باعث شده است که شهرهایی مثل کوالالامپور و جورج تاون داغ‌تر از حومه آن باشد.

(Yuan & et al, 2014: 103) در مقایسه بین شاخص دمای سطح زمین (LST) با شاخص پوشش گیاهی (NDVI) برای پیش و شناسایی جزایر حرارتی شهری با استفاده از ماهواره لندست به مطالعه روابط بین شاخص‌های شناسایی جزایر گرمایی شهر مینی سوتا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بین دمای سطح زمین (LST) و درصد غیرقابل نفوذ (ISA) در تمام فصول سال روابط بسیار قوی وجود دارد به طوری که مقدار خطای استاندارد آن در سطح ۹۵ درصد حدود  $0.07$  بین شاخص‌ها محاسبه گردید، ولی برای شاخص (NDVI) برای شناسایی جزایر گرمایی در فصول سال متفاوت است و باین‌حال برای تجزیه و تحلیل جزایر گرمایی روش‌های بسیار مناسبی هست. در پژوهشی با عنوان تجزیه و تحلیل جزیره حرارتی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره لندست TM بر روی شهر هنگ‌کنگ چنین نتیجه‌گیری شد که، بیشترین تجمع جزیره حرارتی در شمال هنگ‌کنگ، نزدیک فرودگاه بین‌المللی تشکیل شده است.

(Liu & Zhang, 2011: 1535-1552) همچنین در بررسی

جدول ۱: کاربری عمده و مساحت مناطق شهرداری شهر اراک

منطقه شهرداری	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳	منطقه ۴	منطقه ۵
کاربری عمده	صنعتی و ادارات	مسکونی و تجاری	مسکونی و تجاری	فضای سبز و مسکونی	فضای سبز و مسکونی
مساحت (km <sup>2</sup> )	۳۴	۱۵/۹	۱۴/۶	۳/۳	۹/۶
درصد مساحت	۴۳/۹	۲۰/۶	۱۸/۸	۴/۲	۱۲/۴

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

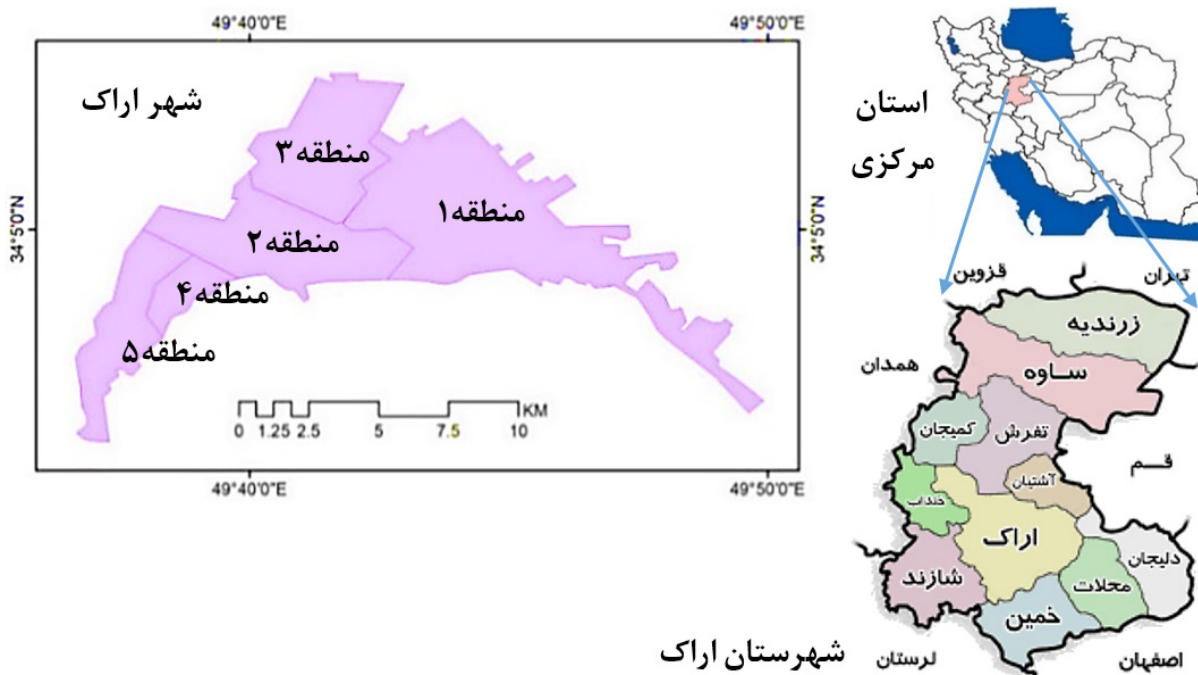
شهر اراک مرکز استان مرکزی است و از طرف شمال با شهرهای آشتیان، تفرش، کميجان و همدان و از طرف غرب با شهرهای خنداب و ملایر و از طرف جنوب با شهرهای شازند و خمین و از شرق با شهرهای دلیجان و محلات همسایه است. شهر صنعتی مذکور در فاصله ۲۸۱ کیلومتری جنوب غربی شهر تهران واقع شده است. براساس مطالعات طرح جامع سال ۱۳۹۰، محدوده شهر اراک شامل ۵ منطقه شهرداری می‌باشد (<https://www.shahrnegar.com>) (جدول ۱).

از نظر مختصات جغرافیایی، این شهر بین ۳۴/۰۳۷۱ تا ۳۴/۱۳۰۹ درجه عرض جغرافیایی شمالی و بین ۴۹/۶۲۴۴ تا ۴۹/۷۸۴۵ درجه طول جغرافیایی شرقی واقع شده و مساحت آن ۷۷/۳ کیلومتر مربع و متوسط ارتفاع آن، ۱۷۵۵ متر از سطح دریاهای آزاد است. اگر خط موربی با جهت شمال غرب - جنوب شرقی از روی اراک ترسیم شود، جغرافیای طبیعی آن را می‌توان به دو بخش متفاوت کوهستانی با آب و هوایی معتدل مایل به سرد در مناطق غرب و جنوب غربی و بخش دشتی آن با میکرواقلیم گرم تر شامل مناطق شمال شرقی و شرق تقسیم بندی کرد (نگاره ۱). از پدیده‌های طبیعی و قابل توجه در اطراف شهر، کویر یا هامون میغان (میقان) است. کوه‌های وفس، خنداب، نسا رشفه و سله بهار با متوسط ارتفاع بالای ۲۶۰۰ متر در بخش شمال غربی تا جنوب غربی شهر، از دیگر عارضه‌های طبیعی اطراف شهر اراک هستند. دو اتوبان پرتدد شمال شهر و جنوب شرقی آن در شرق اراک به هم متصل می‌شوند. مجاورت دو پدیده کوه و دشت، ویژگی‌های میکروکلیمایی خاصی به منطقه

میزان تغییرات مکانی شبانه عمدتاً با اختلاف در شار تابشی موج بلند ورودی شهری و روستایی همراه است و اثر جزیره گرمایی شهری قبل و بعد از فصل مون سون اختلاف معناداری دارد. نتایج حاصل از روش جدید (Chakraborty and Lee, 2019: 277) با استفاده از الگوریتم ساده شهری (SUE)<sup>۱</sup> برای بررسی تخمین شدت جزیره حرارتی سطوح شهری (UHI) با تصاویر مادیس در مقیاس محلی و جهانی نشان داد که، شهرهای دارای آب و هوای خشک الگوهای متمایز روزانه و فصلی را نشان می‌دهند و در سطح جهانی، این تغییر عمدتاً در طول روز (۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد در دهه) مشاهده می‌شود. سرانجام، اهمیت افتراقی پوشش گیاهی بین مناطق شهری و روستایی بر تنوع مکانی - مکانی بررسی شده است. پوشش گیاهی کنترل شدیدی بر تنوع فصلی UHI دارد و همچنین ممکن است تا حدی تنوع طولانی مدت را کنترل کند. در مجموع مطالعات مربوط به جزایر حرارتی نشان می‌دهد که، نقش کاربری‌های شهری و تغییرات محیطی در سطح شبکه شهرها با در نظر گرفتن زمان و فصل سال با استفاده از شاخص‌های شناسایی جزایر گرمایی شهری به ویژه به کمک تصاویر امکان پذیر می‌باشد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف شناخت الگوهای مکانی - زمانی جزایر حرارتی شهری، شهر اراک انجام شده است، لذا نتایج این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌ریزان محیطی، ناحیه‌ای و شهری مفید باشد. از سوی دیگر بررسی تغییرات الگوهای حرارتی به عنوان یک مؤلفه مهم در استراتژی‌ها و راهبردهای مدیریت منابع طبیعی و تغییرات محیطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

1- Simplified Urban-Extent

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
 تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۲۵



نگاره ۱: موقعیت شهر اراک در سطح استان و تقسیمات سیاسی کشور

مختلف جوی صورت گرفته و کوشش شد تصاویری انتخاب شود که هیچگونه عوامل مخل در آن وجود نداشته باشد (جدول ۲). تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های (TM) لندست‌های ۴ و ۵، (ETM+) لندست ۷، (OLI / TIRS) لندست ۸ دارای باندهای طیفی انعکاسی و باندهای حرارتی هستند (جدول ۳). باندهای حرارتی برای شناسایی دمای سطحی و جزایر حرارتی قابل استفاده بوده و باندهای انعکاسی نیز به منظور اعمال شاخص‌ها برای پردازش تصویر به کار گرفته می‌شود. داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست در باند ۶ و داده‌های سنجنده ETM+ در باند ۸ و داده‌های سنجنده OLI / TIRS در باند ۱۱ مورد استفاده قرار گرفت. از داده‌های باند ۶ حرارتی لندست ۵ و ۷ با طول موج‌های ۱۲/۵ - ۱۰/۴۰ میکرومتر و باند ۱۰ لندست ۸ با طول موج ۱۰/۶۰ تا ۱۱/۱۹ میکرومتر برای محاسبه الگوهای توزیع دمای سطحی شهر اراک استفاده شد. باندهای ۳ و ۴ لندست ۵ و ۷ و باندهای ۴ و ۵ لندست ۸ نیز برای محاسبه شاخص NDVI به کار گرفته شدند (NASA, 2014). تصاویر پهنه شهر اراک، مربوط به گذر ۱۶۵ و ردیف ۳۶ می‌باشند.

مورد مطالعه بخشیده است. ابرها و جریان‌های غربی در پاییز و زمستان بیشتر رطوبت خود را در کوه‌های غرب منطقه از دست می‌دهند. فصل زمستان غالباً طولانی و از ۴ تا ۶ ماه متغیر است و بهار و پاییز فصل‌های کوتاهی هستند. تعداد روزهای یخبندان از ۶۵ تا ۱۲۰ روز طی سال‌های مختلف، متغیر است. اوج گرمای شهر اراک در ماه‌های تیر و مرداد ظاهر می‌شود. میزان بارش بین ۲۳۰ تا ۶۳۸ میلی‌متر متغیر است و متوسط بلندمدت بارش آن حدود ۳۴۲ میلی‌متر می‌باشد.

## ۲-۲- داده‌ها و روش کار

به منظور بررسی میزان توسعه مکان‌های گرم شهر و مشخص نمودن الگوهای حرارتی شهری، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست ۴، ۵، ۷ و ۸، طی دوره گرم سال در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است (حلیان و کیخسروی کیانی، ۱۳۹۵: ۳۹۹). نحوه انتخاب تصاویر با توجه به مقیاس توزیع زمانی و عوامل تأثیرگذار بر میزان واضح بودن تصویر مثل اغتشاشات جوی و پوشش ابرهای سطوح



جدول ۲: تاریخ‌های تصویربرداری ماهواره لندست از شهر اراک

تاریخ برداشت میلادی	تاریخ برداشت شمسی	ماهواره	سنجنده	روز
۱۹۸۵/۰۵/۰۵	۱۳۶۴/۰۲/۱۵	لندست ۵	TM5	۱۲۵
۱۹۸۸/۰۸/۰۹	۱۳۶۷/۰۵/۱۸	لندست ۴	TM4	۲۲۲
۱۹۹۳/۰۶/۲۸	۱۳۷۲/۰۴/۰۷	لندست ۵	TM5	۱۷۹
۱۹۹۹/۰۷/۰۷	۱۳۷۸/۰۴/۱۶	لندست ۷	ETM+	۱۸۸
۲۰۰۲/۰۵/۲۸	۱۳۸۱/۰۳/۰۷	لندست ۷	ETM+	۱۴۸
۲۰۱۱/۰۷/۱۶	۱۳۹۰/۰۴/۲۵	لندست ۵	TM5	۱۹۷
۲۰۱۶/۰۷/۲۹	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	لندست ۸	OLI/TIRS	۲۱۰
۲۰۱۷/۰۸/۰۱	۱۳۹۶/۰۵/۱۰	لندست ۸	OLI/TIRS	۲۱۲

جدول ۳: مشخصات توان تفکیک مکانی و رادیومتریک سنجنده (TM), (ETM+), (OLI / TIRS)

ماهواره / سنجنده	تفکیک رادیو متریک	تفکیک مکانی باندهای حرارتی (متر)	تفکیک مکانی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی (متر)	تفکیک باند پانکروماتیک (متر)
لندست ۴ و ۵ TM	۸ بیت	۱۲۰×۱۲۰	۳۰×۳۰	ندارد
لندست ۷ ETM+	۸ بیت	۶۰×۶۰	۳۰×۳۰	۱۵×۱۵
لندست ۸ OLI / TIRS	۱۶ بیت	۱۰۰×۱۰۰	۳۰×۳۰	۱۵×۱۵

## ۲-۱- محاسبه LST و رادیانس طیفی

برای بازیابی دمای روشنایی تصاویر ماهواره‌ای به تابش روشنایی و درخشندگی در هر باند، طبق فرمول (۱) عمل گردید (Lasvan & Sun Gupradite, 2012: 103) و رادیانس طیفی با استفاده از فرمول (۱) محاسبه شد.

$$L_{\lambda} = \frac{(R_{max} - R_{min})}{(QR_{max} - QR_{min})} \times (DN - QR_{min}) + R_{min}$$

رابطه (۱)

در این رابطه  $L_{\lambda}$  تابش روشنایی در هر باند طیفی است.  $R_{min}$  و  $R_{max}$  حداقل و حداکثر مقدار رادیانس طیفی برای باند حرارتی تصویر مربوطه است.  $QR_{max}$  باند مربوطه،  $QR_{min}$  باند مربوطه،  $DN$  مقدار درجه خاکستری پیکسل تصویر ماهواره‌ای باند مربوطه می‌باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۹۳).

برای محاسبه دمای سطحی به روش تک پنجره با استفاده از رابطه (۱) اعداد رقومی تصاویر (Digital Number) به رادیانس طیفی تبدیل شدند. برای تصاویر TM, ETM+ مقادیر از هیدر فایل‌های<sup>۱</sup> تصاویر مذکور استخراج شد. البته قبلاً تصحیح هندسی بر روی تصاویر انجام گرفت و تصاویر دریافتی به اندازه محدوده مورد مطالعه شهر اراک برش داده شد. الگوریتم مورد استفاده برای استخراج درجه حرارت سطح زمین، الگوریتم تک پنجره<sup>۲</sup> بود که گسیلمندی آن با استفاده از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به دست آمد. مقدار کل تابش رسیده به سطح افقی در مسیر حرکت طول موج به طور کامل دریافت نمی‌شود بلکه در مسیر حرکت مستقیم، بخشی از آن توسط مولکول‌ها و ذرات موجود در اتمسفر پراکنده یا جذب می‌گردد، به همین دلیل

3- Radiance min

4- Radiance max

5- Quantize max

6- Quantize min

1- Header files

2- Mono\_Window

**فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )**  
 تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۲۷

سپس طبقات دمایی برای مناطق پنج‌گانه محاسبه شد. در این مطالعه دمای مناطق شهرداری، به چهار طبقه دمایی تقسیم‌بندی و مقدار مساحت هر طبقه محاسبه شد تا از این طریق، میزان تغییرات کاهش یا افزایشی هر طبقه دمایی شناسایی شود (جدول ۵). هدف از محاسبه مساحت دمایی سطح زمین آن است که، میزان تغییرات مساحت نواحی گرم و بسیار گرم (به‌خصوص طبقه چهارم دما که مربوط به دماهای بسیار بالا و بحرانی است) تشخیص داده شود (صادقی‌نیا، ۱۳۹۲: ۵).

جدول ۵: درجه حرارت طبقات دمایی اراک به سانتی‌گراد

طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم
نه چندان گرم	کمی گرم	گرم	بسیار گرم
۲۳-۳۴	۳۴-۳۸	۳۸-۴۱	۴۱-۴۸

**۲-۲-۵- محاسبه درصد تراکم طبقه چهارم دما (نقاط بسیار گرم و بحرانی شهر)**

پس از محاسبه مساحت طبقات دمایی شهر اراک، دمای طبقه چهارم که دارای بالاترین میزان حرارت و از نظر زیست‌محیطی آزاردهنده است در هر منطقه شهرداری مشخص گردید. هدف از محاسبه درصد طبقه چهارم دمایی، مشاهده تعداد پیکسل‌های نقاط گرم شهر اراک به‌صورت منطقه‌ای و سپس بررسی تغییرات این پیکسل‌ها طی دوره ۳۳ ساله می‌باشد. در رابطه (۴) مساحت هر پیکسل برابر با ۹۰۰ مترمربع است.

=تراکم نقاط دمای بحرانی  
 کل مساحت منطقه/تعداد پیکسل‌های الگوی حرارتی در هر منطقه  
 رابطه (۴)

**۲-۲-۶- کمینه و بیشینه و میانگین دمای شهر اراک**

هدف از مشخص نمودن کمینه و بیشینه دمایی در هر منطقه، مطالعه میزان افزایش تغییرات حرارت و تأثیر آن بر میزان توسعه جزیره حرارتی است، که می‌توان با مشخص

**۲-۲-۲- تبدیل مقدار تابش محاسبه‌شده به دمای کلوین**  
 براساس رابطه (۲)، دمای درخشندگی به درجه کلوین محاسبه شد.

$$T = \frac{k2}{\ln\left(\frac{k1}{L\lambda} + 1\right)}$$

رابطه (۲)

در رابطه (۲) مقادیر K1 و K2 ضرایبی هستند که توسط طول‌موج مؤثر دریافت شده از حسگر ماهواره محاسبه می‌شوند. جدول ثابت واسنجی باند حرارتی سنجنده TM و ETM+ در ادامه ارائه شده است (جدول ۴).

جدول ۴: ثابت واسنجی باند حرارتی سنجنده TM و ETM+

ضریب سنجنده (باند)	K1 W(m <sup>2</sup> srμm)	K2 کلوین
L5 - TMB6	۷۶/۶۰۷	۵۶/۱۲۶۰
L7 - ETM+B6	۹/۶۶۶	۷۱/۱۲۸۲
L8 - OLIB10	۸۹/۷۷۷	۸/۱۳۲۱

(مآخذ: مرادی و همکاران، ۱۳۹۳)

**۲-۲-۳- تبدیل دمای کلوین به دمای سانتی‌گراد**

تبدیل دمای کلوین به دمای سانتی‌گراد، با استفاده از رابطه (۳) صورت می‌گیرد:

$$t = T - 273.15$$

رابطه (۳)

اطراف تصاویر حاصله، در بعضی از نقاط فاقد داده است و خط‌هایی به‌صورت ناخواسته رخ می‌دهد. برای برطرف کردن این خطاها، باید آن‌ها را Export کرد تا از تصویر محدودی شهر، جدا شود. این کار برای تمامی شاخص‌ها انجام‌شده است و درنهایت خروجی حاصله، نقشه‌ی LST خواهد بود.

**۲-۲-۴- محاسبه‌ی مساحت طبقات دمایی مناطق پنج‌گانه اراک**

برای محاسبه‌ی مساحت طبقات دمایی مناطق پنج‌گانه، در محیط نرم‌افزار (Arc map) ابتدا دما، کلاس‌بندی و

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه، عبارت NIR همان باند مادون قرمز نزدیک (برای سنجنده‌های لندست ۵ و ۷، باند ۴ و برای سنجنده لندست ۸، باند ۵) و علامت RED باند قرمز (باند ۳ سنجنده‌های لندست ۵ و ۷ و باند ۴ برای لندست ۸) است (Cracknell, 1997: 879).

### ۲-۳-۱- محاسبه‌ی مساحت پوشش گیاهی

بعد از برش مناطق پنج‌گانه‌ی شهر اراک، برای درک رابطه‌ی پوشش گیاهی با LST و همچنین تراکم جزیره‌ی حرارتی، می‌بایست مساحت پوشش گیاهی را در هر منطقه شهرداری به‌دست آورد. بدین منظور، باید تعداد پیکسل‌های پوشش گیاهی تصاویر extract شده‌ی NDVI را در مساحت آن ضرب کرد.

### ۲-۳-۲- شاخص پراکندگی عرصه حرارتی شهر یا ارزیابی اکولوژیکی UTFVI

این شاخص، برای توصیف کمی تأثیر جزیره‌ی حرارتی شهری به‌کار می‌رود و با استفاده از رابطه‌ی (۶) قابل محاسبه است (Liu and Zhang, 2011: 1548).

$$UTFVI = \frac{TS}{TS - T_{mean}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این رابطه TS مقدار دمای سلسیوس است که قبلاً محاسبه شد و Tmean میانگین آن است.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- ارزیابی الگوها و تغییرات دمای سطح زمین

به‌طور کلی با توجه به نقشه‌های دمای سطح زمین شهر اراک، که برای شناسایی الگوهای حرارتی و نقاط گرم طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ بررسی گردید، مشخص شد که، مکان‌های دارای پهنه طبقاتی گرم ارتباط نزدیکی با دمای سطح زمین (LST) دارد و در بخش‌هایی از شهر همواره درجه حرارت بالا مشاهده می‌شود.

نمودن کمینه و بیشینه، میزان تغییرات کمینه و بیشینه و میزان تأثیرگذاری آن را بر گسترش نقاط گرم مطالعه کرد. همچنین با مشخص نمودن میانگین حرارت هر منطقه می‌توان تغییرات درجه حرارت را در سال‌های مورد مطالعه مشاهده نمود. از طرفی، برای تشخیص گرم‌ترین و خنک‌ترین سال و همچنین گرم‌ترین و خنک‌ترین منطقه و یافتن ارتباط آن با تراکم جزیره حرارتی و پوشش گیاهی، نیاز به بیشینه و کمینه و همچنین میانگین دمای مناطق است.

#### ۲-۳-۳- شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال یا NDVI

کسب اطلاعات درباره وضعیت پوشش گیاهی از قبیل میزان و پراکنش آن‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار است. گردآوری اطلاعات در مورد تغییرات پیوسته پوشش گیاهی با روش‌های میدانی و معمولی بسیار مشکل و پرهزینه است. در این حالت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، امکان مطالعه گسترده پوشش گیاهی را فراهم می‌سازد (علوی‌پناه، ۱۳۸۲: ۱۷۰). شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌ها در مطالعات مختلف است. این شاخص به روز<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۷۳ نسبت داده شده است. اما مفهوم آن اولین بار توسط کرایگلر و همکارانش<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۹ بیان شد. بیش از ۱۵۰ شاخص گیاهی در مقالات علمی منتشر شده است، اما تنها تعداد اندکی از آن‌ها پایه بیوفیزیکی قابل قبولی داشته و یا با روشی مشخص آزمایش شده است. یک شاخص گیاهی (پوشش گیاهی برآورد شده) که از داده‌های رقومی قابل انتشار استفاده می‌کند، می‌تواند به‌جای اندازه‌گیری پوشش گیاهی به‌کار رود (Moran & et al, 1994: 249).

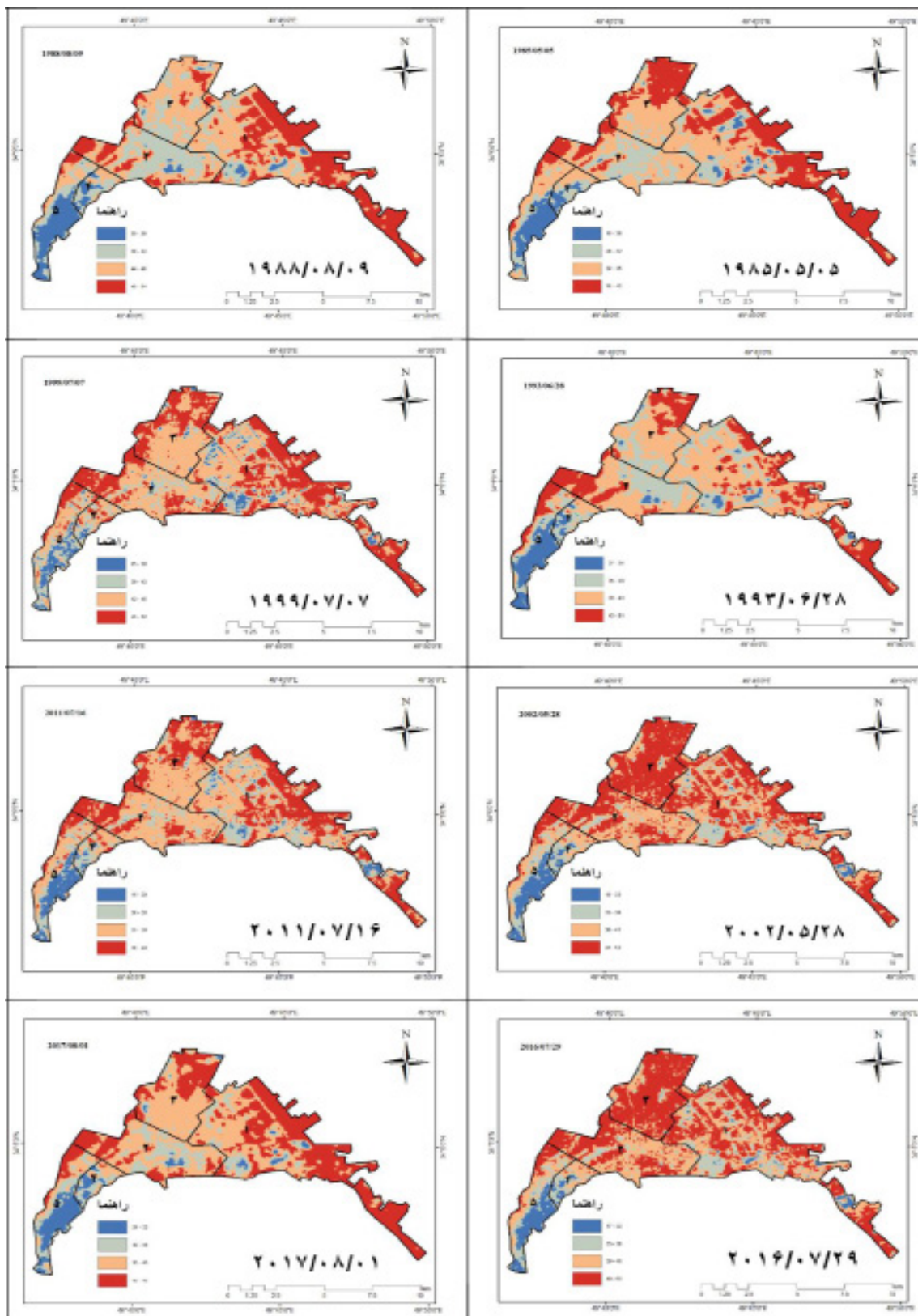
شاخص پوشش گیاهی NDVI (شاخص گیاهی تفریقی نرمال شده)، از پرکاربردترین شاخص‌های فراوانی پوشش گیاهی است که از طریق نسبت‌گیری باند قرمز و باندهای مادون قرمز نزدیک مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید.

1- Roz

2- Kerayglar et al



فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سج) / ۱۲۹  
تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۲۹



نگاره ۲: نقشه طبقات دمای سطح زمین (LST) اراک در روزهای مختلف

همچنان که از نقشه‌های نگاره ۲ پیداست، فراوانی توزیع زمانی و مکانی درجه حرارت بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در بخش‌های مشخصی از اراک به‌ویژه در حاشیه‌های آن در اغلب روزها بسیار زیاد است. بدان معنی که، در کلیه تصاویر مورد مطالعه، مراکز گرم بالای ۴۰ درجه که با رنگ قرمز مشخص شده است، بیشتر منطبق بر اراضی غیرمسکونی، خصوصاً در حاشیه شهر به‌طور وسیعی مشاهده شده و توزیع مکانی الگوهای حرارتی منطبق بر تراکم کاربری‌های صنعتی و مسکونی منطقه یک و دو و سه شکل گرفته است. دلیل این امر استقرار صنایع و تراکم بخش صنعتی در شرق و شمال‌شرق اراک و همجواری با اتوبان و کمربندهای شهری و وجود اراضی بایر از شمال‌غربی تا جنوب‌شرقی اراک می‌باشد. از طرفی، نقش ساختار پلان افقی و کم‌ارتفاع بافت شهری اراک را نیز باید در نظر گرفت که در حفظ و عدم جابه‌جایی گرمای داخل شهر چندان اثرگذار نیست. تقریباً در همه روزهای مورد بررسی با حرکت از نواحی حاشیه به داخل شهر، تسلط بر طبقه دمایی سوم بوده است.

کم شدن این درجه حرارت از حاشیه به سمت داخل شهر با رنگ گرمی پررنگ مشخص است.

طبقات دوم و سوم دمای زیر ۳۸ درجه بیشتر بر روی مناطق مسکونی شهر گسترش یافته است. در بخش‌هایی از شهر که دارای هسته‌های سرد بوده‌اند رابطه نزدیکی با پوشش گیاهی در همان بخش مشاهده شد. به‌طوری‌که پوشش گیاهی از عوامل مؤثر در پایین آمدن دمای سطح زمین در این مناطق بوده است.

جدول ۶: تغییرات زمانی پهنه‌های طبقات دمایی سطح زمین شهر اراک را طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. همچنان که پیداست، تغییرات مساحت پهنه‌های طبقه اول و سوم دمایی با ضریب تغییرات ۰/۰۹- درصد و ۰/۰۴+ درصد، آهنگ تغییرات یکنواختی داشته است.

مساحت پهنه‌های طبقه چهارم دمایی (۴۱ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد) با میانگین ۲۶/۳ کیلومتر مربع و انحراف معیار ۶/۸ واحد بیشترین نوسان و تغییرات مثبت (۴/۳+ درصد) را داشته است. به‌طوری‌که، از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ حدود

جدول ۶: مساحت طبقات دمایی اراک در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ به کیلومتر مربع

طبقه چهارم دمایی ۴۱-۴۸	طبقه سوم دمایی ۳۸-۴۱	طبقه دوم دمایی ۳۴-۳۸	طبقه اول دمایی ۲۳-۳۴	روز و سال شمسی	روز و سال میلادی
۲۵/۹۳	۳۰/۹۳	۱۵/۰۱	۵/۴۶	۱۳۶۴/۰۲/۱۵	۱۹۸۵/۰۵/۰۵
۱۹/۷۳	۲۷/۶۳	۲۲/۷۹	۷/۱۷	۱۳۶۷/۰۵/۱۸	۱۹۸۸/۰۸/۰۹
۱۶/۷۱	۳۱/۷۳	۲۲/۰۷	۶/۸۲	۱۳۷۲/۰۴/۰۷	۱۹۹۳/۰۶/۲۸
۲۲/۹۶	۳۳/۴۳	۱۵/۸۰	۵/۱۵	۱۳۷۸/۰۴/۱۶	۱۹۹۹/۰۷/۰۷
۳۵/۴۸	۲۶/۳۱	۱۱/۲۶	۴/۲۸	۱۳۸۱/۰۳/۰۷	۲۰۰۲/۰۵/۲۸
۲۴/۷۷	۳۴/۷۵	۱۳/۱۸	۴/۶۳	۱۳۹۰/۰۴/۲۵	۲۰۱۱/۰۷/۱۶
۳۵/۴۸	۲۶/۳۱	۱۱/۲۶	۴/۲۸	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	۲۰۱۶/۰۷/۲۹
۲۹/۲۲	۳۰/۹۶	۱۱/۷۷	۵/۳۹	۱۳۹۶/۰۵/۱۰	۲۰۱۷/۰۸/۰۱
۲۶/۳	۳۰/۳	۱۵/۴	۵/۳	میانگین مساحت طبقه دمایی طی ۱۹۸۵-۲۰۱۷	
۶/۸	۳/۲	۴/۷	۱/۲	انحراف معیار	
٪ ۳۴	٪ ۳۸/۸	٪ ۱۹/۹	٪ ۶/۹	درصد میانگین مساحت طبقه دمایی از کل شهر	
+ ۳/۳ Km <sup>2</sup>	+ ۰/۰۳ Km <sup>2</sup>	- ۳/۲ Km <sup>2</sup>	- ۰/۰۷ Km <sup>2</sup>	تغییرات مساحت طبقه دمایی طی ۱۹۸۵-۲۰۱۷	
+ ۴/۳	+ ۰/۰۴	- ۴/۲	- ۰/۰۹	درصد ضریب تغییرات مساحت طبقه دمایی	

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )

تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۳۱

۳/۳ کیلومترمربع بر مساحت طبقه چهارم دمایی افزوده شده است. از طرفی حدود ۳۴ درصد از کل مساحت اراک طی دوره مورد مطالعه تحت سیطره بالاترین طبقه دمایی چهارم بوده است. در این بین، مساحت طبقه دمایی سوم اندکی بالاتر و ۳۸/۸ درصد را به خود اختصاص داده است. در مجموع، از مساحت طبقات دمایی ۱ و ۲ به نفع سهم مساحت طبقه دمایی ۳ و عمدتاً طبقه دمایی ۴ کاسته شده است. به منظور بررسی درصد تراکم نقاط گرم اراک طی دوره زمانی موردنظر، پس از محاسبه طبقات دمایی شهر اراک، دمایی طبقه چهارم که دارای بالاترین میزان حرارت است در هر منطقه مشخص گردید. هدف از محاسبه درصد طبقه چهارم دمایی، مشاهده تعداد پیکسل‌های نقاط گرم و حاد شهر اراک به صورت منطقه‌ای و سپس بررسی تغییرات زمانی این پیکسل‌ها طی دوره ۳۳ ساله است. در این بررسی، هر پیکسل برابر ۹۰۰ مترمربع است.

جدول ۷: درصد تراکم نقاط گرم (دمای طبقه چهارم) شهر اراک

روز	شاخص / منطقه شهرداری	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳	منطقه ۴	منطقه ۵
۱۹۸۵/۰۵/۰۵	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۵/۹	۲/۸۵	۶/۰۹	۰	۰/۹۸
	درصد تراکم در هر منطقه	۱/۴۸	۱۹	۵/۴۳	۰	۸/۱
	درصد تراکم در شهر	۴/۲۱	۸/۳	۲/۸	۰	۳/۱
۱۹۸۸/۰۸/۰۹	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۵/۳۲	۲/۷۷	۱/۰۵	۰	۰/۴۸
	درصد تراکم در هر منطقه	۴/۴۶	۴/۱۸	۵/۷	۰	۳/۵
	درصد تراکم در شهر	۷/۲	۷/۳	۴/۱	۰	۶
۱۹۹۳/۰۶/۲۸	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۸/۰۴	۳/۷۲	۳/۰۶	۰/۰۲	۱/۷۴
	درصد تراکم در هر منطقه	۳/۲۴	۸/۲۴	۸/۲۱	۲	۳/۱۹
	درصد تراکم در شهر	۸/۱	۵	۱/۴	۰	۳/۲
۱۹۹۹/۰۷/۰۷	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۲/۶۹	۴/۱	۴/۴۷	۰/۳۱	۱/۲۳
	درصد تراکم در هر منطقه	۳۸/۴	۲۷/۳	۳۱/۹	۱۰/۳	۰/۴
	درصد تراکم در شهر	۱۷/۱	۵/۵	۶	۰/۴	۱/۶
۲۰۰۲/۰۵/۲۸	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۳/۱۵	۱۰/۷	۱۱/۶۲	۰/۱۱	۱/۴۳
	درصد تراکم در هر منطقه	۴۵/۸	۷/۶	۸۳	۳/۶	۱۵/۸
	درصد تراکم در شهر	۲۰/۴	۹/۵	۱۵/۷	۰/۱	۱/۹
۲۰۱۱/۰۷/۱۶	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۲/۷۷	۴/۹۳	۵/۱۹	۰/۳۲	۱/۳۵
	درصد تراکم در هر منطقه	۳۸/۶	۳۲/۸	۳۷	۱۰/۶	۱۵
	درصد تراکم در شهر	۱۷/۲	۶/۶	۷	۰/۴	۱/۸
۲۰۱۶/۰۷/۲۹	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۵/۱	۷/۱۰	۱۱/۶۲	۰/۱۱	۱/۴۳
	درصد تراکم در هر منطقه	۴۵/۷	۴۷/۳	۸۳	۳/۶	۰/۱
	درصد تراکم در شهر	۲۰/۴	۹/۵	۱۵/۷	۰/۱	۱/۹
۲۰۱۷/۰۸/۰۱	مساحت نقاط گرم به کیلومترمربع	۱۸/۵۵	۴/۱۰	۴/۹۲	۰/۰۶	۱/۴۸
	درصد تراکم در هر منطقه	۵۶/۲	۲۷/۳	۳۵/۱	۲	۱۶/۴
	درصد تراکم در شهر	۲۵	۵/۵	۶/۶	۰	۲

جدول ۸: کمینه، بیشینه و میانگین دمای سطح زمین اراک به سانتی گراد

روز و سال میلادی	روز و سال شمسی	کمینه دما	میانگین دما	بیشینه دما
۱۹۸۵/۰۵/۰۵	۱۳۶۴/۰۲/۱۵	۱۰/۷	۳۳/۷	۴۲/۳
۱۹۸۸/۰۸/۰۹	۱۳۶۷/۰۵/۱۸	۳۰	۴۵/۳	۵۴/۴
۱۹۹۳/۰۶/۲۸	۱۳۷۲/۰۴/۰۷	۲۷/۴	۴۰/۷	۵۱/۵
۱۹۹۹/۰۷/۰۷	۱۳۷۸/۰۴/۱۶	۲۵/۱	۴۴	۵۲/۷
۲۰۰۲/۰۵/۲۸	۱۳۸۱/۰۳/۰۷	۱۸/۱	۳۹/۹	۵۳/۶۱
۲۰۱۱/۰۷/۱۶	۱۳۹۰/۰۴/۲۵	۱۶/۷	۳۶/۴	۴۸/۸
۲۰۱۶/۰۷/۲۹	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	۱۷/۹	۳۹/۷	۵۳/۳
۲۰۱۷/۰۸/۰۱	۱۳۹۶/۰۵/۱۰	۲۱/۴	۳۸/۸	۴۶/۳

در حدود ۱۰/۷ درجه سانتی گراد است. میانگین دما نیز در طول روزهای مورد مطالعه، بین ۳۶ تا ۴۲ درجه سانتی گراد در نوسان بوده است (جدول ۸).

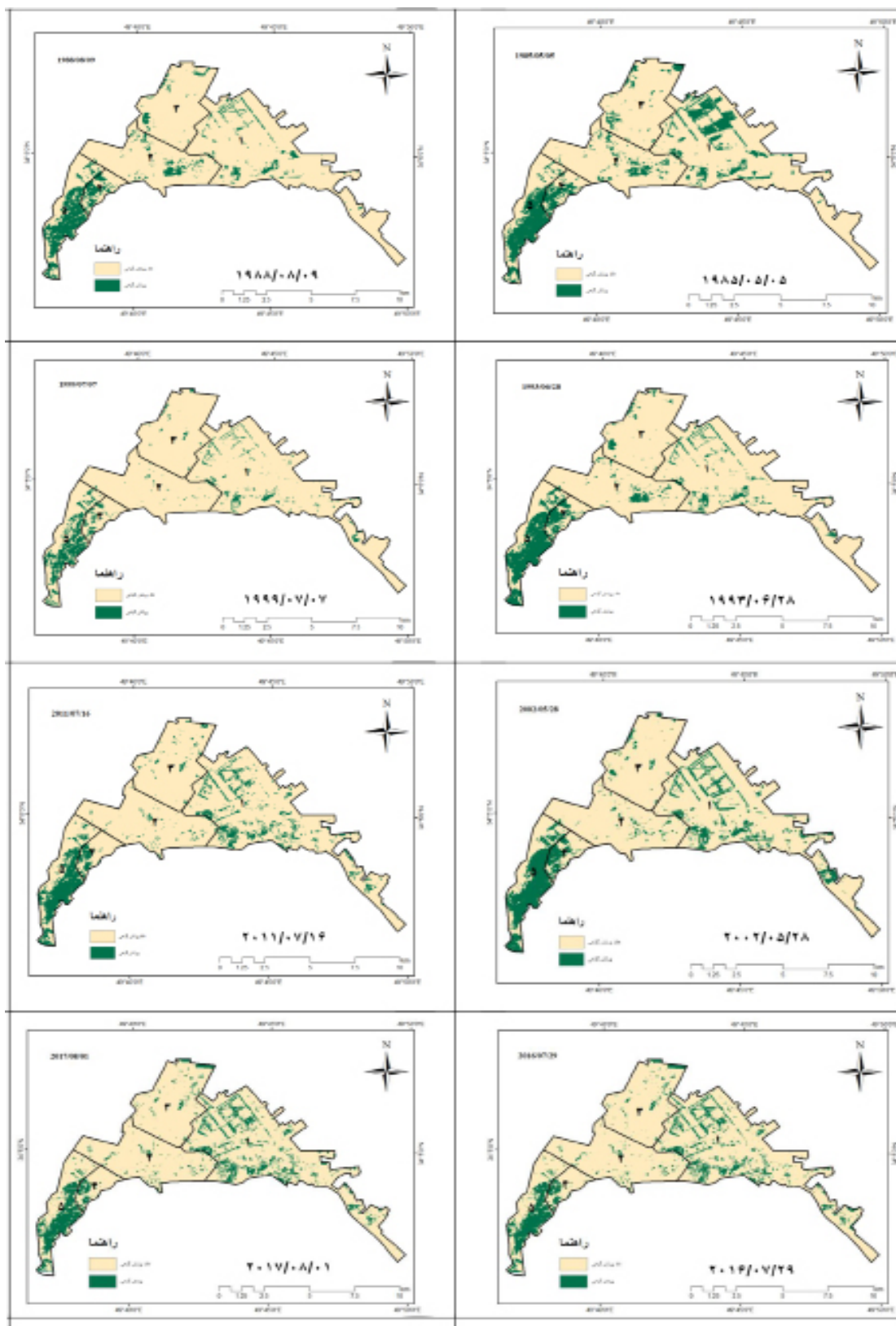
هدف از مشخص نمودن تغییرات توزیع زمانی کمینه و بیشینه دما در هر منطقه، بررسی میزان تغییرات افزایش درجه حرارت و تأثیر آن بر میزان توسعه و گسترش نقاط گرم شهر است. بنابراین، با مشخص نمودن میانگین حرارت هر منطقه، تغییرات درجه حرارت طی دوره مورد مطالعه بررسی و تحلیل شد. همچنانکه از جدول مذکور پیداست، دامنه تغییرات کمینه دما و بیشینه دمایی از سال ۱۹۸۵ به سمت ۲۰۱۷ کاهش پیدا کرده و هر دو به سمت دمای میانگین متمایل شده است. از لحاظ موقعیت منطقه‌ای نیز، فراوانی تکرار کمینه دمایی بیشتر منطبق بر منطقه ۴ و ۵ شهرداری با ۵۰ درصد از موارد بوده و منطقه یک و دو شهرداری هر کدام ۲۵ درصد بقیه موارد را به خود اختصاص داده‌اند. تکرار کمینه دما در مناطق ۴ و ۵ به علت وجود پوشش گیاهی در مناطق مذکور بوده که برای تعدیل دما اثرگذار است (جدول ۹). به همین ترتیب، فراوانی تکرار بیشینه دمایی نیز بیشتر در منطقه یک با فراوانی ۸۸ درصد مشاهده شد و بیشینه دما در منطقه یک هم به علت وجود تمرکز صنایع و شهرک‌های صنعتی، وجود کمر بند شمالی و جنوبی دو طرف این منطقه و ترافیک‌های پرتردد و سنگین است.

همچنان که از جدول ۷ پیداست، مساحت تراکم نقاط گرم و درصد نسبی مربوط به هر منطقه و سطح شهر در روزهای مختلف محاسبه شده است.

مساحت نقاط گرم منطقه یک شهرداری در روز ۱۹۸۵/۰۵/۰۵ حدود ۱۵/۹ کیلومترمربع است و بیشترین درصد تراکم پیکسل‌های نقاط گرم نسبت به هر منطقه و سطح شهر به ترتیب با ۱۹ درصد و ۸/۳ درصد به منطقه دوم شهرداری اختصاص پیدا کرده است. طی دوره مورد بررسی، مساحت نقاط گرم منطقه یک شهرداری از ۱۵/۹ کیلومترمربع در ۱۹۸۵ به ۱۸/۵۵ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۷ رسیده است. در مجموع، منطقه یک از بیشترین فراوانی تکرار و بالاترین مقادیر مساحت نقاط گرم طبقه چهارم دمایی برخوردار است و منطقه چهارم شهرداری، کمترین مقادیر مساحت و درصد تراکم سلول‌های طبقه گرمایی چهارم را تجربه کرده است.

به این ترتیب می‌توان گفت که، گستره طبقه گرمایی چهارم در طی دوره مورد مطالعه، به سمت حاشیه بخش‌های شمال شرقی و شرق اراک کشیده شده و توسعه فیزیکی داشته است. نتایج حاصل از بررسی کمینه، بیشینه و میانگین دمای سطح زمین اراک نشان داد که، بیشترین مقدار بیشینه دما مربوط به روز ۱۹۸۸/۰۸/۰۹ در حدود ۵۴/۴ درجه سانتی گراد که همزمان با وقوع استیلای موج گرمایی بر ایران بوده است و کمترین مقادیر دما مربوط به روز ۱۹۸۵/۰۵/۰۵

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)  
تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک / ... / ۱۳۳



نگاره ۳: نقشه پوشش گیاهی اراک در روزهای مختلف



جدول ۹: میزان مساحت پوشش گیاهی در دوره زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۷ به کیلومتر مربع

تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	مساحت پوشش گیاهی (کیلومتر مربع)	تعداد پیکسل
۱۹۸۵/۰۵/۰۵	۱۳۶۴/۰۲/۱۵	۱۴/۰۸	۱۵۶۵۲
۱۹۸۸/۰۸/۰۹	۱۳۶۷/۰۵/۱۸	۹/۶۵	۱۰۷۳۰
۱۹۹۳/۰۶/۲۸	۱۳۷۲/۰۴/۰۷	۱۱/۰۸	۱۲۳۲۰
۱۹۹۹/۰۷/۰۷	۱۳۷۸/۰۴/۱۶	۶/۱۶	۶۸۵۰
۲۰۰۲/۰۵/۲۸	۱۳۸۱/۰۳/۰۷	۱۳/۶	۱۵۱۵۰
۲۰۱۱/۰۷/۱۶	۱۳۹۰/۰۴/۲۵	۵/۹۴	۶۶۱۰
۲۰۱۶/۰۷/۲۹	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	۱۱/۶۸	۱۲۹۸۰
۲۰۱۷/۰۸/۰۱	۱۳۹۶/۰۵/۱۰	۱۱/۷۰	۱۳۰۰۰

### ۲-۲- تحلیل تغییرات پوشش گیاهی

هدف از کاربرد شاخص (NDVI) بررسی پوشش گیاهی شهر اراک، انطباق آن با طبقات دمای سطح زمین شهر و بررسی تأثیر پوشش گیاهی با دمای سطح زمین است. براساس نتایج حاصل در نگاره ۳ و جدول ۹ مشاهده شد که، پوشش گیاهی با توجه به کاربری‌های متفاوت اراضی شهری با طبقه دمایی مطابقت دارد.

به‌طورکلی، دماهای پایین در قسمت جنوب‌غربی اراک مربوط به وجود پوشش گیاهی و باغ‌های سنجان و کرهرود است. کاهش دما در نقشه‌های دمای سطح زمین طی دوره مورد مطالعه گویای تأیید این امر است. از طرفی، قسمت جنوب‌غربی منطقه چهار در امتداد دامنه کوه‌های زاگرس از خنک‌ترین مکان‌های شهر است. علت پایین بودن دما در این بخش از شهر، وجود باغ‌های سنجان بوده که در نوع خود منحصر به فرد می‌باشد.

در قسمت شرق و جنوب‌شرقی اراک یعنی در منطقه یک، کاربری‌های صنعتی و کمربندهای پرتراфик وجود دارند. به‌علاوه، در شمال شهر یعنی شمال منطقه سه به دلیل تجمع کاربری‌های مسکونی و ترافیک‌های سنگین تکرار تجربه دماهای بالا همواره مشاهده می‌شود. از نواحی منفرد و جزیره‌ای خنک سطح شهر اراک در منطقه جنوب آن می‌توان به پارک جنگلی و باغ‌وحش، همچنین فضای سبز در اطراف هتل امیرکبیر، پارک غدیر، پارک کودک اشاره کرد. در مرکز شهر نیز، پارک امیرکبیر و پارک رودکی، پارک

بوستان احسان، پارک ملت، پارک شهر و در قسمت شمال شرقی پارک ولایت، اراضی کشاورزی در شمال منطقه سه، پارک قائم آل‌محمد، پارک گلبرگ، بوستان آراد، پارک آفتاب و در جنوب‌غربی باغات سنجان جزء پهنه‌های نسبتاً خنک منفرد سطح شهر هستند.

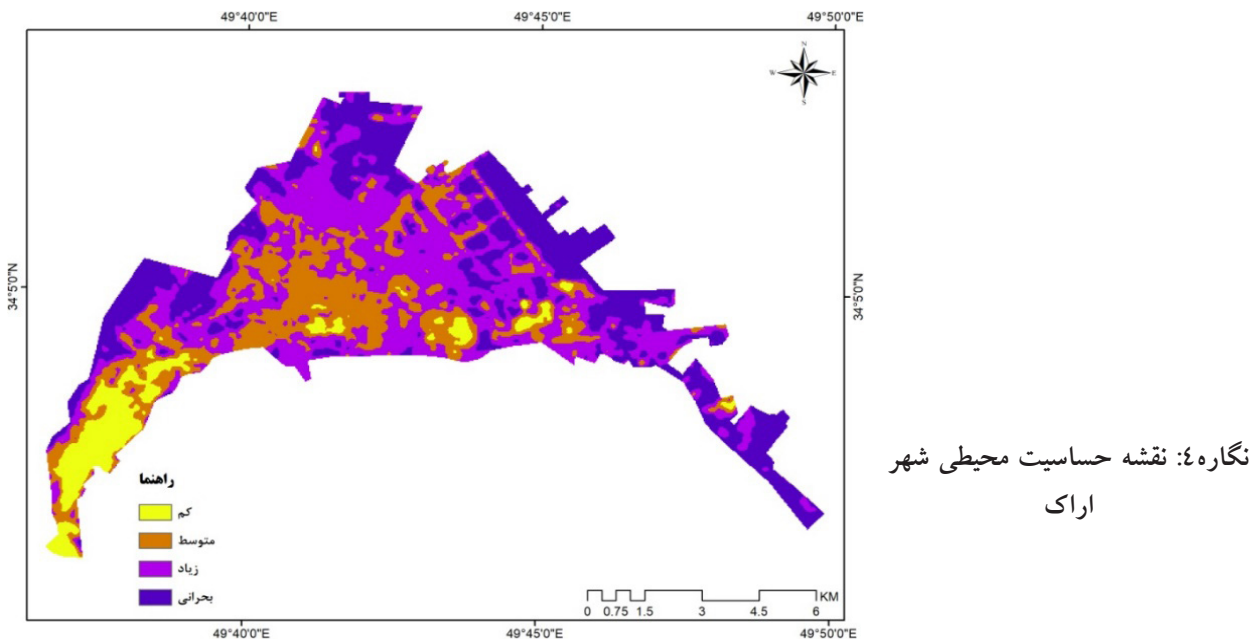
به‌طورکلی، تغییرات محسوسی در مساحت پوشش گیاهی مناطق شهرداری اراک و به تبعیت از آن، تغییرات مکانی در پهنه‌های طبقات دمایی ایجاد شده است. به‌طوری که، در مناطق ۴ و ۵ علاوه بر سوابق وجود پوشش گیاهی از گذشته تا سال ۲۰۱۷، همواره بر مساحت پوشش مذکور و طبقه دمایی پایین افزوده شده است. اما در سایر قسمت‌های شهر از جمله در شمال‌غربی و تا حدودی مرکز شهر تغییرات کاهشی مشاهده می‌شود. اما در مجموع، طی دوره مورد مطالعه مساحت پوشش گیاهی به دلیل تغییر کاربری‌های شهری از ۱۴/۰۸ کیلومتر مربع به مساحت ۱۱/۷۰ کیلومتر مربع تقلیل یافته است (جدول ۹).

### ۳-۳- تحلیل شاخص پراکندگی گستره حرارتی شهر یا ارزیابی اکولوژیکی (UTFVI)

در این شاخص، پوشش گیاهی شهر اراک با استفاده از ۲۰ تصویر سنجنده‌های (ETM+)، (OLI / TRS) و (TM) ماهواره لندست و دمای سطحی (LST) و پوشش گیاهی (NDVI) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. هدف از به‌کارگیری این شاخص، طبقه‌بندی دمایی شهر اراک



فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
 تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۳۵



نصر، باشگاه سوارکاری آلومینیوم، اداره کل هواشناسی، شرکت نمایشگاه‌های بین‌المللی، دانشگاه علمی کاربردی ماشین‌سازی، باغ‌وحش، پایانه مسافری، هتل امیرکبیر و شهر صنعتی.

در منطقه دو شهرداری، بر روی شهرک جهانگیری، کوی علی‌ابن ابی‌طالب، دانشگاه اراک، موزه مفاخر استان، شهرک رضوی (گردو)، بیمارستان امیرکبیر، شهرک ولی‌عصر، دانشگاه پزشکی، راه‌آهن، بیمارستان قدس، دانشگاه اراک پردیس - سردشت، بیمارستان امیرالمؤمنین، دانشگاه پزشکی، شرکت مهران بار اراک، پایانه سازند ملایر، کارخانه آرد تک دمای بحرانی تجربه شده است. دمای بحرانی در منطقه سه شهرداری، بر روی دانشگاه فرهنگیان، شهرک هجرت، شهرک بعثت فاز ۱ و ۲، شهرک الغدیر، شهرک امیرکبیر، بازارچه شهرک قائم، املاک فراهانی، شهرک پردیس یک و نیلوفر ۲، پایانه فراهان، و اراضی بایر در شمال و غرب منطقه حاکم بوده است. در این بین، تنها منطقه چهار شهرداری شرایط دمایی بدون وضعیت بحرانی را تجربه کرده است. در منطقه پنج شهرداری، وضعیت دمای بحرانی بر روی کاربری‌های مسکونی در امتداد خیابان غدیر و بزرگراه اراک - بروجرد، کارخانه لاستیک‌سازی کهرنگ،

براساس حداقل و حداکثر مقادیر دما بوده و با استفاده از آن مکان‌های بسیار گرم و بحرانی شهر اراک شناسایی گردید. مطابق نگاره ۴، بررسی گستره و مساحت طبقه‌های دمایی با درجه حرارت بالاتر از حد انتظار (طبقه دمای بحرانی) شهر اراک نشان داد که، طبقه دمایی بسیار گرم عمدتاً در قسمت‌های شمال، شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی منطقه یک شهرداری، بخش‌های پیرامونی شمال و شمال‌غرب منطقه سه، قسمت‌هایی از غرب منطقه دو، بخش نوار غرب منطقه پنج شهرداری متمرکز شده است.

ایجاد دمای بحرانی در پهنه‌های مذکور مشکلات زیست‌محیطی زیادی به دنبال دارد. مهم‌ترین مکان‌های حساس اراک که با حاکمیت دمای بحرانی شناسایی شدند به شرح زیر است:

در منطقه یک شهرداری، شهرک‌های مسکونی از جمله شهرک الهیه، کوی مشاور، شهرک امین، شهرک امیریه، شهرک معلم، شهرک فاطمیه، اراضی کشاورزی بر روی خیابان شهدای دولت، شهرک بهاران، شهرک حافظیه، کاربری‌های مسکونی بر روی بلوار کشاورز، شهرک شهید مصطفی خمینی، کوی کارمندان شرکت نفت، بهشتی فاز ۱ و ۲، صنایع لبنی اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، صداوسیما، جهاد

در مناطق شهری باعث افزایش دما تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌شود. فناوری های سنجش از دور مبتنی بر تصاویر به‌طور گسترده ای برای بررسی محیط گرمایی شهری تحت گسترش سریع شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. شهر صنعتی اراک یک منطقه صنعتی با رشد و توسعه سریع است که دارای طیف وسیعی از صنایع کوچک و بزرگ و کارگاه‌های مختلف در داخل و عمدتاً حاشیه شهر می‌باشد. این مطالعه به دنبال ارزیابی و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی الگوی دمایی در منطقه شهری اراک است که می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد.

بنابراین، کوشش گردید که، مکان‌های با درجه حرارت حاد و بسیار بالای شهر اراک (طبقه چهارم دمایی) که باعث ایجاد پدیده الگوهای حرارتی در برخی از مناطق شده را با استفاده از روش تحلیلی آماری-فضایی داده‌ها شناسایی و بررسی کند و ویژگی الگوی حرارتی شهر اراک با بررسی روابط بین دمای سطح زمین و NDVI، UTFVI مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا ارتباط میان تغییرات مقیاس زمانی و مکانی دمای سطحی با پوشش سطح زمین آشکار شود. از آنجا که، برآورد داده‌های رقومی Landsat قادر به اندازه‌گیری تغییرات LST است از این‌رو، در تحقیق حاضر از داده‌های طیف‌سنج تصویری Landsat برای اندازه‌گیری تغییرات درجه حرارت سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی نرمال (NDVI) سطح شهر اراک استفاده شد. نقاط گرمایی با استفاده از رویکردهایی مانند مدل‌سازی دمای سطح زمین (LST) مبتنی بر سنجش از دور و نظارت بر دمای محیط براساس بررسی های میدانی شناسایی شدند.

بررسی اقلیم شناسی تغییرات مقیاس زمانی الگوهای دمایی اراک نشان داد که، از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ به‌طور مداوم در برخی از مناطق شهر به‌ویژه در منطقه یک شهرداری (شرق و شمال‌شرقی اراک) افزایش درجه حرارت به‌وجود آمده است، به‌طوری که، حدود ۴/۳ درصد بر مساحت طبقه چهارم دمایی (۴۱ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد) افزوده شده است و الگوهای حرارتی در منطقه مذکور بیشترین شدت دمایی

آرامستان سنجان، امامزاده زرینه خاتون و بهجت خاتون، کوی کوثر (مجتمع‌های مسکونی کوثر)، دانشکده دخترانه اطهر مشاهده گردید.

نقاط و اماکن با وضعیت دمایی کم بحران عمدتاً منطبق بر مناطق برخوردار از وجود پوشش گیاهی مناسب بوده است. به‌طوری که در جنوب منطقه یک شهرداری، فضاهای سبز در سطح وسیعی از کوی کارمندان شرکت نفت، پارک ملت، پارک غدیر، شهربازی لاله، پارک جنگلی شهید باهنر و اراضی کشاورزی بر روی جاده اراک-خمین نقش به‌سزایی در کاهش بحرانی دمایی داشته و گستره جزیره حرارتی شهری را تعدیل کرده‌اند. این وضعیت در مناطق مسکونی منطقه دو شهرداری بر روی خیابان شهید شیروودی و بوستان علم الهدی، منطقه سه پارک قائم آل‌محمد، و منطقه چهار و پنج که شامل باغات سنجان، سه‌لله و الهیه است نیز باعث تعدیل و کاهش دما شده است.

براساس بررسی‌های انجام‌شده در خصوص دما و پوشش گیاهی می‌توان گفت که این دو باهم رابطه معکوس و مستقیمی دارند به‌طوری که، در مکان‌هایی یا نقاطی از شهر که برخوردار از پوشش گیاهی بهتری بوده است، وضعیت بحرانی حساسیت محیطی کمتر بوده و برعکس نقاطی که وضعیت بحرانی دارند حاکی از وجود و تجمع الگوهای حرارتی در آن نقاط می‌باشد و بررسی‌ها و مشاهدات میدانی تحقیق نشان داد که، دلایل عمده آن وجود گره‌ها و مسیرهای پر تردد و ترافیک، کاربری‌های صنعتی، تراکم در سطح بالای کاربری‌های مسکونی و فشرده و بافت قدیم است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تحلیل و پایش طبقات دمایی شهری با توجه به نوع کاربری‌های شهری و در مقیاس بلندمدت یکی از مقوله‌های مهم زیست‌محیطی است. افزایش دمای سطح زمین به‌ویژه پیدایش پدیده جزایر گرمایی شهری، نمایه‌ای از شدت گرما و از عناصر مهم شناخت تغییرات آب‌وهوایی می‌باشد. گزارش‌ها حاکی از آن است که، تأثیر جزیره گرمایی

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )

تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۳۷

شهر آزاردهنده است. گستره طبقه دمایی اول عمدتاً در منطقه خوش آب و هوای پنج شهرداری واقع است و از نظر درصد مساحت و وضعیت دمایی، ثبات دمایی بیشتری را داشته است. اما طبقه چهارم و حاد دمایی که از متوسط دمای بالای ۴۲ درجه سانتی‌گراد برخوردار است و بیشتر در حاشیه شهر به چشم می‌خورد و منطبق بر منطقه یک و سه شهرداری است، با نوسانات مثبت و منفی دمایی همراه بوده است. دلیل نوسانات مثبت دمایی، تغییرات کاربری به صنعتی و کارگاهی و تبدیل اراضی بایر به مسکونی و فشار فزاینده حجم تردد و سائت نقلیه به‌ویژه در منطقه مذکور از کریدور شمال تا جنوب شرقی شهر اراک بوده است و حدود ۲/۷ کیلومترمربع برمساحت الگوی حرارتی طبقه حاد دمایی مذکور افزوده شده است. به‌طوری‌که، بیشترین متوسط مساحت پهنه طبقه دمایی حاد (طبقه چهارم دمایی) شهر اراک در منطقه ۱ شهرداری برآورد شد و حدود ۴۴ درصد از کل منطقه شهرداری مذکور را به خود اختصاص داد. این مقدار برای منطقه شهرداری ۴ به کمتر از یک درصد برآورد شد.

در مجموع، با گسترش شهری و رشد و تمرکز صنایع از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷ مقادیر LST در برخی از مناطق شهری افزایش یافته و روند شهرنشینی و گسترش بخش صنایع و کارگاهی در اراک، اثرات قابل توجهی بر دمای سطحی و تغییرات مقیاس مکانی و زمانی الگوهای حرارتی حاکم بر شهر داشته است. یافته‌های تحقیق حاضر برای بهبود درک اثرات الگوی حرارتی شهری گام کوچکی است که می‌تواند اطلاعات مفیدی به منظور کاهش شرایط حرارتی نامطلوب در دسترس قرار دهد و برای مدیریت بلندمدت محیط زیست حرارتی به‌ویژه منطقه یک شهرداری اراک اتخاذ استراتژی مؤثرتری را با توسعه پوشش گیاهی و کنترل رشد و توسعه متمرکز صنایع در بخش شرق و شمال‌شرقی شهر فراهم کند.

را در طی دوره مورد مطالعه تجربه کرده است و عملاً درجه حرارت کمینه به‌ویژه در شب‌ها بالاتر رفته است. این امر می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت‌های صنعتی، رشد شهری، کاهش سرانه فضای سبز و افزایش سطوح روباز شهری بدون پوشش گیاهی باشد.

بررسی بلندمدت تغییرات مقیاس مکانی الگوهای دمایی نقشه‌های (LST) نیز نشان داد که، در برخی از مناطق شهری به‌ویژه در منطقه یک و سه شهرداری افزایش گرمای ناشی از رشد و توسعه صنایع و کارگاه‌های کوچک و بزرگ طی دو دهه اخیر و همجواری با محورهای مواصلاتی پرتردد با بار ترافیکی بالا، باعث جابه‌جایی و ایجاد الگوهای حرارتی بحرانی بر روی مناطق مذکور شده است.

در واقع برخلاف انتظار و تصور عمومی، الگوهای گرمایی حاد به جای تسلط بر نواحی مرکزی شهر، به سمت حواشی و کاربری‌های صنعتی اطراف شهر هدایت شده است. این ادعای محققین با نتایج حاصل از کار تحقیقی مشابه که جابه‌جایی الگوی حرارتی به سمت مناطق صنعتی شهر ژنگ شیان چین که توسط (Yang et al, 2020: 826) به اثبات رسیده بود و تغییرات مکانی و هدایت الگوی حرارتی به سمت منطقه تازه تأسیس صنعتی شهرک ایب در استان اوریسا در هندوستان که توسط (Chakraborty et al, 2017: 307) شناسایی شده بود بررسی مقایسه‌ای شد و با نتایج محققین مذکور کاملاً مطابقت داشت. به‌طوری‌که، آن‌ها نیز نشان دادند که، رشد و توسعه مناطق صنعتی و کارگاهی در اطراف شهر به‌ویژه در شهرک صنعتی ژنگ شیان و ایب، باعث ایجاد و گسترش جزیره حرارتی با منشاء انسانی شده است. بنابراین، صحت تغییرات و گسترش مقیاس مکانی و زمانی الگوهای دمایی به سمت بخش شرقی و شمال‌شرقی شهر اراک طی دوره مورد مطالعه تأیید گردید.

نتیجه بررسی مساحت طبقات دمای شهر اراک طی دوره مورد مطالعه نشان داد که، بر میزان مساحت پهنه طبقه سوم دمایی با متوسط دمای بالای ۳۹ درجه سانتی‌گراد افزوده شده است. این طبقه دمایی همواره برای ساکنین

منابع و مأخذ

دکتر امیرحسین حلیان و مشاوره دکتر نادر پروین، دانشگاه پیام‌نور مرکز سفز، ص ۱۷۵.

10- Chakraborty, T.; Lee, X., (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 74: 269-280.

11- Chakraborty, T.; Sarangi, C.; Tripathi, S.N., (2017). Understanding Diurnality and Inter-Seasonality of a Sub-tropical Urban Heat Island. *Boundary-Layer Meteorology*, NO 2. Vol. 163: 287-309.

12- Cracknell, A.P., (1997). The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *Geological Magazine*, Vol. 134: pp. 877 - 883

13- Huang, Q.; Lu, Y., (2015). The Effect of Urban Heat Island on Climate Warming in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, NO 8. Vol. 12: PP. 8773-8789.

14- Laosuwan, T.; Sangpradit, S., (2012). Urban heat island monitoring and analysis by using integration of satellite data and knowledge based method. *International Journal of Development and sustainability online*. NO 1. Vol. 2: PP. 99-110.

15- 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*. NO.3. Vol.7. PP. 1535-1552.

16- Moran. M.S.; Clarke, T.R.; Inoue. Y.; Vidal, A., (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. . NO 3. Vol. 49: PP. 246-263.

17- Prason Singh.; Barath Mahadevan.; Arindam Datta.; Vinay Shankar Prasad Sinha.; Neha Pahuja., (2017). Heat Island Effect in an Industrial Cluster - Identification, Mitigation and Adaptation. *The Energy and Resources Institute (TERI)*. New Delhi. India.

۱- حجازی‌زاده، پروین؛ زهرا، نادر (۱۳۸۸). بررسی تغییرات دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر. پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، سال اول، شماره ۱، صص ۵۶-۴۳.

۲- حلیان، کیخسروی کیانی؛ امیرحسین، محمدصادق (۱۳۹۵). واکاوی ورودش‌های مکانی دما در حوضه زاینده‌رود به کمک سنجنده مودیس. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۸. شماره ۳: (پیاپی ۹۷). صص ۴۱۱-۳۹۹.

۳- سلطانی، زهرا (۱۳۹۵). شناسایی و تحلیل جزیره حرارتی در شهر شیراز با استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور. دانشگاه پیام نور مرکز اصفهان، پایان‌نامه ارشد.

۴- صادقی‌نیا، علیجانی، ضیائیان؛ علی، بهلول، پرویز (۱۳۹۱). تحلیل فضایی - زمانی جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از سنجنش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۴: صص ۱۷-۱.

۵- علوی‌پناه، سیدکاظم (۱۳۸۲). کاربرد سنجنش‌ازدور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۱۷۰.

۶- علیجانی، بهلول (۱۳۹۶). محاسبه شدت جزیره حرارتی براساس هندسه شهری مورد مطالعه: محله کوچه‌باغ شهر تبریز، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال چهارم، شماره ۳: صص ۱۱۲-۹۹.

۷- مرادی، مهربان‌ساعی، سرکارگردکانی؛ فرزاد، رضا، علی (۱۳۹۳). پایش دمای سطح زمین (LST) با استفاده از تصویربرداری MODIS (مطالعه موردی استان تهران). همایش ژئوماتیک ژئوماتیک ۱۳۹۳، تهران.

۸- موسوی بایگی، اشرف، فرید حسینی، میان‌آبادی؛ محمد، بتول، علیرضا، آمنه. (۱۳۹۱). بررسی جزیره حرارتی شهر مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نظریه فرکتال. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱: صص ۴۹-۳۵.

۹- تقیب‌زاده، رویا. (۱۳۹۸). تحلیل تغییرات مکانی- زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک با پردازش تصاویر ماهواره‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته اقلیم‌شناسی، به راهنمایی

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک ... / ۱۳۹

26- <http://archive.mrud.ir>

27- <http://glovis.usgs.gov>

28- <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

29- <https://www.shahrnegar.com>

18- Sin. H.T.; Chan N.W., (2004). The urban heat island phenomenon in Penang Island: Some observations during the wet and dry season. Bangui world Conference on Environmental Management; Facing Changing Conditions. September. 2004; Bangui, Malaysia; NO 1. Vol. 2: PP. 504-516.

19- Solecki, W.D.; Rosenzweig, C.; Parshall, L.; Pope, G.; Clark, M.; Cox, J.; Wiencke, M., (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, NO 6. Vol. 1: PP. 39-49.

20- Song, Y.; Wu, C., (2016). Examining the impact of urban biophysical composition and neighboring environment on surface urban heat island effect. Advances in Space Research, NO 1. Vol. 57: PP. 96-109.

21- Theeuwes, N. E.; Steeneveld, G.J.; Ronda, R.J.; Holtslag, A.A.M., (2017). A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. International Journal of Climatology, NO 1. Vol. 37: 443-454.

22- United States Environmental Protection Agency (2008). Reducing urban heat islands: Compendium of strategies (Report). PP. 7-12.

23- Walawender, J.P.; Szymanowaki, 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 Appl. Geophys. NO 6. Vol. 171: PP. 913-940.

24- Yang, H.; Xi, C.; Zhao, X.; Mao, P.; Wang, Z.; Shi, Y.; He, T.; Li Z., (2020). Measuring the Urban Land Surface Temperature Variations Under Zhengzhou City Expansion Using Landsat-Like Data. Remote Sensing. Vol. 12 : 801-828.

25- Yuan, F.; Bauer, M.E., (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery; Remote Sensing of Environment; RSE. NO 3. Vol. 106: PP. 375-386.

