

برآورد تلفیقی دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان با استفاده از

داده‌های سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra/Aqua

بهروز آباد^۱، برومند صلاحی^۲، کوهزاد رئیس‌پور^{۳*} و مسعود مرادی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۴. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۶/۲۹)

چکیده

دمای سطح زمین (LST) که حاصل اندرکنش جو سطح زمین است، به دلیل تأثیرپذیری از پوشش سطح زمین، رطوبت خاک، آلودگی، زبری سطح و اندرکنش این عوامل با هوا، به خوبی می‌تواند تغییرات شرایط گرمایی سطح زمین را آشکار کند. در پژوهش حاضر از داده‌های LST شب‌هنگام سنجنده مودیس هر دو ماهواره ترا و آکوا (MOD11C3 & MYD11C3) که از وبگاه <http://earthdata.nasa.gov> دریافت شد، برای برآورد LST در حوضه آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۹ استفاده شد. پس از فراهم‌سازی داده‌ها با گام‌های زمانی ماهانه و مکانی ۵ کیلومتر، محاسبات بر روی دو ماتریس ماهانه و فصلی انجام شد و به تهیه خروجی‌های آماری-فضایی منطبق با هدف تحقیق، در محیط نرم‌افزارهای ENVI، Excel و GIS اقدام شد. نتایج نشان داد: LST شب‌هنگام در حوضه آبریز جازموریان، طی دوره آماری مورد مطالعه حدود ۱°C افزایش یافته است. این افزایش در دمای کمینه بیش از افزایش در دمای بیشینه (افزایش بیشتر دمای دوره سرد سال در مقایسه با دوره گرم سال) بوده است. توزیع فضایی LST شب‌هنگام نیز، بیانگر دامنه گسترده‌ای از دماها از ۱۰°C- تا ۳۵°C+ است که بیشینه آن در مناطق پست و کم‌ارتفاع مرکزی و جنوبی و کمینه آن در ارتفاعات شمالی حوضه برآورد شد. همچنین برآورد فضایی ناهنجاری LST شب‌هنگام، ضمن تأیید روند افزایشی LST، بیشترین/کمترین ناهنجاری مثبت LST را به ترتیب در بخش‌های مرکزی و غربی/بخش‌های شرقی و ارتفاعات شمالی حوضه نشان داده است. به طور کلی مقادیر LST شب‌هنگام، به طور محسوسی از سال ۲۰۰۸ به بعد و به خصوص در ماه‌های مربوط به دوره سرد سال روند افزایشی داشته است. این شرایط می‌تواند به عنوان نمایه‌ای از تغییر اقلیم مورد توجه قرار گرفته و منجر به تغییر برخی از فراسنج‌های محیطی از قبیل رطوبت نسبی، تبخیر و تعرق، رطوبت سطح خاک، ماندگاری برف، دمای نقطه شبنم و انرژی بازتابی شبانه شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل فضایی، دمای سطح زمین، سنجنده مودیس، ناهنجاری دما، حوضه آبریز جازموریان.

۱. مقدمه

آسایشی انسان، منجر به مطالعه گسترده آن در علوم محیطی و جوی شده است (عطایی و فنایی، ۱۳۹۲). دمای هوا، دمای اندازه‌گیری شده در پناهگاهی با ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متر تعریف می‌شود، اما دمای سطح زمین (LST) سنجش از دوری، دمای رادیومتریک از سطح زمین است که بیانگر یک پارامتر فیزیکی متفاوت از دمای هوا می‌باشد؛ با این وجود این دو متغیر می‌توانند همبستگی قوی داشته باشند (جین و دیکسون، ۲۰۱۰). دمای سطح زمین به فرایندهای رویه زمین از قبیل پوشش زمین، آلودگی، رطوبت خاک، زبری سطح و اندرکنش این

امروزه در مواجهه با چالش‌های محیطی، بشر نیازمند اقدام فوری و هشداردهنده است. پنجمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) به طور آشکاری افزایش جهانی دمای هوا و سطح دریا و متعاقباً پیامدهای فاجعه‌بار آن از قبیل کاهش میزان برف و یخ قطبی، بالا رفتن سطح دریاها و به طور کلی افزایش فرین‌های آب‌وهوایی را بیان کرده است (IPCC، ۲۰۱۳). دما یکی از مهم‌ترین متغیرهای آب‌وهوایی است که تغییرپذیری آن به عنوان عاملی کلیدی در بسیاری از تغییرات زیست‌محیطی قلمداد می‌شود. همچنین تأثیرات انکارناپذیر دما در شرایط

(۲۰۱۱)، جنس سطح زمین، شرایط اقلیمی و آرایش فضایی متنوع از ویژگی‌های پوشش زمین را در افزایش یا کاهش دمای سطح زمین مؤثر قلمداد کرده‌اند. استون و همکاران (۲۰۱۲) تداوم افزایش دمای جهانی را تا حدودی ناشی از تغییر پوشش زمین دانستند. در طول روز، نواحی در سایه و نواحی در معرض تابش مستقیم خورشید می‌تواند یک اختلاف دمایی ۲۰ درجه‌ای داشته باشد. اما در شب چون سطح زمین به شکل یک سطح هم‌دما و یکنواخت عمل می‌کند، اختلاف دما نمود چندانی ندارد (وان و دوزیر، ۱۹۹۶). مسعودیان (۱۳۹۰) نشان داده‌است که در شب‌هنگام به‌علت عدم وجود تابش‌های موج کوتاه خورشیدی، دمای شبانه تحت کنترل تابش‌های بلند خروجی است. در تحقیق اوایلر و همکاران (۲۰۱۶)، ضمن اشاره به توانایی قابل توجه دمای شب‌هنگام سطح زمین در درون‌یابی دمای هوای شبانه، از این متغیر به‌دلیل تفکیک فضایی مناسب و نمایش تغییرات توپوکلیمایی، به‌عنوان یک پیش‌بینی‌کننده مناسب از دمای هوای کمینه در شب یاد شده‌است. همچنین، مشخص شد که دمای شب‌هنگام سطح زمین در مناطق با زمین‌های یکنواخت، بیشتر از الگوهای بیوفیزیکی مرتبط با پوشش زمین متأثر می‌شود. در مورد پایش دمای سطح زمین در ایران نیز، مطالعاتی انجام شده‌است. مرادی (۱۳۹۵) در پژوهشی با بررسی دمای سطح زمین ایران (۱۳۹۴-۱۳۸۱)، به این نتیجه رسیدند که خوشه‌های دمایی هماهنگی زیادی با ناهمواری‌ها و عرض جغرافیایی داشته؛ به‌طوری که خوشه‌های دمایی سرد و معتدل منطبق بر مناطق مرتفع‌تر در البرز و زاگرس و بلندی‌های داخلی کشور و خوشه‌های دمایی گرم و بسیار گرم نیز در نواحی پست عرض‌های جنوبی و بیابان‌های داخلی کشور گسترده شده‌اند. همچنین، واکاوی دمای شب‌هنگام سطح زمین در گستره ایران توسط احمدی و همکاران (۱۳۹۷) نمایانگر رخداد کمینه دمایی تا 20°C از دسامبر تا فوریه و در تبعیت کامل با الگوی ارتفاعات شمالی، غربی، شمال‌غرب و شمال‌شرق کشور است. از سوی دیگر، دمای بیشینه

عوامل با شرایط جوی حساس است (موستوی و همکاران، ۲۰۰۶؛ جین و دیکسون، ۲۰۱۰). در پژوهش شکبیا و همکاران (۱۳۸۸)، ضمن اشاره به نقش مهم داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در موضوعات محیطی و به‌ویژه آب‌وهواشناسی، دمای سطح زمین را به‌عنوان یکی از متغیرهای کاربردی در مطالعات کشاورزی و منابع آب قلمداد کردند. دمای سطح زمین همچنین به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در مطالعات هیدرولوژی، هواشناسی، اقلیم‌شناسی و محیطی مطرح است؛ زیرا این متغیر نتیجه ترکیب همه اندرکنش‌ها و همچنین شار انرژی بین جو و سطح زمین می‌باشد (وان و دوزیر، ۱۹۹۶؛ اندرسون و همکاران، ۱۹۹۷؛ ۲۰۱۱؛ ژو و همکاران، ۲۰۰۳؛ ونگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ لی و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه‌براین‌ها؛ یافته‌های مالک و همکاران (۲۰۰۸) حاکی از کارایی قابل توجه متغیر مذکور در مطالعات تغییرات جهانی برای تخمین بودجه تابشی و به‌عنوان یک کنترل‌کننده برای مدل‌های اقلیمی است؛ بنابراین شناخت دمای سطح زمین در طیف وسیعی از موضوعات علوم زمینی تا اقلیم‌شناسی شهری، تغییر اقلیم جهانی و اندرکنش‌های محیط‌انسان ضروری به‌نظر می‌رسد. متغیر دمای سطح زمین به جهت اهمیت در آشکارسازی تغییرات محیطی، مبنای مطالعات پرشماری در جهان شده‌است. دیسانایاک (۲۰۲۰) و داس و داس (۲۰۲۰)، ضمن اشاره به نقش مهم تغییرات کاربری زمین و توسعه شهری در افزایش دمای سطح زمین، بیشینه مقادیر این متغیر را در نواحی مسکونی و ساختمانی مکان‌یابی کردند. پژوهش‌شن و همکاران (۲۰۲۰) نیز، نشان‌دهنده تأثیرپذیری قابل توجه دمای سطح زمین از تغییرات پوشش زمین می‌باشد؛ به‌طوری که تغییر پوشش زمین از مرداب به ناحیه ساخت و ساز می‌تواند دمای روزهنگام و شب‌هنگام سطح زمین را افزایش دهد. همچنین تبدیل مرداب به زمین کشاورزی سبب افزایش دمای سطح زمین در روزهنگام در اکثر ماه‌ها و در شب‌هنگام در فصل فاقد رویش شده است. مطالعات گوها و همکاران (۲۰۲۰) و ژو و همکاران

یک حوضه آبریز به دلیل تأثیرپذیری آشکار از تغییرات عوامل محیطی، ارزشمند و حائز اهمیت است. معمولاً در بحث تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، بیشتر جهت‌گیری‌ها به برآورد دمای روزهنگام معطوف می‌شود. در صورتی که به موازات بررسی دمای روزهنگام، برآورد دمای شب‌هنگام نیز می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد این موضوعات فراهم کند. حوضه آبریز جازموریان با شرایط خاص زیست‌محیطی و قابلیت‌های بسیارخوب کشاورزی، به ویژه در نیمه جنوبی حوضه به دلیل استمرار کشت در فصول چهارگانه، نقش مهمی در پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی منطقه ایفا می‌کند. از آنجایی که تولیدات کشاورزی به شدت از تغییرات حرارتی سطح زمین و به خصوص دمای شبانه تأثیر می‌پذیرند، بنابراین مطالعه دمای شب‌هنگام سطح زمین به عنوان یکی از فاکتورهای محیطی مؤثر بر اکوسیستم حوضه، علاوه بر ارائه اطلاعات ارزشمند از روند گذشته متغیر مذکور، می‌تواند کمک شایانی به برنامه‌ریزی مربوط به شرایط محیطی حوضه در آینده کند. در همین راستا، در پژوهش پیش‌رو واکاوی دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره‌های ترا و آکوا (۲۰۱۹-۲۰۰۳) مورد کنکاش قرار گرفته است.

۲. داده‌ها و روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز جازموریان با گستره‌ای حدود ۶۹/۶۰۰ کیلومتر مربع و در مختصات $26^{\circ} 35' N$ تا $29^{\circ} 35' N$ و $56^{\circ} 15' E$ تا $61^{\circ} 25' E$ به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های آبریز در جنوب شرق کشور (استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان) قرار دارد (شکل ۱). پایین‌ترین نقطه حوضه تقریباً ۳۵۰ متر (تالاب جازموریان) و مرتفع‌ترین نقطه نیز ۴۴۰۰ متر (ارتفاعات شمال حوضه) ارتفاع دارند. شکل حوضه بیضوی بوده و در مرکز آن باتلاقی وجود دارد که به عنوان محل تجمع تمام آب‌های

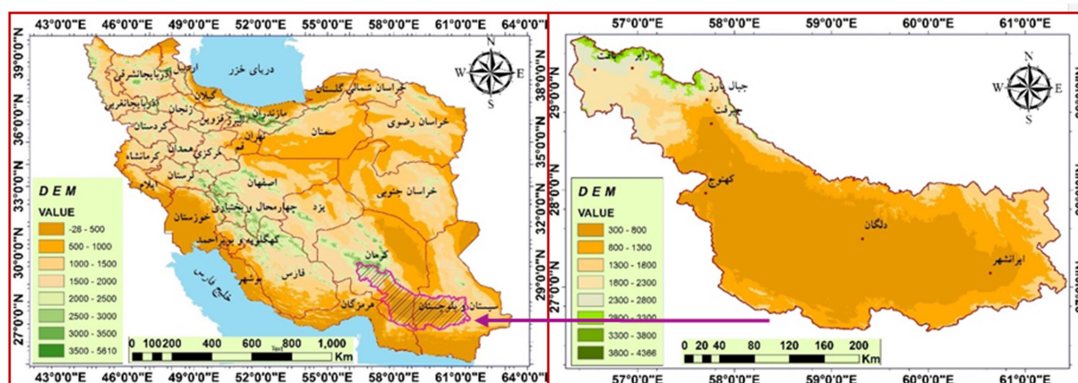
شب‌هنگام (آوریل تا سپتامبر) بر بخش بزرگی از نواحی گرمسیری کشور حاکم است. امروزه پیشرفت‌های علمی روزافزون، زمینه دستیابی به داده‌های با کیفیت بالای تغییرات محیطی و پیدایش ابزارهای جدید تجزیه و تحلیل داده‌ها را فراهم کرده است. پیش‌بینی‌های قابل اعتماد از تغییرات جهانی دمای سطح زمین، برای آگاهی بخشی به تصمیم‌گیران در کاستن پیامدها و تأمین امنیت غذای جامعه جهانی بسیار مفید است (کوهلر و کوئزِر، ۲۰۲۰). بنابراین شگردهای سنجنش از دور، ابزاری نیرومند در پایش زمانی-مکانی تغییرات کاربری زمین و متعاقباً تأثیرات آن بر روی دمای سطح زمین هستند (مصطفی و همکاران، ۲۰۱۹). داده‌های سنجنش از دور ماهواره‌ای می‌توانند پوشش جهانی و طولانی مدت از متغیرهای محیطی فراهم کنند. بنابراین برای تعیین دمای سطح زمین به خصوص زمین‌های ناهموار و صعب‌العبور مانند سیستم کوهستانی هیمالیا مفید بوده است (دار و همکاران، ۲۰۱۹). در میان سنجنده‌های متعدد، سنجنده مودیس یکی از مهم‌ترین منابع داده‌های محیطی می‌باشد که از سال ۱۹۹۹ شروع به تصویربرداری از سطح زمین در تفکیک فضایی حداقل ۲۵۰ متر و تفکیک زمانی روزانه با طیف گسترده‌ای از باندهای طیفی کرده است (فنگ و لاکشمی، ۲۰۱۴). نتایج حاصل از مطالعه گنت و همکاران (۲۰۱۹) در خصوص اعتبارسنجی داده‌های دمای سطح زمین سنجنده مودیس، بیانگر مقدار خطای مطلق ۰/۳۷ کلون برای مقادیر روزهنگام و ۰/۷۴ کلون برای مقادیر شب‌هنگام بوده است. همچنین میانگین انحراف استاندارد دمای سطح زمین، ۱/۵۳ کلون برای روزهنگام و ۱/۲۱ کلون برای شب‌هنگام برآورد شد. هرچند تاکنون یک پژوهش نسبتاً جامع در مورد دمای شب‌هنگام سطح زمین در ایران توسط احمدی و همکاران (۱۳۹۷) انجام شده است، اما از آن جایی که پژوهش مذکور به دلیل گستره وسیع ناحیه مورد مطالعه، به صورت کلی به بررسی موضوع پرداخته است، بنابراین انجام تحقیقات دیگری در مقیاس‌های منطقه‌ای، محلی و به طور خاص در محدوده

ورودی از ارتفاعات اطراف است. رودخانه هلیل رود در شمال و رودخانه بمپور در شرق مهم‌ترین رودخانه‌های تغذیه کننده این حوضه می‌باشند. میزان بارندگی سالانه با بیش از ۲۰۰ میلی‌متر در بخش مرتفع شمالی، ۱۵۰ میلی‌متر در بخش شرقی و کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در بخش جنوب غربی حوضه متغیر است. از نظر زمین ساختار زمین‌شناسی، جنس سنگ‌ها در این حوضه از رس، سیلت و ماسه و همچنین سازندهای تبخیری و آذرین تشکیل شده است (کرینسلی، ۱۳۸۳). اقلیم حاکم بر حوضه آبریز جازموریان از نوع بیابانی بوده و میانگین دمای سالانه آن حدود 21°C می‌باشد. موقعیت جغرافیایی خاص و تفاوت سطوح ارتفاعی قابل ملاحظه در بخش‌های مختلف حوضه، منجر به تفاوت‌های مکانی دما در این حوضه می‌شود. این ویژگی از دمای کمینه پایین‌تر از صفر $^{\circ}\text{C}$ در ارتفاعات شمالی تا دمای بیشینه بالاتر از 50°C در ناحیه پست داخلی مشهود است (شکل ۱).

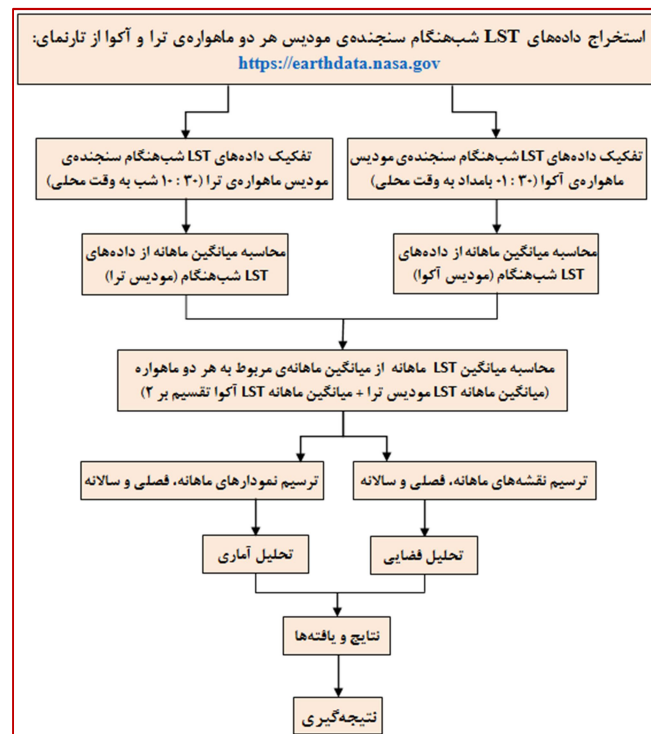
۲-۲. داده‌های پژوهش

سنجده مودیس یکی از سنجده‌های پرکاربرد می‌باشد که بر روی دو ماهواره ترا و آکوا به عنوان بخشی از سیستم اطلاعاتی زمین مستقر شده است. این دو ماهواره در طی یک تا دو روز از سراسر سطح کره زمین، داده‌هایی را در ۳۶ باند طیفی و در محدوده $0.4-14.4$ میکرومتر از طیف الکترومغناطیس برداشت می‌نمایند (فنگ و لاکشمی، ۲۰۱۴). طی سال‌های اخیر استفاده از داده‌های سنجده

مودیس برآورد خوبی از دمای سطح زمین در تفکیک مکانی ۵ کیلومتر فراهم کرده است. همچنین مشخص شده است که دمای سطح زمین سنجده مودیس، تفکیک بالاتری نسبت به سایر سنجده‌های مشابه دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۴). در این تحقیق نیز، جهت برآورد دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان از داده‌های مربوط به دمای شب‌هنگام سطح زمین سنجده مودیس ترا (MOD11C3) و آکوا (MYD11C3) با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر که از تارنمای <https://earthdata.nasa.gov> دریافت شد، برای دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۰۳ استفاده شد. زمان گذر ماهواره ترا از شمال به جنوب (ساعت ۲۲:۳۰ شب) و زمان گذر ماهواره آکوا از جنوب به شمال (ساعت ۰۱:۳۰ بامداد) می‌باشد. در این پژوهش دمای شب‌هنگام سطح زمین برآورد شده، حاصل میانگین دمای هر دو برداشت سنجده مودیس ماهواره‌های ترا و آکوا به وقت محلی می‌باشد (شکل ۳). دلیل استفاده از دو برداشت شب‌هنگام این سنجده، میانگین‌گیری از آنها برای دستیابی به برآورد دقیق‌تری از دمای شب‌هنگام سطح زمین می‌باشد. زیرا برداشت ساعت ۲۲:۳۰ مقادیر کمتر و برداشت ساعت ۰۱:۳۰ بامداد نیز، مقادیر بیشتری از شرایط میانگین را نشان داده و هر کدام به تنهایی نمی‌تواند بیانگر دمای واقعی شب‌هنگام باشد؛ بنابراین اقدام به میانگین‌گیری از داده‌های حاصل برداشت هر دو ماهواره کرده تا نتایج دقیق‌تری از شرایط دمای شب‌هنگام سطح زمین ارائه شود (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز جازموریان در گستره‌ی ایران.



شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام تحقیق.

۳-۲. روش پژوهش

کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، توابع پایه شعاعی و وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) مورد ارزیابی قرار گرفت. روش IDW به دلیل این که از خطای MAE، RMSE کمتر و R^2 بالاتر نسبت به سایر روش‌ها برخوردار بود، برای برآورد فضایی دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان انتخاب شد. نقشه‌های آنومالی نیز با استفاده از رابطه (۱) که توسط سلاما و همکاران (۲۰۱۲) برای برآورد آنومالی دمای سطح زمین ارائه شده است، استخراج شد.

$$LST(a) = \frac{(lst - \mu)}{\sigma^2} \quad (1)$$

که در این رابطه $LST(a)$ بیانگر آنومالی، LST مقدار دمای شب‌هنگام سطح زمین یک‌دوره (سال، فصل و ماه)، μ میانگین بلندمدت LST در طول دوره آماری متناظر و σ^2 واریانس می‌باشد. لازم به ذکر است در این رابطه مبنای محاسبات پیکسل (یاخته) بوده است که آنومالی هر پیکسل بر مبنای مقادیر میانگین و واریانس همان پیکسل در طول دوره آماری (۲۰۱۹-۲۰۰۳) محاسبه شده است.

جهت بررسی تصادفی بودن روند در سری‌های زمانی از

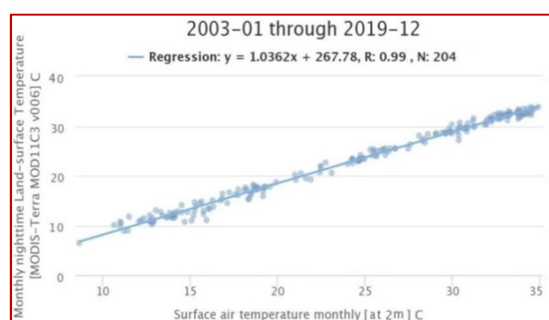
پس از دریافت داده‌های موردنیاز با فرمت‌های NC و CSV، عملیات کنترل کیفی و پیش‌پردازش بر روی آنها اعمال و برای ورود به محیط نرم‌افزارهای GIS، ENVI و Excel آماده شد. پس از فراهم‌سازی فرآورده‌ها با گام‌های زمانی ماهانه و مکانی 5×5 کیلومتر، محاسبات بر روی ماتریس ماهانه به ابعاد 2784×204 (۲۰۴ معرف تعداد مشاهدات در ماه‌های پیاپی از ۱۷ سال مورد مطالعه 17×12) و 2784 معرف تعداد نقاط شبکه‌بندی شده با قدرت تفکیک مکانی افقی 5×5 کیلومتر در حوضه آبریز جازموریان) و فصلی به ابعاد 2784×68 (۶۸ معرف تعداد مشاهدات در فصول پیاپی 17×4) است. میانگین ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین از میانگین LST شبانه متعلق به هر ماه و میانگین فصلی از میانگین سه ماه مربوط به هر فصل استخراج شد. به لحاظ مکانی نیز، مقادیر هر پیکسل شرایط میانگین LST مربوط به هر سری زمانی (ماهانه، فصلی و بلندمدت دوره آماری) است. پس از فراهم‌سازی داده‌ها، جهت انجام فرایند درونیابی روش‌های مختلف درونیابی زمین‌آماري از قبیل روش

ارتفاع ۲ متری) ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک جیرفت (۲۷° ۱۲' N و ۴۲° E) و ایرانشهر (۲۸° ۳۵' N و ۵۷° ۴۸' E) استفاده شد. در گام بعدی مقادیر LST مربوط به دو پیکسل که ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی بر روی آنها واقع شده‌اند، برآورد شد. سپس مقادیر همبستگی بین دو پایگاه مورد استفاده، در مقیاس ماهانه (۲۰۴ ماه) محاسبه شد. یافته‌ها نشان داد؛ مقادیر همبستگی میان LST برآورد شده توسط سنجنده MODIS ماهواره Terra با داده‌های دمای هوا در ارتفاع ۲ متری سطح زمین در هر دو ایستگاه جیرفت و ایرانشهر حدود ۰/۹۹ (R=0.99)، و ماهواره Aqua در ایستگاه جیرفت ۰/۹۷ (R=0.97) و ایرانشهر ۰/۹۸ (R=0.98) بوده‌است (شکل ۳). همبستگی میان مقادیر LST سنجنده MODIS و ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی، در مقیاس ماهانه از ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ متغیر بوده‌است. این شرایط بیانگر وجود همبستگی بسیار قوی میان داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی بوده و صحت داده‌های LST سنجنده MODIS را در راستای برآورد دمای شب‌هنگام سطح زمین تأیید می‌کند.

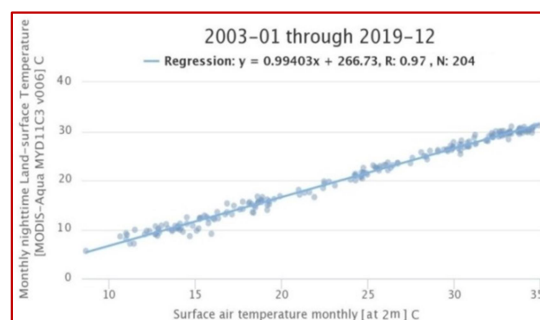
آزمون آماری گرافیکی من کندانال استفاده شد (عساکره، ۱۳۹۰). روند داده‌ها با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی در طی دوره آماری برازش شد و با استفاده از آزمون تی‌تست (T-Test)، معنی‌دار بودن روند آزمون شد (لیو و چن، ۲۰۰۰). در گام نهایی نیز، جهت تحلیل زمانی- فضایی دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه مورد مطالعه، نتایج به صورت نقشه، گراف و نمودار ارائه شد و به واکاوی یافته‌ها برای دست‌یابی به هدف پژوهش پرداخته شد.

۴-۲. اعتبارسنجی داده‌ها

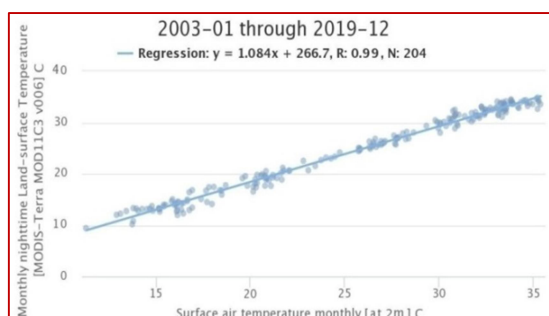
اعتبارسنجی داده‌های سنجنده از دور یکی از مهم‌ترین الزامات قبل از ارائه یافته‌های حاصل از به‌کارگیری داده‌ها در حوزه‌های مطالعاتی مختلف است. به‌منظور نشان دادن دقت و صحت‌سنجی این داده‌ها، نیاز به استفاده از داده‌های زمینی وجود دارد. در این پژوهش نیز، جهت صحت‌سنجی داده‌های دمای شب‌هنگام سنجنده MODIS از میانگین ماهانه داده‌های اندازه‌گیری شده دمای هوا (در



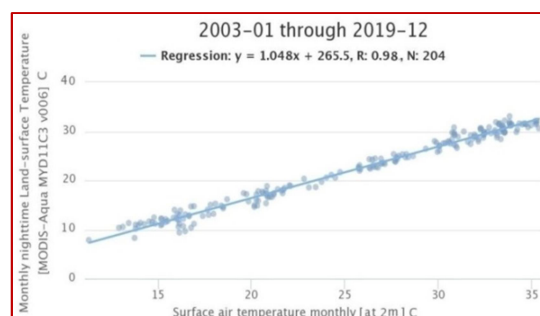
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

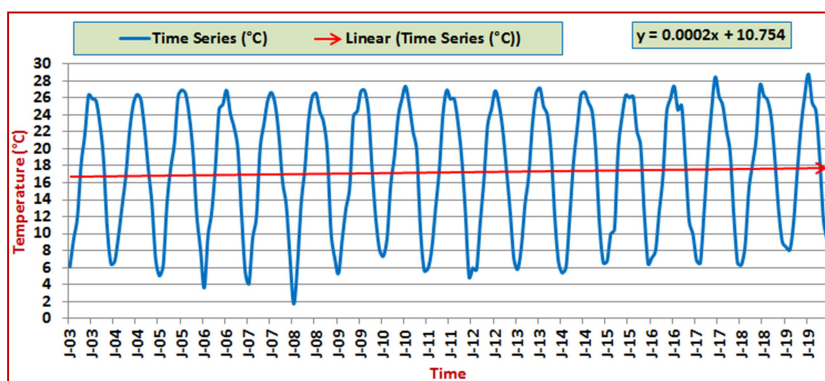
شکل ۳. نمودار پراکندگی بین میانگین ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین سنجنده مودیس و میانگین ماهانه دمای شب‌هنگام هوا در ارتفاع ۲ متری در دو ایستگاه هواشناسی جیرفت و ایرانشهر؛ (الف) داده‌های مودیس آکوا و (ب) مودیس ترا با دمای هوا در ایستگاه هواشناسی جیرفت و (ج) داده‌های مودیس آکوا و (د) مودیس ترا با دمای هوا در ایستگاه هواشناسی جیرفت.

۳. نتایج و بحث

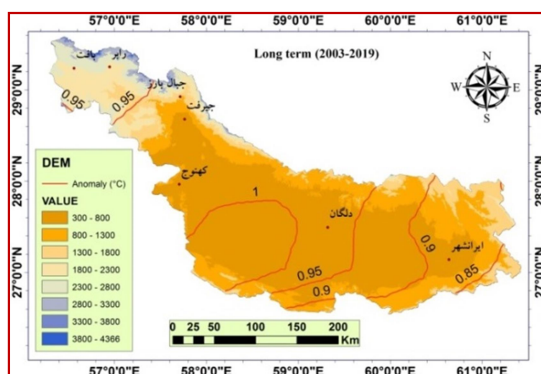
۳-۱. تحلیل بلندمدت

روند سری زمانی ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین حوضه آبریز جازموریان بر اساس برونداد داده‌های سنجنده مودیس در طول دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۰۳ در شکل ۴ آمده است. همان‌طوری که در این شکل مشخص است میانگین دمای سطح زمین شب‌هنگام از تعداد ۲۰۴ ماه متوالی در این حوضه ترسیم شده است. بر اساس نتایج، میانگین دمای شب‌هنگام سطح زمین در سری زمانی مورد بررسی از نوسانات زیادی برخوردار بوده است. در سری زمانی مورد بررسی، ماه‌های جولای ۲۰۱۹ با $(28/81^{\circ}\text{C})$ و جولای ۲۰۱۷ با $(28/45^{\circ}\text{C})$ بیشینه دمای شب‌هنگام سطح زمین و ماه‌های ژانویه ۲۰۰۸ با $(1/72^{\circ}\text{C})$ و ژانویه ۲۰۰۶ با $(3/60^{\circ}\text{C})$ کمینه آن را به خود اختصاص داده‌اند. مقادیر این متغیر به‌طور محسوسی از سال ۲۰۰۸ به‌بعد، افزایش بیشتر دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه (به‌ویژه در ماه‌های مربوط به دوره سرد سال) را نشان داده است. این امر به‌طور آشکاری بیانگر سیر دمای شبانه دوره سرد سال به‌سمت الگویی گرم‌تر می‌باشد. این شرایط می‌تواند به‌عنوان نمایه‌ای از تغییر اقلیم موردتوجه قرار گرفته و منجر به تغییر برخی از فراسنح‌های محیطی از قبیل رطوبت نسبی، تبخیر و تعرق، رطوبت سطح خاک، ماندگاری برف، دمای نقطه شبنم و انرژی بازتابی شبانه شود. بررسی خط روند بیانگر افزایش دمای شب‌هنگام در طول دوره آماری بوده به‌نحوی که میانگین آن در اواخر دوره در حدود 1°C افزایش یافته است. توزیع فضایی بلندمدت

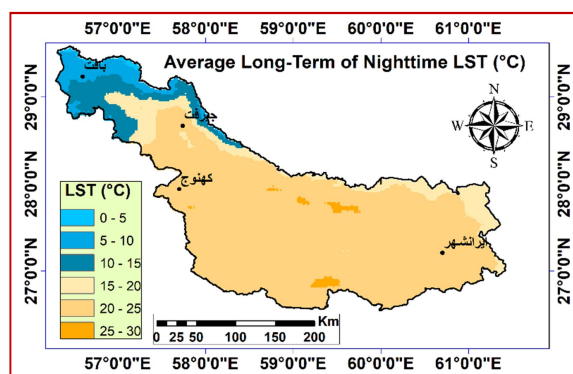
دمای شب‌هنگام سطح زمین در شکل ۵-الف نمایانگر رخداد بیشینه دما تا 30°C در بخش‌های مرکزی و جنوبی و کمینه دما از 5°C - در ناحیه مرتفع شمال حوضه است. وسعت قابل‌ملاحظه حوضه و تنوع سطوح ارتفاعی منجر به رفتار بسیار متفاوت دمای شب‌هنگام سطح زمین شده و تفاوت مکانی میانگین بلندمدت دما را در این حوضه به حدود 30°C رسانده است. بررسی توزیع مکانی دمای شب‌هنگام سطح زمین، به روشنی تأثیر دو عامل ارتفاع و عرض جغرافیایی را در پراکنش فضایی این متغیر در حوضه آبریز جازموریان نشان داده است. شکل ۵-ب نقشه توزیع فضایی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین را در این حوضه نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است، ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در کل حوضه مثبت بوده و مقادیر آن از حداقل $0/85^{\circ}\text{C}$ در جنوب‌شرق تا حداکثر 1°C در جنوب‌غرب متغیر است. افزایش بیشتر ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین را در جنوب‌غرب حوضه، می‌توان به اثرگذاری بیشتر عوامل محیطی و اقلیمی در راستای تشدید شرایط خشکی نسبت داد. از جمله این عوامل، می‌توان به رخداد خشکسالی‌های مداوم و به دنبال آن کاهش سطح آب هامون جازموریان و تضعیف پوشش گیاهی این حوضه اشاره کرد که در پژوهش موسوی راد و همکاران (۱۳۹۸)، این موضوع مشخص شده است. نتایج آنان حاکی از کاهش سطح آب هامون جازموریان، افزایش گستره تحت پوشش خشکسالی و همچنین کاهش پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۶ بوده است.



شکل ۴. سری زمانی و روند دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).



(ب)



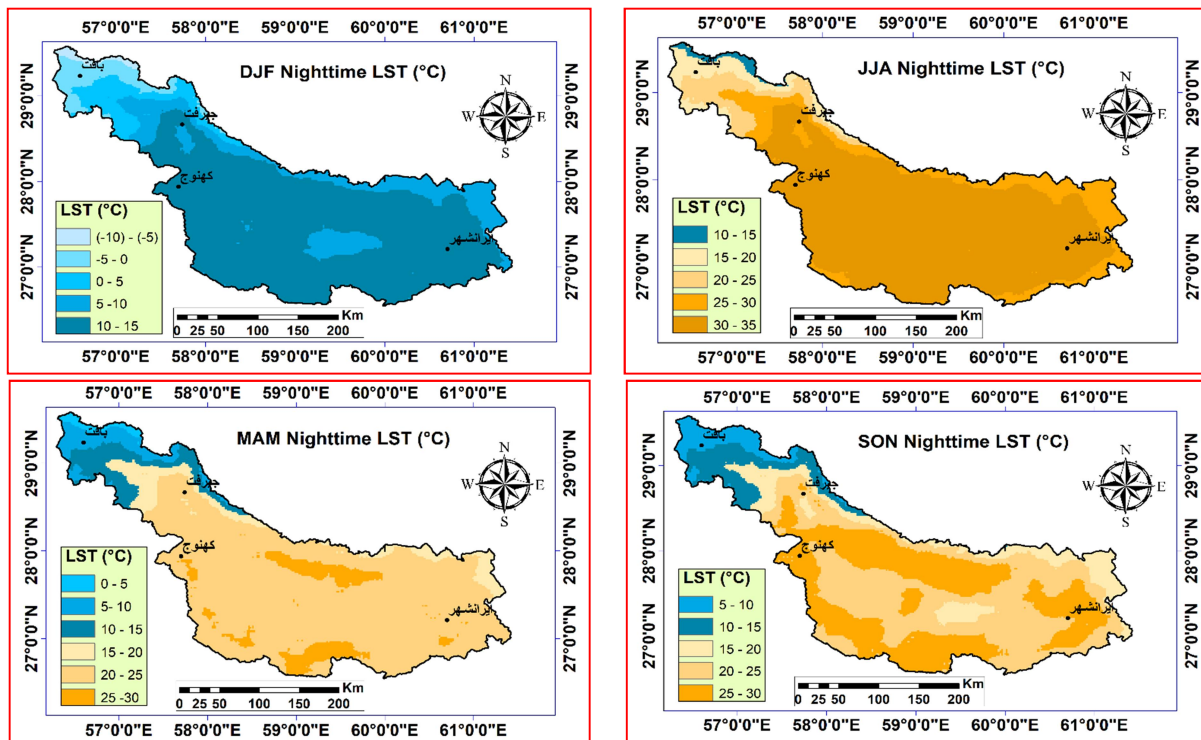
(الف)

شکل ۵. توزیع فضایی (الف) و ناهنجاری (ب) بلندمدت دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه‌ی آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).

۲-۳. توزیع فضایی فصلی

شکل ۶، توزیع فضایی دمای شب‌هنگام سطح زمین را در فصول چهارگانه نشان می‌دهد. در فصل زمستان (ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه یا DJF) دمای شب‌هنگام سطح زمین نشان دهنده حاکمیت قوی سرمایش شبانه در حوضه مورد مطالعه می‌باشد؛ به‌طوری که در بلندی‌های شمالی دمای منفی و در نیمه جنوبی حوضه دما از 15°C بالاتر نرفته است. دلیل رخداد این شرایط را از یک سو می‌توان به تشدید سرمای تابشی در کوهستان‌های بلند و زمین‌های خشک و فاقد پوشش گیاهی نسبت داد که در همین راستا بر اساس تحقیق بذرافشان و رحیمی (۱۳۹۳)، با توجه وابستگی این نوع سرما به شرایط محلی و توپوگرافی، امکان رخداد آن در تمام نقاط کشور محتمل می‌باشد. از سوی دیگر، الگوهای سرمای زمستانه نظیر نفوذ پرفشار سبیری نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند که در همین ارتباط پژوهش عطایی و یوسفی فر (۱۳۹۴) ضمن اشاره به ورود این توده هوا به استان کرمان در فصل زمستان، از آن به‌عنوان یکی از عوامل مهم تغییرپذیری دما در این موقع از سال یاد کرده است. در فصل بهار (ماه‌های مارس، آوریل و می یا MAM)، توزیع دمای سطح زمین شب‌هنگام الگویی معتدل و بهاری را نشان می‌دهد. در این فصل تقریباً ۷۰ درصد از وسعت حوضه، دمای 15°C - 25°C را نشان می‌دهد؛ با این وجود، دمای پایین همچنان در بلندی‌های شمالی این حوضه حاکمیت دارد. نکته

قابل توجه در این فصل، وجود دو ناحیه با دمای 25°C - 30°C در میان بخش‌های مرکزی و شرقی و همچنین منتهی‌الیه جنوب این حوضه می‌باشد. این دمای بالای را می‌توان به دلیل تأثیرپذیری از گرمای زود هنگام فصل تابستان در اواخر این فصل نسبت داد. توزیع دمای شب‌هنگام سطح زمین در فصل تابستان (ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست یا JJA) بیانگر حاکمیت الگوی دمایی بسیار گرم می‌باشد. زیرا که بیش از ۸۰ درصد از گستره حوضه را دمای 25°C - 35°C پوشش داده است؛ با این وجود، علی‌رغم حاکمیت شب‌های گرم در بخش وسیعی از حوضه، اما همچنان در ارتفاعات شمالی دمای نسبتاً معتدل و بهاری (10°C - 25°C) به‌وقوع می‌پیوندد. در فصل پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر یا SON)، ضمن این که دمای شب‌هنگام در نواحی مرتفع شمال و تا حدودی شرق حوضه، به دلیل سرمایش ناشی از بازتاب شبانه روند کاهشی به خود گرفته است. ولی در بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه همچنان دمای بالا (تا 30°C) حاکمیت دارد. نکته قابل توجه در این فصل، وجود یک جزیره حرارتی سرد با دامنه دمای 15°C - 20°C در میان دمای بالای ناحیه مرکزی می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به نوع پوشش زمین و به‌طور خاص سطوح ماسه‌ای نسبت داد؛ چرا که در شب‌هنگام سطوح مذکور با از دست دادن سریع گرمای خود به علت ظرفیت حرارتی پایین، افت دمای بیشتری نسبت به نواحی پیرامونی نشان می‌دهند.

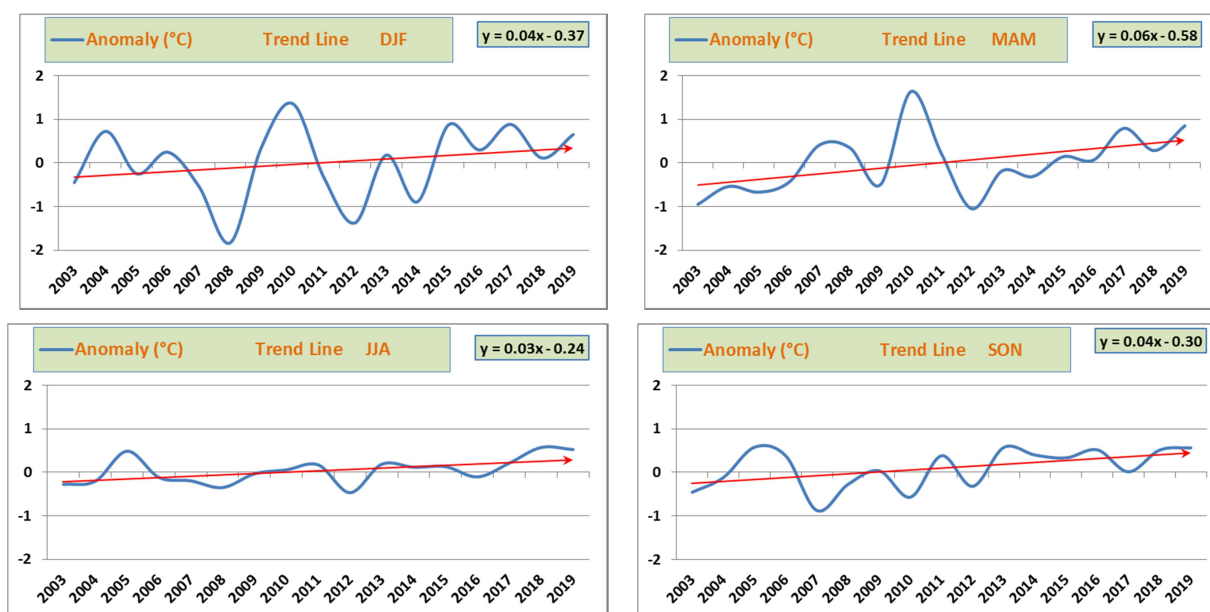


شکل ۶. توزیع فضایی دمای فصلی شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).

۳-۳. ناهنجاری فصلی

نمودار ناهنجاری دمای فصلی شب‌هنگام سطح زمین در شکل ۷ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فصل زمستان (DJF) بیشترین ناهنجاری مثبت با مقدار $+1/3^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۰ و بیشترین ناهنجاری منفی با مقدار $-1/8^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۸ اتفاق افتاد. در این میان گرچه مقادیر ناهنجاری از افت و خیزهای زیادی برخوردار بوده، اما به‌طور کلی روند آن در این فصل با افزایش مواجه بوده است. در فصل بهار (MAM) نیز، بیشترین ناهنجاری مثبت به مقدار $+1/6^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۰ صورت گرفت. بیشترین ناهنجاری منفی در این فصل در آخرین سال دوره یعنی بهار ۲۰۱۹ با مقدار $-1/5^{\circ}\text{C}$ رخ داده است. روند کلی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در فصل بهار همانند فصل زمستان افزایشی بوده و به‌خصوص در نیمه

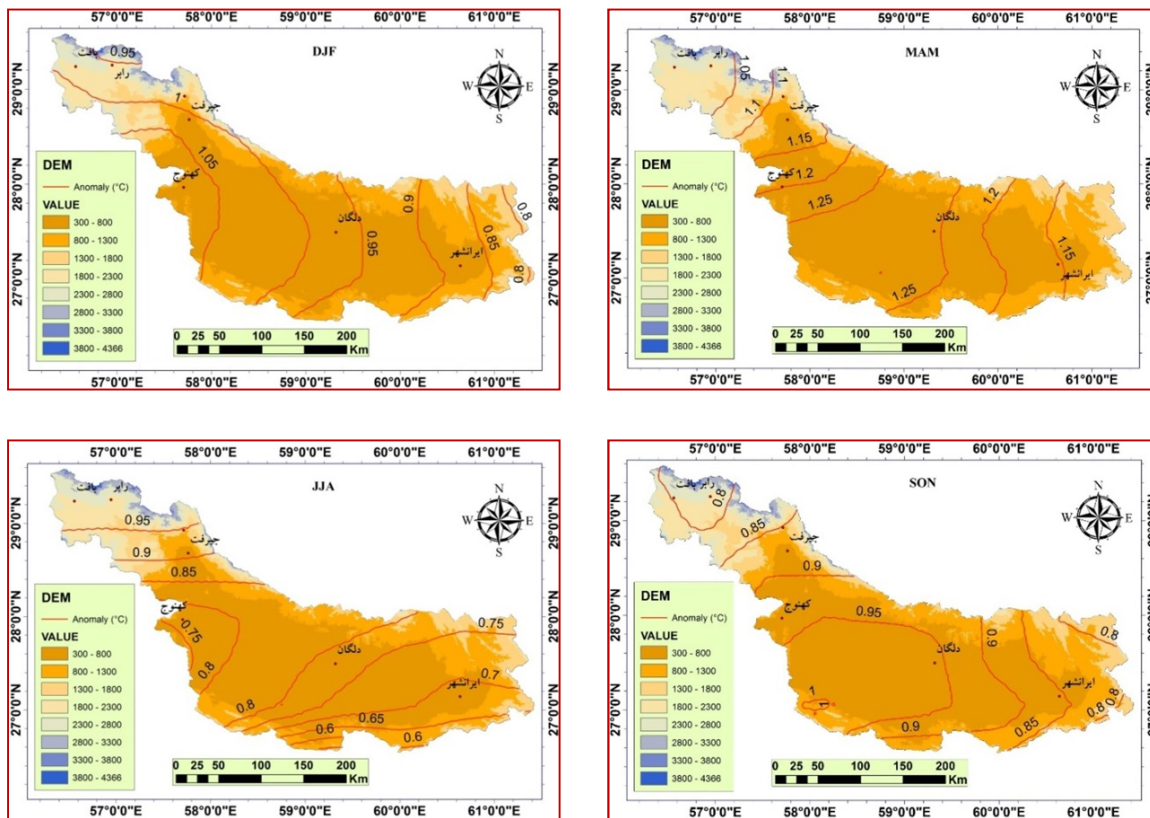
دوم دوره آماری (از سال ۲۰۱۰ به بعد) شیب بیشتری یافته است. در فصل تابستان (JJA)، بیشترین ناهنجاری مثبت/منفی به ترتیب با مقادیر $+0/48^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۵ و $-0/62^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۶ مشاهده شد. گرچه در این فصل، همانند دو فصل زمستان و بهار روند کلی ناهنجاری دما افزایشی بوده اما مقدار افزایش آن از شیب کمتری برخوردار بوده است. ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در فصل پاییز، همانند دیگر فصول تغییرات قابل توجهی را نشان می‌دهد. در این میان، مقادیر بیشینه ناهنجاری مثبت مربوط به سال ۲۰۰۵ ($+0/58^{\circ}\text{C}$) و بیشترین ناهنجاری منفی نیز در سال ۲۰۰۷ به مقدار $-0/8^{\circ}\text{C}$ رخ داده است. روند کلی ناهنجاری دما در این فصل نیز رفتاری افزایشی داشته است.



شکل ۷. ناهنجاری فصلی بلندمدت دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).

ناهنجاری (با $+1^{\circ}\text{C}$) در بخش‌های غربی و مرکزی و کمینه ناهنجاری (با $+0/8^{\circ}\text{C}$) در بخش‌های جنوب‌شرقی و بلندی‌های شمالی حوضه مشاهده شده است. رخداد بیشینه ناهنجاری‌ها در بخش‌های مرکزی و غربی حوضه را می‌توان به کاهش پوشش گیاهی و متعاقباً افزایش حساسیت و شکنندگی محیطی این مناطق در اثر خشکسالی و کمبود بارش نسبت داد. این یافته‌ها با نتایج تحقیق اسکندری دامنه و همکاران (۱۳۹۸) انطباق دارد. آنها در پایش خشکسالی غرب حوضه آبریز جازموریان با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI نتیجه گرفتند که طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ این بخش از حوضه به شدت از خشکسالی متأثر شده است. بررسی ضریب تغییرات در فصول مورد مطالعه حاکی از وجود اختلاف در میان آنها می‌باشد. فصل زمستان با $+0/86^{\circ}\text{C}$ از بیشترین و فصل تابستان با $+0/31^{\circ}\text{C}$ از کمترین ضریب تغییرات برخوردار بوده‌اند. فصول بهار و پاییز نیز به ترتیب با $+0/74^{\circ}\text{C}$ و $+0/45^{\circ}\text{C}$ ضریب تغییرات مواجه بودند.

توزیع فضایی ناهنجاری فصلی دمای شب‌هنگام سطح زمین در طی دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۳ در شکل ۸ آمده است. بر اساس این شکل، در فصل زمستان (DJF) بیشترین کمترین ناهنجاری دمایی به ترتیب با مقادیر $+1/05^{\circ}\text{C}$ در نیمه غربی و $+0/8^{\circ}\text{C}$ در جنوب‌شرق حوضه رخ داده است. در فصل بهار (MAM) گستره زیادی از حوضه ناهنجاری چشم‌گیری را نشان می‌دهد. به طور کلی در این فصل بیشینه ناهنجاری با $+1/25^{\circ}\text{C}$ در نواحی مرکزی و کمترین ناهنجاری به با $+1/01^{\circ}\text{C}$ منطبق بر بلندی‌های شمالی حوضه است. در فصل تابستان (JJA) نسبت به فصل بهار ناهنجاری‌ها از شدت کمتری برخوردار هستند؛ با این وجود بیشینه ناهنجاری با $+0/95^{\circ}\text{C}$ در بلندی‌های شمالی و کمینه ناهنجاری هم با $+0/6^{\circ}\text{C}$ در نیمه جنوبی حوضه به وقوع پیوسته است. در مورد علت وقوع بیشینه ناهنجاری‌ها در بخش‌های شمالی حوضه، شاید بتوان به افزایش دمای ناشی از گرمایش جهانی و به تبع آن کاهش پوشش برف اشاره کرد. در فصل پاییز (SON) بیشینه



شکل ۸. توزیع ناهنجاری فصلی دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).

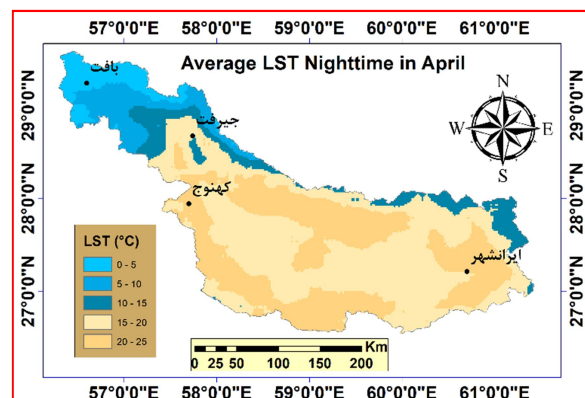
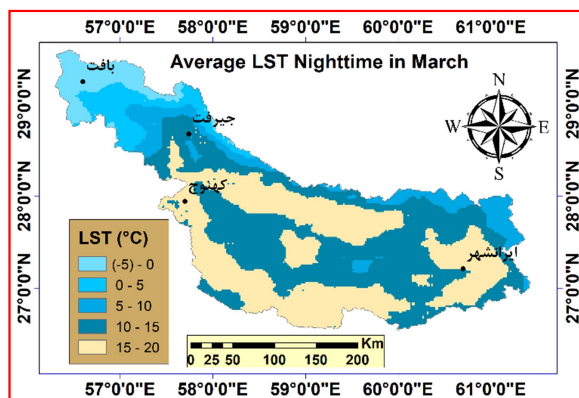
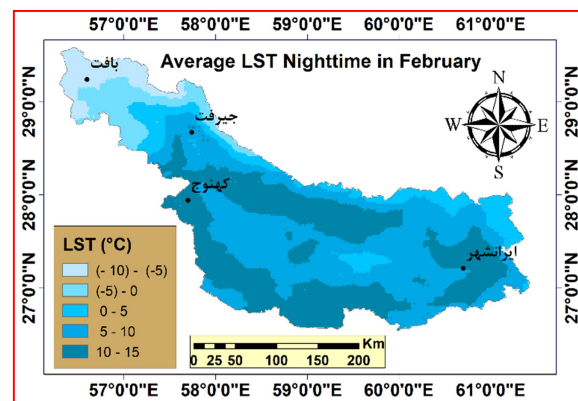
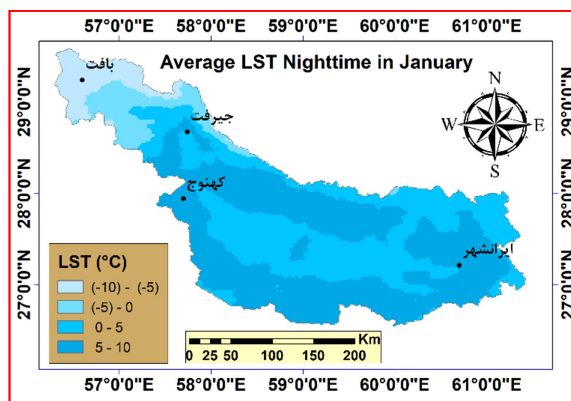
۳-۴. توزیع فضایی ماهانه

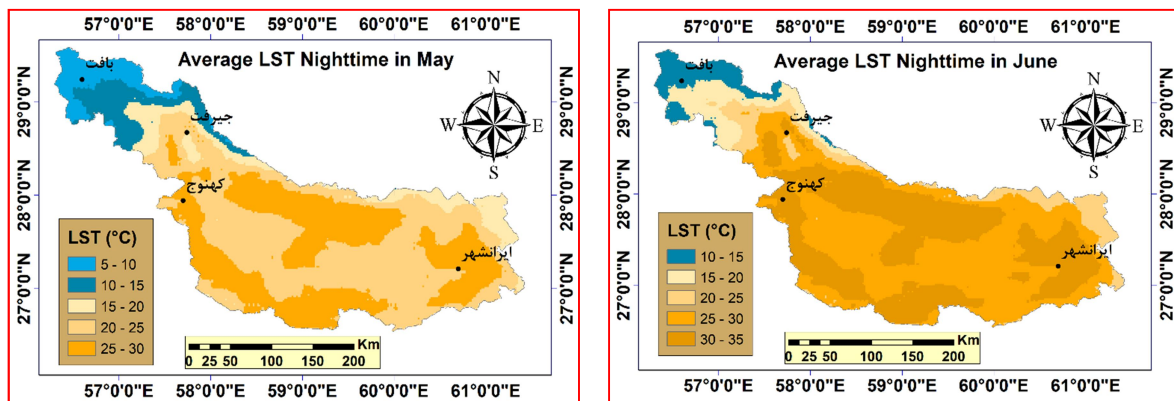
توزیع فضایی ماهانه از دمای شب‌هنگام سطح زمین در دوره‌ی مورد مطالعه (۲۰۱۹-۲۰۰۳) در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است. در ماه ژانویه توزیع دما در دامنه‌ای از 10°C تا $10^{\circ}\text{C}+$ به عنوان سردترین ماه سال شناخته شده است. این شرایط نشان‌دهنده حاکمیت الگوی سرد آب‌وهوایی در این ماه می‌باشد. گسترش آستانه دمایی 10°C بر مناطق مرتفع شمالی، به خوبی اثر ارتفاع بر کاهش قابل ملاحظه دمای شبانه را نشان می‌دهد. در فوریه به عنوان سومین ماه سرد سال (بعد از ژانویه و دسامبر) حوضه، دمای شب‌هنگام سطح زمین رفتاری مشابه با ماه ژانویه داشته است. با این تفاوت که دامنه دمای بیشینه شب‌هنگام سطح زمین آن از 10°C به 15°C افزایش یافته است. در ماه مارس، دمای کمینه نسبت به ماه فوریه 5°C افزایش پیدا کرده و مقدار آن از 10°C به 5°C رسیده است. دمای بیشینه نیز به همین نسبت افزایش یافته و به 20°C

رسیده است. به طور کلی در این ماه بیشترین وسعت حوضه (به ویژه در بخش‌های مرکزی و جنوبی) را دمای 10°C تا 15°C در بر گرفته است. ماه آوریل را می‌توان به عنوان ماه گذار از سرمای زمستانی به هوای نسبتاً معتدل بهاری در گستره زیادی از حوضه قلمداد کرد. زیرا که در این ماه دمای بیش از 15°C تقریباً ۷۰ درصد وسعت حوضه را پوشش داده است؛ علاوه بر این، در ماه مذکور سرمای زمستان به طور قابل توجهی عقب‌نشینی کرده و دمای زیر 5°C در هیچ نقطه‌ای از حوضه رخ نداده است. در ماه می نیز دمای کمینه شب‌هنگام همچنان روند افزایشی داشته است. نکته قابل توجه، افزایش چشم‌گیر دمای بیشینه شب‌هنگام در این ماه تا 30°C می‌باشد. رخداد دمای اخیر را می‌توان ناشی از اثر گرمایشی تابستان زودرس در این حوضه نسبت داد. تداوم این شرایط منجر به تشدید حاکمیت هوای گرم در ماه‌های ژوئن و جولای تا 35°C شده و این ماه‌ها را به عنوان گرم‌ترین ماه‌های

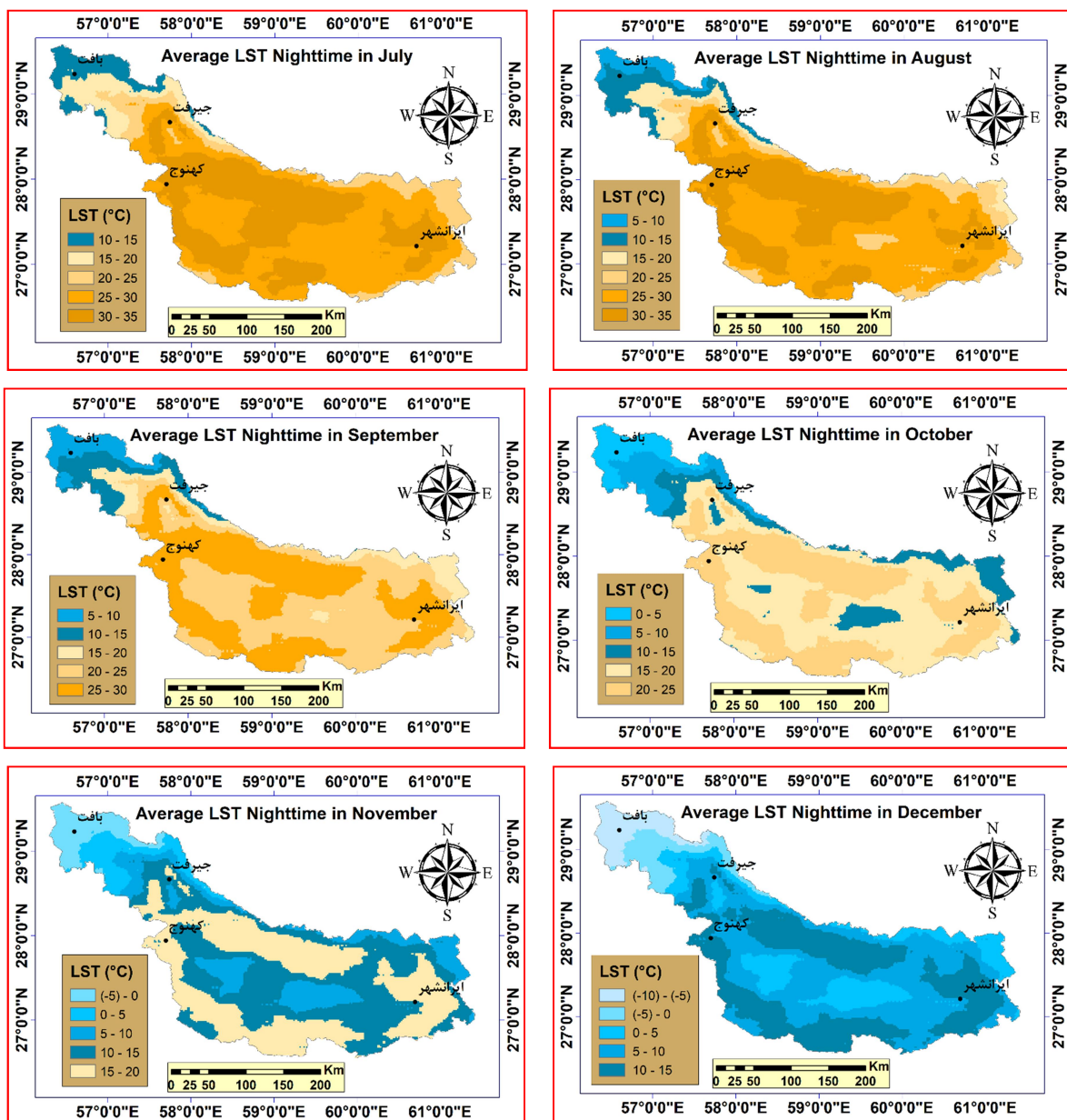
سال از نظر دمای شب‌هنگام سطح زمین برجسته کرده است. دلیل رخداد دمای شب‌هنگام بالا در این ماه‌ها را، می‌توان به حداکثر پرتو افشانی روزانه خورشید، بلندی طول روز و تشدید حاکمیت شرایط حرارتی پایدار ناشی از الگوی پرفشار جنب حاره مربوط دانست. در همین ارتباط بر اساس پژوهش حلیان و شبانکاری (۱۳۸۹)، الگوی پرفشار جنب حاره به‌عنوان کنش‌گر اصلی اقلیم ایران در فصل تابستان بوده که سبب استیلای شرایط گرم و خشک بر گستره وسیعی از کشور می‌شود؛ با این وجود همزمانی حاکمیت دمای نسبتاً معتدل ارتفاعات شمالی با رخداد گرم‌ترین شب‌های سال در نیمه جنوبی حوضه، به‌خوبی اثر بارز ارتفاعات را در کاهش دما و افزایش اختلاف دمای شبانه با نواحی کم‌ارتفاع نشان می‌دهد. دمای بیشینه شب‌هنگام در ماه آگوست همچنان از الگوی دو ماه قبل تبعیت می‌کند. تنها تفاوت، کاهش تدریجی دمای کمینه شب‌هنگام در ارتفاعات حوضه می‌باشد. در ماه سپتامبر به تدریج با تضعیف الگوهای آب‌وهوایی گرم، کاهش طول روز و به تبع آن کاهش گرمای دریافتی

سطح زمین، دمای شب‌هنگام هم کاهش یافته است. به‌طوری که مقادیر بیشینه آن روند نزولی به خود گرفته و از 35°C به 30°C رسیده است. با ورود به ماه اکتبر، دمای شب‌هنگام سطح زمین به روشنی غلبه سرمای شبانه فصل پاییز را نسبت به سپتامبر نشان می‌دهد. چراکه از یک طرف دمای کمینه شب‌هنگام از 5°C به صفر رسیده و از طرف دیگر دمای بیشینه شب‌هنگام نیز از 30°C به 25°C تنزل یافت. ماه نوامبر از لحاظ دمای شب‌هنگام، متأثر از دمای اواخر پاییز و اوایل زمستان است. زیرا از یک طرف دمای کمینه شب‌هنگام از صفر به 5°C - رسیده و از طرف دیگر دمای بیشینه تا 20°C همچنان در بخش‌هایی از جنوب و شرق حوضه مشاهده می‌شود. بررسی توزیع فضایی دمای شب‌هنگام ماه دسامبر، این ماه را به‌عنوان دومین ماه سرد سال (بعد از ژانویه) در حوضه آبریز جازموریان آشکار کرده است. زیرا از یک سو دمای کمینه شب‌هنگام در بلندی‌های شمالی حوضه به 10°C - رسیده و از سوی دیگر دمای بیشینه شب‌هنگام نیز در هیچ نقطه‌ای از 15°C فراتر نرفته است.

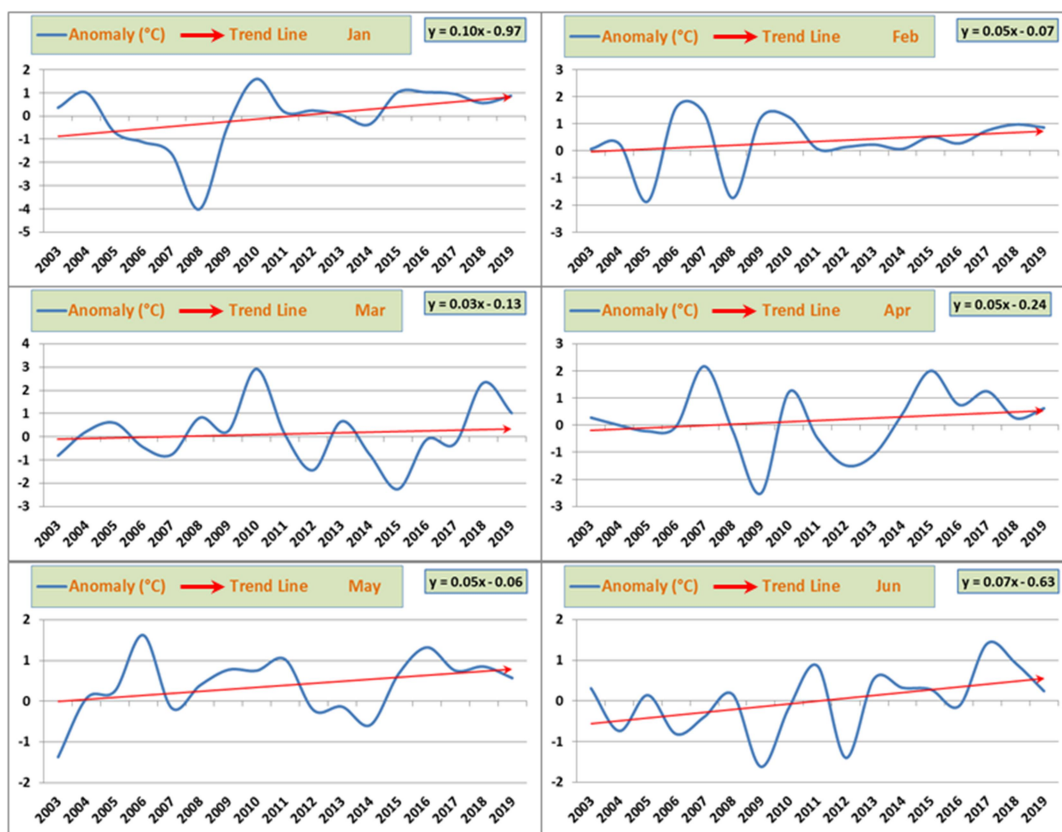




شکل ۹. توزیع فضایی ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).



شکل ۱۰. توزیع فضایی ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).



شکل ۱۱. ناهنجاری ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۰۳-۲۰۱۹).

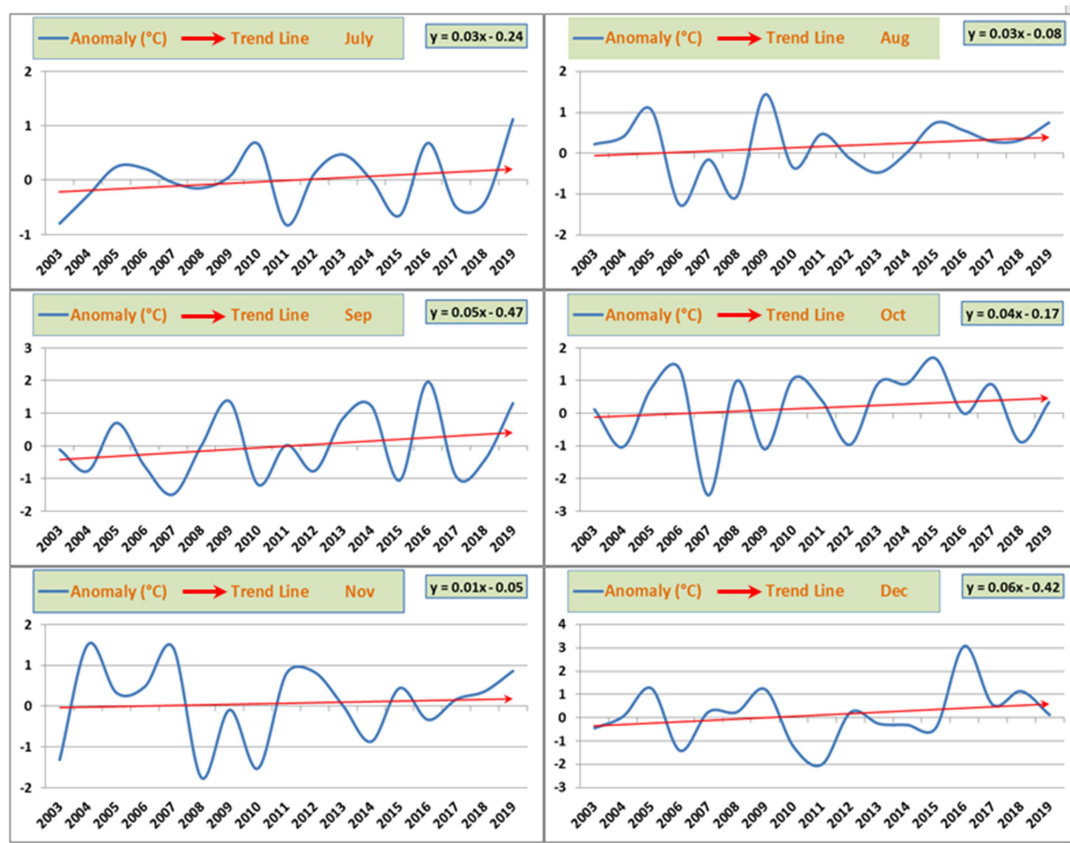
۳-۵. ناهنجاری ماهانه

برآورد ناهنجاری ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آمده است. بر اساس شکل ۱۱، ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در ماه ژانویه از مقادیر منفی تا مثبت قابل توجهی برخوردار است. در این ماه بیشینه ناهنجاری مثبت/منفی به ترتیب با $+1/7^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۹ و -4°C در سال ۲۰۰۸ رخ داده است. روند ناهنجاری دمای شب‌هنگام در این ماه شیب افزایشی قابل ملاحظه‌ای (در حدود $+1^{\circ}\text{C}$) در طول دوره مورد بررسی داشته است. در ماه فوریه نیز بیشینه ناهنجاری مثبت و منفی به ترتیب با مقادیر $+1/8^{\circ}\text{C}$ و $-2/38^{\circ}\text{C}$ در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۲ رخ داد. روند ناهنجاری دمای شب‌هنگام فوریه همانند ژانویه، افزایشی بوده و در طول دوره آماری حدود $+8^{\circ}\text{C}$ افزایش یافت. در ماه مارس بیشینه ناهنجاری مثبت و منفی به ترتیب دارای مقادیر $+2/92^{\circ}\text{C}$ و $-2/51^{\circ}\text{C}$ در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ بوده و

روند کلی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در این ماه حدود $+0/3^{\circ}\text{C}$ بوده است. رفتار ناهنجاری دمای سطح زمین در ماه آوریل از فراز و فرودهایی برخوردار است. در این ماه بیشینه ناهنجاری مثبت با مقدار $+2/17^{\circ}\text{C}$ مربوط به سال ۲۰۰۷ و بیشینه ناهنجاری منفی با $-2/52^{\circ}\text{C}$ مربوط به سال ۲۰۰۹ می‌باشد. به طور کلی برآیند روند ناهنجاری در این ماه از شیب مثبتی برخوردار بوده و افزایشی در حدود $+0/5^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. بیشترین ناهنجاری مثبت/منفی در ماه می به ترتیب با مقادیر $+1/62^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۶ و $-2/40^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۵ برآورد شده و روند کلی ناهنجاری آن افزایشی است. در ماه ژوئن نیز همانند ماه‌های قبل، مقادیر ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین دارای نوسان بوده و بیشینه ناهنجاری مثبت آن $+1/42^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۷ و بیشینه ناهنجاری منفی آن با $-1/62^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۹ اتفاق افتاده است. روند افزایشی ناهنجاری دمای شب‌هنگام در این ماه

است. در ماه اکتبر، بیشترین ناهنجاری مثبت/منفی به ترتیب با $+1/68^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۵ و $-2/52^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۷ رخ داده است. رفتار کلی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در این ماه مشابه آگوست بوده و از همان آغاز دوره مورد مطالعه، شیب افزایشی آن آشکار شده است. روند افزایشی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین همچنان در ماه نوامبر تداوم داشته است. در این ماه بیشینه ناهنجاری مثبت با $+1/51^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۴ و بیشینه ناهنجاری منفی نیز با $-1/75^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۸ اتفاق افتاده است. مقادیر بیشینه ناهنجاری مثبت و منفی دمای شب‌هنگام سطح زمین در ماه دسامبر نسبت به نوامبر افزایش داشته است. در این ماه بیشترین ناهنجاری مثبت با $+3/07^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۶ و بیشترین ناهنجاری منفی نیز با $-0/2^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۱ به وقوع پیوسته است. علاوه بر این؛ روند کلی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در این ماه با افزایش تقریباً $+0/5^{\circ}\text{C}$ ، شیب بیشتری نسبت به نوامبر نشان می‌دهد.

حدود $+0/5^{\circ}\text{C}$ در طول دوره بوده است. ماه جولای به عنوان یکی از گرم‌ترین ماه‌های سال از لحاظ دمای شب‌هنگام سطح زمین، ناهنجاری دمایی کمتری (در حدود $+0/2^{\circ}\text{C}$) را در طول دوره آماری در مقایسه با دیگر ماه‌ها تجربه کرده است. بیشترین ناهنجاری مثبت این ماه با $+1/12^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۹ و بیشترین ناهنجاری منفی آن با $-0/83^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۱ رخ داده است. ماه آگوست نسبت به جولای ناهنجاری بیشتری را نشان داد. بیشینه ناهنجاری مثبت $+1/44^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۹ و بیشینه ناهنجاری منفی $-1/26^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۶، به‌خوبی این شرایط را تأیید می‌کند. روند کلی افزایش ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین در این ماه (حدود $+0/4^{\circ}\text{C}$) دو برابر جولای بوده است. تداوم روند افزایشی ناهنجاری دمای شب‌هنگام سطح زمین با حرکت به سمت ماه‌های پیش رو تشدید شده است. این ویژگی در سپتامبر با رخداد بیشینه ناهنجاری مثبت با $+1/96^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۱۶ و بیشینه ناهنجاری منفی با $-1/49^{\circ}\text{C}$ در سال ۲۰۰۷ مشهود



شکل ۱۲. ناهنجاری ماهانه دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان (۲۰۱۹-۲۰۰۳).

۴. نتیجه گیری

پیشرفت روزافزون تکنولوژی سبب پیدایش گام‌های مهم و نوینی در تسهیل انجام مطالعات علمی برای پژوهشگران علوم محیطی شده است. امروزه با گسترش انواع ماهواره‌ها و متعاقباً در دسترس گذاشتن طیف متنوعی از داده‌های ارزشمند و مفید با تفکیک فضایی-زمانی مناسب، بسترهای مطالعاتی زیادی در واکاوی عناصر آب‌وهواشناختی (به‌ویژه در مناطق بیابانی و کوهستانی فاقد ایستگاه‌های هواشناسی) برای محققان علوم جوی ایجاد شده است. در همین راستا دمای سطح زمین به‌عنوان اندرکنش جو-زمین حاوی اطلاعات مهمی در مورد تغییرات محیطی است؛ زیرا این متغیر به تغییرات پوشش زمین بسیار حساس بوده و کمترین اثرگذاری هر نوع عامل محیطی و غیرمحیطی بر روی سطح زمین را به‌طور آشکاری نمایان می‌کند. در این پژوهش دمای شب‌هنگام سطح زمین در طول دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۳ در حوضه آبریز جازموریان در جنوب شرق کشور مورد کنکاش قرار گرفته است و روندها، توزیع فضایی و ناهنجاری‌های بلندمدت، فصلی و ماهیانه متغیر مذکور بررسی شده است. نتایج نشان دادند دمای شب‌هنگام سطح زمین در دوره آماری مورد مطالعه تقریباً 1°C افزایش یافته است و این افزایش در دمای کمینه (ماه‌های دوره سرد سال) بیشتر از دمای بیشینه بوده است. بر اساس یافته‌ها، بیشینه دمای شب‌هنگام در مناطق پست و کم ارتفاع مرکزی و جنوبی و کمینه آن نیز در بلندی‌های شمالی حوضه به وقوع پیوسته است. توزیع فضایی فصلی دمای شب‌هنگام سطح زمین، بیانگر توزیع دماها در دامنه‌ای از 10°C تا 35°C به ترتیب در فصول زمستان و تابستان است. نوسان بسیار زیاد دمای شب‌هنگام سطح زمین فصلی به‌خوبی نقش بارز ارتفاعات و عرض جغرافیایی را در پراکنش دمایی حوضه آبریز جازموریان نشان می‌دهد. همچنین واکاوی زمانی متغیر مورد مطالعه، بیانگر روند مثبت دمای شب‌هنگام در تمام فصول چهارگانه می‌باشد که در این میان فصول بهار و زمستان از شیب افزایشی بیشتری برخوردار بوده‌اند؛

علاوه بر این، برآورد فضایی ناهنجاری دمای شب‌هنگام ضمن تأیید روند افزایشی آن، موقعیت مکانی بیشینه ناهنجاری دمایی را در بخش‌های مرکزی و غربی و کمینه ناهنجاری‌ها را در بخش‌های شرقی و بلندی‌های شمالی حوضه نشان داده است. واکاوی ناهنجاری ماهانه دمای شب‌هنگام، نمایانگر رخداد بیشینه ناهنجاری مثبت با $4/01^{\circ}\text{C}$ در $3/07^{\circ}\text{C}$ در سپتامبر ۲۰۱۶ و کمینه ناهنجاری با $4/01^{\circ}\text{C}$ در ژانویه ۲۰۰۸ است. به‌طور کلی مقادیر دمای شب‌هنگام سطح زمین به‌طور محسوسی از سال ۲۰۰۸ به‌بعد و به‌خصوص در ماه‌های مربوط به دوره سرد سال (با افزایش بیشتر دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه) افزایش چشم‌گیری نسبت به شرایط نرمال پیدا کرده‌اند. این امر به‌طور آشکاری بیانگر سیر دمای شبانه دوره سرد سال به سمت الگویی گرم‌تر می‌باشد. این شرایط می‌تواند به‌عنوان نمایه‌ای از تغییر اقلیم مورد توجه قرار گرفته و منجر به تغییر برخی از فراسنج‌های محیطی از قبیل رطوبت نسبی، تبخیر و تعرق، رطوبت سطح خاک، ماندگاری برف، دمای نقطه شبنم و انرژی بازتابی شبانه شود. در مورد همسویی نتایج این پژوهش با مطالعات گذشته، شواهد علمی ارزشمندی وجود دارند که صحت یافته‌های این پژوهش را به روشنی نشان داده است. از جمله در یکی از بهترین و جامع‌ترین تحقیقات در مورد تغییرات دمای هوای ایران در نیم سده گذشته، مسعودیان (۱۳۹۰) بیان کرده است دمای هوای شبانه ایران در نیم سده گذشته روند افزایشی چشم‌گیری در بخش‌های جنوبی کشور داشته است که این یافته به روشنی در روند بلندمدت دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان هم نمایان شده است؛ علاوه بر این، جدیدترین مطالعات مرتبط با موضوع پیش رو نیز با یافته‌های این تحقیق انطباق خوبی داشته‌اند؛ به‌طوری که نتایج این پژوهش با مطالعه احمدی و همکاران (۱۳۹۷) در تخمین دمای شب‌هنگام در گستره ایران و همچنین مرادی (۱۳۹۵) در مورد واکاوی دمای سطح زمین در ایران همسو می‌باشند؛ چراکه آنان به نقش بارز ارتفاعات و عرض جغرافیایی در توزیع دمای سطح

حلیان، ا.ح. و شبانکاری، م.، ۱۳۸۹، تحلیل هم‌دید ارتباط پرفشار جنب حاره در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال با بارش روزانه در ایران، تحقیقات جغرافیایی، ۹۷ (۲)، ۸۲-۴۷.

شکیبا، ع.، ضیائیان فیروزآبادی، پ.، عاشورلو، د. و نامداری، س.، ۱۳۸۸، تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM+، فصلنامه سنجش از دور ایران، شماره اول، ۳۹-۵۶.

عساکره، ح.، ۱۳۹۰، مبانی اقلیم‌شناسی آماری، انتشارات دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

عطایی، ه. و یوسفی فر، ب.، ۱۳۹۴، بررسی روند تغییرات دمای شبانه استان کرمان و تأثیرپذیری آن از شدت تابش خورشیدی (TSI) طی نیم قرن اخیر، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۰، ۲۱۲-۱۹۵.

عطایی، ه. و فنایی، ر.، ۱۳۹۲، شناسایی روند تغییرات ماهانه و سالانه متوسط دمای حوضه آبریز گاوخونی طی دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۶۱، فصلنامه اکویولوژی تالاب، سال پنجم، شماره ۱۷، ۳۱-۴۶.

کرینسل، د.، ۱۳۸۳، کویرهای ایران و خصوصیات پالئوکلیماتولوژی آن، ترجمه عباس پاشایی، تهران-ایران.

مرادی، م.، ۱۳۹۵، بررسی آب‌وهواشناختی دمای سطح زمین در گستره ایران با بهره‌گیری از داده‌های مودیس، پایان‌نامه دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی.

مسعودیان، س. ا.، ۱۳۹۰، آب و هوای ایران، انتشارات شریعه توس، مشهد-ایران.

موسوی راد، س. م.، خالقی، ف. و مرادی، ح. ا.، ۱۳۹۸، بررسی روند تغییرات سطح آب و پوشش گیاهی تالاب جازموریان با استفاده از سنجش از دور، پانزدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان.

زمین در ایران اشاره کرده‌اند. در پژوهش پیش رو نیز این عوامل (ارتفاع و عرض جغرافیایی) نقش مهمی در توزیع دمای شب‌هنگام سطح زمین در حوضه آبریز جازموریان ایفا کرده‌اند. همچنین، نتایج این پژوهش با یافته‌های برخی از مطالعات جهانی از جمله الفتیو و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. آنان نیز به افزایش قابل توجه دمای شب‌هنگام سطح زمین در کشور یونان (فصلی و سالانه) اشاره کرده‌اند. با توجه به قابلیت‌های بالای حوضه آبریز جازموریان در تولیدات کشاورزی و همچنین قابلیت گردشگری فصلی در نواحی مختلف این حوضه، اهمیت واکاوی تغییرات دمای شبانه در این خصوص انکارناپذیر می‌باشد. از سوی دیگر، با تداوم افزایش حساسیت‌های محیطی و روند شتابان قاره‌ای شدن اقلیم این حوضه، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده ضمن برآورد سایر متغیرهای اقلیمی، به ارتباط سنجی آنها نیز با LST پرداخته شود تا از این طریق دانش اقلیمی بیشتری از تغییرات محیطی رخ داده در این حوضه کمتر مطالعه شده فراهم شود.

مراجع

احمدی، م.، داداشعلی رودباری، ع. و احمدی، ح.، ۱۳۹۷، پایش دمای سطح زمین در گستره ایران مبتنی بر برون‌داد سنجنده MODIS، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۳۳ (۱)، ۱۷۴-۱۹۰.

اسکندری دامنه، ه.، اسکندری دامنه، ح.، خسروی، ح.، و غلامی، ح.، ۱۳۹۸، تحلیل و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI (مطالعه موردی: حوضه غرب تالاب جازموریان)، نشریه علمی پژوهشی مرتع، ۱۳ (۳)، ۴۷۵-۴۶۱.

بذرافشان، ج. و رحیمی، ج.، ۱۳۹۳، تحلیل و پهنه‌بندی ریسک وقوع یخبندان و سرماهای تشعشعی، جبهه‌ای و مختلط در گستره ایران، نشریه هواشناسی کشاورزی، ۲ (۱)، ۶۷-۷۹.

- Anderson, M. C., Kustas, W. P., Norman, J. M., Hain, C. R., Mecikalski, J. R., Schultz, L. and Gao, F., 2011, Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 223–239, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-223-2011>.
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P. and Mecikalski, J. R., 1997, A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 60, 195–216.
- Dar, I., Qadir, J. and Shukla, A., 2019, Estimation of LST from multi-sensor thermal remote sensing data and evaluating the influence of sensor characteristics. *Annals of GIS*, 25(3), 263–281.
- Das, M. and Das, A., 2020, Assessing the relationship between local climatic zones (LCZs) and land surface temperature (LST)—A case study of Sriniketan-Santiniketan Planning Area (SSPA), West Bengal, India. *Urban Climate*, 32, 100591.
- Dissanayake, D. M. S. L. B., 2020, Land use change and Its impacts on land surface temperature in Galle city, Sri Lanka. *Climate*, 8(5), 65.
- Eleftheriou, D., Kiachidis, K., Kalmintzis, G., Kalea, A., Bantasis, C., Koumadoraki, P. and Gemitzi, A., 2018, Determination of annual and seasonal daytime and nighttime trends of MODIS LST over Greece-climate change implications. *Science of the total environment*, 616, 937–947.
- Ghent, D., Veal, K., Trent, T., Dodd, E., Sembhi, H. and Remedios, J., 2019, A new approach to defining uncertainties for MODIS land surface temperature, *Remote Sensing*, 11(9), 1021.
- Fang, B. and Lakshmi, V., 2014, Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques, *Journal of hydrology*, 516, 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.008>.
- Guha, S., Govil, H., Dey, A. and Gill, N., 2020, A case study on the relationship between land surface temperature and land surface indices in Raipur City, India, *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*: 1–16.
- Jin, M. and Dickinson, R. E., 2010, Land surface skin temperature climatology: Benefitting from the strengths of satellite observations. *Environmental Research Letters*, 5(4), 044004.
- Koehler, J. and Kuenzer, C., 2020, Forecasting Spatio-Temporal Dynamics on the Land Surface Using Earth Observation Data—A Review, *Remote Sensing*, 12(21), 3513.
- Li, H., Sun, D., Yu, Y., Wang, H., Liu, Y., Liu, Q. and Cao, B., 2014, Evaluation of the VIIRS and MODIS LST products in an arid area of Northwest China, *Remote Sensing of Environment*, 142, 111–121.
- Liu, X. and Chen, B., 2000, Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 20(14), 1729–1742.
- Mustafa, E. K., Liu, G., Abd El-Hamid, H. T. and Kaloop, M. R., 2019, Simulation of land use dynamics and impact on land surface temperature using satellite data. *GeoJournal*: 1–19.
- Mostovoy, G. V., King, R. L., Reddy, K. R., Kakani, V. G. and Filippova, M. G., 2006, Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the state of Mississippi, *GIScience & Remote Sensing*, 43(1), 78–110.
- Oyler, J. W., Dobrowski, S. Z., Holden, Z. A. and Running, S. W., 2016, Remotely sensed land skin temperature as a spatial predictor of air temperature across the conterminous United States, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(7), 1441–1457.
- Salama, M. S., Van der Velde, R., Zhong, L., Ma, Y., Ofwono, M. and Su, Z., 2012, Decadal variations of land surface temperature anomalies observed over the Tibetan Plateau by the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) from 1987 to 2008, *Climatic Change*, 114(3), 769–781.
- Shen, X., Liu, B., Jiang, M. and Lu, X., 2020, Marshland loss warms local land surface temperature in China. *Geophysical Research Letters*, 47(6), e2020GL087648.
- Stone, B., Vargo, J. and Habeeb, D., 2012, Managing climate change in cities: Will climate action plans work? *Landscape and Urban Planning*, 107(3), 263–271.
- Wan, Z. and Dozier, J., 1996, A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 34(4), 892–905.
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. and Li, Z. L., 2004, Quality assessment and validation of the MODIS global LST. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 261–274, <https://doi.org/10.1080/0143116031000116417>.
- Weng, Q., Lu, D. and Schubring, J., 2004, Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467–483.
- Zhou, L., Dickinson, R. E., Tian, Y., Jin, M., Ogawa, K., Yu, H. and Schmugge, T., 2003,

A sensitivity study of climate and energy balance simulations with use of satellite-derived emissivity data over Northern Africa and the Arabian Peninsula, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D24).

Zhou, W., Huang, G. and Cadenasso, M. L., 2011, Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes, *Landscape and urban planning*, 102(1), 54-63.

Combined Estimation of Nighttime Land Surface Temperature in Jazmourian Drainage Basin Using MODIS Sensor Data of Terra/Aqua Satellites

Abad, B.¹, Salahi, B.², Raispour, K.^{3*} and Moradi, M.⁴

1. Ph.D. Student, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Professor, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

4. Ph.D. Graduated, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(Received: 9 May 2021, Accepted: 20 Sep 2021)

Summary

Land surface temperature (LST) estimation is widely used in many applied and environmental studies such as agriculture, climate change, water resources, energy management, urban microclimate and environment. LST, which is the result of atmospheric-earth interaction, due to the sensitivity and influence of land surface conditions such as soil cover, soil moisture, albedo, surface roughness and the interaction of these factors with the atmosphere, can well determine changes in land surface temperature conditions. In the present study, Modis nighttime sensor products of both Terra and Aqua satellites (MOD11C3 & MYD11C3) from <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb> for LST estimation in the Jazmourian drainage basin (southeast of Iran), were used in the period 2013-2019. After providing the products with monthly and spatial time steps of 5 km, calculations on two matrices; One monthly with dimensions of 2784 x 204 (204 represents the number of observations in consecutive months of 17 years studied (17 x 12) and 2784 represents the number of gridded points (cells) in Jazmourian drainage basin area) and the other is a seasonal matrix with dimensions of 2784 x 68 (68 representing the number of observations in consecutive chapters (17 x 4) were performed. After performing the relevant statistical and spatial analyzes in Excel and GIS software environment, nighttime LST estimation was used. The results showed that the nighttime LST in the statistical period increased by about 1 degree Celsius and this increase was more in the minimum temperatures (cold period months of the year) than the maximum nighttime LST. According to the findings, the maximum nighttime LST has occurred in the low altitudes of the central and southern regions and the minimum LST has also occurred in the northern heights of the drainage basin. The seasonal spatial distribution of the Earth's nighttime LST indicates the distribution of nighttime LST in the range of -10 to +35°C in winter and summer, respectively. Extreme fluctuations in nighttime LST during the seasonal terrestrial surface well show the prominent role of altitudes and latitudes in the temperature distribution of the Jazmourian drainage basin. Also, the time analysis of the studied variable shows a positive trend of nighttime LST in all four seasons, among which the spring and winter seasons had a higher upward slope. In addition; spatial estimation of nighttime LST anomalies, while confirming its increasing trend, shows the maximum location of nighttime LST anomalies in the central and western parts and the minimum anomalies in the eastern parts and northern heights of the drainage basin. Also, the analysis of monthly anomalies of nighttime LST shows the maximum occurrence of positive anomalies with +0.07°C in September 2016 and the minimum anomalies with -0.01 °C. are in January 2008. In general, the values of the nighttime LST significantly increased from 2008 onwards, especially in the months related to the cold period of the year (with a greater increase in the minimum nighttime LST than the maximum nighttime LST). This indicates the nighttime LST trend of the cold period of the year towards a warmer pattern. These conditions can be considered as an indicator of climate change and lead to changes in some environmental parameters such as relative humidity, evapotranspiration, soil surface moisture, snow persistence, dew point temperature and nightly reflective energy. Considering the high capabilities of the Jazmourian drainage basin in agricultural products and also the capability of seasonal tourism in different areas of this drainage basin, the importance of investigating nighttime LST changes, in this regard, is undeniable. On the other hand, with the continuing increase of environmental sensitivities and the accelerating trend of continental climate in this drainage basin, it is suggested that in future research, while estimating other climatic variables, their correlations with LST are considered. This will provide more climate knowledge of the environmental changes that have occurred in this less studied drainage basin.

Keywords: Spatial analysis, Land Surface Temperature (LST), Modis sensor, Temperature anomaly, Jazmourian drainage basin.

* Corresponding author:

raispour@znu.ac.ir