

بررسی شیب دمای سطح زمین در ایران با داده‌های روز هنگام مودیس

مسعود مرادی - دانشجوی دوره دکتری تخصصی آب‌وهواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی

برومند صلاحی* - دکتری تخصصی اقلیم‌شناسی، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

سید ابوالفضل مسعودیان - دکتری تخصصی اقلیم‌شناسی، استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۷/۷

چکیده

آگاهی از دمای سطح زمین تغییرات زمانی - مکانی ترازمندی انرژی در سطح زمین را آشکار می‌سازد. در داده‌های دمای سطح زمین مودیس اختلاف زمان خورشیدی محلی وجود دارد. این اختلاف ممکن است به دلیل تفاوت زمانی در برداشت پیکسل‌های یک خط پیمایش ماهواره در یک روز باشد یا در روزهای مختلف زمان محلی برداشت دما در یک پیکسل متغیر باشد. هدف از پژوهش کنونی بررسی شیب دمای سطح زمین و تغییرات زمانی - مکانی آن در ایران است که با داده‌های روز هنگام مودیس تیرا و آکوا بررسی شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان در برآورد دمای سطح زمین برای یک ساعت محلی ثابت استفاده کرد. بدین ترتیب، امکان مقایسه داده‌های دورسنجی دمای سطح زمین با داده‌های ایستگاهی و نیز امکان مقایسه دمای پیکسل‌های مختلف در سراسر ایران با یکدیگر فراهم می‌آید. تغییرات زمانی - مکانی چشم‌گیری در شیب دمای سطح زمین ایران دیده می‌شود؛ این تغییرات از شرایط محیطی و تغییرات دریافت انرژی خورشید اثر می‌پذیرد. در ماه‌های مختلف سال شیب‌های دمایی صفر تا +۱ درجه کلوین بر ساعت و +۱ تا +۲ درجه کلوین بر ساعت گستره بیشتری از ایران را پوشش می‌دهند؛ با این حال، در دوره سرد سال شیب‌های صفر تا -۱ درجه، به‌ویژه در بلندی‌های البرز و زاگرس، گسترش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ایران، تغییرات زمانی - مکانی، شیب دمای سطح زمین، مودیس.

مقدمه

توانایی مودیس در دیدبانی زمین عنصری کلیدی برای پشتیبانی از مطالعه سیستمی زمین است (سالومونسون و همکاران، ۱۹۸۹: ۱۵۲). یکی از فرآورده‌های مودیس داده‌هایی با کیفیت بالا از دمای سطح زمین^۱ است که از دو ماهواره تیرا و آکوا تولید می‌شود (وان و لی، ۲۰۰۸: ۵۳۷۴). آگاهی از دمای سطح زمین تغییرات زمانی - مکانی چگونگی ترازمندی انرژی سطح زمین را آشکار می‌سازد، در بسیاری از موضوعات کاربردی نقش اساسی دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۵)، و در بسیاری از مطالعات آب‌وهواشناسی، آب‌شناسی، و بوم‌شناسی مورد نیاز است (وان و لی، ۱۹۹۷: ۹۸۰). در مقیاس‌های فصلی و بین سالانه نوسان دمای هوا کوچک‌تر از دمای سطح زمین است. تغییرات اختلاف دمای هوا و سطح زمین نیز به تغییرات دمای سطح زمین بستگی دارد (اوکو و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۹۹۵). تغییرات چرخه روزانه دمای سطح زمین نیز با

* E- mail: bromand416@yahoo.com

ویژگی‌های سطح و شرایط محیطی کاملاً در ارتباط است (کوان و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۵۷). تفاوت‌های جغرافیایی و فصلی دامنه دمای روزانه، که از دیدبانی ماهواره یا از اندازه‌گیری‌های زمینی به‌دست آمده است، نشان می‌دهد که در هر دو روش اندازه‌گیری دامنه دمای روزانه در مناطق روستایی بیشتر از مناطق شهری است (سان و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۷۷۹). همچنین، دمای روزانه سطح زمین در مناطق شهری، نسبت به دمای هوای روزانه، نمایش بهتری از کنش‌های محیطی در داخل شهرها دارد (ژان و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۳۹).

از سوی دیگر، اختلاف زمان خورشیدی محلی در برداشت پیکسل‌های یک خط پیمایش مشخص ماهواره در یک روز یا یک پیکسل در روزهای مختلف ممکن است بیش از دو ساعت باشد. همچنان که دمای سطح زمین همگام با زمان خورشیدی محلی تغییر می‌کند، امکان مقایسه مستقیم دمای سطح زمین در پیکسل‌های مختلف یک روز و هر پیکسل در روزهای مختلف وجود ندارد (دوان و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۴۲). گذر از این مشکل با بهنجارسازی دمای سطح زمین حاصل از دیدبانی ماهواره به یک زمان ثابت خورشیدی امکان‌پذیر است. بدین منظور، نخست لازم است رفتار دمای سطح زمین در بازه زمانی میان دو برداشت پیاپی شناسایی یا میان‌یابی شود. میان‌یابی داده‌های ناپیوسته از ماهواره‌های قطب‌گرد را می‌توان در سه دسته اصلی - شامل روش‌های آماری، مدل‌های انرژی سطح زمین، و مدل چرخه دمای روزانه - گروه‌بندی کرد. روش آماری از پایه‌های فیزیکی بی‌بهره است و در پی برآزش اندازه‌گیری‌های شناخته‌شده با خطای همبستگی کمینه است. دقت مدل‌های انرژی سطح زمین بسیار است، اما نیازمند متغیرهای زمین‌سنجی، فیزیکی، و هواشناسی بیشتری است که همیشه در دسترس نیست (کوان و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۵۸؛ زاکسک و اوستیر، ۲۰۱۲: ۱۱۷).

مدل چرخه دما روشی برای سبک و سنگین کردن مدل‌های فیزیکی و تجربی است (کوان و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۵۸). در برخی مطالعات از روش‌های گوناگون برای بررسی چرخه دمای روزانه سطح زمین استفاده شده است. در یک پژوهش، کارایی شش مدل از چرخه دمای سطح زمین در پوشش‌های زمینی مختلف بررسی شد. این کار در دو بازه زمانی ۲۴ ساعته (دوره اول) و ۹ صبح تا ۳ بامداد روز بعد (دوره دوم) انجام شد. ریشه مربعات خطا در مدل‌های مختلف از یک کلون در دوره اول تا ۰/۴ کلون در دوره دوم متفاوت بود. از بررسی نتایج این مدل‌ها چنین برمی‌آید که در نتیجه نبود پیوستگی فیزیکی در مدل‌های چرخه دمای روزانه، به‌ویژه در زمان برآمدن آفتاب، این مدل‌ها نتوانسته‌اند به خوبی افزایش آهسته و یکنواخت دمای سطح زمین را در این زمان از روز بازتولید کنند (دوان و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۵). چرخه دمای روزانه سطح زمین، که از اندازه‌گیری‌های GOES به‌دست آمده است، نسبت به داده‌های مشابه آن در AVHRR، هم‌خوانی بیشتری با دیدبانی‌های زمینی دارد. بنابراین، از چرخه دمای روزانه دما با استفاده از یک الگوریتم^۱ برآزش برای داده‌های AVHRR استفاده می‌شود (سان و پینکر، ۲۰۰۵: ۳۹۸۳). کسب نتایج بهتر در مقایسه دمای ایستگاهی با دیدبانی‌های ماهواره‌ای و نیز دقت بیشتر در مقایسه اندازه‌گیری‌های زمینی دمای سطح زمین با دیدبانی‌های ماهواره‌ای در شرایط آسمان صاف گویای اهمیت این فراسنج در دستیابی به چرخه دمای روزانه از دمای سطح زمین است (ایگناتف و گاتمن، ۱۹۹۸: ۶۴۱). تخمین دمای سطح زمین و چرخه دمای روزانه آن با تفکیک مکانی یک کیلومتر مودیس با استفاده از

داده‌های GOES نشان می‌دهد که در مناطقی با پوشش ناهمگون در جنوب غربی ایالات متحده دقت کار در مقایسه با دیدبانی‌های زمینی بهتر از ۲ درجه سلسیوس است؛ اما اندکی خطای تخمینی در بعضی موارد، به‌ویژه در مناطق خشک و در فصل زمستان، وجود دارد (اینامدار و همکاران، ۲۰۰۸: D07107). تأثیر تفاوت زمان محلی خورشیدی در تغییر مکانی دمای سطح زمین مودیس می‌تواند با مدل چرخه روزانه دما از بین برود. بهنجارسازی زمانی دمای سطح زمین به وسیله زمان خورشیدی محلی امکان بررسی فرایندهای سطح زمین را بهبود می‌بخشد (دوان و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۹۹). در بهنجارسازی دمای سطح زمین مودیس تیرا در روزهنگام برای رسیدن به یک دمای ثابت در زمان خورشیدی محلی میانگین ریشه مربعات خطا در داده‌های موجود قبل از بهنجارسازی ۱/۵ درجه کلون بوده است که پس از آن به ۰/۵ کلون کاهش یافته است.

از نظر تئوری، یک الگوی شناسایی فیزیکی، که در یک دوره الگوهای زمانی - مکانی شیب دمای سطح زمین را نشان دهد، از عوامل زیادی، مانند تابش ورودی خورشید، ارتفاع، پوشش زمین، باد، و رطوبت خاک، اثر می‌پذیرد. در بررسی برخی از این عوامل مشخص شده است شیب دمای سطح زمین در یک دوره زمانی برای بررسی دو متغیر پوشش زمین و قلمروهای مختلف جغرافیایی مورد نیاز نیست. اما، از رطوبت خاک و گستره دمای روزانه برای دستیابی به دقت بهتر می‌توان استفاده کرد (دوان و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۴۷). در پژوهشی دیگر داده‌های دمای سطح زمین با استفاده از یک تابع وزن‌دهی زمانی - مکانی آمیخته شد؛ هدف از آن دستیابی به داده‌هایی با چگالی زمانی - مکانی مناسب برای بررسی چرخه روزانه دمای سطح زمین بود. در این تابع، وزن‌دهی بر اساس میزان شباهت پیکسل‌ها در معادله انجام شد. نتایج آمیختن داده‌های ماهواره‌های قطب‌گرد و زمین‌آهنگ موجود در امریکای شمالی، اروپا، و افریقا با استفاده از سه سنجنده نتایج بهتری نسبت به دو سنجنده فراهم کرد (ویو و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۷۷). فقط با دورسنجی می‌توان داده‌های بلندمدت سرزمین‌های پهناور را، که لازمه شناسایی بیابان‌زایی‌اند، در دسترس گذاشت. از راه پایش فراسنج‌های گوناگون سطح زمین می‌توان گرایش یک محل به سوی بیابان‌زایی و تغییر سطح زمین را پیش‌هنگام شناسایی کرد. یکی از این فراسنج‌های مهم چرخه روزانه دمای سطح زمین است (سچادلیچ و همکاران، ۲۰۰۱: ۳۹). در شناسایی چرخه روزانه دمای سطح زمین ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل شناخته شده است که با فصل سال و عرض جغرافیایی تغییر می‌کند. ویژگی‌های دیگری نیز مانند ابرناکی، رطوبت خاک، لایه مرزی، و هواسپهر روی آن بر دمای سطح زمین و چرخه روزانه آن اثر می‌گذارند (جین و دیکینسون، ۱۹۹۹: ۲۱۰۶). دمای سطح زمین در مقیاس جهانی اغلب با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بررسی می‌شود. در مطالعه‌ای، با این روش، سه مؤلفه اول به عنوان دامنه، فاز، و گستره (مدت روزهنگام) چرخه روزانه شناسایی شد و ۰/۹۷ از تغییرپذیری آن را نشان می‌دهند. سپس، تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای نظم‌دادن به تخمین چرخه روزانه دما در یک چگالی زمانی بالاتر استفاده شد (آیرس و همکاران، ۲۰۰۴: ID04313). در بررسی روند دمای سطح زمین در فلات تبت مشخص شد که کمینه روزانه دمای سطح زمین سریع‌تر از بیشینه آن افزایش یافته است؛ نتیجه آن کاهش دامنه روزانه دمای سطح زمین بود. این نتایج با دمای هوای نزدیک سطح زمین در سطح جهانی و منطقه هم‌خوانی دارد و از آنجا که دمای هوای نزدیک سطح زمین به وسیله دمای سطح زمین کنترل می‌شود، این نتایج با اطمینان رخداد یک روند گرمایشی در دمای هوای نزدیکی سطح زمین را نشان می‌دهد (اوکو و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۹۹۵). جداسازی اثرهای همدید کوتاه‌مدت از اثر ویژگی‌های پایاتری مانند پوشش گیاهی و گونه خاک

سطح زمین در چرخه روزانه دما نیز می‌تواند امکان مطالعه بلندمدت داده‌ها را برای بررسی فرایندهای سطح زمین فراهم سازد (گوتزه و اولسن، ۲۰۰۱: ۳۴۲). تولید فرآورده‌های ثابت گسیلندگی و دمای سطح زمین از میان داده‌های آستر و مودیس با استفاده از الگوریتم جداسازی گسیلندگی و دما (TES) نشان می‌دهد که داده‌های این دو ماهواره توانسته‌اند قالب طیفی دو سایت زمینی در یک منطقه ریگزار را به خوبی بازیابی کنند (هالی و هوک، ۲۰۱۰: ۱۳۲۴). ایجاد یک پایگاه داده پیوسته در زمان و مکان، که با داده‌های دورسنجی ناریب باشد و خطای تخمینی آن به وسیله بازیابی‌های دورسنجی محاسبه شود و نیز ارزیابی اطمینان داده‌های بازیابی شده با یک روش پساfrایندی هدف پژوهش کوکسیا و همکاران (۲۰۱۵) بوده است. برآیند کار ایشان داده‌هایی با پیوستگی زمانی- مکانی است که اختلاف ناشی از تفاوت میان ماهواره‌های نوآ را نداشته و پایگاه داده به دست آمده به گونه‌ای تعریف شده است که با داده‌های اصلی ماهواره‌های نوآ در یک تابع توزیع احتمالاتی اریبی نداشته باشد (کوکسیا و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۹۱).

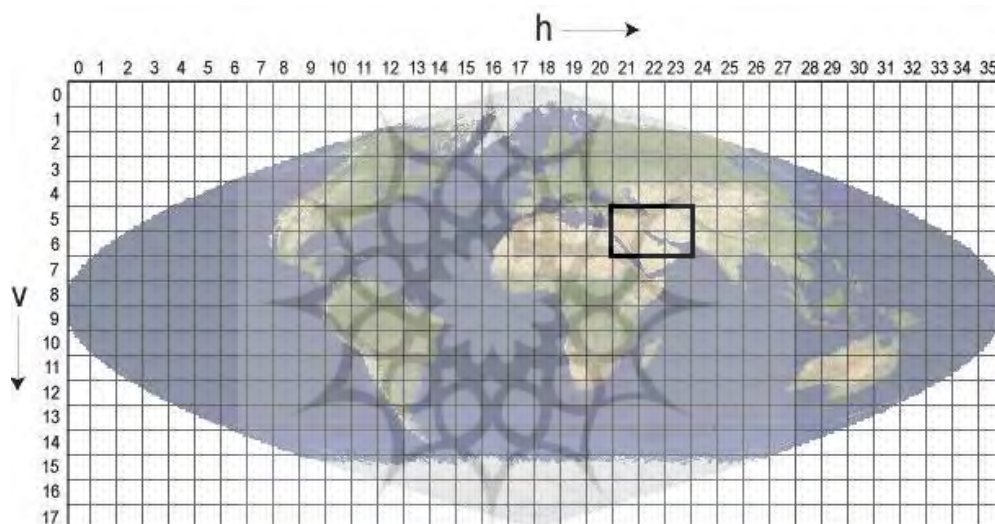
ریز مقیاس‌نمایی روش دیگری است که به منظور بهبود چگالی مکانی دمای سطح زمین در داده‌های حاصل از ماهواره‌های زمین آهنگ بر پایه تصاویر با چگالی مکانی بالاتر استفاده شده است (زاکسیک و اوستیر، ۲۰۱۲: ۱۱۶). در بیشتر پژوهش‌هایی که به آن اشاره شد آگاهی از شیب دمای سطح زمین عامل مهمی در شناخت بهتر رفتار دمای سطح زمین است و از آن برای اهداف مختلفی مانند افزایش چگالی زمانی- مکانی دمای سطح زمین، قابلیت مقایسه، و افزایش دقت کار استفاده می‌شود.

در پژوهش حاضر، با استفاده از دیدبانی‌های ماهواره تیرا و آکوای مودیس، شیب دمای سطح زمین میان این دو در ایران بررسی شده است. بنابراین، پژوهش کنونی دو هدف مهم را دنبال می‌کند: نخست، شناسایی شیب دمای سطح زمین میان دو دیدبانی روزنگام مودیس برای هر یک از پیکسل‌های درون مرز ایران؛ و دیگر ارزیابی ارتباط آن با تغییرات ناهمواری و ترازهای ارتفاعی مختلف. آگاهی‌هایی که از این راه به دست می‌آید کمک خواهد کرد تا داده‌های دمای سطح زمین را برای یک ساعت محلی ثابت برآورد کنیم. بدین ترتیب، هم امکان مقایسه داده‌های دمای سطح زمین حاصل از دورسنجی با داده‌های ایستگاهی فراهم می‌شود هم امکان مقایسه دمای پیکسل‌های مختلف در سراسر ایران با یکدیگر فراهم می‌آید.

داده‌ها و روش‌شناسی

برای تولید فرآورده‌های دمای سطح زمین مودیس از دو الگوریتم استفاده شده است: ۱. الگوریتم پنجره مجزای بهنجار شده با چگالی مکانی یک کیلومتر (وان و دوزایر، ۱۹۹۶: ۸۹۲) که با هدف کاهش خطاهای گسیلندگی و خطای کمی‌سازی سنجنده تولید شده است؛ ۲. الگوریتم روز- شب که با چگالی مکانی نزدیک به ۵ کیلومتر (مجموعه ۴) و ۶ کیلومتر (مجموعه ۵) تولید شده است. در این پژوهش از داده‌های تولید شده با الگوریتم پنجره مجزا در بازه زمانی روزانه استفاده شده است. این داده‌های راقومی برای بازه زمانی ۱۳۹۴/۹/۹ - ۱۳۸۲/۴/۱۷ (۴۸۹۴ روز) از تارنمای مودیس به نشانی <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb> برداشت شده است. پیش از این تاریخ، داده‌های مودیس آکوای روزانه

در دسترس نیست. در فرمت رقومی داده‌ها برای هر پیکسل اطلاعات گوناگونی مانند دمای سطح زمین^۱، اطمینان از کیفیت^۲، زمان گذر ماهواره^۳، زاویه دید سنجنده^۴، و گسیلندگی^۵ سطح زمین در دسترس است. این داده‌ها با سیستم تصویر سینوسی بر روی موزائیک‌هایی^۶ به ابعاد ۱۰ در ۱۰ درجه قوسی برای سراسر خشکی‌های زمین در تارنمای مودیس موجود است و برای استفاده از آن به صورت درجه سلسیوس این داده‌ها در عامل مقیاس (۰.۲/۱) ضرب شده و سپس از ۲۷۳ منهای شده است. شکل ۱ موقعیت موزائیک‌هایی را که در بردارنده ایران اند نشان می‌دهد. ابعاد متریک هر موزائیک حدود ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ کیلومتر است و ۱۸۸۴۰۷۷ پیکسل سراسر پهنه ایران را می‌پوشاند. در این پژوهش از داده‌های مودیس تیرا و آکوا در برداشت‌های روزهای مودیس بهره برده‌ایم. بدین ترتیب، آرایه‌ای زمانی-مکانی به اندازه ۱۸۸۴۰۷۷×۴۸۹۴ از دمای سطح زمین در ایران برای هر یک از داده‌های ماهواره تیرا و آکوا از دوره آماری فراهم آمد و اساس دآوری‌های این پژوهش درباره دمای سطح زمین همین آرایه بوده است.



شکل ۱. موقعیت موزائیک‌های دربرگیرنده ایران

میدان دید مودیس، با توجه به زاویه دید ۶۸ درجه‌ای در پیکسل‌های کناری هر خط پیمایش، در حدود ۵۵ درجه است. به سبب این زاویه دید گسترده، اختلاف زمان خورشیدی محلی برای پیکسل‌های کناری شرق و غرب در یک ردیف پیمایش بیش از یک ساعت است. زمان برداشت تصویر از یک محل مشخص روی زمین در برداشت‌های موفق آن تا ۱.۵ ساعت متغیر است (دوان و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۹۷). در این پژوهش شیب دمای سطح زمین ایران میان دو دیدبانی ماهواره‌های تیرا (ساعت ده‌ونیم بامداد) و آکوا (ساعت یک‌ونیم نیمروز) به وقت محلی محاسبه شده است و از این پس در این مطالعه منظور از شیب دمای سطح زمین شیب دما میان دو برداشت مودیس تیرا و آکوا در روزهای مودیس است. برای این

1. land surface temperature (LST)
2. quality assurance
3. view time
4. view angel
5. emissivity
6. tile

کار، اختلاف دمای سطح زمین در دو برداشت تیرا و آکوا نسبت به زمان برداشت آن‌ها محاسبه شده است. این کار برای هر پیکسل درون مرز ایران و در هر روز آماری بر حسب کلونین بر ساعت محاسبه شده است (رابطه ۱ و ۲).

$$\Delta LST = (LST_{ad} - LST_{td}) \quad \Delta t = t_{ad} - t_{td} \quad (1)$$

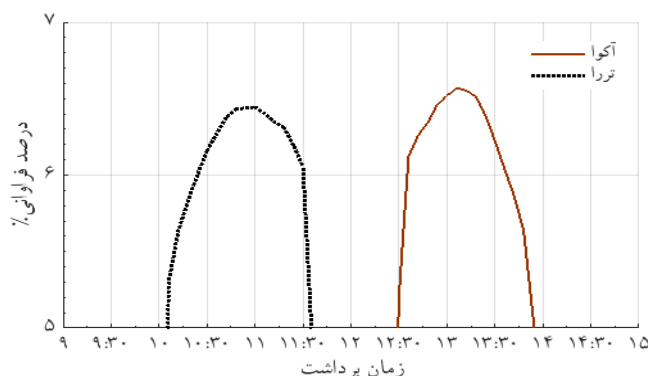
$$SLST = \frac{\Delta LST}{\Delta t} \quad (2)$$

در تساوی‌های بالا، Δt فاصله زمانی دو دیدبانی تیرا و آکو در روز هنگام بر حسب ساعت است، t_{ad} و t_{td} به ترتیب زمان دیدبانی روز هنگام در آکو و تیرا بر حسب ساعت محلی، LST_{ad} و LST_{td} دمای سطح زمین در دو ماهواره بر حسب کلونین، LST اختلاف دمای سطح زمین در دیدبانی‌های روز هنگام دو ماهواره بر حسب کلونین، و در نهایت $SLST$ شیب دمای سطح زمین^۱ بین دیدبانی‌های دو ماهواره بر حسب کلونین بر ساعت است که برای هر پیکسل و هر روز دوره آماری موجود جداگانه محاسبه شده است. حاصل این کار سه آرایه جداگانه شامل شیب دمای سطح زمین روزانه برای هر پیکسل، زمان برداشت روز هنگام در ماهواره تیرا، و زمان برداشت روز هنگام در ماهواره آکو برای هر پیکسل است. برای بررسی فراوانی شیب‌های دمایی مختلف، نخست شیب دما در بازه‌های ۰/۱ درجه کلونین بر ساعت دسته‌بندی و سپس فراوانی شیب دمای سطح زمین در هر یک از دسته‌های موجود محاسبه شده است. ترازهای ارتفاعی ایران نیز در بازه‌های ۲۵ متری دسته‌بندی شده است تا فراوانی هر یک از طبقات شیب دمای سطح زمین در این ترازها بررسی شود. توزیع فراوانی زمان پیمایش ماهواره در بازه‌های شش دقیقه‌ای برای هر یک از پیمایش‌های تیرا و آکوا انجام شده است تا تغییرات احتمالی فراوانی پیمایش سطح زمین در بازه‌های مختلف از زمان گذر ماهواره بررسی شود. هدف از این بررسی یافتن پاسخ این پرسش است: شیب دمای سطح زمین نسبت به زمان و مکان پایاست؟ یا نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کند؟

میانگین بلندمدت ماهانه برای شیب دمای سطح زمین در ایران به منظور بررسی پراکنش مکانی شیب دمای سطح زمین و تغییرات فصلی آن انجام شده است. بدین منظور، برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب تنظیم شد تا میانگین شیب دمای سطح زمین محاسبه شود. برای این کار، از داده‌های محاسبه شده برای شیب دمای سطح زمین در مقیاس زمانی روزانه استفاده شده است و خروجی آن آرایه‌ای به اندازه $12 \times 360 \times 24$ است. از میان این خروجی پیکسل‌های درون ایران جداسازی و سپس تغییرات زمانی- مکانی آن بررسی شده است.

یافته‌های پژوهش

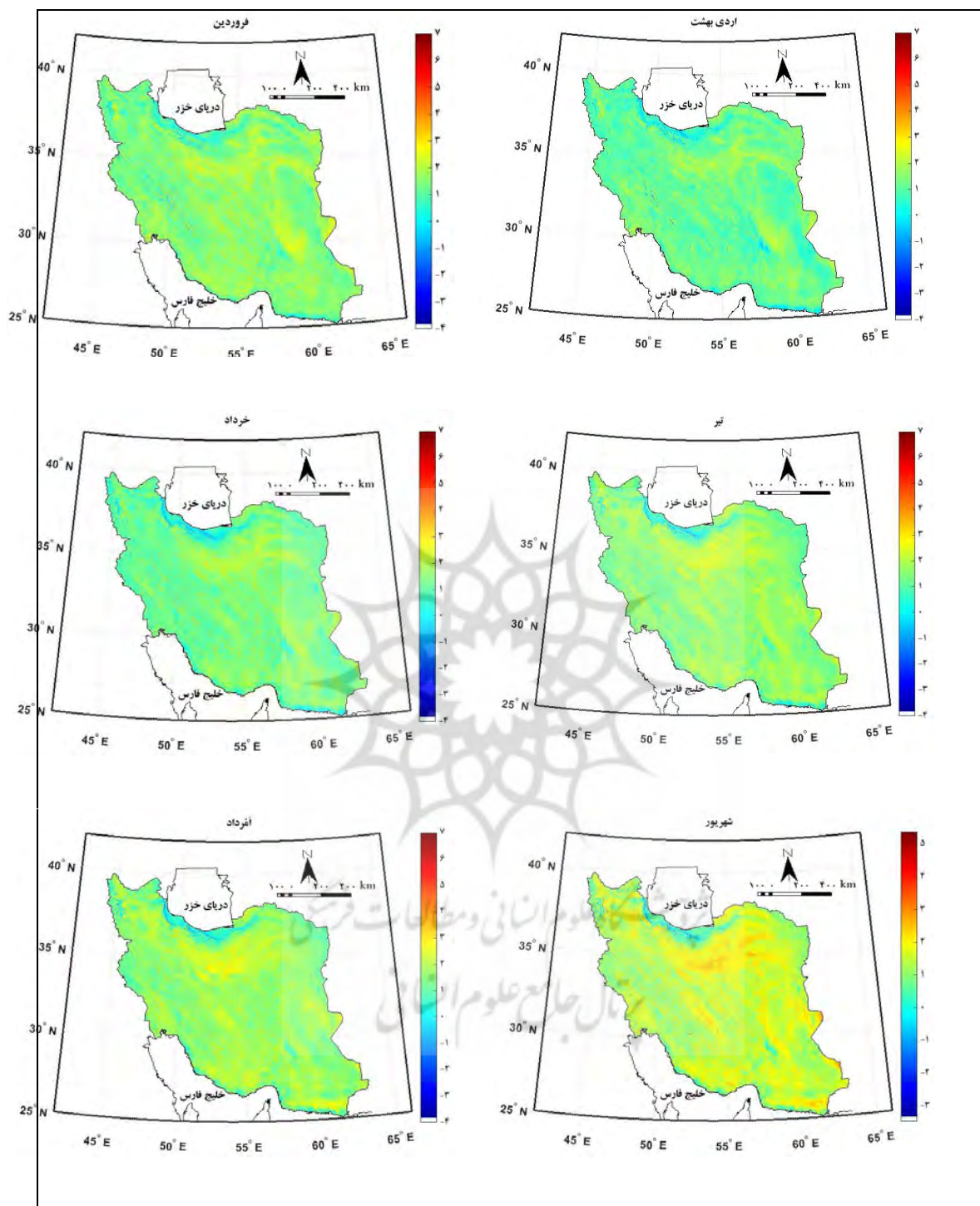
در بررسی شیب دمای سطح زمین، زمان برداشت یکی از عناصر اصلی مورد استفاده بوده است. برای آگاهی از آن درصد فراوانی زمان برداشت در بازه‌های زمانی شش دقیقه‌ای محاسبه شده است. شکل ۲ این درصد فراوانی را برای میانگین بلندمدت برداشت‌های ماهواره تیرا و آکوا مودیس نشان می‌دهد. زمان گذر ماهواره تیرا (صبح) از روی ایران از حدود ساعت ده صبح تا دوازده ظهر است و اندکی پس از آن ماهواره آکو (عصر) ایران را پیمایش می‌کند. با آغاز زمان گذر هر دو ماهواره درصد فراوانی زمان دیدبانی‌ها نیز تا بیشترین مقادیر افزایش می‌یابد و در طی زمان برداشت از ۵/۵ تا ۶/۵ درصد نوسان دارد. از این شکل می‌توان دریافت که توزیع زمانی برداشت دمای سطح زمین ایران توسط هر یک از این دو ماهواره یکنواختی زیادی دارد و درصد فراوانی زمان‌های دیدبانی سطح زمین تقریباً یکسان است.



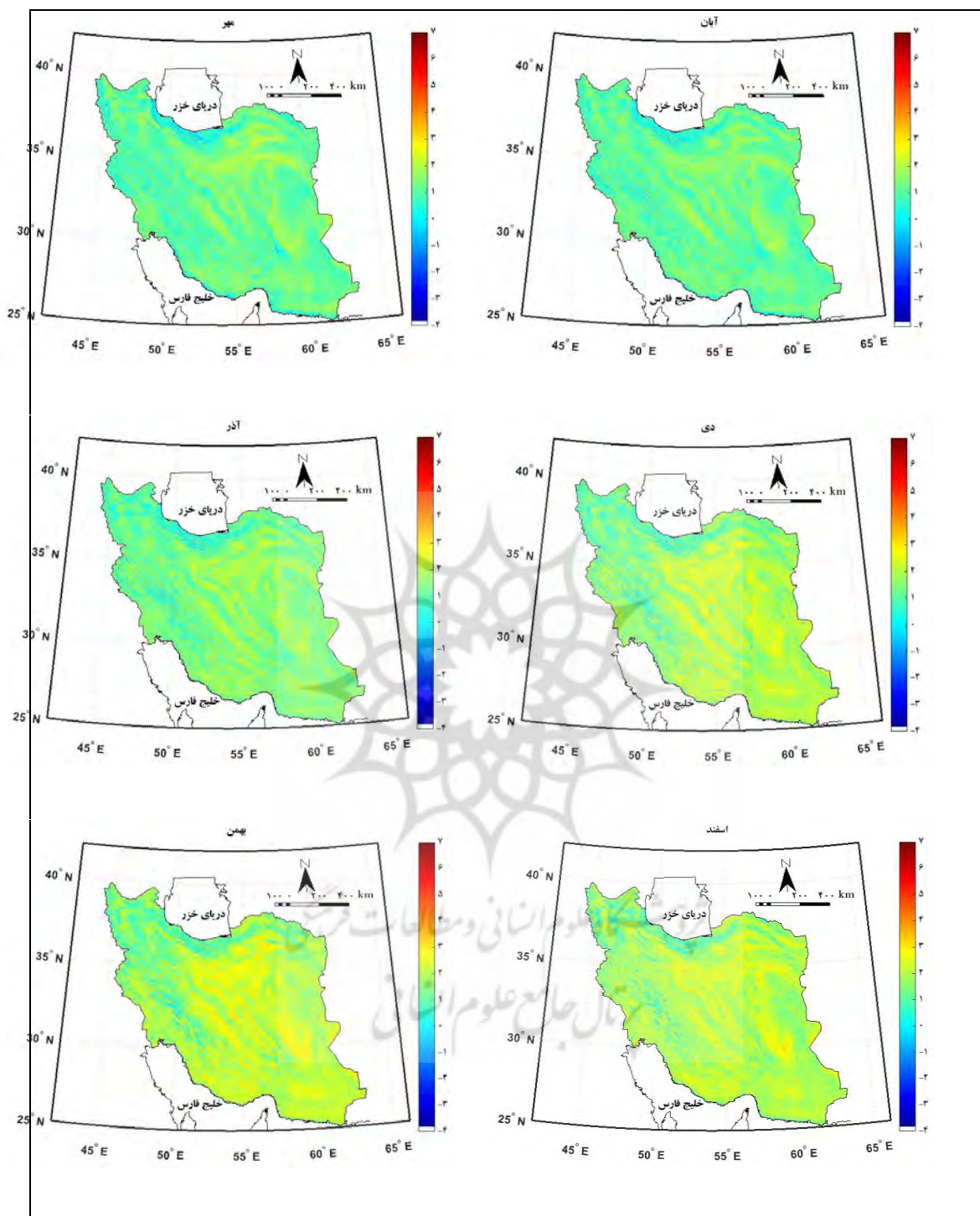
شکل ۲. درصد فراوانی برداشت دمای سطح زمین در زمان پیمایش تورا و آکوا

یکی از مزیت‌های مودیس امکان دیدبانی زمین با دو ماهواره تورا و آکوا است که در مجموع چهار بار در شبانه‌روز زمین را پیمایش می‌کنند. بنابراین، می‌توان شیب دمای سطح زمین را از میزان تغییر دمای سطح زمین در برداشت‌های ماهواره تورا و آکوا نسبت به زمان برداشت آن‌ها برای هر پیکسل داخل ایران به‌دست آورد. در پژوهش حاضر، به سبب محدودیت حجم مطالعه، فقط شیب دمای سطح زمین در برداشت‌های روزهای مودیس بررسی شده است. بررسی پراکنش مکانی شیب دمای سطح زمین می‌تواند بینش بهتری از ویژگی‌های آن را در ایران ارائه کند. شکل‌های ۳ و ۴ میانگین بلندمدت ماهانه شیب دمای سطح زمین ایران بین دو گذر روزهای تورا و آکوا را نشان می‌دهند. اثر ناهمواری و ویژگی‌های محیطی بر شیب دمای سطح زمین را در همه ماه‌های سال می‌توان دید. بیابان‌های داخلی ایران با شیب دمایی بیشتر نسبت به دیگر مناطق در طی سال نمایان‌اند. هماهنگی شیب دمای سطح زمین با ارتفاع به گونه‌ای است که به خوبی می‌توان اثر ناهمواری‌های ایران را روی آن دنبال کرد. از باب نمونه، چاله‌های میان رشته‌کوه‌های زاگرس و ایران مرکزی با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی و نیز پستی‌های ایران مرکزی مانند دشت کویر، دشت لوت، و چاله جزموریان به خوبی نمایان است. کرانه‌های شمالی باریکه‌ای از کرانه‌های جنوبی و بلندی‌ها مناطقی هستند که شیب‌های دمایی پایین در آن‌ها دیده می‌شود. در این مناطق سطح زمین عمدتاً نمناک است یا پوشش گیاهی انبوهی دارد. وجود نم کافی در این مناطق سبب ذخیره بیشتر انرژی در سطح زمین می‌شود و در نتیجه دمای سطح زمین نوسان کمتری را در طی روز و در فاصله زمانی دو برداشت مودیس تورا و آکوا نشان می‌دهد. از فروردین تا تیرماه شیب‌های دمایی پایین‌تر از ۲ درجه کلون بر ساعت در بیشتر مناطق ایران دیده می‌شود. مثلاً، در فروردین ۰/۸۵ از مساحت ایران شیب دمایی بین صفر تا ۲+ درجه داشته است؛ در حالی که شیب‌های دمایی بیش از ۲ درجه ۱۴/۳ درصد و کمتر از صفر درجه یا شیب‌های منفی فقط ۰/۷ از مساحت ایران را پوشش داده است (جدول ۱). از ماه مرداد بر گستره مناطق با شیب دمایی بیش از ۲ درجه کلون بر ساعت افزوده شده و این شرایط به سمت نیمه سرد سال نمایان‌تر می‌شود.

شیب‌های دمایی کمتر در دوره گرم سال می‌تواند در نتیجه زاویه بالای تابش خورشید و پایداری هوا سپهر در این زمان از سال باشد که سبب کاهش تغییرپذیری مکانی در دریافت انرژی خورشید می‌شود. در ماه‌های سرد سال، بلندی‌های البرز و زاگرس شیب‌های دمایی پایین و گاه منفی را تجربه می‌کنند؛ در مقابل آن، مناطق پست داخلی با افزایش شیب‌های دمایی مثبت همراه است. این شرایط به‌ویژه در دی و بهمن سبب افزایش دامنه تغییرات و نیز تغییر مکانی در شیب دمای سطح زمین ایران شده است.



شکل ۳. میانگین بلندمدت ماهانه شیب دمای رویه زمین (کلوین بر ساعت) از فروردین تا شهریور (ترسیم‌شده در نرم‌افزار متلب)



شکل ۴. میانگین بلندمدت ماهانه شیب دمای رویه زمین (کلوین بر ساعت) از مهر تا اسفند (ترسیم شده در نرم افزار متلب)

در مجموع، شیب دمای سطح زمین در نیمه شرقی بیش از نیمه غربی کشور است. شاید بتوان خشکی خاک در این بخش از کشور را عامل افزایش شیب دما دانست، زیرا گرمای ویژه خاک خشک بسیار کمتر از خاک مرطوب است. شیب دمای سطح زمین در ماه‌های مختلف تغییرات چشم‌گیری را نشان می‌دهد. جدول ۱ مساحتی از ایران را، که شیب‌های دمایی مختلف آن را اشغال کرده است، نشان می‌دهد. در مجموع سالانه، شیب‌های صفر تا +۱ درجه کلوین بر ساعت

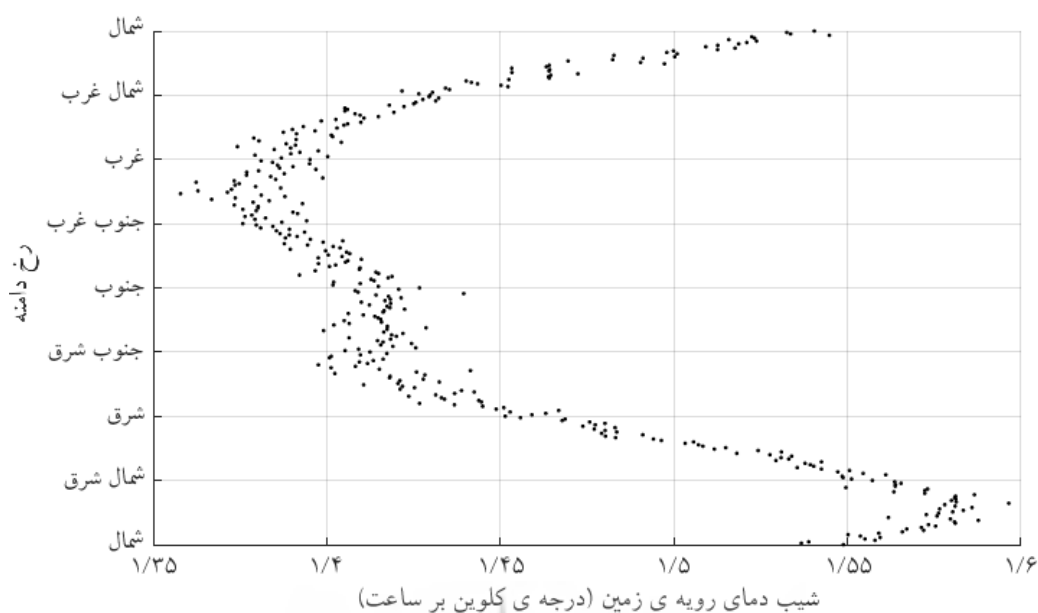
بیشترین درصد پوشش را دارد. پس از آن، شیب دمایی یک تا دو درجه و سپس صفر تا -1 درجه کلون بر ساعت قرار دارد. اما، این شرایط در ماه‌های مختلف سال تغییرات معناداری را نشان می‌دهد؛ به طوری که در دوره گرم سال شیب دمای $+1$ تا $+2$ درجه گسترش بیشتری نسبت به شیب دمایی صفر تا -1 درجه دارد و در دوره سرد سال شرایط وارونه می‌شود. در دوره سرد سال، شیب دمای سطح زمین در بازه صفر تا -1 درجه کلون بر ساعت افزایش چشم‌گیری را نشان می‌دهد و در بهمن‌ماه با $51/1$ درصد بیشترین درصد پوشش را در ایران دارد (جدول ۱). ممکن است کاهش دما در بین ساعات ده‌ونیم تا سیزده‌ونیم در فصل زمستان، به‌ویژه در بلندی‌ها و کرانه‌های شمالی ایران، ناشی از افزایش احتمال ابرناکی و، در نتیجه، کاهش دریافت انرژی بوده باشد (شکل ۴). احتمال رخداد وزش‌های بسیار سرد و افت دمای سطح نیز وجود دارد. شرایط مشابه در ماه‌های تیر و مرداد نیز دیده می‌شود؛ ممکن است به دلیل رشد ابرهای جوششی در بعدازظهر در این ماه‌ها باشد که با سایه‌اندازی بر سطح زمین موجب ثبت دماهای پایین‌تر نسبت به برداشت تیرا در پیش‌ازظهر شده است. در این مورد هم کرانه‌های شمالی کشور بیشترین میزان شیب منفی (کاهش دما از ده‌ونیم تا سیزده‌ونیم) را نشان می‌دهد (شکل ۳).

جدول ۱. درصد پوشش مساحت ایران توسط طبقات شیب دمای سطح زمین در هر ماه

ماه	شیب دما					
	-2 تا -1	-1 تا 0	0 تا 1	1 تا 2	3 تا 4	
فروردین	$0/3$	14	$72/7$	$12/1$	$0/7$	0
اردیبهشت	$0/2$	4	$62/5$	$31/5$	$1/6$	1
خرداد	$0/2$	$6/7$	$71/1$	$20/5$	$1/3$	$0/1$
تیر	$0/3$	19	70	$9/8$	$0/8$	$0/1$
مرداد	$4/0$	$25/1$	$65/7$	8	$0/7$	$0/1$
شهریور	$0/1$	$13/1$	71	$14/6$	1	$0/1$
مهر	0	$3/4$	$63/2$	$31/5$	$1/7$	0
آبان	0	2	$64/9$	$31/4$	$1/6$	0
آذر	0	$8/5$	$74/5$	$15/7$	$1/2$	$0/1$
دی	$0/5$	$36/8$	$52/5$	$9/4$	$0/8$	0
بهمن	$1/5$	$51/1$	$39/6$	$7/1$	$0/5$	0
اسفند	$1/3$	$45/5$	$47/2$	$5/5$	$0/5$	0
میانگین	$0/4$	$1/9$	$62/9$	$16/4$	1	$0/12$

با توجه به اثرهای چشم‌گیر ناهمواری در تغییر مکانی شیب دمای سطح زمین، در ادامه به بررسی ارتباط آن با ارتفاع، شیب، و رخ دامنه می‌پردازیم. همچنان که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، تغییرات شیب دمای سطح زمین در ایران ارتباط نمایی با ناهمواری‌ها دارد. با توجه به اهمیت ارتفاع، زاویه تابش خورشید، و جهت‌گیری دامنه‌ها بر انرژی دریافتی از خورشید به بررسی آن‌ها می‌پردازیم. شکل ۵ میانگین بلندمدت شیب دمای سطح زمین را در دامنه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به پراکنش ناهمواری‌های ایران در عرض‌های جغرافیایی و مناطق اقلیمی گوناگون، در اثر میانگین‌گیری بلندمدت، دامنه تغییرات شیب دمای سطح زمین کاهش یافته است، اما همین تغییرات اندک در دامنه‌های مختلف یک رفتار منظم و معنی‌دار را نشان می‌دهد. از دامنه‌های شمال شرقی (۳۰ درجه) تا دامنه‌های جنوب شرقی (۱۳۰ درجه) شیب دمای سطح زمین رو به کاهش است و پس از آن تا دامنه‌های جنوبی در شیب دمایی ۱/۴ درجه کلون بر ساعت ثابت می‌ماند و در ادامه در دامنه‌های جنوب غربی دوباره شیب دمای سطح زمین ایران به سمت مقادیر کوچک‌تر می‌رود. با این شرایط، هر چه از دامنه‌های شمال شرقی در جهت عقربه‌های ساعت حرکت کنیم تا دامنه‌های شمال غربی اختلاف میان دمای سطح زمین تیرا و آکوا کمتر می‌شود. از دامنه‌های شمال غربی تا شمال شرقی شیب دمای سطح زمین تغییر جهت می‌دهد و افزایش می‌یابد. این شرایط را می‌توان با توجه به زاویه تابش خورشید و جهت‌گیری عمومی دامنه‌ها در ایران توضیح داد. در صبح هنگام، با برآمدن آفتاب و در طی گذر ماهواره تیرا در دامنه‌های شمال شرقی تا جنوبی انرژی تابشی خورشید دریافت می‌شود و در زمان گذر ماهواره آکوا در اوایل بعدازظهر، با توجه به کاهش زاویه تابش در این دامنه‌ها، روند افزایشی دمای سطح متوقف می‌شود. نتیجه آن کاهش شیب دمای سطح زمین بین دو گذر یادشده است که در این دامنه‌ها دیده می‌شود؛ اما در دامنه‌های رو به شمال، که دریافت انرژی عمدتاً از تابش‌های پراکنده تأمین می‌شود، روند افزایشی دمای سطح زمین از صبح تا عصر به تدریج ادامه می‌یابد و سبب افزایش شیب دمایی میان دیدبانی‌ها در این دو زمان از روز می‌شود.

شکل ۶ رابطه وارونه میان شیب زمین و شیب دمای سطح زمین را برای میانگین بلندمدت سالانه نشان می‌دهد. از زمین‌های هموار تا شیب ۲۲ درجه شیب دمای سطح زمین به صورت منظم و به میزان یک درجه سلسیوس کاهش یافته است. از شیب‌های ۲۲ درجه این رابطه ضعیف شده و شیب دمای سطح زمین نوسان دارد. این رفتار دمایی به سبب قرارگیری بیشتر شیب‌های تند در ارتفاعات با رخ‌های دامنه‌ای مختلف و کاهش تعداد دیدبانی‌های ماهواره در این شیب‌هاست. در شیب‌های بزرگ‌تر از ۲۲ درجه ۴۱۸۷ پیکسل یک کیلومترمربعی در ایران وجود دارد که فقط ۰/۰۷ درصد از کل گستره ایران را شامل می‌شود.



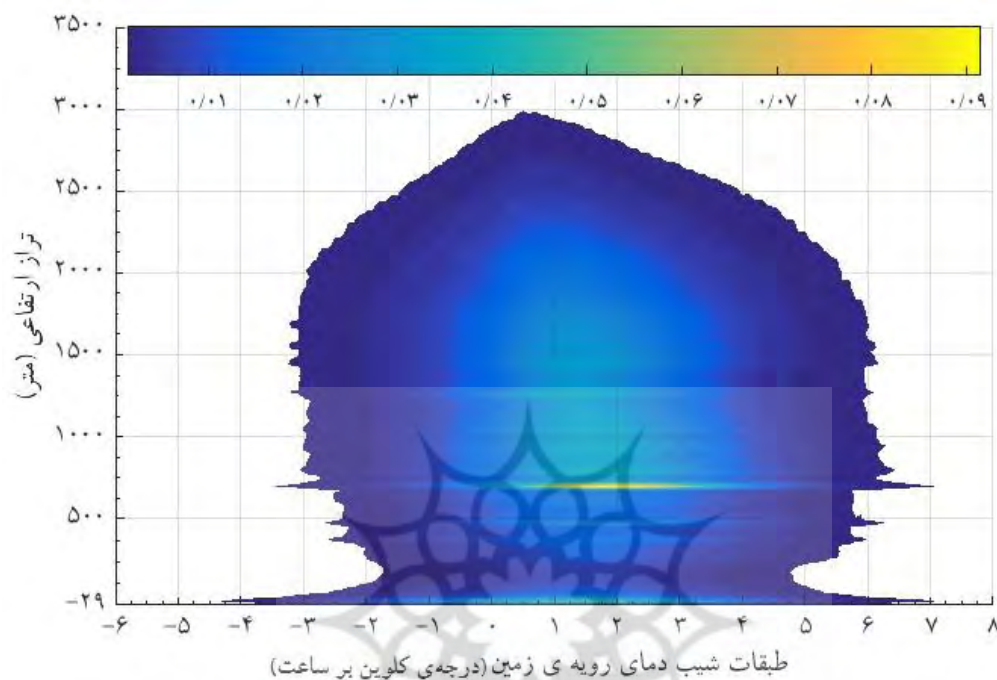
شکل ۵. میانگین بلندمدت شیب دمای سطح زمین ایران در دامنه‌های مختلف (درجه سلسیوس)



شکل ۶. میانگین بلندمدت سالانه شیب دمای سطح زمین ایران در شیب‌های مختلف

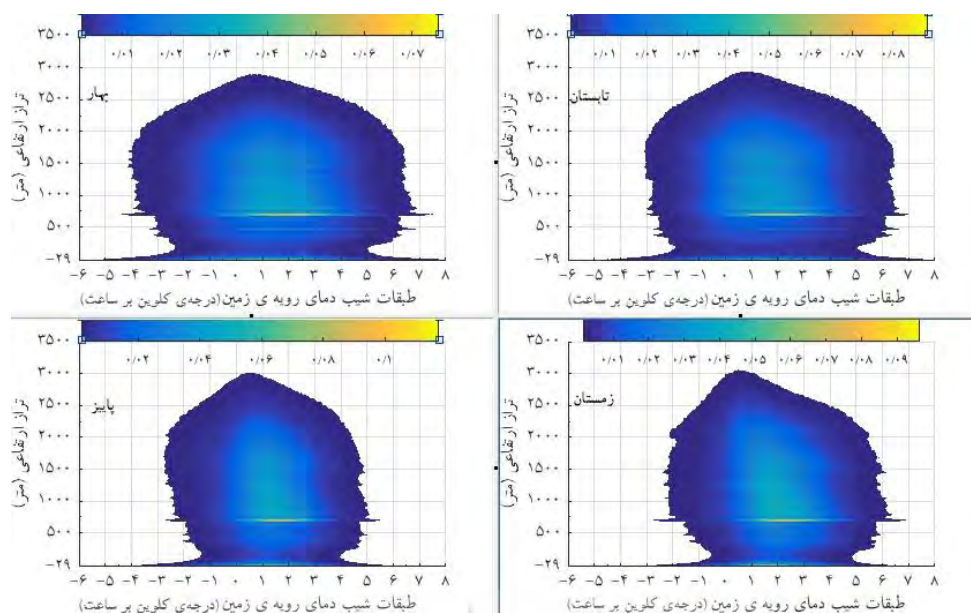
شکل ۷ درصد فراوانی بلندمدت سالانه برای طبقات شیب دمای سطح زمین را در ترازهای ارتفاعی مختلف نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی‌ها به میزان ۰/۰۹ درصد در ترازهای ارتفاعی ۷۰۰ تا ۷۵۰ متری رخ داده است. افزایش دامنه تغییرات شیب دمای سطح زمین با فراوانی آن در ترازهای ارتفاعی همراه است و این به معنی دیدبانی دما در ویژگی‌های سطحی ناهمگون تر در نتیجه فراوانی برداشت در این ترازهاست. با افزایش ارتفاع به تدریج از میزان فراوانی‌ها کاسته شده و هم‌زمان دامنه تغییرات شیب دمای سطح زمین نیز کاهش یافته است؛ اما نکته بسیار مهم این است که فراوانی‌های

بیشتر در طبقات شیب دمایی پایین‌تر، یعنی صفر تا $+3$ درجه کلوین بر ساعت، قرار دارد که نشان‌دهنده ثبات دمای سطح زمین در بازه زمانی برداشت تیرا تا آکوا در طول روز است و این به معنی افزایش دمای سطح زمین از زمان برداشت آن در ماهواره تیرا تا ماهواره آکوا در گستره صفر تا 3 درجه است.



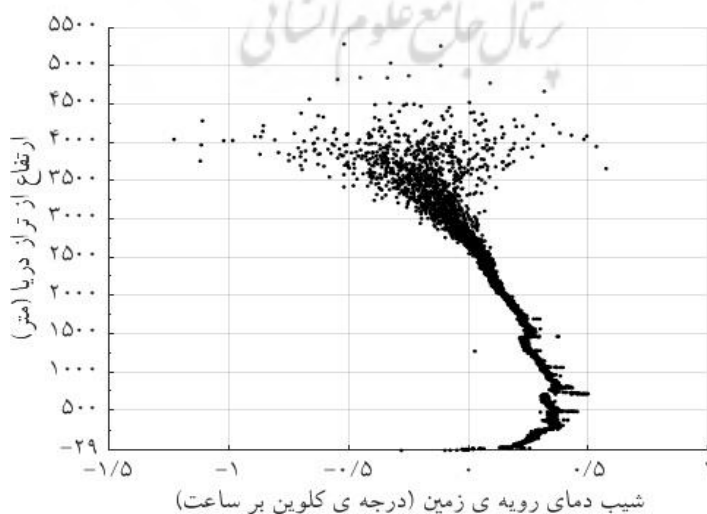
شکل ۷. درصد فراوانی سالانه طبقات شیب دمای سطح زمین در ترازهای ارتفاعی مختلف

شکل ۸ تغییرات بلندمدت فصلی دمای سطح زمین در شیب‌های دمایی و ترازهای ارتفاعی گوناگون را نشان می‌دهد. ترازهای ارتفاعی 700 تا 750 متری همچنان بیشترین فراوانی‌های شیب دمای سطح زمین را در فصل‌های سال نشان می‌دهند. دامنه تغییرات شیب دمای سطح زمین از -4.5 تا بیش از 7 درجه کلوین بر ساعت پراکنده شده است، اما بیشترین فراوانی‌ها در بازه صفر تا $+3$ درجه قرار دارد. در فصل تابستان، دامنه تغییرات شیب دمای سطح زمین کاهش می‌یابد و از -3 تا $+6.5$ درجه کلوین بر ساعت را در بر می‌گیرد. این شرایط در پاییز به کمترین مقدار خود از -2.5 تا $+5$ درجه کلوین بر ساعت می‌رسد و نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر دمای سطح زمین در این فصل سال است. شیب‌های دمایی منفی به معنی فزونی دمای سطح زمین در زمان دیدبانی تیرا در صبح نسبت به دیدبانی آکوا در بعدازظهر است؛ همچنان که در شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود، بخشی از شیب‌های دمای سطح زمین را، به‌ویژه در ارتفاع‌های 750 تا 2000 متر، در بر می‌گیرد. در زمستان شیب دمای سطح زمین با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و به سمت مقادیر صفر می‌رود. بیشترین رخداد فراوانی در پاییز و زمستان به ترتیب در شیب‌های $+1.5$ و $+2.5$ درجه کلوین بر ساعت و در حدود 0.11 درصد بوده است که، مانند سایر فصل‌های سال، در تراز ارتفاعی 725 متری قرار دارد.



شکل ۸. درصد فراوانی فصلی طبقات شیب دمای سطح زمین در ترازهای ارتفاعی گوناگون

رابطه میان شیب دمای سطح زمین با ارتفاع هم‌خوانی آشکاری با رابطه دمای سطح زمین و ارتفاع دارد. از سطح دریا تا بلندای ۳۰۰ متری شیب دمای سطح زمین رو به افزایش است. روند کاهشی آن از ارتفاع ۸۰۰ متری تا ۳۰۰۰ متری با آهنگ تقریباً یکنواختی رخ می‌دهد. در این میان، به سبب شرایط محیطی انحراف‌هایی نیز مشاهده می‌شود. مثلاً، در تراز ۱۲۶۸ متری شیب دمای سطح زمین ۰/۵ درجه کلونین بر ساعت کمتر از ترازهای بالا و پایین آن است؛ بررسی‌ها نشان داد که به سبب اثر تعدیلی دریاچه ارومیه در این تراز ارتفاعی است. از بلندای ۳۰۰۰ متری، به دلیل کاهش تعداد دیدبانی‌ها و پراکنش آن‌ها در بخش‌های مختلف ایران، این رابطه به تدریج ضعیف شده است. شیب دمای سطح زمین پراکنش زیادی را در این ترازها نشان می‌دهد.



شکل ۹. میانگین بلندمدت شیب دمای سطح زمین ایران در ترازهای ارتفاعی

نتیجه‌گیری

بررسی شیب دمای سطح زمین در ایران درباره ویژگی‌های دمای سطح زمین ایران دانش بیشتری به دست می‌دهد. بررسی میانگین بلندمدت زمان برداشت دمای سطح زمین نشان داد که در دو ماهواره تیرا و آکوا پیمایش سطح زمین در طی زمان گذر آن‌ها از روی ایران- که در حدود دو ساعت طول می‌کشد- به صورت یکنواخت پراکنده شده است. تغییرات زمانی- مکانی چشم‌گیری در شیب دمای سطح زمین ایران دیده می‌شود؛ این تغییرات از شرایط محیطی و تغییرات دریافت انرژی خورشید اثر می‌پذیرد. اثر ناهمواری‌ها و پهنه‌های آبی در کاهش شیب دمای سطح زمین به خوبی دیده می‌شود. در مقابل، پستی‌ها و مناطق بیابانی، به سبب خشکی خاک، شیب‌های دمایی مثبت و بیشتر را تجربه می‌کنند. در ماه‌های مختلف سال شیب‌های دمایی صفر تا +۱ درجه و +۱ تا +۲ درجه کلون بر ساعت گستره بیشتری از ایران را پوشش می‌دهند؛ با این حال، در دوره سرد سال شیب‌های صفر تا -۱ درجه کلون بر ساعت، به‌ویژه در بلندی‌های البرز و زاگرس، گسترش می‌یابند. بررسی شیب دمای سطح زمین در دامنه‌های مختلف نشان می‌دهد در دامنه‌های شرقی تا دامنه‌های جنوبی و غربی با دریافت انرژی بیشتر از تابش مستقیم خورشید شیب دمای سطح زمین کمتر است و از دامنه‌های شمال شرقی به سمت دامنه‌های غربی یک روند کاهشی را تجربه می‌کنند. در حالی که دامنه‌های شمالی- که دریافت انرژی خورشید به‌ویژه در دوره سرد سال بیشتر به صورت غیرمستقیم است- با افزایش شیب دمای سطح زمین همراه است. رابطه شیب زمین با شیب دمای سطح زمین وارونه است و با افزایش شیب زمین شیب دما نیز کاهشی است که غیرمستقیم می‌تواند بازگوکننده رابطه دمای سطح زمین با ارتفاع باشد. همچنان‌که بررسی‌ها نشان می‌دهد، جدای از کرانه‌های آبی و مناطق پست ایران، در سایر ترازهای ارتفاعی، با افزایش ارتفاع از شیب دمای سطح زمین بین صبح و عصر کاسته می‌شود. این پژوهش نشان داد شیب‌های کم در دمای سطح زمین در طی سال و در بیشتر مناطق ایران رخ می‌دهد و ویژگی غالب تغییرات دمای سطح زمین میان ماهواره مودیس تیرا و آکوا است. با این شرایط، می‌توان دمای سطح زمین روزهنگام این دو ماهواره را برای افزایش دقت و قابلیت مقایسه این داده‌ها به یک زمان ثابت میان این دو برداشت روزهنگام هم‌زمان‌سازی کرد.

منابع

- Aires, F.; Prigent, C.; Rossow, W.B. (2004). Temporal interpolation of global surface skin temperature diurnal cycle over land under clear and cloudy conditions, *Journal of geophysical research*, 109: D04313.
- Coccia, G.; Siemann, A.L. and Wood, M.P., E.F. (2015). Creating consistent datasets by combining remotely-sensed data and land surface model estimates through Bayesian uncertainty post-processing: The case of Land Surface Temperature from HIRS, *Remote Sensing of Environment*, 170: 290-305.
- Duan, S.-B.; Wu, H.; Wang, N.; Zhou, X.-M.; Tang, B.-H. and Li, Z.-L. (2011). preliminary results of temporal normalization of modis land surface temperature, *IEEE, IGARSS conference*, pp. 297-300.
- Duan, S.-B.; Li, Z.-L.; Wang, N.; Wu, H. and Tang, B.-H. (2012). Evaluation of six land-surface diurnal temperature cycle models using clear-sky in situ and satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 124: 15-25.
- Duan, S.-B.; Li, Z.-L.; Tanga, B.-H.; Wu, H. and Tang, R. (2014). Generation of a time-consistent land surface temperature product from MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 140: 339-349.
- Gottsche, F.M. and Olesen, F.S. (2001). Modeling of diurnal cycle of brightness temperature of extracted from METEOAT data, *Remote sensing of Environment*, 76: 337-348.

- Ignatov, A. and Gutman, G. (1998). Diurnal cycles of land surface temperatures, *Advanced Space Research*, 22: 641-644.
- Hulley, G.C. and Hook, S.J. (2010). Generating Consistent Land Surface Temperature and Emissivity Products Between ASTER and MODIS Data for Earth Science Research, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4): 1304-1315.
- Inamdar, A.K.; French, A.; Hook, S.; Vaughan, G.; Luckett, W. (2008). Land surface temperature retrieval at highspatial and temporal resolutions over the southwestern United States, *Jurnal of Geophysics Research*, 113: D07107.
- Jin, M. and Dickinson, R.E. (1999). Interpolation of surface radiative temperature measured from polar orbiting satellites to a diurnal cycle 1. Without clouds, *Journal of Geophysical Research*, 104(D2): 2105-2116.
- Li, Z.L.; Tang, B.-H.; Wu, H.; Ren, H.; Yan, G.; Wan, Z.; Trigo, I.F. and Sobrino, J.A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37.
- Liu, H. and Weng, Q. (2012). Enhancing temporal resolution of satellite imagery for public health studies: A case study of West Nile Virus outbreak in Los Angeles in 2007, *Remote Sensing of Environment*, 117: 57-71.
- Oku, Y.; Ishikawa, H.; Haginoya, S. and Ma, Y. (2006). **Recent trends in land surface temperature on the tibetan plateau**, *Journal of Climate*, 19: 2995-3003.
- Quan, J.; Chen, Y.; Zhan, W.; Wang, J.; Voogt, J. and Li, J. (2014). A hybrid method combining neighborhood information from satellite data with modeled diurnal temperature cycles over consecutive days, *Remote Sensing of Environment*, 155: 257-274.
- Salomonson, V.V.; Barnes, W.L.; Maymon, P.W.; Montgomery, H.E. and Ostrow, H. (1989). MODIS: Advanced Facility Instrument for Studies of the Earth as a System, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(2): 145-153.
- Schadlich, S.; Gottsche, F.M. and Olesen, F.-S. (2001). Influence of Land Surface Parameters and Atmosphere on METEOSAT Brightness Temperatures and Generation of Land Surface Temperature Maps by Temporally and Spatially Interpolating Atmospheric Correction, *Remote Sensing of Environment*, 75: 39-46.
- Sun, D.; Kafatos, M.; Pinker, R.T. and Easterling, D.R. (2006). Seasonal Variations in Diurnal Temperature Range From Satellites and Surface Observations, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10): 2779-2785.
- 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: 892-905.
- Wan, Z. and Li, Z.-L. (1997). A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 980-996.
- Wan, Z. and Li, Z.-L. (2008). Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product, *International Journal of Remote Sensing*, 29(17): 5373-5395.
- Wu, P.; Shen, H.; Zhang, L. and Göttsche, F.-M. (2015). Integrated fusion of multi-scale polar orbiting and geostationary satellite observations for the mapping of high spatial and temporal resolution land surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, 156: 169-181.
- Zak ekK. and O tir, K. (2012). Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis, *Remote Sensing of Environment*, 117: 114-124.
- Zhan, W.; Chen, Y.; Voogt, J.; Zhou, J.; Wang, J.; Liu, W. and Mad, W. (2012). Interpolating diurnal surface temperatures of an urban facet using sporadic thermal observations, *Building and Environment*, 57: 239-252.