

تخمین تابش خالص روزانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شرایط آسمان صاف با کاربرد داده‌های سنجنده MODIS

چیمین حاتمی ژارآباد- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد رشته آبخیزداری، دانشگاه ارومیه
مهدی عرفانیان* - دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه
سحر بابایی حصار- دانش‌آموخته مقطع دکتری رشته آبخیزداری، دانشگاه کاشان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱/۲۷

چکیده

تخمین تابش خالص روزانه در مدیریت منابع آب، به‌ویژه در برآورد میزان تبخیر و تعرق، کاربرد گسترده‌ای دارد. در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاع سنجنده ASTER داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و یک مدل هندسی (مبتنی بر شیب و جهت) در تهیه نقشه‌های تابش خالص روزانه (Rn) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد. در تخمین مؤلفه‌های تابش از محصولات مختلف سنجنده MODIS شامل آلبدو، ضریب گسیلندگی زمین و اتمسفر، دمای سطح زمین و هوا استفاده شد. به دلیل وسعت زیاد حوضه، مؤلفه‌های تابش فقط برای چهار تاریخ در شرایط آسمان صاف تهیه شد. برای اعتبارسنجی نتایج، از داده‌های تابش طول موج کوتاه ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز استفاده شد و معیارهای خطای RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۳۰/۲۹ و ۱۹ وات بر مترمربع به دست آمد. مقادیر تابش خالص طول موج بلند روزانه (Rnl) با روش چهارزمانه مشاهدات دمای سطح زمین برآورد شد. به دلیل فقدان داده‌های مشاهده‌ای تابش طول موج بلند، از روش فائو (پنمن) برای تولید مقادیر Rnl در ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، تبریز، بناب، مراغه، و سپهند استفاده شد. نتایج نشان داد مقادیر تابش طول موج کوتاه ۲۴ ساعته ورودی در پیکسل‌های هموار و شیب‌دار دارای اختلاف زیادی است.

کلیدواژگان: ارومیه، تابش خالص، مدل هندسی، مودیس.

مقدمه

تابش خالص خورشیدی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مورد نیاز در تحقیقات اتمسفر، هیدرولوژی، اقلیم، هیدرولوژی حوضه آبخیز، و مدل‌های ذوب برف به‌شمار می‌رود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۱). برآورد میزان سالانه تبخیر و تعرق در تحقیقات منابع آب و هیدرولوژی حوضه آبخیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. فرایند تبخیر و تعرق در هر منطقه تا حد زیادی به میزان انرژی خالص جذب‌شده توسط خاک یا گیاهان بستگی دارد (سبزی‌پرور و شادمانی، ۱۳۹۰). تابش خورشیدی، برخلاف سایر متغیرهای روزانه هواشناسی مانند دما، بارندگی، و سرعت باد فقط در تعداد اندکی از ایستگاه‌های سینوپتیک ایران اندازه‌گیری می‌شود و اندازه‌گیری مقادیر تابش (طول موج کوتاه و بلند)، به علت بروز مشکلات فنی برای دستگاه‌های تابش‌سنجی، به‌ویژه در روزهای مرطوب، به دلیل بارش برف و باران، اغلب با خطا همراه است. تاکنون برای برآورد مقدار تابش روزانه در مقیاس نقطه‌ای (ایستگاه) مدل‌های تجربی، اقلیمی، آماری، و نیمه‌فیزیکی در سطح دنیا

معرفی شده و توسعه یافته است که اغلب آن‌ها در مقیاس نقطه‌ای قابل استفاده‌اند. کاربرد روش‌های زمین‌آماری در تولید نقشه‌های تابش در مقیاس سطح حوضه آبخیز، به دلیل تعداد کم و پراکنش مکانی نامناسب ایستگاه‌های تابش‌سنجی، به‌ویژه در ایران، اغلب با خطای قابل ملاحظه همراه است. به‌رغم اهمیت عوامل توپوگرافی مانند شیب و جهت از نظر تأثیر در میزان دریافت، جذب، و انعکاس تابش خورشیدی، بیشتر مدل‌های تخمین تابش با حذف اثرهای عوامل یادشده فقط در مقیاس ایستگاه (سطح افقی فاقد شیب) پیشنهاد شده‌اند و کاربرد بیشتر مدل‌های تابش در نواحی شیب‌دار و کوهستانی، به دلیل تغییرات شیب و جهت، مناسب نیستند. در سال‌های اخیر، در زمینه معرفی و توسعه مدل‌های برآورد تابش مبتنی بر داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه بر اساس داده‌های ماهواره‌ای محصولات سنجنده^۱ MODIS، تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است. به دلیل تأثیرات مختلف اتمسفر و خصوصیات سطح زمین بر میزان جذب و انعکاس تابش طول موج کوتاه و بلند خورشیدی از یک طرف و تغییرات مکانی و زمانی مقدار تابش خورشیدی از طرف دیگر استفاده از مدل‌های توسعه‌یافته مبتنی بر سنجش از دور، به‌ویژه در مقیاس ناحیه‌ای و منطقه‌ای، توسط بسیاری از محققان با هدف برآورد مؤلفه‌های تابش و تبخیر و تعرق لحظه‌ای (زمان گذر ماهواره) و مقیاس روزانه مورد تأکید قرار گرفته است. در این بخش به نتایج پژوهش‌های مهم مرتبط با موضوع مقاله حاضر اشاره می‌شود:

توار و بالداسانو (۲۰۰۱) از روش آماری برای برآورد تابش ساعتی در کاتالونیای اسپانیا با استفاده از داده‌های سنجنده AVHRR ماهواره NOAA برای یازده ماه متوالی استفاده کردند. ضریب همبستگی بین داده‌های تخمینی و مقادیر مشاهداتی بیشتر از ۰/۹۸ بود و معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) از ۹/۶ تا ۱۵/۸ و مقدار اریبی بین ۱/۳ تا ۹/۵ برآورد شد. ژاکوبز و همکاران (۲۰۰۲) از داده‌های ماهواره‌ای GOES برای برآورد تابش خالص روزانه و تخمین تبخیر و تعرق استفاده کردند و کاربرد آن را با توجه به قدرت تفکیک مکانی نسبتاً پایین ماهواره GOES، به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز کوهستان، توصیه نکردند. بیشت و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در شرایط آسمان صاف و با توسعه مدل سینوسی تابش، مقادیر تابش خالص لحظه‌ای و روزانه دشت بزرگ جنوبی را در اوکلاهامای آمریکا برآورد کردند. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که همبستگی بسیار خوبی بین مقادیر تابش برآوردشده توسط مدل سینوسی و مقادیر مشاهداتی وجود دارد. بیشت و براس (۲۰۱۰) برای برآورد تابش خالص روزانه دشت بزرگ جنوبی ایالات متحده آمریکا در شرایط آسمان صاف و ابری از داده‌های اتمسفری و سطح زمین محصولات مختلف سنجنده MODIS استفاده کردند و با تهیه نقشه‌های رستری تابش در روزهای صاف، ضریب همبستگی ۰/۹ را بین مقادیر تابش خالص روزانه برآوردشده و داده‌های مشاهده‌ای گزارش دادند. سامانی و همکاران (۲۰۰۷) در دو ایستگاه هواشناسی واقع در نیومکزیکو با استفاده از داده‌های سنجش از دور، اقلیمی، خصوصیات پوشش گیاهی، و آلودگی سطح زمین مقادیر تابش خالص روزانه را برآورد کردند. مقایسه داده‌های تابش خالص مشاهده‌ای و برآوردشده در سه روش مختلف در نیومکزیکو نشان داد که خطای برآورد از ۱/۰۶ تا ۵/۳۴ مگاژول بر متر مربع بر روز متغیر است. لانگ و همکاران (۲۰۱۰) متوسط تابش خالص روزانه یک منطقه واقع در شمال کشور چین را با استفاده از داده‌های محصولات سنجنده MODIS و مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۲ و در شرایط فقدان یا کمبود داده‌های هواشناسی برآورد کردند. آن‌ها یک مدل هندسی را برای تخمین میانگین تابش خالص روزانه با دخالت دادن مقدار شیب و جهت پیکسل‌ها ارائه کردند. همچنین، برای برآورد مقدار تابش خالص روزانه با طول موج بلند از روش چهارزمانه برای برآورد میانگین دمای سطح زمین LST^۳ استفاده

1. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

2. Digital Elevation Model

3. Land Surface Temperature

کردند. مقایسه مقادیر تابش خالص روزانه مبتنی بر روش‌های چهارزمانه و یک‌زمانه برای تخمین LST نشان داد که، بر اساس میانگین دمای سطح زمین با روش چهارزمانه، مقادیر تابش خالص روزانه طول موج بلند با دقت بیشتری برآورد کردنی است. آن‌ها در روش یک‌زمانه، میانگین ۲۴ ساعته LST هر پیکسل را بر اساس داده‌های LST در یک زمان گذر ماهواره و در روش چهارزمانه بر اساس داده‌های LST پیکسل در چهار زمان گذر با برازش یک تابع چندجمله‌ای برآورد کردند. جیانگتاو و همکاران (۲۰۱۳) با هدف برآورد میانگین تابش خالص روزانه در شرایط آسمان صاف با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS نتیجه گرفتند که مدل سنجش از دور برآورد تابش خالص روزانه بر اساس محصولات MODIS در شرایط آسمان صاف (آفتابی) از دقت خوبی برخوردار است.

نتایج تحقیقات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های تخمین تابش در مقیاس نقطه‌ای (ایستگاه) ارزیابی شده و در اغلب موارد از داده‌های هواشناسی در برآورد مقادیر تابش استفاده شده است. سبزی پرور (۲۰۰۸)، با استفاده از مدل‌های تابش صباغ، پالتریج، دانشیار، اصلاح‌شده صباغ، اصلاح‌شده پالتریج، و اصلاح‌شده دانشیار، میانگین ماهانه مقدار تابش روزانه را در سواحل شمالی و جنوبی ایران تخمین زد. معیارهای خطا نشان داد که مدل اصلاح‌شده دانشیار در برآورد تابش خورشیدی در مقیاس ماهانه در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه از خطای کمتری برخوردار است. علیزاده و خلیلی (۱۳۸۷) مدل آنگسترم- پرسکات را در برآورد تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مشهد به کار بردند و ضرایب بهینه مدل تجربی یادشده را ارائه کردند. صابری و همکاران (۱۳۸۸) تابش خورشیدی ورودی به سطح زمین را با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR ماهواره NOAA در استان کرمانشاه با استفاده از مدل آماری برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر تابش برآوردشده و مشاهداتی وجود دارد. موسوی بایگی و همکاران (۱۳۸۹) هفت مدل برآورد تابش طول موج کوتاه خورشیدی را به منظور معرفی مناسب‌ترین مدل در ایستگاه سینوپتیک مشهد ارزیابی و مقایسه کردند. آن‌ها مدل واسنجی‌شده آنگسترم- پرسکات را مناسب‌ترین مدل برآورد تابش خورشیدی معرفی کردند. عرفانیان و بابایی (۲۰۱۳)، به منظور برآورد تابش روزانه، مدل فیزیکی هیبرید و مدل‌های تجربی اصلاح‌شده صباغ و دانشیار را برای تعدادی از ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران، که دارای شرایط اقلیمی مختلف است و بیشتر عرض‌های جغرافیایی ایران را پوشش می‌دهد، استفاده کردند. معیارهای خطا نشان داد که مدل فیزیکی هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه نسبت به دو مدل تجربی اصلاح‌شده صباغ و دانشیار، که سبزی پرور (۲۰۰۸) و سبزی پرور و شتابی (۲۰۰۷) در ایران پیشنهاد داده‌اند، کارایی بیشتری دارد.

به‌رغم قابلیت داده‌های سنجش از دور در برآورد تابش و تبخیر و تعرق و ضرورت لحاظ اثرهای عوامل مختلف از قبیل شیب، جهت، دمای سطح زمین، آلبدو، و ضریب انتقال‌پذیری اتمسفر، با مرور منابع، می‌توان ادعا کرد که تحقیقات انجام شده در ایران، که بر داده‌های روزانه ماهواره‌ای به‌ویژه سنجنده MODIS استوار باشد، بسیار محدود و پراکنده است. بنابراین، در این پژوهش، مدل هندسی برآورد تابش خالص روزانه، که اخیراً لانگ و همکاران (۲۰۱۰) آن را توسعه داده‌اند، در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای چهار روز با شرایط آسمان صاف و آفتابی ارزیابی شد. به دلیل حجم بالای محاسبات رستری، نقشه‌های ورودی و خروجی مدل هندسی تابش صرفاً برای روزهای انتخابی تهیه شد. مقادیر تابش طول موج کوتاه ورودی به سطح زمین و تابش خالص طول موج بلند بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز، به عنوان ایستگاه‌های تابش‌سنجی منطقه، اعتبارسنجی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

در این پژوهش، حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غربی ایران با مساحت تقریبی ۵۲۷۰۰ کیلومتر مربع به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این حوضه بین ۱۳° ۴۴' تا ۵۳° ۴۷' درجه طول شرقی و بین ۳۵° ۴۰' تا ۳۸° ۲۸' درجه عرض شمالی قرار دارد و، طبق روش طبقه‌بندی کوپن، دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد و مقدار متوسط بارندگی سالانه آن حدود ۳۵۰ میلی‌متر است (بابایی‌حصار، ۱۳۹۱). برای اعتبارسنجی تابش طول موج کوتاه از داده‌های تابش طول موج کوتاه ثبت‌شده در ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز در چهار تاریخ با شرایط آسمان کاملاً صاف (شبانه‌روز) در سطح حوضه استفاده شد. شرایط آسمان صاف (فاقد ابر) در طول شبانه‌روز در فاصله زمانی ۲۰۰۲-۲۰۱۰ در محصولات MODIS جست‌وجو شد و چهار تاریخ برای ارزیابی مدل تابش انتخاب گردید. به دلیل ثبت‌نشدن مقادیر تابش طول موج بلند، از داده‌های روزانه دما، ساعات روشنایی، و فشار بخار برای تخمین تابش روزانه طول موج بلند با روش فائو (پنمن) در پنج ایستگاه سینوپتیک واقع در سطح حوضه استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

ردیف	ایستگاه سینوپتیک	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	ارومیه	۴۵° ۰۳'	۳۷° ۳۹'	۱۳۱۶
۲	تبریز	۴۶° ۱۷'	۳۸° ۰۵'	۱۳۶۱
۳	بناب	۴۶° ۳۹'	۳۷° ۲۰'	۱۲۹۰
۴	مراغه	۴۶° ۱۶'	۳۷° ۲۴'	۱۴۷۸
۵	سهند	۴۶° ۰۷'	۳۷° ۵۶'	۱۳۴۱

به منظور تهیه نقشه‌های رستری شیب و جهت حوضه، از مدل رقومی ارتفاع سنجنده ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. از داده‌های ماهواره‌ای محصولات MOD11A (ماهواره ترا) و MYD11A (ماهواره آکوا) سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر برای تخمین دمای متوسط روزانه پیکسل‌ها و برآورد تابش خالص با طول موج بلند در روش چهارزمانه استفاده شد. محصولات یادشده شامل داده‌های دمای سطح زمین (LST) و ضریب گسیلندگی سطح زمین در باندهای ۳۱ و ۳۲ مودیس است. برای استخراج آلدوی سطح زمین، از محصولات MCD43A با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شد. ماهواره Terra در ساعات ۱۰:۳۰ صبح و ۱۰:۳۰ شب و ماهواره Aqua در ساعات ۱:۳۰ بعدازظهر و ۱:۳۰ بامداد از مدار استوا عبور می‌کند. از محصولات MOD07 و MOD06 برای استخراج داده‌های دمای هوا، فشار بخار، و دمای نقطه شبنم استفاده شد. قدرت تفکیک مکانی محصولات MOD06 و MOD07 به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ متر است. فرمت داده‌های ماهواره‌ای به صورت HDF است. کلیه لایه‌های HDF، پس از پردازش اولیه، در سیستم تصویر UTM زون شماره ۳۸ شمالی و با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه آماده‌سازی شد.

مدل هندسی تابش

لانگ و همکاران (۲۰۱۰) میانگین تابش خالص روزانه (R_n) را به صورت رابطه ۱ ارائه کرده‌اند:

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} = (1 - \alpha)(S_{in24} + S_{d24}) + (L_{d24} - L_{n24}) \quad (1)$$

که R_n میانگین روزانه تابش خالص (وات بر متر مربع)، S_{in24} میانگین روزانه تابش مستقیم (وات بر متر مربع)، S_{d24}

میانگین روزانه تابش غیرمستقیم (وات بر متر مربع)، L_{d24} میانگین روزانه تابش طول موج بلند ورودی (وات بر متر مربع)، L_{n24} میانگین روزانه تابش طول موج بلند خروجی (وات بر متر مربع)، و α آلبدوی سطح زمین است. تابش خالص روزانه (Rn) شامل تابش خالص طول موج کوتاه (Rns) و تابش خالص طول موج بلند (Rnl) است.

تابش مستقیم ۲۴ ساعته (Sin24)

تابش مستقیم لحظه‌ای (S_{in}) برای سطوح شیب‌دار و هموار از طریق رابطه‌های زیر به دست می‌آید (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$S_{in} = \frac{I_0}{d^2} \cdot \cos(i) \cdot \tau^m \quad (2)$$

که S_{in} تابش مستقیم لحظه‌ای در لحظه گذر ماهواره (وات بر متر مربع)، I_0 مقدار ثابت خورشیدی (۱۳۶۷ وات بر متر مربع)، d فاصله زمین تا خورشید در واحد نجومی، $\cos(i)$ کسینوس زاویه زنیث در لحظه گذر، τ ضریب انتقال‌پذیری اتمسفر، m عدد بدون بعد جرم اتمسفر، P_a فشار اتمسفری (کیلو پاسکال)، و Z ارتفاع پیکسل (متر) است و مقادیر m و P_a از رابطه‌های زیر برآورد می‌شود (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$m = \frac{P_a}{101.3 \cos(i)} \quad (3)$$

$$P_a = 101.3 \exp(-Z / 8200) \quad (4)$$

کسینوس زاویه زنیث $\cos(i)$ برای سطوح هموار (شیب صفر) تابعی از عرض جغرافیایی، زاویه انحراف خورشید، و زمان گذر به وقت استاندارد محلی t است. برای پیکسل‌های شیب‌دار، مقدار شیب و جهت جغرافیایی نیز دخالت دارند و کسینوس زاویه زنیث برای سطوح هموار (رابطه ۵) و سطوح شیب‌دار (رابطه ۶) به صورت رابطه ۵ و ۶ محاسبه می‌شود (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\cos(i) = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (5)$$

$$\cos(i) = \sin\delta(\sin\varphi \cos\alpha - \cos\varphi \sin\alpha \cos\beta) + \cos\delta \cos\omega(\cos\varphi \cos\alpha + \sin\varphi \sin\alpha \cos\beta) + \cos\delta \sin\alpha \sin\beta \sin\omega \quad (6)$$

که δ زاویه انحراف خورشید در پیکسل (رادیان)، Φ عرض جغرافیایی پیکسل (رادیان)، α شیب پیکسل (رادیان)، β آزیموت پیکسل نسبت به جهت جنوب (رادیان)، t ساعت محلی (ساعت)، و ω زاویه خورشید (رادیان) در زمان گذر t ($\omega = \pi(t - 12)/12$) است. مقدار آزیموت β از $-\pi$ تا $+\pi$ متغیر است و برای جهت جنوبی برابر صفر، جهت شرقی برابر $+\pi/2$ ، و جهت غربی برابر $-\pi/2$ است (مقدار مثبت در خلاف جهت حرکت عقربه ساعت و مقدار مثبت در جهت عقربه ساعت نسبت به جنوب جغرافیایی). در رابطه‌های یادشده، اگر $\cos(i)$ برابر صفر فرض شود، زوایای خورشید در زمان طلوع (ω_1) و غروب (ω_2) برای هر پیکسل (هموار یا شیب‌دار) استخراج می‌شود (به پیوست مقاله لانگ و همکاران (۲۰۱۰) مراجعه شود). میانگین روزانه تابش مستقیم (S_{in24}) با انتگرال‌گیری از تابش مستقیم لحظه‌ای (S_{in}) در فاصله بین طلوع و غروب خورشید برای هر پیکسل از رابطه ۷ به دست می‌آید (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$S_{in24} = (a + b \frac{n}{N}) \frac{I_0}{2\pi d^2} [u \cdot \sin\delta(\omega_2 - \omega_1) + v \cdot \cos\delta(\sin\omega_2 - \sin\omega_1) - \sin\beta \sin\alpha \cos\delta(\cos\omega_2 - \cos\omega_1)] \quad (7)$$

$$u = \sin\varphi \cos\alpha - \cos\varphi \sin\alpha \cos\beta$$

$$v = \cos\varphi \cos\alpha + \sin\varphi \sin\alpha \cos\beta$$

که مقدار $(a + b \times n / N)$ در رابطه ۷ بیانگر میانگین روزانه ضریب انتقال‌پذیری اتمسفری است (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰). ضرایب a و b دارای تغییرات مکانی است و در صورت وجود داده‌های مشاهداتی ساعت روشنایی (n) و محاسبه حداکثر ساعت روشنایی ($N = 12(\omega_2 - \omega_1) / \pi$) می‌توان مقدار ضریب انتقال‌پذیری را برای هر نقطه یا پیکسل برآورد کرد. در این پژوهش، به دلیل فقدان داده‌های ساعت روشنایی واقعی (n) و بی‌اطلاعی از ضرایب بهینه a و b در منطقه، ضریب انتقال‌پذیری اتمسفری از رابطه ۸، که آلن و همکاران (۲۰۰۶) ارائه کرده‌اند، برآورد شد. بدین منظور، با استفاده از داده‌های MOD07 در زمان‌های گذر صبح (ماهواره ترا) و بعدازظهر (ماهواره آکوا)، ضریب انتقال‌پذیری لحظه‌ای τ محاسبه شد و سپس میانگین روزانه ضریب انتقال‌پذیری در هریک از تاریخ‌های انتخابی به دست آمد:

$$\tau = 0.35 + 0.627 \exp \left[\frac{-0.00146 P_a}{K_t \cos \theta} - 0.075 \left(\frac{W}{\sin \theta} \right)^{0.4} \right] \quad (8)$$

که در آن W آب موجود در اتمسفر (میلی‌متر)، K_t ضریب کدورت یا تیرگی اتمسفر که مقدار یک برای هوای صاف و ۰/۵ برای هوای کاملاً ابری است (بین صفر و یک)، P_a فشار هوا (کیلو پاسکال)، و θ زاویه زنیث (رادیان) در زمان گذر است. اجزای روابط ریاضی مذکور به صورت لایه‌های رستری برای منطقه مورد مطالعه در هر تاریخ تهیه شد.

لانگ و همکاران (۲۰۱۰) دو اصل را برای مدل برآورد تابش با در نظر گرفتن تأثیر عوامل هندسی (شیب و جهت) ارائه کردند. اصل اول بیان می‌کند در حد فاصل بین طلوع و غروب در سطح شیب‌دار مقدار $\cos(i) > 0$ است. طبق اصل دوم در هر پیکسل شیب‌دار، زمان طلوع نمی‌تواند زودتر از سطح هموار و زمان غروب نمی‌تواند دیرتر از پیکسل واقع در سطح هموار (بدون شیب) اتفاق افتد. به عبارت دیگر، زوایای طلوع (ω_1) و غروب (ω_2) در یک پیکسل شیب‌دار لزوماً باید در بازه $-W_H$ (زاویه طلوع) و W_H (زاویه غروب) همان پیکسل در شرایط هموار (فرض شیب صفر) قرار گیرند (در پیکسل شیب‌دار، زاویه طلوع برابر W_{s1} و زاویه غروب برابر W_{s2} است). در صورتی که چنین حالتی رخ ندهد، زوایای طلوع و غروب سطح هموار طلوع و غروب سطح شیب‌دار در نظر گرفته می‌شود. چنانچه اصل اول برقرار نباشد و در حد فاصل طلوع و غروب سطح شیب‌دار (W_{s1} و W_{s2}) مقدار $\cos(i) < 0$ باشد، برای یک پیکسل شیب‌دار چهار حالت نادر (خاص) زیر ممکن است اتفاق افتد:

- الف) W_{s1} و W_{s2} در بازه $-W_H$ و W_H قرار گیرد. در این حالت، پیکسل شیب‌دار در طول روز دو بار طلوع و غروب دارد.
 ب) W_{s1} در بازه $-W_H$ و W_H قرار گیرد. در این حالت، طول روز پیکسل (N) از زوایای $-W_H$ و W_{s1} به دست می‌آید.
 ج) W_{s2} در بازه $-W_H$ و W_H قرار داشته باشد. در این حالت، طول روز پیکسل از زوایای W_{s2} و W_H به دست می‌آید.
 د) W_{s1} و W_{s2} در بازه $-W_H$ و W_H قرار نداشته باشد. در این حالت، پیکسل تابش مستقیم خورشیدی دریافت نمی‌کند.

تابش غیرمستقیم ۲۴ ساعته (S_{d24})

تابش غیرمستقیم لحظه‌ای (S_d) به صورت رابطه ۹ برآورد می‌شود (لیو و جوردن، ۱۹۶۰):

$$S_d = 0.3(1 - \tau^m) \frac{I_0}{d} \cos(i) \quad (9)$$

تابش غیرمستقیم روزانه (S_{d24}) بر حسب وات بر متر مربع با توجه به تغییرات جزئی تابش غیرمستقیم لحظه‌ای و ثابت‌بودن تقریبی آن در طول روز از رابطه ۱۰ به دست می‌آید (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$S_{d24} = \frac{S_d \times N}{24} \quad (10)$$

تابش خالص روزانه طول موج بلند (Rnl)

متوسط روزانه تابش خالص طول موج بلند (R_{nl})، که تفاوت بین تابش با طول موج بلند روزانه (L_{d24}) ساطع شده از اتمسفر و تابش طول موج بلند روزانه (L_{u24}) ساطع شده توسط سطح زمین است، به صورت رابطه ۱۱ برآورد می‌شود:

$$Rnl = Ld24 - Lu24 = \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (11)$$

برآورد تابش طول موج بلند ورودی بر اساس داده‌های سنجنده MODIS با استفاده از رابطه ۱۲ برآورد می‌شود:

$$Ld24 = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (12)$$

که T_a دمای هوا (کلوین) و ε_a متوسط روزانه ضریب گسیلندگی هوا است و از رابطه ۱۳ و ۱۴ برآورد می‌شود (بیشتر و براس، ۲۰۱۰):

$$\varepsilon_a = 1 - (1 - \xi) \exp(-\sqrt{1.2 + 3\xi}) \quad (13)$$

$$\xi = \frac{46.5}{T_a} e_a \quad (14)$$

که e_a فشار بخار بر حسب هکتو پاسکال است از رابطه ۱۵ برآورد می‌شود (بیشتر و براس، ۲۰۱۰):

$$e_a = 6.11 \exp\left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{T_d}\right)\right] \quad (15)$$

L_v گرمای نهان ویژه تبخیر (برابر ۱۰^۶ × ۲۵ ژول بر کیلوگرم است)، R_v ثابت بخار برای آب (برابر ۴۶۱ ژول بر کیلوگرم در کلوین)، T_d دمای نقطه شبنم (کلوین)، T_a متوسط روزانه دمای هوا (کلوین)، و σ ثابت استفان-بولتزمن (w k⁻⁴ m⁻² × ۵/۶۷ × ۱۰^{-۸}) است. جزئیات رابطه‌های یادشده را بیشتر و همکاران (۲۰۰۵) توضیح داده‌اند. تابش طول موج بلند خروجی بر اساس قانون استفان-بولتزمن به صورت رابطه ۱۶ برآورد می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۳):

$$Lu24 = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (16)$$

میانگین روزانه T_s یا دمای سطح زمین (LST) در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در چهار زمان گذر ماهواره‌های ترا و آکوا با برازش یک تابع چندجمله‌ای درجه سوم در هر پیکسل برآورد شد (هوانگ، ۲۰۱۳):

$$T_s = \frac{\int_0^{24} (a_1 t^3 + a_2 t^2 + at + a_4)}{24} = 3456 a_1 + 192 a_2 + 12 a_3 + a_4 \quad (17)$$

در این رابطه، مقدار T_s میانگین ۲۴ ساعته دمای سطح زمین در پیکسل مورد نظر است. در هر پیکسل، ضرایب رابطه ۱۷ با برازش تابع چندجمله‌ای درجه سوم روی داده‌های دمای سنجنده MODIS در چهار زمان گذر ماهواره برآورد می‌شود. همچنین، در این پژوهش، از روش چهارزمانه یادشده به منظور برآورد میانگین دمای هوا و دمای نقطه شبنم استفاده شد. میانگین ضریب گسیلندگی سطح زمین در هر پیکسل از رابطه ۱۸ برآورد می‌شود (لانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\varepsilon_s = 0.273 + 1.778 \varepsilon_{31} - 1.807 \varepsilon_{31} \varepsilon_{32} - 1.037 \varepsilon_{32} + 1.774 \varepsilon_{32}^2 \quad (18)$$

که ε₃₁ و ε₃₂ به ترتیب بیانگر ضریب گسیلندگی سطح پیکسل در باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS است. به دلیل عدم اندازه‌گیری تابش خالص طول موج بلند در ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از داده‌های

روزانه دمای کمینه (T_{min})، دمای بیشینه (T_{max})، ساعات روشنایی واقعی (n)، حداکثر ساعت روشنایی (N)، و فشار بخار هوا (کیلوپاسکال) استفاده شد و با کمک روش فائو (پنمن)، به عنوان روش جای‌گزین مناسب و قابل قبول، برای تولید داده‌های R_{nl} در شرایط فقدان داده‌های واقعی تابش استفاده شد (عرفانیان و بابایی، ۲۰۱۳). ذکر این نکته لازم است که مراحل برنامه‌نویسی و محاسبات مدل هندسی تابش در نرم‌افزار Matlab انجام شد و نمایش لایه‌های رستری تهیه‌شده در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 انجام گرفت.

یافته‌های پژوهش

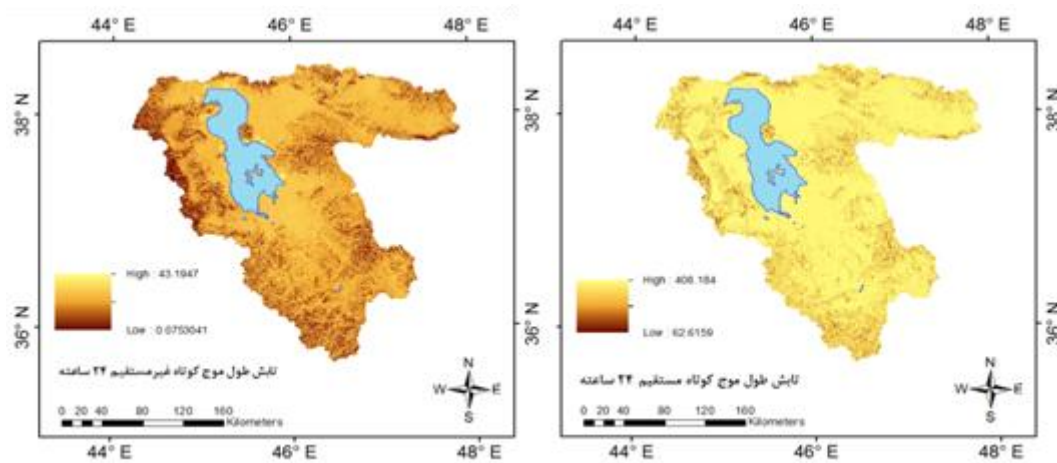
تابش مستقیم طول موج کوتاه (S_{in24})

در هر تاریخ انتخابی، نخست نقشه تابش مستقیم لحظه‌ای به‌دست آمد و بر اساس آن نقشه تابش مستقیم طول موج کوتاه (S_{in24}) تهیه شد. مثلاً، شکل ۱ (راست) نقشه S_{in24} را برای تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵ نشان می‌دهد. مقادیر طول روز (N) در هر یک از تاریخ‌های انتخابی برای پیکسل‌های هموار و شیب‌دار متفاوت است (نتایج ارائه نشده است). زمان طلوع سطح شیب‌دار نمی‌تواند قبل از طلوع سطح هموار رخ دهد و همچنین زمان غروب سطح شیب‌دار نمی‌تواند بعد از غروب سطح هموار اتفاق افتد. چنانچه چنین حالتی رخ دهد، لازم است که مقدار آن با طلوع و غروب سطح هموار جای‌گزین شود. نتایج نشان داد که حالت‌های نادر در شیب‌های بالای ۰ و ۳۰ درجه رخ می‌دهد. جدول ۲ تعداد حالت نادر را در چهار تاریخ انتخابی با آسمان کاملاً صاف در سطح حوضه در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۰ نشان می‌دهد.

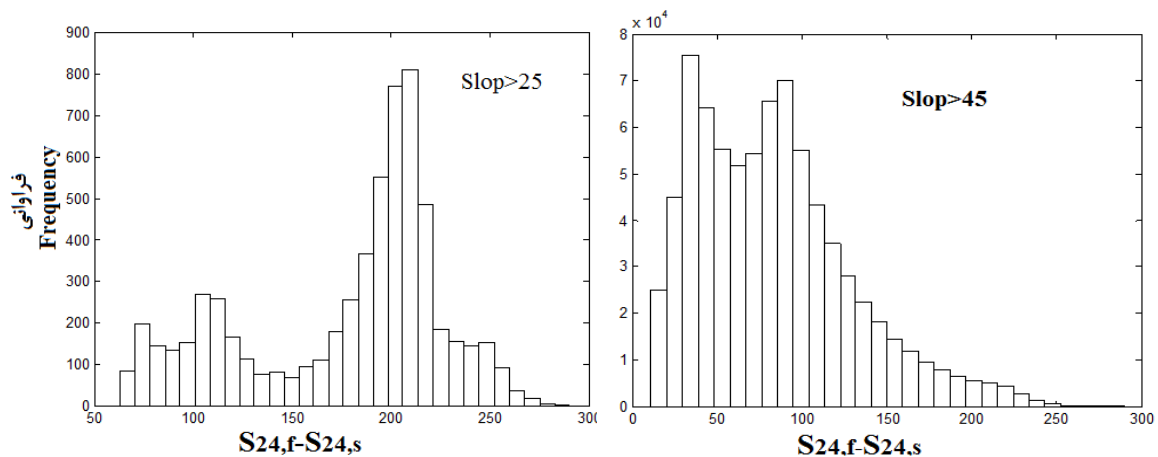
جدول ۲. تعداد پیکسل‌های حالت‌های نادر در تاریخ‌های مورد مطالعه

تاریخ (روز سال)	بازه W1	بازه W2	تعداد حالت نادر اول	تعداد حالت نادر دوم	تعداد حالت نادر سوم
۲۰۰۶/۰۵/۲۹ (۱۴۹)	[-۳/۰۹, ۱/۸۶]	[-۱/۰۳, ۳/۰۸]	۱۰۴۱۰	۱	۱۱۹۶۷
۲۰۰۶/۰۷/۲۷ (۲۰۸)	[-۳/۰۷, ۱/۸۴]	[-۱/۰۳, ۳/۰۵]	۸۳۱۸	۴	۹۱۴۵
۲۰۰۶/۰۸/۱۲ (۲۲۴)	[-۳/۰۵, ۱/۶۵]	[-۱/۰۴, ۳/۰۱]	۷۶۴۲	۱	۸۲۹۶
۲۰۰۷/۰۹/۰۷ (۲۵۰)	[-۲/۱۳, ۱/۰۳]	[-۱/۰۲, ۲/۳۲]	۱۴۱۷۶	۱	۱۷۳۷۱

نقشه تابش ۲۴‌ساعته مستقیم طول موج کوتاه ($S_{in24,s}$) بر اساس شیب و جهت پیکسل‌ها با نقشه تابش ۲۴‌ساعته مستقیم طول موج کوتاه با فرض شیب صفر تمام پیکسل‌ها ($S_{in24,f}$) در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵ مقایسه شد و نمودار توزیع فراوانی یا هیستوگرام $S_{in24,f} - S_{in24,s}$ برای پیکسل‌هایی با شیب بالاتر از ۲۵ درجه (شکل ۲ چپ) و بالاتر از ۴۵ درجه (شکل ۲ راست) تهیه شد. شکل ۲ نشان می‌دهد $S_{in24,f} - S_{in24,s}$ به صورت مقادیر مثبت است و با افزایش درجه شیب فراوانی پیکسل‌ها بیشتر می‌شود که بیانگر اهمیت شیب در مقدار تابش ۲۴‌ساعته مستقیم طول موج کوتاه (S_{in24}) دریافت‌شده توسط پیکسل بین طلوع تا غروب خورشید است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که سطوح افقی نسبت به سطوح شیب‌دار مقدار S_{in24} بیشتری دریافت می‌کنند. بنابراین، نادیده‌گرفتن شیب (مانند فرض شیب صفر در اغلب مدل‌های تابش) به منزله برآورد بیشتر مقدار تابش مستقیم ۲۴‌ساعته S_{in24} است و در مقیاس حوضه آبخیز به دلیل تغییرات جهت و شیب این فرض می‌تواند موجب بروز خطا در مدل‌های توزیعی تابش یا تبخیر و تعرق شود.



شکل ۱. نقشه حوضه آبریز دریاچه ارومیه (منطقه مورد مطالعه) و مقادیر تابش مستقیم Sin24 (سمت راست) و تابش غیرمستقیم Sd24 (سمت چپ) بر حسب وات بر متر مربع در تاریخ ۱۳۸۵/۵/۵



شکل ۲. توزیع فراوانی (هیستوگرام) تفاوت بین مقدار تابش طول موج کوتاه ۲۴ ساعته (Sin24) در سطوح هموار (f) و شیب‌دار (s) در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵

برآورد تابش غیرمستقیم طول موج کوتاه (Sa24)

برای برآورد تابش غیرمستقیم ۲۴ ساعته با طول موج کوتاه، نخست باید تابش غیرمستقیم لحظه‌ای Sd را به دست آورد. تابش مستقیم خورشیدی توسط ذرات تشکیل اتمسفر پراکنده می‌شود و فقط بخشی از تابش پراکنده شده توسط اتمسفر در نهایت به سطح زمین می‌رسد. پس از تهیه نقشه تابش غیرمستقیم لحظه‌ای طول موج کوتاه در هر تاریخ، نقشه ۲۴ ساعته Sd24 تهیه شد. به عنوان نمونه کار، نقشه Sd24 در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵ ارائه شده است (شکل ۲ چپ). مطابق این شکل، در سطح حوضه دریاچه ارومیه، مقادیر Sd24 بین ۰٫۰۷ تا ۴۳ وات بر متر مربع در تغییر بوده و تابش پراکنده در سطوح هموار بیشتر از مناطق مرتفع (نواحی غرب حوضه) دریافت شده است. مقادیر Sd24 در مقایسه با مقادیر Sin24، که بین ۶۲ تا ۴۰۸ وات بر متر مربع متغیر است (شکل ۲ راست)، ناچیز است.

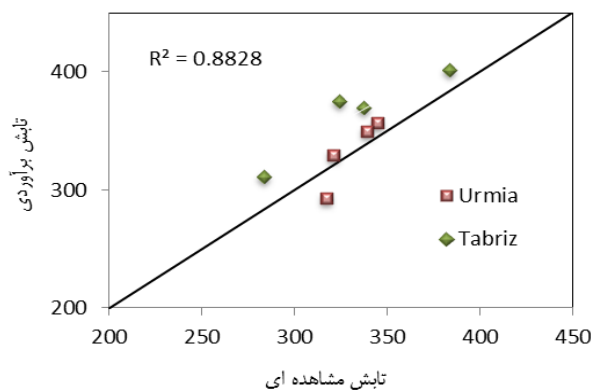
اعتبارسنجی تابش ۲۴ ساعته طول موج کوتاه

به منظور اعتبارسنجی تابش ۲۴ ساعته طول موج کوتاه برآوردشده ($S_{d24} + S_{in24}$)، مقدار این پارامتر با تابش ورودی اندازه‌گیری شده صرفاً در دو ایستگاه سینوپتیک ارومیه و تبریز مقایسه شد (به دلیل فقدان داده‌های مشاهده‌ای تابش روزانه). مقدار معیارهای جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) به ترتیب برابر با ۳۰/۲۹ و ۱۹ وات بر متر مربع در روز به دست آمد. مطابق شکل ۳، نمودار پراکنش نشان می‌دهد که مقادیر تابش روزانه طول موج کوتاه رسیده به سطح زمین در چهار تاریخ انتخابی با شرایط آسمان صاف به طور میانگین حدود ۱۰/۵ درصد بزرگ‌تر از مقادیر مشاهده‌ای است و میزان خطای تخمین در ایستگاه تبریز بزرگ‌تر از ایستگاه ارومیه است (شکل ۳).

در تحقیقات جیانگنائو و همکاران (۲۰۱۳) و حیدری (۱۳۹۳) مقادیر تابش طول موج کوتاه ورودی برآوردشده بر پایه داده‌های ماهواره‌ای بزرگ‌تر از داده‌های مشاهده‌ای گزارش شده است. در شرایطی که مقدار عنصری مانند دی‌اکسید کربن، گازهای پایدار، مواد آبروسل، ذرات آب در اتمسفر زیاد باشد، موجب وقوع پدیده پراکندگی و اضمحلال بخش بیشتری از تابش رسیده به سطح زمین می‌شود. عدم دخالت این مسئله موجب می‌شود تا تابش طول موج کوتاه برآوردشده بیشتر از مقدار واقعی آن شود (سبزی‌پرور و شادمانی، ۱۳۹۰). عوامل یادشده تا حد زیادی در میزان ضریب انتقال‌پذیری اتمسفر تأثیر دارند. در تحقیق حاضر، به دلیل فقدان داده‌های ساعت‌روشنایی و تعداد کم ایستگاه‌های هواشناسی در سطح حوضه، تهیه نقشه $(a + b \times n/N)$ ذکرشده در رابطه ۷ در تاریخ‌های انتخابی امکان‌پذیر نبوده است و به جای آن از مقدار میانگین روزانه ضریب انتقال‌پذیری بر اساس روش ارائه‌شده توسط آلن و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شده است و تخمین بزرگ‌تر این ضریب در رابطه ۷ می‌تواند موجب برآورد بیشتر مقادیر S_{in24} شود.

تابش روزانه خالص طول موج بلند (Rnl)

مقدار تابش طول موج بلند به علت تغییرات دمای سطح زمین و دمای هوا در طول شبانه‌روز قابل اغماض نیست و سهم قابل ملاحظه‌ای در مقدار تابش خالص خورشیدی دارد. برای محاسبه مقدار تابش طول موج بلند ورودی، لایه‌های ضریب گسیلش اتمسفر و دمای اتمسفر لازم است و برای محاسبه طول موج بلند خروجی، لایه‌های ضریب گسیلش زمین و دمای سطح زمین مورد نیاز است. این لایه‌ها به ترتیب با استفاده از مقدار فشار بخار اشباع و ضریب گسیلش در باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS به دست آمد.



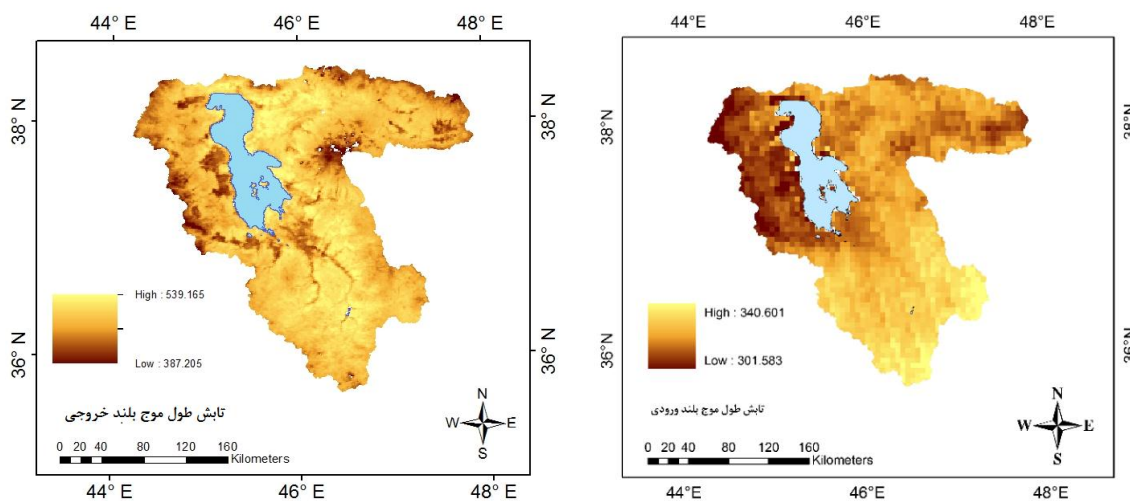
شکل ۳. مقایسه مقادیر تابش روزانه طول موج کوتاه ($S_{in24} + S_{d24}$) مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده) و برآوردشده (مدل هندسی) در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز بر حسب وات بر متر مربع در روز

تابش ۲۴ ساعته طول موج بلند ورودی (L_{d24})

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در این مطالعه از روش چهارزمانه برای برآورد دمای میانگین هوا و سطح زمین بر اساس داده‌های دمای محصولات سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره ترا و آکوا (چهار زمان گذر) در هر تاریخ انتخابی استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار Matlab و برازش یک تابع درجه سوم روی چهار مقدار دما و استخراج ضرایب رگرسیونی، مقدار میانگین دما برای هر پیکسل برآورد شد. پس از آماده‌سازی لایه‌های ضریب گسیلش و دمای اتمسفر، نقشه تابش طول موج بلند ورودی L_{d24} ساعتی در تاریخ‌های انتخابی استخراج شد. از باب نمونه، نقشه رستری L_{d24} منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵ نشان داده شده است (شکل ۴ راست).

تابش ۲۴ ساعته طول موج بلند خروجی (L_{u24})

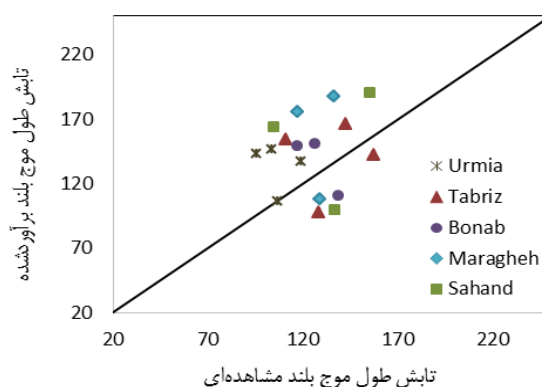
با کاربرد روش چهارزمانه و برآورد میانگین دمای سطح زمین LST و تهیه لایه‌های ضریب گسیلش سطح زمین، نقشه‌های تابش ۲۴ ساعته طول موج بلند خروجی استخراج شد. از باب نمونه، نقشه رستری L_{u24} منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵ به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل ۴ چپ). پس از تهیه لایه‌های رستری L_{u24} در روزهای انتخابی، تابش خالص روزانه طول موج بلند (R_{nl}) استخراج شد (نتایج ارائه نشده است).



شکل ۴. تابش ۲۴ ساعته طول موج بلند ورودی (چپ) و طول موج بلند خروجی (راست) در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵

اعتبارسنجی تابش ۲۴ ساعته طول موج بلند

به دلیل فقدان داده‌های مشاهده‌ای تابش خالص با طول موج بلند (R_{nl}) در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل تابش از روش فائو (پنمن) برای تولید یا بازسازی مقادیر روزانه R_{nl} استفاده شد. نمودار پراکنش (بیست نقطه) شامل مقادیر مشاهده‌ای و برآوردشده تابش R_{nl} برای پنج ایستگاه هواشناسی دارای آمار هواشناسی مورد نیاز روش فائو (ارومیه، تبریز، بناب، مراغه، و سهند) در چهار تاریخ انتخابی در شکل ۵ ارائه شده است و مقادیر RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۳۶/۸۱ و ۳۳/۴۱ وات بر مترمربع به دست آمد.



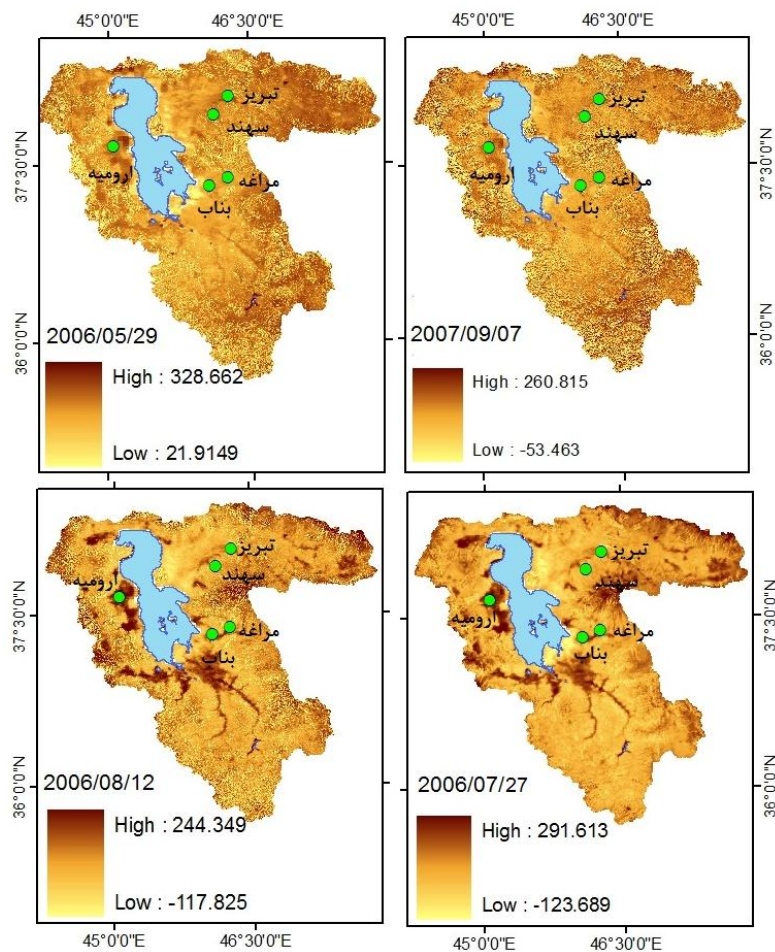
شکل ۵. مقایسه مقادیر برآوردشده تابش خالص طول موج بلند (وات بر متر مربع) مدل هندسی و روش فائو (به عنوان داده‌های مشاهده‌ای) در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز، بناب، مراغه، و سهند

لانگ و همکاران (۲۰۱۰)، با مقایسه مقادیر R_{nl} بر اساس روش LST یک‌زمانه و روش LST چهارزمانه سنجنده مودیس با مقادیر R_{nl} معادله پنمن در ۱۸ ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه آبخیز Baiyangdian، در شش تاریخ انتخابی، با شرایط آسمان کاملاً صاف (آفتابی)، مقادیر RMSE و Bias را در روش یک‌زمانه به ترتیب برابر ۳۹/۶ و ۳۳/۳- وات بر متر مربع و در روش چهارزمانه به ترتیب برابر ۱۲/۸ و ۲/۷ وات بر متر مربع گزارش کردند. آن‌ها نشان دادند که روش چهارزمانه در تخمین LST نسبت به روش تک‌زمانه از دقت بسیار زیادی برخوردار است و مقادیر برآوردشده R_{nl} با روش چهارزمانه اندکی بیشتر از مقادیر پنمن (۱۹۴۸) است و روش تک‌زمانه مقادیر R_{nl} را به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقادیر پنمن (مشاهداتی) برآورد کرده است. در تحقیق یادشده، نمودار پلات پراکنش شامل ۴۸ نقطه بود که بیانگر مقادیر R_{nl} مربوط به ۱۸ ایستگاه هواشناسی در شش تاریخ انتخاب شده است. نام‌برندگان نشان دادند که روش چهارزمانه LST و معادله پنمن (مبتنی بر داده‌های روزانه دما و فشار هوا در ایستگاه هواشناسی)، به‌ویژه در مناطق دارای ایستگاه با شرایط حداقل داده‌ها، می‌تواند کاربرد گسترده داشته باشد. به عبارت دیگر، روش سنجش از دور چهارزمانه می‌تواند به‌خوبی مقادیر R_{nl} را در مقیاس حوضه آبخیز و با دقت قابل قبول در مقیاس حوضه آبخیز ارائه کند.

تابش خالص روزانه (R_n)

نقشه تابش خالص روزانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای چهار تاریخ انتخابی با شرایط آسمان صاف در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، مقدار تابش خالص R_n جذب‌شده توسط پیکسل‌های هموار نسبت به مناطق شیب‌دار (سرشاخه‌ها و مناطق کوهستانی نزدیک مرز حوضه) بسیار بیشتر است. مثلاً، در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵ (۲۰۰۶/۷/۲۷) مقادیر حداقل و حداکثر مقادیر R_n به ترتیب حدود ۱۲۴- و ۲۹۲ وات بر متر مربع برآورد شده است. متأسفانه، با توجه به فقدان داده‌های تابش خالص روزانه در ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوضه، امکان اعتبارسنجی مقادیر R_n میسر نبوده است. به هر حال، مقایسه مقدار تابش ۲۴ ساعته مستقیم طول موج کوتاه در دو حالت هموار و شیب‌دار در تاریخ‌های انتخابی بیانگر این واقعیت است که در مقیاس حوضه باید حتماً مقدار شیب پیکسل را برای تخمین صحیح‌تر S_{in24} اعمال کرد (این موضوع در شکل ۲ نشان داده شد). ذکر این نکته ضرورت دارد که هدف از پژوهش حاضر تخمین تابش خالص روزانه بر پایه محصولات سنجنده مودیس (با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر) و لحاظ مقادیر شیب و جهت در شرایط حداقل داده‌های هواشناسی در مقیاس منطقه‌ای است. به‌رغم اینکه مقادیر برآوردشده R_n و داده‌های تابش مشاهداتی (مقیاس پیکسل) قابل

مقایسه نیستند، مدل هندسی تابش با لحاظ اثرهای شیب و جهت به‌ویژه در مناطق کوهستانی می‌تواند در تهیه نقشه تغییرات مکانی تابش مقادیر قابل اعتمادتری ارائه کند. لانگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز بر این موضوع تأکید کرده‌اند (سبزی-پرور و شادمانی، ۱۳۹۰). بیشتر و همکاران (۲۰۰۵) تأکید کردند که به منظور مقایسه متغیرهای دارای توزیع مکانی (مانند تابش) با مشاهدات زمینی (مقیاس نقطه)، به دلیل ناپیوستگی، تفاوت مقیاس، تعداد محدود و پراکنش مکانی نامناسب ایستگاه‌ها، روش‌های قابل قبول جهانی وجود ندارد. بنابراین، مقایسه تابش در مقیاس پیکسل (۱۰۰ هکتار) با مقادیر ایستگاه (مقیاس نقطه) باید در نظر گرفته شود؛ به‌ویژه در مواردی که ناهمگنی پیکسل زیاد باشد.



شکل ۶. نقشه متوسط روزانه تابش خالص (Rn) حوضه آبریز دریاچه ارومیه در تاریخ ۵ مرداد ۱۳۸۵

نتیجه‌گیری

تحلیل آماری نقشه‌های رستری تابش در چهار تاریخ انتخابی با شرایط آسمان صاف در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که دامنه‌های غربی و شرقی حوضه مقدار تابش بیشتری دریافت می‌کنند و در عرض‌های جغرافیایی بالاتر حوضه مقدار تابش کمتری در واحد سطح در طول روز به سطح زمین رسیده و جذب می‌شود. همچنین، طول روز تأثیر بسزایی در مقادیر تابش ۲۴ ساعته با طول موج کوتاه دارد و در مقادیر تابش خالص روزانه تأثیر می‌گذارد. تحلیل ارتباط بین تابش خالص با ارتفاع، شیب، و جهت جغرافیایی نشان داد که در جهات جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی مقادیر تابش خالص روزانه

بیشتر است و با افزایش ارتفاع پیکسل‌ها، به‌ویژه در نواحی مرتفع و کوهستانی، مقدار تابش خالص روزانه نسبت به سطوح هموار و ارتفاعات پایین مانند اراضی مجاور دریاچه ارومیه کمتر است.

ذکر این نکته لازم است که در این مقاله نقشه‌های روزانه زاویه طلوع و غروب خورشید، ساعات روشنایی، و تحلیل آماری روابط بین مقادیر تابش و ارتفاع در شیب‌ها و جهات مختلف ارائه نشده است و با یافته‌های لانگ و همکاران (۲۰۱۰) تطابق دارد. بر اساس مقایسه نتایج مدل هندسی تابش (مقادیر R_s ورودی به سطح زمین) و داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه سینوپتیک تبریز و ارومیه (به دلیل فقدان داده‌های تابش خالص روزانه)، مقادیر برآوردشده در حدود ۱۰ درصد بیشتر از داده‌های تابش مشاهده‌ای است. ارائه روابط رگرسیونی چندمتغیره بین تابش خالص و ارتفاع در طبقات شیب و جهات مختلف حوضه می‌تواند بسیار کاربردی باشد. مؤلفه تابش طول موج بلند ورودی تا حد زیادی متأثر از ضریب گسیلش و دمای اتمسفر است. در پژوهش حاضر، از محصولات مختلف سنجنده MODIS مانند دمای سطح زمین، آلبیدوی سطح زمین، و ضریب گسیلش زمین و هوا به طور مستقیم استفاده شد.

ضریب انتقال‌پذیری اتمسفر نیز به دلیل نبود داده‌های ساعات روشنایی در ایستگاه‌ها با روش سنجش از دور برآورد شد. به دلیل فقدان داده‌های دمای سطح زمین در روزهای ابری، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای میسر نبوده است و حجم بالای محاسبات باعث شد که در این تحقیق، با توجه به وسعت زیاد حوضه دریاچه ارومیه، فقط برای چهار تاریخ با شرایط آسمان صاف مقادیر تابش برآورد شود. بنابراین، ضرورت دارد مدل هندسی تابش و قابلیت داده‌های ماهواره‌ای در برآورد مؤلفه‌های بیلان انرژی در حوضه‌های آبخیز دارای ایستگاه‌های هواشناسی با پراکنش مکانی مناسب، داده‌های روزانه هواشناسی و تابش خالص دقیق‌تر ارزیابی شود.

صرف‌نظر از ناهمگنی خصوصیات حوضه از نظر لیتولوژی، نوع خاک، رطوبت، پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب و جهت، ذکر این نکته ضروری است که توسعه و ارزیابی مدل‌های تخمین تابش، که فرایندهای فیزیکی سطح زمین و اتمسفر را دخالت می‌دهند، به بهبود برآورد مقادیر تابش خالص روزانه منجر می‌شود. بهبود مقادیر تابش و تغییرات مکانی آن در سطح حوضه بالطبع در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، تخمین تبخیر و تعرق، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، تخمین رطوبت پیشین خاک، برآورد رواناب و پایش سیلاب و خشک‌سالی اهمیت اساسی دارد. استفاده از مدل‌های اتمسفریک یا روش‌های پیشرفته در تعیین وضعیت اتمسفر از نظر دما، فشار، و بخار آب در تخمین تابش روزانه، به‌ویژه در شرایط ابری، توصیه می‌شود. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی قابلیت استفاده از داده‌های سنجنده MODIS انجام شده است؛ به محققان و کارشناسان بخش اجرایی توصیه می‌شود در مقیاس حوضه آبخیز، به‌ویژه در نواحی‌ای که فاقد آمار هواشناسی‌اند، از متدولوژی تحقیق حاضر و داده‌های ماهواره‌ای به‌رغم امکان خطای ۱۰-۲۰ درصد استفاده شود. ارزیابی مدل هندسی تابش در سایر حوضه‌های آبخیز ایران با شرایط مناسب از نظر تعداد و پراکنش ایستگاه‌ها، داده‌های هواشناسی، به‌ویژه مشاهدات روزانه تابش با طول موج کوتاه و بلند (ورودی و خروجی)، توصیه می‌شود.

منابع

- بابایی حصار، س. (۱۳۹۱). ارزیابی مدل هیبرید در برآورد تابش خورشیدی در شرایط مختلف اقلیمی ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه.
- حیدری، و. (۱۳۹۳). توسعه یک مدل ساده سنجش از دور تبخیر و تعرق و ارزیابی آن در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه.
- سبزی‌پرور، ع. و شادمانی، م. (۱۳۹۰). تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من‌کنندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵: ۸۲۳-۸۳۴.
- صابری، پ.؛ رحیمی‌خوب، ع.؛ صابری، ف. و زبردست، س. (۱۳۸۸). برآورد تابش خورشیدی رسیده به زمین با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR ماهواره نوا (مطالعه موردی: کرمانشاه)، سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز، دانشگاه شهید چمران، ص ۱۶۳-۱۷۲.
- عرفانیان، م. و بابایی، س. (۱۳۹۲). ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران، مجله آب و خاک، ۲۷(۱): ۱۵۸-۱۶۸.
- علیزاده، ا. و خلیلی، ن. (۱۳۸۷). تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه مشهد)، مجله آب و خاک، ۲۳(۱): ۲۲۹-۲۳۸.
- موسوی بایگی، م.؛ اشرف ب. و میان‌آبادی، آ. (۱۳۸۹). بررسی مدل‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی به منظور معرفی مناسب‌ترین مدل در یک اقلیم نیمه‌خشک، مجله آب و خاک، ۲۴: ۸۳۶-۸۴۴.
- Alizadeh, A. and Khalili, N. (2009). Estimation of Angstrom Coefficient and Developing a Regression Equation for Solar Radiation Estimation (Case study: Mashhad), *Journal of Water and Soil*, 23(1): 229-238. (In Persian).
- Allen, R.G.; Trezza R. and Tasumi, M. (2006). Analytical Integrated Functions for Daily Solar Radiation on Slopes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(1-2): 55-73.
- Babaei Hesar, S. (2012). Evaluation of Hybrid Model to Estimate Solar Radiation in Different Climatic Conditions in Iran, MS thesis, Faculty of Natural Resources, Urmia University. 94pp. (In Persian).
- Bisht, G.; Venturini, V.; Islam S. and Jiang, L.E. (2005). Estimation of the Net Radiation Using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Data for Clear Sky Days, *Remote Sensing of Environment*, 97(1): 52-67.
- Bisht, G. and Bras, R.L. (2010). Estimation of Net Radiation from the MODIS Data under all Sky Conditions: Southern Great Plains Case Study, *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1522-1534.
- Erfanian, M. and Babaei Hesar, S. (2013). Evaluation of Hybrid Model for Estimating Daily Solar Radiation in Some Solar Sites of Iran, *Journal of Water and Soil*, 27(1): 158-168. (In Persian).
- Heidari, V. (2015). Developing a Simple Evapotranspiration Model Using Remote Sensing and its Evaluation in Urmia Lake Basin, Master thesis, Faculty of Natural Resources, Urmia University. 118 pp. (In Persian).
- Hwang, K.; Choi, M.; Lee, S.O. and Seo, J.W. (2013). Estimation of Instantaneous and Daily Net Radiation from MODIS Data under Clear Sky Conditions: a Case Study in East Asia, *Irrigation Science*, 31(5): 1173-1184.

- Jacobs, J.M.; Myers, D.A.; Anderson, M.C. and Diak, G.R. (2002). GOES Surface Insolation to Estimate Wetlands Evapotranspiration, *Journal of Hydrology*, 266(1): 53-65.
- Jiangtao, H.; Gensuo, J.; Tianbao, Z.; Hesong, W. and Bohui, T. (2013). Satellite-based Estimation of Daily average net Radiation under Clear-sky Condition, *Advances in Atmospheric Sciences*, 31(3): 705-720.
- Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. (1960). The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy*, 4(3): 1-19.
- Long, D.; Gao, Y. and Singh, V.P. (2010). Estimation of Daily Average Net Radiation from MODIS Data and DEM over the Baiyangdian Watershed in North China for Clear Sky Days, *Journal of hydrology*, 388(3): 217-233.
- Mousavi Baygi, M.; Ashraf, B. and Miyanabady, A. (2010). The Investigation of Different Models of Estimating Solar Radiation to Recommend the Suitable Model in a Semi-arid Climate, *Journal of Water and Soil*, 24(4): 836-844. (In Persian).
- Penman, H.L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. In Proceedings of the Royal Society of London, a Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, 193(1032): 120-145.
- Rogers Roddy, R. and Yau, M.K. (1989). *A Short course in cloud physics*, International series in natural philosophy.
- Saberi, P.; Rahimi Khoob, A.; Saberi, F. and Zebardast, S. (2009). Estimation of Incoming Surface Solar Radiation by NOAA AVHRR Images (Case Study: Kermanshah), *The 3th National Conference on management of irrigation and drainage networks*, Jan. 27-28 Jan. 2009, Ahwaz Chamran University, Ahwaz. (In Persian).
- Sabziparvar, A. (2008). A Simple Formula for Estimating Global Solar Radiation in Central Arid Deserts of Iran, *Renewable Energy*, 33(5): 1002-1010.
- Sabziparvar, A.A. and Shadmani, M. (2011). Trends Analysis of Reference Evapotranspiration Rates by Using the Mann-Kendall and Spearman Tests in Arid Regions of Iran, *Journal of Water and Soil*, 25(94): 823-834. (In Persian).
- Sabziparvar, A. and Shetaee, H. (2007). Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran, *Energy*, 32: 649-655.
- Samani, Z.; Bawazir, A.S.; Bleiweiss, M.; Skaggs, R. and Tran, V.D. (2007). Estimating Daily Net Radiation over Vegetation Canopy through Remote Sensing and Climatic Data, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4): 291-297.
- Tovar, H.F. and Baldasano, J.M. (2001). Solar Radiation Mapping from NOAA AVHRR Data in Catalonia, Spain, *Journal of Applied Meteorology*, 40(11): 1821-1834.
- Yang, K.; Huang, G.W. and Tamai, N. (2001). A Hybrid Model for Estimating Global Solar Radiation, *Solar energy*, 70(1): 13-22.