

تعیین دمای سطح با استفاده از فناوری سنجش از دور در منطقه سیستان

پیمان دانش کار آراسته، عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مسعود تجریشی، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف
بهرام تقفیان، عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

Determination of Surface Temperature in Sistan Region Using Remote Sensing Technology

P. Daneshkar Arasteh M. Tajrishy
B. Saghafian

Abstract

Earth skin temperature including soil, water, snow and vegetation surface temperature is one of the main variables in geo-science studies. Generally, spatial distribution of surface temperature is needed in such studies. Spatial monitoring of surface temperature is possible using remote sensing data, and the time series of images provide a continuous spatio-temporal framework required in modeling energy balance of regional evaporation, optimization of energy demands or dispersion of atmospheric pollutions. In this paper, some common methods of surface temperature estimation using satellite imagery were introduced and calibrations of several forms of split window equation were addressed for Sistan area, Iran. Split window method is based on the fact that the atmospheric transmittance varies with wave length and uses a combination of thermal infra-red brightness temperature and emissivity. To calibrate the split window equation, ground observations and 22 NOAA/AVHRR images during 1992 to 2002 were used to develop regression models. Statistical tests were performed to evaluate the equations and coefficients. Ten AVHRR images were used to verify the developed equations. The results indicated that three different forms of split window equations successfully passed the χ^2 statistical test. But, F and Kruskal-Wallis tests showed that they are not statistically different at 95 percent significant level. Therefore, the simplest form was used to derive surface temperature maps in the Sistan region, and recommended as the most applicable one.

Key Words: AVHRR, Brightness Temperature, Emissivity, Remote Sensing, Sistan, Split Window, Surface Temperature.

چکیده

دمای سطح زمین شامل خاک، آب، برف و پوشش گیاهی از جمله متغیرهایی است که در دامنه وسیعی از مطالعات و تحقیقات علوم زمین و محیط زیست کاربرد دارد و عموماً دید مکانی وسیعی از آن در پروژه ها مورد نیاز است. فناوری سنجش از دور، امکان پایش مکانی همزمان این کمیت را در سطوح وسیع فراهم می آورد و سری زمانی تصاویر، پیگیره پیوسته زمانی- مکانی این متغیر را تشکیل می دهد. چنین پیگیره پیوسته ای در اکثر مدل سازی های بیان انرژی مانند آنچه در برآورد تبخیر به صورت منطقه ای مورد نیاز است یا بهینه سازی توزیع و مصرف انرژی و یا انتشار آلاینده های جوی، مورد استفاده قرار می گیرد. در مقاله حاضر، ضمن معرفی برخی روش های متداول تخمین دمای سطح با استفاده از تصاویر ماهواره ای به واسطی و انتخاب صورت مناسبی از معادله پنجره مجزا در محدوده دشت سیستان و هامون ها اقدام شده است. اصل مورد پیروی در این روش که از ترکیب دمای درخشندگی و گسیلندگی باند های فروسرخ حرارتی استفاده می نماید، بر این پایه استوار است که اتمسفر در طول موج های متفاوت، عکس العمل متفاوتی از خود بروز می دهد. برای این منظور، با استفاده از دمای برداشت شده از سطح زمین در دو نقطه مشاهده ای و به ازای ۲۲ تصویر سنجنده AVHRR از ماهواره سری NOAA، طی بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ میلادی در مرحله واسنجی، اقدام به توسعه روابط رگرسیونی گردیده و آزمون های مربوطه نیز به کار گرفته شده اند. در مرحله اعتبارسنجی از ۱۰ تصویر AVHRR دیگر و اطلاعات مشاهده شده زمینی همزمان آنها بهره گیری شده و آزمون χ^2 برای بررسی میزان اعتبار روابط به کار گرفته شده است. بر این اساس، سه صورت از معادله پنجره مجزا که با آزمون های مورد نظر تأیید شده بودند، انتخاب و برای بررسی میزان اختلاف، مورد آزمون های پارامتری F و ناپارامتری Kruskal-Wallis قرار گرفتند. آزمون های مزبور نشان دادند که بین نتایج سه رابطه، اختلاف معنی داری در میانگین و میانه در سطح معنی داری ۹۵ درصد وجود ندارند. لذا ساده ترین صورت معادله پنجره مجزا که متغیرهای کمتری دارد، به عنوان گزینه قابل کاربرد پیشنهاد و بر اساس آن، نقشه های توزیع دمای سطح زمین در محدوده سیستان از طریق پردازش تصاویر استخراج گردید.

واژگان کلیدی: پنجره مجزا، دمای درخشندگی، دمای سطح، سنجش از دور، سیستان، گسیلندگی، AVHRR

مقدمه

ثبت شده در سنجنده برقرار نمود. دمای درخشندگی^۹ که دمای متناظر با انرژی تابشی دریافت شده از سطح توسط سنجنده می باشد، از حل معادله پلانک بدست می آید. تئوری ها و معادلات توسعه یافته و همچنین شکل تقریبی و نحوه حل این معادلات برای باندهای حرارتی^{۱۰} سنجنده AVHRR^{۱۱} از ماهواره های سری NOAA^{۱۲} را می توان در منابع گوناگون جستجو نمود [۱۱]. آنچه در سنجنده ثبت و ضبط می گردد، تغییر یافته تابش گسیل یافته از سطح است. بدین شکل که تشعشع گسیل شده از سطح که توزیع طیفی آن از تابع پلانک پیروی می نماید، قبل از رسیدن به سنجنده از ستون اتمسفر گذر نموده و این گذر از داخل اتمسفر به کلی توزیع طیفی آن را تغییر می دهد [۶]. بنابراین، به هنگام تعیین دمای سطح از باندهای حرارتی، باید اصلاحاتی برای اثراتی که اتمسفر بر تابش دریافتی به وسیله سنجنده بر جای نهاده، صورت گیرد. برای اصلاح اثرات اتمسفر^{۱۳} شیوه های متفاوتی به شرح ذیل ارائه شده است:

الف- واسنجی تصویر بر اساس مقادیر مشاهده ای زمینی^{۱۴}

بسیاری از محققین با استفاده از دمای اندازه گیری شده زمینی همزمان با تصویر برداری در چند نقطه، اقدام به واسنجی و تعیین دمای سطح می نمایند. در این ارتباط فعالیت های متعددی صورت گرفته است. در کلیه این تحقیقات، دمای درخشندگی به وسیله روابط رگرسیونی به دمای سطح در ایستگاه های زمینی مرتبط شده و نقشه توزیع دمای سطح استخراج شده است. به عنوان مثال با استفاده از تصویر باندهای چهار AVHRR مورخ ۱۹۹۱/۹/۴ نقشه توزیع دمای سطح دریاچه بایکال توسط Bolgrien و همکاران (۱۹۹۵) تهیه شده است و Miller و Millis (۱۹۸۹) نقشه توزیع دمای سطح دریاچه گریت سالت واقع در ایالت یوتا را در ایالات متحده به همین شیوه با استفاده از تصویر TM استخراج نمودند. تحقیقات Wang و Yang (۲۰۰۲) در مناطق جنوبی نیوانگلند منجر به ارائه رابطه ای

دمای سطح^۱ در بسیاری از مطالعات و تحقیقات، نظیر بررسی توزیع انرژی در سطح تبخیر، انتشار مواد و آلاینده ها در توده های آبی و بطن خاک، انتشار آلودگی در هوا، برنامه ریزی توزیع و مصرف انرژی، طراحی و بهسازی شبکه حمل و نقل و مکانیابی آتش سوزی ها مورد نیاز است. معمولاً دمای سطح زمین به صورت نقطه ای در تعداد محدودی از نقاط که عموماً ایستگاه های اندازه گیری می باشند، مورد پایش قرار می گیرد. در مواقعی که توزیع مکانی دمای سطح در پهنه وسیع و به طور همزمان مورد نیاز است، فنآوری سنسج از دور^۲ قابلیت های خود را به نمایش می گذارد.

اجسام بسته به دما و خصوصیات فیزیکی که دارند از خود انرژی تابشی گسیل می نمایند و به صورت ایده آل یک جسم سیاه^۳ حداکثر انرژی تابشی ممکن را به ازای دمای مشخص از خود گسیل می نماید. مطابق با قانون پلانک^۴ گسیل انرژی از یک جسم سیاه تابع دمای فیزیکی جسم، طول موج و سرعت سیر نور در خلاء می باشد و به طور تجمعی در تمام طیف امواج الکترومغناطیسی، کل انرژی گسیل یافته از جسم سیاه از قانون استفان- بولتزمن^۵ پیروی می نماید [۱۹]. اکثر اجسام در طبیعت رفتاری مغایر با اجسام سیاه دارند و انرژی تابشی کمتری نسبت به جسم سیاه از خود گسیل می نمایند و تنها در یک طول موج خاص، حداکثر تابش را تولید می کنند. نسبت انرژی گسیل یافته از این اجسام نسبت به جسم سیاه با کمیتی به نام گسیلندگی جسم^۶ معرفی می شود. البته باید به این میزان انرژی گسیل شده از اجسام طبیعی، مقدار انرژی تابشی بازتاب شده^۷ از آنها که دارای منشاء خارجی می باشد را نیز افزود [۱۷].

سنجنده غیرفعال^۸ ترکیب انرژی گسیل یافته و بازتاب شده از سطح را دریافت می نماید. این انرژی که دارای دو منشاء متفاوت است (منشاء اولی زمین و منشاء دومی خورشید) دارای طول موج های مختلفی بوده و توسط سنجنده قابل تفکیک می باشد [۶]. با توجه به قانون پلانک می توان ارتباطی خطی بین دمای جسم و گسیلندگی آن با دمای

Brightness Temperature^۹
Thermal Channel^{۱۰}

Advanced Very High Resolution Radiometer^{۱۱}

National Oceanic and Atmospheric Administration^{۱۲}

Atmospheric Effects Correction^{۱۳}
Ground Observation^{۱۴}

Surface Temperature^۱
Remote Sensing^۲
Black Body^۳
Planck's Law^۴
Stefan-Boltzmann Law^۵
Body Emissivity^۶
Reflected Radiant Energy^۷
Passive Sensor^۸

ج- حذف اثر اتمسفر^{۱۶}

گاهی به جای اصلاح اثر اتمسفر، سعی می‌گردد اثر آن در تصویر حذف گردد. در این ارتباط دو شیوه کلی وجود دارد: استفاده از دو یا چند تصویر همزمان یا بکارگیری دو یا چند باند حرارتی از یک تصویر. در روش دو دید^{۱۷} که توسط Singh (۱۹۸۴) معرفی شده، از تصویر برداری تقریباً همزمان از یک منطقه استفاده می‌شود. حل همزمان معادله انتقال تابش برای دو تصویر که رابطه خطی تابع پلانک را در سنجنده و سطح زمین بیان می‌نماید، منجر به تعیین ضریب عبور دهندگی اتمسفر^{۱۸} و به دنبال آن تعیین دمای سطح می‌شود. در این روش، فرض می‌گردد که عبور دهندگی اتمسفر تحت یک زاویه خاص برای دو تصویر همزمان یا تقریباً همزمان، برابر است.

نکته حائز اهمیت در روش دو دید این است که اگر دو تصویر همزمان از یک منطقه، اما با زاویه دید مختلف وجود داشته باشد، می‌توان اثر اتمسفر را برای دو تصویر یکسان فرض نمود و همچنین دمای سطح برای هر دو تصویر یکی است. در حالی که به لحاظ زاویه دید متفاوت، دمای درخشندگی متفاوتی برای دو تصویر بدست آمده است. بنابراین با جایگذاری دمای درخشندگی هر یک از تصاویر، یک دستگاه دو معادله و دو مجهول غیرخطی بدست می‌آید که حل عددی آن منجر به تعیین طول اپتیکی و به دنبال آن دمای سطح می‌گردد. بدین ترتیب، نیاز به اطلاعات زمینی برای واسنجی دمای سطح مرتفع شده و دمای سطح مستقل از برداشت های زمینی به وسیله سنجش از دور تعیین می‌شود. استفاده از این روش در سطوح اقیانوس ها و سایر پهنه های غیر قابل دسترس و اندازه گیری زمینی توصیه شده است.

مسئله اساسی در این روش دسترسی به دو تصویر همزمان از منطقه است. البته، Singh (۱۹۸۴) اذعان می‌دارد که اگر دو تصویر غیرهمزمان، اما نزدیک به هم از لحاظ زمانی وجود داشته باشد، می‌توان از این روش استفاده کرد، به شرطی که در فاصله زمانی بین دو تصویربرداری، اثر اتمسفر تغییر نیابد. به عنوان مثال، گرد غبار در هوا گسترده نشده باشد.

در روش چند بانسی^{۱۹} که به نام پنجره مجزا^{۲۰} نیز نامیده می‌شود، از این ایده که اتمسفر در طول

برای تعیین دمای سطح از دمای درخشندگی باند شش تصویر ETM+ گردید. در این تحقیق از یک گذر تصویر و اطلاعات همزمان در ۱۵ ایستگاه زمینی استفاده شده و حداکثر خطایی معادل ۰/۸ درجه سانتی گراد بدست آمده است.

علیرغم دقت کافی که این روابط تجربی دارند، استفاده از آنها محدود به محل توسعه مدل است و کاربردی در سایر مناطق ندارند. همچنین به دلیل تغییرات زمانی اثر اتمسفر، استفاده از این روش تنها وقتی مقدور است که تعدادی تصویر غیر همزمان و اطلاعات زمینی همزمان با آنها در اختیار باشد تا به این ترتیب تغییرات وسیع زمانی اثر اتمسفر در معادله لحاظ گردد. اما هنوز محدودیت کاربرد محلی معادلات مطرح می‌باشد. لذا اکثر محققین، روش های دیگر تخمین دمای سطح را ترجیح می‌دهند، به خصوص روش هایی که به اطلاعات زمینی وابستگی کمتری دارند.

ب- مدل سازی معکوس اثر اتمسفر^{۱۵}

بسیاری از محققین من جمله Cracknell (۱۹۹۷) برای تعیین دمای سطح زمین، مدل سازی اتمسفر و اثر گازهای موجود در آن بر طیف الکترومغناطیسی را پیشنهاد می‌نمایند. در این شیوه با استفاده از حل معادلات حاکم بر انتقال تابش در هر یک از گازها و ترکیبات موجود در اتمسفر، اقدام به شبیه سازی اثر این ترکیبات بر تابش رسیده به سنجنده به صورت معکوس و مرحله به مرحله نموده، نهایتاً انرژی تابشی گسیل شده از سطح و دمای سطح را تعیین می‌نمایند.

این عملیات به وسیله برنامه های رایانه ای صورت گرفته و برای این منظور، معادلات انتقال انرژی تابشی به صورت عددی حل می‌گردند [۶]. این برنامه ها، پارامترهای متعددی از مشخصات اتمسفر شامل ترکیبات گازی آنها، محتوای رطوبتی، نیمرخ دمایی و نوسانات ماهانه و فصلی این عوامل را بکار می‌گیرند که نیازمند شناخت کافی از مشخصات اتمسفر در ایستگاه های زمینی است که معمولاً هم دسترسی به این اطلاعات و هم دستیابی به آن برنامه ها و نرم افزارهای پیچیده همیشه ممکن نیست. یکی از شناخته شده ترین برنامه ها در این زمینه برنامه LOWTRAN و نسخ متعدد آن است [۱۲]. در این زمینه به برنامه MODTRAN نیز می‌توان اشاره نمود [۲۰].

Atmospheric Effects Elimination^{۱۶}Two Look Method^{۱۷}Atmospheric Transmittance^{۱۸}Multi-Channel Method^{۱۹}Split Window^{۲۰}Atmospheric Effects Back Modeling^{۱۵}

آزمون F در سطح معنی داری ۹۹ درصد و در مرحله اعتبارسنجی با آزمون χ^2 در سطح معنی داری ۹۹ درصد، مورد تأیید قرار گرفته و دارای خطای نسبی متوسطی معادل شش درصد است. در جدول (۱)، T_s ، دمای سطح؛ T_{B4} و T_{B5} ، به ترتیب دمای درخشندگی باندهای ۴ و ۵ سنجنده AVHRR و همگی بر حسب درجه سانتی گراد می باشند.

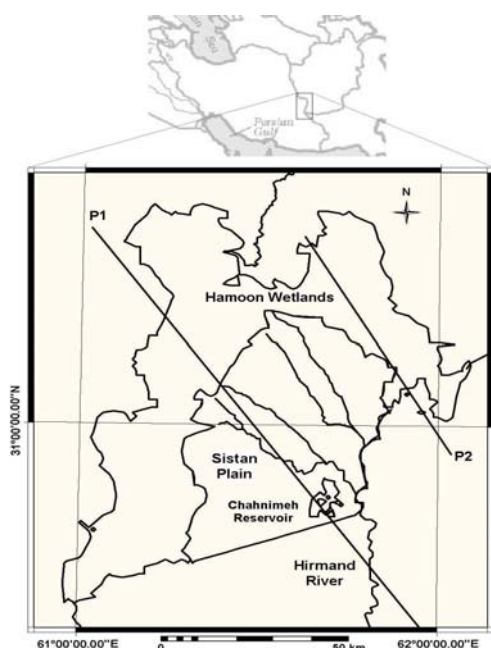
روش تحقیق

چنانچه قبلاً ذکر شد، مدل های تصحیح اثر اتمسفر به اطلاعات گسترده و بسیار دقیقی از نیمرخ اتمسفر نیاز دارند که در محدوده مطالعاتی، چنین اطلاعاتی فراهم نبود. از طرف دیگر به برنامه های مورد نیاز برای مدل سازی اتمسفر نیز دسترسی وجود نداشت. لذا، استفاده از این شیوه برای برآورد دمای سطح منتفی گردید. از طرف دیگر، روش دو دید مستقل از اطلاعات زمینی است و در محدوده مطالعاتی به دلیل محدودیت تعداد ایستگاه های زمینی، اطلاعات ناچیزی در اختیار قرار دارد؛ لذا به کارگیری این شیوه بسیار مناسب تشخیص داده شد. اما، در میان حدود ۱۵۰ گذر تصویر اخذ شده، تصاویری تقریباً همزمان، وجود نداشت. در نتیجه، استفاده از این روش نیز میسر نگردید. بنابراین، از روش واسنجی تصاویر با استفاده از اطلاعات زمینی برای تعیین دمای سطح بهره گیری شد. برای این منظور صور متفاوتی از معادلات پنجره های مجزای مندرج در جدول (۲) به کار گرفته شد.

موج های متفاوت، عکس العمل متفاوتی از خود بروز می دهد، استفاده گردیده است. روش پنجره مجزا، کم و بیش از دهه ۱۹۷۰ به کار گرفته شده، اما پس از پرتاب ماهواره های سری NOAA و تصویر برداری توسط سنجنده AVHRR، به دلیل وجود دو باند حرارتی نزدیک به هم ۴ و ۵ در این سنجنده ها؛ استفاده از این روش، گسترش فراوانی یافته است. ضرایب این روش را می توان از طریق مدل سازی اثر اتمسفر که چندان توصیه نشده و واسنجی محلی تعیین نمود. از روش پنجره مجزا تا کنون چندین شکل مختلف ارائه شده که در برخی، دمای درخشندگی کلیه باندهای فرورسرخ حرارتی و فرورسرخ میانی AVHRR (باندهای ۳، ۴ و ۵ در سنجنده AVHRR) به دمای سطح مرتبط می شود و در برخی، تنها باندهای حرارتی مورد استفاده قرار می گیرد [۹ و ۱۰]. استفاده از این شیوه با تصاویر TM و ETM+ نیز گزارش شده [۲ و ۳، ۹] و همچنین، معادلات متعددی برای تصویربرداری های روزانه و شبانه به صورت مجزا ارائه شده است [۶ و ۱۱]. به هر حال، این شیوه نیز نیاز به واسنجی محلی دارد. روش پنجره مجزا از سایر روش های ذکر شده از مقبولیت و مطلوبیت بیشتری برخوردار بوده و در اکثر تحقیقات و مطالعات از آن استفاده می گردد. در این مقاله، با استفاده از اطلاعات زمینی همزمان با تصویر برداری، صورت های متفاوتی از روش پنجره مجزا در محدوده دشت سیستان برای تخمین توزیعی دمای سطح زمین شامل سطوح آبی، خاک و پوشش گیاهی، واسنجی شده است.

منطقه مورد مطالعه

دشت سیستان در محدوده جغرافیایی $35^{\circ} 30'$ تا $31^{\circ} 20'$ عرض شمالی و $61^{\circ} 15'$ تا $61^{\circ} 55'$ طول شرقی قرار دارد و دارای حدود ۸۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی است (شکل ۱). در این محدوده، دو ایستگاه سینوپتیک هواشناسی زابل و زهک قرار دارند که اطلاعات مورد نیاز از دمای سطح خاک از اطلاعات برداشت شده در آنها استخراج شده است. قدمت آمار برداری در این ایستگاه ها به ترتیب بالغ بر ۴۳ و ۱۳ سال است. اما در این تحقیق، از اطلاعات مربوط به سال های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ میلادی استفاده شده است. در محدوده مورد نظر، دانش کار آراسته (۱۳۸۳) برای دمای سطح آب از روش پنجره مجزا، معادلات جدول (۱) را پیشنهاد و مورد بررسی قرار داده است. وی معادله ردیف شش را انتخاب و مورد ارزیابی قرار داد. وی نشان داد که علیرغم ضریب تعیین نه چندان مطلوب در مرحله توسعه روابط، این رابطه به وسیله



شکل (۱) محدوده مورد مطالعه.

جدول (۱) واسنجی دمای درخشندگی برای تعیین دمای سطح در سیستان [۱].

ردیف	معادله	R ² (%)
Eq1	$T_S = 0.66 T_{B4} + 15.8$	۴۶
Eq2	$T_S = 0.63 T_{B5} + 15.4$	۴۳
Eq3	$T_S = -7.2 + 1.36 T_{B4} - 0.011 T_{B4}^2$	۴۷
Eq4	$T_S = -7.5 + 1.45 T_{B5} - 0.012 T_{B5}^2$	۴۵
Eq5	$T_S = 9.3 + 0.77 T_{B4} - 0.17 T_{B5}$	۴۷
Eq6	$T_S = 8.93 + 0.53 T_{B4} - 0.16(T_{B4} - T_{B5})$	۶۰

جدول (۲) معادلات پنجره های مجزای به کار گرفته شده در تحقیق.

منبع	معادله	نماد
McClain و همکاران (۱۹۸۵)	$T_S = a + b(T_{B4} - T_{B5})$	Eq1
Li و Becker (۱۹۹۰)	$T_S = a + b\left(\frac{T_{B4} + T_{B5}}{2}\right) + c\left(\frac{T_{B4} - T_{B5}}{2}\right)$	Eq2
Li و Becker (۱۹۹۰)	$T_S = a + bT_{B4} + cT_{B5} + d\varepsilon_4 + e\varepsilon_5$	Eq3
Dash (۲۰۰۴)	$T_S = a + \left[b + c\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right) + d\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right] \left(\frac{T_{B4} + T_{B5}}{2}\right) + \left[e + f\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right) + g\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right] \left(\frac{T_{B4} - T_{B5}}{2}\right)$	Eq4
Uliveri و همکاران (۱۹۹۲)	$T_S = a + bT_{B4} + c(T_{B4} - T_{B5}) + d(1 - \varepsilon)$	Eq5

نیست. روابط تجربی ارائه شده برای تخمین گسیلندگی سطح از شاخص های گیاهی مانند NDVI^{۲۱} به صورت معادلات خطی و غیرخطی [۲۲ و ۲۴]، علیرغم مقبولیت و کاربرد گسترده به دلیل ماهیت تجربی که دارند، ذاتاً قابل کاربرد در تمامی اقلیم ها و مناطق نمی باشند [۸]. در نتیجه، در این تحقیق میزان اثر این کمیت بر دقت روابط نیز مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای دمای درخشندگی و گسیلندگی برای تعداد ۳۲ گذر تصویر AVHRR از طریق پردازش تصویر استخراج گردید و در مقابل دمای سطح خاک اندازه گیری شده در ایستگاه های منطقه برای تعیین ضرایب معادلات به کار گرفته شد. در این ارتباط، ۳۰ درصد از اطلاعات (تعداد ده تصویر) برای اعتبارسنجی معادلات از قبل

در جدول (۲)، ε_4 و ε_5 به ترتیب گسیلندگی سطح در باندهای مزبور؛ ε ، میانگین گسیلندگی ها؛ $\Delta\varepsilon$ ، اختلاف دو گسیلندگی؛ a, b, c, d, e, f, g ، ضرایب رگرسیونی بوده و سایر متغیرها قبلاً تعریف شده اند. معادلات مورد بررسی توسط دانش کار آراسته (۱۳۸۳) با توجه به هدف کاربرد در محدوده توده های آبی هامون ها توسعه یافته است. در صورتی که دمای سطح خاک مورد توجه باشد، باید علاوه بر دمای درخشندگی باندهای متفاوت از گسیلندگی سطح در آن باندها نیز استفاده گردد [۷]. تعیین گسیلندگی سطح زمین یکی از محدودیت های منطقه مورد مطالعه است. لذا به کار گیری معادلات پنجره مجزا با اعمال اثر گسیلندگی سطح در این منطقه به سادگی امکان پذیر

^{۲۱} Normalized Difference Vegetation Index

کنار گذاشته شد و ۷۰ درصد باقی مانده (تعداد ۲۲ تصویر) برای توسعه معادلات به کار رفت. متغیرهای گسیلندگی باندهای ۴ و ۵ با استفاده از روابط ارائه شده در منابع [۲۱ و ۲۴] محاسبه و در مدل سازی به کار گرفته شده است.

نتایج و بحث

جدول (۳) ضرایب معادلات مندرج در جدول (۲) را نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می گردد، معادلات Eq1 و Eq3 دارای ضرایب تعیین بسیار پایینی بوده و از تحلیل ها کنار گذاشته شده اند. اما روابط Eq2، Eq4، Eq5 دارای ضرایب تعیین برابر یا اندکی بیشتر از ۶۰ درصد می باشند. چنانچه در این جدول ملاحظه می شود، علاوه بر ضرایب رگرسیونی و ضرایب تعیین، درصد خطای نسبی متوسط و مقدار χ^2 مشاهده ای نیز ارائه شده است. کمترین خطای نسبی مربوط به Eq4 برابر ۵/۳ درصد می باشد.

همچنین، مشاهده می گردد که علیرغم ضرایب تعیین نه چندان مطلوب، معادلات Eq2 و Eq4 توسط آزمون χ^2 در مرحله اعتبارسنجی در سطح معنی داری ۹۵ درصد مورد تأیید قرار گرفته اند و معادله Eq5 علیرغم خطای نسبی کمتر از معادله Eq2 به وسیله این آزمون در مرحله اعتبارسنجی در سطح معنی داری مورد نظر، تأیید نشده است. شکل (۲) نتایج اعتبارسنجی را به صورت گرافیکی نمایش می دهد. چنانچه در این شکل ملاحظه می گردد، معادلات مردود شناخته شده، پراکنش بیشتری حول نیمساز ربع اول (خط ۱:۱) دارند.

از طرف دیگر، نتایج بدست آمده نشان می دهد که علیرغم پیچیده تر شدن معادلات با افزودن متغیر گسیلندگی سطح، نتایج تفاوت قابل توجهی ننموده اند. این نکته توسط Keir و همکاران (۲۰۰۰) نیز مورد تأکید قرار گرفته است. برای بررسی اختلاف میان معادلات Eq2 و Eq4 از جدول (۳) و معادله Eq6 از جدول (۱)، آزمون های پارامتری F و ناپارامتری KW^{22} بر میانگین و میانه نتایج معادلات، مورد استفاده قرار گرفت. مقدار p آزمون F معادل ۰/۰۵۲۲ نشان می دهد که میانگین نتایج سه معادله در سطح ۹۵ درصد، اختلاف معنی داری ندارند. همچنین، مقدار p آزمون KW معادل ۰/۰۷۴۵ حاکی از عدم معنی داری اختلاف میانه های نتایج معادلات در سطح معنی داری ۹۵ درصد است. تحقیقات Oesch و همکاران (۲۰۰۱) در محدوده ارتفاعات آلپ در اروپا نیز حاکی از عدم تفاوت نتایج این روش ها است.

$Kruskal-Wallis Test^{22}$

بنابراین، افزایش متغیرهای گسیلندگی سطح هیچ مزیتی نداشته و در عین حال این محدودیت را اعمال می نماید که روابط مورد استفاده در تعیین گسیلندگی مربوط به سطح خاک و پوشش گیاهی است و در توده های آب سطحی کارایی ندارد. لذا، معادله Eq6 از جدول (۱) که توسط دانش کار آراسته (۱۳۸۳) ارائه شده بود، به دلیل سادگی و نیاز به متغیر کمتر و امکان استفاده هم در سطح خاک و پوشش گیاهی و هم سطوح آب آزاد (به دلیل عدم وابستگی به گسیلندگی سطح)، مناسب تر تشخیص داده شد و توزیع دما در سطح منطقه بر مبنای این معادله مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳) نقشه توزیع دمای سطح در محدوده سیستم را برای تصویربرداری مورخ ۱۹۹۶/۵/۲۴ نشان می دهد. چنانچه در این شکل ملاحظه می شود، در محدوده هامون ها یک دامنه تغییرات ۱۲ درجه سانتی گراد از ۲۰ تا ۳۲ درجه سانتی گراد به چشم می خورد.

نیمرخ دمایی شکل (۴) در ناحیه ۲ تأییدی بر این مدعا است. چنانچه در شکل (۴) مشاهده می گردد، نواحی ۲، ۴ و ۶ که به ترتیب شامل سطوح آب آزاد هامون ها، مخزن چاه نیمه و رود هیرمند است، نسبت به اراضی بایر بالادست هامون ها (ناحیه ۱)، دشت سیستم (ناحیه ۳) و اراضی بایر پایین دست منطقه (نواحی ۵ و ۷) از دمای کمتری برخوردار می باشند. به پیروی از دمای درخشندگی، نواحی دارای پوشش گیاهی و خاک هامون پوزک و حاشیه هامون های صابری و هیرمند که فاقد آب آزاد می باشند، دمای سطح بیشتر و در محدوده آبهای آزاد هامون ها، دما کمتر است (شکل ۳). نیمرخ دمایی شکل (۵) که مربوط به امتداد P2 در شکل (۱) می باشد، این موضوع را مورد تأکید قرار می دهد. نواحی ۱ و ۳ در شکل (۵) مربوط به سطوح آب آزاد هامون پوزک، ناحیه ۲ مربوط به نیزارها و محدوده دارای پوشش گیاهی تالاب پوزک بوده و ناحیه ۴ اراضی بایر جنوب هامون پوزک را شامل می شود. در محدوده دارای آب آزاد (شکل ۳، ناحیه ۲ در شکل ۴ و ناحیه ۱ در شکل ۵)، دامنه تغییرات دما حدود سه درجه سانتی گراد (از ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتی گراد) می باشد که حداقل دما مربوط به نقاط عمیق شمال هامون صابری است (ناحیه ۲ در نیمرخ دمایی شکل ۴). البته بر خلاف انتظار، آبهای عمیق مخزن چاه نیمه، دمای بالاتری را نشان می دهند (ناحیه ۴ در نیمرخ دمایی شکل ۴) که علت در اثر سلول های مرزی نهفته است. یعنی به دلیل اندازه سلول های ۱۱۰۰ متری تصاویر، مرزهای چاه نیمه به

۲- معادله $TS = 8.93 + 0.53 TB4 - 0.16(TB4 - TB5)$ تنها معادله ای بود که در سطح معنی داری ۹۹ درصد در مرحله توسعه روابط، مورد تأیید قرار گرفت.

۳- خطای نسبی متوسط معادله انتخاب شده حدود ۶ درصد بود.

۴- صور پیچیده تر معادله پنجره مجزا که با آزمون های آماری مراحل توسعه و اعتبارسنجی در سطح معنی داری ۹۵ درصد تأیید شده بودند، با معادله انتخابی در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی داری نداشتند.

با توجه به نتایج بدست آمده، دقت روابط توسعه یافته و انتظار کسب نتایج بهتر و با دقت بیشتر از روش دو دید از دیدگاه نظری، پیشنهاد می گردد تعدادی جفت تصویر تقریباً همزمان از منطقه تهیه شود و ضمن استخراج دمای سطح به صورت توزیعی از این روش، نتایج با روش پنجره مجزا مقایسه گردد. همچنین، با توجه به قدرت تفکیک مکانی بهتر تصاویر Landsat-TM/ETM+ و وجود باندهای فرسرخ میانی و حرارتی در این سنجنده ها، پیشنهاد می شود با تکرار تحقیق در محدوده مخزن چاه نیمه و نیزارهای هامون پوزک نتایج مورد تدقیق قرار گیرد.

منابع

- ۱- دانش کار آراسته، پ. ۱۳۸۳. توسعه یک مدل توزیعی برآورد تبخیر منطقه ای با بهره گیری از فنون سنجنش از دور (مطالعه موردی دریاچه هامون). رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۲۵۰ ص.
- 2-Allen, R.G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, 229: 27-41.
- 3-Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin-Turkey. *Journal of Hydrology*, 229: 87-100.
- 4-Becher, F. & Li, Z.H. 1990. Toward a local split window method over land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 369-393.
- 5-Bolgrien, D.W., Granin, N.G., & Levin, L. 1995. Surface temperature dynamics of Lake Baikal observed from AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61: 211-216.
- 6-Cracknell, A.P. 1997. The advanced very high resolution radiometer (AVHRR). Taylor & Francis Ltd., London, U.K., 534 pp.

دقت تفکیک نشده و مقادیر سلول های مرزی، میانگینی از دمای سطح آب و سطح خاک فاقد پوشش گیاهی مجاور مخزن را ارائه می نمایند. لذا، تصویر مزبور برای بررسی تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه مناسب نیست.

در محدوده دشت سیستان، دما در دامنه ۲۶ تا ۳۶ درجه سانتی گراد تغییر می نماید. محدوده کشتزارهای سیستان دارای دمایی بین ۳۰ تا ۳۲ درجه سانتی گراد و محدوده جنوب هامون پوزک دارای دمایی بین ۲۶ تا ۲۸ درجه سانتی گراد است (شکل ۳ و ناحیه ۳ در شکل ۴). در صورتی که از محدوده هامون ها و کشتزارهای سیستان به سمت نواحی فاقد پوشش گیاهی حرکت شود، به دمای سطح افزوده می گردد (نواحی ۵ و ۷ در شکل ۴ و ناحیه ۴ در شکل ۵).

علت مشاهده دمای کمتر در جنوب هامون پوزک، احتمالاً فرآیند سرمایشی تبخیر- تعرق^{۲۳} می باشد. همین فرآیند در خط سیر رودخانه هیرمند و سایر آبراهه های منتهی به هامون ها با شدتی کمتر مشاهده می شود. تفاوت دما بین نواحی ۲ و ۴ در شکل (۵) حاکی از کاهش دما در محدوده دارای پوشش گیاهی هامون پوزک است که چنانچه ذکر شد، احتمالاً به این فرآیند مربوط بوده و یا ممکن است، اختلاط سلول های دارای آب آزاد با سلول های دارای پوشش گیاهی موجب آن شده باشد. به هر حال، قدرت تفکیک مکانی تصاویر مورد استفاده، در این ارتباط ناکافی بوده و از محدودیت های این تحقیق به شمار می رود. با توجه به ناحیه ۵ در شکل (۴) ملاحظه می شود که در امتداد وزش باد غالب در منطقه (راستای شمال غربی به جنوب شرقی) شیب نیمرخ های دمای درخشندگی باندهای ۴ و ۵ و دمای سطح افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش دما در راستای باد غالب است. این نکته حکایت از شارش انرژی محسوس در منطقه از اراضی بالادست دارد که از ویژگی های محدوده سیستان می باشد.

نتیجه گیری و پیشنهادات

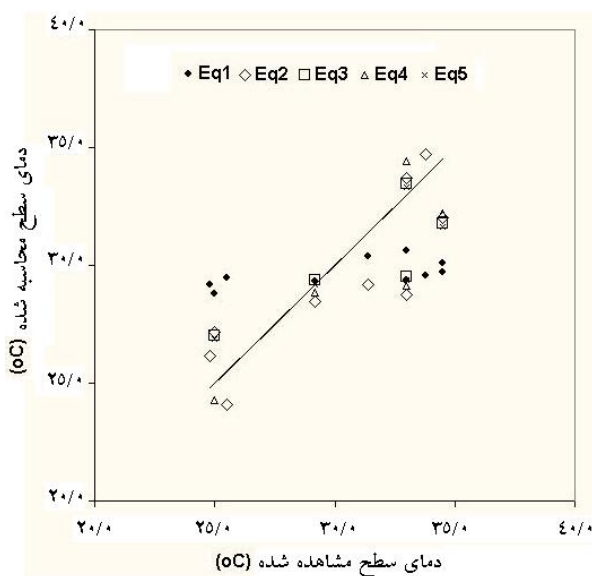
نتایج بدست آمده در این تحقیق را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

- ۱- واسنجی معادله پنجره مجزا در ناحیه سیستان، نشان داد که پیچیده تر شدن معادلات با افزایش متغیر گسیلندگی، دقت نتایج را به مقدار معنی داری افزایش نمی دهد. لذا، صور ساده تر معادله از دیدگاه کاربردی ارجحیت دارند.

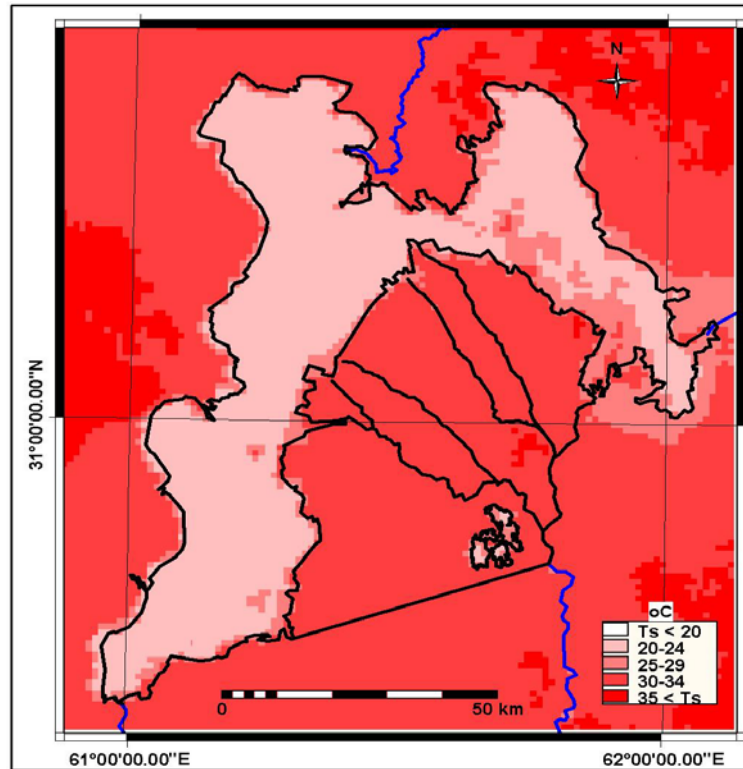
جدول (۳) نتایج واسنجی معادلات پنجره های مجزای جدول (۲).

معادله	ضرایب	ضریب تعیین (%)	خطای نسبی متوسط (%)	χ^2
Eq1	a= ۲۸/۲ b= ۱	۱۰	۱۱	۴/۸۰
Eq2	a= ۹/۳۱ b= ۰/۵ c= ۱/۰۵	۶۰	۶/۱	۰/۵۵*
Eq3	a= ۳۸/۶ b= ۰/۰۴ c= ۰/۳ d= -۱۴/۳ e= -۱۳/۴	۳۳	۵/۷	۱/۸۳
Eq4	a= ۱۱/۷ b= -۱۰/۱ c= -۲۷/۲ d= -۱۱۰/۶ e= ۲۱۶۳ f= ۵۵۹۰ g= ۲۲۷۶۴۶	۶۱/۶	۵/۳	۰/۲۵*
Eq5	a= ۱۰/۹ b= ۰/۳۷ c= -۰/۳۲ d= ۲۷/۷	۶۰	۵/۶	۱/۸۳

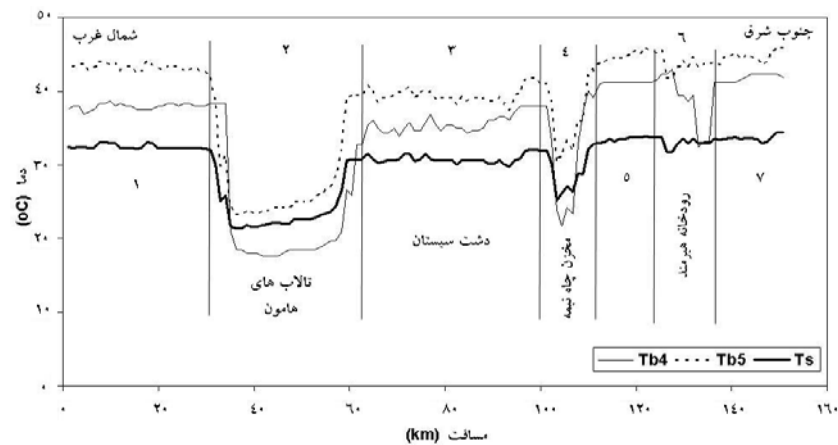
* معنی داری آزمون در سطح ۹۵ درصد



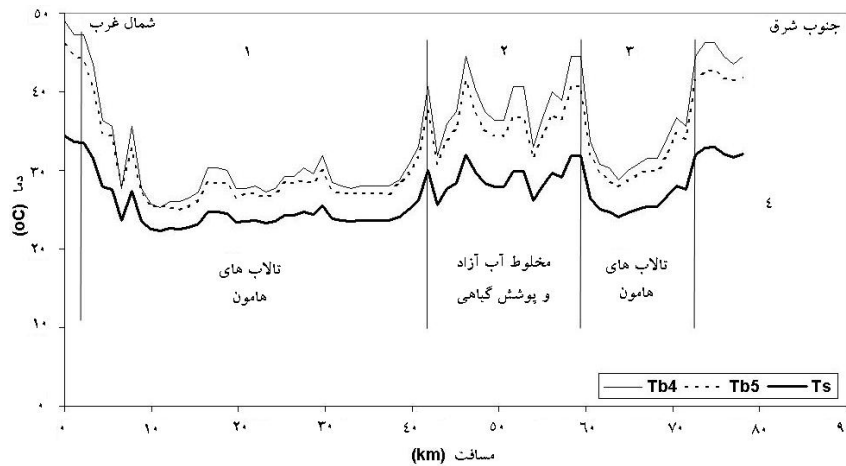
شکل (۲) نتایج معادلات متفاوت پنجره های مجزای جدول (۲) در مرحله اعتبارسنجی.



شکل (۳) نقشه توزیع دمای سطح در محدوده سیستان، مورخ ۱۹۹۶/۵/۲۴.



شکل (۴) نیمرخ دمایی محدوده مورد مطالعه (امتداد P1 شکل ۱).



شکل (۵) نیمرخ دمایی محدوده مورد مطالعه (امتداد P2 در شکل ۱).

- 7-Dash, P. 2004. Land surface temperature and emissivity retrieval from satellite measurements. Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe, Germany, 87 pp.
- 8-Gieske, A.S., Wubett, M.T., Timmermans, W.J., Parodi, G.N., Wolski, P., & Arneith, A. 2003. Temperature-emissivity separation with ASTER and LANDSAT 7 validation on the fringe of the Okavango Delta-Botswana. Available on the: http://www.itc.nl/library/Papers_2003/peer_ref_conf/gieske.pdf.
- 9-Granger, R.J. 2000. Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin. *Journal of Hydrology*, 229: 70-76.
- 10-Ha, K.J., Oh, H.M., & Kim, K.Y. 2001. Inter-annual and inter-annual variability of NDVI, LAI and Ts estimated by AVHRR in Korea. *Korean Journal of Remote Sensing*, 17(2): 111-119.
- 11-Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P., Nerry, F., & Otle, C. 2000. Land surface temperature retrieval techniques and applications: Case of the AVHRR. In: Quattrochi, D.A. and Luvall, J.C. (Eds.), *Thermal remote sensing in land surface processes*, CRC Press, Boca Raton, F.L., U.S.A., 33-109.
- 12-Mather, P.M. 1999. Computer processing of remotely sensed images: an introduction. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K.
- 13-McClain, E.P., Pichel, W.G., & Walton, C.C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90: 587-601.
- 14-Miller, W. & Millis, E. 1989. Estimating evaporation from Utah's Great Salt Lake using thermal infrared satellite imagery. *Water Resources Bulletin*, 25: 541-550.
- 15-Njoku, E.G. & Brown, O.B. 1993. Sea surface temperature. In: Gurney, R.J., Foster, J.L., & Parkinson, C.L. (Eds.), *Atlas of satellite observations related to global change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 237-249.
- 16-Oesch, D., Wundele, S., & Hauser, A. 2001. Land surface temperature retrieval from NOAA-AVHRR over the Alps. *Proceedings of 2001 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users Conference*, Antalya, Turkey.
- 17-Okamoto, K. 2001. *Global environment remote sensing*. Ohmsha Ltd., Tokyo, Japan, 23-26.
- 18-Prince, S.D., Goetz, S.J., Dubaya, R.O., Czajkowski, K.P., & Thawley, M. 1998. Influence of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor pressure deficit using Advanced Very High-Resolution Radiometer satellite observations: Comparison with field observations. *Journal of Hydrology*, 212/213: 230-249.
- 19-Rott, H. 2000. Physical principles and technical aspects of remote sensing. In: Schultz, G.A. & Engman, E.T. (Eds.), *Remote sensing in hydrology and water management*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 15-39.
- 20-Schmugge, T.J., Kustas, W.P., Ritchie, J.C., Jackson, T.J., & Rango, A. 2002. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25: 1367-1385.
- 21-Singh, S.M. 1984. Removal of atmospheric effects on a pixel by pixel basis from the thermal infrared data from instruments on satellite: the advanced very high resolution radiometer (AVHRR). *International Journal of Remote Sensing*, 5: 161-183.
- 22-Sobrino, J.A. & Raissouni, N. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 353-366.
- 23-Uliveri, C.M.M., Castronuovo, R.F., & Cardillo, A. 1992. A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellite. *COSPAR*, Washington D.C., U.S.A.
- 24-Van de Griend, A.A. & Owe, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 119-131.
- 25-Yang, J. & Wang, Y.Q. 2002. Estimation of land surface temperature using Landsat-7 ETM+ thermal infrared and weather station data. Available on the http://www.itrs.uri.edu/research/LST_page/paper4.doc.