

اللهم اغفر لي



دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان :

برآورد تبخیر و تعرق منطقه تربت حیدریه با استفاده از سنجش از دور

اساتید راهنما :

دکتر صمد امامقلی زاده

دکتر خلیل اژدری

نگارنده :

ریحانه قربانیان

بهمن ۱۳۹۹

تقدیم اثر

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بی کران و در کمال افتخار تقدیم می نمایم به:

محضر ارز شمن پدر و مادر عزیزم به خاطر همدی تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونگی زیستن را به من آموختن.

تشکر و قدردانی

از اساتید فاضل و اندیشمندی که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند کمال تشکر را دارم.

اینجانب **ریحانه قربانیان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه های آبی** دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بر آورد تبخیر و تعرق منطقه تربت حیدریه با استفاده از سنجش از دور** تحت راهنمایی **جناب آقای دکتر صمد امامقلی زاده و دکتر خلیل اژدری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

برآورد میزان آب مصرفی گیاه یا تبخیر و تعرق برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و کشاورزی، طراحی سیستم‌های آبیاری، توازن هیدرولوژیکی و همچنین تخمین تقریبی عملکرد محصول ضرورت دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین تبخیر و تعرق در مقیاس‌های کوچک با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی مانند لایسیمتر و... وجود دارد که از دقت بالایی برخوردار هستند، اما به دلیل داشتن هزینه زیاد و سختی کار در مناطق وسیع کاربرد ندارند. به همین دلیل روش‌های مبتنی بر دورسنجی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بیشتر مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش به برآورد تبخیر و تعرق در منطقه تربت حیدریه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال پرداخته شد.

در این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۸ برای ده روز از ماه‌های گرم سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفت و جهت مقایسه نتایج به دست آمده از روش مبتنی بر سنجش از دور (سبال)، از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تربت حیدریه به منظور برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت با در نظر گرفتن ضرایب گیاهی محصول (Kc)، مطابق با نوع و مرحله رشد گیاه استفاده شد. با استفاده از شاخص‌های آماری مانند خطای نسبی و ضریب تبیین به بررسی توانایی و عملکرد سنجش از دور و الگوریتم سبال پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش سنجش از دور توانسته است، مقدار تبخیر و تعرق در مقیاس روزانه را با خطای نسبی ۵/۱ درصد و ضریب تبیین ۰/۸۸ برآورد نماید.

کلمات کلیدی: تبخیر و تعرق - الگوریتم سبال - تصاویر ماهواره لندست ۸ - معادله فائو-پنمن-مانتیت -

سنجش از دور

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱-مقدمه
۳	۱-۲-اهمیت تحقیق
۴	۱-۳-روش تحقیق
۶	۱-۴-مراحل انجام کار تحقیق
۶	۱-۵-ضرورت انجام کار تحقیق
۷	۱-۶-فرضیات تحقیق
۷	۱-۷-اهداف تحقیق
	فصل دوم: بررسی منابع
۱۰	۲-۱-مقدمه
۱۰	۲-۲-مروری بر تاریخچه سری ماهواره‌ی لندست
۱۳	۲-۳-مروری بر تاریخچه الگوریتم سبال
۱۴	۲-۴-مروری بر پژوهش‌های انجام شده
	فصل سوم: مواد و روش‌ها
۲۶	۳-۱-منطقه مورد مطالعه
۲۷	۳-۲-داده‌های مورد استفاده
۲۷	۳-۲-۱-داده‌های هواشناسی
۲۸	۳-۲-۲-تصاویر ماهواره‌ای

۲۹	۳-۳-الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین(سبال)
۳۰	۳-۳-۱-تابش‌های خالص سطح زمین
۳۱	۳-۳-۱-۱-آلبیدوی سطح
۳۳	۳-۳-۲-۱-تابش‌های طول موج کوتاه ورودی
۳۴	۳-۳-۱-۳-تابش‌های طول موج بلند خروجی از سطح زمین
۳۴	۳-۳-۱-۴-Emissivity
۳۵	۳-۳-۱-۵-شاخص‌های پوشش گیاهی
۳۵	۳-۳-۱-۶-دمای سطح زمین
۳۶	۳-۳-۱-۷-دمای درخشندگی
۳۶	۳-۳-۱-۸-تابش‌های طول موج بلند ورودی
۳۷	۳-۳-۲-شار حرارتی خاک
۳۷	۳-۳-۳-شار گرمای محسوس
۳۸	۳-۳-۱-مقاومت آئرو دینامیکی
۳۹	۳-۳-۲-انتخاب پیکسل گرم و سرد
۳۹	۳-۳-۳-۳-dt _{total} محاسبه‌ی
۴۲	۳-۳-۴-پایداری اتمسفری
۴۴	۳-۴-شار گرمای نهان تبخیر
۴۴	۳-۵-تبخیر و تعرق لحظه‌ای
۴۵	۳-۶-تبخیر و تعرق روزانه
۴۵	۳-۷-تبخیر و تعرق گیاه مرجع
۴۷	۳-۸-نرم افزارهای مورد استفاده

فصل چهارم: نتایج و بحث

۵۰	۱-۴-مقدمه
۵۱	۲-۴-داده‌های زمینی
۵۳	۳-۴-تصاویر ماهواره‌ای
۵۳	۴-۴-تحلیل پارامترهای شار انرژی
۵۳	۱-۴-۴-تابش خالص سطح زمین
۵۴	۱-۱-۴-۴-آلبیدوی سطحی
۵۹	۲-۱-۴-۴-تابش‌های طول موج کوتاه ورودی
۶۰	۳-۱-۴-۴-شاخص‌های گیاهی
۶۲	۱-۳-۱-۴-۴-شاخص سطح برگ
۶۵	۲-۳-۱-۴-۴-شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده
۶۸	۴-۱-۴-۴-دمای سطح زمین
۷۱	۵-۱-۴-۴-تابش‌های طول موج بلند خروجی
۷۱	۶-۱-۴-۴-تابش‌های طول موج بلند ورودی
۷۵	۲-۴-۴-شار گرمای خاک
۷۸	۳-۴-۴-شار گرمای محسوس
۸۴	۵-۴-تبخیر و تعرق روزانه
	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۲	۱-۵-نتیجه‌گیری
۹۳	۲-۵-خطاهای تحقیق
۹۴	۳-۵-پیشنهادات

فهرست جداول

۱۲	جدول (۱-۲): باندهای لندست ۸
۲۸	جدول (۱-۳): تاریخ اخذ و زمان تصویربرداری
۵۱	جدول (۱-۴): زمان و تاریخ تصویربرداری
۵۲	جدول (۲-۴): داده‌های هواشناسی
۵۵	جدول (۳-۴): ضریب وزنی
۵۵	جدول (۴-۴): آلبیدوی سطحی
۵۹	جدول (۵-۴): مقادیر زاویه خورشیدی، dr و Rs
۷۲	جدول (۶-۴): تابش‌های طول موج بلند ورودی
۷۹	جدول (۷-۴): مشخصات پیکسل گرم در زمان تصویربرداری ماهواره
۷۹	جدول (۸-۴): مشخصات پیکسل سرد در زمان تصویربرداری ماهواره
۸۰	جدول (۹-۴): تعداد دفعات تکرار
۸۹	جدول (۱۰-۴): مشخصات آماری تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه

فهرست اشکال

۲۶	شکل (۱-۳): موقعیت منطقه در گوگل ارث
۲۷	شکل (۲-۳): موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی
۳۰	شکل (۳-۳): فرآیند تبخیر و تعرق
۳۱	شکل (۴-۳): شارهای ورودی و خروجی از سطح زمین
۳۳	شکل (۵-۳): تصویر DEM

- شکل (۳-۶): فرآیند تکرار برای محاسبه H ۴۴
- شکل (۴-۱): میانگین بارش در سال‌های مورد مطالعه ۵۰
- شکل (۴-۲): مراحل محاسبه‌ی بازتاب‌های بالای جو ۵۴
- شکل (۴-۳): آلبیدوی سطحی ۵۶
- شکل (۴-۴): مراحل انجام تصحیح رادیومتریکی ۶۰
- شکل (۴-۵): مراحل انجام تصحیح اتمسفری ۶۱
- شکل (۴-۶): شاخص‌های گیاهی ۶۱
- شکل (۴-۷): شاخص LAI ۶۲
- شکل (۴-۸): شاخص NDVI ۶۵
- شکل (۴-۹): تصحیح رادیومتریکی باند حرارتی ۶۸
- شکل (۴-۱۰): تصحیح اتمسفری باند حرارتی ۶۸
- شکل (۴-۱۱): محاسبه‌ی دمای درخشندگی ۶۸
- شکل (۴-۱۲): LST ۶۹
- شکل (۴-۱۳): تابش‌های خالص سطح زمین ۷۳
- شکل (۴-۱۴): شار گرمای خاک ۷۶
- شکل (۴-۱۵): شار گرمای محسوس ۸۱
- شکل (۴-۱۶): نتایج بدست آمده از تبخیر و تعرق لحظه‌ای روش سبال و پنمن-مانتیث ۸۴
- شکل (۴-۱۷): تبخیر و تعرق روزانه ۸۵
- شکل (۴-۱۸): نتایج بدست آمده از تبخیر و تعرق روزانه روش سبال و پنمن-مانتیث ۸۸

فصل اول

مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از پارامترهای مهم در چرخه‌ی هیدرولوژی است که طی این فرآیند حجم بالایی از آبهای موجود در سطح زمین و آبهای زیرسطحی به بخار تبدیل می‌شود که اگر این امر از سطوح آزاد آب و خاک صورت گیرد تبخیر؛ و اگر از سطح گیاهان صورت بگیرد تعرق نامیده می‌شود.

محاسبه تبخیر و تعرق از این جهت حائز اهمیت است که آب آبیاری در بسیاری از مناطق جهان محدود و کمیاب می‌باشد. از طرفی کشاورزی عمده‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین است و همچنین تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزاء بیلان آب است که با برآورد آن می‌توان جنگل‌ها، مراتع، منابع آب و سیستم‌های آبیاری را مدیریت و عملکرد محصول را پیش‌بینی و کنترل کرد.

در بین پدیده‌های مختلف چرخه هیدرولوژی؛ محاسبه تبخیر و تعرق واقعی مشکل‌ترین آنها می‌باشد و عملاً غیر قابل اجراست، حتی در صورت انجام نیز نمی‌توان به نتایج حاصله اطمینان داشت. (علیزاده، ۱۳۹۸)

اکثر روش‌هایی که برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده می‌شود به صورت نقطه‌ای بوده و در محدوده کوچکی در سطح یک مزرعه تحقیقاتی صورت می‌گیرد. از عمده‌ترین مشکلات این روش‌ها می‌توان به پرهزینه و زمان‌بر بودن آنها اشاره کرد؛ همچنین بسیاری از مناطق صعب‌العبور بوده و حتی داده‌های زمینی را در اختیار ندارد، در همه مناطق ایستگاه زمینی سینوپتیک موجود نیست یا از روش‌هایی مثل لایسیمتر که دقت نسبتاً خوبی دارد، استفاده نمی‌شود و با توجه به اینکه در این روش‌ها عموماً، منطقه کوچکی مورد پژوهش قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی برای یک منطقه وسیع امکان‌پذیر نیست.

به این علت پژوهشگران درصدد یک روش جدید و کاربردی برآمدند تا با استفاده از آن هم از اتلاف وقت و هزینه جلوگیری کنند هم نتیجه رضایت‌بخش و قابل قبولی بگیرند. روش‌های مبتنی بر سنجش از دور اهدافی که پژوهشگران به دنبال آن بودند را محقق ساخته است.

علم و هنر کسب اطلاعات از پدیده‌ها و اجسام بدون تماس با آنها را سنجش از دور می‌گویند، که با استفاده از این روش در هر منطقه‌ای می‌توان به اطلاعات مهمی در زمینه‌های کشاورزی، جنگلداری، هواشناسی،

زمین‌شناسی، آب‌شناسی، مطالعات زیست محیطی، توسعه اراضی، مدیریت منابع زمینی و... دست یافت. سنجش از دور با توجه به ثبت تغییرات دوره‌ای پدیده‌های سطح زمین و اختلاف بازتابش الکترومغناطیسی، در بررسی گیاهان و محصولات کشاورزی و منابع آب بسیار کارآمد است. در این پژوهش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست^۱ و الگوریتم توازن انرژی سطح برای زمین^۲، به محاسبه تبخیر و تعرق در منطقه تربت حیدریه پرداخته شد.

۱-۲- اهمیت تحقیق

برای اینکه از منابع آب، استفاده بهینه داشته باشیم لازم است در مورد کل حجم آب مصرفی و همچنین وضعیت کشت و مقدار تبخیر و تعرق اطلاعات کافی در دست داشته باشیم، برای یک برنامه‌ریزی صحیح آبیاری و بهبود مدیریت مصرف آب، باید در مورد نیاز آبی گیاهان اندازه‌گیری دقیقی صورت بگیرد که یکی از راه‌های کاهش تلفات آب است.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق وجود دارد، مانند: روش‌های اندازه‌گیری (روش لایسیمیتری، روش تشت تبخیر، آتمومتر)، روش‌های نقطه‌ای (روش آیرودینامیک، روش بیلان انرژی، روش ترکیبی، روش تجربی)، روش منطقه‌ای (روش تکمیلی و روش‌های مبتنی بر سنجش از دور). (امیدوار، ۱۳۹۰)

دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری تبخیر و تعرق لایسیمیتری می‌باشد که در ایستگاه‌های تحقیقاتی از آن استفاده می‌شود؛ لایسیمیترها هم انواع مختلفی دارند که در میان آنها لایسیمیترهای وزنی از دقت بیشتری برخوردار هستند، اما بعلاوه اینکه لایسیمیتر مقرون به صرفه نمی‌باشد و همچنین برای مناطق وسیع قابل اجرا نیست؛ استفاده از آن محدود به ایستگاه‌های تحقیقاتی می‌باشد. روش‌های مذکور دیگر هم بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند که با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در سطح کشور و بالا بودن هزینه جمع‌آوری اطلاعات میدانی؛ روش‌های مبتنی بر سنجش از دور با توجه به برتری‌هایی که نسبت به روش‌های

¹ Landsat

² Surface Energy Balance Algorithms for Land

میدانی دارد از جمله:

- ✓ مقرون به صرفه بودن اخذ داده‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای
- ✓ امکان‌پذیر بودن اخذ داده‌ها از مناطق وسیع در هر زمان و مکان
- ✓ عدم حضور فیزیکی در منطقه مورد مطالعه
- ✓ استفاده از نیروی انسانی کم ولی متخصص
- ✓ عملیات زمینی بسیار کم
- ✓ متنوع بودن سنجنده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای؛ اطلاعات کامل‌تری در مدت زمان کم‌تری را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

به همین دلیل روش‌های مبتنی بر دورسنجی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای؛ بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

الگوریتم سبال که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است نیاز به داشتن نقشه کاربری اراضی و دانستن نوع محصولات کشاورزی ندارد زیرا به جز داده‌های اندکی از ایستگاه سینوپتیک، بقیه اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شود.

۱-۳- روش انجام تحقیق

در این پژوهش مدلی مبتنی بر سنجنش از دور به نام سبال مورد ارزیابی قرار گرفت. الگوریتم توازن انرژی سطح برای زمین که به سبال معروف است اولین بار توسط باستیانسن و همکاران با هدف محاسبه تبخیر و تعرق در سال ۱۹۹۸ ارائه گردید که این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط آلن و همکاران اصلاح گردید. (آلن و همکاران، ۲۰۰۲)

سبال یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های شار انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجنش از دور است که می‌تواند بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین کمترین مقدار داده‌های زمینی این محاسبه را انجام دهد. در اکثر نقاط جهان این روش مورد استفاده قرار گرفته و

نتایج مطلوبی نیز به همراه داشته است. سبال با استفاده از مقاومت آئرودینامیکی و فیزیک توازن انرژی و تابش می‌تواند تبخیر و تعرق را در ۲۵ زیر مدل برآورد کند.

الگوریتم سبال که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است نیاز به داشتن نقشه کاربری اراضی و دانستن نوع محصولات کشاورزی ندارد زیرا به جز داده‌های اندکی از ایستگاه سینوپتیک، بقیه اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شود.

مدل سبال از دو پیکسل شاخص به عنوان پیکسل سرد و پیکسل گرم برای تعیین شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی استفاده می‌کند که انتخاب این دو پیکسل بسیار مهم است و کیفیت تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده بستگی به دقت در انتخاب این دو پیکسل دارد، برای انتخاب پیکسل سرد باید از زمین زراعی دارای پوشش گیاهی پرتراکم و کاملاً آبیاری شده استفاده کرد و همچنین برای انتخاب پیکسل گرم باید از زمین غیر زراعی کشاورزی که خشک و خاکی است استفاده کرد. مقدار آلبیدو و شاخص سطح برگ و دما در انتخاب این دو پیکسل به ما کمک خواهد کرد، نکته دیگر این است که باید از انتخاب پیکسل‌های به شدت گرم و به شدت سرد اجتناب کرد.

در این روش براساس محاسباتی که صورت می‌گیرد یک مقدار به عنوان باقیمانده انرژی حاصل می‌شود که طبق آن مقدار، تبخیر و تعرق لحظه‌ای در همان زمان تصویربرداری ماهواره محاسبه می‌شود و سپس به تبخیر و تعرق روزانه تبدیل خواهد شد.

سعی شده بهترین روش‌ها و زیرمدل‌هایی که مناسب منطقه مورد مطالعه می‌باشد از الگوریتم سبال انتخاب و مورد محاسبه قرار بگیرد.

تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده برای این پژوهش مربوط به سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۴-۲۰۱۵-۲۰۱۶ می‌باشد؛ که در هر سال، سه روز از سه ماه گرم سال را در نظر گرفته‌ایم و با انجام پردازش‌های لازم بر روی این تصاویر، تبخیر و تعرق در طی چهارسال مورد مقایسه قرار گرفته است.

همچنین به منظور راست‌آزمایی نتایج حاصل از الگوریتم سبال، از روش دیگری به نام فائو-پنمن-مانتیت

با در نظر گرفتن ضرایب گیاهی محصول (KC)، متناسب با نوع و دوره‌ی رشد گیاه استفاده گردید که یکی از معتبرترین روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق می‌باشد.

۴-۱- مراحل انجام کار تحقیق

روند انجام کار در این تحقیق بدین صورت است :

- اخذ تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و جمع‌آوری داده‌های هواشناسی از ایستگاه سینوپتیک منطقه مورد مطالعه
- انجام پیش پردازش‌ها و پردازش‌های لازم برای استخراج اطلاعات مربوطه با استفاده از نرم افزار ENVI
- اجرای الگوریتم سبال برای تولید و بررسی لایه‌های اصلی شار خالص، شار محسوس و شار گرمای نهان خاک که برای تولید هر کدام از این لایه‌ها لازم است زیرلایه‌های دیگری تولید و ارزیابی شوند.
- محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای و تبدیل آن به مقیاس روزانه.
- ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج بدست آمده در مقایسه با روش فائو-پنمن-مانتیت.

۵-۱- ضرورت تحقیق

شهرستان تربت حیدریه با وسعتی بیش از ۳۶۶۸ کیلومتر مربع و در فاصله ۱۴۲ کیلومتری شهر مشهد، مرکز استان خراسان رضوی قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این شهرستان بر روی مدارهای ۵۹ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع شهرستان از سطح دریاهای آزاد، ۱۴۵۱ متر و دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک می‌باشد که متوسط بارندگی سالیانه آن حدود ۲۴۵ میلی‌متر است.

شهرستان تربت حیدریه دارای ۳۶۲۱۱ هکتار سطح زیر کشت آبی و ۵۰۰۱ هکتار سطح زیر کشت دیم می‌باشد؛ که زمین‌های مرغوب، منابع آبی شیرین، آب و هوای متنوع جهت کشت و پرورش انواع محصولات گرمسیری و سردسیری، همچنین تولید بیش‌ترین و مرغوب‌ترین زعفران ایران و جهان را داراست.

اما این شهرستان چندین سال است که یکی از بحرانی‌ترین مناطق استان خراسان رضوی قرار گرفته است. حدوداً ۹۲ درصد از منابع آب این شهرستان در بخش کشاورزی و مابقی در صنعت و مصارف خانگی استفاده می‌شود، کشت محصولاتی که به آب فراوان نیاز دارند نظیر: چغندر، هندوانه، پنبه، خربزه و همچنین حفر چاه آب بیشتر از نیاز شهرستان، کاهش بارندگی و خشکسالی باعث شده این شهرستان با محدودیت منابع آبی و خشکسالی‌های پیاپی مواجه شود و آب شیرین در این منطقه از اهمیت فراوانی برخوردار گردد.

۱-۶- فرضیات تحقیق

- نتیجه حاصل از الگوریتم سبال با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸، رضایت بخش است.
- خروجی بدست آمده از الگوریتم سبال و خروجی حاصل از معادله فائو-پنمن-مانتیث منطبق هستند.
- تبخیر و تعرق به درستی محاسبه شده و الگوریتم سبال از دقت لازم برخوردار است.

۱-۷- اهداف تحقیق

با توجه به ضرورت و اهمیت برآورد تبخیر و تعرق، در این پژوهش با استفاده از روش سنجش از دور به برآورد این پارامتر مهم هواشناسی پرداخته شد. هدف از انجام این پژوهش عبارتند از:

- ❖ محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال
- ❖ تبدیل مقیاس از لحظه‌ای به روزانه
- ❖ راست آزمایی روش سبال در برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیث
- ❖ مقایسه تبخیر و تعرق در طی چهار سال متوالی

فصل دوم

کلیات و بررسی منابع

۲-۱- مقدمه

کشور ایران بر روی نوار نیمه خشک نیمکره‌ی شمالی جهان قرار گرفته است. بارندگی به جز در مناطق حاشیه دریای خزر که به اندازه کافی صورت می‌گیرد، در مناطق کوهستانی بارش مناسبی دارد و اکثر شهرها با مشکل کمبود آب مواجه اند. منطقه تربت حیدریه هم از این امر مستثنی نیست و با توجه به خشکسالی‌های پیاپی، در شرایط بحرانی قرار گرفته است.

برآورد میزان تبخیر و تعرق در کشاورزی بخصوص مسائل مربوط به آب مهم می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تعیین تبخیر و تعرق وجود دارد که می‌توان به اندازه‌گیری صحرایی و استفاده از روش‌های مبتنی بر دورسنجی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اشاره نمود. در این فصل ابتدا مروری به روش‌های دورسنجی شده و به تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

۲-۲- مروری بر تاریخچه سری ماهواره لندست

ماهواره لندست در سال ۱۹۷۲ میلادی تحت عنوان ماهواره تکنولوژی منابع زمینی با موشک دلتا به فضا پرتاب شد که پس از فرستادن ماهواره دوم از این سری به لندست ۱ تغییر نام یافت. لندست ۲ در سال ۱۹۷۵ و لندست ۳ در سال ۱۹۷۸ به فضا فرستاده شدند، که سه نسل اول ماهواره لندست (سری ۱، سری ۲، سری ۳) با سنجنده چند طیفی و با قدرت تفکیک ۷۹ متر، مأموریت خود را انجام دادند که طراحی آنها به گونه‌ای بود که هر روز کره زمین را در یک مدار قطبی با ارتفاع حدود ۹۰۰ کیلومتر دور زده و در نتیجه قسمت اعظم کره زمین را با ۲۵۱ گردش ماهواره مورد تصویر برداری قرار دهند؛ تصویر برداری توسط سنجنده چند طیفی در سال ۱۹۹۲ خاتمه یافت.

لندست ۴ در سال ۱۹۸۲ پرتاب شد و علاوه بر سنجنده چند طیفی، یک سنجنده جدید به نام نقشه بردار موضوعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر را با خود حمل می‌کرد. لندست ۵ نیز با خصوصیات همانند لندست ۴ پرتاب شد که در ارتفاع ۷۰۰ کیلومتر قرار گرفته و در نتیجه کره زمین را با ۲۳۳ گردش پوشش می‌دهند.

لندست ۶ در سال ۱۹۸۴ با شکست مواجه شد و در فضا ناپدید گردید. لندست ۷ در ۱۵ آوریل ۱۹۹۹ با یک سنجنده جدید به نام نقشه بردار موضوعی تقویت شده با هدف مطالعات کوچک مقیاس مانند: کنترل دوره رشد گیاهان، کنترل جنگل زدایی، نقشه های کاربری اراضی، فرسایش، برف سنجی و... به فضا پرتاب شد. و اما آخرین سری، ماهواره لندست ۸ می باشد که در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ میلادی با همکاری مشترک ناسا و سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا به فضا پرتاب گردید که تاکنون فعال و قابل اجرا می باشد، این ماهواره در هر گذر نواری به عرض ۱۸۵ کیلومتر را پوشش می دهد و تهیه پوشش کامل زمین ۱۶ روز طول می کشد؛ که دارای ۱۱ باند طیفی با تفکیک مکانی ۳۰ متر برای باندهای مرئی و مادون قرمز، تفکیک مکانی ۱۵ متر برای باند پانکروماتیک و تفکیک مکانی ۱۰۰ متر برای باندهای حرارتی را دارا می باشد و در روز حدودا ۴۰۰ تصویر می گیرد و نسبت به لندست ۷ که هشت باند طیفی دارد و در روز ۲۵۰ تصویر می گرفت دارای افزایش قابل ملاحظه ای می باشد. ۹ باند طیفی ماهواره لندست ۸ با حسگر عملیاتی تصویرسازی سرزمین (OLI) جمع آوری می شوند که ۷ باند آن با حسگرهای TM و ETM+ که بر روی ماهواره های لندست قبلی قرار داشته اند سازگاری دارند و ۲ باند طیفی دیگر لندست ۸ با حسگر مادون قرمز حرارتی (TIRS) تصویربرداری می شوند؛ که همچنین برای محاسبه مقدار تبخیر و تعرق کاربرد دارند. (جوی زاده و همکاران، ۱۳۹۵)

جدول (۱-۲): باندهای لندست ۸

شماره باند	محدوده طیفی (میکرومتر)	قدرت تفکیک (متر)
۱	۰/۴۳۳ - ۰/۴۵۳	۳۰
۲	۰/۴۵۰ - ۰/۵۱۵	۳۰
۳	۰/۵۲۵ - ۰/۶۰۰	۳۰
۴	۰/۶۳۰ - ۰/۶۸۰	۳۰
۵	۰/۸۴۵ - ۰/۸۸۵	۳۰
۶	۱/۵۶۰ - ۱/۶۶۰	۳۰
۷	۲/۱۰۰ - ۲/۳۰۰	۳۰
۸	۰/۵۰۰ - ۰/۶۸۰۰	۱۵
۹	۱/۳۶۰ - ۱/۳۹۰	۳۰
۱۰	۱۰/۶ - ۱۱/۲	۱۰۰
۱۱	۱۱/۵ - ۱۲/۵	۱۰۰

- **باند ۱ (آبی):** حداکثر قدرت نفوذ در آب را دارد و برای تعیین مناطق با گرد و خاک مناسب است.
- **باند ۲ (آبی):** دارای حداکثر قدرت نفوذ در آب است و برای نقشه برداری در آب‌های کم عمق، تفکیک خاک از پوشش‌های گیاهی و همچنین تشخیص درختان پهن برگ از سوزنی برگ استفاده می‌شود.
- **باند ۳ (سبز):** در این باند گیاهانی که سالم هستند دارای بیشترین بازتاب هستند، همچنین اکسید آهن در این باند جذب می‌شود.
- **باند ۴ (قرمز):** این باند بخاطر کلروفیلی که جذب می‌کند، برای مجزا کردن گیاهان از یکدیگر مناسب است. اکسید آهن نیز در این باند بازتاب بالایی دارد.

➤ **باند ۵ (فروسرخ انعکاسی):** میزان تراکم، انواع پوشش گیاهی، میزان رطوبت خاک و تجمع آب را در منطقه نشان می‌دهد.

➤ **باند ۶ (فروسرخ میانی):** این باند در مطالعات هیدرولوژی بسیار پر کاربرد است به دلیل اینکه میزان رطوبت در بافت گیاهان و خاک را نشان می‌دهد همچنین برای تشخیص ابر، برف و یخ نیز مفید است. کانی‌های رسی هم در این محدوده بازتاب می‌شوند پس بنابراین برای تشخیص سنگ‌ها از کانی‌ها هم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

➤ **باند ۷ (فروسرخ میانی):** جذب کانی‌های رسی در این باند صورت می‌گیرد و برای مطالعات زمین شناسی مورد استفاده می‌شود.

➤ **باند ۸ (پانکروماتیک):** این باند بخاطر قدرت تفکیک مکانی بالایی که نسبت به بقیه باندها دارد برای مطالعات زمین شناسی و شهری کاربرد دارد.

➤ **باندهای ۹ و ۱۰ (فروسرخ حرارتی):** تخمین درجه حرارت سطح زمین با کمک این باندها صورت می‌گیرد و برای مطالعه میزان رطوبت خاک و طبقه‌بندی پوشش گیاهی نیز مناسب است.

۲-۳- مروری بر تاریخچه‌ی الگوریتم SEBAL:

در چندین دهه گذشته روش‌های بسیاری برای تخمین میزان تبخیر و تعرق مورد ارزیابی قرار گرفته است، اما عمده‌ترین مشکل این روش‌ها عدم دسترسی به داده‌های زمینی مورد نیاز برای محاسبات و همچنین پرهزینه و زمان‌بر بودن مراحل انجام کار است. بیشتر روش‌های اندازه‌گیری به صورت نقطه‌ای تبخیر و تعرق را برآورد می‌کنند و برای مناطق وسیع یا صعب‌العبور کاربردی ندارند. از طرفی دیگر باید در محدوده‌های نزدیک به ایستگاه هواشناسی مطالعات صورت بگیرد که احتمال تغییرات کاربری اراضی و فیزیک خاک در طی چندسال وجود دارد، از طرفی نمی‌توان نتایج مطالعات میدانی که در محدوده کوچکی صورت گرفته است را با کل منطقه که وسعت زیادی دارد تطبیق داد. به همین خاطر در چند سال اخیر روش‌های مبتنی بر

سنجش از دور مورد توجه بیشتری قرار گرفتند. در روش‌های مبتنی بر دورسنجی، می‌توان از ماهواره‌ها و سنجنده‌ها و الگوریتم‌های متنوعی برای محاسبات تبخیر و تعرق استفاده کرد.

الگوریتم توازن انرژی سطح برای زمین (سبال)، نخستین بار توسط باستیانسن^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۸ میلادی ارائه شد. بعدها اصلاحاتی بر روی این روش صورت گرفت و از مزیت‌های این روش این است که برای اقلیم‌های متفاوت کاربرد دارد و می‌تواند بدون نقشه کاربری اراضی، با حداقل داده‌هایی که از ایستگاه سینوپتیک اندازه‌گیری می‌شود و همچنین با نیروی کار کم ولی متخصص در کمترین زمان و مقرون به صرفه تبخیر و تعرق را برآورد کند. از نکات قابل توجه برای این الگوریتم، می‌توان به عدم وجود ابر در تصویر و همچنین وجود پیکسل گرم (خشک) و سرد (مرطوب) در تصویر به صورت همزمان اشاره کرد.

الگوریتم سبال امکان برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس لحظه‌ای را در همان لحظه‌ی تصویر برداری ماهواره از منطقه مورد مطالعه و تبدیل آن به تبخیر و تعرق در مقیاس روزانه را به ما می‌دهد.

سه پارامتر مهمی که در این الگوریتم محاسبه می‌شود:

- تابش‌های خالص سطح زمین
- شار گرمای خاک
- شار گرمای محسوس

حاصل تفریق این سه پارامتر یک میزان انرژی باقیمانده در سطح زمین است که گرمای نهان نام دارد؛ و از گرمای نهان به تبخیر و تعرق لحظه‌ای می‌رسیم.

۲-۴- مروری بر پژوهش‌های انجام شده

ثنایی نژاد و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای که در زیر حوضه آبریز مشهد در سال ۱۳۸۸ با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و الگوریتم سبال با احتساب اثرات توپوگرافی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که تصاویر سنجنده مودیس و الگوریتم سبال قادر هستند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در زیر حوضه آبریز مشهد به

¹ Bastiaamssen

خوبی برآورد نمایند. بر اساس نتایج بدست آمده از تحقیقات ایشان، نواحی با پوشش گیاهی متراکم و دمای پایین دارای مقادیر بالای تبخیر و تعرق بوده و مناطق دارای دمای بالا و پوشش گیاهی پراکنده و کم از مقدار تبخیر و تعرق کمی برخوردارند.

امیدوار و همکاران (۱۳۹۱) به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی از یک روش نسبتاً جدید به نام متریک، و تصاویر سنجنده‌ی استر استفاده کردند. این پژوهش در سه محدوده‌ی کشاورزی در مجاورت ایستگاه‌های مشهد، گل‌مکان و قوچان انجام شد و نتایج حاصل از مدل توازن انرژی متریک نشان داد که از مدل‌های مناسب جهت تخمین تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد.

در مطالعه‌ی دیگری که توسط قمرنیا و رضوانی (۱۳۹۲) انجام شد، از داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی و اطلاعات هواشناسی، با روش سبال برای محاسبه تبخیر و تعرق دشت میان‌بند در غرب ایران استفاده گردید. همچنین از روش مرسوم دیگری به نام فائو برای محاسبه تبخیر و تعرق محصول گندم به منظور صحت‌سنجی الگوریتم سبال مورد ارزیابی قرار گرفت؛ نتایج حاصل شده از الگوریتم سبال و روش فائو همبستگی بالایی (۰/۸۴) بین این دو روش را نشان داد، که الگوریتم سبال از توانایی بالایی برای تعیین تبخیر و تعرق برخوردار است.

یاوری و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای که در دشت نیشابور داشتند از تصاویر ماهواره مودیس و الگوریتم سبال برای محاسبه دقیق تبخیر و تعرق در مقیاس حوضه-سال استفاده کردند. نتایج بدست آمده از الگوریتم سبال را با نتایج مدل SWAT مقایسه کردند که دقت خوبی داشت. می‌توان گفت این روش محاسبه تبخیر و تعرق روشی دقیق، ساده و مقرون به صرفه‌ای در مقیاس حوضه-سال می‌باشد.

قربانی و همکاران (۱۳۹۳) از دو الگوریتم سبال و متریک و سنجنده مودیس به منظور برآورد تبخیر و تعرق شهرستان ملایر در سال ۱۳۹۲ استفاده کردند. و به منظور راست‌آزمایی نتایج را با نتایج بدست آمده از روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه کردند. نتایج حاصل در این تحقیق، حدود ۵.۲۶٪ روش متریک را بیش برآوردتر از روش سبال نشان داد.

در مطالعه‌ای که یعقوب زاده و همکاران (۱۳۹۴) بر روی روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق و مقایسه آنها با الگوریتم سبال، با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس برای مزرعه ذرت واقع در دشت نیشابور انجام دادند، نشان داد که می‌توان از الگوریتم سبال برای تعیین تبخیر و تعرق در مناطق با کمبود داده و برای ارزیابی روش‌های محاسباتی و مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد.

در پژوهش دیگری که کرباسی و همکاران (۱۳۹۵)، برای تعیین نیاز آبی گیاهان مزارع ذرت و یونجه در دوره‌ی رشد این دو گیاه در شهرستان خرم دره انجام دادند، از تصاویر لندست ۸ و الگوریتم توازن انرژی سطح خشکی (سبال) استفاده کردند و نتایج بدست آمده از الگوریتم سبال با نتایج بدست آمده از مدل پنمن-مانیت-فائو مقایسه و اعتبارسنجی شد. این بررسی نشان داد که این دو مدل مطابقت نسبتاً خوبی با هم دارند، اما الگوریتم سبال در مقایسه با مدل پنمن-مانیت-فائو مقدار تبخیر و تعرق را برای گیاه یونجه بیشتر و برای گیاه ذرت کمتر برآورد می‌کند.

میان‌آبادی و همکاران (۱۳۹۵) از الگوریتم انتخاب خودکار پیکسل‌های گرم و سرد بدون دخالت کاربر و تصاویر ماهواره‌ی لندست، در حوضه آبریز نیشابور-رخ استفاده نمودند و برای صحت‌سنجی نتایج از معادله بیلان آب و خروجی مدل SWAT، روش خطی لگاریتمی و همچنین چارچوب بادیکو استفاده شد؛ که نتایج نشان داد انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم در الگوریتم سبال برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی سالانه و در مقیاس مکانی کل حوضه قابل قبول است اما در مقیاس‌های کوچک مکانی و زمانی نتایج الگوریتم سبال با خروجی مدل SWAT همبستگی خوبی ندارد.

مسلم زاده و مختاری (۱۳۹۵) برای محاسبه تبخیر و تعرق دشت سگزی از الگوریتم سبال و تصویر لندست ۸ در تاریخ ۲۰۱۵/۰۶/۰۲ استفاده کردند. نتایج بدست آمده از این تحقیق تبخیر و تعرق واقعی در منطقه را بین ۰.۲ تا ۰.۸ (mm/h)، نشان داد.

همچنین زمان‌ثانی و همکاران (۱۳۹۶) در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ در محدوده‌ی ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان حاجی آباد، با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و الگوریتم سبال انجام دادند، نتیجه

این شد که بین نتایج بدست آمده از الگوریتم توازن انرژی سطح خشکی و لایسیمتر اختلاف معنی داری وجود ندارد و سبال کارایی مناسبی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی را داراست.

نوری و فرامرزی (۱۳۹۶) به منظور برآورد تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه با استفاده از الگوریتم سبال ویژه مناطق کوهستانی و ناهموار، از تصاویر سنجنده‌ی مودیس و لندست ۸ استفاده کردند و به منظور صحت سنجی نتایج حاصل شده از روش فائو-پنمن-مانتیت با نتایج بدست آمده از الگوریتم سبال مقایسه شد. نتایج نشان داد برآورد تبخیر و تعرق روزانه، روش سبال با روش فائو-پنمن-مانتیت حدود ۰.۴۳ درصد اختلاف دارد، بنابراین برای محاسبه تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه این روش از دقت مناسبی برخوردار است.

همچنین با تحقیقاتی که راینی سرجاز و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از سنجنده OLI و الگوریتم سبال در منطقه دشت ناز ساری انجام دادند، نشان داد که الگوریتم سبال با روش پنمن-مانتیت-فائو مطابقت دارد و تصاویر سنجنده OLI و الگوریتم سبال می‌تواند به خوبی تبخیر و تعرق واقعی را در منطقه دشت ناز ساری محاسبه کند.

صحراگرد و همکاران (۱۳۹۸) برای تخمین تبخیر و تعرق روزانه گیاه نیشکر، در کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان واقع در استان خوزستان، از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ و همچنین روش سبال استفاده کردند. به منظور اعتبارسنجی کارایی مدل سبال در هر دو حالت استفاده از تصاویر تلفیق شده و استفاده از تصاویر لندست ۸ از داده‌های لایسیمتری استفاده شد که نتایج، همبستگی مدل سبال با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با $(R^2 = 0.88)$ ، و مدل سبال با تصاویر تلفیق شده لندست ۸ و سنتینل ۲، با $(R^2 = 0.90)$ را نشان داد که تطابق مناسبی با روش لایسیمتری داشته است.

در پژوهشی که ملکی‌نژاد و فیروزی (۱۳۹۸) برای محاسبه تبخیر و تعرق در منطقه هرات انجام دادند، از الگوریتم سبال و تصویر سنجنده مودیس برای آگوست ۲۰۱۷ استفاده شد. نتایج نشان داد در ناحیه غربی و شمال به جنوب که زمین زراعی و باغات پسته وجود دارد تبخیر و تعرق متوسط رو به بالا و در ناحیه شمال

و شمال شرقی به دلیل وجود پلایا در منطقه، تبخیر و تعرق کمتر است. همچنین تبخیر و تعرق واقعی در تابستان به دلیل افزایش دما بین ۲۲۶ تا ۵۵۲ میلی‌متر می‌باشد.

صانع و همکاران (۱۳۹۹) پژوهشی در منطقه وردیج، واقع شده در استان تهران با هدف ارزیابی الگوریتم سبال و با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی منطقه در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ میلادی جهت تعیین تبخیر و تعرق واقعی انجام دادند. آنها از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده کردند، و با استفاده از داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه، تبخیر و تعرق مرجع را با روش‌های فائو-پنمن-مانتیث، پنمن-رایت، هارگریوز سامانی و بلانی کریدل تخمین زدند. و به این نتیجه رسیدند که روش سبال جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی مناسب است.

علاوه بر تحقیقات داخلی که در بالا به آنها اشاره شد، در سایر کشورها نیز از روش سنجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده گردید. برای مثال:

آلن و همکاران (۱۹۹۸) به منظور مطالعه بر روی مناطق کوهستانی و دریاچه‌های سرد الگوریتم سبال که توسط باستیانسن در هلند ارائه شد را اصلاح کردند، منطقه مطالعاتی حوضه آبریز رودخانه Bear واقع در ۲۰۰۰۰ کیلومتری Utah، Idaho و Wyoming بوده است و آنها تبخیر و تعرق را در مقیاس ماهانه محاسبه کردند. برای ارزیابی نتایج را با مقادیر بدست آمده از اندازه‌گیری لایسیمتری مقایسه کردند، نتایج تبخیر و تعرق ماهانه را با میانگین تفاضلی $\pm 16\%$ و تفاوت فصلی به دلیل کاهش خطای تصادفی فقط 4% نشان داد.

بیل و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از داده‌های سنجش از دور در حوضه‌ای از هند، شارهای انرژی سطح را محاسبه کردند. و با استفاده از یک روش نیمه تئوری مقاومت آئروپودینامیکی را به دست آوردند، نتایج حاصل را با روش تشت تبخیر مقایسه کردند که از دقت خوبی برخوردار بود.

تاسومی و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی که در دو منطقه Idaho برای تخمین تبخیر و تعرق با روش سبال و مقایسه آن با روش لایسیمتری انجام دادند، نتایج حاصل از برآورد تبخیر و تعرق با روش سبال مطابقت قابل قبولی با نتایج به دست آمده از روش لایسیمتری نشان دادند.

وانگ و همکاران (۲۰۰۵) برای تبخیر و تعرق گیاه گردو در منطقه New Mexico، از تصاویر استر^۱ استفاده کردند، روش‌های نقطه‌ای جهت برآورد تبخیر و تعرق برای محاسبه نیاز آبی این گیاه مؤثر نبوده به همین دلیل از الگوریتم سبال که برای این درخت تعدیل شده بود، استفاده نمودند که میزان خطای نسبی در برآورد تبخیر و تعرق ۱۱٪ و خطای مطلق ۰.۴۷ میلی متر در روز بود.

کلوزوف و همکاران (۲۰۰۷) پژوهشی در یک منطقه قزاقستان، به منظور برآورد تبخیر و تعرق گیاه پنبه در یک دوره کوتاه محصول دهی در ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر انجام دادند. از این تحقیق نتیجه گرفتند که طول مونین ابوخوف در به دست آوردن پارامتر شار گرمای محسوس در محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در الگوریتم سبال نقش مهمی دارد و با ارائه فرمولی از طول مونین ابوخوف بیان می‌دارند که این فرمول در تشکیل چرخه محاسبه شار گرمای محسوس، در پیدا کردن سایر مجهولات مؤثر است.

$$L(m) = \frac{u_*^3 p_a c_p T_a}{gk(H + c_{061} c_p T_a E)} \quad (1-2)$$

لی و همکاران (۲۰۰۸) به منظور بررسی آب مصرفی و بهره‌وری از مصرف آب، از تصاویر ماهواره نوآ و الگوریتم سبال استفاده کردند، این پژوهش در دشت شمال چین انجام شد و نتایج با معادله‌ی هارگریوز و داده‌های هواشناسی و ضریب گیاه کشت شده در منطقه و داده‌های لایسیمتری ارزیابی نمودند، که نتایج حاکی از آن بود که خطای نسبی روش سبال در حدود ۴.۳٪ می‌باشد.

والنتین و همکاران (۲۰۰۸) از سنسورها و مدل‌های چندگانه جهت مطالعه بیلان آب و بیلان انرژی استفاده کردند. این پژوهش بر روی گندم زمستانه در شمال شرقی آلمان انجام شد و برای ارزیابی بیلان انرژی از نسبت Bowen استفاده شد همچنین رطوبت پروفیل خاک در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری شد، این پژوهش نشان داد مقدار تبخیر و تعرق با رطوبت خاک برای گندم زمستانه همبستگی خوبی ندارد.

¹ Aster

هانگ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست و مودیس و الگوریتم سبال، به بررسی تبخیر و تعرق روزانه در منطقه New Mexico پرداختند. در این مطالعه هدف استفاده از دو ماهواره لندست و مودیس بررسی پایداری الگوریتم سبال بود. تبخیر و تعرق روزانه حاصل شده از ماهواره لندست انحراف معیار بالاتری داشت و نسبت به تصاویر مودیس استانداردتر می‌باشد، اما میانگین تبخیر و تعرق روزانه‌ی هر دو تصویر مشابه است که به دلیل دقت مکانی، هندسی و رادیومتریکی این دو تصویر متفاوت است.

تیکسریا و همکاران (۲۰۰۹) برای بررسی نیاز آبی گیاهان از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی و روش سبال استفاده کردند، این پژوهش برای مناطق نیمه خشک برزیل انجام شد و با کالیبره کردن داده‌های زمینی و انجام معادلات الگوریتم سبال پارامترهای آلبیدوی سطحی، دمای سطحی، تابش خالص، زبری سطح، شار حرارت خاک و... برای تخمین تبخیر و تعرق محاسبه شد؛ نتایج بدست آمده برای تعیین نیاز آبی گیاهان باغی که عمده‌ترین مصرف کننده آب در منطقه مورد مطالعه هستند، کاربردی می‌باشد.

موتیگا و همکاران (۲۰۰۹) به منظور برآورد توزیع مکان-دمایی تبخیر و تعرق در منطقه‌ی Upper Ewaso Ng'iro در کشور کنیا پارامترهایی نظیر آلبیدو، دما و شاخص گیاهی NDVI را محاسبه کردند. در این پژوهش از تصاویر سنجنده مودیس و الگوریتم سبال استفاده شد؛ با مقایسه نتایج حاصل شده از الگوریتم سبال و نتایج به دست آمده از روش بیلان آبی، همبستگی ۰.۷۰٪ بین خروجی‌ها مشاهده شد.

دورسون و همکاران (۲۰۰۹) برای برآورد تبخیر و تعرق سالانه در منطقه Imperil Irrigation در کالیفرنیا جنوبی، از سه روش برآورد تبخیر و تعرق برای سال ۱۹۹۸ استفاده کردند. این روش‌ها شامل: روش مبتنی بر سنجش از دور (SEBAL)، معادله بیلان آبی و روش FAO-56 برای محاسبه دوره آبیاری زمین می‌باشد. مقایسه انجام شده نشان می‌دهد که مقدار تبخیر و تعرق سالانه بدست آمده از هر دو روش فائو و سبال نسبت به معادله بیلان آبی به ترتیب ۰.۶ و ۱.۴٪ خطا داشته است.

سان و همکاران (۲۰۱۱) به منظور برآورد تبخیر و تعرق تالاب دریاچه Nansi چین از تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی استفاده کردند. مقادیر تبخیر ثبت شده از تصاویر +ETM و DEM و

روش سبال را با نتایج حاصل شده از روش تشت تبخیر مقایسه کردند، این تحقیق نشان داد تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال با کمترین داده‌های هواشناسی در مناطق بزرگ مانند تالاب‌ها نتیجه خوبی ارائه می‌دهد.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) برای تخمین توزیع مکانی تبخیر و تعرق حوضه رودخانه Heihe چین از روش اصلاح شده سبال استفاده کردند و اعتبارسنجی نتایج با روش پیشنهادی تاسومی انجام شد. در تبخیر و تعرق روزانه $R^2=0.966$ بود و از انجام این تحقیق نتیجه گرفتند می‌توان با روش ساده شده سبال، تبخیر و تعرق را در مقیاس وسیع برآورد کرد.

هادجیمیتسیس و همکاران (۲۰۱۳)، با هدف محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاه بادام زمینی در روستای ماندریا در جزیره‌ی قبرس، از تکنیک سنجش از دور استفاده کردند. در این تحقیق از ماهواره لندست ۵ و لندست ۷ با استفاده از الگوریتم سبال استفاده شد و برای افزایش دقت با استفاده از معادلات تجربی، روش سبال تصحیح شد.

ساری و همکاران (۲۰۱۳) به منظور برآورد آب مصرفی و عملکرد مزارع برنج درصدد محاسبه تبخیر و تعرق برآمدند، آنها از روش تعادل بیلان انرژی سطحی (سبال) و روش تشخیص phenology، برای منطقه Pantura Jawa Barat واقع در اندونزی استفاده کردند، نتایج تبخیر و تعرق واقعی میانگین فصلی ۲۷۴.۵ میلی‌متر در هر فصل با انحراف معیار ± ۴۴.۷ میلی‌متر، برای مزارع برنج را نشان داد.

بزرا و همکاران (۲۰۱۵) با هدف ارزیابی تبخیر و تعرق روزانه در مزرعه پنبه واقع در ایالت Ceara برزیل روش‌های مبتنی بر سنجش از دور را به کار بردند. آنها از هفت تصویر لندست برای مطالعه سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ و الگوریتم SEBAL و SSEB استفاده کردند و نتایج را با مقادیر بدست آمده از روش نسبت Bowen مقایسه کردند. نتایج نشان داد روش SSEB یک ابزار مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق در مناطق نیمه خشک می‌باشد و برای محاسبه تعادل انرژی نیاز به داده‌های هواشناسی ندارد و با دمای میانگین

پیکسل‌های گرم و سرد محاسبات را انجام می‌دهد و پردازش ساده‌تری نسبت به الگوریتم سبال که نیاز به حل یک فرآیند تکراری برای بدست آوردن مقادیر شار گرمای محسوس دارد، ارائه می‌دهد.

یانگ و همکاران (۲۰۱۵) برای بررسی آب مصرفی محصول ذرت تابستانه و گندم زمستانه در سه دشت Hai و Huai، Huang چین از الگوریتم سبال استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده (NDVI) و دمای سطح زمین (LST)، اهمیت قابل توجهی در برآورد تبخیر و تعرق محصول دارند، میانگین تبخیر و تعرق فصلی ذرت تابستانه و گندم زمستانه به ترتیب ۳۵۴.۸ و ۵۲۱.۵ میلی‌متر بود.

نودا و همکاران (۲۰۱۸) به منظور بررسی کاربرد پتانسیل تبخیر و تعرق در فصل خشک برای مدل‌سازی عمق آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه Molopo واقع در آفریقای جنوبی پرداختند، آنها از تصاویر لندست ۵ برای سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۵ و تصاویر لندست ۸ برای سال ۲۰۱۵ از الگوریتم سبال استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد کاهش تدریجی ET_p در بین سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۵ در سراسر منطقه مورد مطالعه رخ داده است که ET_p در آب‌های زیرزمینی کم عمق، بالا و در آب‌های زیرزمینی عمیق، پایین است. بنابراین ارزیابی ET_p و تغییرات آنها در مقیاس حوضه آبریز برای برنامه‌ریزی و مدیریت آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز حائز اهمیت است.

ما و همکاران (۲۰۱۸) برای برآورد تبخیر و تعرق حوضه رودخانه Heihe که در شمال غربی چین واقع شده است، از تصاویر سنجنده مودیس و لندست ۷ و روش SEBS استفاده کردند و برای ارزیابی نتایج حاصل شده را با مقادیر بدست آمده از برج‌های EC موجود در منطقه مقایسه کردند. نتایج برآورد تبخیر و تعرق روزانه $RMSE=0.81$ mm/day و $MAPE=12\%$ را نشان داد.

ری‌یز گونزالس و همکاران (۲۰۱۸) به منظور برآورد نیاز آبی گیاه ذرت در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ از تصاویر ماهواره لندست برای منطقه‌ای Comarca Lagunera در مکزیک استفاده کردند. نتایج نشان داد که

تبخیر و تعرق در مراحل اولیه رشد گیاه کم و در اواسط فصل و مراحل برداشت زیاد شده است، همچنین سنجش از دور ابزاری مناسب برای کمی کردن مصرف آب محصول در مقیاس منطقه‌ای است.

داس سانتوس و همکاران (۲۰۲۰) به منظور ارزیابی کارایی برجهای EC در منطقه Caatinga که در شمال شرق برزیل واقع شده است، از الگوریتم SEBAL و MOD16_ET استفاده کردند. برجهای EC می‌تواند شارهای انرژی را با دقت بالایی اما در مقیاس نقطه‌ای اندازه‌گیری کند. بدین منظور از تکنیک سنجش از دور برای اندازه‌گیری شار انرژی در مقیاس‌های وسیع استفاده کردند؛ با استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم سبال شار انرژی به مدت سه سال (۲۰۱۴-۲۰۱۶) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد الگوریتم سبال تبخیر و تعرق را به درستی برای فصل مرطوب برآورد می‌کند اما MOD16_ET برای تمام فصول نتایج رضایت بخشی ارائه می‌دهد.

احمد و جعفر (۲۰۲۰) برای برآورد تبخیر و تعرق در دره Bekaa لبنان برای دوره زمانی ۳۴ ساله از الگوریتم متریک و سبال استفاده کردند این تحقیق نشان داد بیش از ۶۴٪ در فصل خشک و ۷۰٪ در فصل مرطوب به صورت تبخیر و تعرق مصرف می‌شود.

فوزی و همکاران (۲۰۲۰) برای محاسبه تبخیر و تعرق در حوضه رودخانه نیل از ۱۸ تصویر لندست ۸ در طول فصل تابستان ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ و الگوریتم سبال استفاده کردند و به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از الگوریتم سبال، روش فائو-پنمن-مانتیت را به کار بردند نتایج حاکی از آن بود که تبخیر و تعرق واقعی منطقه مورد مطالعاتی با $R^2=0.843\%$ و $RMSE=0.264 \text{ mm/day}$ از دقت کافی برخوردارند.

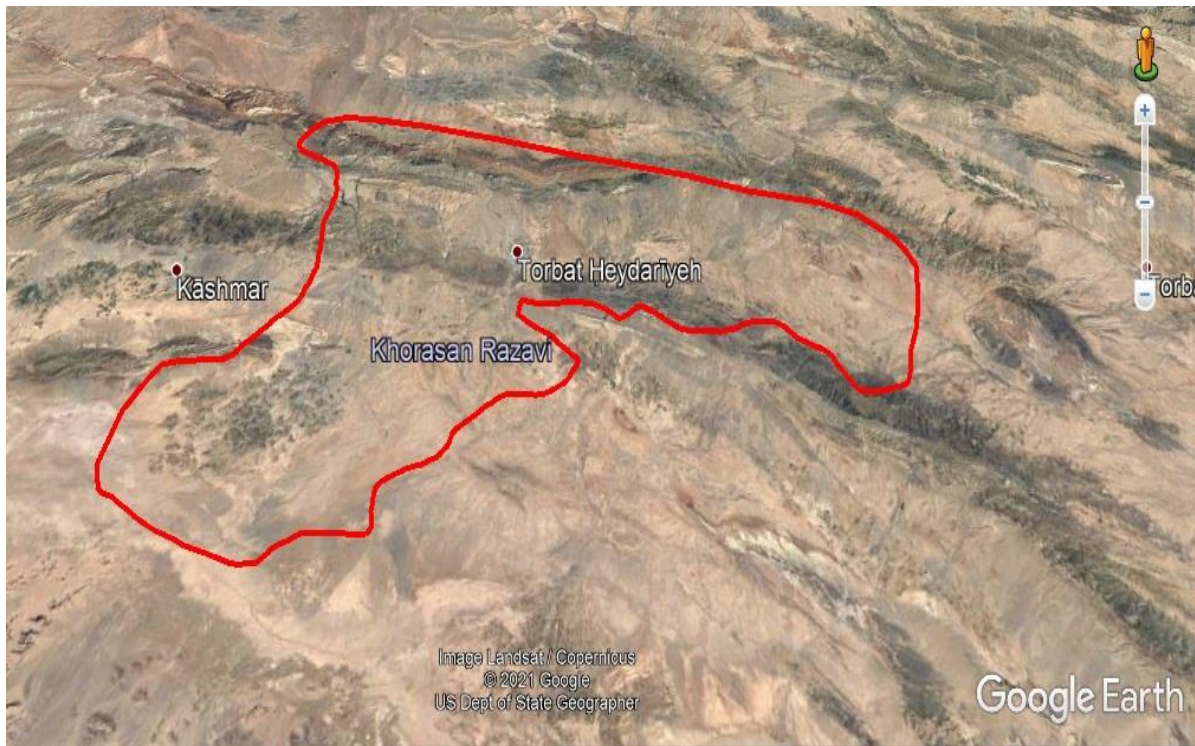
فصل سوم

مولدوروش

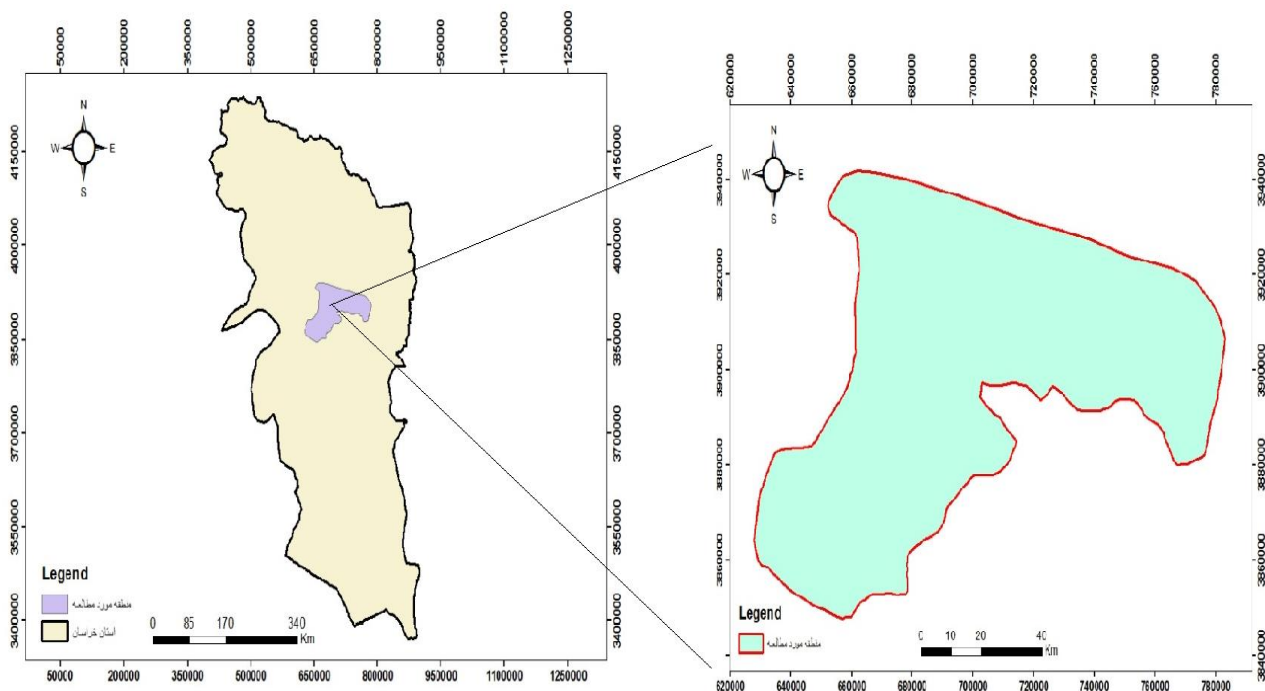
۳-۱- منطقه مورد مطالعه

برای انجام این تحقیق شهرستان تربت حیدریه با وسعتی بیش از ۳۶۶۸ کیلومتر مربع، در فاصله ۱۴۲ کیلومتری از مرکز استان خراسان رضوی، که در مدارهای ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفت. این منطقه دارای اقلیم سرد و نیمه خشک می‌باشد. مقدار متوسط بارش در این شهرستان حدود ۲۴۵ میلی متر، متوسط حداکثر دمای منطقه ۲۱/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداقل دما ۸/۴ درجه سانتی‌گراد است.

شکل (۳-۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را در محیط گوگل ارث نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۳-۲) موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی و شهرهای اطراف نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در گوگل ارث



شکل (۳-۲): موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی

۳-۲- داده‌های مورد استفاده

۳-۲-۱- داده‌های هواشناسی

برخی از داده‌های هواشناسی مورد نیاز در این مطالعه از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تربت حیدریه گرفته شده است، داده‌های زمینی مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

- درجه حرارت لحظه‌ای (درجه حرارتی که ایستگاه زمینی در زمان تصویربرداری ماهواره از منطقه مورد پژوهش، ثبت می‌کند).
- حداقل درجه حرارت
- حداکثر درجه حرارت
- تاریخ ژولین
- ساعت‌های آفتابی
- رطوبت نسبی

- ارتفاع متوسط
- سرعت باد
- طول و عرض جغرافیایی
- زمان برداشت داده‌ها (باید دقیقا مربوط به همان ساعت تصویربرداری ماهواره باشد یا نزدیک‌ترین زمان ممکن در روز به زمان تصویربرداری)
- ارتفاع بادسنج

۳-۲-۲- تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این تحقیق مربوط به سنجنده‌های OLI و TIRS مستقر بر روی ماهواره لندست ۸ می‌باشند. این تصاویر در سایت USGS به صورت رایگان در اختیار عموم قرار می‌گیرد. همچنین برای مدل ارتفاع رقومی منطقه از تصویر dem سنجنده استر با قدرت تفکیک ۳۰ متری استفاده شد.

جدول (۳-۱): تاریخ اخذ و زمان تصویربرداری

تاریخ	زمان	تاریخ ژولین
۲۰۱۳/۸/۲	۰۶:۳۹	۲۲۴
۲۰۱۴/۶/۱۲	۰۶:۳۷	۱۶۳
۲۰۱۴/۷/۱۴	۰۶:۳۷	۱۹۵
۲۰۱۴/۷/۳۰	۰۶:۳۷	۲۱۱
۲۰۱۵/۵/۳۰	۰۶:۳۶	۱۵۰
۲۰۱۵/۷/۱	۰۶:۳۶	۱۸۲
۲۰۱۵/۸/۲	۰۶:۳۷	۲۱۴
۲۰۱۶/۶/۱	۰۶:۳۷	۱۵۲

۲۰۱۶/۷/۳	۰۶:۳۷	۱۸۴
۲۰۱۶/۸/۴	۰۶:۳۷	۲۱۶

برای انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های ۱۳۹۳، ۱۳۹۲، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ استفاده گردید، به غیر از سال ۱۳۹۲ که فقط یک تصویر در ۱۱ مرداد ماه وجود داشت در بقیه سال‌ها سه تصویر از سه ماه گرم استفاده گردید که عبارتند از :

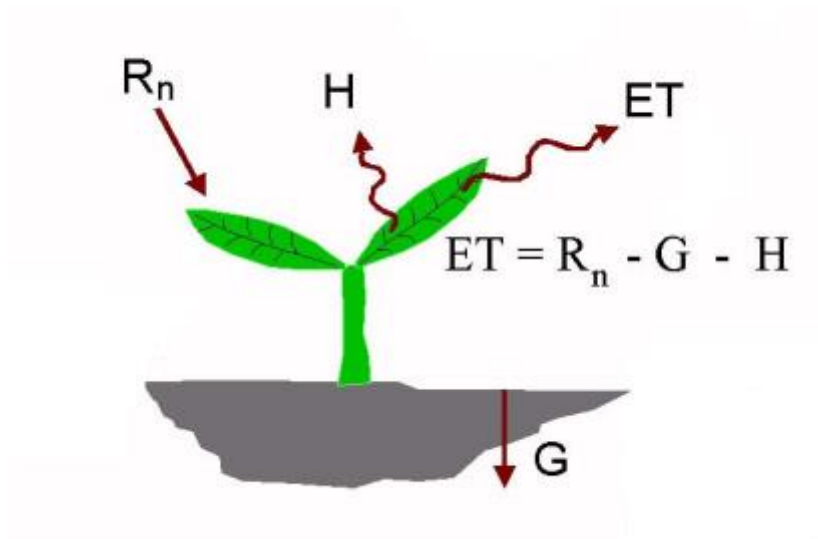
- سال ۱۳۹۳ (۲۲ خرداد، ۲۳ تیر، ۸ مرداد)
- سال ۱۳۹۴ (۹ خرداد، ۱۰ تیر، ۱۱ مرداد)
- سال ۱۳۹۵ (۱۲ خرداد، ۱۳ تیر، ۱۴ مرداد).

نزدیکترین زمانی که ایستگاه هواشناسی در زمان تصویر برداری ماهواره داده‌برداری کرده است، ساعت ۱۱:۱۰ دقیقه صبح می‌باشد.

۳-۳- الگوریتم توازن انرژی سطح برای زمین (سبال)

الگوریتم سبال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی می‌تواند بر اساس رابطه توازن انرژی سطح، میزان تبخیر و تعرق در مقیاس لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره از منطقه را برآورد کند.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (۱-۳)$$



شکل (۳-۳): فرآیند تبخیر و تعرق

در این معادله ET میزان تبخیر و تعرق^۱، λET شار گرمای نهان تبخیر، R_n تابش‌های خالص سطح زمین^۲، G شار گرمای خاک^۳ و H شار گرمای محسوس^۴ می‌باشد. که همه پارامترهای بیان شده در رابطه فوق بر حسب W/m^2 می‌باشند.

۳-۳-۱- تابش‌های خالص سطح زمین (R_n)

برای محاسبه مقدار R_n باید مشخص کنیم که چه مقدار از انرژی الکترومغناطیسی در زمان تصویربرداری ماهواره به سطح زمین رسیده است و چه میزان انرژی الکترومغناطیسی از سطح زمین منتشر شده است.

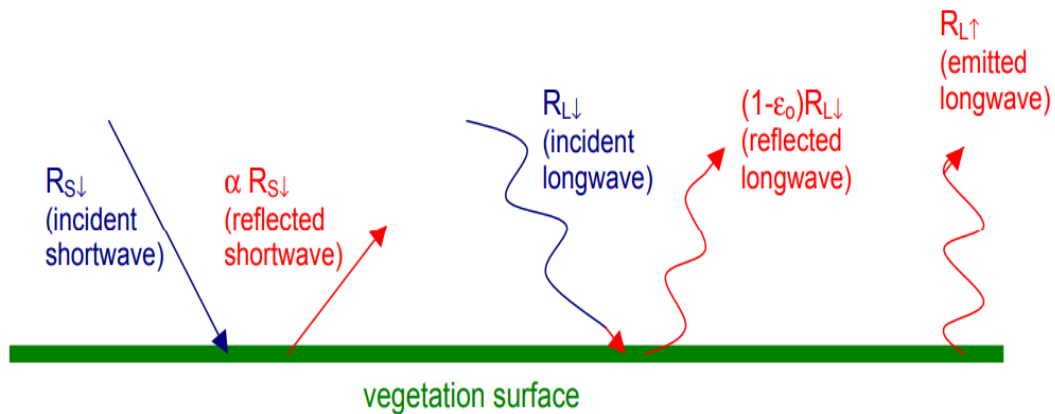
$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (۲-۳)$$

¹ Evaporation and Transpiration

² Net Radiation

³ Soil Heat Flux

⁴ Sensible Heat Flux



شکل (۳-۴): شارهای ورودی و خروجی از سطح زمین

در معادله فوق:

$R_{S\downarrow}$ ، تابش‌های طول موج کوتاه رسیده به سطح زمین است بر حسب w/m^2 .

α ، آلبیدوی سطح است که دو اثر مهم اتمسفر یعنی پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی از آن حذف شده و این پارامتر بدون بعد می‌باشد.

$R_{L\downarrow}$ ، تابش‌های طول موج بلند ورودی هستند بر حسب w/m^2 .

$R_{L\uparrow}$ ، تابش‌های طول موج بلند خروجی هستند بر حسب w/m^2 .

ϵ_0 ، نشان دهنده توان تشعشعی یک پدیده و بدون بعد است.

به طور اختصاصی به محاسبه هر کدام از این پارامترها می‌پردازیم.

۳-۳-۱-۱- آلبیدوی سطح

$Reflectance_{toa}$: بازتاب‌های صورت گرفته از سطح زمین است که تحت تأثیر لایه‌های بالایی اتمسفر قرار

گرفته اند. برای اینکه آلبیدوی سطحی را محاسبه کنیم اولین گام این است که این تصویر را بدست آوریم.

$Albedo_{toa}$: برای محاسبه آلبیدوی بالای جو، باید مقدار بازتاب‌های صورت گرفته از سطح زمین در هر طول

موج را در یک ضریب وزنی ضرب کنیم:

$$\alpha_{toa} = \Sigma(\omega_{\lambda} \times \rho_{\lambda}) \quad (3-3)$$

ضریب وزنی از طریق این رابطه محاسبه می‌شود:

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\Sigma ESUN_{\lambda}} \quad (4-3)$$

ESUN: به میزان انرژی الکترومغناطیسی رسیده به سطح زمین در هر یک از طول موج‌ها و باندهای ماهواره‌ی لندست ۸، ESUN می‌گویند.

برای اینکه آلبیدوی بالای جو را به آلبدوی سطح تبدیل کنیم باید دو اثر مهم اتمسفر که پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی هستند را حذف کنیم.

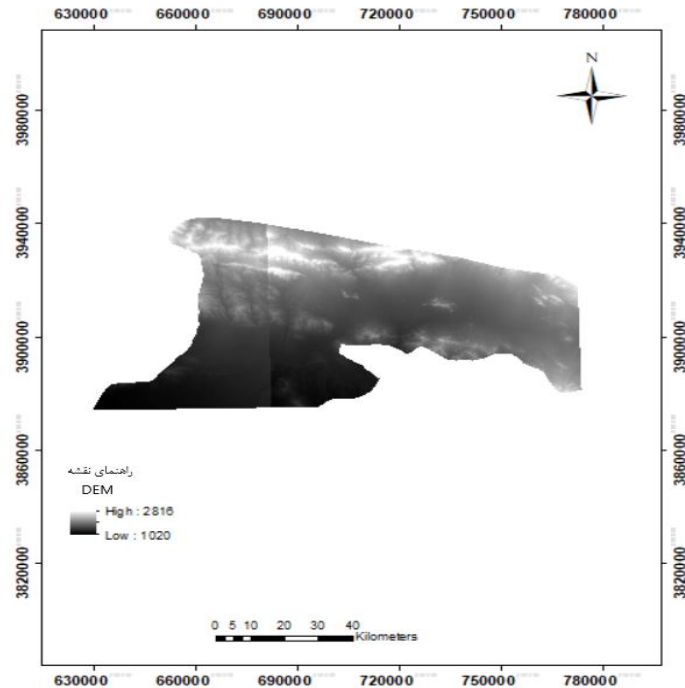
$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path-radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (5-3)$$

$\alpha_{path-radiance}$ برای حذف اثر پخش مورد استفاده قرار می‌گیرد و رنج مقادیر آن بین ۰.۰۲۵ تا ۰.۰۴ است. اما برای سبال مقدار ثابت ۰.۰۳ توصیه شده است. (باستیانسن-۲۰۰۰)

τ_{sw} برابر با انتقال پذیری اتمسفر است که ضخامت اتمسفر را نشان می‌دهد؛ در واقع، رابطه عکسی بین ضخامت و انتقال پذیری اتمسفر وجود دارد:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (6-3)$$

Z: بیانگر ارتفاع از سطح آب‌های آزاد و بر حسب متر می‌باشد، که برای متغیر Z هم می‌توان از مدل‌های ارتفاعی رقومی زمین (dem) استفاده کرد و هم از میانگین ارتفاعی منطقه بهره‌مند شد. اگر منطقه مسطح باشد می‌توان از میانگین ارتفاعی استفاده کرد اما در صورتی که منطقه دارای ناهمواری باشد بهتر آن است که از مدل dem استفاده گردد.



شکل (۳-۵): تصویر DEM

۳-۳-۱-۲- تابش‌های طول موج کوتاه ورودی ($R_s \downarrow$)

مقدار انرژی الکترومغناطیسی که از تابش‌های خورشید به صورت مستقیم یا پراکنده به سمت زمین می‌رسد، با فرض اینکه شرایط آسمان صاف و بدون ابر است آن را برای زمان تصویربرداری به این صورت محاسبه می‌کنند:

$$R_s \downarrow = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (۷-۳)$$

در این فرمول :

G_{sc} ثابت خورشیدی با مقدار $1367 \text{ (w/m}^2\text{)}$ می‌باشد، $\cos \theta$ زاویه ورودی خورشید، d_r برابر با مربع معکوس

فاصله نسبی زمین تا خورشید، τ_{sw} شفافیت جوی است.

دامنه مقادیر R_s باید بین $1000 - 200 \text{ w/m}^2$ باشد.

برای محاسبه d_r باید فاصله زمین تا خورشید را از فایل MTL استخراج کنیم:

$$dr=1/(\text{Earth-sun-distance})^2 \quad (۸-۳)$$

برای محاسبه θ باید مقدار sun-elevation را از فایل MTL استخراج کنیم سپس با استفاده از این فرمول محاسبه شود:

$$\theta = 90 - \text{Sun_Elevation} \quad (۹-۳)$$

۳-۳-۱-۳-۳ تابش‌های طول موج بلند خروجی از سطح زمین ($R_L \uparrow$)

تابش طول موج بلند خروجی میزان انرژی است که از سطح زمین به جو ساطع می‌شود. این پارامتر با استفاده از معادله استفان-بولتزمن محاسبه می‌شود:

$$R_L \uparrow = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (۱۰-۳)$$

Emissivity -۴-۱-۳-۳

همانطور که گفته شد نشان دهنده گسیلمندی است، هر چقدر توان تشعشعی یا گسیلمندی یک پدیده بیشتر باشد emissivity آن بالاتر است و بالعکس. رنج مقادیر آن همیشه در بازه بین صفر و یک توزیع می‌شود.

σ ثابت استفان است با مقدار 5.67×10^{-8}

T_s دمای سطح زمین

ε_0 Emissivity که یکی از مؤلفه‌های مهم در محاسبه $R_{loutgoing}$ می‌باشد در الگوریتم سبال برای مناطقی که پوشش گیاهی کمی دارند از طریق این فرمول قابل محاسبه می‌باشند:

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01LAI \quad LAI < 3 \quad (۱۱-۳)$$

$$\varepsilon_0 = 0.98 \quad LAI \geq 3 \quad (۱۲-۳)$$

۳-۱-۳-۵- شاخص‌های پوشش گیاهی

وقتی می‌خواهیم شاخص‌های طیفی را محاسبه کنیم حتما باید تصویر Multispectral ما از نظر رادیومتریکی و اتمسفری تصحیح شده باشد. سپس دو شاخص مهم برای برآورد تبخیر و تعرق یعنی شاخص سطح برگ^۱ (LAI) و شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده^۲ (NDVI) را محاسبه می‌کنیم. هر دو شاخص درصد پوشش گیاهی را نشان می‌دهند، اما شاخص NDVI به خوبی شاخص LAI تغییرات تراکم و تنوع پوشش گیاهی را نشان نمی‌دهد.

۳-۱-۳-۶- دمای سطح زمین (LST):

در ماهواره لندست ۸ باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ برای برآورد دمای سطح زمین کاربردی هستند که برای محاسبه دمای سطح زمین از Emissivity تصحیح شده استفاده می‌کنیم، برای اینکار ابتدا با استفاده از فرمول زیر درصد پوشش گیاهی را مشخص می‌کنیم:

$$PV = (NDVI - NDVI_{\min} / \max - \min) \quad (13-3)$$

با استفاده از فرمول زیر Emissivity که برای محاسبه LST لازم است را برآورد می‌کنیم:

$$E = 0.004 \times pv + 0.986 \quad (14-3)$$

حالا با اعمال شرایط زیر Emissivity را در داخل NDVI تصحیح می‌کنیم:

شامل پوشش‌های آبی و خاکی می‌شوند:

$$NDVI < 0.2 = 0.97 \quad (15-3 \text{ الف})$$

شامل پوشش‌های گیاهی پرتراکم می‌شوند:

$$NDVI > 0.5 = 0.99 \quad (15-3 \text{ ب})$$

شامل پوشش‌های گیاهی با تراکم کمتر می‌شوند:

$$0.2 < NDVI > 0.5 = e$$

¹Leaf Area Index

²Normalized Difference Vegetation Index

(۳-۱۵-پ)

بعد از اعمال این شرایط باید رنج مقادیر در بازه [۰.۹۷-۰.۹۹] باشد.

برای محاسبه T_s لازم است تصحیح رادیومتریکی و اتمسفری بر روی باند حرارتی صورت گیرد.

۳-۳-۱-۷- دمای درخشندگی:

Brightness temperature یا دمای درخشندگی، دمای ثبت شده توسط سنجنده که مغایر با دمای سطح زمین است. اثرات اتمسفر بر روی $Brightness\ temperature$ وجود دارد اما اثرات اتمسفر از روی LST ، نرمالسازی و حذف می شود.

رادیانس باند حرارتی، شامل شار انرژی ثبت شده توسط سنسور بر حسب واحد وات بر پیکسل است.

حالا طبق فرمول زیر LST محاسبه می شود:

$$T_s = (TB) / (1 + (rad \times (14380) \times \log(e))) \quad (۳-۱۶)$$

حالا که پارامترهای لازم محاسبه شد می توانیم طبق فرمول (۳-۱۰) تابش های طول موج بلند خروجی را محاسبه می شود، که دامنه مقادیر در بازه [۷۰۰-۲۰۰] است.

۳-۳-۱-۸- تابش های طول موج بلند ورودی (RL_{\downarrow}):

شار تابش حرارتی که از جو به سمت پایین می آید و با استفاده از معادله استفان-بولتزمن محاسبه می شود:

$$RL_{\downarrow} = \epsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (۳-۱۷)$$

در این معادله ϵ_a تابش اتمسفری و بدون بعد است و طبق فرمول تجربی که باستیانسن در ۱۹۹۵ ارائه کرد به این صورت محاسبه می شود:

$$\epsilon_a = 0.85 \times (-\ln \tau_{sw})^{.09} \quad (۳-۱۸)$$

Ta درجه حرارت ثبت شده در ایستگاه زمینی است که در محل پیکسل‌های سرد قرار دارد و با توجه به تاریخ و لحظه‌ی تصویربرداری ماهواره، از داده‌های هواشناسی استخراج می‌شود. برای اینکه دما برحسب کلوین باشد:

$$Ta + 273.15 \quad (۱۹-۳)$$

سپس تابش‌های طول موج بلند ورودی محاسبه می‌شود؛ دامنه مقادیر در بازه [۲۰۰-۵۰۰] قرار دارد. پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه Rn در فرمول (۱۷-۳) قرار داده می‌شود دامنه مقادیر تابش‌های خالص سطح زمین در پوشش‌های گیاهی باید در بازه [۷۰۰-۱۰۰] w/m² باشد. در مرحله بعدی الگوریتم سبال باید به محاسبه پارامترهای G و H پردازیم

۳-۳-۲- شار حرارتی خاک (G)

به مقدار انتقال گرما در داخل خاک و پوشش‌های گیاهی که در اثر هدایت مولکولی صورت می‌گیرد، شار حرارتی خاک می‌گویند. در الگوریتم سبال برای محاسبه شار حرارت خاک از معادله‌ی تجربی که توسط باستیانسن در ۲۰۰۰ ارائه شد، ابتدا نسبت G/Rn نیمه روز محاسبه می‌شود:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4)} \quad (۲۰-۳)$$

باید رنج مقادیر در مناطقی که پوشش گیاهی وجود دارد بین ۰.۰۵ تا ۰.۱۵ باشد.

برای بدست آوردن مقدار G باید نسبت G/Rn را در مقدار Rn ضرب کنیم.

دامنه مقادیر در داخل پوشش گیاهی باید پایین‌تر از خاک باشد.

۳-۳-۳- شار گرمای محسوس (H)

میزان اتلاف گرما به هوا که به دلیل همرفت و هدایت مولکولی به خاطر اختلاف دما صورت می‌گیرد را شار گرمای محسوس می‌گویند، که تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است. با این رابطه شار گرمای محسوس را محاسبه می‌کنند:

$$H = (\rho \times c_p \times dT) / r_{ah} \quad (21-3)$$

ρ چگالی هوا برحسب (kg/m^3) ، c_p گرمای ویژه هوا برابر با $(1004J/kg/k)$ ، dT اختلاف حرارتی دو نقطه مبنا در ارتفاع z_1, z_2 ، r_{ah} مقاومت آئروودینامیکی به انتقال گرما بر حسب (s/m)

۳-۳-۱- مقاومت آئروودینامیکی (r_{ah}):

مهم‌ترین مؤلفه‌ای که در پارامتر H محاسبه می‌کنیم، مقاومت آئروودینامیکی است، که خود تابعی از شار گرمای محسوس است. مقاومت آئروودینامیکی به روش تکرار قابل حل می‌باشد. اولین بار که مقاومت آئروودینامیکی را محاسبه می‌کنیم تصحیح نشده است، و محاسبات را تا جایی ادامه می‌دهیم که نهایتاً بهترین H را از طریق r_{ah} همگرا شده برآورد کنیم.

$$R_{ah} = \frac{\ln \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right]}{U_* \times K} \quad (22-3)$$

K ضریب ثابت ون کارمن است (معادل با ۰.۴۱) ، Z_1 و Z_2 مبنای ارتفاع پوشش گیاهی هستند و در مدل سبال به ترتیب برای آنها مقادیر ۰.۱ و ۲ متر پیشنهاد شده است. U شتاب باد در منطقه مورد نظر است که از طریق این فرمول قابل محاسبه می‌باشد:

$$u^* = \frac{K U x}{\ln \left[\frac{Z_x}{Z_{0m}} \right]} \quad (23-3)$$

U_x سرعت باد (m/s) در ارتفاع x که از طریق ایستگاه سینوپتیک بدست می‌آید که معمولاً ایستگاه سرعت باد را در ارتفاع ۱۰ متر می‌دهد.

Z_x ارتفاعی که سرعت باد را در ایستگاه سینوپتیک اندازه گیری می‌کنند که معمولاً برابر ۱۰ متر می‌باشد. Z_{0m} طول ناهمواری‌هایی که توسط پوشش‌های گیاهی در منطقه ایجاد می‌شود و به عنوان اثری که ویژگی‌های فیزیکی پوشش گیاهی در سرعت باد می‌تواند داشته باشد لحاظ می‌شود.

مقدار Z_{0m} را برای نواحی کشاورزی می‌توان به صورت تابعی از شاخص سطح برگ مطابق با رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$Z_{0m}=0.018 \times LAI \quad (24-3)$$

حالا طبق فرمول (23-3) u^* را در ارتفاع ۱۰ متر محاسبه می‌کنیم.

سرعت باد را در ارتفاع ۲۰۰ متر طبق این فرمول مدل می‌کنیم:

$$u_{200} = u^* \frac{\ln \left[\frac{200}{Z_{0m}} \right]}{K} \quad (25-3)$$

شتاب باد را در ارتفاع ۲۰۰ متر طبق این فرمول محاسبه می‌کنیم:

$$u^* = \frac{K \times U_{200}}{\ln \left[\frac{200}{Z_{0m}} \right]} \quad (26-3)$$

مقاومت آئرودینامیکی را طبق فرمول (22-3) محاسبه می‌کنیم.

۳-۳-۲- انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد^۱:

در الگوریتم سبال دو پیکسل سرد و گرم بسیار حائز اهمیت است، زیرا این دو پیکسل مشخص کننده‌ی شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی می‌باشند. و کیفیت محاسبات تبخیر و تعرق بستگی به دقت انتخاب این دو پیکسل شاخص دارد.

در این مرحله پیکسل‌هایی که مستعد پیکسل گرم و پیکسل سرد شدن را دارند، پیدا می‌کنیم و سپس شار حرارتی محسوس را به دست می‌آوریم. شرط انتخاب پیکسل سرد شدن این است که پیکسل در داخل پوشش گیاهی پرتراکم با درجه حرارت نسبتا پایین انتخاب شود و پیکسل گرم در زمین‌های غیر زراعی کشاورزی و در نواحی خاکی قرار بگیرد که دمای بالایی داشته باشد.

۳-۳-۳- محاسبه‌ی dt_{total}

¹ Hot and Cold Pixel

برای محاسبه شار گرمای محسوس از معادله (۲۱-۳) نیاز به تعیین اختلاف درجه حرارت هوای نزدیک به سطح زمین در هر پیکسل می باشد که به آن dt می گویند. اما بخاطر اینکه چنین اطلاعاتی در دست نیست سوال فرض را بر این قرار گرفته که یک رابطه خطی بین مقادیر dt و T_s برقرار است:

$$dT = aT_s + b \quad (۲۷-۳)$$

T_s درجه حرارت سطح زمین است، a و b ضرایب همبستگی می باشند.

ابتدا باید dt براساس اطلاعات پیکسل سرد و سپس براساس اطلاعات پیکسل گرم محاسبه شود و با استفاده از فرمول بالا مقدار dt را برای سایر پیکسل ها محاسبه کرد.

برای محاسبه پیکسل سرد از این فرمول استفاده می کنیم:

$$dt_{cold} = H_{cold} \times r_{ah-cold} / (\rho_{cold} \times C_p) \quad (۲۸-۳)$$

ρ نشان دهنده چگالی هوا می باشد که طبق فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\rho = 1000 \times (\text{air-pressure}) / 287 \times 1.01 \times Lst \quad (۲۹-۳)$$

air-pressure فشار هوای محاسبه شده است و LST باید به صورت کلوین باشد:

$$\text{air-pressure} = 101.3 \times [293 - 0.0065 \times \text{elevation} \div 293]^{5.26} \quad (۳۰-۳)$$

c_p مقدار ثابت ۱۰۰۴ است، وقتی پارامترهای مورد نیاز برآورد شد در معادله (۲۸-۳) قرار داده و dt_{cold} را محاسبه می کنیم.

dt_{hot} هم با استفاده از فرمول (۲۸-۳) بدست می آید با این تفاوت که به جای h_{hot} مقدارش را می نویسیم.

پس بدین صورت اختلاف حرارتی را با dt_{hot} و dt_{cold} محاسبه می‌کنیم.

برای محاسبه ضریب همبستگی a مطابق این فرمول عمل می‌کنیم:

$$a = \frac{diff-dts}{diff-lst} \quad (31-3)$$

یعنی اختلاف dt_{hot} و dt_{cold} را بر اختلاف LST پیکسل‌های گرم و سرد تقسیم شود.

دامنه مقادیر a مثبت می‌باشد.

ضریب همبستگی b از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$B = (-a) \times Lst(hot) + dt_{hot} \quad (32-3)$$

در قسمت‌هایی که شامل پوشش گیاهی هستند مقدار b منفی است.

وقتی ضرایب a و b محاسبه شد نسبت به تعیین dt_{total} اقدام می‌کنیم، LST که در اینجا محاسبه می‌شود

$LST_{dem-corrected}$ می‌باشد.

$LST_{dem-corrected}$ براساس تغییرات ارتفاعی نرمالیزه شده است و اثرات ارتفاعی در داخل آن لحاظ می‌شود:

$$lst_{dem} = lst + 0.0065 \times (elevation - datum) \quad (33-3)$$

$datum$ در این فرمول معادل با حداقل ارتفاع است.

$$dt-total = a(LST_{dem-corrected}) + b \quad (34-3)$$

dt_{total} نباید مقادیر منفی داشته باشد.

در این مرحله H اولیه را مطابق این فرمول محاسبه می‌کنیم.

$$H = \frac{(\rho_{air} \times C_p \times dT)}{R_{ah}} \quad (21-3)$$

H اولیه بیانگر شار گرمای محسوس در داخل منطقه است، اولین H با فرض اینکه شرایط جوی منطقه در

حالت خنثی است محاسبه می‌شود. اما چون مقاومت آئرودینامیکی تصحیح نشده است نمی‌توان به H بدست

آمده اطمینان داشت. و باید تا وقتی که rah همگرا شود محاسبات را ادامه داد تا H نهایی از rah همگرا شده حاصل شود و در محاسبات m-g-h مورد استفاده قرار بگیرد تا بتوانیم میزان شار انرژی در دسترس که برای تبخیر و تعرق استفاده می‌شود را به عنوان λET برآورد کنیم و بعد از این طریق به تبخیر و تعرق لحظه‌ای برسیم.

۳-۳-۳-۴- پایداری اتمسفر:

الگوریتم سبال برای محاسبه نیروی ارشمیدس که به علت گرمای سطح اتفاق می‌افتد، از تئوری طول-مونین-بوخوف در یک فرآیند تکراری استفاده می‌کند.

$$L = - \frac{\rho \times C_p \times U_z^3 \times T_s}{K \times G \times H} \quad (35-3)$$

که این تئوری امکانی را برای ما فراهم می‌کند که از طریق مقادیر به دست آمده در آن مشخص کنیم که در منطقه مورد مطالعه وضعیت جوی به چه صورت است؛ شرایط پایداری اتمسفر بر روی مقاومت آئرو دینامیکی بسیار اثرگذار می‌باشد خصوصاً برای شرایط خشک باید در محاسبه‌ی شار گرمای محسوس لحاظ شود.

وضعیت جوی شامل سه حالت پایداری می‌شود: پایدار، خنثی، ناپایدار که الگوریتم سبال برای هر سه حالت پایداری اتمسفر روابط مشخصی تعیین کرده است.

اگر مقدار $L < 0$ باشد، یعنی جو در حالت ناپایدار است:

$$\Psi_{m(200m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + X_{(200m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + X_{(200m)}^2}{2} \right) - 2 \operatorname{Arctan}(X_{(200m)}) + 0.5\pi \quad (36-3)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + X_{(2m)}^2}{2} \right) \quad (37-3)$$

$$\Psi_{h(0.1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + X_{(0.1m)}^2}{2} \right) \quad (38-3)$$

$$X_{200m} = \left[1 - 16 \frac{200}{L} \right]^{0.25} \quad (39-3)$$

$$X_{2m} = \left[1 - 16 \frac{2}{L} \right]^{0.25} \quad (40-3)$$

$$X_{0.1m} = \left[1 - 16 \frac{0.1}{L} \right]^{0.25} \quad (41-3)$$

اگر مقدار $L > 0$ باشد، جو پایدار است:

$$\Psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (42-3)$$

$$\Psi_{h(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (43-3)$$

$$\Psi_{h(0.1m)} = -5 \left(\frac{0.1}{L} \right) \quad (44-3)$$

اگر مقدار $L = 0$ باشد جو حالت طبیعی و خنثی دارد.

مقدار تصحیح شده شتاب باد در هر تکرار با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$u_* = \frac{U_{200K}}{\ln \left(\frac{200}{Z_{0m}} \right) - \Psi_{m(200m)}} \quad (45-3)$$

مقدار تصحیح شده برای مقاومت آئرو دینامیکی برای انتقال گرما با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

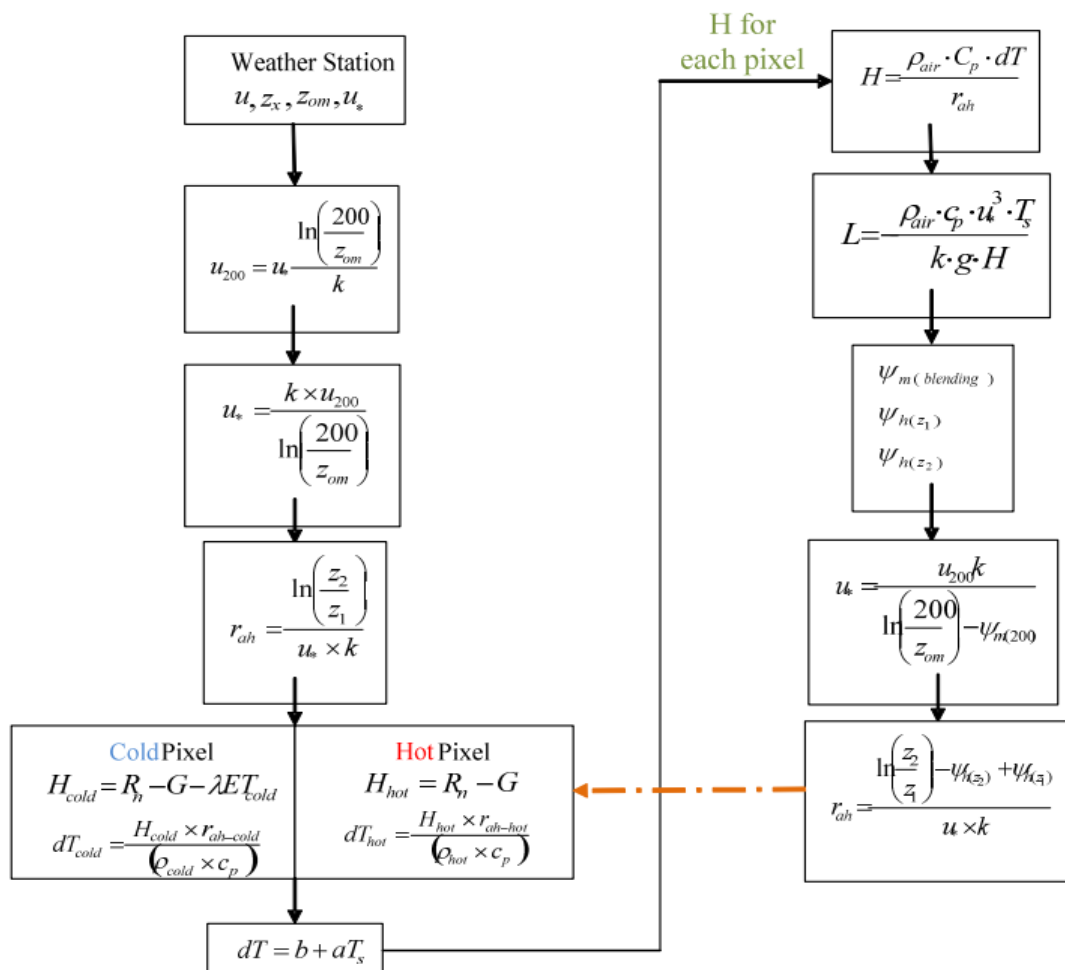
$$R_{ah} = \frac{\ln \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* \times K} \quad (46-3)$$

وقتی مقاومت آئرو دینامیکی تصحیح شد، می‌توان یک dt جدید با استفاده از معادله (34-3) برآورد کرد و

rah تصحیح شده، دوباره وارد معادلات dt_{cold} و dt_{hot} شود و این معادلات در یک چرخه تکرار می‌شوند تا

مقاومت آئرو دینامیک همگرا شود و آن H که از مقاومت آئرو دینامیکی همگرا شده بدست آید در فرمول (3-)

(¹) جایگزین شود.



شکل (۳-۶): فرآیند تکرار برای محاسبه H

۳-۴- شار گرمای نهان تبخیر

شار گرمای نهان تبخیر، نشان دهنده‌ی میزان اتلاف گرما از سطح به واسطه تبخیر و تعرق است؛ که با استفاده از فرمول زیر برای هر پیکسل قابل محاسبه می‌باشد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (۳-۱)$$

۳-۵- تبخیر و تعرق لحظه‌ای

بعد از اینکه شار گرمای نهان تبخیر را محاسبه کردیم به دلیل اینکه ماهواره در یک گذر از منطقه تصویربرداری می‌کند پس باید مقدار تبخیر و تعرق، در لحظه تصویربرداری محاسبه شود. با استفاده از این رابطه:

$$ET_{ins} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (47-3)$$

در این معادله ۳۶۰۰ برای تبدیل زمان از ثانیه به ساعت می‌باشد، ET_{ins} مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای و λ گرمای نهان بخار است هنگامی که یک کیلو گرم آب به بخار تبدیل می‌شود برحسب (J/Kg)؛ که از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود: (آلن و همکاران، ۲۰۰۷)

$$\lambda = (2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)) \times 10^6 \quad (48-3)$$

۳-۶- تبخیر و تعرق روزانه

میزان تبخیر و تعرق روزانه نسبت به لحظه‌ای بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور از کسر تبخیر و تعرق مرجع استفاده می‌شود که نسبت تبخیر و تعرق لحظه‌ای محاسبه شده برای هر پیکسل به تبخیر و تعرق مرجع که با استفاده از داده‌های هواشناسی در زمان تصویربرداری اندازه‌گیری شده، استفاده می‌شود:

$$ET_{rF} = \frac{ET_{ins}}{ET_r} \quad (49-3)$$

سپس به منظور تخمین تبخیر و تعرق روزانه از نسبت تبخیر و تعرق مرجع روزانه به ساعتی استفاده می‌شود که بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$ET_{24} = ET_{rF} \times ET_{r-24} \quad (50-3)$$

۳-۷- تبخیر و تعرق گیاه مرجع

تبخیر و تعرق از یک سطح چمنزار کوتاه شده و بدون کمبود آب، تبخیر و تعرق گیاه مرجع نامیده شده و با ET_0 نشان داده می‌شود. یکی از بهترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع روش پنمن-مانتیت است که

گیاه مرجع به عنوان یک گیاه فرضی دارای ارتفاع ۰.۱۲ متر و ضریب آبدوی ۰.۲۳ و همچنین مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر تعریف می‌شود.

رابطه فائو-پنمن-مانتیش برای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک مناسب است و طبق رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (Rn - G) + \gamma \times Cn \times U_2 \times \frac{es - ea}{T_{ins} + 273.15}}{\Delta + \gamma \times (1 + Cd \times U_2)} \quad (51-3)$$

در این رابطه:

Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع

Rn: تابش خالص سطح زمین

G: شار گرمای خاک

γ : ضریب ثابت سایکرومتری

Cn: عدد ثابت ۶۶

U_2 : سرعت باد در ارتفاع دو متری

es: فشار بخار اشباع

ea: فشار بخار واقعی

T_{ins} : درجه حرارت اندازه‌گیری شده در لحظه تصویربرداری ماهواره بر حسب سیلسیوس

Cd: عدد ثابت ۰.۲۵ می‌باشد.

۳_۸_ نرم افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای از نرم افزار ENVI5.3، جهت ترسیم نقشه‌های خروجی از نرم افزار Arc_GIS10.7، برای سازماندهی و تجزیه و تحلیل کردن داده‌های آماری از نرم افزار Excel2019 و برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از نرم افزار REF_ET استفاده گردید.

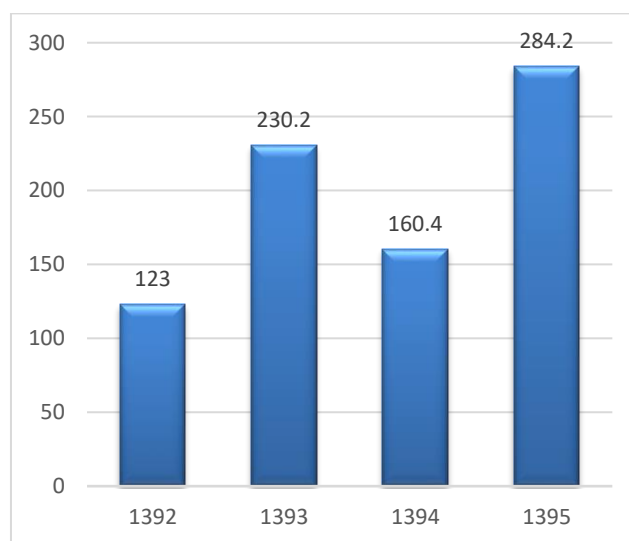
فصل چہارم

نتیجہ و بحث

۴-۱- مقدمه

کشور ایران جزء مناطق نیمه خشک جهان محسوب می‌شود و تنها در شمال ایران و حاشیه دریاچه‌ی خزر به اندازه کافی بارش باران وجود دارد، در صورتی که بارندگی در اکثر مناطق ایران در نواحی کوهستانی رخ می‌دهد، بنابراین مشکل کمبود آب یک مسئله جدی در چندین سال اخیر می‌باشد.

منطقه تربت حیدریه یکی از بحرانی‌ترین مناطق خراسان رضوی در زمینه کم آبی محسوب می‌شود. برآورد یکی از مهمترین پارامترهای هدر رفت آب، برای مدیریت و برنامه‌ریزی در مورد منابع آب و مصرف آن امری ضروری است. متوسط سالانه بارندگی چهارسال مورد مطالعه، در شکل (۴-۱) آمده است.



شکل (۴-۱): میانگین بارش بر حسب (میلی‌متر) در سال‌های مورد مطالعه

در این فصل به ارائه نتایج این تحقیق و کارآرایی روش مبتنی بر سنجش از دور پرداخته شد. در این مطالعه از الگوریتم سبال به منظور برآورد تبخیر و تعرق استفاده شد، برای صحت سنجی نتایج مبتنی بر الگوریتم سبال نیز از روش فائو-پنمن-مانتیت استفاده شد.

۴-۲- داده‌های زمینی

به منظور انجام محاسبات روش پنمن-مانتیث و همچنین در برخی از معادلات مانند الگوریتم سیال، نیاز به داشتن داده‌های هواشناسی می‌باشد که داده‌های هواشناسی از ایستگاه سینوپتیک منطقه تربت حیدریه گرفته شد.

آمار و اطلاعات مورد نیاز با توجه به زمان تصویربرداری ماهواره در زمان گذر سنجنده از منطقه مورد نظر، اخذ گردید. جدول (۴-۱) زمان و تاریخ تصویربرداری را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱): زمان و تاریخ تصویربرداری

تاریخ ژولین	زمان	تاریخ
۲۲۴	۰۶:۳۹	۲۰۱۳/۸/۲
۱۶۳	۰۶:۳۷	۲۰۱۴/۶/۱۲
۱۹۵	۰۶:۳۷	۲۰۱۴/۷/۱۴
۲۱۱	۰۶:۳۷	۲۰۱۴/۷/۳۰
۱۵۰	۰۶:۳۶	۲۰۱۵/۵/۳۰
۱۸۲	۰۶:۳۶	۲۰۱۵/۷/۱
۲۱۴	۰۶:۳۷	۲۰۱۵/۸/۲
۱۵۲	۰۶:۳۷	۲۰۱۶/۶/۱
۱۸۴	۰۶:۳۷	۲۰۱۶/۷/۳
۲۱۶	۰۶:۳۷	۲۰۱۶/۸/۴

جدول (۴-۲): داده‌های هواشناسی

تاریخ	زمان داده‌برداری	دمای لحظه‌ای	سرعت باد	رطوبت نسبی
۲۰۱۳/۸/۱۲	۱۱:۱۰	۲۶/۸	۳	۳۴/۴
۲۰۱۴/۶/۱۲	۱۱:۱۰	۳۲/۸	۳/۱	۹/۶
۲۰۱۴/۷/۱۴	۱۱:۱۰	۳۰/۴	۶	۱۶/۵
۲۰۱۴/۷/۳۰	۱۱:۱۰	۲۷/۴	۵	۱۴/۴
۲۰۱۵/۵/۳۰	۱۱:۱۰	۳۱	۱/۷	۱۵/۴
۲۰۱۵/۷/۱	۱۱:۱۰	۳۱/۳	۷/۹	۱۴/۹
۲۰۱۵/۸/۲	۱۱:۱۰	۲۸/۶	۷/۳	۱۲/۶
۲۰۱۶/۶/۱	۱۱:۱۰	۳۰	۴/۲	۱۵/۸
۲۰۱۶/۷/۳	۱۱:۱۰	۳۲/۲	۴	۱۶/۸
۲۰۱۶/۸/۴	۱۱:۱۰	۲۶/۶	۴/۸	۱۷/۱

جدول (۴-۲): ادامه داده‌های هواشناسی

تاریخ	حداقل دما	حداکثر دما	ساعات آفتابی
۲۰۱۳/۸/۱۲	۱۸/۳	۳۱	۹/۸
۲۰۱۴/۶/۱۲	۱۷/۲	۳۶/۶	۱۱/۷
۲۰۱۴/۷/۱۴	۲۱/۲	۳۳/۳	۱۳/۳
۲۰۱۴/۷/۳۰	۱۷/۴	۲۹/۹	۱۲/۱
۲۰۱۵/۵/۳۰	۱۶/۴	۳۴/۴	۱۱/۱
۲۰۱۵/۷/۱	۲۴/۸	۳۴/۲	۱۳
۲۰۱۵/۸/۲	۱۷/۲	۳۲	۱۳
۲۰۱۶/۶/۱	۱۹/۵	۳۲/۲	۹/۶
۲۰۱۶/۷/۳	۲۱/۷	۳۶	۱۲/۸
۲۰۱۶/۸/۴	۱۴/۹	۳۰/۵	۱۲/۶

۴-۳- تصاویر ماهواره‌ای

با استفاده از نرم افزار ENVI5.3 پردازش تصاویر ماهواره‌ای انجام گرفت. پردازش تصاویر ماهواره‌ای سه مرحله دارد:

I. پیش پردازش: انجام تصحیحات هندسی، رادیومتریکی و اتمسفری انجام می‌شود.

II. پردازش: از داده‌های تصحیح شده اطلاعات مؤثر استخراج گردد.

III. پس پردازش: اعتبارسنجی اطلاعات استخراج شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای محاسبه تبخیر و تعرق نیازی به تصحیح هندسی نمی‌باشد، ولی تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری لازم است انجام گردد. در ادامه تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری که برای محاسبه پارامترهای شار انرژی مورد نیاز است، آمده است.

۴-۴- تحلیل پارامترهای شار انرژی

در الگوریتم سبال جهت برآورد تبخیر و تعرق روش‌های گوناگون برای شرایط مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای مثال می‌توان به معادلات: رابطه پلانک و شاخص SAVI و... اشاره نمود. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه، از لحاظ اقلیمی جزو مناطق سرد و نیمه خشک می‌باشد، لذا در این تحقیق از معادلات زیر استفاده شد که برای منطقه مناسب است و نتایج حاصل از این معادلات در ادامه مورد بررسی قرار گرفت.

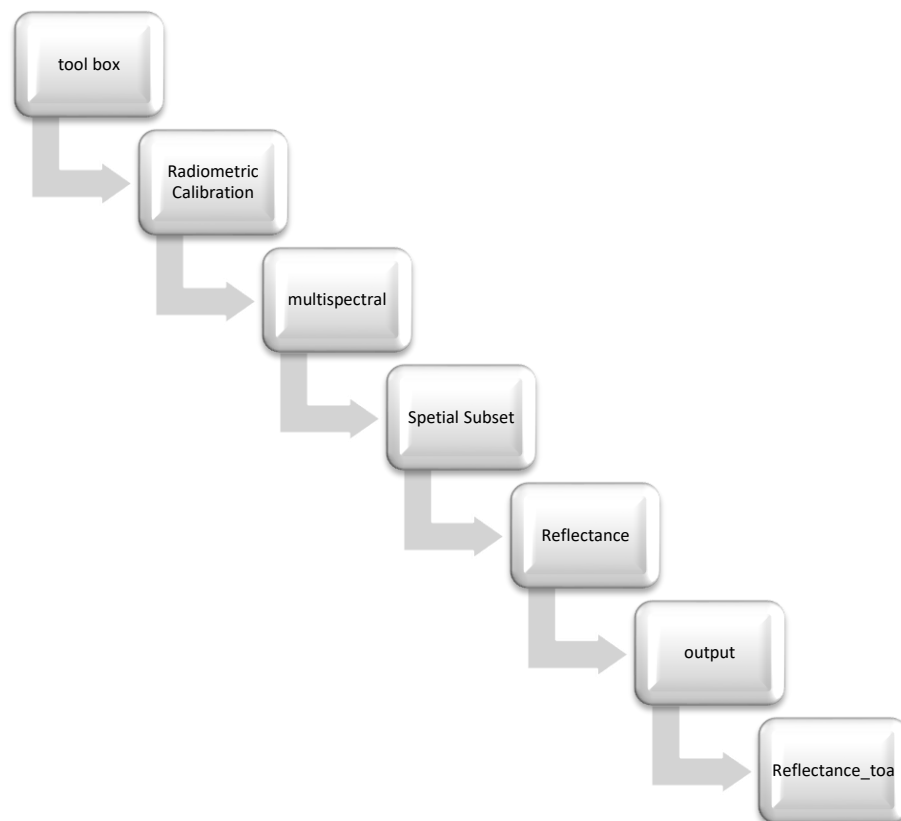
۴-۴-۱- تابش‌های خالص سطح زمین (R_n)

میزان شار تابش‌های خالص سطح زمین (R_n) با استفاده از معادله توازن تابش سطحی (۳-۲)، بر اساس پارامترهای (α) آلبدوی سطحی، ($R_{s\downarrow}$) تابش طول موج کوتاه ورودی (w/m^2)، ($R_{l\downarrow}$) تابش طول موج بلند ورودی (w/m^2)، (ϵ_0) توان تشعشعی، ($R_{l\uparrow}$) تابش طول موج بلند خروجی (w/m^2) محاسبه شده است. در ادامه محاسبه هر کدام از پارامترهای مذکور آمده است:

۴-۱-۱-۴-۱- آلبیدوی سطحی

آلبیدوی سطحی نسبت تابش منعکس شده از سطح به تابش طول موج کوتاه رسیده از خورشید است و مقدار آن با توجه به بازتاب صورت گرفته از هر سطح نظیر آب، خاک، برف، یخ، آسفالت، انواع گیاهان و... مختلف است. معمولاً آلبیدو در بیابانها مقدار بالایی دارد ولی برای جنگلها و اقیانوسها مقدار آلبیدو کمتر است، برای پوششهای گیاهی معمولاً در حدود ۰.۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه این پارامتر باید برآوردی از تصویر بازتابهای بالای جو انجام گردد، بدین منظور با استفاده از نرم افزار ENVI5.3 تصویر ماهواره‌ای فراخوانی شد و در شکل زیر مراحل محاسبه بازتابهای بالای جو توضیح داده شد:



شکل (۴-۲): مراحل محاسبه بازتابهای بالای جو

به منظور برآورد آلبیدوی بالای جو باید مقدار بازتاب بالای جو در هر طول موج، در یک ضریب وزنی ضرب گردد. که این ضریب وزنی با استفاده از فرمول (۷-۳) بدست می‌آید و در جدول (۳-۴) مقدار آن آمده است:

جدول (۳-۴): ضریب وزنی

BAND	ESUN	ESUN/ΣESUN	ω
۱	۱۷۱۹	$1719 \div 8671$	۰/۱۹
۲	۱۷۸۷	$1787 \div 8671$	۰/۲
۳	۱۷۴۶	$1746 \div 8671$	۰/۲
۴	۱۵۳۶	$1536 \div 8671$	۰/۱۷
۵	۹۹۷	$997 \div 8671$	۰/۱۱
۶	۸۱۱	$811 \div 8671$	۰/۰۹
۷	۷۵	$75 \div 8671$	۰/۰۰۸

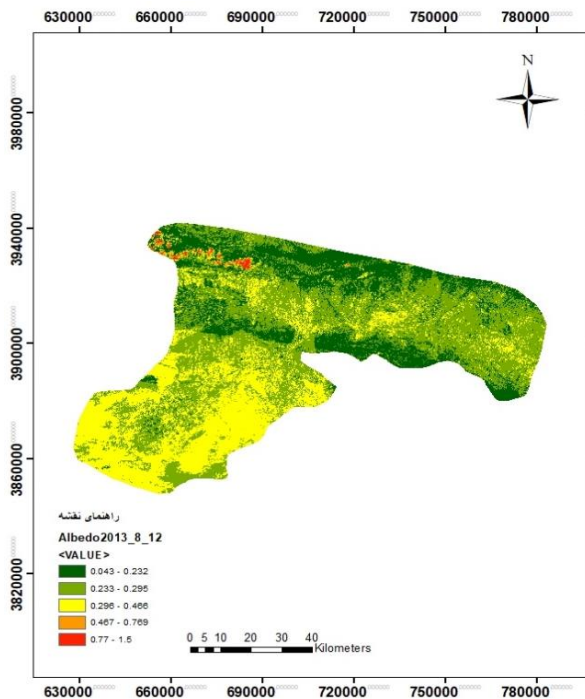
با استفاده از فرمول (۳-۳) مقدار آلبیدوی بالای جو محاسبه شد، سپس به منظور برآورد آلبیدوی سطحی با استفاده از فرمول (۵-۳)، مقادیر بدست آمده بدین صورت است:

جدول (۴-۴): آلبیدوی سطحی

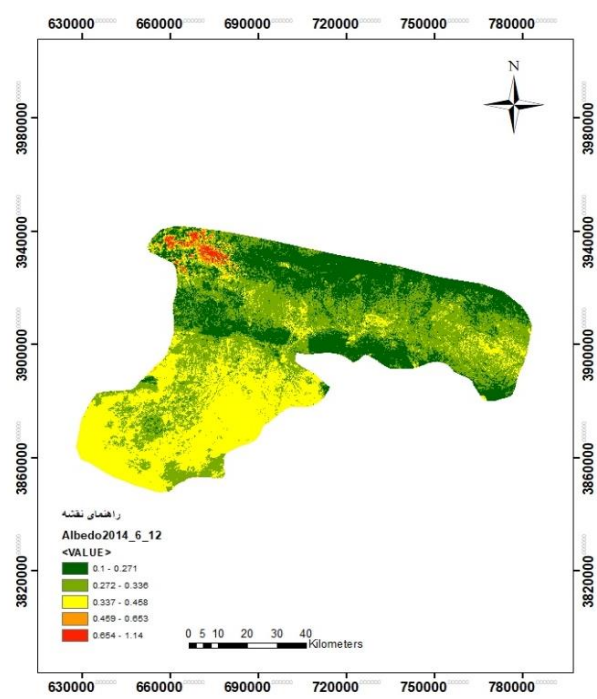
تاریخ	حداقل	حداکثر	میانگین
۲۰۱۳/۸/۱۲	-۰/۰۵	۱/۵۰۱	۰/۱۹
۲۰۱۴/۶/۱۲	-۰/۰۵	۱/۳۹۳	۰/۲۳
۲۰۱۴/۷/۱۴	-۰/۰۵	۱/۴۵۶	۰/۲۱
۲۰۱۴/۷/۳۰	-۰/۰۵	۱/۰۸۲	۰/۲۱
۲۰۱۵/۵/۳۰	-۰/۰۵	۱/۳۷۵	۰/۲۲
۲۰۱۵/۷/۱	-۰/۰۵	۱/۵۱۴	۰/۲۱
۲۰۱۵/۸/۲	-۰/۰۵	۱/۲۸۰	۰/۲۱
۲۰۱۶/۶/۱	-۰/۰۵	۱/۳۳۰	۰/۲۱

۲۰۱۶/۷/۳	-۰/۰۵	۱/۴۹۲	۰/۲۱
۲۰۱۶/۸/۴	-۰/۰۵	۱/۳۳۰	۰/۲۱

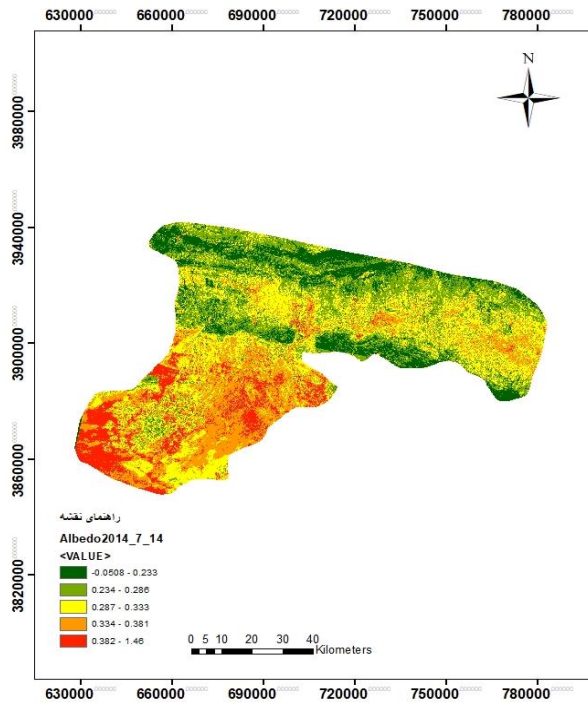
در واقع انرژی که از سوی خورشید به سمت زمین ساطع می‌شود باعث می‌شود آب از حالت مایع به بخار تبدیل شود، مقداری از این انرژی ساطع شده در جو پخش یا بازتاب می‌شود و مقداری از انرژی، به زمین رسیده و جذب یا بازتاب می‌شود. بازتاب انرژی الکترومغناطیسی رسیده به سطح زمین به صورت آلبیدوی سطحی بیان می‌شود که در نقاطی که زمین زراعی و پوشش گیاهی وجود دارد مقدار آن کمتر از مناطق خاکی است. در اشکال (۳-۴) نقشه‌ی آلبیدوی سطحی در روزهای تصویربرداری ماهواره از منطقه مورد مطالعه آمده است:



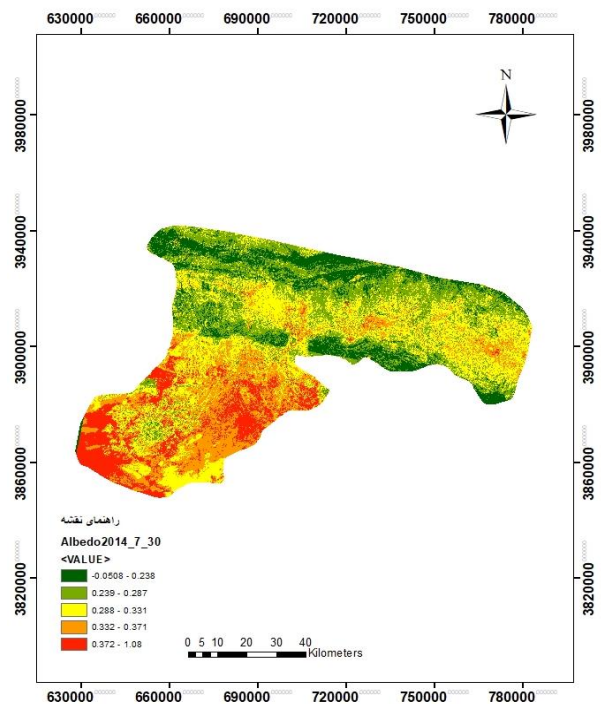
شکل (۳-۴): آلبیدوی سطحی



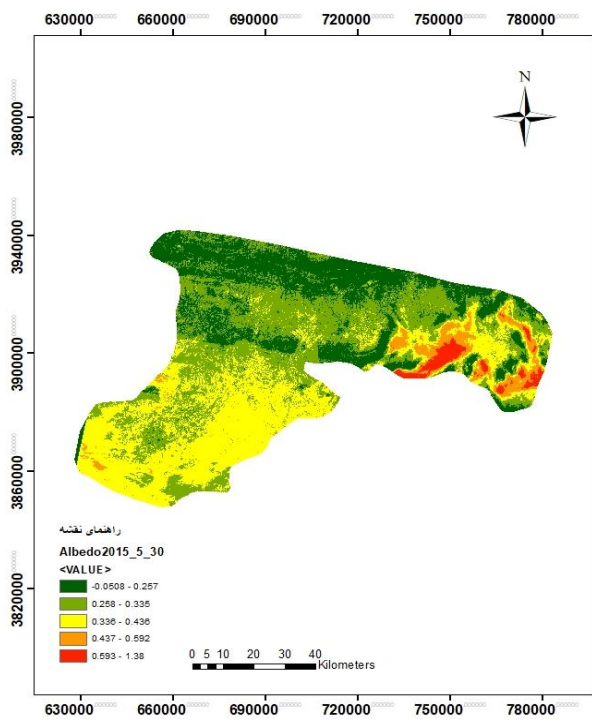
الف: شکل (۳-۴)



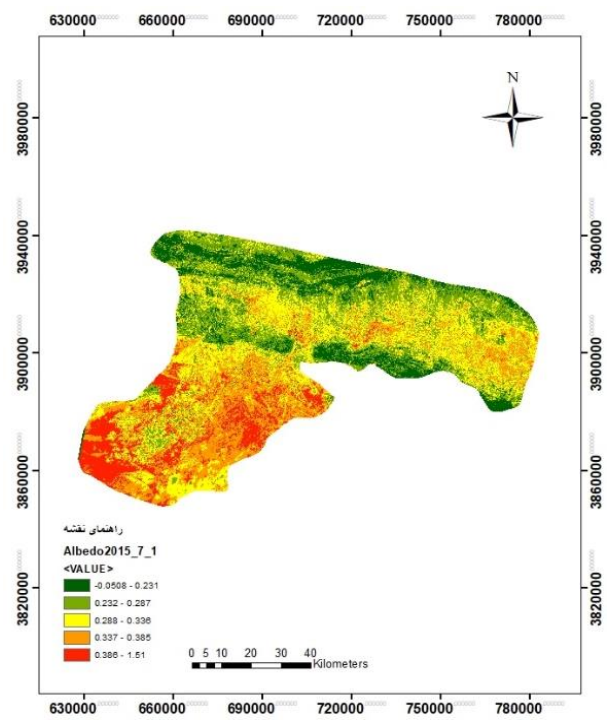
ب: شکل (۳-۴)



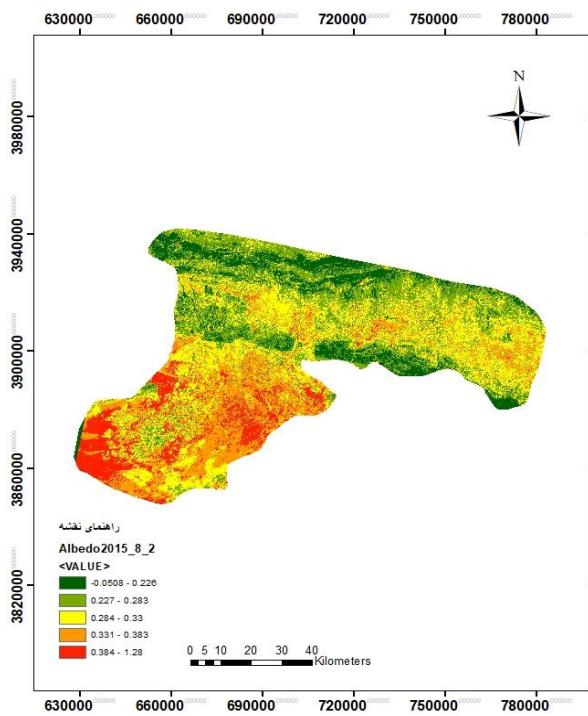
پ: شکل (۳-۴)



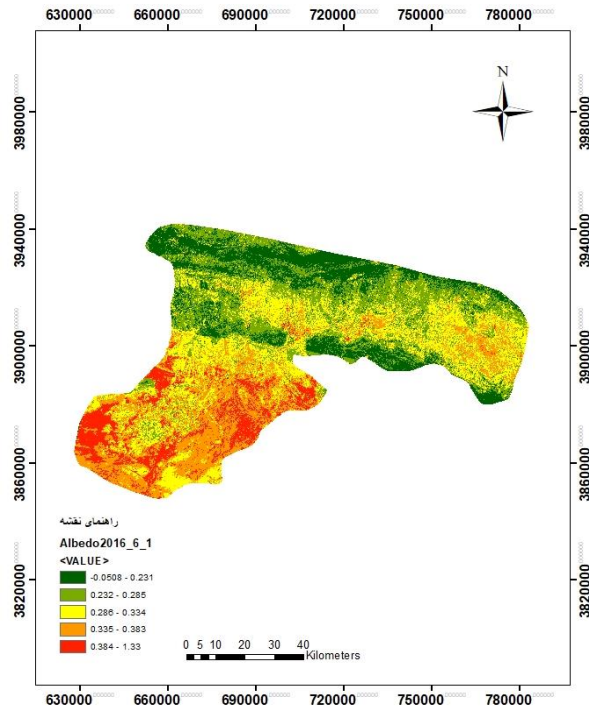
ت: شکل (۳-۴)



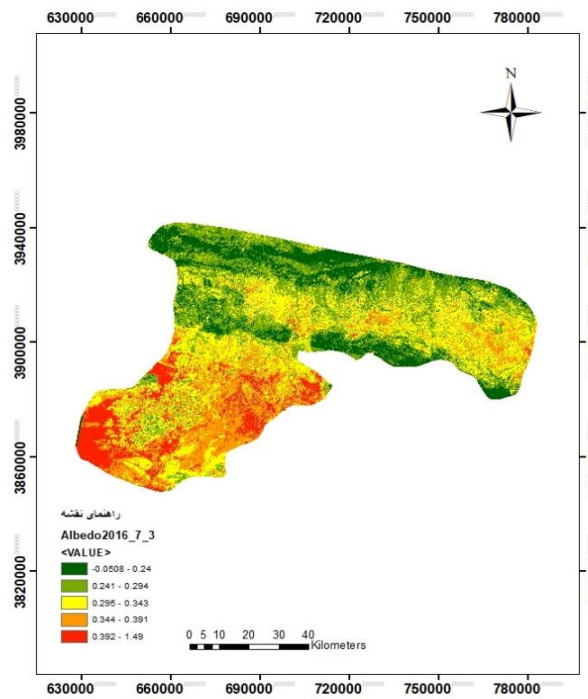
ث: شکل (۳-۴)



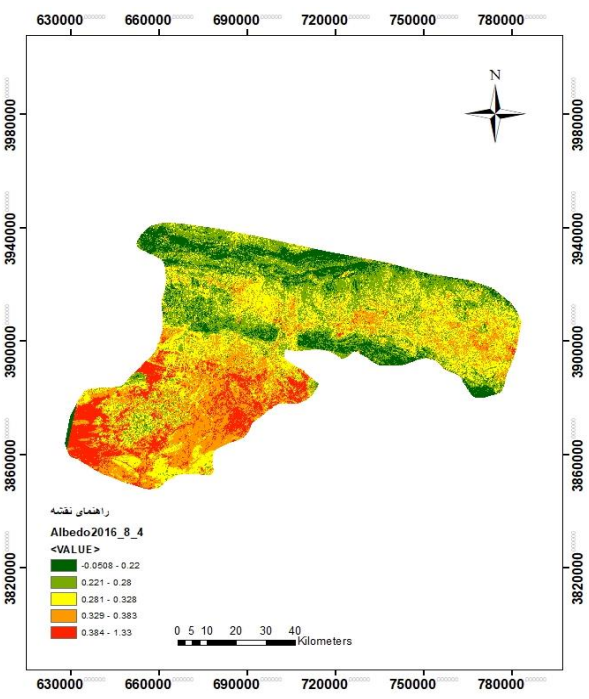
ج: شکل (۳-۴)



ج: شکل (۳-۴)



ج: شکل (۳-۴)



خ: شکل (۳-۴)

۴-۱-۲-۴- تابش‌های طول موج کوتاه ورودی (Rs↓)

تابش‌های طول موج کوتاه رسیده به سطح زمین با استفاده از فرمول (۳-۷) و نقشه ارتفاع رقومی منطقه (DEM) بدست آمد. میزان تابش طول موج کوتاه ورودی، به زاویه انرژی خورشیدی رسیده به سطح، موقعیت زمانی و مکانی سطح، مربع معکوس فاصله نسبی زمین تا خورشید و همچنین وجود مه و ابر که می‌تواند انرژی خورشیدی را جذب یا منعکس کند، بستگی دارد. مقادیر حاصل شده از پارامترهای مورد استفاده در جدول (۴-۵) آمده است که در تاریخ ۲۰۱۴/۷/۳۰ خورشید در فاصله کمتری نسبت به زمین قرار داشته است:

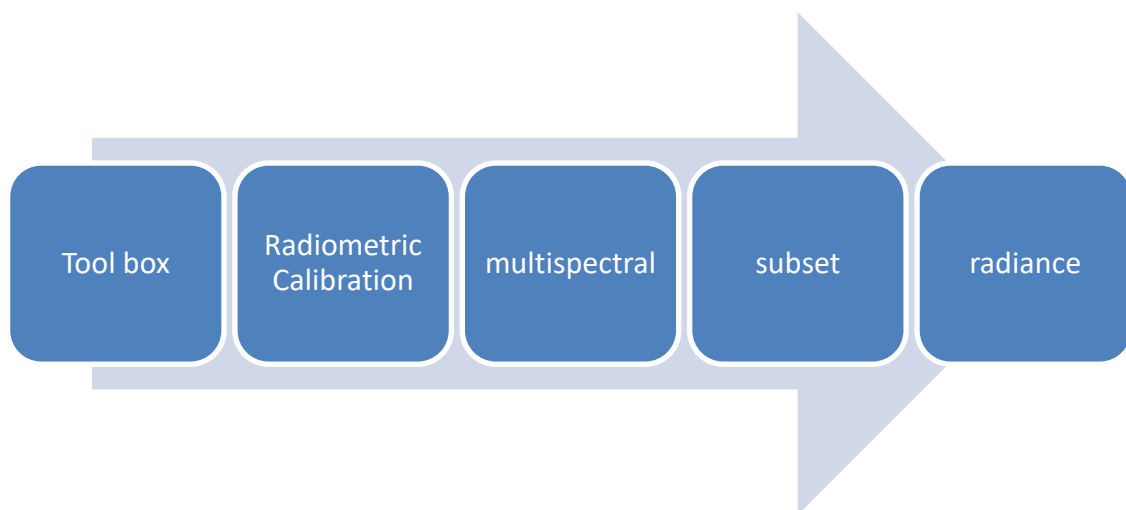
جدول (۴-۵): مقادیر زاویه خورشیدی، dr، Rs↓

تاریخ	زاویه خورشیدی	dr	Rs↓
۲۰۱۳/۸/۱۲	۲۷/۹۲	۰/۹۷	۸۹۸/۴۹
۲۰۱۴/۶/۱۲	۲۱/۷۸	۰/۹۶	۹۲۹/۶۴
۲۰۱۴/۷/۱۴	۲۳/۷۴	۰/۹۶	۹۱۹/۵۴
۲۰۱۴/۷/۳۰	۲۵/۸۹	۰/۷۵	۷۰۲/۶۰
۲۰۱۵/۵/۳۰	۲۲/۳۳	۰/۹۷	۹۳۹/۳۳
۲۰۱۵/۷/۱	۲۲/۵۸	۰/۹۶	۹۲۹/۶۴
۲۰۱۵/۸/۲	۲۶/۳۹	۰/۹۷	۹۰۸/۷۰
۲۰۱۶/۶/۱	۲۲/۰۶	۰/۹۷	۹۳۹/۳۳
۲۰۱۶/۷/۳	۲۲/۷۰	۰/۹۶	۹۲۹/۶۴
۲۰۱۶/۸/۴	۲۶/۷۸	۰/۹۷	۹۰۸/۷۰

در جدول (۴-۵) زاویه خورشیدی بر حسب درجه و $R_{s\downarrow}$ بر حسب (w/m^2) می باشد. همچنین مقادیر $R_{s\downarrow}$ در بازه (۱۰۰۰-۲۰۰) وات بر مترمربع قرار دارد.

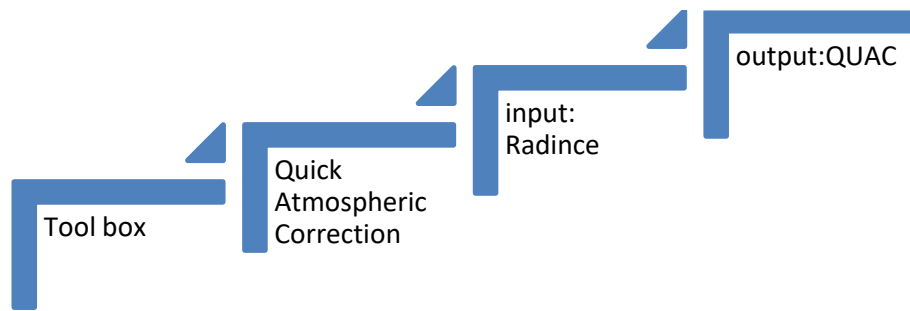
۴-۱-۳- شاخص های گیاهی

برای محاسبه شاخص های طیفی باید تصویر ماهواره ای تصحیح رادیومترکی و تصحیح اتمسفری شود، بدین منظور با استفاده از نرم افزار ENVI5.3 نسبت به انجام تصحیحات لازم اقدام شد و مراحل آن در شکل (۴-۴) آمد:



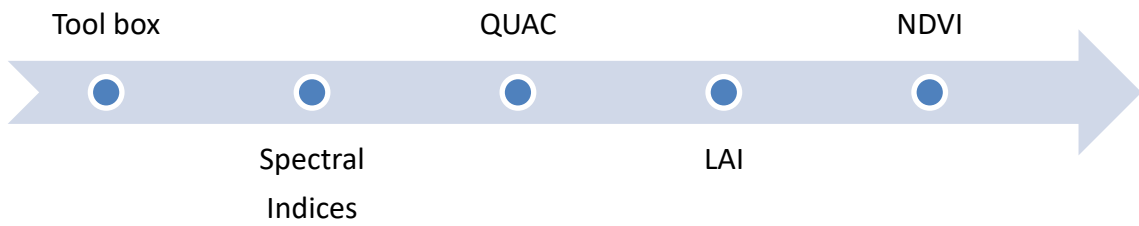
شکل (۴-۴): مراحل انجام تصحیح رادیومترکی

رادیانس معادل با انرژی الکترومغناطیسی رسیده به سنجنده است که حاوی بازتابها و گسیل امواج الکترومغناطیس و اختلالات ایجاد شده توسط سنسور و پخش های صورت گرفته در داخل اتمسفر است، در شکل (۴-۵) مراحل انجام تصحیح اتمسفری توضیح داده شد:



شکل (۴-۵): مراحل انجام تصحیح اتمسفری

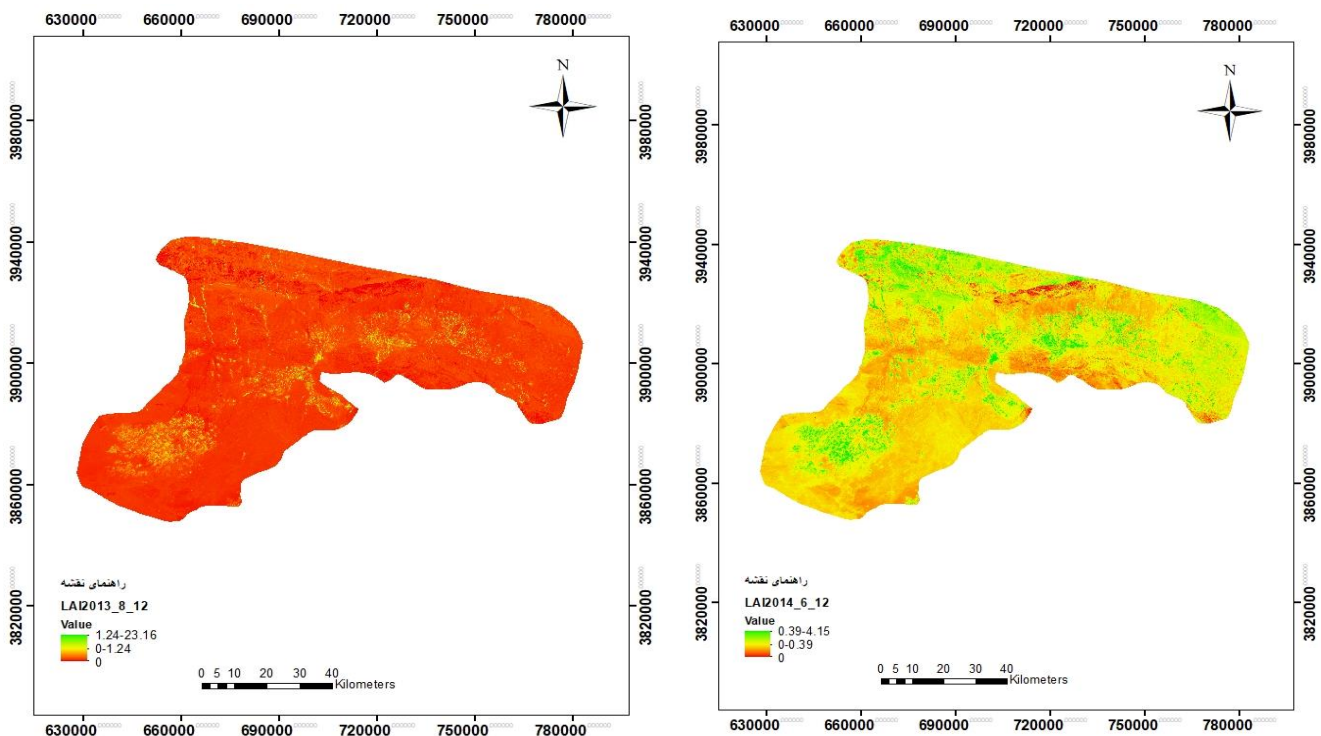
برای محاسبه شاخص‌های طیفی طبق مراحل شکل (۴-۶) در نرم افزار اقدام شد:



شکل (۴-۶): شاخص‌های طیفی

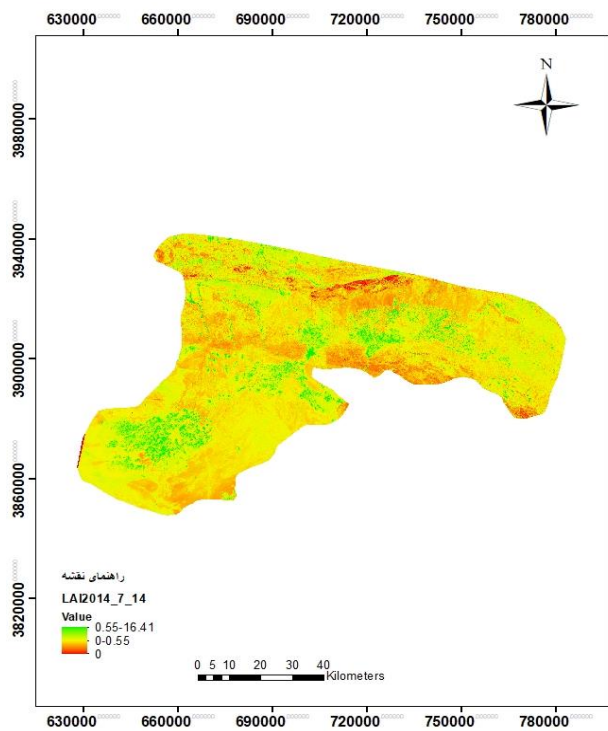
۴-۱-۳-۱- شاخص سطح برگ (LAI)

شاخص سطح برگ نسبت تغییرات و تراکم پوشش گیاهی را نشان می‌دهد، شاخص سطح برگ در محاسبه تبخیر و تعرق بسیار حائز اهمیت می‌باشد زیرا در زمان کشت، صد درصد فرآیند ET به صورت تبخیر انجام می‌شود اما هنگامی که گیاه رشد می‌کند و پوشش گیاهی کامل می‌شود تعرق بیش از ۹۰ درصد آن را تشکیل می‌دهد. مقادیر صفر نشان دهنده‌ی آب و خاک در منطقه هستند و هرچه مقدار از صفر بیشتر شود به درصد پوشش گیاهی افزوده می‌شود. شاخص سطح برگ زمین‌های زراعی را از زمین‌های بایر کشاورزی تفکیک می‌کند، در ادامه اشکال (۴-۷)، شاخص سطح برگ در روزهای تصویر برداری ماهواره آمده است:

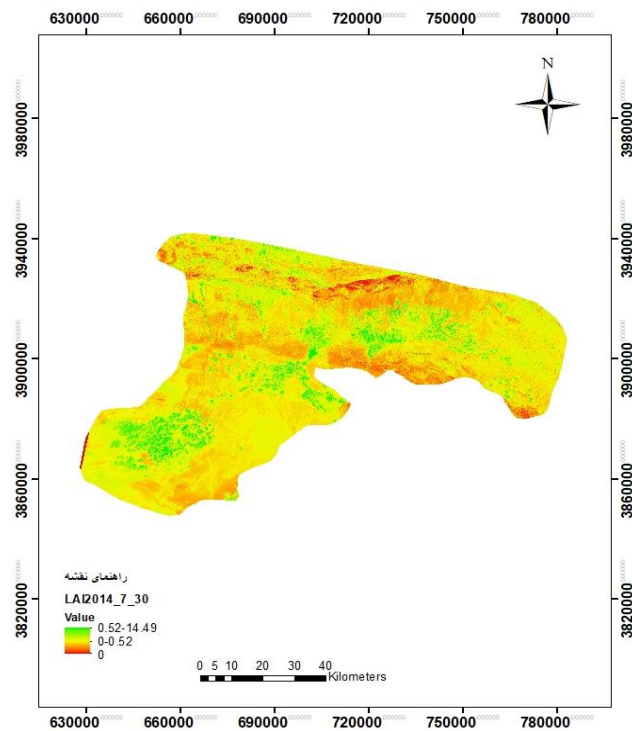


شکل (۴-۷): شاخص سطح برگ

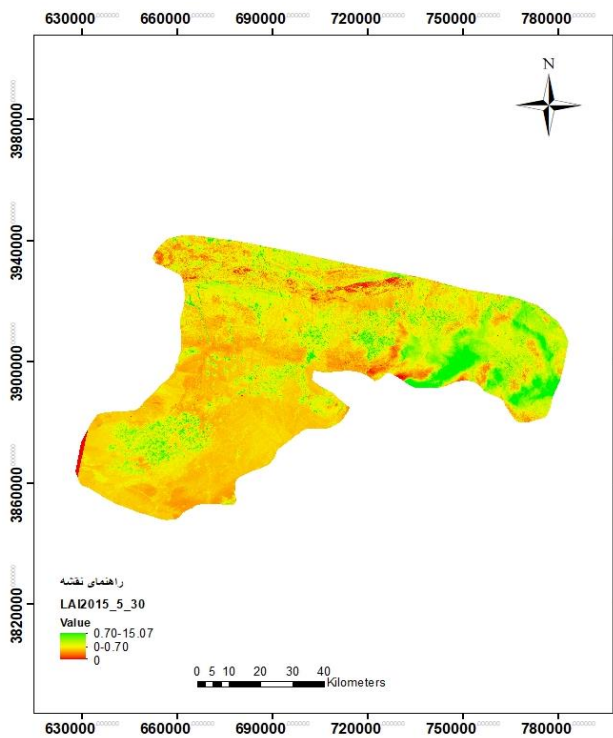
الف: شکل (۴-۷)



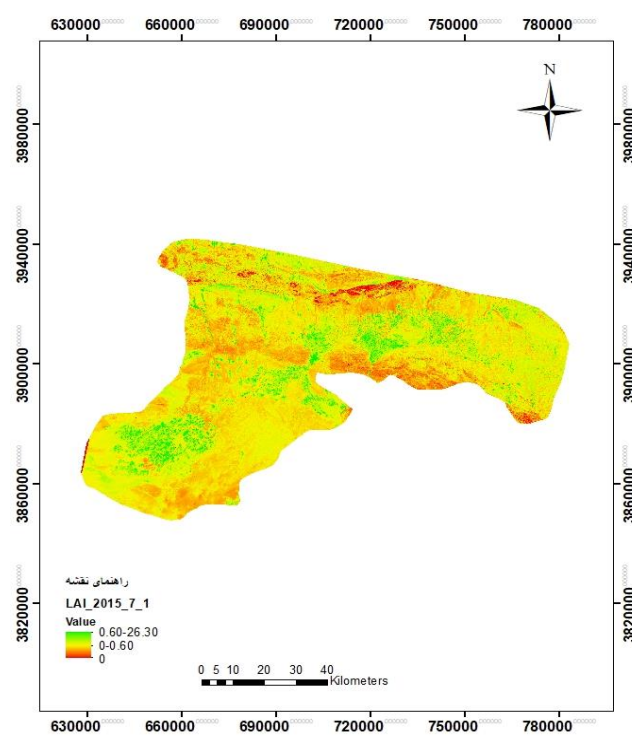
ب: شکل (۷-۴)



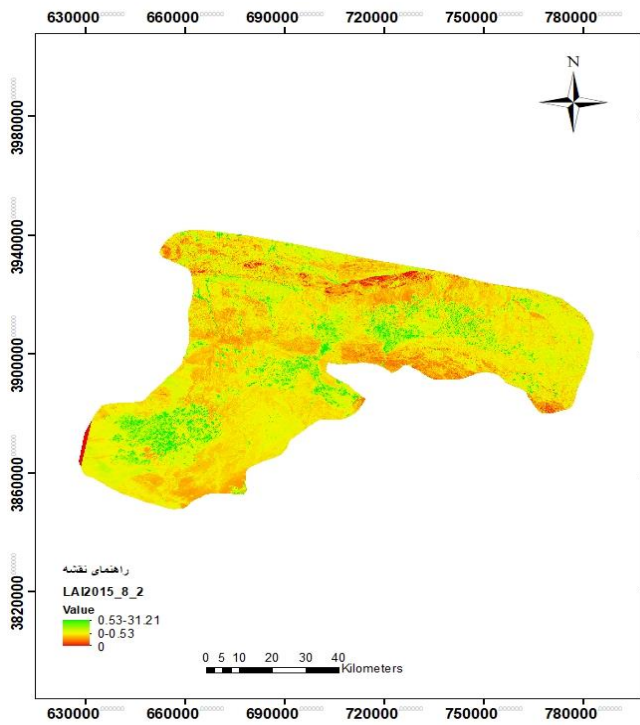
پ: شکل (۷-۴)



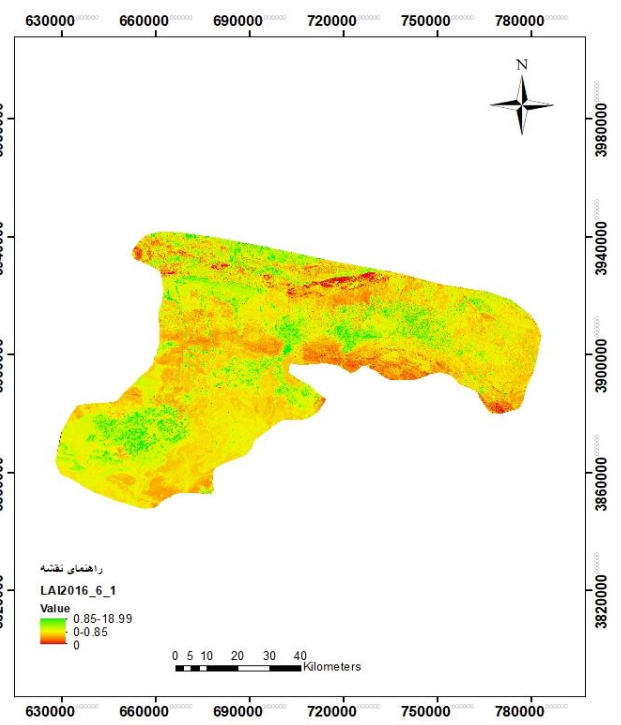
ت: شکل (۷-۴)



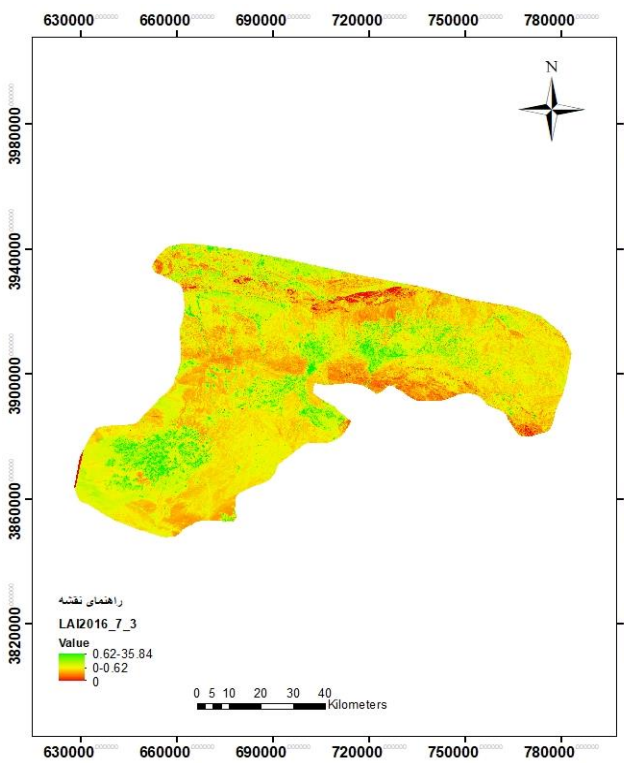
ث: شکل (۷-۴)



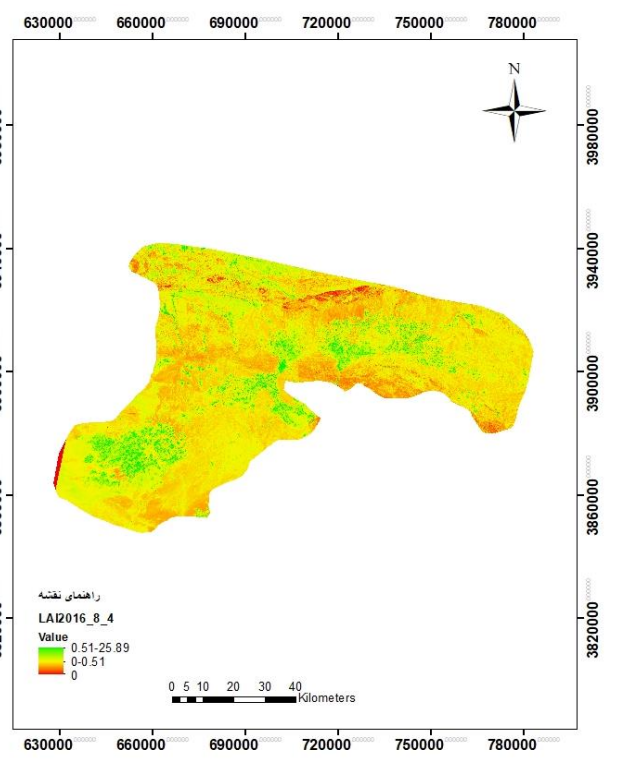
ج: شکل (۷-۴)



ج: شکل (۷-۴)



ج: شکل (۷-۴)

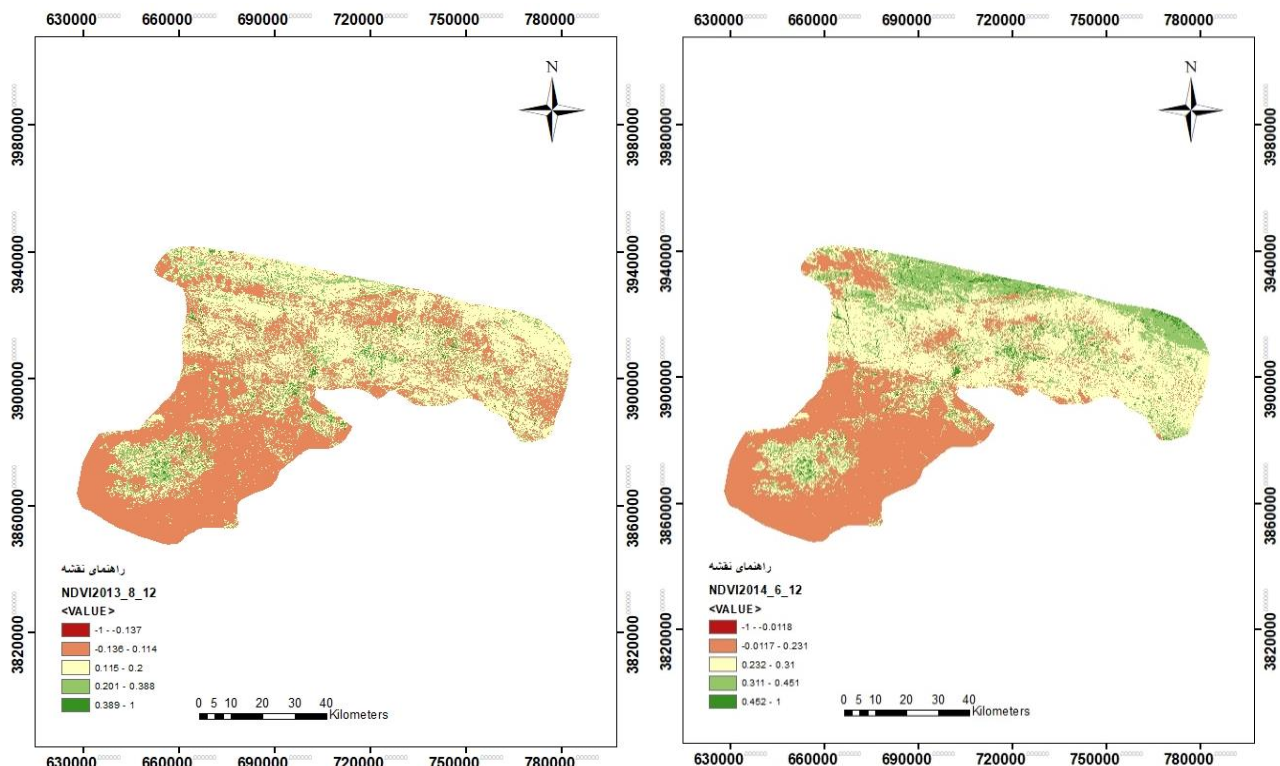


خ: شکل (۷-۴)

۴-۱-۳-۲- شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)

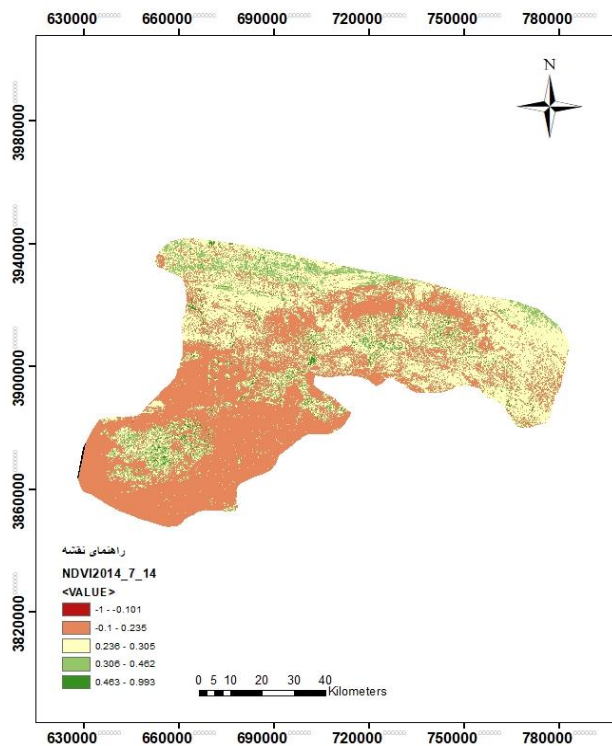
معروف‌ترین و ساده‌ترین شاخص پوشش گیاهی شاخص NDVI است که تراکم پوشش گیاهی در منطقه را نشان می‌دهد. دامنه مقادیر شاخص NDVI در بازه بین (-1_1) قرار دارد، که مقادیر منفی پهنه‌های آبی، مقادیر صفر پهنه‌های خاکی و بیش از ۰.۲ و ۰.۳ پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. شاخص گیاهی NDVI زمین‌های کشاورزی را از سایر مناطق کوهستانی، بیابانی و شهری متمایز می‌کند.

البته شاخص NDVI تغییرات و تنوع پوشش گیاهی را به خوبی شاخص LAI نشان نمی‌دهد اما این دو شاخص برای نشان دادن توان تشعشعی پدیده به عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی تابش‌های طول موج بلند خروجی از سطح زمین و همچنین در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم بسیار حائز اهمیت می‌باشند. اشکال (۴-۸)، شاخص NDVI در روزهای تصویر برداری ماهواره از منطقه مورد مطالعه آمده است:

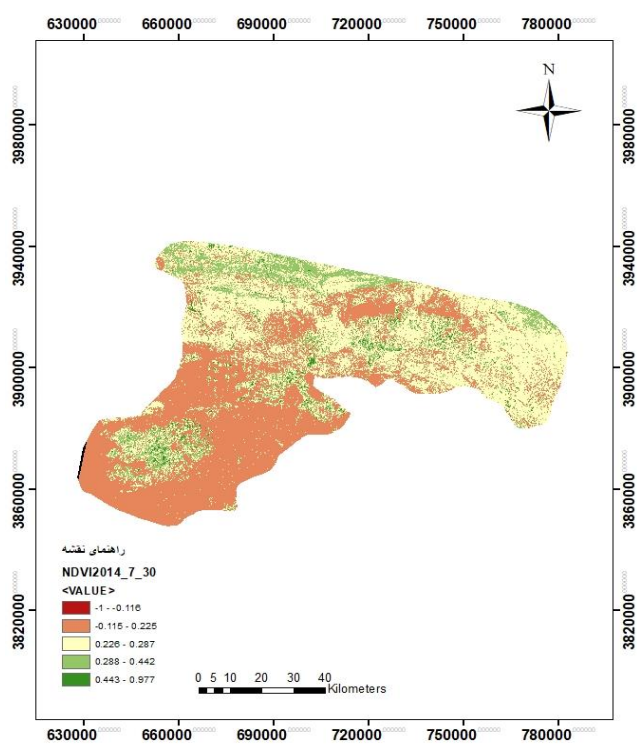


شکل (۴-۸): شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده

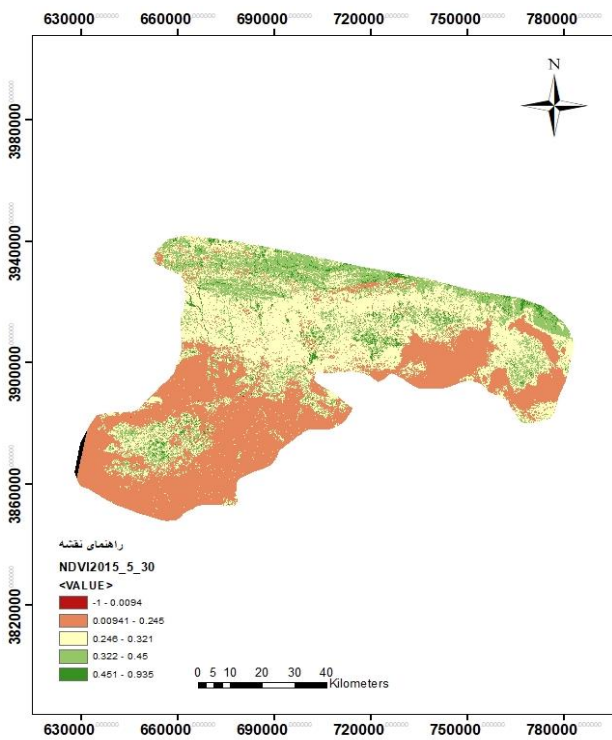
الف: شکل (۴-۸)



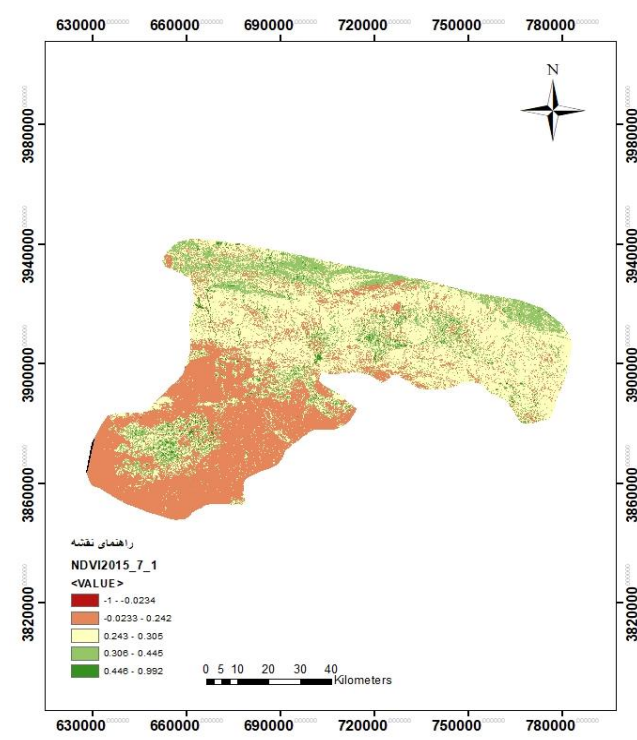
ب: شکل (۸-۴)



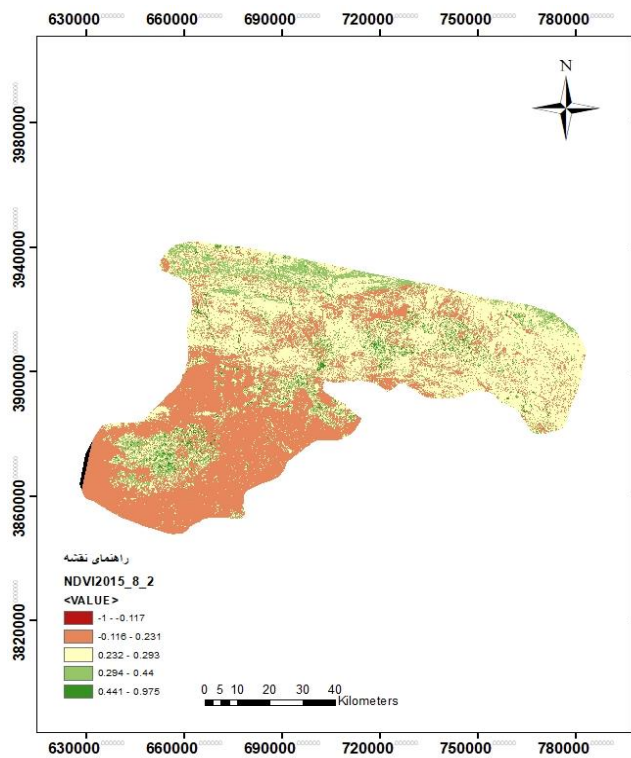
پ: شکل (۸-۴)



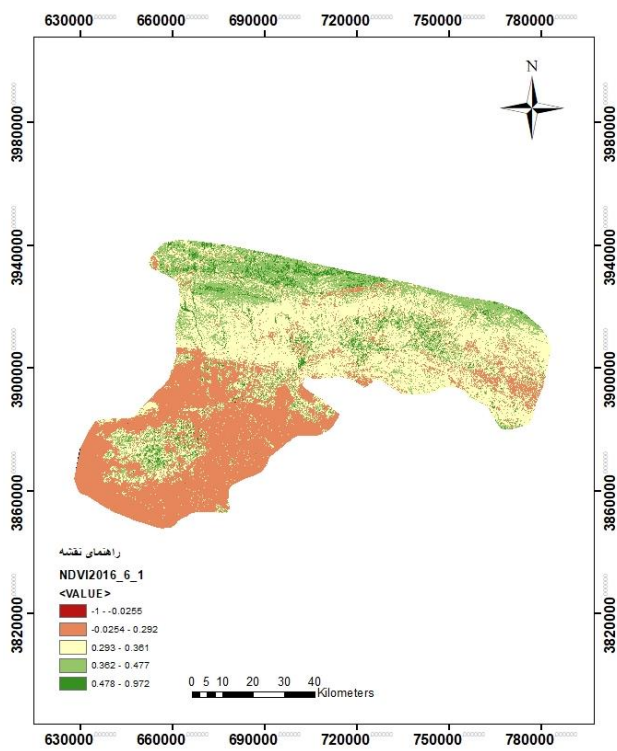
ت: شکل (۸-۴)



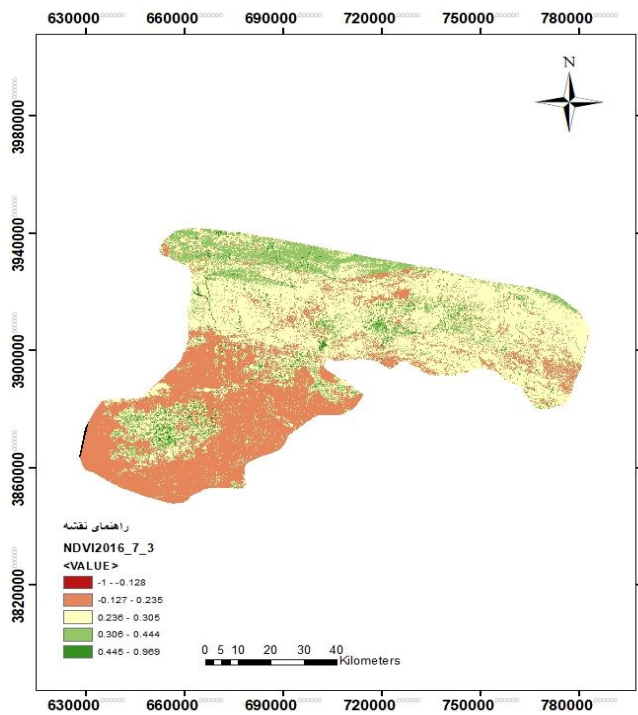
ث: شکل (۸-۴)



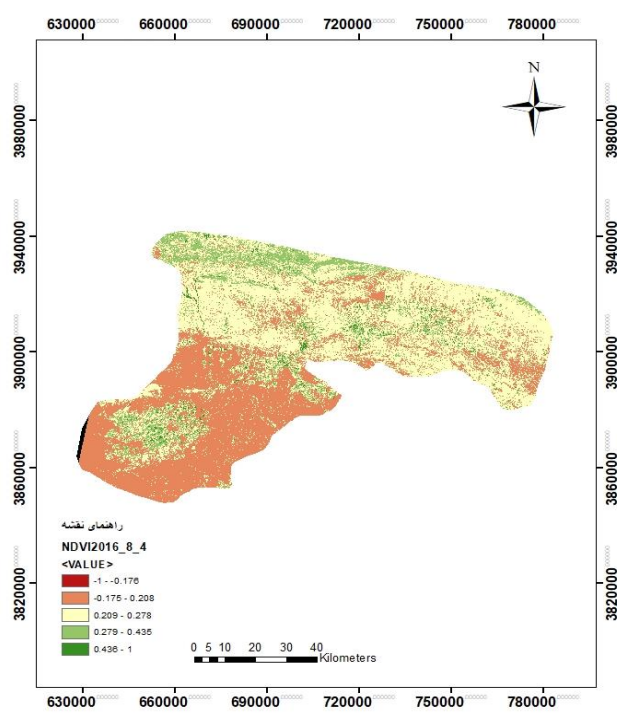
ج: شکل (۸-۴)



چ: شکل (۸-۴)



ج: شکل (۸-۴)



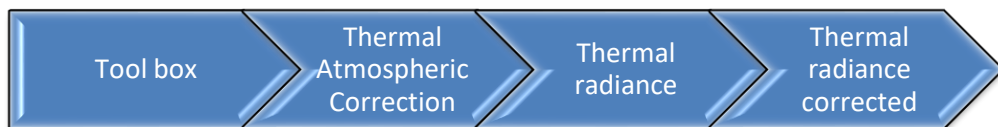
خ: شکل (۸-۴)

۴-۱-۴-۴- دمای سطح زمین (LST)

در گام اول برای محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از فرمول (۳-۱۳) درصد پوشش گیاهی محاسبه شد و با استفاده از فرمول (۳-۱۴) توان تشعشعی که برای دمای سطح زمین لازم است برآورد شد؛ سپس با شرایط (۳-۱۵) توان تشعشعی تصحیح شد. در گام دوم از دو باند حرارتی ۱۰ و ۱۱ ماهواره لندست ۸ استفاده شد؛ که اثرات اتمسفر از روی LST، نرمال سازی و حذف شد. در گام سوم با استفاده از توان تشعشعی تصحیح شده و باند حرارتی تصحیح شده با استفاده از معادله (۳-۱۶) میزان دمای سطح زمین محاسبه شد. پوشش‌های گیاهی پر تراکم که آبیاری کامل شده‌اند دمای سطحی پایین‌تری دارند در صورتی که در مناطق خاکی و بدون پوشش گیاهی میزان دمای سطحی بیشتر است، چون انرژی بیشتری صرف گرم کردن خاک می‌شود به همین دلیل میزان حرارت بیشتر است. در شکل (۴-۱۲) دمای سطح زمین نشان داده شده است.



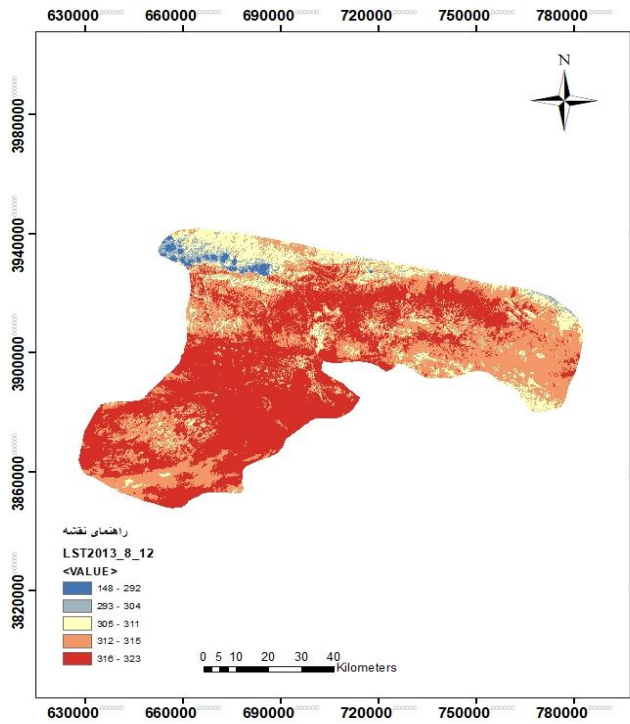
شکل (۴-۹): تصحیح رادیومتریکی باند حرارتی



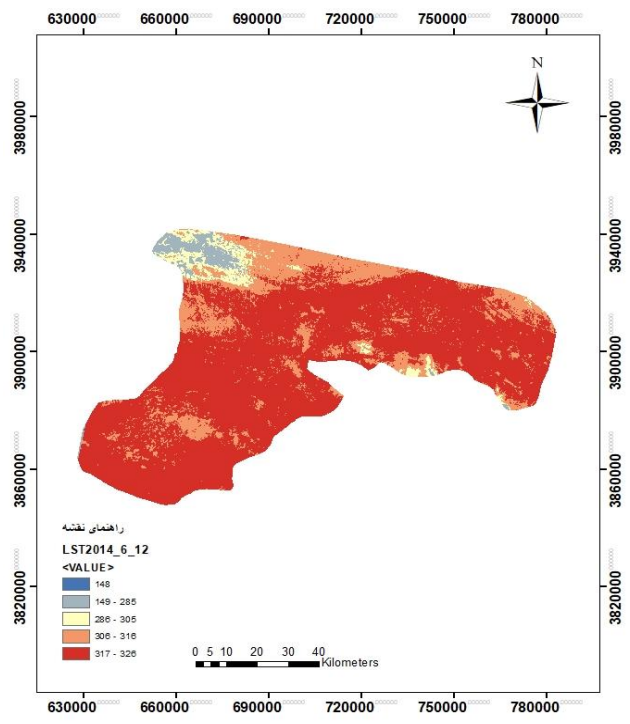
شکل (۴-۱۰): تصحیح اتمسفری باند حرارتی



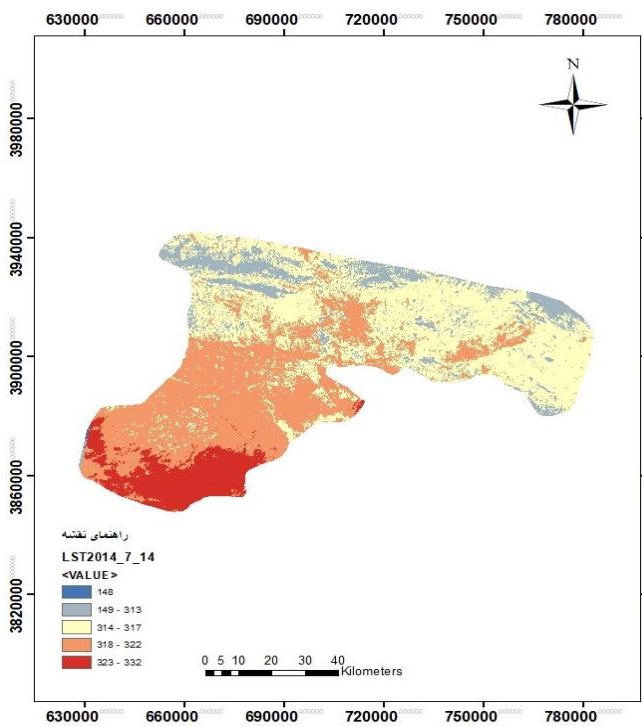
شکل (۴-۱۱): محاسبه دمای درخشندگی



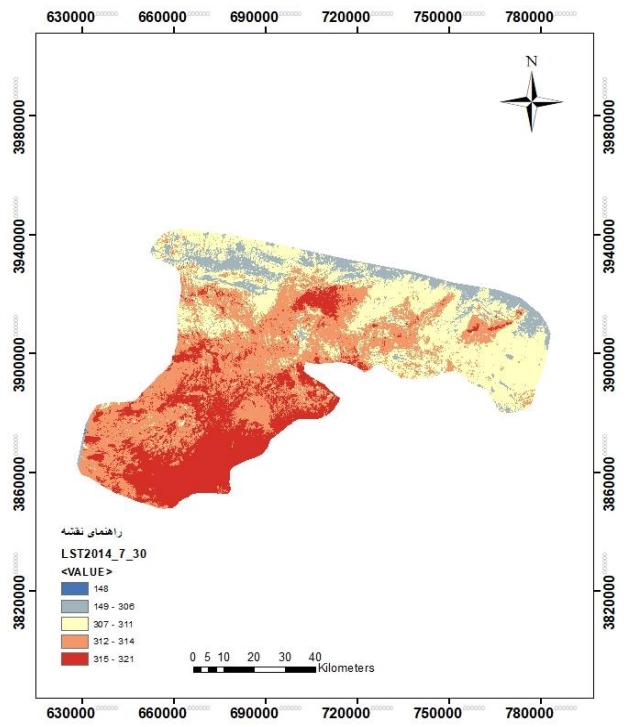
شکل (۴-۱۲): دمای سطح زمین



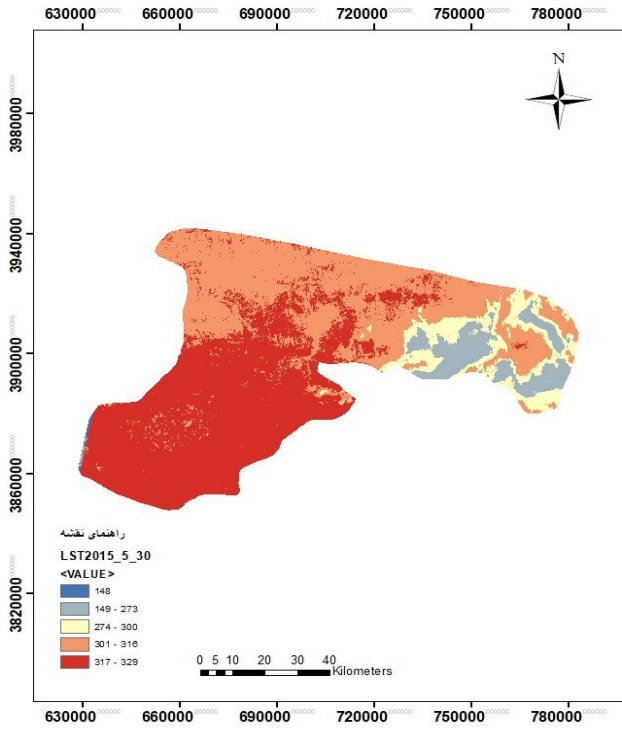
الف: شکل (۴-۱۲)



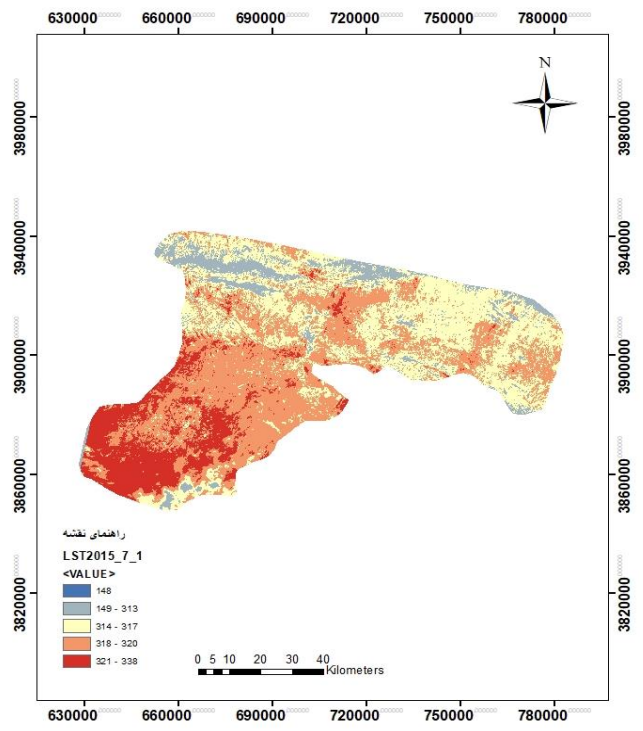
ب: شکل (۴-۱۲)



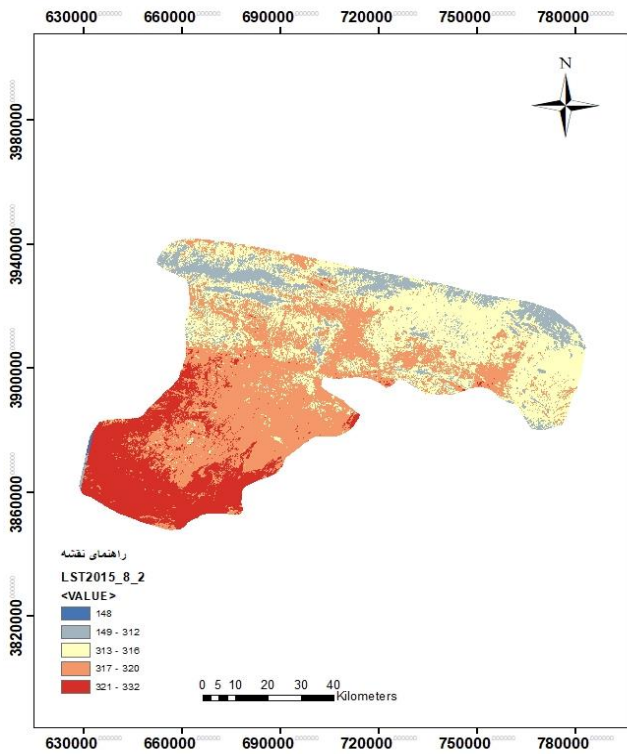
پ: شکل (۴-۱۲)



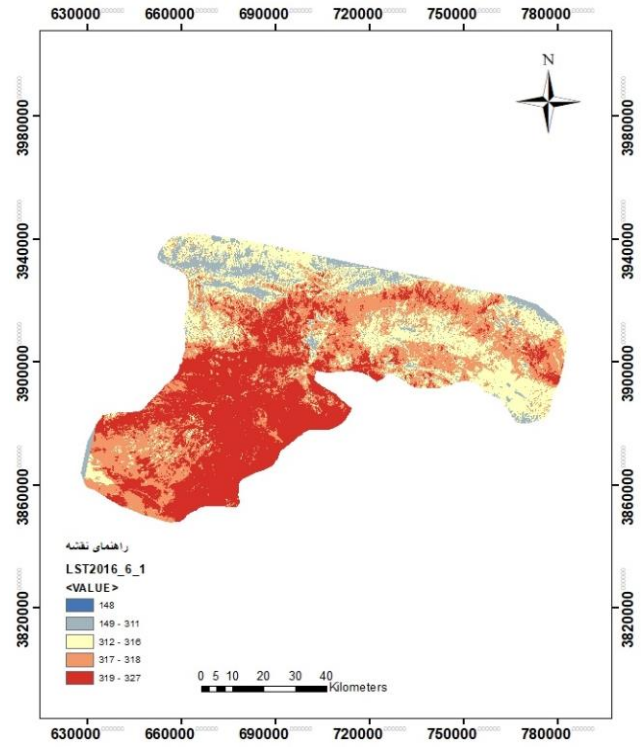
ت: شکل (۱۲-۴)



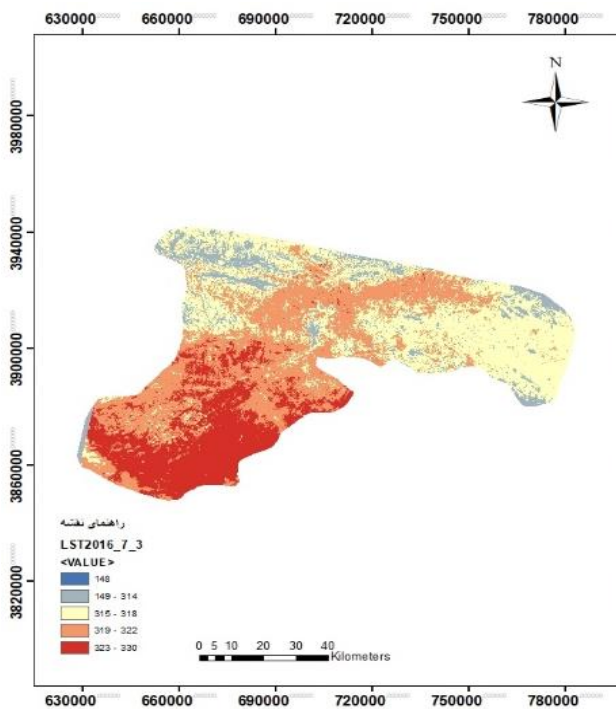
ث: شکل (۱۲-۴)



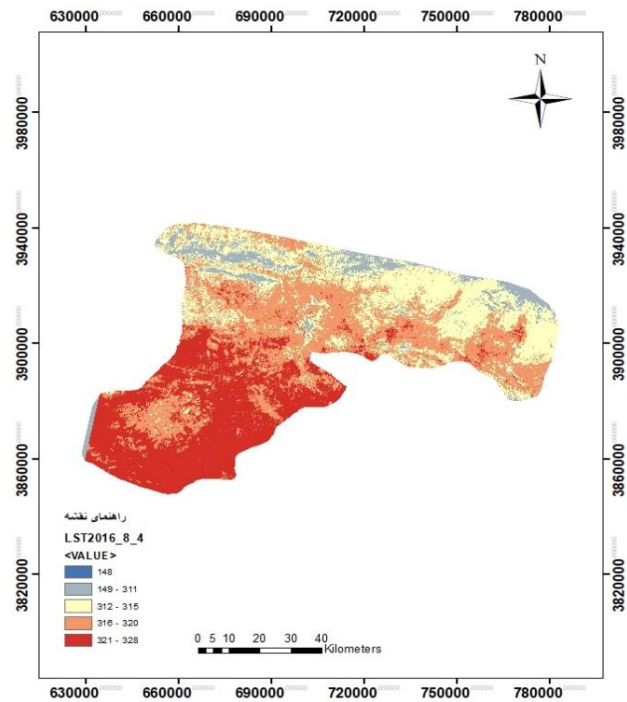
ج: شکل (۱۲-۴)



چ: شکل (۱۲-۴)



ح: شکل (۱۲-۴)



خ: شکل (۱۲-۴)

۴-۴-۱-۵- تابش‌های طول موج بلند خروجی ($RI\uparrow$)

براساس دمای سطحی و با استفاده از معادله (۳-۱۰) تابش‌های طول موج بلند خروجی از سطح زمین محاسبه شد. هر چقدر که دمای سطح زمین بیشتر باشد، میزان تابش طول موج بلند خروجی افزایش می‌یابد و با کاهش دمای سطحی نیز $RI\uparrow$ کم می‌شود.

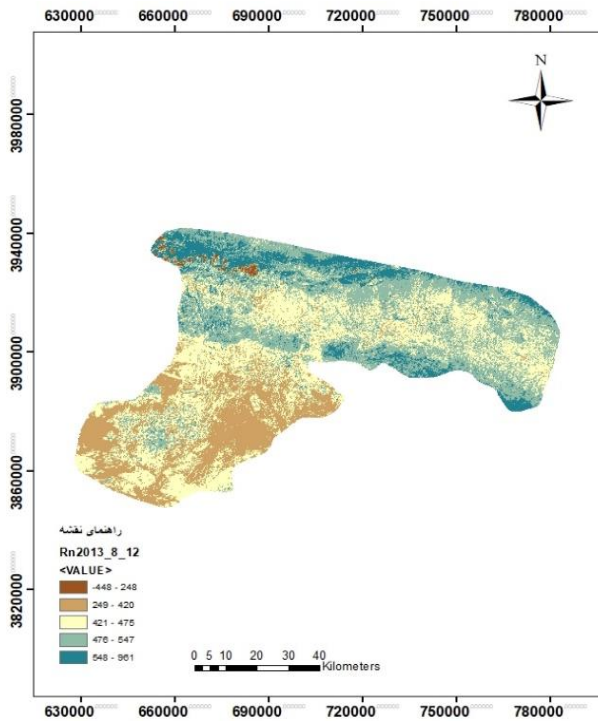
۴-۴-۱-۶- تابش‌های طول موج بلند ورودی ($RI\downarrow$)

تابش طول موج بلندی که از جو به سمت سطح زمین می‌آید با استفاده از فرمول (۳-۱۷) محاسبه شد و مقادیر به دست آمده در بازه (۲۰۰-۵۰۰) قرار دارد.

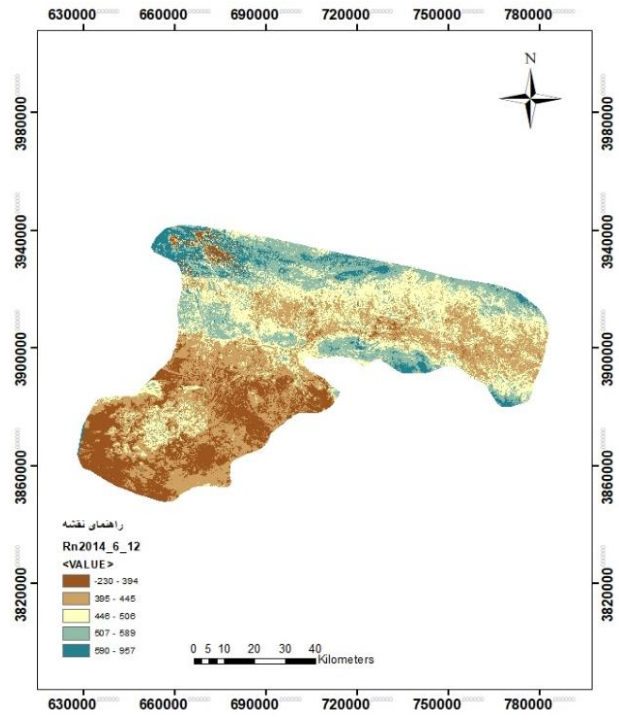
جدول (۴-۶): تابش‌های طول موج بلند ورودی

تاریخ	RI↓
۲۰۱۳/۸/۱۲	۳۴۵/۷۳
۲۰۱۴/۶/۱۲	۳۷۴/۲۴
۲۰۱۴/۷/۱۴	۳۶۲/۶۳
۲۰۱۴/۷/۳۰	۳۴۸/۴۶
۲۰۱۵/۵/۳۰	۳۶۵/۵۱
۲۰۱۵/۷/۱	۳۶۶/۹۵
۲۰۱۵/۸/۲	۳۵۴/۱۱
۲۰۱۶/۶/۱	۳۶۰/۷۳
۲۰۱۶/۷/۳	۳۷۱/۳۱
۲۰۱۶/۸/۴	۳۴۴/۸۱

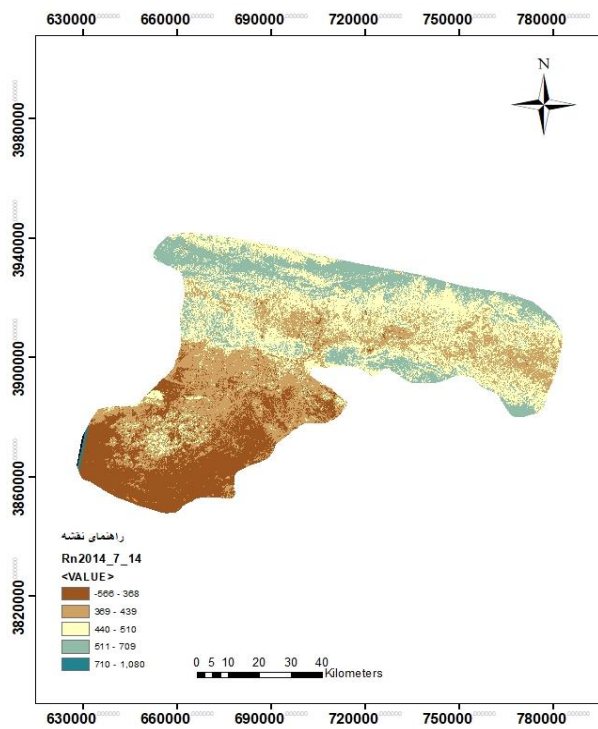
با به دست آوردن مقادیر شار تابش‌های ورودی و خروجی، شار تابش خالص سطح طبق فرمول (۲-۳) محاسبه شد، ارقام پوشش گیاهی در شار تابش خالص در بازه (۷۰۰-۱۰۰) قرار دارند؛ در شکل (۴-۱۳) شار تابش خالص سطح زمین قابل مشاهده است.



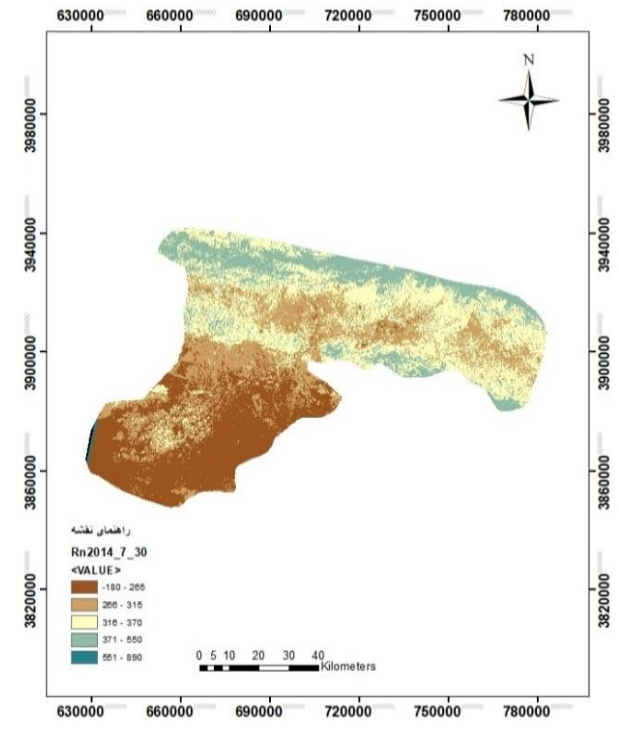
شکل (۴-۱۳): شار تابش خالص سطح زمین



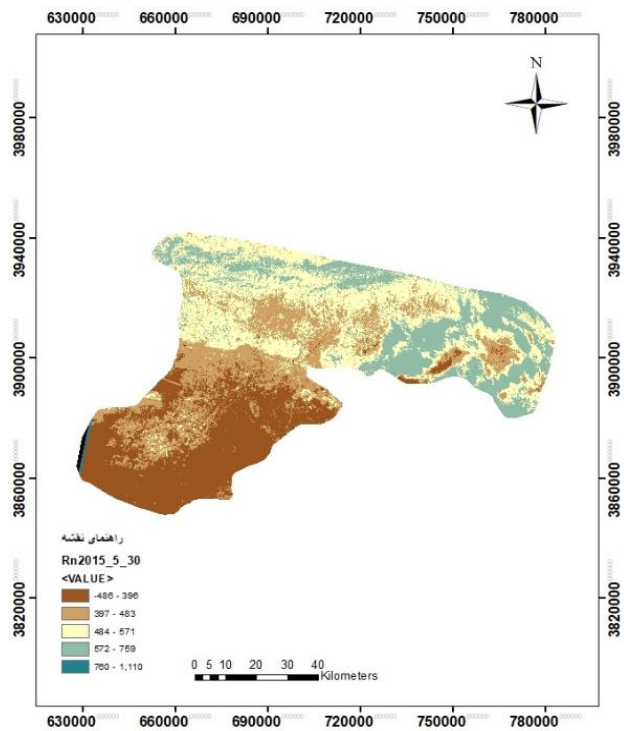
الف: شکل (۴-۱۳)



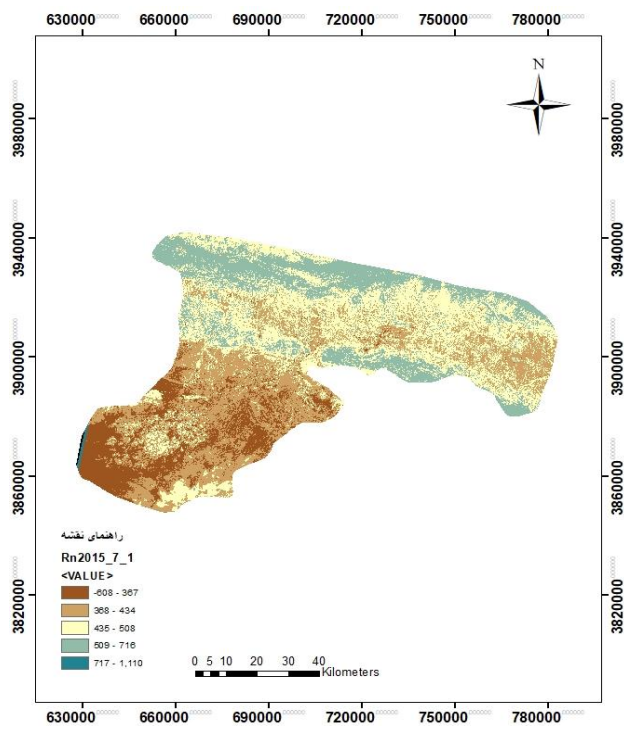
ب: شکل (۴-۱۳)



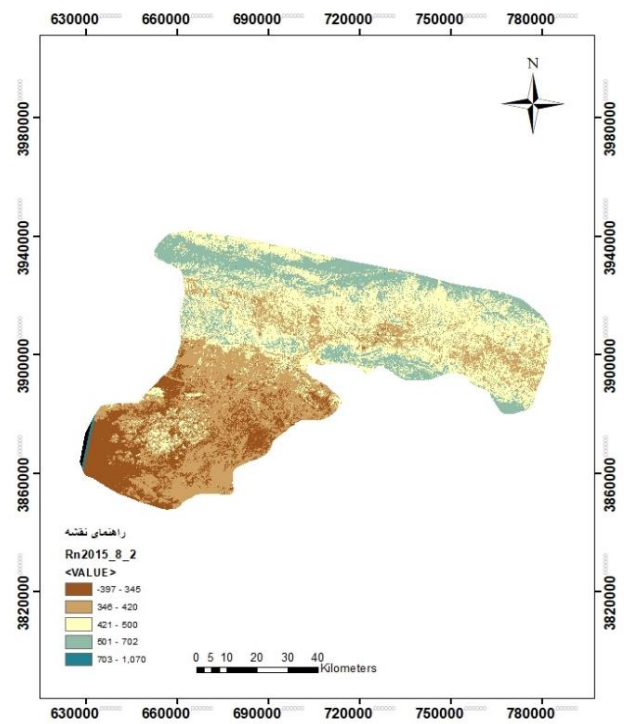
پ: شکل (۴-۱۳)



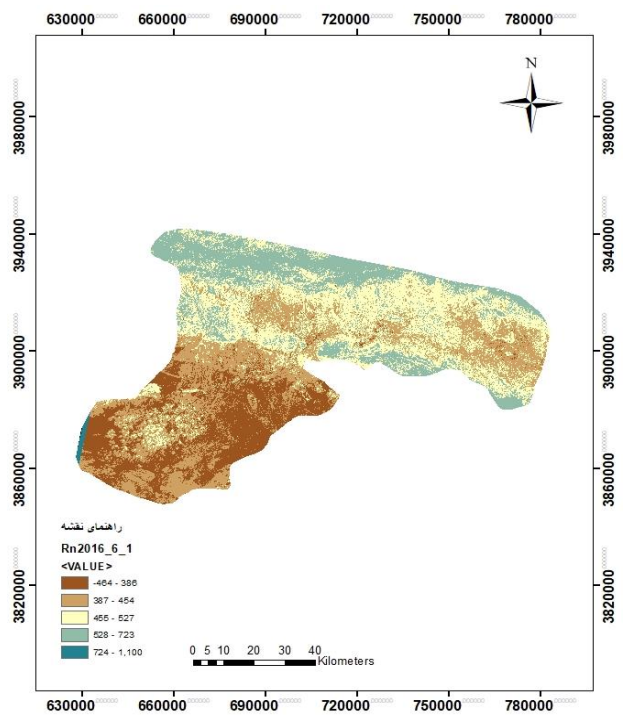
ت: شکل (۱۳-۴)



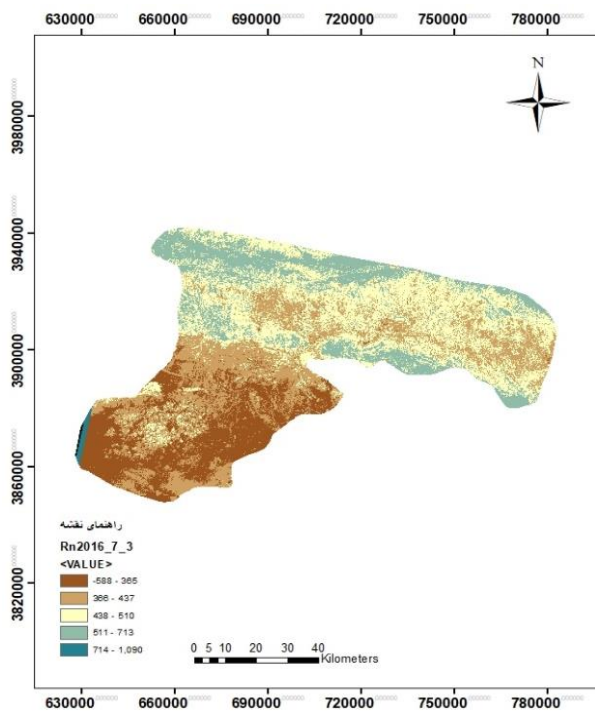
ث: شکل (۱۳-۴)



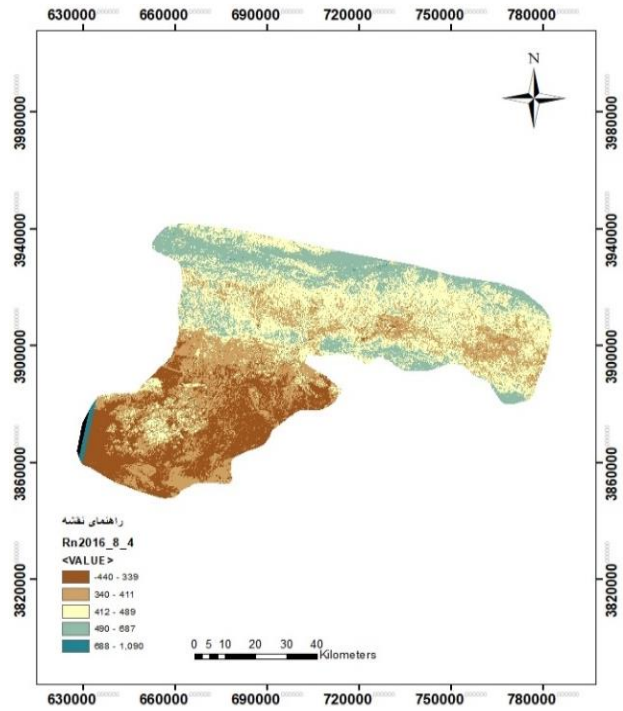
ج: شکل (۱۳-۴)



چ: شکل (۱۳-۴)



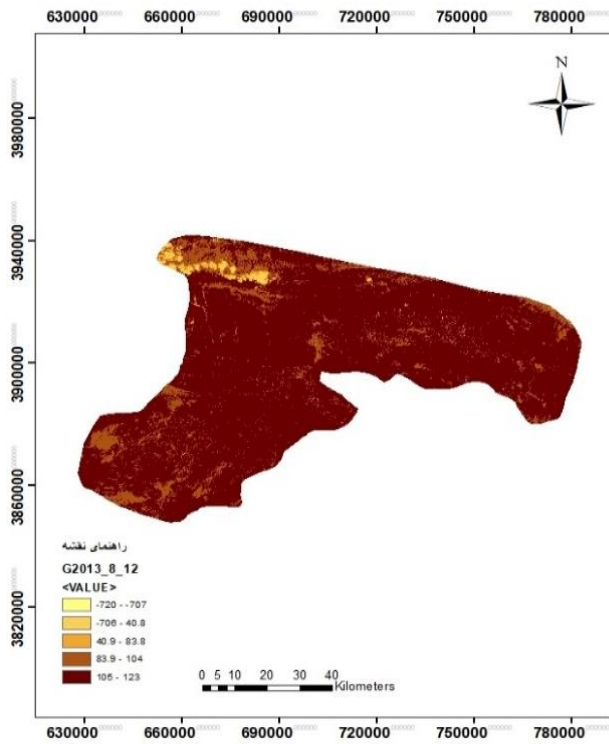
ح: شکل (۴-۱۳)



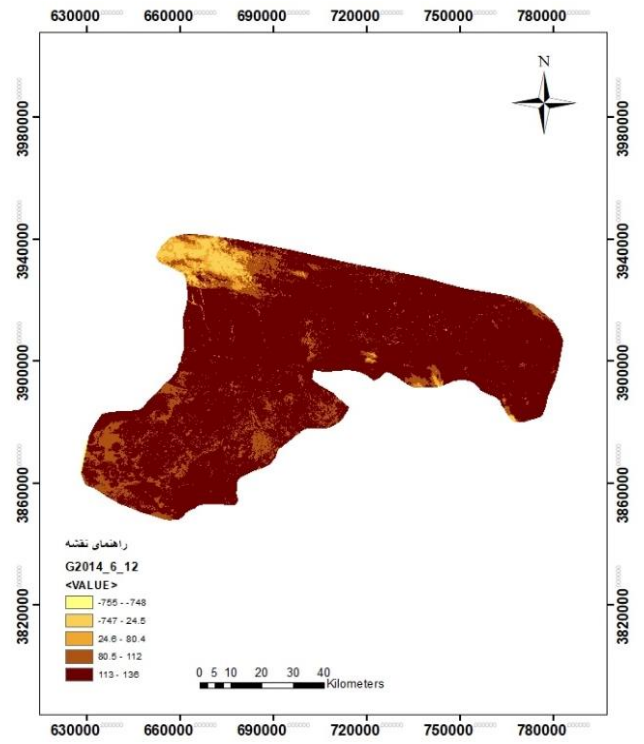
خ: شکل (۴-۱۳)

۴-۴-۲- شار گرمای خاک (G)

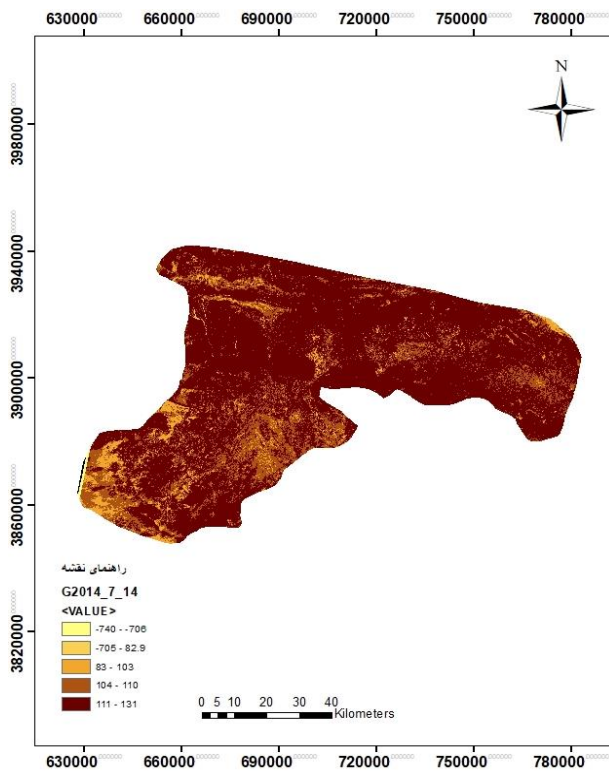
مقدار انرژی که برای گرم شدن خاک مصرف می‌شود باید در زمان تبخیر و تعرق مورد بررسی قرار بگیرد. در زمان گرم شدن سطح زمین خاک به علت رسانش مقداری انرژی به صورت گرما دریافت می‌کند که در زمان سرد شدن سطح این انرژی ذخیره شده را از دست می‌دهد. با به دست آوردن شار گرمای خاک با استفاده از رابطه (۳-۲۰)، به ازای روزهای تصویربرداری در شکل (۴-۱۴) قابل مشاهده می‌باشد. مقادیر شار گرمای خاک، نسبت به شار تابش خالص سطح زمین پایین است و همچنین در پوشش‌های گیاهی کمتر از مناطق خاکی است، هرچقدر دمای سطح بیشتر باشد به همان نسبت شار گرمای خاک نیز افزایش پیدا می‌کند.



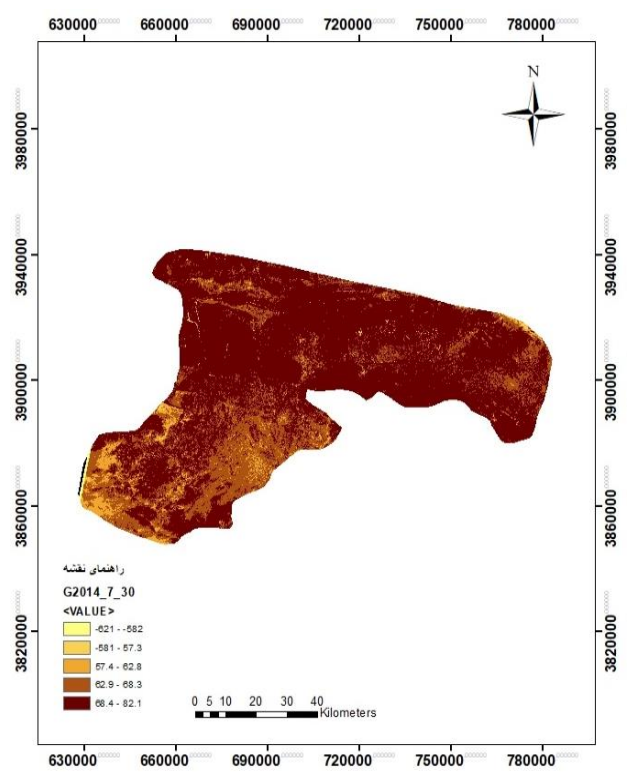
شکل (۴-۱۴): شار گرمای خاک



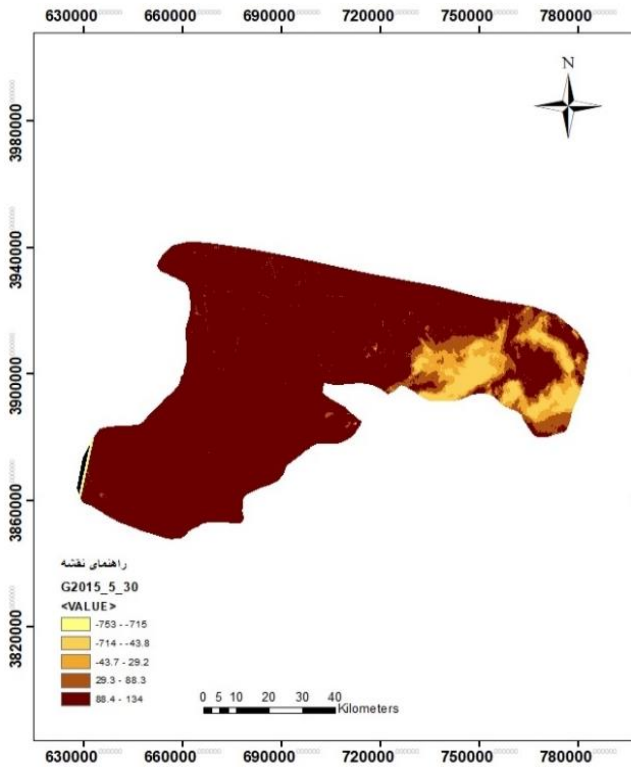
الف: شکل (۴-۱۴)



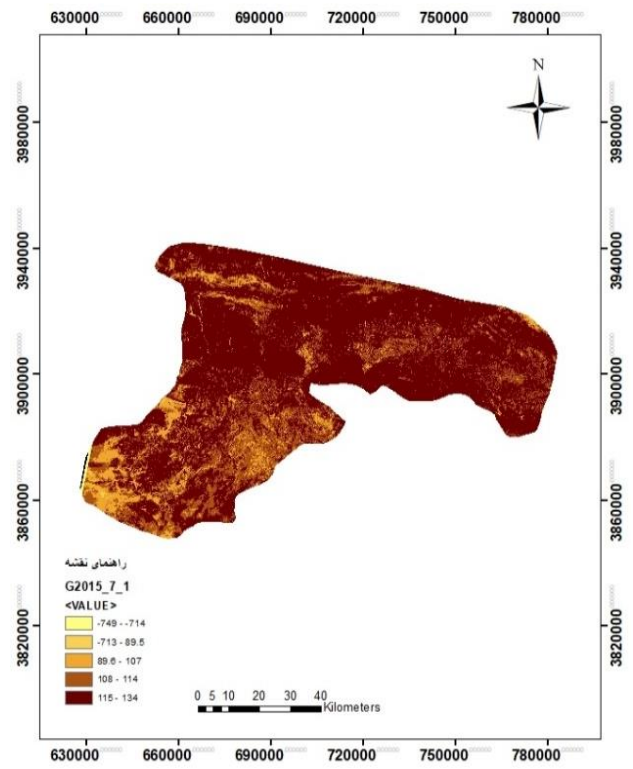
ب: شکل (۴-۱۴)



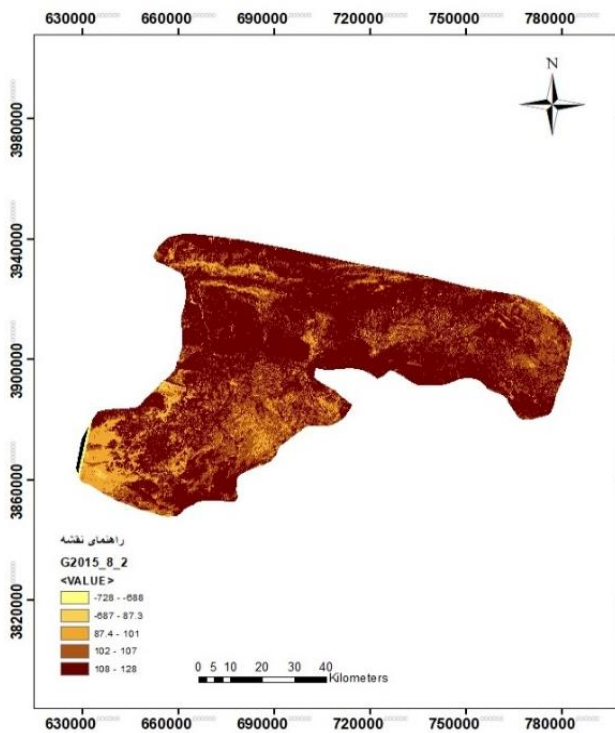
پ: شکل (۴-۱۴)



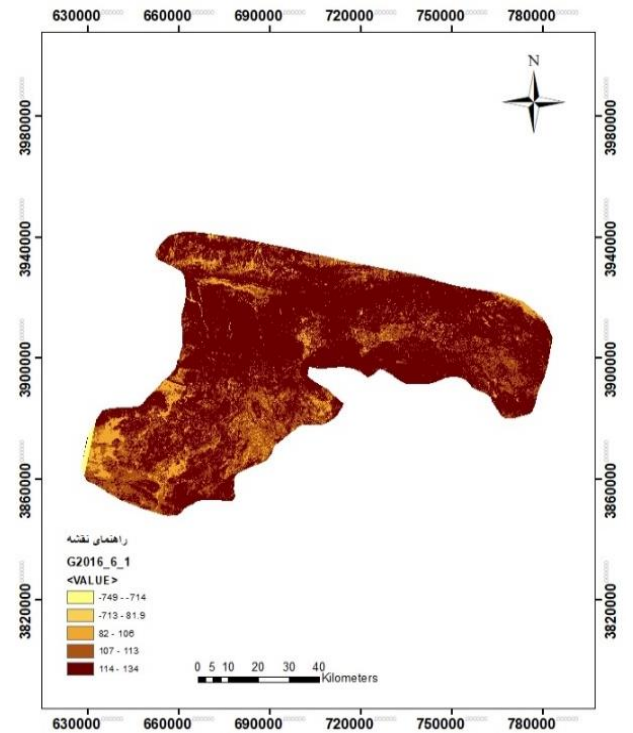
ت: شکل (۱۴-۴)



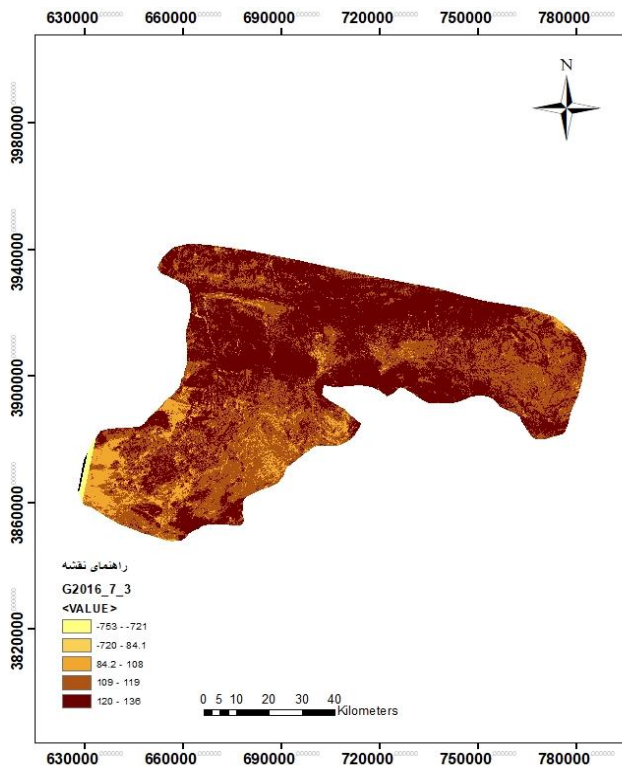
ث: شکل (۱۴-۴)



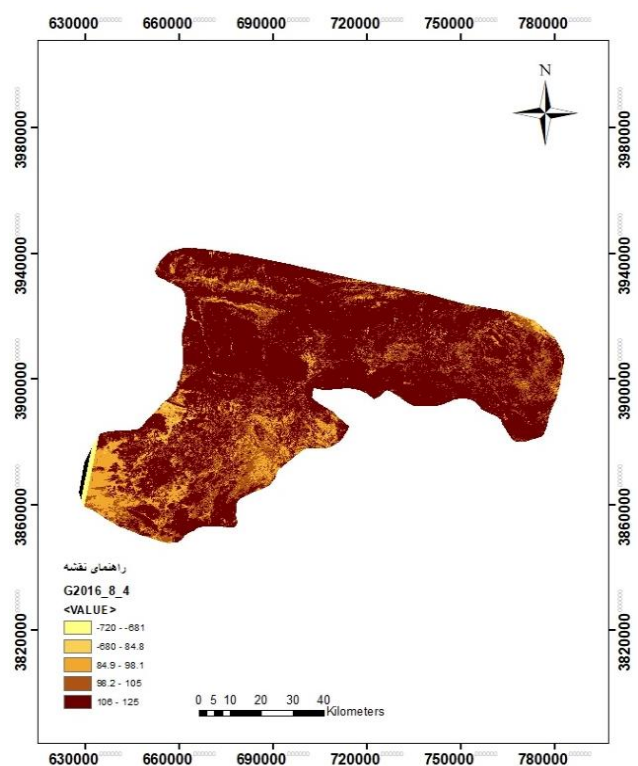
ج: شکل (۱۴-۴)



چ: شکل (۱۴-۴)



ح: شکل (۱۴-۴)



خ: شکل (۱۴-۴)

۴-۴-۳- شار گرمای محسوس (H)

برآورد شار گرمای محسوس یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترهای مورد محاسبه در تبخیر و تعرق است که محاسبه این پارامتر نیاز به بررسی مقاومت آئرو دینامیکی، چگالی هوا و اختلاف حرارتی بین دو نقطه‌ی مبنا دارد. اولین گام برای محاسبه شار گرمای محسوس انتخاب دو پیکسل سرد و گرم به عنوان شرط مرزی تبخیر و تعرق است، که پیکسل گرم برای سطح خشک با دمای سطحی نسبتاً بالا و در زمین‌های بایر کشاورزی انتخاب شد. از انتخاب گرم‌ترین پیکسل باید اجتناب شود چون معمولاً سطوحی مانند آسفالت و ایزوگام و... گرمای زیادی ذخیره می‌کنند، و پیکسل سرد برای سطح مرطوب با پوشش گیاهی پرتراکم که دمای سطحی پایینی دارد، انتخاب گردید، همچنین نباید سردترین پیکسل منطقه را انتخاب کرد. در جدول (۴-۷)، مشخصات پیکسل گرم و در جدول (۴-۸)، مشخصات پیکسل سرد که در نزدیک‌ترین محدوده کشاورزی به ایستگاه سینوپتیک منطقه مورد مطالعه انتخاب شد، آمده است:

جدول (۴-۷): مشخصات پیکسل گرم در روزهای تصویربرداری ماهواره

تاریخ	LAI	LST	Rn	G	H_Hot_1
۲۰۱۳/۸/۱۲	۰/۱	۳۱۵/۷۰	۵۶۰/۱۰	۱۱۷/۸۹	۴۴۲/۲۱
۲۰۱۴/۶/۱۲	۰/۲	۳۱۵/۰۵	۵۲۳/۲۷	۱۲۳/۳۶	۳۹۹/۹۱
۲۰۱۴/۷/۱۴	۰/۴	۳۱۵/۰۸	۴۷۸/۶۸	۱۱۷/۰۳	۳۶۱/۶۴
۲۰۱۴/۷/۳۰	۰/۴	۳۱۵/۰۷	۳۰۸/۳۶	۷۵/۳۱	۲۳۳/۰۵
۲۰۱۵/۵/۳۰	۰/۴	۳۱۵/۵۹	۵۴۹/۵۹	۱۲۵/۱۷	۴۲۴/۴۱
۲۰۱۵/۷/۱	۰/۴	۳۱۷/۱۷	۴۷۷/۱۰	۱۲۲/۰۱	۳۵۵/۰۸
۲۰۱۵/۸/۲	۰/۲	۳۱۶/۶۶	۵۰۵/۹۸	۱۱۸/۸۹	۳۸۷/۰۹
۲۰۱۶/۶/۱	۰/۶	۳۱۵/۵۱	۵۴۵/۹۴	۱۲۳/۱۴	۴۲۲/۸۰
۲۰۱۶/۷/۳	۰/۴	۳۱۵/۶۹	۵۹۰/۲۱	۱۲۴/۹۳	۴۶۵/۲۷
۲۰۱۶/۸/۴	۰/۴	۳۱۵/۳۸	۵۱۶/۰۱	۱۱۵/۴۳	۴۰۰/۵۸

جدول (۴-۸): مشخصات پیکسل سرد در روزهای تصویربرداری ماهواره

تاریخ	LAI	LST	Albedo	Rn	G	H_Cold_1
۲۰۱۳/۸/۱۲	۲/۰۵	۳۰۳/۳۹	۰/۲۲	۵۷۱/۹۱	۷۶/۶۳	۳۶۰/۶۳
۲۰۱۴/۶/۱۲	۲/۰۸	۳۰۷/۸۲	۰/۲۰	۶۰۵/۰۵	۳۶/۰۸	۳۷۹/۸۰
۲۰۱۴/۷/۱۴	۳/۳۵	۳۰۷/۹۳	۰/۲۲	۵۶۸/۷۲	۳۵/۴۱	۲۰۸/۷۷
۲۰۱۴/۷/۳۰	۳/۲۶	۳۰۴/۹۱	۰/۲۳	۳۹۵/۸۳	۲۷/۰۴	۱۰۶/۹۸
۲۰۱۵/۵/۳۰	۳/۲۵	۳۰۷/۹۷	۰/۲۴	۵۷۰/۴۴	۵۳/۷۷	۴۱۷/۹۰
۲۰۱۵/۷/۱	۱/۵	۳۰۷/۸۷	۰/۲۳	۵۷۱/۷۲	۹۸/۶۸	۳۵/۲۱
۲۰۱۵/۸/۲	۲/۴۸	۳۰۷/۵۱	۰/۲۲	۵۵۹/۱۱	۶۵/۲۱	۱۱۲/۷۶
۲۰۱۶/۶/۱	۳/۵۷	۳۰۹/۸۷	۰/۲۲	۵۶۹/۷۶	۳۳/۸۸	۳۱۰/۵۴
۲۰۱۶/۷/۳	۲/۹۴	۳۱۰/۹۳	۰/۲۲	۵۶۹/۰۲	۵۶/۲۶	۲۷۳/۵۸
۲۰۱۶/۸/۴	۲/۶۱	۳۰۷/۹۷	۰/۲۲	۵۴۵/۶۰	۶۴/۷۳	۲۴۲/۶۲

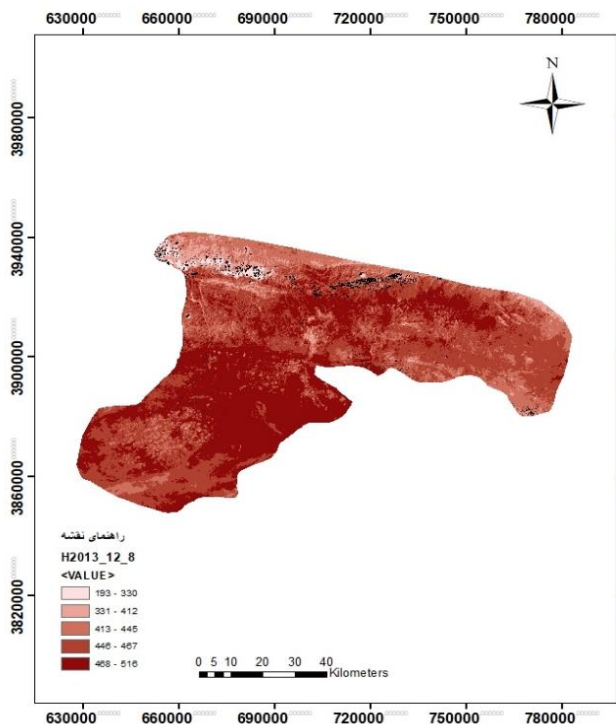
مقدار H_Hot_1 باید از مقدار H_Cold_1 بیشتر باشد.

مهم‌ترین مؤلفه‌ای که در شار گرمای محسوس برآورد می‌شود مقاومت آئرودینامیکی است که در مرحله اول به صورت تصحیح نشده طبق معادله (۳-۲۲) محاسبه شد و اولین شار حرارت محسوس به دست آمد. به منظور تصحیح انتقال متلاطم گرما بر اثر نیروی ارشمیدس از تئوری طول مونین-ابوخوف استفاده شد؛ این محاسبات در یک فرآیند تکرار قرارگرفت تا مقاومت آئرودینامیکی تصحیح شد، این فرآیند تکرار تا زمان همگرا شدن مقاومت آئرودینامیکی ادامه پیدا کرد، در جدول (۴-۹) تعداد دفعات تکرار برای همگرا شدن مقاومت آئرودینامیکی در روزهای مورد مطالعه آمده است:

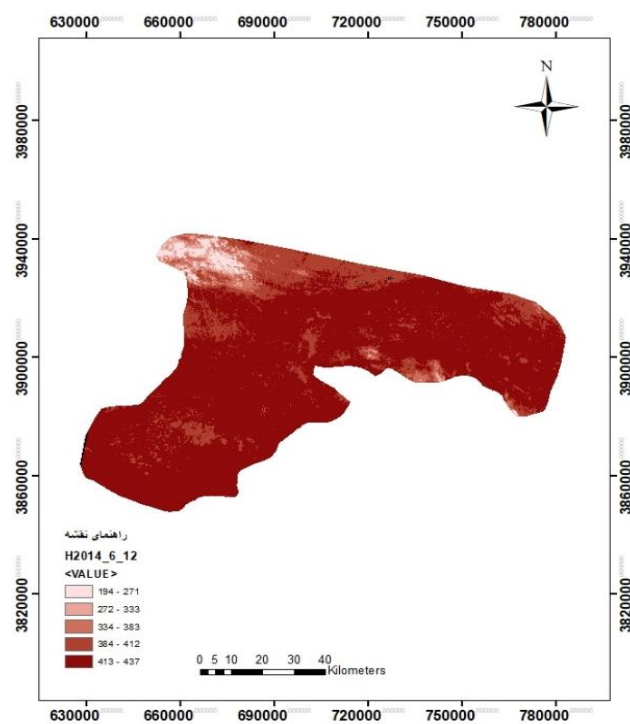
جدول (۴-۹):تعداد دفعات تکرار

تاریخ	دفعات تکرار
۲۰۱۳/۸/۱۲	۸
۲۰۱۴/۶/۱۲	۷
۲۰۱۴/۷/۱۴	۷
۲۰۱۴/۷/۳۰	۸
۲۰۱۵/۵/۳۰	۸
۲۰۱۵/۷/۱	۷
۲۰۱۵/۸/۲	۷
۲۰۱۶/۶/۱	۷
۲۰۱۶/۷/۳	۸
۲۰۱۶/۸/۴	۷

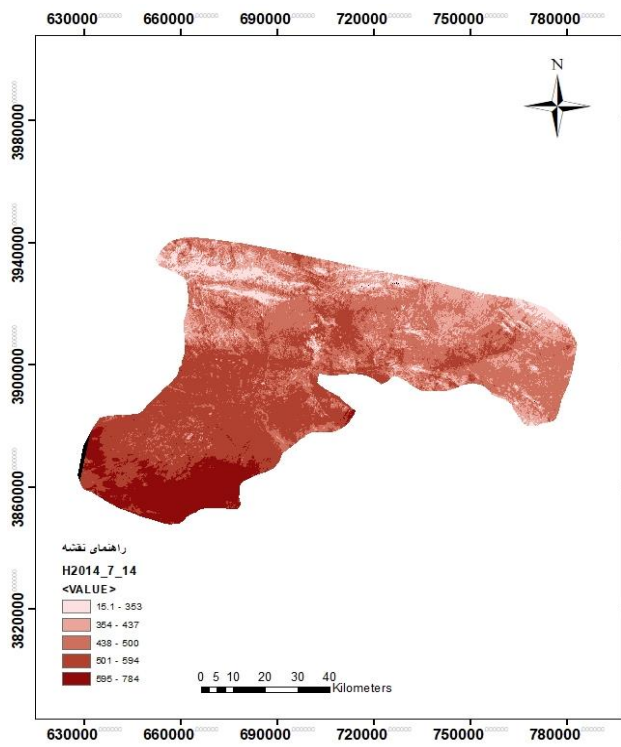
پس از اینکه مقاومت آثرودینامیکی همگرا شد، شار گرمای محسوس که از این همگرایی به دست آمد، وارد رابطه (۱-۳) برای محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای گردید. تصاویر شار گرمای محسوس در شکل (۴-۱۵) آمده است:



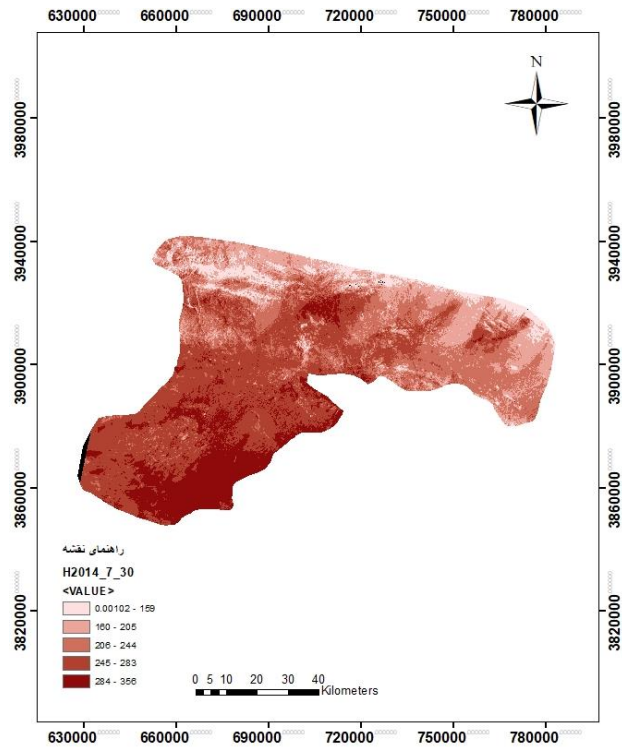
شکل (۴-۱۵): شار گرمای محسوس



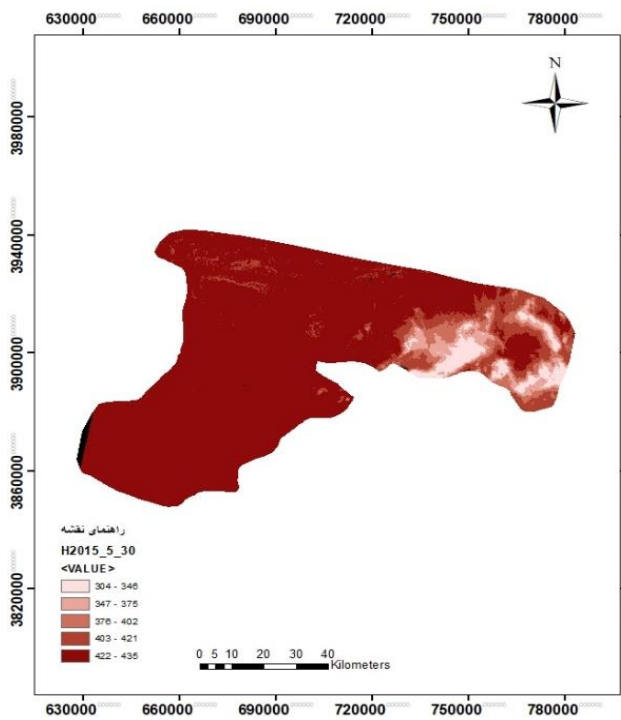
الف: شکل (۴-۱۵)



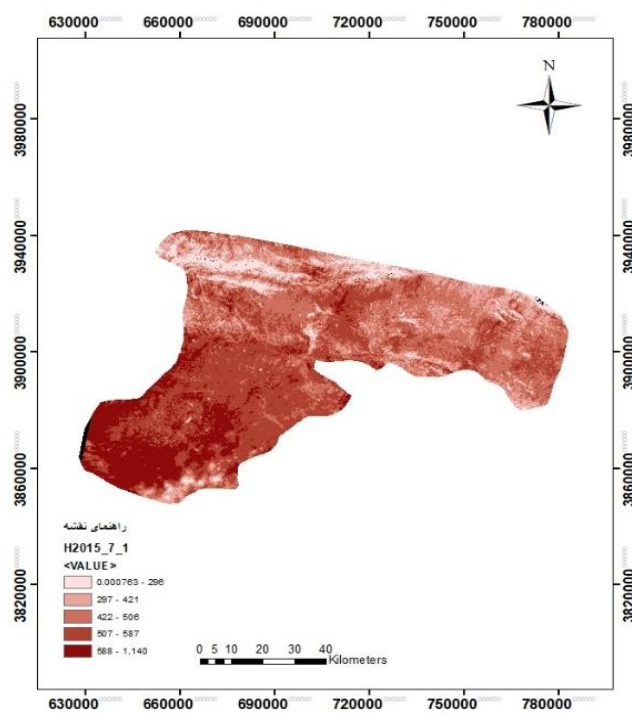
ب: شکل (۱۵-۴)



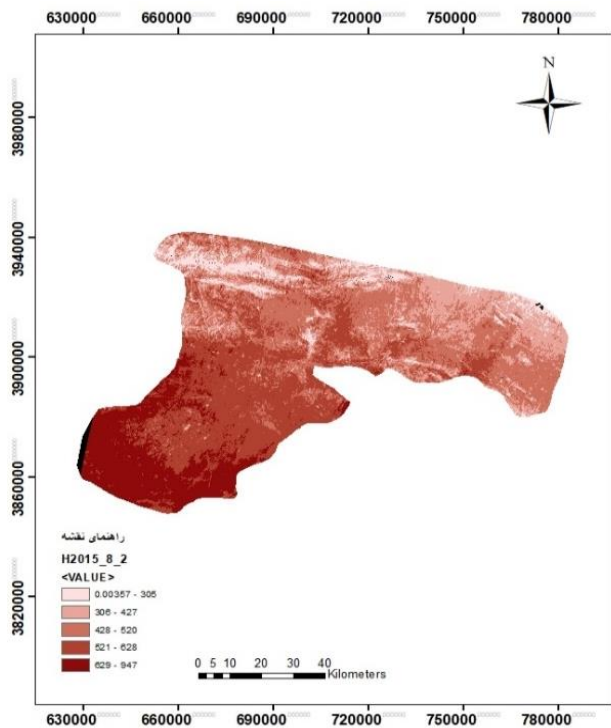
پ: شکل (۱۵-۴)



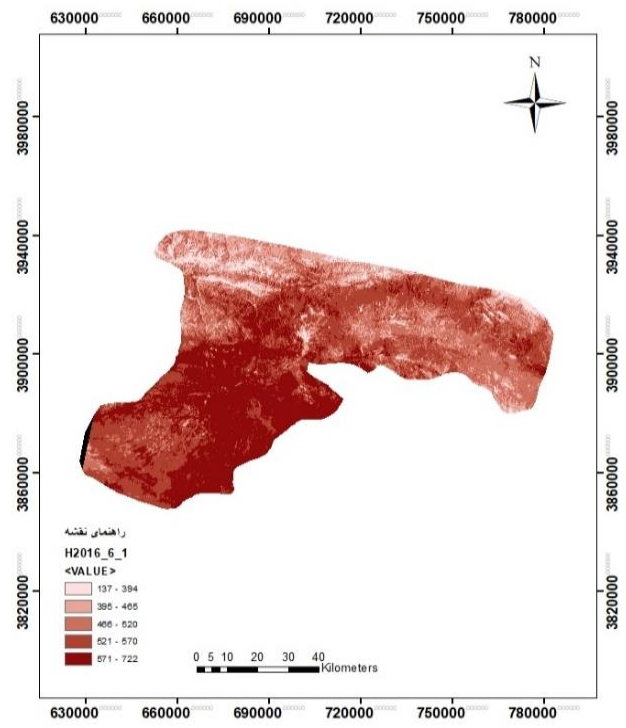
ت: شکل (۱۵-۴)



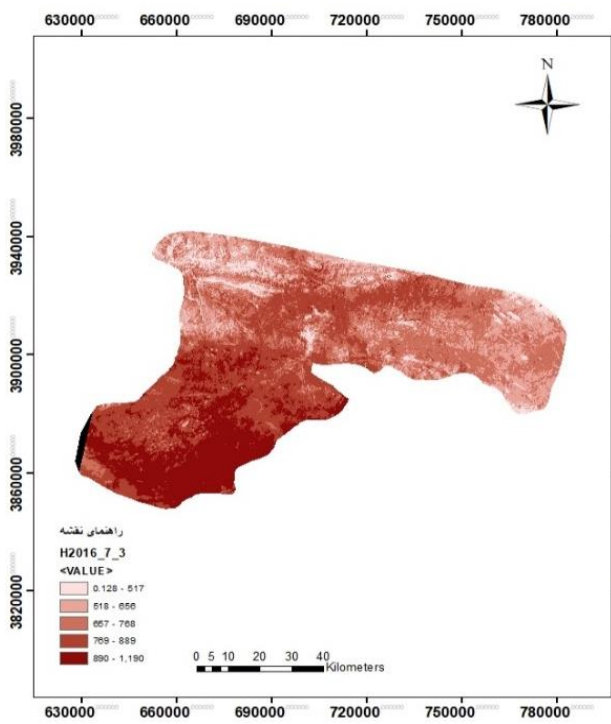
ث: شکل (۱۵-۴)



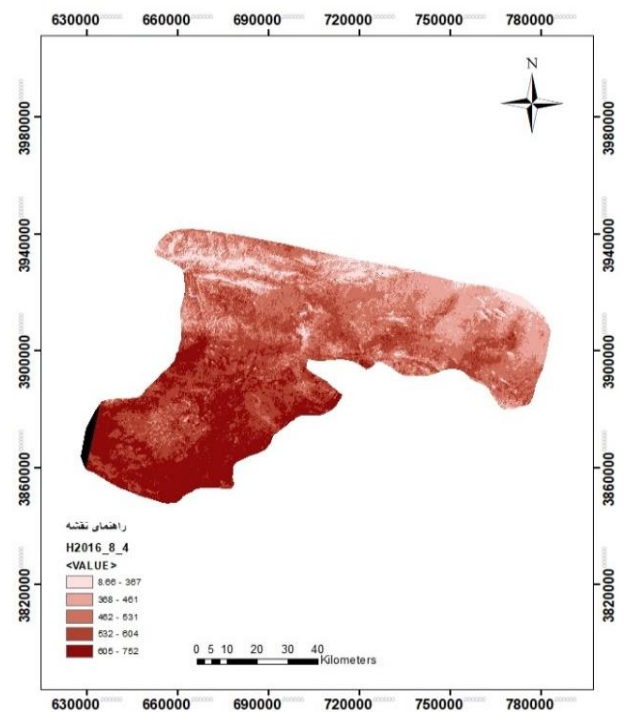
ج: شکل (۱۵-۴)



چ: شکل (۱۵-۴)



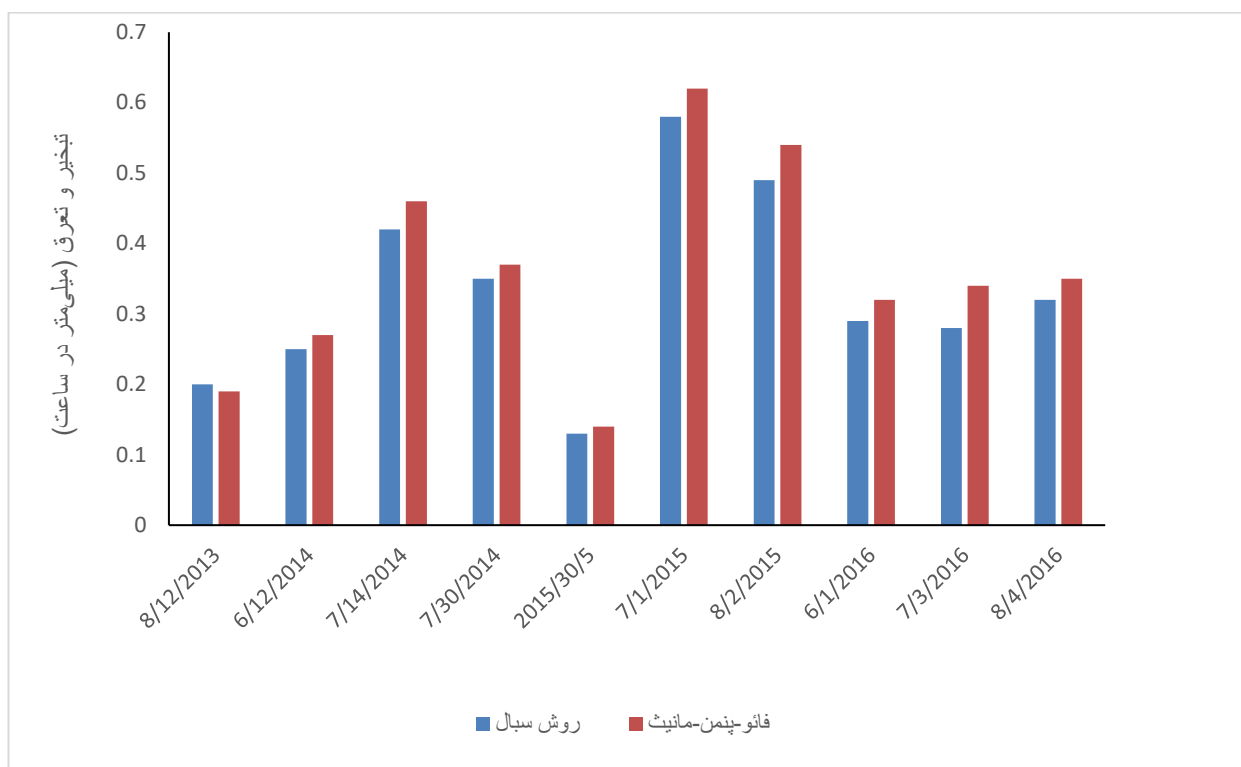
ح: شکل (۱۵-۴)



خ: شکل (۱۵-۴)

نتایج بدست آمده تبخیر و تعرق لحظه‌ای در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است.

جهت ارزیابی مقادیر بدست آمده از روش سبال نتایج آن برای روزهای متفاوت در مقایسه با روش فائو-پنمن-مانتیث در جدول (۴-۱۰) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که همخوانی خوبی ($R^2=0.96$) بین این دو روش در مقیاس لحظه‌ای را نشان می‌دهد.



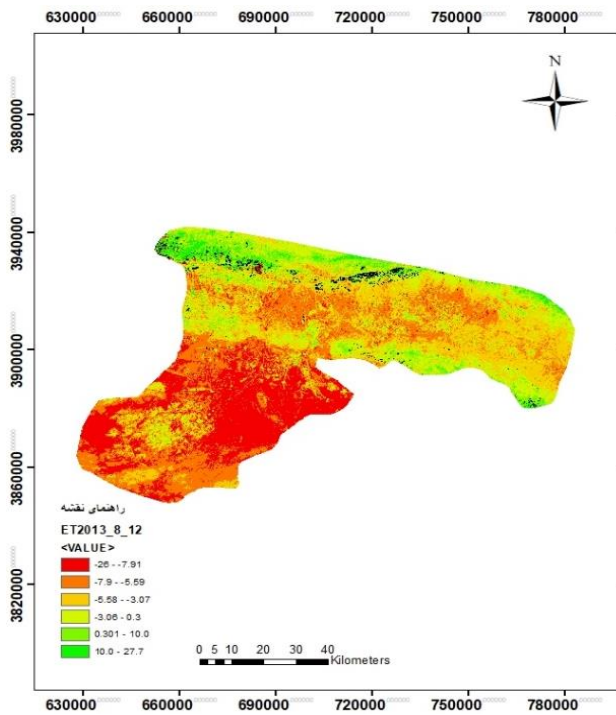
شکل (۴-۱۶): نتایج بدست آمده از تبخیر و تعرق لحظه‌ای روش سبال و فائو-پنمن-مانتیث

نتایج حاصل از الگوریتم سبال با روش فائو-پنمن-مانتیث برای برآورد میزان تبخیر و تعرق لحظه‌ای از همبستگی بیش از ۹۰٪ برخوردار بود.

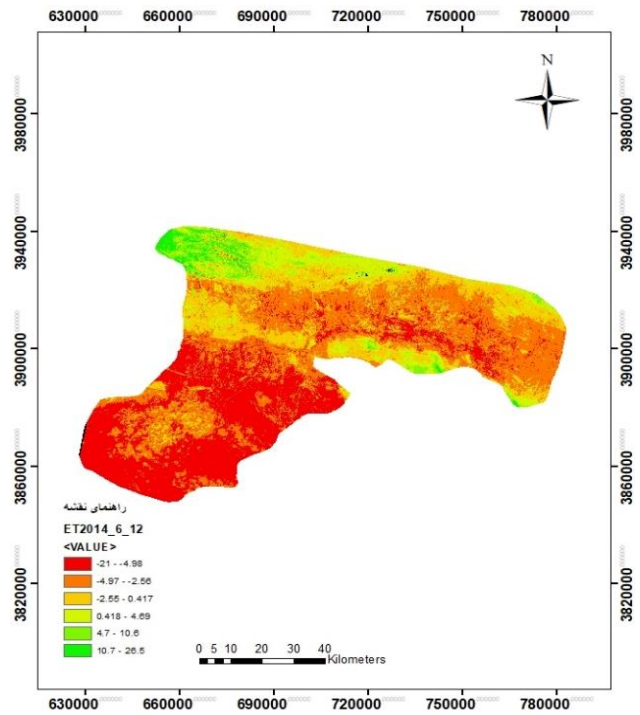
۴-۵- تبخیر و تعرق روزانه

با اجرای الگوریتم سبال تبخیر و تعرق روزانه حاصل شد که با استفاده از مقدار لحظه‌ای آن، از نسبت تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده گردید. بدین منظور تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره از منطقه مورد مطالعه و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه برای ایستگاه هواشناسی

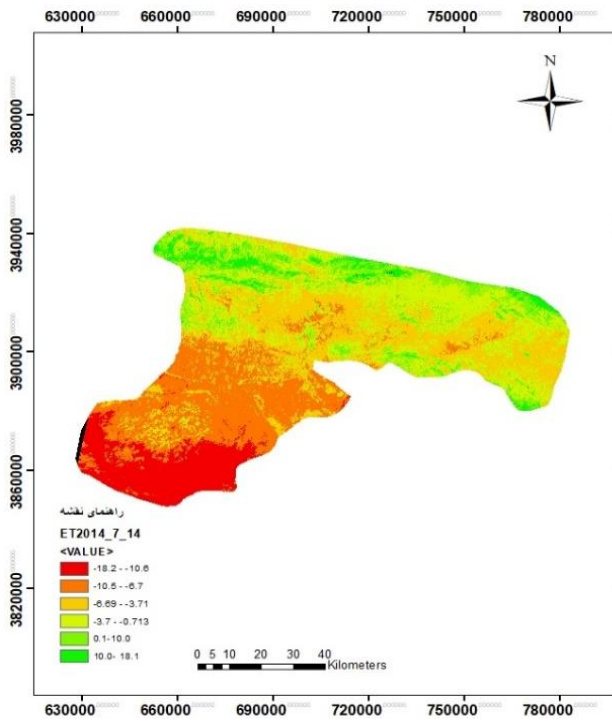
سینوپتیک منطقه تربت حیدریه محاسبه شد. که مقدار تبخیر و تعرق روزانه بر حسب میلیمتر بر روز طبق رابطه (۳-۴۷) برآورد گردید. در شکل (۴-۱۷)، تبخیر و تعرق روزانه نشان داده شده است :



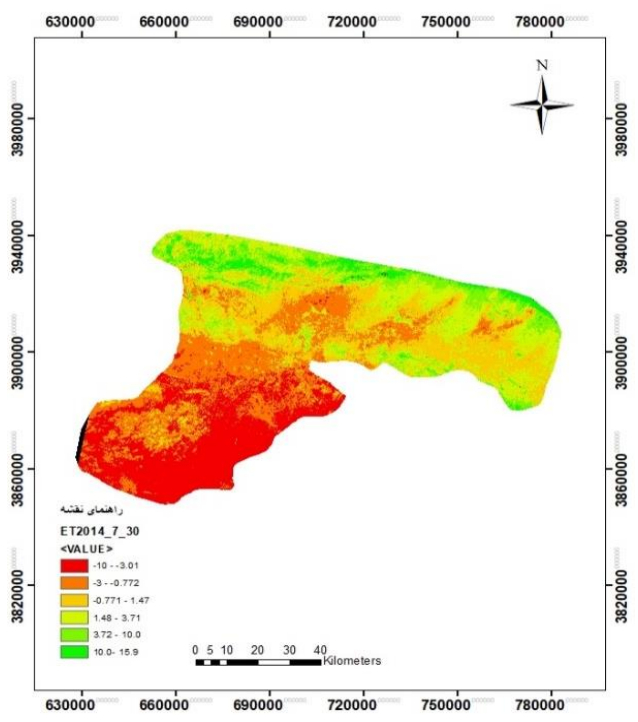
شکل (۴-۱۷): تبخیر و تعرق روزانه



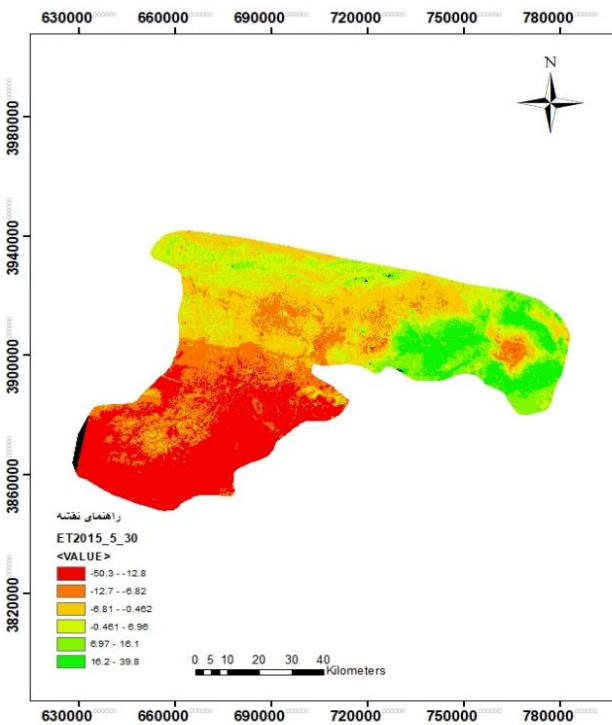
الف: شکل (۴-۱۷)



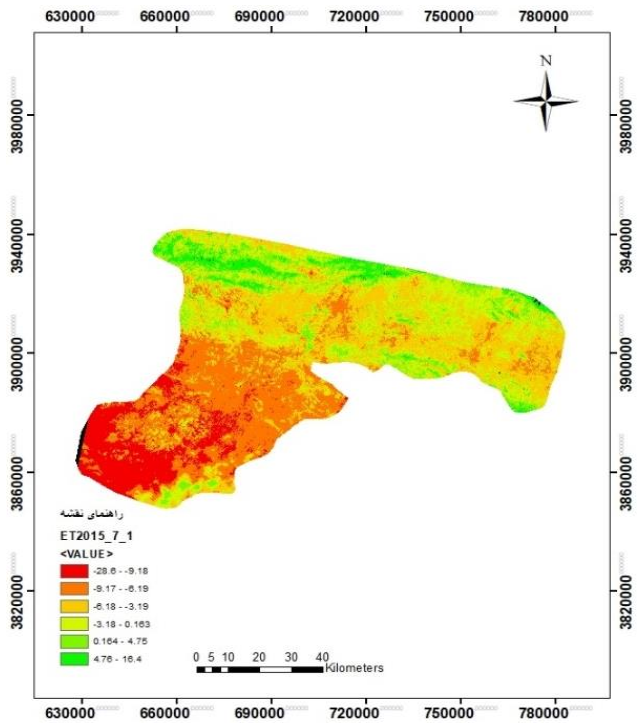
ب: شکل (۱۷-۴)



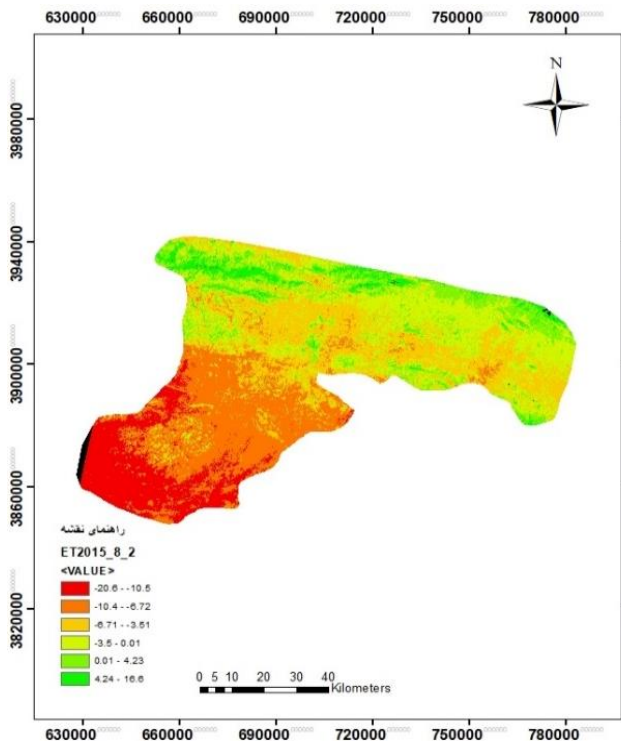
پ: شکل (۱۷-۴)



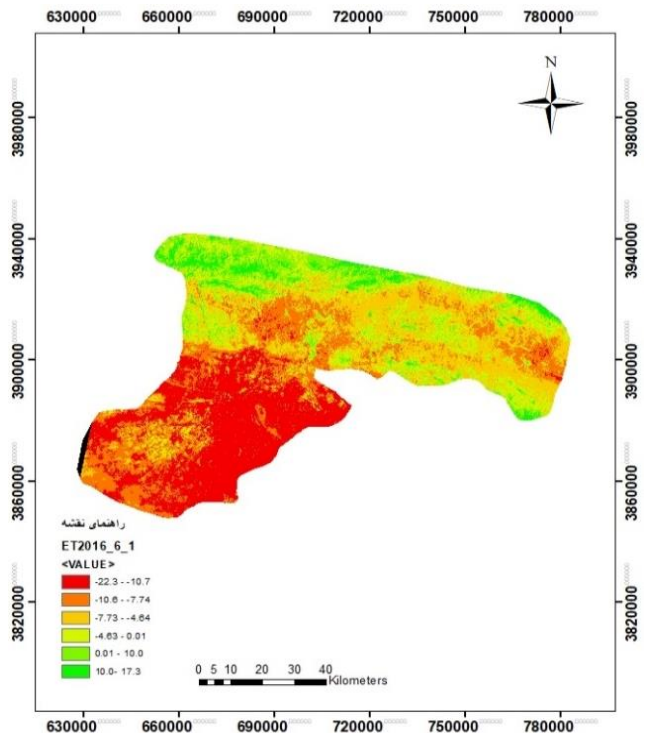
ت: شکل (۱۷-۴)



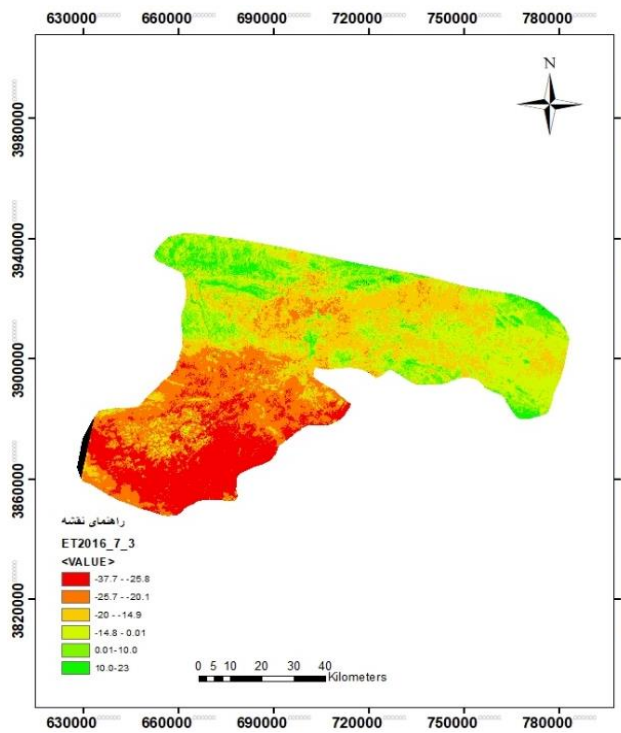
ث: شکل (۱۷-۴)



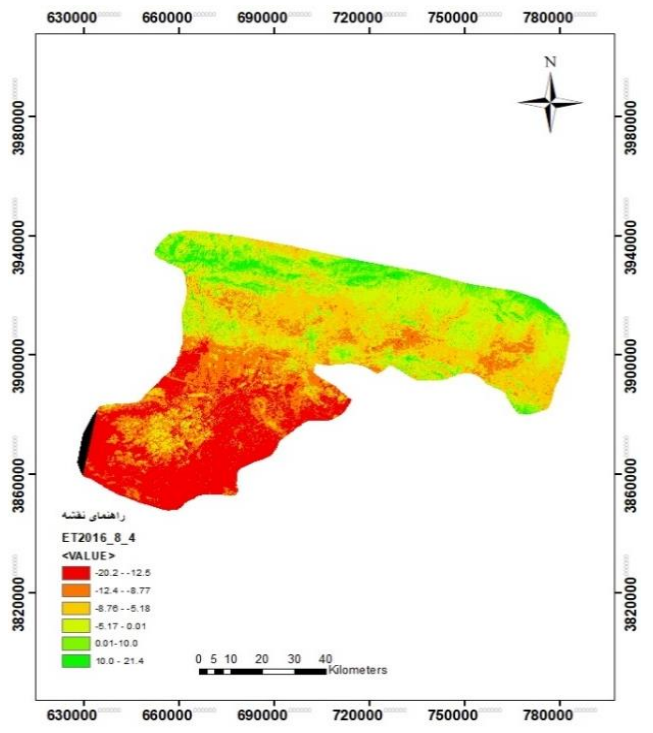
ج: شکل (۱۷-۴)



ج: شکل (۱۷-۴)



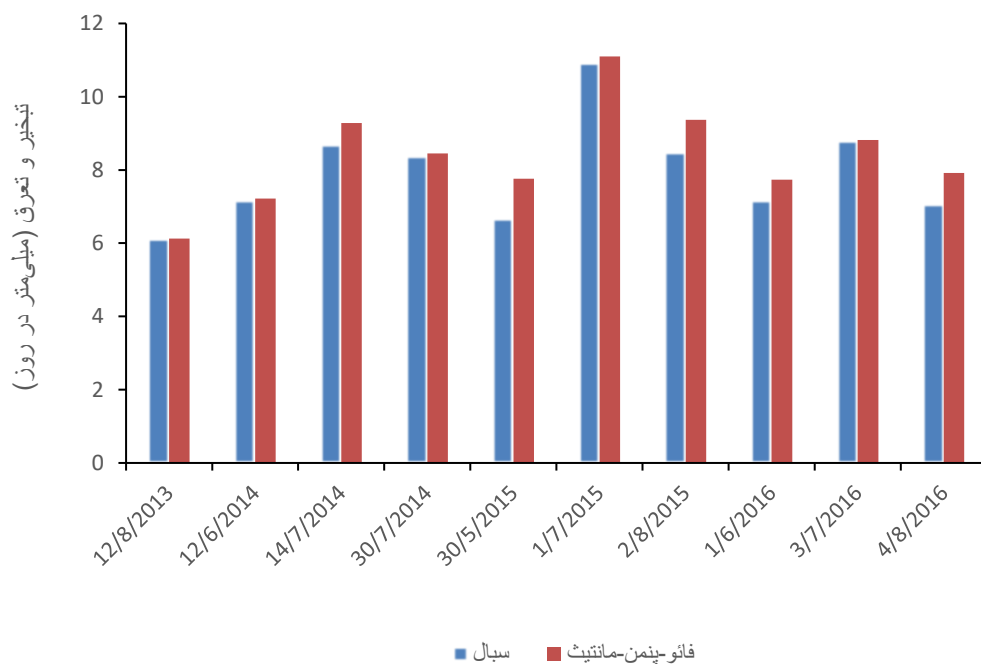
ج: شکل (۱۷-۴)



خ: شکل (۱۷-۴)

مقادیر بدست آمده از تبخیر و تعرق روزانه، روش سبال و روش فائو-پنمن-مانتیت در شکل (۴-۱۸) آمده

است:



شکل (۴-۱۸): نتایج بدست آمده از تبخیر و تعرق روزانه روش سبال و فائو-پنمن-مانتیت

با توجه به اینکه برآورد تبخیر و تعرق با مقیاس روزانه کاربرد بیشتری نسبت به مقیاس لحظه‌ای دارد، تبخیر و تعرق روزانه نیز محاسبه شد و نتایج حاصل از الگوریتم سبال با روش فائو-پنمن-مانتیت برای برآورد میزان تبخیر و تعرق روزانه از همبستگی ۸۸٪ برخوردار بود. در جدول (۴-۱۰) مشخصات آماری تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه الگوریتم سبال نسبت به روش فائو-پنمن-مانتیت آمده است:

جدول (۴-۱۰): مشخصات آماری تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه

	سبال	
	ET _{ins}	ET _{DAY}
R ²	۰/۹۶	۰/۸۸
RMSE	۰/۰۳۵	۰/۵۶۸
MAE	۰/۰۳	۰/۴۲
RE	۸/۵	۵/۱

بنابراین استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ و اجرای الگوریتم سبال می‌تواند راهکار مناسبی جهت برآورد تبخیر و تعرق با دقت بالا باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد الگوریتم سبال و روش سنجش از دور می‌تواند جایگزین روش‌های میدانی شود و نتایج مطلوبی ارائه دهد.

فصل پنجم

تجزیه کسری و شهادت

۵-۱- نتیجه گیری

از یک جهت مصارف گوناگون از آب برای توسعه صنعت، کشاورزی و مصارف خانگی و از جهت دیگر محدودیت منابع آب شیرین و بارش کم و خشکسالی‌های پی در پی باعث چند برابر شدن اهمیت آب شیرین شده است. با توجه به اینکه بیشترین مصرف کننده‌ی آب در بخش کشاورزی می‌باشد، باید راهکاری به منظور جلوگیری از اتلاف آب و برنامه ریزی و بهره برداری صحیح از منابع آب در دسترس، ارائه داد.

در چند سال اخیر تکنولوژی سنجش از دور با توجه به قابلیت‌هایی که دارد، نظیر: دسترسی به مناطق وسیع و صعب العبور، استفاده راحت، کم هزینه و سریع، نیاز کم به داده‌های زمینی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین سنجنده‌های مختلف با قدرت طیفی، مکانی و زمانی گوناگون، قدرت انتخاب بیشتری در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا با توجه به هدف و منطقه مورد مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای با سنجنده مناسب را انتخاب کند. تکنولوژی سنجش از دور می‌تواند برای محاسبه پارامترهای چرخه‌ی هیدرولوژی استفاده شود تا به بهینه شدن مصرف آب براساس مدیریت عرضه و تقاضا کمک کند. تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین اجزاء بیلان آب می‌باشد که محاسبه آن برای جلوگیری از هدر رفت آب امری ضروری است.

در این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شد که دارای قدرت تفکیک مکانی نسبتاً بالا (۳۰ متر) می‌باشد و پس از محاسبه پارامترهای بیلان انرژی، تبخیر و تعرق به صورت لحظه‌ای و روزانه محاسبه گردید. الگوریتم توازن انرژی سطح خشکی (سبال) در بازه‌های زمانی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از الگوریتم سبال با نتایج حاصل از روش پنمن-مانتیت مورد ارزیابی قرار گرفت، که نتایج نشان داد در مقیاس لحظه‌ای و روزانه، همبستگی بیش از ۰.۸۵٪ بین نتایج حاصل شده از روش سبال با نتایج حاصل شده از روش فائو-پنمن-مانتیت وجود دارد.

در تحقیق انجام شده توسط فوزی و همکاران (۲۰۲۰)، برای محاسبه تبخیر و تعرق در حوضه رودخانه نیل از ۱۸ تصویر لندست ۸ در طول فصل تابستان ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ و الگوریتم سبال استفاده کردند و به منظور

صحت سنجی نتایج حاصل از الگوریتم سبال ، روش فائو-پنمن-مانتیث را به کار بردند، که نتایج تبخیر و تعرق واقعی منطقه مورد مطالعاتی با $R^2=0.843\%$ و $RMSE=0.264 \text{ mm/day}$ نشان داد. قطعا روش‌های زمینی برآورد دقیق‌تری نسبت به روش‌های مبتنی بر سنجش از دور دارند اما نتایج تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نشان داده است که سنجش از دور می‌تواند در زمان کمتر و برای مناطق وسیع‌تر کاربردی باشد.

۵-۲- خطاهای تحقیق

- به منظور کالیبره کردن پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم سبال در منطقه ابزار لازم جهت اندازه‌گیری زمینی معتبر مانند لایسیمتر و برج اندازه‌گیری شارهای سطحی^۱ و... وجود نداشت.
- به دلیل عدم وجود زمین زراعی در محدوده ایستگاه هواشناسی، نمی‌توان پیکسل سرد را از آنجا انتخاب کرد، به همین دلیل سعی شده است که نزدیکترین فاصله زمین زراعی با ایستگاه هواشناسی انتخاب شود.
- به دلیل وجود ابر در تصاویر ۲۰۱۴/۶/۱۲ و ۲۰۱۵/۵/۳۰ در زمان محاسبات شار گرمای محسوس، یک سری خطاهایی صورت گرفت، که نمی‌توان به صحت همگرایی مقاومت آئروپنمیک آن اطمینان داشت.
- به دلیل احتمالات خطا در ثبت تابش خورشیدی، کثیف بودن دستگاه در زمان قرائت و وجود املاح و رسوبات در تشتک تبخیر، صحت داده‌های هواشناسی اخذ شده از ایستگاه سینوپتیک منطقه مورد مطالعه مورد اطمینان نیستند.

¹ Flux Tower

۵-۳- پیشنهادات

- ۱) استفاده از تلفیق تصاویر دو سنجنده با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، ماهواره‌ی لندست ۸ از نظر قدرت تفکیک مکانی مناسب‌تر است اما هر ۱۶ روز یک بار تصویربرداری می‌کند.
- ۲) به منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج، برآورد تبخیر و تعرق در مناطقی انجام شود که از لایسیمتر وزنی و برج‌های اندازه‌گیری شارهای سطحی برخوردارند.
- ۳) محاسبه تبخیر و تعرق در بازه زمانی طولانی‌تر که تغییرات آب و هوایی کاملاً مورد بررسی قرار بگیرد.
- ۴) اثر وجود ابر در تصویر حتی با برش دادن منطقه از بین نمی‌رود، پس تصاویر باید کاملاً بدون ابر انتخاب شود.

منابع

- امیدوار، ج.، داوری، ک.، ارشد، ص.، موسوی بایگی، م.، اکبری، م.، فرید حسینی، ع. (۱۳۹۱). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده استر و مدل متریک. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۳(۹): ۳۸-۴۹.
- امیدوار، ج. (۱۳۹۰). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم متریک و سنجنده استر. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ثنائی نژاد، ح.، نوری، س.، هاشمی نیا، م. (۱۳۹۰). برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۳): ۵۴۷-۵۴۰.
- جوی‌زاده، س.، قمرزاده، م.، براهیمی، م.، شمس آبادی، ا.، (۱۳۹۶). آموزش کاربردی ENVI (مقدماتی و پیشرفته). انتشارات دانشگاهی کیان (۱۳۹۵).
- رائینی سرجاز، م.، پیری، هدایت.، غلامی، م.، خزائی، س. (۱۳۹۷). برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و الگوریتم سبال، مطالعه موردی دشت ناز-ساری. مجله هواشناسی کشاورزی. ۶(۱): ۸-۱.
- زمان ثانی، ا.، خورانی، ا.، صادقی لاری، ع.، سدیدی، ج. (۱۳۹۶). ارزیابی برآورد تبخیر-تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان حاجی آباد. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۹(۴): ۶۸۱-۶۶۷.
- صانع، م.، کوچک‌زاده، م.، شریفی، ف. (۱۳۹۸). ارزیابی الگوریتم سبال جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه وردیج. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۱): ۱۳۵-۱۲۵.

صحراگرد، س.، نصری، ع.، الباجی، م.، کابلی‌زاده، م. (۱۳۹۹). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم توازن انرژی سطحی سبال و تصاویر تلفیق شده‌ی ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲، مطالعه موردی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۱): ۱۶۷-۱۵۶.

علیزاده، ا. (۱۳۹۸). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۱۳۹۳.

قمرنیا، ه.، رضوانی، س. (۱۳۹۳). محاسبه و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) در غرب ایران (دشت میان‌دربند). مجله آب و خاک. ۲۸(۱): ۸۱-۷۲.

قربانی، ا.، فرامرزی، م.، کرمی، ج.، غلامی، ن.، سبحانی، ب. (۱۳۹۳). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های سبال و متریک در برآورد تبخیر و تعرق، مطالعه موردی شهرستان ملایر. مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا. ۱۹(۲): ۱۵۳-۱۸۴.

کرباسی، م.، مقدم، م.، نیکبخت، ج.، کاویانی، ع. (۱۳۹۵). تخمین تبخیر-تعرق واقعی گیاه با استفاده از الگوریتم سبال، مطالعه موردی منطقه خرم دره در استان زنجان. اکوهیدرولوژی. ۳(۳): ۴۳۷-۴۲۷.

میان‌آبادی، آ.، علیزاده، ا.، ثنایی‌نژاد، ح.، قهرمان، ب.، داوری، ک. (۱۳۹۵). ارزیابی الگوریتم سبال برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی حوضه نیشابور-رخ با استفاده از مدل SWAT. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۰(۴): ۵۴۱-۵۲۵.

ملکی نژاد، ح.، فیروزی، ف. (۱۳۹۸). بررسی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش سبال در منطقه خشک و نیمه خشک. مطالعه موردی هرات. همایش ملی راهبردهای سازگاری با کم‌آبی در منطق خشک و نیمه خشک (۱): ۱-۸.

مسلم زاده، ن.، مختاری، ا. (۱۳۹۵). برآورد از راه دور تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از الگوریتم SEBAL با به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای Landsat8، مطالعه موردی دشت شرق اصفهان. کنفرانس بین‌المللی آب، محیط زیست و توسعه پایدار (۱): ۱-۸.

نوری، ح.، فرامرزی، م. (۱۳۹۶). بررسی تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف اراضی مناطق کوهستانی با استفاده از الگوریتم سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۶۶(۲): ۳۹-۵۶.

یعقوبزاده، م.، ایزدپناه، ز.، برومندنسب، س.، سیدکابلی، ح. (۱۳۹۵). مقایسه الگوریتم سبال با مدل SWAP و روش‌های محاسباتی جهت تعیین تبخیر و تعرق. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۹(۳): ۴۹-۳۹.

یاوری، م.، امیدوارم، ج.، داوری، ک.، فرید حسینی، ع.، اینانلو، م. (۱۳۹۳). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق واقعی سالانه در مقیاس بزرگ به کمک تبخیر و تعرق برآوردی از روش سبال در دشت نیشابور. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۵(۱۷): ۴۴-۵۵.

Allen, R. G., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., Morse, A. (1998). Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model and Landsat images. 2001 ASAE Annual Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., and Holtslag, A.A.M. (1998). A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1. Formulation. Journal of Hydrology, 212-213: 198-212.

Bezerra, B. G., Silva, B. B., Dos Santos, C. A. C., Bezerra, J. R. C. (2015). Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches. Advances in Remote Sensing 4(03): 234.

Dos Santos, C. A. C., Mariano, D. A., Nascimento, F. A., Dantas, F.C., Oliveira, G., Da Silva, B. B., Da Silva, L. L., Bezerra, B. G., Safa, b., Medeiros, S.S., Neale, ch. M. U . (2020). Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 85: 101982.

Fawzy, H. E.-D., Sakr, A., El-Enany, M., Moghazy, H.m. (2020). Spatiotemporal assessment of actual evapotranspiration using satellite remote sensing technique in the Nile Delta, Egypt. *Alexandria Engineering Journal* (2021)60,1421-1432.

Hong, S., Hendrickx, J., Borchers, B., (2009).Up- scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat(30m) to MODIS(250m) scal.*J of Hydrol* 370:122 to 138.

Hadjimitsis, D., Rapadavid, G., Toullos, L., Michaelides, S., (2013). A Modified SEBAL Modeling Approach for Estimating Crop Evapotranspiration in Semi- arid Conditions. *Water Management*, 27:3493-3506.

Jaafar, H. H. and F. A. Ahmad (2020). Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment*, 238: 111034.

Koloskov, G., KhMukhamejanove, T.W.T., (2007). MoninObukhov Lengths Cornerstone of the SEBA Calculation of Evapotranspiration, *Journal of Hydrology* 335, 170-179.

Kinoti, M., J , Z., and Su, W.T., “Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng’iro North Basin, Kenya”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12, pp. S100–S108, 2009.

Li, H., Li, Z.Y., Lei, C., Li, Z.L., and Shengwei, Z. (2008). Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology.*Journal of Agricultural water Management* 95:1271-1278.

Ma, Y., Liu, S., Song, L., Xu, Z., Liu, Y., Xu, T., Zhu, Z. (2018). Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 216: 715-734.

Ndou, N. N., Palamuleni, L. G., Ramoelo, A. (2018). Modelling depth to groundwater level using SEBAL-based dry season potential evapotranspiration in the upper Molopo River Catchment, South Africa. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 21(3): 237-248.

Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., Ahiablame, L. (2018). "Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index." *Advances in Meteorology*. Article ID 4525021, 12 pages.

Sari, D. K., Ismullah, I. H., Sulasdi, W. N., Harto, A. B. (2013). "Estimation of water consumption of lowland rice in tropical area based on heterogeneous cropping calendar using remote sensing technology." *Procedia Environmental Sciences* 17: 298-307.

Sun, Z., Wei, B., Shen, W., Wang, C., You, D., Liu, Z. (2011). Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling* 54(3-4): 1086-1092.

Sarwar A. and R. Bill .(2003). Estimation of Surface Heat Fluxes in the Indus Basin. Using ASTER Imagery. *Pakistan Journal of Water Resources*. 7 (1):53-64

Thoreson, B., Clark, B., Soppe, R., Keller, A., Bastiaanssen, W., Eckhardt, J. (2009). Comparison of evapotranspiration estimates from remote sensing (SEBAL), water balance, and crop coefficient approaches. *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers 2009 ASCE*. 4361-4347.

Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. and Wright, J.L. (2003). U.S. validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite. *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for large Regions*, 17 Sept.

Teixeira, A.H. de C. W.G.M. Bastiaanssen , M.D. Ahmad , M.G. Bos.(2009). Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Saõ Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. *Agricultural and forest meteorology* 149 -462 – 476.

Valentijn, R.N. P, Timmermans, W., Loew, A.,(2007). Comparision of the estimated water and energybudgets oof large winter wheat field during AgriSAR by multiple sensors and models, *Journal of Hydrology* 349,425-440.

Wang, J. T. W. Sammis, C. A. Meier, L. J. Simmons, D. R. Miller, and Z. Samani.(2005) A Modified SEBAL Model for Spatially Estimating Pecan Consumptive Water Use for Las Cruces, New Mexico.

YANG, J.-y., MEI, X.-r., HUO, Z.-g., YAN, C.-r., JU, H., ZHAO, F.-h., LIU, Q. (2015). Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 14(10): 2065-2076.

Zhang, X.-c., WU, J.-w., WU, H.-y., LI, Y. (2011). Simplified SEBAL method for estimating vast areal evapotranspiration with MODIS data. *Water Science and Engineering* 4(1): 24-35.

Abstract

Estimation of plant water consumption or evapotranspiration is necessary for management and planning of water and agricultural resources, design of irrigation systems, hydrological balance as well as approximate estimation of crop yield. There are various methods for determining evapotranspiration on a small scale using field measurements such as lysimeters, etc., which have high accuracy, but due to the high cost and difficulty of work in areas, they are not widely used. For this reason, methods based on remote sensing and the use of satellite imagery have received more attention from researchers. Therefore, due to the importance of the subject, in this study the evapotranspiration in Torbat-e Heydariyeh region was estimated using satellite images and Sebal algorithm. In this study, Landsat 8 satellite images were examined for ten days from the warm months of 2013 to 2016, and to compare the results obtained from the method based on remote sensing (Sebal), from the data measured at the Synoptic Meteorological Station of Torbat Heydariyeh. In order to estimate evapotranspiration using the FAO-Penman-Monteith method, taking into account the plant coefficients (KC), according to the type and stage of plant growth.

Using statistical indicators such as relative error and coefficient of determination, the ability and performance of remote sensing and Sebal algorithm were investigated. The results show that the remote sensing method has been able to estimate the amount of evapotranspiration on a daily scale with a relative error of 5.1% and an explanation coefficient of 0.88.

Keywords : Evapotranspiration - Sebal Algorithm - Landsat 8 Satellite Images - FAO-Penman-Monteith Equation - Remote Sensing



**Shahrood University of
Technology**

Faculty of Agriculture
M.Sc. Thesis in Water Structure Engineering

Estimation of Evapotranspiration of the Torbat Heydariyeh using Remote Sensing method

By: Reyhaneh Ghorbanian

Supervisor:
Dr. Samad Emamgholizadeh
Dr. Khalil Azhdary

February, 2021