

ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های سبال و متریک در برآورد تبخیر و تعرق (مطالعه موردی: شهرستان ملایر)

اردوان قربانی^{1*}، محمد فرامرزی²، جلال کرمی³، نبی‌الله غلامی⁴، بهروز سبحانی⁵

1- دانشیار سنجش از دور، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

3- استادیار سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

4- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

5- دانشیار سنجش از دور، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

دریافت: 93/9/10

پذیرش: 93/11/27

چکیده

برآورد تبخیر و تعرق یکی از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب است. روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق وجود دارد. در این تحقیق، امکان‌سنجی کارایی دو مدل سبال و متریک با استفاده از تصویر MODIS سال 1392 و مقایسه آن‌ها در سطح شهرستان ملایر انجام شده است. با استفاده از این مدل‌ها، شارهای سطحی محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده است. با توجه به روابط موجود و تفاوت‌های دو مدل در محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری و مقدار شار گرمای خاک، نتایج نشان می‌دهد الگوریتم سبال با میانگین تبخیر و تعرق 6/83 میلی‌متر در روز، در مقایسه با الگوریتم متریک با مقدار 7/21 میلی‌متر در روز، حدود 5/26 درصد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در محدوده شهرستان ملایر را کمتر برآورد کرده است. علت اصلی این اختلاف استفاده از معادلات متفاوت در محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری و شار گرمای خاک است. بخش عمده این تفاوت‌ها، اختلاف زیاد در مقادیر شار گرمای خاک محاسبه‌شده با دو روش است. همچنین براساس نتایج، هر دو مدل می‌توانند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را متناسب با توزیع مکانی منطبق با شرایط پستی و بلندی و پوشش گیاهی شهرستان ملایر برآورد کنند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، سنجش از دور، الگوریتم سبال، متریک، استان همدان.



1- مقدمه

تبخیر و تعرق واقعی ET_{act}^1 یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از عوامل تعیین‌کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب است و برآورد آن در زمینه‌های مختلف علوم همچون هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع، و مدیریت منابع آب مورد نیاز است (میدوار و همکاران، 1392: 13). برای محاسبه میزان تبخیر - تعرق در شرایط اقلیمی و جغرافیایی مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی روش‌های زیادی توسعه داده و آزمایش شده است. اغلب این روش‌ها از اندازه‌گیری داده‌های نقطه‌ای برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند؛ بنابراین فقط مناسب مناطق محلی‌اند و به سبب طبیعت پویا و تغییرات منطقه‌ای تبخیر و تعرق، به حوضه‌های بزرگ تعمیم داده نمی‌شوند (Li & Lyons, 2002: 61). با استفاده از روش سنجش از دور تبخیر و تعرق را در یک منطقه، بدون نیاز به دانستن پیشینه‌ای درباره اوضاع خاک، محصول و نحوه مدیریت مزرعه برآورد می‌کنند (Bastiaanssen Et al., 2005: 85). تاکنون از روش‌ها و سنجنده‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای و حتی جهانی استفاده شده است. انتخاب روش و نوع سنجنده به میزان دسترسی به داده‌های مورد نیاز، دسترسی به تصاویر سنجنده‌ها، وسعت منطقه مطالعه و اهداف پژوهش بستگی دارد. الگوریتم‌های سبال (توازن انرژی سطح زمین)² (Allen Et al., 2002: 15) و متریک³ (به دست آوردن تبخیر و تعرق در قدرت تفکیک مکانی بالا با کالیبراسیون داخلی) (Allen Et al., 2007: 380) از پرکاربردترین روش‌های محاسبه بیلان انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور است. الگوریتم سبال روشی است که برپایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر و تعرق واقعی را با حداقل داده‌های زمینی برآورد می‌کند. این الگوریتم را اولین بار باستیانس و همکاران (1998: 212) معرفی کردند و سپس آلن و همکاران (2002: 15) به اصلاح آن پرداختند؛ به طوری که الگوریتم اصلاح‌شده جدید با الگوریتم توازن انرژی متریک شباهت زیادی دارد (Allen Et al., 2002: 380). الگوریتم متریک به منظور فراهم کردن برآوردهای نسبتاً دقیق‌تر ET با تصاویر قدرت تفکیک مکانی زیاد ($\sim 30m$)

1. actual evapotranspiration

2. Surface Energy Balance for Land (SEABL)

3. Mapping EvapoTranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METHRIC)

در مقایسه با مدل‌های کلی‌تر مانند الگوریتم سبال و اعمال آثار حرکت افقی هوا در محاسبه ET ایجاد شده است. تفاوت مدل متریک با مدل سبال (Bastiaanssen Et al., 1998: 212) در استفاده از ET مرجع مبتنی بر داده‌های هواشناسی برای ایجاد شرایط توازن انرژی در یک پیکسل (پیکسل سرد) و برون‌یابی زمانی تبخیر و تعرق لحظه‌ای به روزانه است. در الگوریتم سبال اصلاح‌شده آلن و همکاران (2002: 15) این تفاوت‌ها نیز رفع شده و فقط در برخی روابط جزئی اختلاف دارند. دقت ET برآوردشده در روش سبال برای یک روز و در مقیاس 200 هکتار 85 درصد است که این دقت برای یک فصل تا 95 درصد افزایش می‌یابد. باستیانسسن و همکاران (2005: 85) دقت ET سالیانه برای سطوح بزرگ با استفاده از این روش را به‌طور میانگین 96 درصد بیان کردند. همچنین اظهار کردند که استفاده از این روش برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس‌های بزرگ و دوره‌های بلندمدت نتایج بهتری می‌دهد.

2- پیشینه تحقیق

درباره استفاده از سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. این مطالعات نشان‌دهنده کارایی روش‌های سنجش از دوری در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای و سطوح بزرگ است. برای مثال، آلن و همکاران (2005: 15) با به‌کار بردن الگوریتم متریک و مقایسه آن با مقادیر لایسیمی، میزان خطا در برآورد تبخیر و تعرق چمن و چغندر قند را به ترتیب 4 و 1 درصد برای فصل رشد به‌دست آوردند. تاسومی¹ و همکاران (2005: 335) در آیداهو دو مدل توازن انرژی سبال قدیمی و متریک را مقایسه و بیان کردند که نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های لایسیمتر تطابق خوبی دارد. چاوز² و همکاران (2007: 267) با استفاده از تصاویر لندست و مدل متریک، مقادیر ET روزانه را با داده‌های لایسیمتری مقایسه و میزان خطای کمتر از 28 درصد را گزارش کردند. فولهز³ و همکاران (2009: 1398) با استفاده از تصاویر لندست و مدل توازن انرژی متریک، مقادیر تبخیر و تعرق را در برزیل محاسبه و کارایی این مدل را در برآورد مصرف آب و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه‌خشک

1. Tasumi
2. Chavez
3. Folhes



و تحت آبیاری شمال شرق برزیل توصیه کردند. موتیگا¹ و همکاران (2010: 108) تبخیر و تعرق را با استفاده از الگوریتم سبال و مدل تعادل آب در همین بازه زمانی محاسبه، و نتایج را مقایسه کردند و همبستگی 70 درصدی را نشان دادند. ژوپینگ² و همکاران (2011: 1088) با استفاده از تصاویر لندست ETM⁺ و الگوریتم سبال در چین، پتانسیل مدل سبال را برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی تأیید کردند. یوتینگ³ و همکاران (2012: 112) با استفاده از تصاویر MODIS و الگوریتم سبال نشان دادند که تغییرپذیری درون‌سالی در تبخیر و تعرق بر زمین‌های کشاورزی، بدنه‌های آبی، جنگل‌ها و گراسلندهای آبی با تغییرپذیری در مقادیر تبخیر و تعرق توجیه‌پذیرند. پاول⁴ و همکاران (2013: 214) مقادیر تخمینی تبخیر و تعرق و دیگر مؤلفه‌های الگوریتم سبال را با داده‌های میدانی اندازه‌گیری‌شده با چهار لایسیمتر دقیق وزنی در دو سطح شرایط کشت آبی و دیم مقایسه کردند و به نتایج قابل قبول در استفاده از الگوریتم سبال رسیدند. پاول و همکاران (2014: 157) با استفاده از الگوریتم سبال مقدار تبخیر و تعرق را برای دو سطح کشاورزی آبی و دیم تخمین زدند و نتایج را با داده‌های چهار لایسیمتر وزنی مقایسه و بر کارایی این الگوریتم تأکید کردند.

در ایران نیز نوری (1389: 109) امکان استفاده از الگوریتم سبال را برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر MODIS در زیرحوضه آبریز مشهد بررسی کرد و نتیجه گرفت که این تصاویر و الگوریتم قادرند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس روزانه در منطقه مشهد به‌خوبی برآورد کنند. باقری و همکاران (1391: 15) برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز از تصاویر MODIS استفاده کردند و دریافتند که مدل سبال و متریک بااینکه فرضیات پیچیده‌ای ندارند، نتایج مناسبی به‌دست می‌دهند و برای کار در سطوح بزرگ مناسب‌اند. امیدوار و همکاران (1392: 1) با استفاده از الگوریتم‌های سبال و متریک و تصاویر ASTER در منطقه‌ای از مشهد نتیجه گرفتند که هر دو مدل مقدار تبخیر و تعرق واقعی را متناسب با توزیع مکانی منطبق با شرایط پستی و بلندی و پوشش گیاهی حوضه برآورد می‌کنند. درباره استفاده از الگوریتم‌های سبال و متریک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

1. Mutiga
2. Zhongping
3. Yuting Yang
4. Paul

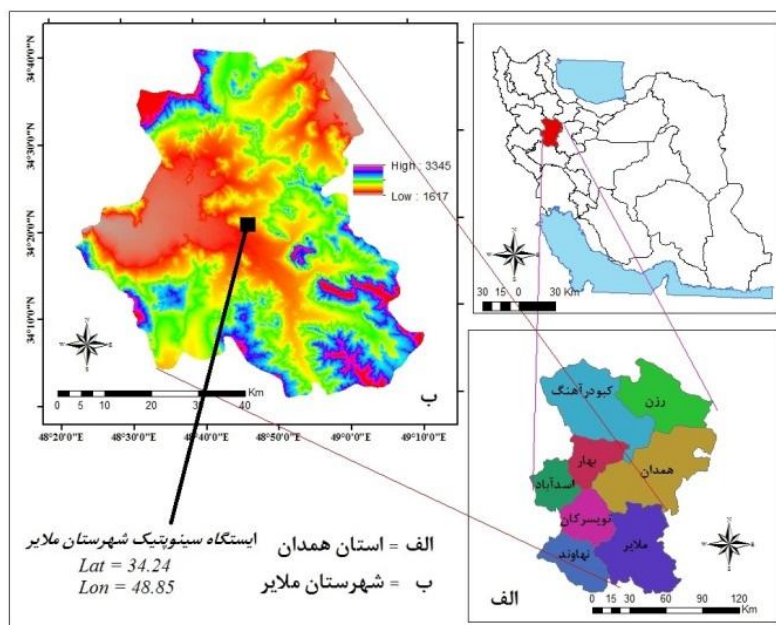
پژوهش‌های زیادی انجام شده است؛ ولی چه در دنیا (Bastiaanssen Et al., 1998: 212; Allen Et al., 2002: 15; Allen Et al., 2007: 380; Yuting Et al., 2012: 112; Paul Et al., 2013: 157 & 2014: 157) و چه در ایران (نوری، 1389: 101-106؛ باقری و همکاران، 1391: 81-96؛ کریمی، فرهادی و حصادی، 1391: 352؛ امیدوار و همکاران، 1392: 12) با توجه به سابقه بیش از یک دهه تحقیق در این زمینه، هنوز ضرورت دارد تحقیقات بیشتری با توجه به تنوع اقلیمی و آب‌وهوایی انجام شود تا امکان ارزیابی تبخیر و تعرق به‌نحوی مطلوب‌تر و دقیق‌تر برپایه این مدل‌ها و تصاویر ماهواره‌ای انجام گیرد. همچنین، با توجه به اینکه این مدل‌ها تجربی بوده و از پاره‌ای روش‌ها و معادلات تجربی استفاده می‌کنند، ضرورت دارد این مدل‌ها برای شرایط منطقه‌ای کالیبره و واسنجی شوند. در این تحقیق، تبخیر و تعرق واقعی در سطح شهرستان ملایر با اقلیمی نیمه‌خشک و کوهستانی - که دارای کاربری‌های مختلف مانند مرتع، مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی آبی و دیم، سطوح آبی و غیره است و به‌صورت ناهمگن گسترش یافته‌اند - برآورده نشده است. لازم است یادآوری شود که در سطح منطقه مطالعه، نه از تصویر MODIS و نه از تصاویر دیگر در بررسی مقدار تبخیر و تعرق، چه با استفاده از مدل‌های سبال و متریک و چه مدل‌های دیگر، استفاده نشده و برآوردی صورت نگرفته است؛ بنابراین این تحقیق از نخستین پژوهش‌ها در این زمینه است. گفتنی است در اکثر مطالعات پیشین، با استفاده از تصاویر و دو مدل نام‌برده، برآورد تبخیر و تعرق اغلب در مناطق زراعی با کشت همگن کالیبره شده و در سطح اراضی ترکیبی کالیبره نشده‌اند؛ اما در این پژوهش با تأکید بر نحوه عمل‌کرد دو مدل و کارایی و مقایسه آن‌ها در اوضاعی خارج از شرایط کالیبره‌شده در یک محیط همگن انجام شده است.

3- داده‌ها و روش تحقیق

3-1- منطقه مطالعه

شهرستان ملایر وسعتی معادل 3208 کیلومتر مربع دارد که 16/9 درصد از سطح استان همدان را داراست (شکل 1). تغییرات ارتفاعی بین 1617 تا 3345 متر نشان‌دهنده کوهستانی بودن منطقه (شکل 1 مدل رقومی ارتفاع نوسانات ارتفاعی را نشان می‌دهد) است و مقدار بارش سالیانه براساس گرادیان ارتفاع و بارش استخراج‌شده از کل ایستگاه‌های سطح شهرستان و مناطق

هم‌جوار (نهاوند، تویسرکان، همدان، فرودگاه، همدان، نوژه، اراک، کنگاور و بروجرد) با دوره پایه هفده‌ساله (1995-2012م) به‌طور متوسط بین 250 تا 327 میلی‌متر است. میزان تبخیر و تعرق پتانسیل 24 ساعته در ایستگاه شهرستان ملایر برای ماه اردیبهشت به‌طور متوسط معادل 7/58 میلی‌متر ثبت شده است. در مطالعات مختلف با استفاده از سنجش از دور در برآورد تبخیر و تعرق، از لایسیمتر برای کنترل نتایج و نقشه‌های تولید شده استفاده می‌شود. به‌دلیل نبود لایسیمتر در سطح شهرستان ملایر، از ایستگاه سینوپتیک شهر ملایر که دما، بارندگی و تبخیر را ثبت می‌کند، به‌عنوان ایستگاه مرجع برای کنترل نتایج نقشه‌های تولید شده استفاده شده است (شکل 1). داده‌های ساعتی روز 1391/2/24 مصادف با زمان اخذ تصویر MODIS با استفاده از مدل فائو - پنمن - مانیتث به‌کار رفت. با توجه به اینکه مقدار بارندگی در فصل رشد کم است و اراضی کشاورزی دچار کمبود آب هستند، با برآورد تبخیر و تعرق واقعی می‌توان میزان آب مصرفی را مدیریت کرد تا بیشترین بازده را داشته باشند.



شکل 1 موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه در سطح کشور و استان همدان و تغییرات ارتفاعی سطح شهرستان

3-2- انتخاب، آماده‌سازی و پیش‌پردازش تصویر

با توجه به رشد روز افزون صنعت سنجش از دور و افزایش سنجنده‌ها، یکی از مبانی پایه در انتخاب تصویر مناسب برای هر مطالعه‌ای از جمله مطالعات برآورد تبخیر و تعرق، کمک گرفتن از تصاویر ارزان‌قیمت برای کالیبره کردن و استفاده از آن‌ها به منظور ارزیابی و برآورد تبخیر و تعرق در طول زمان است (کریمی، فرهادی و حصادی، 1391: 352؛ امیدوار و همکاران، 1392: 12). یکی از تصاویر مناسب که در دورترین نقاط دنیا در این زمینه مورد توجه است، تصاویر رایگان MODIS است (نوری، 1389: 101-106). نکته دیگر در این زمینه، کالیبره کردن تصاویر مختلف، به‌ویژه تصاویر ارزان‌قیمت با توجه به شرایط منطقه‌ای در قالب تحقیقات است تا در ادامه بخش اجرا به‌صورت مستمر، از تصویر و چارچوب پیش‌نهادی تحقیقات در مطالعات اجرایی استفاده شود. بنابراین، هرچند از تصویر MODIS در نقاط مختلف دنیا از جمله ایران در این حوزه استفاده و با شرایط منطقه کالیبره شده، به‌کار گرفتن این تصاویر و الگوریتم‌های سبال و متریک و مقایسه آن‌ها در ایران، در مرحله تکامل است (باقری و همکاران، 1391: 81). به‌علاوه در زمینه استفاده و کالیبره کردن تصاویر مختلف از جمله تصاویر MODIS در استان همدان با خصوصیات اقلیمی و پوشش گیاهی آن تحقیقات زیادی انجام نگرفته است. در تحقیقات انجام‌شده، از تصاویر Landsat TM در کرمانشاه (کریمی، فرهادی و حصادی، 1391: 352-364)، ASTER در مشهد (امیدوار و همکاران، 1392: 12) و از MODIS در دشت تبریز (باقری و همکاران، 1391: 81-96) از الگوریتم سبال یا مدل‌های دیگر استفاده نشده و تصاویر MODIS به‌طور گسترده به‌کار نرفته است. بنابراین، در این پژوهش انتخاب تصویر با در نظر گرفتن عواملی همچون شرایط زمانی (بهار)، کیفیت مطلوب، عدم پوشش لکه‌های ابر و همچنین به‌دلیل محدودیت انتخاب تصاویر دیگر، تصویر MODIS انتخاب شده است. تصویر انتخابی سطح دو بوده و به تصحیح هندسی نیاز نداشته؛ ولی با 10 نقطه کنترل GPS قبل از استفاده تصویر برای اصلاح و تأیید تصحیح هندسی کنترل شده است. با توجه به زمان گرفتن تصویر که عاری از اغتشاشات جوی بوده و همچنین به‌دلیل تک‌زمانه بودن تفسیر، به تصحیحات اتمسفری نیازی نبوده است (Song Et al., 2001: 230). در جدول یک مشخصات تصویر مورد استفاده آمده است.

جدول 1 خصوصیات تصویر MODIS انتخاب‌شده

نوع تصویر	تاریخ اخذ تصویر (میلادی)	تاریخ اخذ تصویر (شمسی)	تعداد باند	قدرت تفکیک (متر)
MODIS	2013/14/05	1392/2/24	19 باند انعکاسی	250,500,1000
			17 باند حرارتی	1000

3-3- الگوریتم توازن انرژی سبال و متریک

مبانی نظری و چگونگی روند محاسبات برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش سبال و متریک به تفصیل در منابع مختلف بیان شده است (ر.ک: Allen Et al., 2002 & 2007). در هر دو مدل، مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و براساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌شود. از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای فقط می‌توانند در زمان گذر ماهواره اطلاعاتی بدهند، مدل‌های یادشده امکان برآورد مقدار شار گرمای نهان لحظه‌ای را در زمان تصویر امکان‌پذیر می‌کنند (Allen Et al., 2002: 15). همچنین براساس همین منبع، شار گرمای نهان برای هر پیکسل تصویر و به صورت معادله توازن انرژی سطح براساس معادله یک محاسبه شده است.

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad \text{معادله 1}$$

در معادله یک، λET شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) است. دقت برآورد شار گرمای نهان به روند محاسبات و دقت برآورد پارامترهای R_n ، G و H بستگی دارد. الگوریتم‌های سبال و متریک در اکثر بخش‌های محاسباتی مشابه‌اند و فقط در برخی روابط تفاوت دارند (Ibid). مقدار تابش خالص، اولین مرحله به منظور حل معادله توازن انرژی سطحی در الگوریتم سبال، محاسبه شار تابش خالص سطحی (R_n) با استفاده از شارهای تابش ورودی و خروجی براساس معادله دو محاسبه شده است (Ibid).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{Sl} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad \text{معادله 2}$$

R_{SL} تابش موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2)، α آلبدوی سطحی و ϵ_0 توان تشعشعی سطحی باندهای 31 و 32 سنجنده MODIS است. تمام پارامترهای یادشده در هر دو روش مانند هم محاسبه شده‌اند. فقط تفاوت در معادله برآورد مقدار ضریب شفافیت اتمسفر τ_{sw} ، سبب ایجاد اختلاف در مقادیر خروجی تابش طول موج کوتاه ورودی R_{SL} و در تابش طول موج بلند ورودی از اتمسفر $R_{L\downarrow}$ شده و در نتیجه، مقادیر تابش خالص R_n به دست آمده است. از معادله‌های سه و چهار به ترتیب به منظور محاسبه در الگوریتم سبال و متریک استفاده شده است (Allen Et al., 2002 & 2007).

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad \text{معادله 3}$$

$$\tau_{sw} = 0.75 + 0.627 * \exp \left[\frac{-0.00146 * p}{kt \cos hor} - 0.75 \left(\frac{w}{\cos hor} \right)^{0.4} \right] \quad \text{معادله 4}$$

z ارتفاع از سطح دریا (m)، P فشار اتمسفر (kpa)، W آب موجود در اتمسفر (mm)، θ_{hor} زاویه زنیث خورشیدی و k_t ضریب مه‌آلودگی است.

شار گرمای خاک، میزان انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی بر اثر هدایت مولکولی است (Ibid). از آنجا که محاسبه مستقیم مقدار شار گرمای خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مشکل است، در روش سبال ابتدا نسبت G/R_n در نیمه روز، با استفاده از معادله تجربی باستیانسن (2000) به صورت معادله پنج محاسبه شده است.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad \text{معادله 5}$$

در معادله پنج، T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$) و α آلبدوی سطحی است. مقدار G با ضرب کردن این نسبت در R_n به دست می‌آید. به همین منظور، ابتدا $NDVI^1$ با استفاده از رابطه شش محاسبه شده است. $NDVI$ شاخصی است که مقدار و اوضاع پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر آن بین -1 تا +1 متغیر است؛ به طوری که مقدار آن برای سطح خاک لخت حدود صفر،

1. Normalized Deference Vegetation Index

اُردوان قربانی و همکاران _____ ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های سبال و ...

برای سطوح کاملاً پوشیده از گیاه حدود 1 و برای سطح حاوی آب و ابرها معمولاً کمتر از صفر است.

$$\text{NDVI} = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2) \quad \text{معادله 6}$$

R_2 انعکاس طیفی باند 1 مودیس (باند قرمز) و R_1 انعکاس طیفی باند 2 مودیس (باند مادون قرمز نزدیک) است. تاسومی (2003) به منظور محاسبه شار گرمای خاک در مدل متریک، معادله‌های هفت و هشت را پیش‌نهاد داد که در این تحقیق نیز از آن‌ها استفاده شده است.

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18e^{-0.52LAI} \quad LAI^1 \geq 0.5 \quad \text{معادله 7}$$

$$\frac{G}{R_n} = 1.8 * (T_s - 273.15) / (R_n + 0.084) \quad LAI < 0.5 \quad \text{معادله 8}$$

با توجه به اینکه یکی از پارامترهای معادله هفت شاخص سطح برگ‌گی یا LAI است، با استفاده از رابطه نه به محاسبه آن پرداخته شده است. درواقع، LAI شاخصی از بیوماس و مقاومت تاج پوشش گیاهی است و به صورت نسبت کل برگ‌های گیاه به سطح زمین پوشانده شده از آن گیاه تعریف می‌شود (Ibid).

$$LAI = -\{\ln((0.69 - SAVI)/0.59)\} / 0.91 \quad \text{معادله 9}$$

رابطه LAI به نوع محصول و موقعیت جغرافیایی محل مطالعه بستگی دارد و معادله نه براساس میانگین رابطه $SAVI-LAI^2$ برای انواع محصولات، اولین بار در ناحیه آیداهوی جنوبی محاسبه شده است. بنابراین، مقادیر دقیق‌تر LAI از تصویر ماهواره‌ای را می‌توان با

1. Leaf Area Index

2. Soil-Adjusted Vegetation Index

ترکیب نقشه کاربری زمین و رابطه SAVI-LAI برای هر نوع محصول به‌دست آورد. در این مطالعه نیز، از رابطه‌ای که در آیداهو جنوبی به‌دست آمده است (LAI)، استفاده شده (Ibid, 17). با توجه به اینکه یکی از پارامترهای شاخص LAI، شاخص تعدیل‌شده گیاهی برای خاک یا SAVI است، با استفاده از معادله ده این شاخص محاسبه شده است (Ibid, 25). شاخص SAVI سعی در کاهش آثار خاک زمینه در NDVI دارد و آثار رطوبت خاک نیز در این شاخص کاهش می‌یابد (Huete, 1998: 295).

$$\text{SAVI} = ((1+L)(R_1-R_2))/(R_1+R_2+L) \quad \text{معادله 10}$$

L فاکتور تصحیح آثار زمینه خاک است و از صفر برای پوشش گیاهی متراکم‌تر تا 1 برای تراکم‌های کمتر متغیر است. در این تحقیق، مقدار استاندارد استفاده‌شده 0/5 است (Allen Et al., 2002: 25) که با پوشش گیاهی متوسط تناسب دارد. در شهرستان ملایر با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI که نشان‌دهنده شرایط پوشش گیاهی است، میانگین شاخص برابر با 0/19 بود که با توجه به شرایط بزرگی پیکسل‌های سنجنده MODIS، برابر با پوشش گیاهی متوسط در نظر گرفته شده و مقدار 0/5 برای ضریب تصحیح آثار زمینه خاک استفاده شده است.

یکی از تفاوت‌های اصلی روش سبال قدیمی و متریک در چگونگی محاسبه مقدار شار گرمای محسوس است (Ibid, 27) که در مدل سبال این اختلاف وجود ندارد. مقدار این مؤلفه از معادله یازده موسوم به بیلان انرژی محاسبه شده است (Ibid). منظور از شار گرمای محسوس، میزان هدررفت گرما به هوا از طریق همرفت و هدایت مولکولی به‌علت وجود اختلاف دماست که با استفاده از معادله یازده محاسبه شده است (Ibid).

$$H = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad \text{معادله 11}$$



ρ چگالی هوا (kg/m^3), C_p گرمای ویژه هوا (1004 J/Kg/K), dT اختلاف دما (T_1-T_2) بین دو ارتفاع (Z_1-Z_2) برحسب درجه کلوین (K) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرماس (s/m). شار گرمای محسوس تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است. حل این معادله به دلیل وجود دو مجهول r_{ah} و dT مشکل است. به منظور تسهیل محاسبات، از دو پیکسل سرد و گرم (که در آن‌ها می‌توان مقادیر قابل اعتمادی برای H پیش‌بینی کرد و در نتیجه برآوردی از dT به دست آورد) و سرعت باد در ارتفاع معین استفاده شده است. با توجه به اینکه r_{ah} تابعی از شار گرمای محسوس است، معادله یازده دارای حل صریح نیست و باید به روش چرخه‌ای حل شود. به منظور اعمال تصحیح‌های پای‌داری جو، از طول مانین آبخوف¹ (Ibid, 34) استفاده شده که توضیحات و معادلات مربوط به آن در ادامه آمده است. در مرحله اول، از چرخه محاسبه H از به کارگیری توابع پای‌داری جو صرف نظر شده است. با چشم‌پوشی از توابع پای‌داری، تخمین مقاومت آیرودینامیکی صحیح نیست؛ ولی این امکان ایجاد می‌شود تا بتوان سایر پارامترها را یکی پس از دیگری محاسبه کرد. برای این کار باید ابتدا دو پیکسل لنگر را برگزید، سپس برای این دو پیکسل محاسبه صورت گیرد و با استفاده از آن‌ها برای کل تصویر محاسبه انجام شود. روش سبال از دو پیکسل شاخص برای تعیین شرایط مرزی ثابت، در معادله توازن انرژی استفاده می‌کند (Ibid). این پیکسل‌ها که پیکسل سرد و گرم نامیده می‌شوند، باید در محدوده مطالعه در سطح تصویر انتخاب شوند. پیکسل سرد از منطقه پوشیده از پوشش گیاهی کامل و کاملاً آب‌یاری شده انتخاب شده که در آن دمای سطحی برابر با دمای هوای نزدیک سطح فرض می‌شود. پیکسل گرم نیز از یک زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک که در آن تبخیر و تعرق صفر فرض می‌شود، انتخاب شده است. در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم دقت زیادی صورت گرفته است؛ زیرا کیفیت نتایج و محاسبات در روش سبال به دقت در انتخاب این دو پیکسل بستگی دارد (Ibid). در انتخاب پیکسل‌های مذکور از عواملی همچون دمای سطحی، آلبدو و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شده است؛ بدین صورت که پیکسل سرد دارای دمای کم، آلبدوی حدود 0/22 تا 0/24 مطابق با زمین یونجه و مقدار NDVI زیاد باشد؛ درحالی که پیکسل گرم دارای دمای

1. Monin-Obukhov

زیاد، آلودگی زیاد شبیه به سایر زمین‌های خشک و بدون پوشش گیاهی و مقدار NDVI کم باشد. در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم دقت شده تا از انتخاب دماهای خیلی کم یا خیلی زیاد اجتناب شود. چنانچه دمای پیکسل سرد خیلی کم انتخاب شود، مقدار تبخیر و تعرق در پیکسل‌هایی که تبخیر و تعرق کامل داشته اما دمای بیشتری دارند، کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. درباره پیکسل گرم نیز، چنانچه دمای آن خیلی زیاد انتخاب شود، مقدار تبخیر و تعرق پیکسل‌های با دمای کمتر اما مقدار تبخیر و تعرق معادل صفر، بیشتر از صفر خواهد شد. در این تحقیق، با توجه به نظریه سبال، پیکسل سرد مزارع با پوشش گیاهی کامل (معمولاً یونجه) و کاملاً آبیاری شده انتخاب شده است که در آن دمای سطحی و دمای هوای نزدیک سطح برابر فرض می‌شوند و پیکسل گرم هم از اراضی کشاورزی بدون پوشش و خشک انتخاب شده است؛ سپس با بازدید میدانی و ارزیابی مقادیر NDVI و آلودگی و دمای سطحی نقاط به‌دست‌آمده از مطالعات میدانی، پیکسل‌های گرم و سرد برگزیده شده است.

باوجود یکسان بودن روش محاسبه H در هر دو مدل سبال و متریک، به‌علت استفاده از مقادیر R_n و G در روند محاسبات H، نتایج خروجی مقدار H نیز برای دو روش متفاوت خواهد بود. پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس براساس شرایط جوی تصحیح شد، مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با معادله یک برای هر پیکسل محاسبه شد. از آنجا که مقادیر شار تابش خالص (R_n)، شار گرمای محسوس (H) و شار گرمای خاک (G) که تاکنون به‌دست آمده، مقادیر لحظه‌ای و برای زمان گذر ماهواره هستند، مقدار شار گرمای نهان (λET) نیز لحظه‌ای است. λET مقداری است که از طریق تصاویر ماهواره‌ای به‌دست می‌آید. بنابراین، مقدار عددی λ باید محاسبه شود تا با تقسیم عدد مربوط در هر پیکسل، مقدار ET به‌دست آید. با استفاده از شار گرمای نهان لحظه‌ای، مقدار ET لحظه‌ای به‌صورت معادله دوازده (Ibid, 37) به‌دست آمده است.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad \text{معادله 12}$$

ET_{inst} مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای نهان تبخیر (J/Kg) و عدد 3600 برای تبدیل زمان از ثانیه به ساعت است. مقدار λ نیز از معادله سیزده محاسبه شده است.

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad \text{معادله 13}$$

3-3-1- کسر تبخیر و تعرق مرجع (ET_rF)

کسر تبخیر و تعرق مرجع به صورت نسبت تبخیر و تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) محاسبه شده برای هر پیکسل (mm/hr) به تبخیر و تعرق مرجع (ET_r) محاسبه شده از داده‌های هواشناسی برای زمان تصویر (mm/hr) براساس معادله چهارده محاسبه شده است.

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad \text{معادله 14}$$

ET_rF مشابه ضریب گیاهی (K_c) بوده و برای برون‌یابی ET از زمان تصویر به دوره 24 ساعته یا طولانی‌تر استفاده می‌شود. مقدار ET_rF عموماً بین صفر و یک متغیر است؛ به طوری که در پیکسل کاملاً خشک مقدار $ET_rF=0$ و $ET=0$ و در پیکسل سرد- اگر در مزرعه یونجه یا ذرت واقع شده باشد - ET آن تا اندازه‌ای بیشتر از ET_r است؛ بنابراین $ET_rF > 1$ (احتمالاً $1/1$) است. مقادیر منفی برای ET_rF به علت خطاهای سیستماتیک که از راه فرضیات مختلف در سبال وارد می‌شوند، رخ می‌دهد (Ibid). برای محاسبه ET_r روابط متعددی بیان شده که از میان آن‌ها، رابطه پنمن - مانتیت را فائو برای اکثر کشورهای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، پیش‌نهاد کرده است (Ibid, 12). روش پنمن - مانتیت دارای نسخه‌های متعددی است که از بین آن‌ها، روش فائو - پنمن - مانتیت به عنوان یکی از معتبرترین روش‌ها برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع، مورد استفاده متخصصان است (علیزاده، 1387). بنابراین، در این پژوهش از نسخه فائو - پنمن - مانتیت 56 در نرم‌افزار REF-ET به منظور محاسبه ET_r استفاده شده است.

3-3-2- تبخیر - تعرق 24 ساعته

اغلب، مقادیر روزانه تبخیر و تعرق (ET_{24}) در مقایسه با مقادیر لحظه‌ای کاربرد بیشتری دارند. سبال مقدار ET_{24} را با فرض اینکه ET_rF لحظه‌ای، شبیه به میانگین ET_rF در طول 24 ساعت است، محاسبه می‌کند. مقدار ET_{24} (mm/day) براساس معادله پانزده (Allen Et al., 2002: 32) محاسبه شده است.

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r,24} \quad \text{معادله 15}$$

$ET_{r,24}$ مجموع ET_r طی 24 ساعت برای همان روز تصویر است که با جمع کردن مقادیر ساعتی ET_r با یکدیگر در روز گذر ماهواره به دست آمده است. با توجه به نبود لایسیمتر در سطح شهرستان ملایر، ناگزیر از تنها ایستگاه سینوپتیک شهر ملایر که اطلاعات هواشناسی را ثبت می‌کند، به عنوان ایستگاه مرجع برای کنترل نتایج و نقشه‌های تولیدشده جهت ارزیابی مدل‌ها در سطح منطقه استفاده شده است. مقادیر حداکثر تبخیر و تعرق برآوردشده با مدل سبال و متریک با مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده با فرمول فائو - پنمن - مانتیث (براساس چارچوب اشاره شده برای روز 1391/2/24 مصادف با زمان اخذ تصویر MODIS) مقایسه شده است.

4- یافته‌های تحقیق

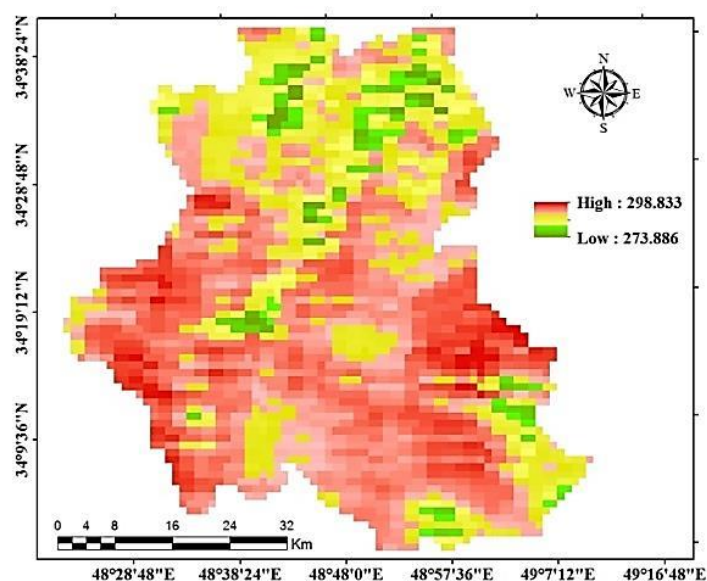
نتایج برآورد تبخیر و تعرق روزانه به دو روش سبال و متریک نشان می‌دهد در مکان‌هایی که دارای پوشش گیاهی انبوه و مقادیر NDVI دارای ارزش زیاد است، دمای سطحی کمتری مشاهده می‌شود و برعکس، در مناطقی که مقادیر NDVI کمتری دارند و در نتیجه دارای پوشش تنک و خاک لخت هستند، دمای سطحی زیادتر است که این شرایط به دلیل نبود منبعی برای تبخیر و تعرق است. این جریان نشان‌دهنده مقادیر تبخیر و تعرق زیاد در نواحی با NDVI زیاد و مقادیر تبخیر و تعرق کم در نواحی با مقدار NDVI کم است. بنابراین، چارچوب محاسبات و روند ارزشی پیکسل‌ها در نقشه تولیدشده صحیح است و در ادامه، باید صحت نتایج و ارزش مقدار تبخیر و تعرق برآوردشده در هر پیکسل تأیید و علت اختلاف‌ها تشریح شود. با توجه به نتایج جدول یک و شکل‌های دو و سه، الگوریتم سبال با میانگین تبخیر و تعرق 6/83 میلی‌متر در روز، در مقایسه با الگوریتم متریک با مقدار میانگین تبخیر و تعرق 7/21 میلی‌متر در روز، 5/26 درصد میانگین تبخیر و تعرق واقعی روزانه را در محدوده شهرستان ملایر کمتر برآورد کرده است. میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه شهرستان ملایر برای ماه اردیبهشت به طور متوسط معادل 7/58 میلی‌متر از تشتک تبخیر به صورت نقطه‌ای

اردوان قربانی و همکاران _____ ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های سبال و ...

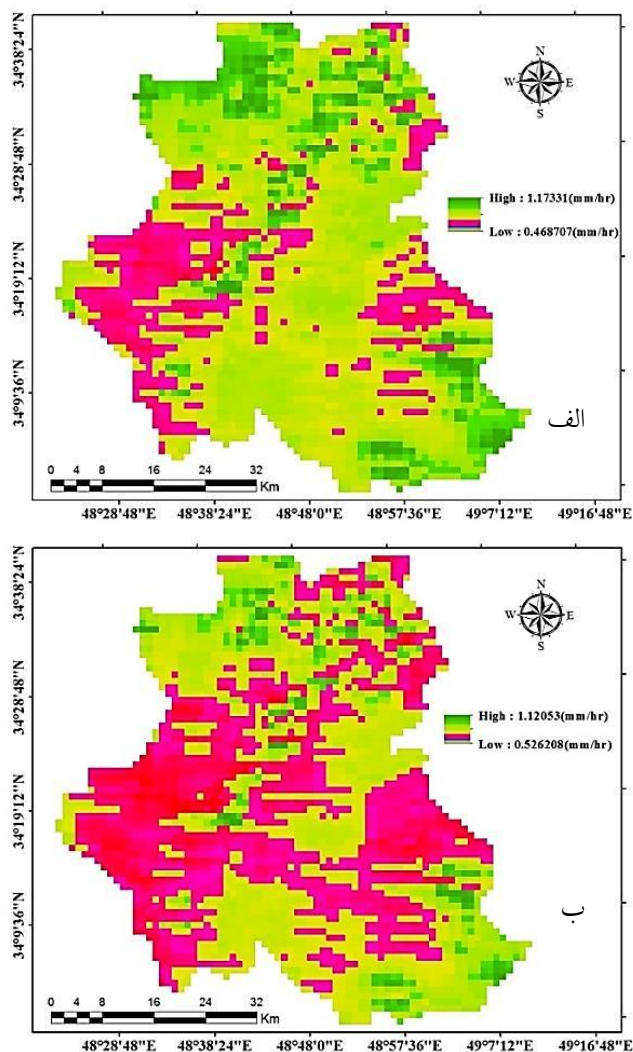
برای شهر ملایر ثبت شده است؛ اما با توجه به موقعیت شهر ملایر که تقریباً در گودی قرار گرفته، تغییرات ارتفاعی 1728 متری سطح شهرستان (شکل 1)، قرار گرفتن بخش زیاد شهرستان در ارتفاع بالاتر از شهر ملایر و همچنین با توجه به همبستگی منفی بین ارتفاع و تبخیر و تعرق، مقدار متوسط آن در سطح شهرستان 6/86 میلی‌متر براساس روش فائو- پنمن- مانیتث است. بنابراین، الگوریتم سبال در مقایسه با مدل متریک نتایج نزدیک‌تری به‌دست داده است.

جدول 2 نتایج برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از دو مدل سبال و متریک برای شهرستان ملایر

ET (Total)	Area	St dev.	Mean ET24	Max ET24	
(10 ⁶ * lit/day)	(ha)	تبخیر و تعرق	mm/day	mm/day	مدل
21910/64	320800	1/13	6/83	10/73	سبال
23129/68	320800	0/91	7/21	10/24	متریک



شکل 2 دمای سطحی محاسبه‌شده (کلوین) در محدوده شهرستان ملایر با استفاده از تصاویر MODIS



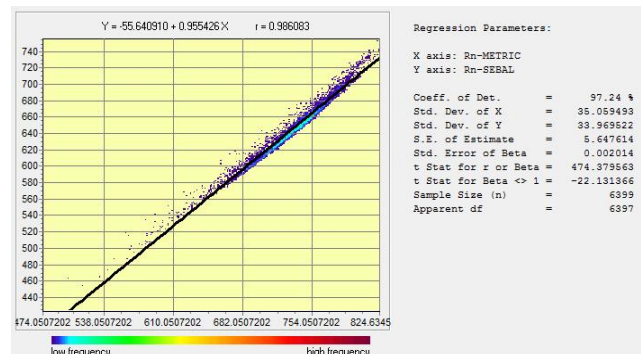
شکل 3 مقدار تبخیر و تعرق محاسبه‌شده با استفاده از تصویر MODIS و دو الگوریتم: الف: سبال، ب: متریک در سطح شهرستان ملایر

نتایج بررسی علل تفاوت در مقادیر برآوردشده تبخیر و تعرق به دو روش سبال و متریک، براساس مؤلفه‌های اصلی معادله بیلان به‌دست‌آمده از دو الگوریتم نام‌برده تحت عنوان R_n و G ، H در شکل چهار ارائه شده است. R_n شار تابش خالص است. نتایج

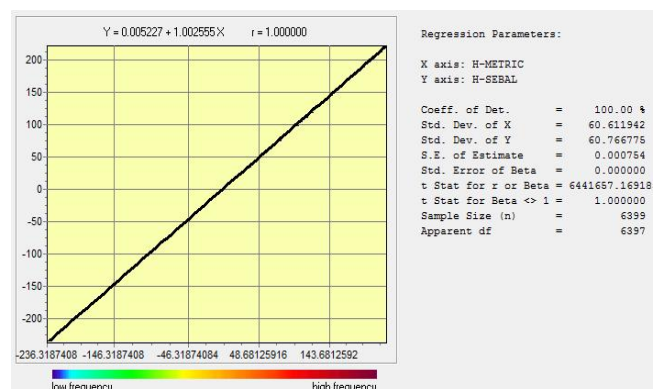


برآورد R_n با استفاده از مدل سبال و متریک از هم‌بستگی بسیار زیادی برخوردار است و دلیل اختلاف جزئی در نتایج، تفاوت این دو الگوریتم در چگونگی محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری است (امیدوار و همکاران، 1392: 17) که در استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک به این تفاوت اشاره شده است. با توجه شکل چهار، مقدار R_n محاسبه شده با روش متریک میزان بیشتری را در مقایسه با الگوریتم سبال برآورد کرده است؛ هرچند امیدوار و همکاران (1392) و تاسومی (2005) به چنین مشکلی اشاره نکرده‌اند. گفتنی است نتایج شکل چهار مربوط به تصویر اردیبهشت است و نمی‌توان این فرآورد را به تمام ماه‌های سال نسبت داد. در روش سبال، مقدار ضریب شفافیت اتمسفری در تمام ماه‌های سال ثابت است؛ چون فقط به ارتفاع منطقه بستگی دارد؛ اما در روش متریک، پارامترهایی همچون مقدار بخار اتمسفر، فشار هوا و زاویه زنیت خورشیدی نیز دخیل‌اند که این پارامترها مطابق با زمان تغییر خواهند کرد. بنابراین به نظر می‌رسد نمودار مقدار برآورد R_n با استفاده از این دو روش در تمام زمان‌ها برآورد یکسان و ثابتی نداشته باشد. به‌منظور بررسی این مسئله لازم است تا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف، مقادیر R_n با استفاده از دو روش ضریب شفافیت اتمسفری، به‌ویژه در ماه‌های مختلف سال برآورد شود تا بتوان چگونگی برآورد R_n را در سایر فصول بهتر بررسی کرد. شار گرمای خاک محاسبه شده براساس معادله‌های پنج و شش در شکل چهار درمقابل یکدیگر رسم شده است.

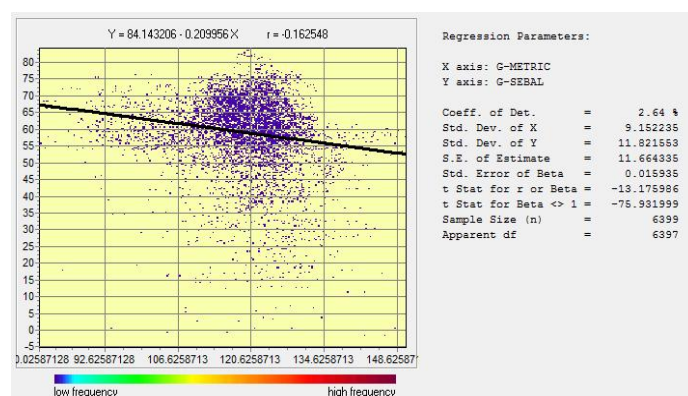
در شکل چهار (الف، ب، ج) بین دو پارامتر گرمای محسوس و تابش خالص در دو مدل سبال و متریک، تقریباً هم‌بستگی خوب و معناداری برقرار است که امیدوار و همکاران (1392: 17) نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. با توجه به مطالعات قبلی امیدوار (1390: 10)، دلایل انحراف اندک تابش خالص در دو مدل تشریح شده است. شار گرمای خاک هم‌بستگی ضعیفی دارد که نشان‌دهنده نبود رابطه مشخصی بین دو روش یادشده است. با توجه به اینکه شار گرمای خاک در دو روش با روابط تجربی جداگانه‌ای محاسبه شده و از آنجا که در محاسبه مقدار G از پارامترهای LAI ، $NDVI$ ، آلبدو و دمای سطح زمین استفاده شده، این اختلاف ظاهراً گریزناپذیر است. به‌منظور بررسی علل وجود این ناهم‌بستگی، شار گرمای خاک براساس هریک از چهار پارامتر یادشده در شکل پنج رسم شده است.



الف



ب

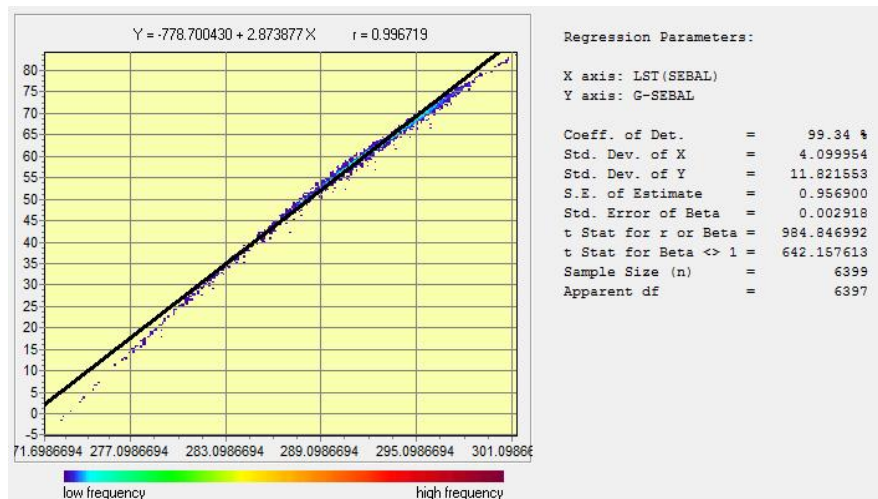


ج

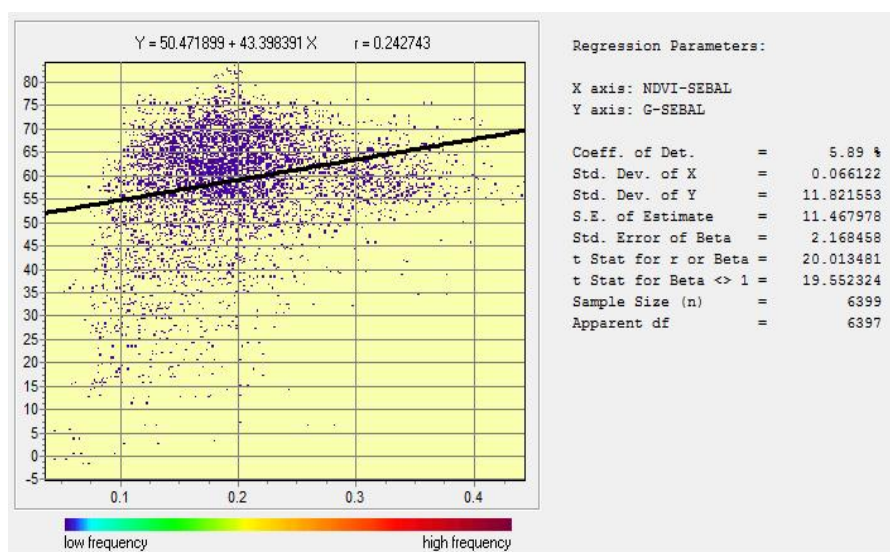
شکل 4 نمایش هم‌بستگی پارامترهای الف: Rn، ب: H، ج: G، محاسبه‌شده با دو الگوریتم سبال و متریک



در میان پارامترهای یادشده، تنها پارامتر دمای سطحی با مقدار شار گرمای خاک سیال هم‌بستگی تقریباً کاملی دارد که نشان می‌دهد هرچه دمای سطحی زمین بیشتر باشد، مقدار شار گرمای خاک زیادتر است و برعکس (شکل مربوط به دمای سطحی و شار گرمای خاک کاملاً گویای این مطلب است). با توجه به شاخص NDVI محاسبه‌شده، ارزش بیشتر نقاط در محدوده 0/1 تا 0/2 است و این دامنه تغییرات در این شاخص مربوط به پوشش خاکی است که شار گرمای زیادی دارد و رابطه خوبی در تصویر برقرار کرده است؛ ولی در سایر نقاطی که دارای انحراف است، احتمالاً به دلیل قدرت تفکیک تصویر MODIS است که با توجه به بزرگی پیکسل (1000 متر) و به دلیل سهم هر پیکسل از عوارض - با توجه به کاربری‌های شهرستان ملایر و توپوگرافی ناهمسان آن - برای نتایج بهتر، باید عملیات زیرپیکسل برای این کار انجام شود. در پارامتر LAI و آلبدو نیز وضعیت به همین ترتیب است. آلبدو هم‌بستگی ضعیفی با مقدار شار گرمای نهان برقرار کرده است؛ اما با توجه به اینکه بیشتر نقاط آن رابطه معکوس با مقدار شار نشان داده‌اند، یعنی باوجود داشتن شار گرمای نهان زیاد، دارای آلبدوی کمی هستند. در نقاطی که مقدار آلبدو زیاد است، مقدار کمتری انرژی ذخیره شده و در مکان‌هایی که دارای آلبدو کم هستند، مقدار انرژی بیشتری در خاک نگه‌داری شده است. در پارامتر LAI نیز با توجه به فشردگی نقاط در محدوده پایین مقدار LAI، یعنی در مکان‌هایی که مقدار LAI یا پوشش گیاهی کمتر است، مقدار گرمای بیشتری در خاک ذخیره شده است. علت زیاد بودن شار گرمای نهان با توجه به LAI بالا در مکان‌هایی که این شرایط را دارند، پیکسل‌های مخلوط در تصویر MODIS است.

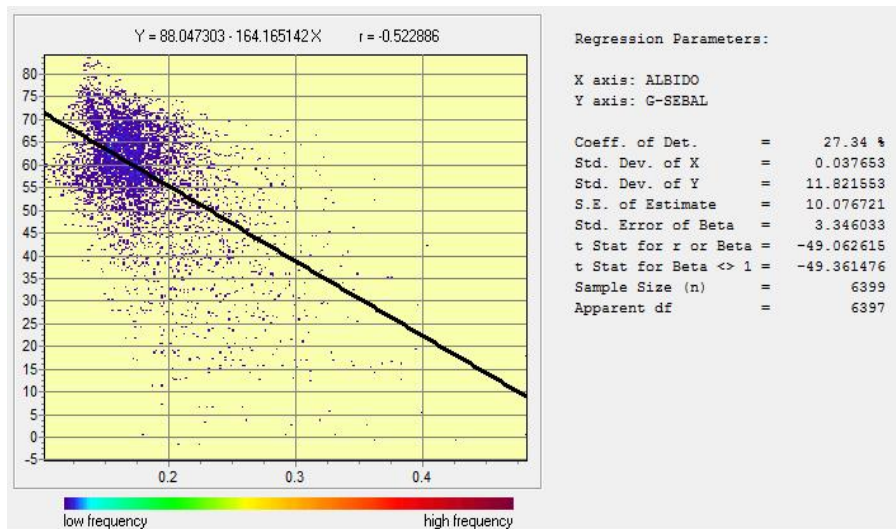


الف

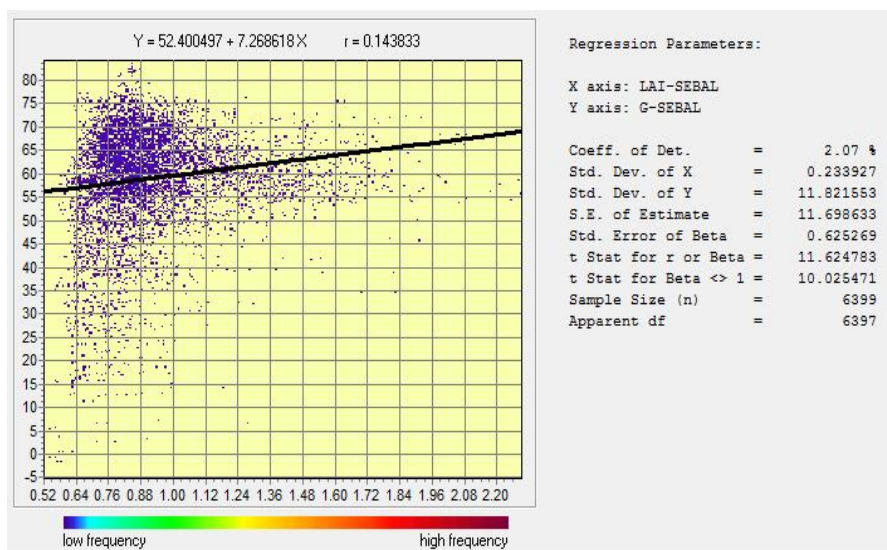


ب

شکل 5 ادامه در صفحه بعد



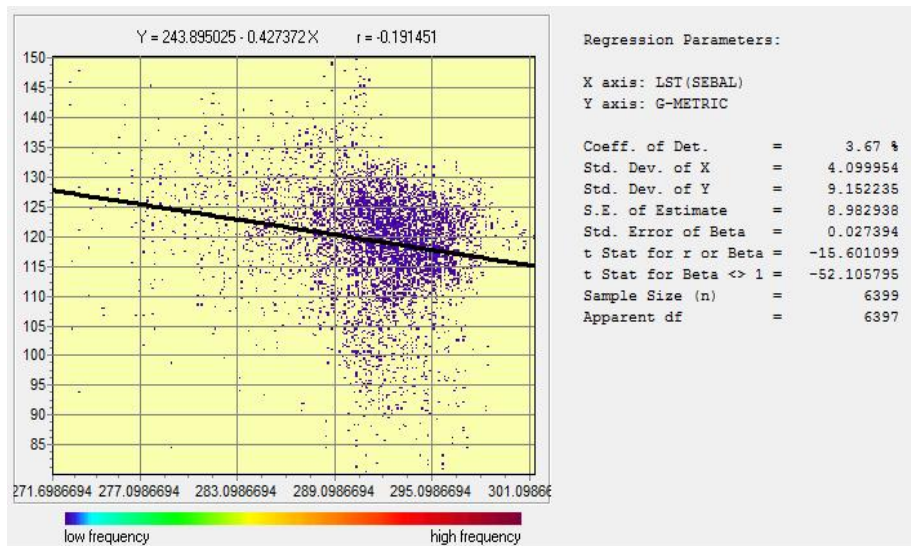
ج



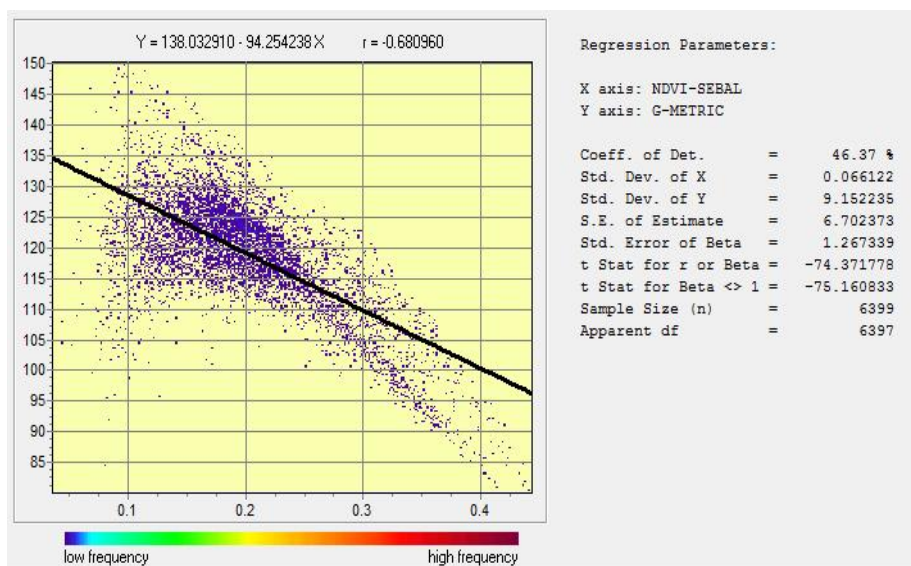
د

ادامه شکل 5 همبستگی شار گرمای خاک (سبیل) با پارامترهای الف: دمای سطحی زمین، ب: NDVI، ج: آلبيدو،

د: LAI

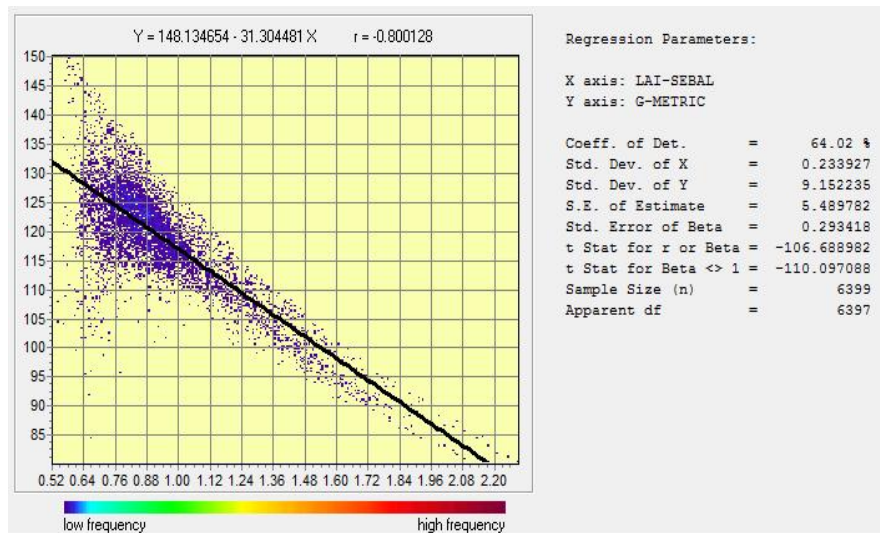


الف

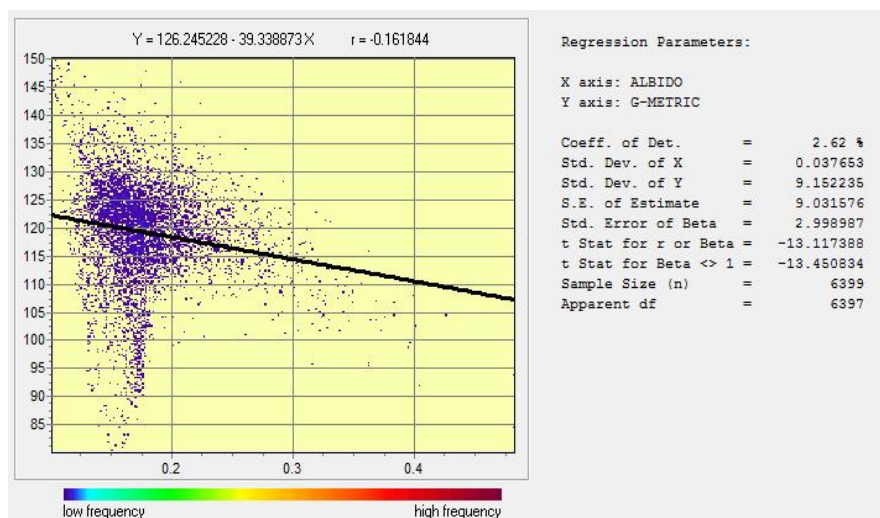


ب

شکل 6 ادامه در صفحه بعد



ج



د

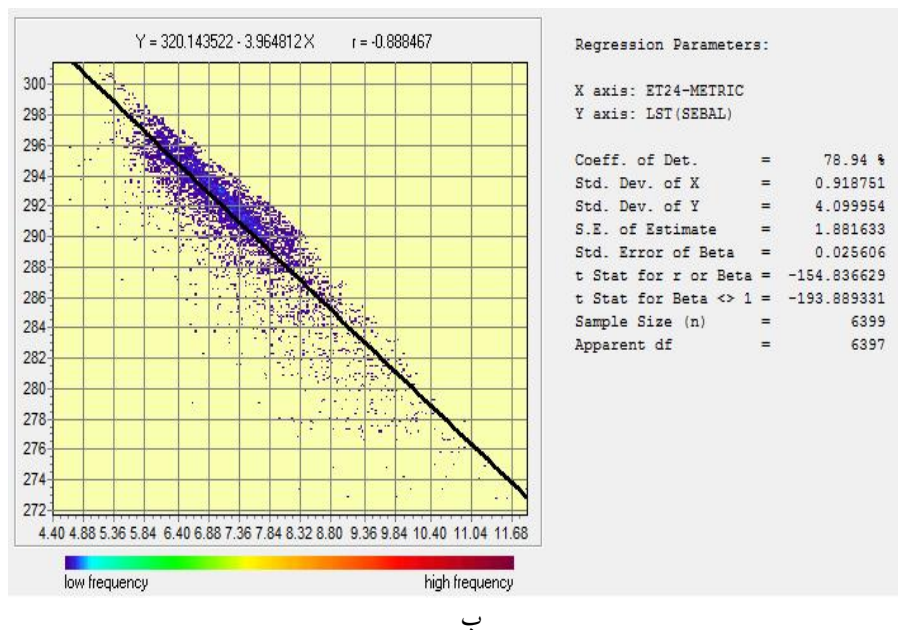
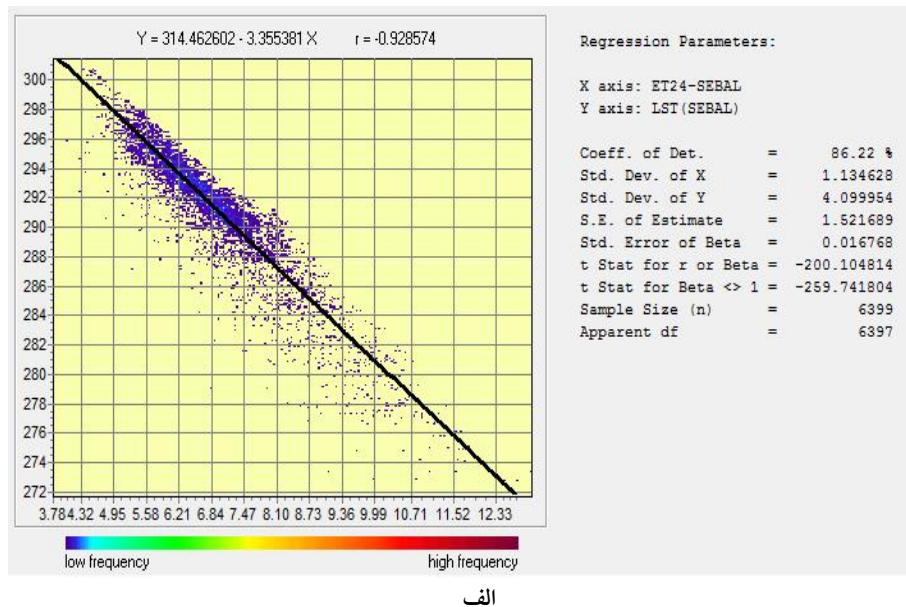
شکل 6 همبستگی شار گرمای خاک (متریک) با پارامترهای الف: دمای سطحی زمین، ب: NDVI، ج: LAI، د: آلبدو

شار گرمای نهان در مدل متریک - به دلیل اینکه از شاخص LAI به جای شاخص‌های مناسب‌تر پوشش گیاهی استفاده کرده - در مقایسه با شار گرمای نهان الگوریتم سبال، مقادیر بیشتری دارد (شکل 6). به طور کلی، LAI شاخص مطلوبی در این زمینه نبوده است؛ زیرا به دلیل استفاده از روابط تجربی است که برای منطقه آیداهو جنوبی پیش‌نهاد شده و ضرورت دارد قبل از استفاده از این روابط تجربی برای محل مطالعه (شهرستان ملایر)، کالیبره یا واسنجی شود. امیدوار و همکاران (1392: 18) در استفاده از این دو الگوریتم به این تفاوت اشاره کرده و به نتایج مشابهی دست یافته‌اند: هم‌بستگی مقدار شار گرمای نهان با دمای سطحی در مدل متریک در مقایسه با مدل سبال، ضعیف بوده است. امیدوار (1391: 19) نیز به نتایجی همسان در مطالعه خود رسید؛ ولی با توجه به مقدار شار گرمای نهان در مدل سبال در مقایسه با مقادیر مدل متریک، با توجه به دما، بیشتر نقاط در این نمودار (شکل 7) دارای ارزش است؛ زیرا در مقادیر دمای زیاد، مقادیر شار گرمای نهان مدل متریک نیز در مقایسه با مقادیر شار گرمای نهان در مدل سبال افزایش می‌یابد و مقدار انحراف این رابطه در قسمتی بیان شده که با کاهش دما، مقدار شار گرمای نهان زیاد می‌شود؛ علت این مسئله استفاده از شاخص LAI در برآورد مقادیر شار گرمای نهان در مدل متریک است. با واسنجی رابطه شاخص LAI در منطقه این مشکل را می‌توان حل کرد. پارامترهای LAI، NDVI و آلبدو نیز در هم‌بستگی با شار گرمای نهان مدل متریک دارای وضعیتی مشابه‌اند. در نمودار هم‌بستگی شاخص NDVI با شار گرمای نهان مدل متریک کاملاً نمایان است که این دو پارامتر دارای هم‌بستگی معکوس‌اند و با افزایش هر پارامتر، پارامتر دیگر کاهش پیدا می‌کند و برعکس، با کاهش هر پارامتر، پارامتر دیگر افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه همانند روش سبال، بیشتر نقاط در این نمودار در مکان‌هایی با شار گرمای نهان زیاد و مقادیر NDVI بین 0/1 تا 0/2 واقع شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت این مقدار انحراف قابل اغماض است. در نمودار هم‌بستگی شاخص LAI و شار گرمای نهان مدل متریک نیز شرایطی کاملاً شبیه به شاخص NDVI شکل گرفته است. در نمودار هم‌بستگی آلبدو نیز



مانند روش سبال، بیشتر نقاط با آلبیدوی کم، مقادیر شار گرمای نهان زیادی دارند که در شرایطی نیز دارای انحراف‌اند که به دلیل پیکسل‌های بزرگ و شرایط توپوگرافی و پوششی ناهمسان است. با توجه به دلایل ذکرشده و اینکه برای به دست آوردن پارامتر شار گرمای نهان در دو مدل سبال و متریک از روابط تجربی استفاده شده و این روابط تجربی از شاخص‌هایی استفاده می‌کنند که با توجه به شرایط منطقه دیگر پیش‌نهاد شده‌اند، باید واسنجی شوند. همچنین، به دلیل اینکه این شاخص‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS محاسبه شده و شهرستان ملایر با توجه به پیکسل‌های بزرگ تصاویر، دارای شرایط کاملاً ناهمگن از لحاظ پستی و بلندی و پوشش گیاهی است، این مشکل ناهم‌بستگی در شار گرمای نهان در دو مدل را شکل داده است.

براساس آنچه تاکنون درباره علل وجود اختلاف بین برآوردهای تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک مطرح شد و با عنایت به مقدار تبخیر و تعرق به دست آمده در هر دو روش در شکل سه، الگوریتم سبال در دمای پایین و الگوریتم متریک در دمای بالا دارای فراب‌آورد است. علت این امر، در مقادیر شار گرمای خاک و مقدار تابش خالص با توجه به روش‌های متفاوت به دست آوردن این پارامترها در هر دو الگوریتم سبال و متریک است. در ادامه، ارتباط مقدار تبخیر و تعرق در هر دو الگوریتم با مقدار دمای سطحی بررسی شده است که دارای هم‌بستگی مشابهی است و با افزایش دما، مقدار تبخیر و تعرق کاهش پیدا می‌کند؛ در نتیجه دارای هم‌بستگی معکوس با دمای سطحی است و فراب‌آورد مقدار تبخیر و تعرق در دماهای پایین در الگوریتم سبال و فراب‌آورد در دماهای بالا در الگوریتم متریک را نشان می‌دهد.



شکل 7 هم‌بستگی تبخیر و تعرق 24 ساعته محاسبه شده الف: الگوریتم سبال، ب: الگوریتم متریک با دمای سطحی

5- نتیجه

وجود الگوریتم‌ها و روش‌های متفاوت برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از یک سو و تولید روش‌های جدید که برخی دارای تفاوت‌های بسیار با الگوریتم‌های پیشین‌اند از سوی دیگر، نشان‌دهنده پیشرفت روزافزون دانش هوا و اقلیم‌شناسی با کاربرد سنجش از دور است. اما بررسی بیشتر در این زمینه ضروری است تا ابتدا روش‌های موجود به‌دقت واکاوی و سپس روش‌های جدیدتر همراه با صحت برآورد بهتر ارائه شود.

این تحقیق با بررسی اختلاف بین دو الگوریتم سبال و متریک برای محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از تصویر MODIS و توجیه اختلاف‌ها انجام گرفت. براساس نتایج، در ماکزیمم تبخیر و تعرق منطقه، الگوریتم سبال مقدار بیشتری نسبت به متریک برآورد کرده که نشانه فرابراورد این روش در دماهای پایین است. اما در کل، الگوریتم سبال در مقایسه با الگوریتم متریک دارای مقدار کمتری است که فرابراورد الگوریتم متریک در دماهای پایین را نشان می‌دهد. در محدوده شهرستان ملایر، نتایج الگوریتم سبال با میانگین تبخیر و تعرق $6/83$ میلی‌متر در روز و الگوریتم متریک با مقدار میانگین $7/21$ میلی‌متر در روز است. علت این اختلاف استفاده از معادلات متفاوت در محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری و شار گرمای خاک است. بخش عمده این تفاوت‌ها به دلیل اختلاف زیاد در مقادیر شار گرمای خاک محاسبه‌شده با دو روش نام‌برده است. براساس مطالعه صورت‌گرفته، شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در شار گرمای خاک - که در منطقه مورد مطالعه واسنجی نشده‌اند - و شرایط منطقه از لحاظ توپوگرافی و پوششی با توجه به اندازه پیکسل تصویر MODIS بیشترین تأثیر را در ایجاد این اختلاف داشته‌اند. بنابراین، لازم است تا به‌منظور رفع این اختلاف‌ها، کالیبراسیون و واسنجی مطالعات بیشتری صورت گیرد.

6- منابع

- امیدوار، جواد، برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم متریک با استفاده از تصاویر /ستر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، 1390.

- امیدوار، جواد و همکاران، «برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک»، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، س 3، ش 12، صص 12- 20، 1392.
- باقری، محمدحسین و همکاران، «مقایسه مدل‌های سنجش از دور تک‌منبعی و دو‌منبعی شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز»، سنجش از دور و GIS/ایران، س 4، ش 1، صص 81- 96، 1391.
- کریمی، علیرضا، بهمن فرهادی بانسوله و همایون حصادی، «برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست»، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ج 6، ش 4، صص 353- 364، 1391.
- نوری، سمیرا، برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر سنجنده مودیس در زیرحوضه آبریز مشهد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، 1389.
- Allen, R.G. Et al., "SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho implementation", *Advanced Training and User's Manual*, Version 1.0, 2002.
- Allen, R.G., M. Tasumi & A. Morse, "Satellite-Based Evapotranspiration by METRIC and Landsat for Western States Water Management", *US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop*, Feb 8-10, 2005, Ft. Collins, 2005.
- Allen, R.G., M. Tasumi & R. Trezza, "Satellite-based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) Model", *J. Irri. Drain. Eng.*, Vol. 133, No. 4, Pp. 380- 394, 2007.
- Almhab, A. & I. Busu, "Estimation of Evapotranspiration with Modified SEBAL Model Using Landsat-TM and NOAA-AVHRR images in Aride Mountains Area", *Proceedings of Second Asia International Conference on Modelling & Simulation*, 13-15 May, Kuala Lampur, Pp. 350- 355, 2008.
- Bagheri, M.H. Et al., "Compression Remote Sensing Single Source and two Sources Models Energy Flux in the Real Evapotranspiration Estimate", *J. Rem. Sen. GIS*, Yr. 4, No. 1, Pp. 81-96, 2012. [in Persian]

- Bastiaanssen, W.G.M. Et al., "A remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1.Formulation", *J. Hydrol.*, Vol. 212-213, Pp. 198-212, 1998.
- _____ "SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Condition", *J. Irri. Drain. Eng.*, No. 131(1), Pp. 85-93, 2005.
- Bastiaanssen, W.G.M., "SEBAL-based Sensible and Latent Heat Fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey", *J. Hydrol.*, Vol. 229, Pp. 87- 100, 2000.
- Chavez, J.L. Et al., "An Application of METRIC for ET Mapping in the Texas high plains", December 9- 11, 2007, *Irrigation Association CD-ROM, San Diego*, Pp. 268-283, 2007.
- Folhes, M.T., C.D. Renno & J.V. Soares, "Remote Sensing for Irrigation Water Management in the Semi-Arid Northeast of Brazil", *Agri. Water Manag*, Vol. 96, Pp. 1398- 1408, 2009.
- Hafeez, M.M. Et al., "Field Evapotranspiration Estimation in Central Luzon, Philippine, Using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra MODIS and Aster", *Proceedings of Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application. Ottawa, Canada*, 2002.
- Huete, A.R., "A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)", *Rem. Sen. Environ.*, Vol. 25, Pp. 295-309, 1988.
- Jacob, F. Et al., "Mapping Surface Fluxes Using Visible-Near Infrared and Thermal Infrared Data with the SEBAL Algorithm", *J. Agron*, Vol. 22, Pp. 669-680, 2002.
- Karimi, A., B. Farhadi & H. Hesadi, "Evaluate Real Evapotranspiration at the Regional Scale Using SEBAL Algorithm and Landsat Imagery", *J. Irri. Water Eng. Vol. 6, No. 4*, Pp. 353-364, 2013. [in Persian]
- Li, F. & T.J. Lyons, "Remote Estimation of Regional Evapotranspiration", *Environ. Mod. Soft.*, Vol. 17, Pp. 61-75, 2002.

- Mutiga, J., Zh. Su & T. Woldai, "Using Satellite Remote Sensing to Assess Evapotranspiration: Case Study of the Upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya", *Int. J. App. Earth Obser. Geoinfo.*, Vol. 12, Pp. 100-108, 2010.
- Nouri, S., *Evaluation of Real Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and MODIS Imagery in the Mashhad Sub Basin*, Master Thesis, Department of Water Engineering, Ferdowsi University, 2011. [in Persian]
- Omidvar, J. Et al., "Evaluation and comparison of the SEBAL and METRIC Algorithms in the Estimation of Evapotranspiration", *J. Irri. Water Eng*, Yr. 3, No. 12, Pp. 12-20-2013. [in Persian]
- Omidvar, J., *Evapotranspiration Estimate Using METRIC Algorithm and ASTER Image*, Master Thesis, Department of Water engineering, Ferdowsi University., 110.2012. [in Persian]
- Paul, G. Et al., "Investigating the Influence of Roughness Length for Heat Transport (zoh) on the Performance of SEBAL in Semi-Arid Irrigated and Dryland Agricultural Systems", *J. Hydrol*, Vol. 509, Pp. 231-244, 2014.
- _____ "Lysimetric Evaluation of SEBAL Using High Resolution Airborne imagery from BEAREX08", *Advan. in Water Resou*, Vol. 59, Pp. 157-168, 2013.
- Shu, Y. Et al., "An Evapotranspiration (ET) Model Based GIS Using LANDSAT Data and MODIS Data with Improved Resolution", *J. Rem. Sen. Environ. Mon. GIS App., and Geo*, Vol. 6, Pp. 63-66, 2006.
- Song, C. Et al., "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effect", *Rem. Sen. Environ.*, Vol. 75, Pp. 230-244, 2001.
- Tasumi, M. Et al., "U.S. Validation Tests on the SEBAL Model for Evapotranspiration Via Satellite", *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for large Regions*, 17 Sept, 2003.
- Tasumi, M., R.G. Allen & R. Trezza, "Operational Aspects of Satellite-Based Energy Balance Models for Irrigated Crops in the Semi-Arid U.S", *Irri. and Drain. Sys*, Vol. 19, Pp. 355-376, 2005.

- Trezza, R., "Estimation of Evapotranspiration from Satellite-Based Surface Energy Balance Models for Water Management in the Rio Guarico Irrigation System, Venezuela", *Universidad de los Andes, NURR-CIDIAT*, 2006.
- Wang, J., R. Kimura & W. Bastiaanssen, "Monitoring ET with Remote Sensing and the Management of Water Resources on a Basin Scale", *The 11th CReS International Symposium on Remote Sensing Japan*, 2005.
- Yuting, Y., Sh. Songhao & J. Lei, "Remote Sensing Temporal and Spatial Patterns of Evapotranspiration and the Responses to Water Management in a Large Irrigation District of North China", *Agri. and For. Met.*, Vol. 164, Pp. 112-122, 2012.
- Zhongping, S. Et al., "Evapotranspiration Estimation Based on the SEBAL Model in the Nansi Lake Wetland of China", *Math. and Com. Mod*, Vol. 54, Pp. 1086-1092, 2011.