

مقایسه تبخیر تفرق واقعی حاصل از داده‌های لایسیمتری و الگوریتم SEBAL در دشت کرمان، با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS

سعید دلگرم^{۱*}، مرتضی رحیم‌پور^۲، بهرام بختیاری^۲، نسرین سیاری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، بخش مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استادیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴. استادیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱/۲۲)

چکیده

در این مقاله، در ایستگاه مورد مطالعه‌ای واقع در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان، با عرض جغرافیایی $30^{\circ}15'$ شمالی و طول جغرافیایی $58^{\circ}58'$ ، که به لایسیمتر وزنی الکترونیکی و دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی مجهز بود، با استفاده از ۱۵ تصویر منتخب سنجنده MODIS، که مربوط به بهار و تابستان ۱۳۸۶ است، مقدار تبخیر-تفرق واقعی در منطقه مطالعاتی برآورد و نتایج حاصله با داده‌های زمینی حاصل از لایسیمترهای موجود در منطقه مقایسه شد. نتایج قابل قبول RMSE برابر با ۰/۶۲۴۱۹، NOF برابر با ۰/۰۹۰۷۹ و EF برابر با ۰/۸۷۶۳۶ به دست آمد. همچنین، ضریب تبیین ۰/۷۱ بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نشان داد که این الگوریتم در برآورد تبخیر-تفرق واقعی دقت بالایی دارد. پس از برآورد پارامترهای دمای سطح زمین، آلبیدو، شاخص‌های پوشش گیاهی، گسیلندگی سطح و تابش خالص با توجه به تفکیک پیکسل لایسیمتر در منطقه، نقشه توزیع مکانی تبخیر-تفرق روزانه در سطح منطقه ترسیم شد.

کلیدواژگان: تبخیر-تفرق واقعی، سنسجش‌ازدور، لایسیمتر، MODIS، SEBAL.

مقدمه

تبخیر-تفرق^۱ 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 مختلفی نظیر هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل، مرتع و مدیریت منابع آب مورد نیاز است (Sanayinezhad *et al.*, 2011). تخمین میزان تبخیر-تفرق بر مبنای روابط تجربی، همواره مورد توجه بوده است. مبنای بیشتر روش‌های ارائه‌شده بر پایه روابط بین پارامترهای هواشناسی است که کمبود یا نقصان این داده‌ها، استفاده از این روش‌ها را با محدودیت روبرو می‌کند (Farshi *et al.*, 2011). از طرفی، این اطلاعات، نقطه‌ای و به ایستگاه‌های هواشناسی مربوط است و برآورد خاص خود را دارند (Allen *et al.*, 2003). سنسجش‌ازدور این قابلیت را دارد که مقدار تبخیر-تفرق را تخمین بزند و توزیع مکانی و زمانی آن را بررسی کند، زیرا تنها روشی است که می‌تواند پارامترهای معروفی نظیر دمای سطحی،

ضریب آلبیدو و شاخص پوشش گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط فراهم کند و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. بنابراین، در سطوح بسیار وسیع، مانند حوضه‌ها، لازم است از روش‌ها و مدل‌های مختلف سنسجش‌ازدور استفاده شود. الگوریتم SEBAL^۲ از الگوریتم‌های بیلان انرژی روی سطح است که برای محاسبه شار گرمای نهان به‌منزله باقی‌مانده معادله بیلان انرژی استفاده می‌شود. Bastiaanssen & Menenti (1989) این الگوریتم را نخستین بار برای برآورد تبخیر از سفره‌های کم‌عمق آب زیرزمینی استفاده کردند. Bastiaanssen & Menenti (2002) این الگوریتم را توسعه دادند و به منظور اعتبارسنجی آن از اندازه‌گیری‌های وسیع میدانی در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده کردند. نتایج نشان داد که در ۸۵ درصد موارد پارامترهای به‌دست‌آمده از سبال با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بدون هیچ‌گونه واسنجی مطابقت داشتند. تحقیقات وسیع و گوناگونی در زمینه استفاده از این الگوریتم در زمینه محاسبات میدانی و در موضوعات مختلف در سطح جهان انجام گرفته است. در تحقیقی دیگر، در ایالات

* نویسنده مسئول: Delgarm.s@Gmail.com

1. Evapotranspiration

2. Surface Energy Balance Algorithm for Land

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

ایستگاه مطالعه شده در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان با عرض جغرافیایی $30^{\circ}15'$ شمالی و طول جغرافیایی $56^{\circ}58'$ شرقی و متوسط ارتفاع $1753/8$ متر از سطح دریا واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه منطقه براساس آمار ۴۰ ساله (۱۹۷۴-۲۰۱۳) ایستگاه سینوپتیک کرمان، $164/1$ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین، میانگین دمای هوا در منطقه $18/1$ درجه سانتی‌گراد، متوسط دما در سردترین ماه برابر $4/6$ درجه سانتی‌گراد و متوسط دما در گرم‌ترین ماه سال $35/7$ درجه سانتی‌گراد بوده است. این ایستگاه به لایسیمتر وزنی الکترونیکی و دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی مجهز است و اطراف آن را زمین‌های کشاورزی و تحت آبیاری دربرگرفته است. شایان ذکر است کشت غالب منطقه مطالعاتی، که در قسمت غربی دشت کرمان واقع شده‌اند، پسته است.

اطلاعات لایسیمتر

در محدوده مطالعه شده یک لایسیمتر وزنی الکترونیکی، که نمایی از آن در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است، به شعاع ۲ متر و به عمق ۵ متر احداث شده است. این لایسیمتر در مرکز زمینی به مساحت 400 متر مربع مقادیر تبخیر- تعرق گندم و گیاه مرجع چمن را اندازه‌گیری می‌کند. داده‌برداری‌های لایسیمتری از تاریخ ۱ مهرماه ۱۳۸۴ آغاز شد و به‌صورت روزانه تا تاریخ ۲۹ اسفند ۱۳۸۷ ادامه یافت.

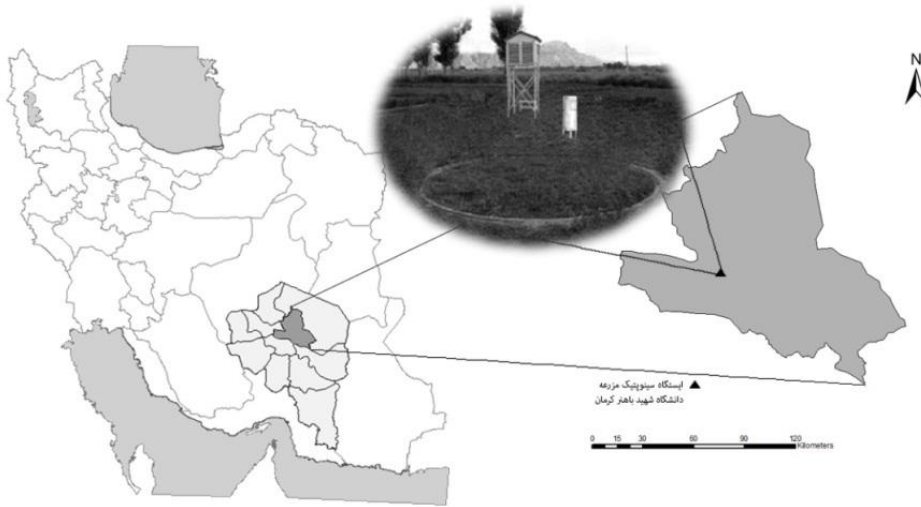
تصاویر ماهواره‌ای

به‌منظور اجرای این تحقیق، از ۱۵ تصویر ماهواره‌ای Terra سنجنده MODIS، که از طریق وب‌سایت سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا^۴ تهیه و زمین مرجع شدند، استفاده شد. این تصاویر، به بهار و تابستان ۱۳۸۶ مربوط است و تاریخ و مشخصات تصاویر استفاده‌شده در جدول ۱ آمده است. تصحیحات رادیومتریکی شامل اعمال هیستوگرام‌ها جهت بهبود کنتراست تصاویر و اعمال فیلترها جهت حذف ابرناکی برخی تصاویر فروردین‌ماه انجام شد. پراکنش اتمسفریک نیز با استفاده از تکنیک رفلکس پیکسل سیاه شناسایی و برطرف شد. کلیه عملیات پردازش و تجمیع تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار ENVI انجام گرفت، سپس فلوچارت مربوط به الگوریتم SEBAL در محیط IDL کدنویسی شد. این دیاگرام در شکل ۴ آمده است.

متحد در دره رودخانه بیر، Allen et al. (2002) با به کار بردن SEBAL به مقایسه نتایج با مقادیر لایسیمتری پرداختند. مقادیر ET^۱ ماهانه ۱۶ درصد و فصلی ۴/۳ درصد با مقادیر لایسیمتری تفاوت داشتند. این محققان مقادیر Kc^2 را در طول فصل رشد توسط ET^۳ و با استفاده از داده‌های زمینی محاسبه کردند. Sun et al. (2011) SEBAL را با استفاده از تصاویر Landsat برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی به‌منظور کاربری‌های مختلف و برای حوضه دریاچه نانسی در چین اجرا و نتایج مثبتی را از آن گزارش کردند. نتایج نشان‌دهنده مقادیر پایین خطا RMSE برابر با $0/38$ میلی‌متر در روز برای این مدل بود. همچنین (2013) George et al. در مطالعه موردی در یکی از مزارع تک‌زاس آمریکا مؤتلفه آبرودینامیکی مربوط به محاسبه دمای سطحی خاک را در شرایط شفافیت اتمسفری بالا، برای دو پیکسل سرد و گرم در دو نوع پوشش گیاهی با کشت و بافت متفاوت اندازه‌گیری و باهم مقایسه کردند. آن‌ها در ادامه، تبخیر واقعی محاسبه‌شده از سوی الگوریتم سبال را با داده‌های لایسیمتری موجود مقایسه کردند و به RMSE مساوی با $0/13$ و R^2 برابر با $0/75$ دست یافتند. (2012) Bagheri et al. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده لایسیمتری برای ۶ گذر سنجنده MODIS در مزرعه کشاورزی دانشگاه تبریز، دقت مدل را حدود ۸۰ درصد در سطح مزرعه کشاورزی برآورد کردند. همچنین، در این تحقیق، مدل SEBAL با سایر مدل‌های سنجش‌ازدور مطرح نظیر METRIC و TSEB مقایسه و ارزیابی شد و در نهایت مدلی مناسب برای به‌کارگیری در سطح مزارع کوچک و در سطح مقیاس‌های بزرگ‌تر گزارش شد. همچنین، (2005) Mbasheri et al. مقادیر تبخیر- تعرق واقعی را با استفاده از روش سبال و تصاویر مودیس در مزرعه نمونه ارتش، واقع در دشت گرگان، برآورد کردند. آن‌ها با مقایسه نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر ارائه‌شده در منابع، بیان کردند که استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم سبال می‌تواند برآورد خوبی از تبخیر- تعرق در مناطق هموار ارائه کند. هدف از تحقیق حاضر، تخمین میزان تبخیر- تعرق واقعی در دشت مورد نظر با استفاده از معادله توازن انرژی به‌صورت مکانی، مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری‌شده لایسیمتری، محاسبه ضریب گیاهی، برای پوشش حوضه مربوطه و در نهایت تهیه نقشه توزیع تبخیر- تعرق واقعی در سرتاسر حوضه براساس محاسبات شبکه سلولی است.

1. Evapotranspiration
2. Crop Coefficient
3. Reference Evapotranspiration

4. (<http://lance-modis.eosdis.nasa.gov>)



شکل ۱. محدوده منطقه مطالعاتی



شکل ۲. نمای از لایسیمتر وزنی الکترونیکی

شکل ۳. نمای از اتاق کنترل و سنسورهای لایسیمتر

جدول ۱. تاریخ تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در برآورد تبخیر- تعرق به روش سبال

روز جولایوسی	تاریخ تصویربرداری (شمسی)	شماره تصویر	روز جولایوسی	تاریخ تصویربرداری (شمسی)	شماره تصویر
۱۷۹	۷ تیر ۱۳۸۶	۹	۹۲	۱۳ فروردین ۱۳۸۶	۱
۱۹۱	۱۹ تیر ۱۳۸۶	۱۰	۱۰۴	۲۵ فروردین ۱۳۸۶	۲
۱۹۸	۲۶ تیر ۱۳۸۶	۱۱	۱۱۵	۵ اردیبهشت ۱۳۸۶	۳
۲۰۴	۱ مرداد ۱۳۸۶	۱۲	۱۲۴	۱۴ اردیبهشت ۱۳۸۶	۴
۲۲۰	۱۷ مرداد ۱۳۸۶	۱۳	۱۲۷	۱۷ اردیبهشت ۱۳۸۶	۵
۲۲۳	۲۰ مرداد ۱۳۸۶	۱۴	۱۴۷	۶ خرداد ۱۳۸۶	۶
۲۳۶	۲ شهریور ۱۳۸۶	۱۵	۱۶۳	۲۲ خرداد ۱۳۸۶	۷
			۱۷۲	۳۱ خرداد ۱۳۸۶	۸

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، ET : تبخیر- تعرق (mm/day)، λ : گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، $ET\lambda$: معرف شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n : تابش خالص خورشید (W/m^2)، H : شار گرمای محسوس (W/m^2) و G : شار گرمای خاک (W/m^2) است.

الگوریتم توازن انرژی سطح برای خشکی (SEBAL)

مدل سبال، مقدار تبخیر- تعرق واقعی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمین مورد نیاز و براساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌کند. شار تبخیر- تعرق برای هر پیکسل تصویر، به صورت باقی‌مانده رابطه توازن انرژی سطح محاسبه می‌شود.

تابش خالص

مقدار تابش خالص از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که عبارت‌اند از تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$) که بخشی از این انرژی تابشی توسط سطوح مختلف منعکس می‌شود. ($R_{L\downarrow}$) تابش طول موج بلند ورودی از اتمسفر ($R_{s\uparrow}$) و تابش طول موج بلند گسیل شده از سطح ($R_{L\uparrow}$). بنابراین، تابش خالص لحظه‌ای در واحد سطح با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن α آلبدوی سطحی، $R_{s\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (0.3 تا 3 میکرومتر) (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (3 تا 100 میکرومتر) (w/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (w/m^2) و ε_0 گسیل‌مندی سطحی عریض باند است. به دلیل محدود بودن صفحات مقاله، تشریح کامل طریقه محاسبات تابش خالص خورشیدی در فلوجارت شکل ۴ آمده است.

شار گرمای خاک (G)

در روش سبال، ابتدا نسبت G/R_n در نیمه‌روز، با استفاده از معادله تجربی ارائه شده از سوی باستیانس (۲۰۰۰)، به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$(\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0.978 \times NDVI^4]$$

که در آن، T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$) و α آلبدوی سطحی و NDVI شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی که در ادامه نحوه محاسبه آن بیان شده است. و در نهایت، مقدار G با ضرب کردن نسبت فوق در R_n به دست می‌آید.

شار گرمای محسوس (H)

در روش سبال برای برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شوند. یکی از این پیکسل‌ها، که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کامل پوشیده از گیاه و آبیاری شده است. دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر-تقرقی معادل تبخیر-تقرقی مرجع دارد. پیکسل دوم، که پیکسل گرم نام دارد، زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک است. بنابراین، مقدار شار گرمای نهان تبخیر باید از روش‌های تکراری حل شود و گرما محسوس است.

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن ρ_{air} چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg.K$)، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع

(K) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرماست (s/m). برای تعیین پیکسل‌های سرد و گرم در انتخاب پیکسل‌های شاخص از دو فاکتور دما و شاخص سطح برگ LAI استفاده شد. بدین صورت که پیکسل سرد باید دمای پایین و LAI بالا و پیکسل گرم هم باید دمای بالا و LAI پایین داشته باشد. در انتخاب پیکسل گرم، از انتخاب مقادیر حداکثر دما اجتناب شد. بدین دلیل که معمولاً بیابان‌ها و مناطق مسکونی دمای بالاتری نسبت به اراضی خشک بایر کشاورزی دارند و بالطبع اگر این مناطق به منزله پیکسل گرم انتخاب شوند، برای اراضی خشک با دمای پایین‌تر، تبخیر-تقرقی مقداری مثبت می‌شود. در جدول ۲ مشخصات مربوط به پیکسل‌های گرم و سرد انتخابی در این پژوهش آمده است.

جدول ۲. مشخصات پیکسل‌های گرم و سرد منتخب در این تحقیق

پیکسل سرد	پیکسل گرم	
۵۷°۱۲'۳۴.۴۳" E	۵۷°۱۴'۳۵.۲۳" E	طول جغرافیایی
E		
۳۰°۲۴'۹.۵۶" N	۳۰°۲۴'۴.۷۱" N	عرض جغرافیایی
۲۹۰	۳۲۵	دمای سطح خاک
۱،۵۴۲۳	۰،۲۱۴۷۸۱	شاخص سطح برگ

پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس براساس شرایط جوی تصحیح شد، مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با رابطه ۱ برای هر پیکسل محاسبه و سپس با استفاده از رابطه ۵ مقدار لحظه‌ای تبخیر-تقرقی واقعی برآورد شد.

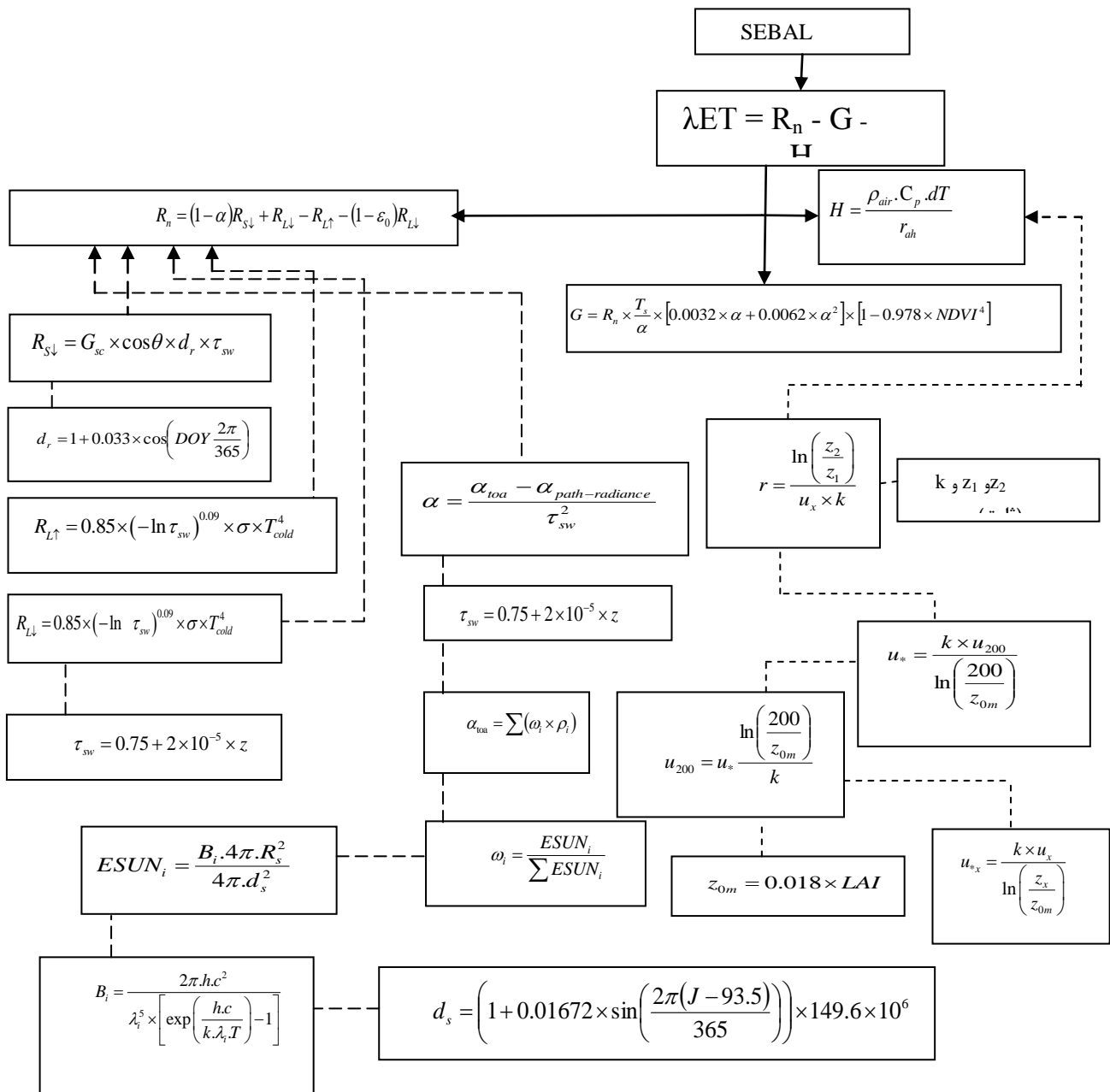
$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (\text{رابطه ۵})$$

ET_{inst} تبخیر-تقرقی لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای نهان بخار آب یا میزان گرمای جذب شده هنگامی که یک کیلوگرم آب بخار می‌شود (J/kg) و عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل زمان ثانیه به ساعت است. در شکل ۴، فلوجارت مراحل الگوریتم سبال با دقت درخور توجهی آورده شده است.

صحت‌سنجی

برای برآورد تبخیر-تقرقی روزانه از تبخیر-تقرقی لحظه‌ای، می‌توان از مفهوم تبخیر-تقرقی گیاه مرجع استفاده کرد. به این منظور، تبخیر-تقرقی گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره (ET_{inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه (ET_{24}) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه محاسبه شد.

فلوچارت مربوط به الگوریتم SEBAL



شکل ۴. فلوچارت کلی محاسبه مدل سبال و محاسبه rah (مقاومت آیرودینامیکی)

به منظور ارزیابی مقادیر تبخیر- تعرق محاسباتی به دست آمده به وسیله الگوریتم SEBAL و مقایسه با مقادیر مشاهداتی (لایسیمتر)، از دو آزمون نکویی برازش NOF^۱ و EF^۲ استفاده شد که مقادیر آنها به ترتیب با استفاده از معادله‌های ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

$$NOF = \frac{1}{ET_{obs}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{obs,i} - ET_{sim,i})^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

سپس نسبت تبخیر- تعرق لحظه‌ای محاسبه شده از مدل سبال به تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره تعیین و حاصل ضرب این نسبت در تبخیر- تعرق روزانه گیاه مرجع، میزان تبخیر- تعرق واقعی روزانه (ETact-24) به دست آمد. برای محاسبه‌های تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس زمانی روزانه از روش پنمن- مانتیت گزارش شماره ۵۶ فائو استفاده شد که در رابطه ۶ به آن اشاره شده است.

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

1. Normalized Objective Function
2. Modeling Efficiency

(۱۷۲ جولایوسی) ۷,۵۴ میلی‌متر تخمین زده شد.

در شکل ۶، برای نمونه، مقایسه نتایج تبخیر-تعرق حاصل از لایسیمتر منطقه و روش فائو ۵۶ در تیر ۱۳۸۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج، همبستگی قابل قبولی با ضریب R^2 برابر با ۰,۵۸ برقرار است. این مقایسه برای دیگر ماه‌های گرم سال ۱۳۸۶ نیز صورت گرفت و نشان از دقت قابل قبول داده‌های لایسیمتری در منطقه داشت.

مدل‌سازی برای ۱۵ تصویر منتخب به‌طور یکسان و با روابط مشابه اعمال شد، اما به دلیل حجم بالای خروجی‌ها، نتایج مربوط به تصویر روز ۳۱ خرداد ۱۳۸۶ ارائه شده است. برای محاسبه ضریب L (فاکتور تصحیح اثر بازتابندگی خاک) تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر انتخاب شد. پیکسل‌های سرد و گرم براساس در اختیار داشتن زمین‌های با پوشش گیاهی مناسب و بایر، با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر رطوبت موجود، انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد که توزیع شاخص DNDVI در محدوده ۰,۱ تا ۰,۴۹ در حال تغییر است. مقادیر دمای سطح زمین نیز از ۲۹۰ تا ۳۲۵ درجه کلوین در نوسان بودند. پایین‌بودن مقادیر شاخص NDVI و همچنین بالایبودن دمای سطح زمین به ضعیف‌بودن پوشش گیاهی منطقه مربوط می‌شود. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده در این قسمت با واقعیت‌های موجود در منطقه مطالعاتی هم‌خوانی قابل قبولی دارد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب توزیع پراکندگی شاخص NDVI و دمای سطح زمین (LST) را در تاریخ ۳۱ خرداد ۱۳۸۶ نشان می‌دهد.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{obs,i} - ET_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{obs,i} - \bar{ET}_{obs})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

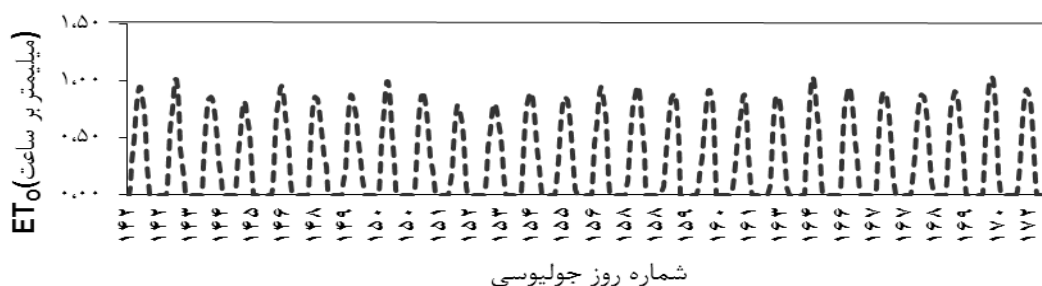
در این معادله‌ها، $ET_{obs,i}$ تبخیر-تعرق مشاهده‌ای، $ET_{sim,i}$ تبخیر-تعرق محاسباتی، \bar{ET}_{obs} میانگین تبخیر-تعرق مشاهده‌ای و n تعداد داده‌های مشاهده‌ای یا محاسباتی است. شایان ذکر است در صورتی که مقادیر NOF و EF به ترتیب صفر و یک باشد، تبخیر-تعرق مشاهده‌ای و محاسباتی باهم برابرند. در جدول ۳، مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای تبخیر-تعرق در روزهای مربوطه انتخابی نشان داده شده است.

نتایج و بحث

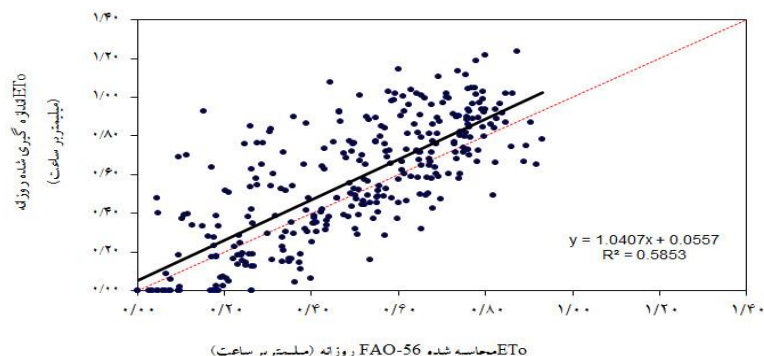
محاسبات و اندازه‌گیری‌های مربوط به لایسیمتر

اندازه‌گیری‌ها در شش ماه گرم سال به شکل روزانه و ساعتی انجام گرفت، ولی به دلیل محدودبودن صفحات مقاله برای مثال در شکل ۵ سری زمانی تبخیر-تعرق واقعی گیاه چمن در مقیاس روزانه در خرداد ۱۳۸۶ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، سینوسی‌بودن نمودار، تغییرات شبانه‌روزی داده‌های لایسیمتری را به خوبی نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع در مقیاس ساعتی ۱,۱ میلی‌متر در ظهر روز ۲۹ خرداد و کمترین مقدار آن ۰,۸۳ میلی‌متر در ظهر روز ۱۱ خرداد ۱۳۸۶ برآورد شده است. همچنین، میزان مجموع تبخیر-تعرق واقعی در روز ۳۱ خرداد



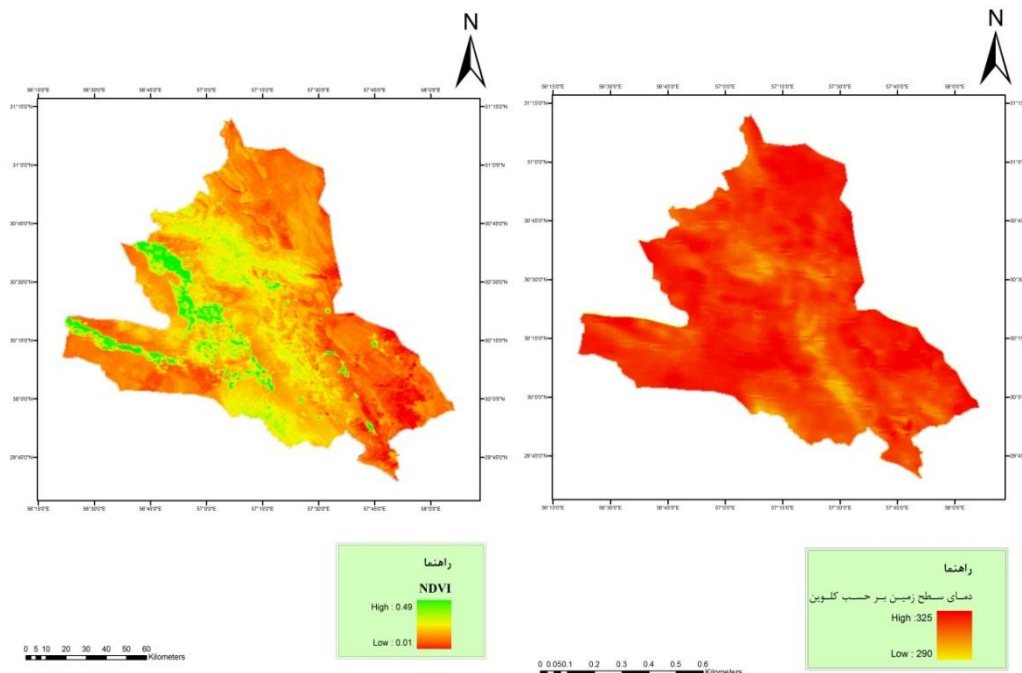
شکل ۵. تبخیر-تعرق واقعی محاسبه‌شده به وسیله لایسیمتر در مقیاس ساعتی در خرداد ۱۳۸۶



شکل ۶. مقایسه تبخیر-تعرق روزانه حاصل از داده‌های لایسیمتر و روش FAO-56 در تیر ۱۳۸۶

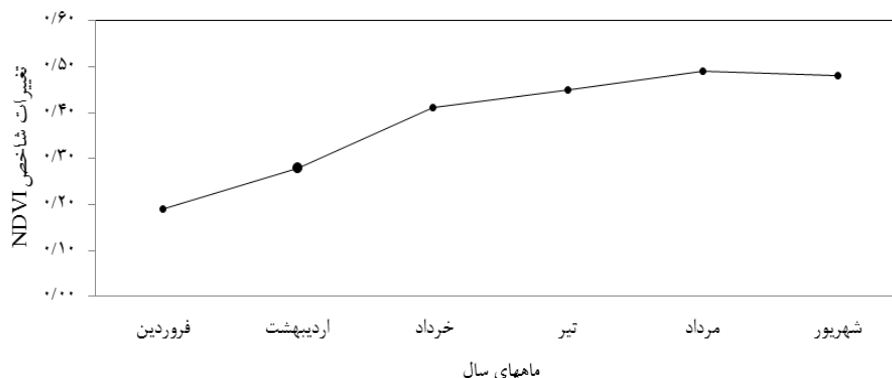
مقابل در روز جولایوسی ۹۲، یعنی ۱۳ فروردین ۱۳۸۶، به کمترین مقدار خود، یعنی ۳/۸۵ میلی‌متر در روز، رسیده است. علت کاهش تبخیر- تعرق در اوایل فروردین مربوط به عدم رویش کامل گیاهان و در نتیجه کاهش شاخص پوشش گیاهی و همچنین سردی هواست. عامل گرمی هوا در تیرماه نیز باعث افزایش تبخیر- تعرق شده است. شایان ذکر است مقادیر مشاهداتی محاسبه‌شده لایسیمتر در مقابل مقادیر تبخیر- تعرق مرجع محاسبه‌شده از سوی روش پنمن مانیتیت FAO 56 مقداری تفاوت دارد که این اختلاف به ضریب خرد اقلیم $(K_{mc})^1$ برای تنظیم ET، ضریب پوشش گیاهی (K_r) و ضریب تراکم برای تنظیم تبخیر- تعرق و تراکم بوته مرتبط است.

در طی اجرای مراحل، مقدار شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی (NDVI) نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محاسبه شد. به این صورت که این شاخص برای روزهای تصویربرداری (در هر ماه سه نوبت) در کل منطقه مطالعاتی محاسبه و پس از میان‌گیری به‌منزله نماینده ماه مورد نظر معرفی شده است. روند تغییرات آن طی این دوره در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار این شاخص طی دوره رشد با افزایش پوشش گیاهی سبز افزایش می‌یابد و مقدار آن در مرداد ۱۳۸۶، که گیاه (پسته) به بیشترین رشد خود رسیده، حداکثر است. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، مقدار تبخیر- تعرق در روز جولایوسی ۱۹۱، که مربوط به ۱۹ تیر ۱۳۸۶ است، به بیشترین مقدار خود، یعنی ۸/۸۲ میلی‌متر در روز، رسیده و در



شکل ۸. نقشه LST در ۳۱ خرداد ۱۳۸۶

شکل ۷. نقشه شاخص NDVI در ۳۱ خرداد ۱۳۸۶



شکل ۹. نمودار مقادیر شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی در منطقه در شش ماه گرم سال ۱۳۸۶

برآورد تبخیر- تعرق روزانه

جدول ۳. نتایج تبخیر- تعرق واقعی حاصل از مدل SEBAL، لایسیمتر و روش FAO 56

روز جولایوسی	لایسیمتر (میلی‌متر بر روز)	SEBAL (میلی‌متر بر روز)	FAO 56 (میلی‌متر بر روز)
۹۲	۳٫۸۵	۳٫۷۷	۳٫۸۱
۱۰۴	۵٫۴۲	۵٫۶۵	۶٫۰۷
۱۱۵	۵٫۳۷	۶٫۰۳	۵٫۸۴
۱۲۴	۶٫۵۹	۷٫۲۱	۵٫۹۳
۱۲۷	۶٫۵۸	۵٫۸۳	۶٫۷۶
۱۴۷	۷٫۷۲	۶٫۹۱	۵٫۹۸
۱۶۳	۶٫۸۳	۷٫۴۱	۶٫۷۵
۱۷۲	۷٫۵۴	۷٫۲۵	۶٫۵۵
۱۷۹	۸٫۱۴	۷٫۶۱	۷٫۳۸
۱۹۱	۸٫۸۲	۷٫۹۲	۷٫۳۲
۱۹۸	۷٫۹۶	۸٫۵۰	۷٫۸۷
۲۰۴	۶٫۷۳	۷٫۵۲	۶٫۱۴
۲۲۰	۶٫۷۱	۵٫۷۴	۶٫۳۴
۲۲۳	۷٫۲۳	۶٫۷۶	۶٫۳۲
۲۳۶	۷٫۶۴	۷٫۳۲	۶٫۶۸

جدول ۴. نتایج مقایسه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBAL با لاهای متفاوت در مقابل لایسیمتر

تاریخ دریافت تصویر MODIS	لایسیمتر mm/day	SEBAL						
		L=۰	L=۰٫۲	L=۰٫۴	L=۰٫۵	L=۰٫۶	L=۰٫۸	L=۱
۲٫۴٫۲۰۰۷	۳٫۸۵	۳٫۴۷	۳٫۵۲	۳٫۵	۳٫۶۲	۳٫۶۸	۳٫۷۱	۳٫۷۷
۱۴٫۴٫۲۰۰۷	۵٫۴۲	۵٫۴۷	۵٫۴۸	۵٫۵۱	۵٫۵۳	۵٫۵۸	۵٫۶	۵٫۶۵
۲۵٫۴٫۲۰۰۷	۵٫۳۷	۵٫۸۷	۵٫۹	۵٫۹۱	۵٫۹۴	۵٫۹۶	۵٫۹۷	۶٫۰۳
۴٫۵٫۲۰۰۷	۶٫۵۹	۶٫۹۱	۶٫۹۵	۷٫۱۲	۷٫۱۵	۷٫۱۷	۷٫۲۳	۷٫۲۱
۷٫۵٫۲۰۰۷	۶٫۵۸	۵٫۶۹	۵٫۷۱	۵٫۷۳	۵٫۷۵	۵٫۷۸	۵٫۷۹	۵٫۸۳
۲۷٫۵٫۲۰۰۷	۷٫۷۲	۶٫۷۷	۶٫۷۹	۶٫۸۲	۶٫۸۵	۶٫۸۷	۶٫۸۹	۶٫۹۱
۱۲٫۶٫۲۰۰۷	۶٫۸۳	۷٫۲۸	۷٫۳۱	۷٫۳۴	۷٫۳۶	۷٫۳۷	۷٫۳۹	۷٫۴۱
۲۱٫۶٫۲۰۰۷	۷٫۵۴	۷٫۱۴	۷٫۱۷	۷٫۱۹	۷٫۲	۷٫۲۲	۷٫۲۳	۷٫۲۵
۲۸٫۶٫۲۰۰۷	۸٫۱۴	۷٫۴۷	۷٫۵	۷٫۵۳	۷٫۵۶	۷٫۵۷	۷٫۵۹	۷٫۶۱
۱۰٫۷٫۲۰۰۷	۸٫۸۲	۷٫۷۸	۷٫۸۱	۷٫۸۴	۷٫۸۷	۷٫۹	۷٫۹۱	۷٫۹۲
۱۷٫۷٫۲۰۰۷	۷٫۹۶	۸٫۳۵	۸٫۳۷	۸٫۴۱	۸٫۴۳	۸٫۴۶	۸٫۴۸	۸٫۵۰
۲۳٫۷٫۲۰۰۷	۶٫۷۳	۷٫۴	۷٫۴۲	۷٫۴۴	۷٫۴۷	۷٫۴۹	۷٫۵	۷٫۵۲
۸٫۸٫۲۰۰۷	۶٫۷۱	۵٫۵۷	۵٫۶۲	۵٫۶۵	۵٫۶۸	۵٫۷۱	۵٫۷۲	۵٫۷۴
۱۱٫۸٫۲۰۰۷	۷٫۲۳	۶٫۶۱	۶٫۶۵	۶٫۶۸	۶٫۷	۶٫۷۳	۶٫۷۵	۶٫۷۶
۲۴٫۸٫۲۰۰۷	۷٫۶۴	۷٫۱۴	۷٫۱۸	۷٫۲۲	۷٫۲۵	۷٫۲۹	۷٫۳۱	۷٫۳۲
	NOF	۰٫۰۹۶۷۲	۰٫۰۹۴۵۱	۰٫۰۹۳۸۱	۰٫۰۹۲۵۳	۰٫۰۹۱۰۷	۰٫۰۹۱	۰٫۰۹۰۷۹
	EF	۰٫۸۵۹۶۷	۰٫۸۶۶۰۱	۰٫۸۶۷۹۹	۰٫۸۷۱۵۷	۰٫۸۷۵۶	۰٫۸۷۵۷۹	۰٫۸۷۶۳۶
	RMSE	۰٫۶۶۴۹۹	۰٫۶۴۹۸۰	۰٫۶۴۴۹۹	۰٫۶۳۶۱۸	۰٫۶۲۶۱۱	۰٫۶۲۵۶۳	۰٫۶۲۴۱۹

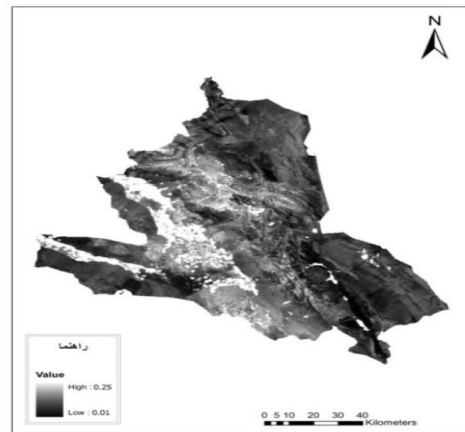
مشاهداتی و محاسباتی است، در L مساوی با یک کمترین مقدار یعنی ۰٫۰۹۰۷۹ را به خود اختصاص داده است. شاخص EF نیز، که در عدد یک نشان‌دهنده منطبق بودن داده‌های محاسباتی و میدانی بر روی هم است، در L برابر با یک بیشترین مقدار یعنی ۰٫۸۷۶۳۶ را دارد که این عدد نمایانگر همبستگی بالای داده‌های محاسباتی حاصل از الگوریتم سبال و داده‌های میدانی حاصل از لایسیمتر منطقه است. همچنین، آمار درج‌شده در جدول ۴ بیانگر این است که با زیاد شدن L شاخص SAVI، که در شکل ۱۰ آمده است، کاهش می‌یابد؛ به‌نحوی که در L های بزرگ و در

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، هرچه مقدار L به سمت یک نزدیک‌تر می‌شود، انحراف معیار کمتر و نتایج دقیق‌تر است. بدین معنا که در L های کوچک‌تر، تأثیرات خاک و پوشش گیاهی متفاوت، خود را بیشتر نشان می‌دهد. در نتیجه، با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و سرد منطقه، مقادیر بهینه L در حد یک برآورد شد. مقدار کمترین RMSE برای L برابر با یک به میزان ۰٫۶۲۴۱۹ و بیشترین آن به میزان ۰٫۶۶۴۹۹ برای L برابر با صفر بوده است. همچنین، براساس آمار جدول ۴، شاخص NOF، که نزدیک بودن آن به صفر بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های

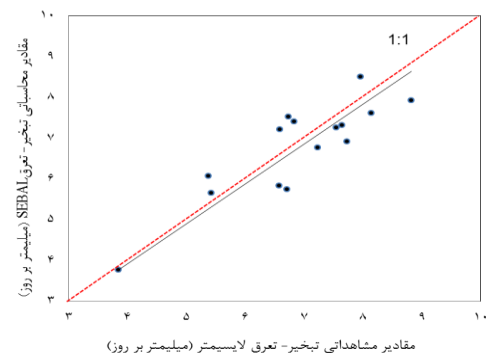
روند تغییرات تبخیر- تعرق در روزهای منتخب تصویربرداری به دو روش محاسباتی سبال و لایسیمتر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نوآوری این پژوهش این بود که عملیات مربوط به شناسایی پیکسل مربوط به مختصات لایسیمتر در نرم‌افزار ENVI انجام شد و تبخیر- تعرق این پیکسل براساس کاربری منطقه در سال ۱۳۸۶ با احتساب درصد زمین‌های بایر، آسفالت و گونه‌های گیاهی دیگر محاسبه شد. این کاربری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به مساحت تحت پوشش گیاهی و غیرگیاهی هر کاربری در این پیکسل، 500×500 متر تبخیر- تعرق واقعی با ابزار کراسینگ و درون‌یابی کریجینگ تعیین شد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، محاسبات مربوط به پیکسل سبال برآوردی نزدیک‌تر به محاسبات لایسیمتری داشته است.

در نهایت، خروجی اصلی مدل سبال، یعنی نقشه تبخیر- تعرق واقعی دشت کرمان، ترسیم شد. شکل ۱۴ نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق واقعی دشت کرمان در روز ۳۱ خرداد ۱۳۸۶ است. همان‌طور که مشخص است، تبخیر- تعرق واقعی در چهار کاربری بیابان، شهری، کشاورزی و کوهستان در محدوده صفر تا 8.51 میلی‌متر بر روز قرار گرفته است. در این شکل، به‌طور واضح، دیده می‌شود که مدل سبال در محیط‌های کوهستانی دچار خطای نسبتاً زیادی نشده است و در سایه‌ها و مناطق شیب‌دار با توجه به ورودی‌هایی همچون نقشه‌های کاربری اراضی، شیب و اسپکت تبخیر- تعرق را به‌طور تقریباً صحیحی برآورد کرده است. بیشترین تبخیر- تعرق متعلق به زمین‌های کشاورزی واقع در غرب و جنوب غربی شهرستان است و کمترین تبخیر به مناطق کویری و پست منطقه شهداد مربوط می‌شود.

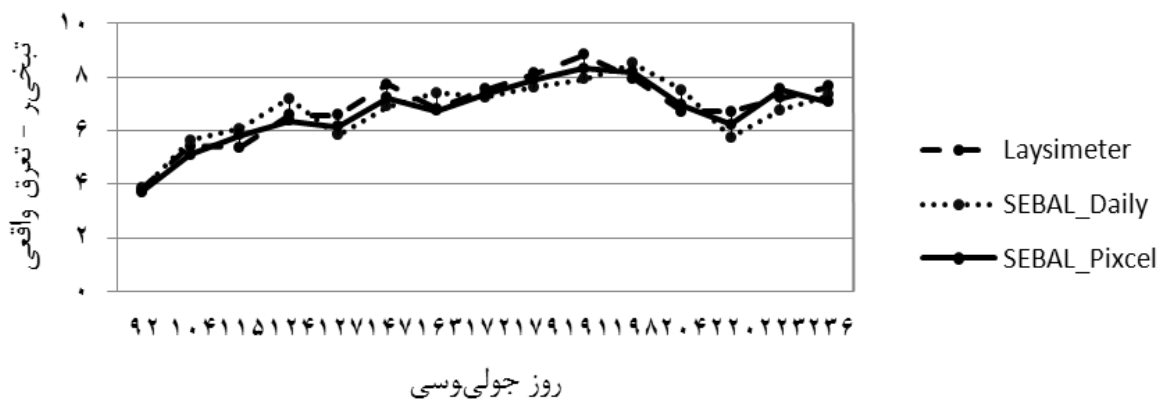
خاک‌های تیره یا پوشش‌های گیاهی بسیار اندک، LAI منفی می‌شود، که در محاسبات صفر منظور می‌شود. نتایج حاصل از الگوریتم سبال، مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل برآوردی از روش سبال با مقادیر محاسبه‌شده به‌وسیله لایسیمتر منطقه در روزهای تصویربرداری مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب همبستگی 0.71 نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول روش سبال در برآورد تبخیر- تعرق است.



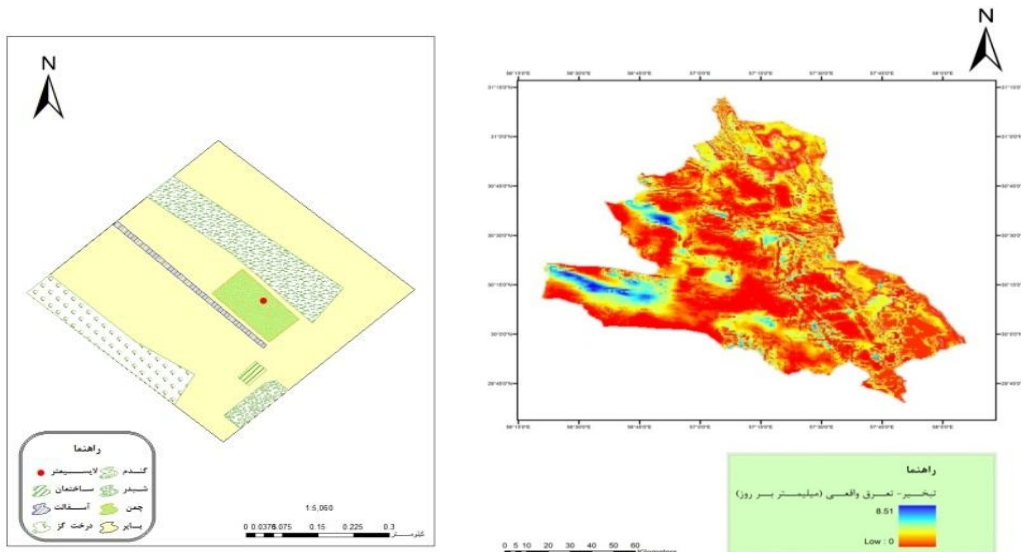
شکل ۱۰. نقشه درصد پوشش گیاهی تهیه‌شده براساس شاخص SAVI



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق به‌دست‌آمده از دو روش سبال و لایسیمتر



شکل ۱۲. روند تغییرات تبخیر- تعرق در روزهای منتخب تصویربرداری به دو روش محاسباتی سبال و لایسیمتر و همچنین تفکیک پیکسل مربوط به لایسیمتر



شکل ۱۳. کاربری اراضی مربوط به پیکسل ۵۰۰ × ۵۰۰ شامل لایسیمتر

شکل ۱۴. نقشه تبخیر- تعرق واقعی دشت کرمان در روز ۳۱ خرداد ۱۳۸۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با به‌کارگیری الگوریتم SEBAL و با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS برای ۱۵ تصویر منتخب بدون ابر مربوط به بهار و تابستان ۱۳۸۶ تبخیر- تعرق واقعی به صورت روزانه محاسبه و با داده‌های مشاهداتی حاصل از لایسیمتر وزنی الکترونیکی، که در منطقه در اختیار بود، مقایسه شد. ضریب تبیین ۰/۷۱ بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نشان داد که این الگوریتم در برآورد تبخیر- تعرق واقعی دقت بالایی دارد. در این مطالعه، RMSE برابر با ۰/۶۲۴۱۹، NOF برابر با ۰/۰۹۰۷۹ و EF برابر با ۰/۸۷۶۳۶ به دست آمد. نتایج این بخش با نتایج حاصل از تحقیق George *et al* (2013)، که مقادیر تبخیر- تعرق واقعی حاصل از الگوریتم را در مقایسه با مقادیر لایسیمتری ارزیابی کرده بودند، مطابقت دارد. همچنین میزان شاخص NDVI محاسبه‌شده از روش سنجنده‌ز دور، که بیانگر پوشش سبز منطقه است، مطابقت خوبی با روند توسعه یا کاهش سطح زیر کشت داشته است و نتایج تبخیر- تعرق نیز نشان از هماهنگی آن با نتایج پوشش گیاهی داشت؛ به نحوی که بیشترین میزان تبخیر تعرق مربوط به اواسط تابستان و کمترین آن مربوط به اوایل بهار بوده است. در مناطق کویری و دشت شهداد، مدل دچار خطای نسبی شده است که دلیل آن را می‌توان به بافت خاک و ضریب آلبیدوی بالای این مناطق نسبت داد. در اجرای مراحل الگوریتم

سبال انتخاب پیکسل سرد و گرم از حساسیت بالایی برخوردار است و نتایج نشان داد که انتخاب اشتباه این پیکسل‌ها مراحل بعدی الگوریتم را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. بنابراین، برای مشخص کردن این دو پیکسل باید اطلاعات دقیقی از منطقه داشت. در پایان، نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق منطقه براساس کاربری‌های مورد نظر ترسیم شد. این نقشه وسیع امکان مدیریت مکانی آب، صرفه‌جویی و تخصیص بهینه آب را امکان‌پذیر می‌کند. همچنین، پیشنهادهایی درخصوص انجام‌دادن پژوهش‌های آبی در این زمینه ارائه می‌شود.

۱. امکاناتی همچون برج‌های اندازه‌گیری شارهای سطحی، به منظور ارزیابی روش‌های موجود برآورد تبخیر- تعرق واقعی مبتنی بر تکنیک سنجنده از دور در منطقه ایجاد شود؛ ۲. روش SEBAL از مبنای فیزیکی مطلوبی برخوردار است، اما وجود برخی روابط تجربی در طول مراحل برآورد تبخیر- تعرق سبب می‌شود در محاسبات، به‌خصوص در تعیین نیاز آبی گیاه، خطاهایی به وجود آید. بنابراین توصیه می‌شود ضرایب این روابط برای هر منطقه تصحیح شود؛ ۳. از الگوریتم‌های دومنبعی استفاده شود که علاوه بر اطلاعات هواشناسی و ماهواره‌ای به اطلاعاتی از قبیل بافت، ساختمان و رطوبت خاک نیز نیازمندند که با کسب این اطلاعات می‌توان برآوردی بسیار دقیق از تبخیر- تعرق منطقه ارائه کرد.

REFERENCES

Allen, R. G., Morse, A. and Tasumi, A. (2003). Application of SEBAL for Western US water rights regulation and planning. *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions*, 17

sept.

Allen, R. G., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R. and Bastianssen, W. (2002). SEBAL Surface Energy Balans Algorithms for Land. Idaho

- Implementation. Advanced Training and Users Manual., version 1.
- Bagheri harooni, M., Arshad, S., Majnoni, A. and Morid, S. (2012). Compare single-source remote sensing model for estimating actual evapotranspiration and two sources of energy flux in plain Tabriz. *Journal Remote Sensing and GIS Iran*.4(1), 252-273
- Bastiaanssen, W. G. M. Menenti, M. (2002). satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus basin, *Water Resource Res.* 38 (12):1273.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M. (1989). Mapping groundwater losses in the Western Desert of Egypt with satellite measurements of surface reflectance and surfacetemperature.in (ed.) J.C. Hooghart. *Water Management and Remote Sensing. TNO Committee on ydrological Research proceedings and information no.* 42(1), 61-89.
- Farshi, A., Kheyrai, J., Syadat, H., Mirlatifi, M., Darbandi, S., Salamat, A., Entesari, M., and Sadatmiri, N. (2011). Evaluate the efficiency of irrigation water during the past decades in the country. *On-farm water management*.
- George, P., and Prasanna, H. (2013). Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolutionairborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources.* 59 (2),157–168.
- Sanayinezhad, H., Nori, S., and Hashemineya, M. (2011). Estimation of actual evapotranspiration using satellite images in Mashhad. *Journal of Water and Soil, Agricultural Science and Technology*, 25 (3), 540- 547.
- Mobasheri, M., Khavariyan, H., Ziyaian, P. and Kamali, Gh. (2005). Estimates of actual evapotranspiration using MODIS images and algorithms SEBAL. *National mapping agency, Tehran*
- Sun, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D., and Liu Z. (2011). Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modeling in agriculture.* 59(4),1086–1092.