

تهیه و ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق براساس داده‌های ماهواره لندست ۸ و مدل SEBAL در جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل‌های پل سفید و کیاسر)

احمد عباس نژاد الجین^۱، علی اصغر درویش صفت^{۲*}، جواد بذرافشان^۳

۱. دانشجوی دکتری جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳

چکیده

برآورد دقیق تبخیر و تعرق واقعی می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریت جنگل‌های هیرکانی که اهمیت زیادی در کاهش شدت تغییرات اقلیمی و همچنین تأمین منابع آبی شمال ایران دارد، کمک‌کننده باشد. روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تبخیر و تعرق به محدودیت‌هایی دچار است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری‌ها اشاره کرد. در مقابل، برخی روش‌های سنجش از دور ایجاد شده‌اند که حتی می‌توانند سبب دستیابی به نقشه‌های تبخیر و تعرق شوند، البته باید قبل از به‌کارگیری این نقشه‌ها، صحت و درستی این روش‌ها ارزیابی شود. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای (ET_{INST}) و روزانه (ET₂₄) برآورده شده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و مدل SEBAL در جنگل‌های هیرکانی است. برای این منظور، تصاویر ماهواره لندست ۸ در تاریخ‌های ۱۳۹۳/۰۵/۰۴ و ۱۳۹۵/۰۳/۰۸ برای ۲۰۰ هزار هکتار از جنگل‌های هیرکانی در محدوده شهرستان‌های پل سفید و کیاسر تهیه شد. پس از پردازش و محاسبات، شارگرمای نهان از تصاویر برآورد و برپایه شارگرمای نهان، نقشه‌های ET_{INST} و ET₂₄ تهیه شد. برای ارزیابی این نقشه‌ها، مقدار زمینی ET_{INST} و ET₂₄ با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های پل سفید و کیاسر و روش پنمن-ماتیت-فانو محاسبه شد. متوسط ET_{INST} و ET₂₄ برآورده شده با استفاده از تصاویر و روش سبال به ترتیب در ایستگاه پل سفید ۰/۵۳ و ۵/۳۹ و در ایستگاه کیاسر ۰/۴۸ و ۴/۹۸ و متوسط محاسبه‌شده این دو پارامتر در دو تاریخ یادشده به ترتیب در ایستگاه پل سفید ۰/۶۰ و ۶/۱۶ و در ایستگاه کیاسر ۰/۵۵ و ۵/۸۲ است. مقایسه مقادیر برآورده شده با روش پنمن-ماتیت-فانو نشان داد که میانگین اختلاف مطلق برآورده شده برای ET_{INST} و ET₂₄ به ترتیب ۰/۰۶۸ و ۰/۸۰۹ و میانگین درصد اختلاف نسبی برای این دو پارامتر به ترتیب ۱۱/۹۹ و ۱۳/۵۶ درصد است که در مجموع توانایی زیاد رویکرد استفاده شده در تهیه نقشه‌های تبخیر و تعرق و امکان استفاده کاربردی از این نقشه‌ها را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، سنجش از دور، لندست ۸، نقشه تبخیر و تعرق، SEBAL.

مقدمه

امتداد یافته است. مساحت این جنگل‌ها ۱/۸۵ میلیون هکتار است که ۱۵ درصد جنگل‌های ایران را در بر می‌گیرد. جنگل‌های هیرکانی از نظر تنوع زیستی جزو اکوسیستم‌های غنی و باقی‌مانده جنگل‌های دوران سوم زمین‌شناسی است [۱] که تأثیر مهمی در جذب دی‌اکسید

جنگل‌های هیرکانی به صورت نواری باریک روی دامنه شمالی رشته کوه البرز از آستارا تا گلی‌داغی در بجنورد

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۳۰۴۴

پیشرفت‌های سنجش از دور به‌عنوان علم، فن و هنر کسب اطلاعات از پدیده‌ها از راه دور [۸]، امکان برآورد ET_A از تصاویر ماهواره‌ای براساس مدل‌های بیلان انرژی سطحی را فراهم آورده است [۹]. تصاویر ماهواره‌ای به‌دلیل دسترسی بهتر، پوشش مناسب از لحاظ مکان و زمان، هزینه کم و به‌روز بودن اطلاعات پایه، برای برآورد ET_A قابل اعتمادند [۱۰]. اطلاعات پیوسته ET_A برآوردشده از تصاویر ماهواره‌ای در برنامه‌ریزی، مدیریت، ارزیابی نیاز آبی، بیلان آب در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی بسیار مفید است [۱۱، ۱۲].

مدل $SEBAL^2$ ، از پرکاربردترین مدل‌های الگوریتم بیلان انرژی سطحی برای سطوح مسطح است که در صورت به‌کارگیری برای مناطق کوهستانی باید براساس مدل رقومی ارتفاعی (DEM) اصلاح شود [۴]. این مدل، کمترین نیاز را به داده‌های زمینی دارد و مقاومت آئروپدینامیکی یکسانی برای پوشش گیاهی و خاک در نظر می‌گیرد [۱۳، ۱۴]. به‌دلیل تراکم زیاد جنگل‌های هیرکانی، تأثیر خاک در بازتاب ثبت‌شده توسط ماهواره بسیار کم است. همچنین در این جنگل‌ها با توجه به تعداد کم ایستگاه‌های هواشناسی، اطلاعات زمینی کمی در دسترس است؛ از این‌رو، استفاده از مدل $SEBAL$ در این جنگل‌ها ممکن است نتیجه بهتری نسبت به دیگر مدل‌های الگوریتم بیلان انرژی سطحی داشته باشد [۱۵].

Elmer و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده‌های لندست ۸، تحقیقاتی با هدف برآورد ET_A روزانه توسط مدل $SEBAL$ در دلتای رود نیل مصر انجام دادند. به‌منظور ارزیابی ET_A برآوردشده، مقدار ET_A به روش فائو-پنمن - مانیتینگ محاسبه شد و نتایج نشان داد که ET_A برآوردشده با $R^2 = 0.97/83$ و $RMSE$ برابر 0.469 میلی‌متر در روز توانایی زیادی در برآورد ET_A دارد [۱۶].
Rahimzadegan و Janani (۲۰۱۹) در تحقیقی به کارایی داده‌های لندست ۸ و مدل $SEBAL$ در برآورد ET_A در

کربن، کاهش آثار تغییر اقلیم و گرمایش جهانی دارند [۲]. اهمیت این جنگل‌ها ضرورت پژوهش در زمینه‌های مختلف از جمله چگونگی وضعیت تبخیر و تعرق در آن را ایجاب می‌کند. فرایند تبخیر و تعرق، تبدیل آب از سطح پدیده‌ها و همچنین آب درون بافت گیاهان موجود در اکوسیستم به بخار و ورود آنها به جو است که تابعی از ویژگی‌های خاک، آب‌وهوا، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی منطقه است و می‌توان آن را به‌صورت پتانسیل واقعی (ET_A) محاسبه کرد. برآورد دقیق تبخیر و تعرق واقعی (ET_A)، می‌تواند از جنبه‌های مختلفی مانند تولید اولیه، بررسی رفتار و شدت آتش‌سوزی، انتخاب راهکارهای صحیح مدیریت و همچنین پایش این جنگل‌ها کمک‌کننده باشد.

ET_A از اساسی‌ترین پارامترهای معادلات بیلان آب و انرژی سطح زمین است [۳] که به‌عنوان عامل کنترل‌کننده در چرخه آب و انتقال انرژی بین بیوسفر، اتمسفر و هیدروسفر، تأثیر مهمی در هیدرولوژی و هواشناسی از جمله پیش‌بینی و برآورد سیلاب و آب‌های زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای، تعیین مقدار تبخیر مخازن آب، شبیه‌سازی گردش جوی و تغییرات آب‌وهوای جهان در مقیاس بزرگ دارد [۴]. در علوم هواشناسی و هیدرولوژی، برای اندازه‌گیری ET_A روش‌ها و معادله‌های مختلفی وجود دارد که از روش‌های مستقیم به‌شمار می‌روند [۵]. به‌کارگیری این روش‌ها به محدودیت‌هایی از جمله زمان، هزینه و لزوم دسترسی به داده‌های هواشناسی دچار است [۶]. افزون‌بر این، ET_A حاصل از روش‌های مستقیم، نقطه‌ای است و استفاده از این روش‌ها در سطوح محلی و منطقه‌ای به‌سادگی میسر نیست [۷]. اهمیت این موضوع در جنگل‌های هیرکانی به دلایلی همچون تغییرات زیاد توپوگرافی، تنوع گونه‌ای زیاد و کمبود ایستگاه‌های هواشناسی دوچندان می‌شود.

از نتایج اولین تحقیق، پژوهش‌های تکمیلی با همان رویکرد در قسمت‌های مختلف این جنگل‌ها صورت گیرد. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی صحت نقشه‌های ET_A لحظه‌ای و روزانه برآورده شده از تصاویر لندست ۸ و مدل SEBAL در قسمت بالابند جنگل‌های هیرکانی است.

مواد روش‌ها

منطقه تحقیق

منطقه تحقیق بخشی از جنگل‌های هیرکانی ایران، واقع در حوزه شهرستان‌های پل سفید و کیاسر در استان مازندران با طول جغرافیایی $28^{\circ} 52' 56''$ تا $1^{\circ} 36' 53''$ شرقی و عرض جغرافیایی $12^{\circ} 36' 2''$ تا $20^{\circ} 36' 2''$ شمالی است که زهکشی اصلی آن را رودخانه‌های تجن و تلار انجام می‌دهند. مساحت منطقه که نقشه ET_A واقعی برای آن تهیه شد، حدود ۲۰۰ هزار هکتار و تغییرات ارتفاعی آن ۲۴۰۰ متر است (شکل ۱). براساس طرح‌های جنگلداری گونه‌های راش، ممرز، بلوط، انجیلی، توسکای بیلاقی، توسکای قشلاقی، ون، پلت، افرا و شمشاد گونه‌های اصلی منطقه را تشکیل می‌دهند.

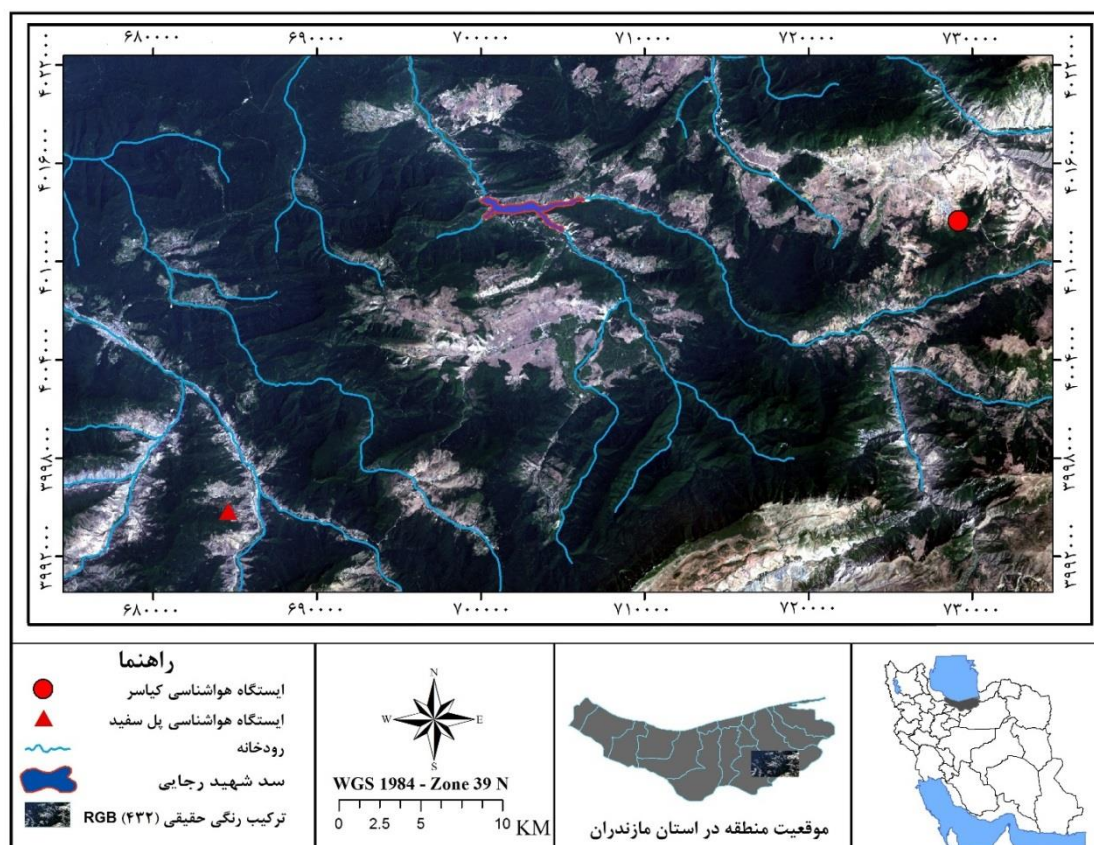
داده‌های استفاده شده

داده‌های سنجنده‌های OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ در دو تاریخ $1393/05/04$ و $1395/03/08$ از فصل رویش جنگل‌های هیرکانی که تبخیر و تعرق در آن اهمیت بیشتری دارد، از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه شد. همچنین نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای تهیه نقشه مدل رقومی ارتفاع و کنترل هندسی تصاویر استفاده شد. داده‌های سه‌ساعتی ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی پل سفید و کیاسر که در محدوده جنگل قرار دارند، برای تاریخ‌های یادشده از سازمان هواشناسی کشور تهیه و در محاسبات ET_A با روش پنمن-مانیت-فائو استفاده شد.

باغ‌های پسته در سمنان پرداختند. اعتبارسنجی ET_A برآورده شده با نتایج دستگاه هوشمند هواشناسی (iMetos-Pessl)، $R^2=0/8$ و RMSE برابر $2/5$ میلی‌متر را نشان داد که نشان‌دهنده قابلیت خوب این رویکرد برای برآورد ET_A است [۱۷]. Numata و همکاران (۲۰۱۷) توانایی داده‌های لندست ۷ و ۵ و مدل METRIC^۱ را در برآورد ET_A روزانه جنگل‌های آمازون در برزیل ارزیابی کردند. نتایج، توانایی مدل به‌کاررفته در برآورد ET_A روزانه را با $RMSE=0/81$ میلی‌متر در روز و $MAE=15\%$ نشان داد [۱۸]. Longba و Valizadeh Kamran (۲۰۱۸) با هدف تعیین ET_A روزانه گیاه ذرت در استان خوزستان، مدل SEBAL و داده‌های لندست ۸ را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که RMSE و MAE تبخیر و تعرق برآورده شده نسبت به روش پنمن-مانیت-فائو به ترتیب $0/45$ و $0/18$ است که کارآمدی روش به‌کاررفته را نشان می‌دهد [۱۹]. Abbasnezhad Alchin و همکاران (۲۰۱۸) قابلیت داده‌های لندست ۸ و مدل SEBAL را در برآورد ET_A روزانه و لحظه‌ای جنگل‌های خزری با مدل ترکیبی پنمن-مانیت-فائو مقایسه کردند. نتایج نشان داد که میانگین درصد اختلاف نسبی در مقیاس‌های لحظه‌ای و روزانه به ترتیب $11/45$ و $14/27$ درصد است که توانایی مناسب رویکرد استفاده شده است [۱۵].

بررسی منابع نشان می‌دهد که قابلیت مدل SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای در کشورهای مختلفی از جمله ایران بررسی شده است، ولی مطالعات مربوط به بخش کشاورزی است و تنها یک مطالعه در قسمت پایین‌بند جنگل‌های هیرکانی نزدیک به جلگه توسط Abbasnezhad Alchin و همکاران (۲۰۱۸) صورت گرفته است، با توجه به تنوع رویشگاه‌ها، توپوگرافی و اقلیم در جنگل‌ها هیرکانی ضروری است که برای اطمینان

1. Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration
2. Mean Absolute Error



شکل ۱. تصویر ترکیب رنگی حقیقی (RGB(432) لندست ۸ از منطقه تحقیق و موقعیت آن در ایران، استان مازندران و محل ایستگاه‌های هواشناسی

پیش‌پردازش‌ها

پیش از پردازش تصاویر، وضعیت هندسی و کیفیت رادیومتری آنها بررسی شد و پس از تبدیل ارزش‌های تصاویر (DNها) به رادیانس تصحیح اثرهای اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH در نرم افزار ENVI 5.3 انجام گرفت.

برآورد ET_A با استفاده از تصاویر و مدل SEBAL

شار گرمای نهان پارامتر اصلی محاسبه ET_A است که مدل SEBAL برپایه‌ای الگوریتم بیان انرژی سطحی مقدار آن را در لحظه تصویربرداری برای هر پیکسل محاسبه می‌کند. براساس این الگوریتم، مقدار انرژی ورودی به سطح زمین با مقدار انرژی خروجی از آن برابر است که معادله آن با چشم‌پوشی از مقدار انرژی مصرف‌شده برای فتوسنتز به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود [۱۴].

$$R_n + H + \lambda ET = G \quad (1)$$

R_n شار گرمای خالص (W/m^2)، G شار گرمایی خاک (W/m^2)، H شار گرمای محسوس (W/m^2)، λET شار گرمای نهان (W/m^2) است. برای اجرای الگوریتم مذکور، به متغیرهایی نیاز است که در ادامه به اختصار معرفی می‌شوند.

شار گرمای خالص R_n

شار گرمای خالص (R_n) براساس اختلاف بین تابش ورودی و خروجی در طول موج‌های بلند و کوتاه محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

$$R_n = (1 - \alpha) R_s \downarrow + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \epsilon_0) RL \downarrow \quad (2)$$

در رابطه بالا، $R_s \downarrow$ تابش طول موج کوتاه ورودی ($W \cdot m^{-2}$)، $RL \downarrow$ تابش طول موج بلند ورودی

تابش طول موج بلند ورودی $RL\downarrow$ و خروجی $RL\uparrow$

مقدار این تابش‌ها که به محل و زمان تصویربرداری وابسته است، براساس رابطه استقفا بولتزن (رابطه‌های ۷ و ۸) محاسبه می‌شود [۴].

$$RL\downarrow = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (۷)$$

$$RL\uparrow = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (۸)$$

در رابطه‌های بالا، ε_a گسیلندگی جو، σ ثابت استقفا بولتزن $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 / \text{K}^4$ ، T_a دمای هوای نزدیک سطح زمین برحسب درجه کلوین، ε_0 گسیلندگی سطحی و T_s دمای سطح زمین برحسب درجه کلوین است.

شار گرمایی خاک G

شار گرمای خاک مقدار ذخیره گرمایی خاک و پوشش گیاهی ناشی از هدایت مولکولی آنهاست که از نسبت آن به شار گرمای خالص و با استفاده از رابطه باستانس محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{a_s} \times (0.0038 \times a_s + 0.0074 \times a_s^2) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4) \quad (۹)$$

G شار گرمای خاک ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)، R_n شار گرمای خالص ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)، a_s سپیدایی سطحی و $NDVI$ شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهان حاصل از داده‌های ماهواره‌ای است که براساس باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شود.

شار گرمای محسوس H

شار گرمای محسوس میزان هدررفت انرژی است که در اثر اختلاف دما به هوا منتقل می‌شود.

$$H = \frac{\rho \times Cp \times dT}{r_{ah}} \quad (۱۰)$$

$RL\uparrow$ تابش طول موج بلند خروجی ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)، α ضریب آلبیدوی سطحی و ε_0 ضریب سپیدایی سطحی است. سپیدایی سطحی با استفاده از بازتاب‌های ثبت‌شده در تصاویر و ضرایب وزنی هر باند و براساس روابط تحقیق Ayad و همکاران (۲۰۱۶) برآورد و گسیلندگی سطحی براساس رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه شد [۲۰].

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01 \times LAI \quad (۳)$$

$$LAI = -\frac{\ln\left(\frac{0.73 - SAVI}{0.5}\right)}{0.3} \quad (۴)$$

LAI شاخص سطح برگ و $SAVI$ شاخص گیاهی تعدیل خاک است.

دمای سطح زمین

دمای سطح زمین براساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_0 \cdot K_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (۵)$$

T_s دمای سطح زمین به کلوین، $L\lambda$ رادیانس باند حرارتی لندست ۸ (باندهای ۱۰)، و K_1 و K_2 ضریب‌های ثابت برای باندهای حرارتی تصویر است که از Header تصاویر استخراج می‌شود.

تابش طول موج کوتاه ورودی $R_s\downarrow$

مقدار این تابش در زمان عبور ماهواره با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$R_s\downarrow = G_{SC} \times \cos\theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (۶)$$

در رابطه‌های بالا، G_{SC} ثابت خورشیدی ۱۳۶۷ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)، θ زاویه تابش خورشید در لحظه عبور ماهواره، d_r معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید و τ_{sw} شفافیت اتمسفر است.

$$ET_{24} = \frac{86400EF(R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (13)$$

ET_{24} تبخیر و تعرق واقعی روزانه (mm/day)، EF کسر تبخیر، R_{n24} تابش خالص در طول روز و G_{24} شار گرمای خاک در طول روز است. مقدار شار گرمای خاک در طول روز بسیار کم و تقریباً نزدیک به صفر $G_{24} \cong 0$ است. R_{n24} و EF به ترتیب براساس رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$R_{n24} = (1-a) \times R_a \times \tau_{sw} - 100 \times \tau_{sw} \quad (14)$$

$$EF = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} \quad (15)$$

R_a تابش فرازمینی است که از روابط هواشناسی محاسبه می‌شود.

ET_A ساعتی و روزانه زمینی

سازمان خواربار و کشاورزی، روش پنمن-مانتیت-فائو را در نشریه FAO-56 برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ساعتی و روزانه ارائه داده است [۲۱]. به منظور ارزیابی نقشه‌های ET_A برآوردشده، تبخیر و تعرق مرجع ساعتی و روزانه در تاریخ تصاویر با این روش برای ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه و به دلیل جنگلی بودن منطقه و تنوع گونه‌ای زیاد، با استفاده از ضریب منظر^۱ (K_L) به ET_A تبدیل شد. این ضریب براساس روش WUCOLS^۲ که توسط بخش منابع آب دانشگاه کالیفرنیا ایجاد شده معادل ۰/۹۳۶ محاسبه شد (رابطه ۱۶).

$$k_l = k_s \times k_d \times k_{mc} \quad (16)$$

k_s ضریب گونه، k_d ضریب تراکم و k_{mc} ضریب ریزاقليم است.

H شار گرمای محسوس ($W \cdot m^{-2}$)، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg/K$)، dT اختلاف دمای نزدیک سطح، T_a دمای هوا برحسب درجه کلوین و r_{ah} مقاومت آئرو دینامیکی است. در رابطه ۱۰ برای محاسبه چگالی هوا پارامترهای دمای سطحی و ارتفاع از سطح دریا و برای محاسبه مقاومت آئرو دینامیکی سرعت باد و زبری سطح استفاده می‌شود. اما برای محاسبه dT در مدل SEBAL از دو پیکسل سرد و گرم که ارزیابی شار گرمای محسوس و نهان در آنها امکان پذیر است، استفاده می‌شود. با محاسبه dT برای پیکسل‌های سرد و گرم و ایجاد رابطه خطی بین آنها مقدار dT برای پیکسل‌های دیگر محاسبه می‌شود (رابطه ۱۱).

$$dT = aT_s + b \quad (11)$$

در رابطه بالا، a و b ضرایب رگرسیون هستند که براساس پیکسل‌های سرد و گرم محاسبه شدند. برای اعمال اثر نیروی ارشمیدس بر شار گرمای محسوس حاصل از رابطه ۱۰، الگوریتم مونین ابوخوف (Monin-Obukhov) در یک فرایند تکراری استفاده می‌شود [۲۰].

محاسبه تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای (ساعتی)

تبخیر و تعرق واقعی در لحظه گذر ماهواره (ET_{INST}) براساس رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$ET_{INST} = 3600 \times \lambda ET / \lambda \quad (12)$$

در رابطه بالا، ET_{INST} تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای در λ گرمای نهان تبخیر (J/Kg)، λET شار گرمای نهان و ۳۶۰۰ برای تبدیل ثانیه به ساعت است.

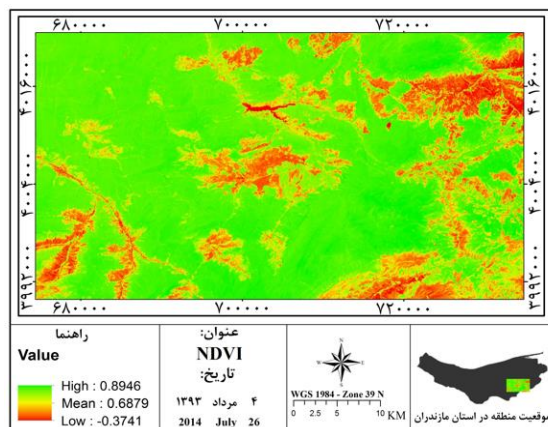
محاسبه تبخیر و تعرق واقعی روزانه

ET روزانه با استفاده از کسر تبخیر و براساس رابطه ۱۳ برآورد می‌شود.

1. Landscape coefficient
2. Water Use Classification of Land Landscape species

نشان می‌دهند. براساس این نقشه‌ها، مقدار میانگین NDVI در تاریخ ۱۳۹۵/۳/۸ (برابر ۰/۷۴۸۳) نسبت به تاریخ ۱۳۹۳/۵/۴ (برابر ۰/۶۸۷۹) بیشتر است که دلیل آن ممکن است تازگی برگ‌های درختان و وجود گیاهان علفی در مناطق غیرجنگلی باشد.

نمونه‌ای از نقشه‌های دمای سطحی برآوردشده در شکل ۲ ارائه شده است. براساس این نقشه‌ها، میانگین دمای سطحی در تاریخ‌های ۱۳۹۳/۵/۴ و ۱۳۹۵/۳/۸ به ترتیب ۳۰۸/۸۱۴ و ۳۰۶/۸۰۲ درجه کلوین است. این روند دمایی با دمای هوای منطقه مطابقت دارد. نقشه‌های دمای سطحی نیز نشان می‌دهند که سطوح آبی سد شهید رجایی و مناطق بدون پوشش گیاهی به ترتیب حداقل و حداکثر دما را دارند. این در حالی است که اراضی جنگلی، دمای متعادل‌تری نسبت به سطوح یادشده دارند. همچنین در اراضی جنگلی، مناطق دارای شاخص NDVI بیشتر (تراکم بیشتر پوشش درختان)، دمای سطحی کمتری نسبت به مناطق با شاخص NDVI کمتر دارند.



شکل ۲. نمونه‌ای از نقشه‌های NDVI و دمای سطح زمین (LST) برآوردشده از تصاویر ماهواره لندست ۸

کاربری اراضی و تراکم پوشش جنگل است؛ درحالی که مهم‌ترین دلایل تغییرات زمانی ET_A به عوامل هواشناسی مانند دما و رطوبت اشباع هوا بستگی دارد. مقایسه مقدار ET_A در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد که سطوح آبی سد شهید رجایی به دلیل تبخیر پتانسیل و سطوح بدون پوشش و صخره‌ای به دلیل کمبود آب در دسترس،

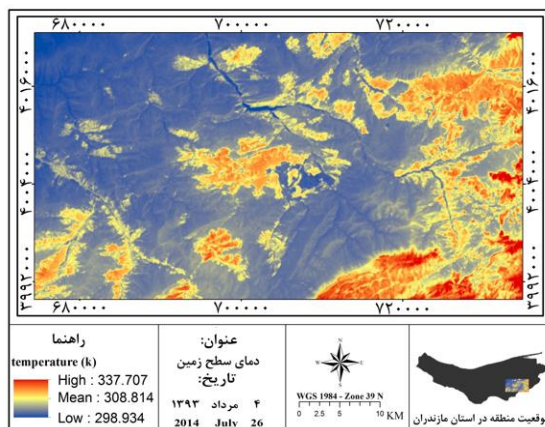
اعتبارسنجی نقشه‌های ET_A برآوردشده از تصاویر ماهواره‌ای

برای اعتبارسنجی نقشه‌های ET_A برآوردشده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل SEBAL، مقدار ET_A در محل ایستگاه‌های هواشناسی پل سفید و کیاسر از نقشه برآوردشده استخراج و با مقدار ET_A محاسبه‌شده از روش پنمن-مانیت-فائو براساس آماره‌های اختلاف مطلق و میانگین آن (MAE)، درصد اختلاف نسبی و میانگین آن (MRE) مقایسه و ارزیابی شد.

نتایج و بحث

محاسبات مربوط به مدل SEBAL

همان‌گونه که اشاره شد الگوریتم سبال از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است و قبل از تهیه نقشه‌های ET_A پارامترهای مختلفی از جمله شاخص NDVI و دمای سطحی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محاسبه می‌شوند. تفسیر نقشه‌های شاخص NDVI محاسبه‌شده (شکل ۲) تراکم درختان در قسمت‌های مختلف منطقه جنگلی را

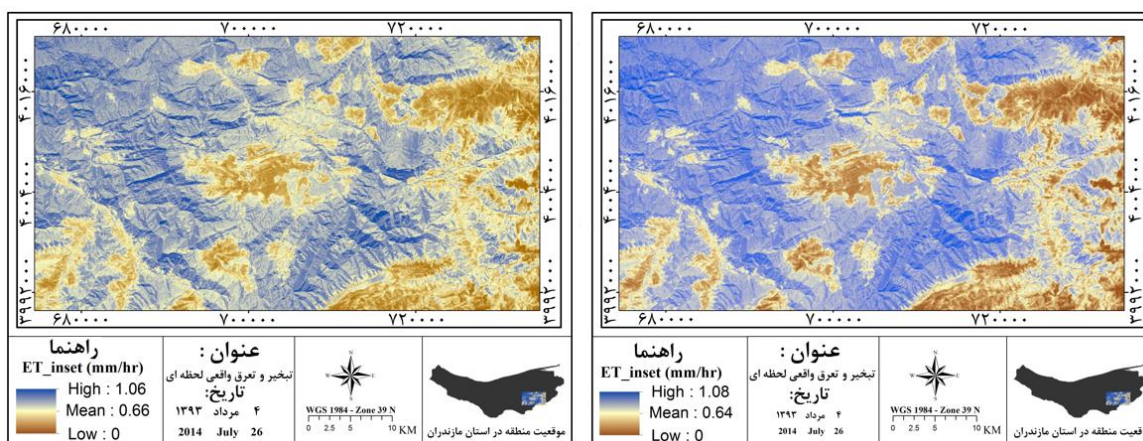


نقشه‌های ET_A برآوردشده

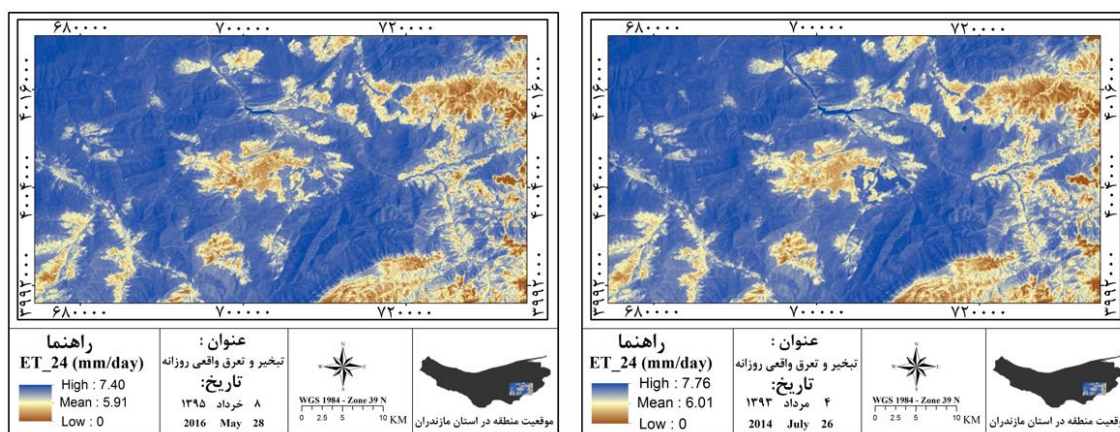
نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای (ET_{INST}) و روزانه (ET_{24}) برآوردشده از مدل SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. این نقشه‌ها تغییرات مکانی و زمانی ET_A در منطقه را نشان می‌دهند. مهم‌ترین دلایل تغییرات مکانی ET_A ، تغییر

درختان بر ET_A به صورت خطی نیست، چراکه تأثیر تراکم پوشش گیاهی بر عوامل مؤثر بر ET_A مانند گسیلندگی از یک حد به بالا به صورت ثابت در می‌آید. مقایسه متوسط ET_A برآوردشده در سطح منطقه در مقیاس‌های لحظه‌ای و روزانه نیز نشان می‌دهد که تبخیر و تعرق در تاریخ ۱۳۹۳/۰۵/۰۴ بیشتر از ۱۳۹۵/۰۳/۰۸ است.

به ترتیب حداکثر و حداقل ET_A را دارند. با وجود این، مقدار ET_A در مناطق جنگلی بیشتر از سطوح بدون پوشش و صخره‌ای و کمتر از سطوح آبی سد شهید رجایی است که این تغییرات با نتایج تحقیق Ayad و همکاران [۹] نیز همسوست. همچنین، در مناطق جنگلی با افزایش شاخص NDVI که نشان‌دهنده تراکم درختان است، مقدار ET_A افزایش پیدا می‌کند. البته تأثیر تراکم



شکل ۳. نقشه‌های تبخیر و تعرق لحظه‌ای برآوردشده (برحسب mm/hr)



شکل ۴. نقشه‌های تبخیر و تعرق روزانه برآوردشده (برحسب mm/day)

می‌دهد که میانگین اختلاف مطلق و درصد اختلاف نسبی ET_{INST} برآوردشده به ترتیب ۰/۰۶۸ و ۱۱/۹۹ است که حداقل آن مربوط به تاریخ ۱۳۹۳/۰۵/۰۴ در محل ایستگاه پل سفید با درصد اختلاف نسبی ۹/۶۰ و حداکثر آن مربوط به تاریخ ۱۳۹۵/۳/۸ در محل ایستگاه کیاسر با درصد

اعتبارسنجی نقشه‌های ET_A

به منظور ارزیابی نقشه‌های ET_A برآوردشده، مقادیر ET_A لحظه‌ای و روزانه در محل ایستگاه‌های هواشناسی از نقشه‌های برآوردشده، استخراج و با مقادیر زمینی آنها مقایسه شد (جدول‌های ۱ و ۲). نتایج مقایسه نشان

از دور در برآورد ET_{24} را نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های تحقیقات Abbasnezhad Alchin و همکاران [۱۵]، Elnmer و همکاران [۱۴] و Singh و Senay [۲۲] همسوست. از این رو با اتکا به این نتیجه می‌توان نقشه‌های تبخیر و تعرق را در سطوح گسترده جنگلی و در مقاطع زمانی مورد نظر تهیه کرد و در مطالعات مختلف و مباحث مدیریتی به کار گرفت.

اختلاف نسبی $13/58$ ، است. ET_{24} برآوردشده نیز همانند ET_{INST} برآوردشده در تاریخ $1393/05/04$ در محل ایستگاه پل سفید و در تاریخ $1395/03/08$ در محل ایستگاه کیاسر با درصد خطای نسبی $11/10$ و $15/98$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار خطای نسبی را دارد. همچنین ET_{24} برآوردشده با میانگین اختلاف مطلق $0/809$ و درصد میانگین اختلاف نسبی $13/56$ ، توانایی زیاد سنجش

جدول ۱. نتایج مقایسه ET_{INST} زمینی با ET_{INST} برآوردشده در محل ایستگاه هواشناسی

تاریخ تصاویر	ET_{INST} برآوردشده (E_i) (mm/hr)	ET_{INST} زمینی (M_i) (mm/hr)	اختلاف مطلق ($M_i - E_i$)	درصد اختلاف نسبی ($\frac{M_i - E_i}{M_i} \times 100$)
۱۳۹۵/۰۳/۰۸	۰/۵۰۶۱	۰/۵۸۳۱	۰/۰۷۷۰	۱۳/۲۱
۱۳۹۳/۰۵/۰۴	۰/۵۵۰۱	۰/۶۰۸۴	۰/۰۵۸۴	۹/۵۹۸
۱۳۹۵/۰۳/۰۸	۰/۴۶۳۱	۰/۵۳۵۸	۰/۰۷۲۷	۱۳/۵۸
۱۳۹۳/۰۵/۰۴	۰/۵۰۱۰	۰/۵۶۵۵	۰/۰۶۴۵	۱۱/۵۸
			۰/۰۶۸۴	۱۱/۹۹

جدول ۲. نتایج مقایسه ET_{24} زمینی با ET_{24} برآوردشده در محل ایستگاه هواشناسی

تاریخ تصاویر	ET_{24} برآوردشده (E_i) (mm/day)	ET_{24} زمینی (M_i) (mm/day)	اختلاف مطلق ($M_i - E_i$)	درصد اختلاف نسبی ($\frac{M_i - E_i}{M_i} \times 100$)
۱۳۹۵/۰۳/۰۸	۵/۱۹۲	۶/۰۴۹	۰/۸۵۹	۱۴/۲۱
۱۳۹۳/۰۵/۰۴	۵/۵۸۰	۶/۲۷۸	۰/۶۹۷	۱۱/۱۰
۱۳۹۵/۰۳/۰۸	۴/۸۵۱	۵/۷۷۲	۰/۹۲۳	۱۵/۹۸
۱۳۹۳/۰۵/۰۴	۵/۱۲۰	۵/۸۵۹	۰/۷۳۹	۱۲/۹۵
			۰/۸۰۹	۱۳/۵۶

نتیجه گیری

مقایسه با مناطق بدون پوشش گیاهی، مقدار ET_A بیشتر و دمای سطحی کمتری دارند. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت جنگل در ذخیره آب و تعدیل دماست، چراکه تصاویر ماهواره‌ای در روزهای آفتابی تهیه می‌شود و در نتیجه تبخیر از مناطق بدون پوشش با شدت بیشتری انجام می‌گیرد و آب در دسترس کاهش و دما افزایش پیدا می‌کند. اما در مناطق جنگلی، تبخیر و تعرق با شدت کمتری انجام می‌گیرد و در نتیجه آب در دسترس برای تبخیر و تعرق وجود دارد، بنابراین دما نیز صرف تبخیر و تعرق می‌شود و کاهش پیدا می‌کند.

نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که نقشه‌های ET_{INST} و ET_{24} برآوردشده در قسمت‌های بالابند جنگل‌های هیرکانی نیز همانند قسمت‌های پایین‌بند این جنگل‌ها از صحت مناسبی برخوردارند. بنابراین می‌توان تغییرات مکانی و زمانی ET_A در این جنگل‌ها را با استفاده از داده‌های لندست ۸ و مدل SEBAL تهیه کرد و در طرح‌های جنگلداری، مدیریت و پایش جنگل‌ها و همچنین مدیریت منابع آبی مناطق هیرکانی به کار گرفت. تغییرات ET_A و دمای سطحی روی نقشه‌های برآوردی نشان می‌دهد که مناطق جنگلی در

References

- [1]. Marvie Mohadjer, M.R. (2011). *Silviculture*, University of Tehran Press.
- [2]. Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., and Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1): 63-105.
- [3]. Atarod, P., Sadghi, M. M., Fathizade, O., Motahry, M., Rahbar, S., Ahmadi, M., and Bairamzade, V. (2015). Temperature- and radiation based methods against the standard FAO Penman- Monteith for estimating the reference evapotranspiration (ET_0) in Gorgan. *Forest and Wood Products*, 68, 359-369.
- [4]. Zhao, L. L., Ronglin, T., Zhengming, W., Yuyun, B., Chenghu, Z., Bohui, T., Guangjian, Y., and Xiaoyu, Z. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9:3801-3853.
- [5]. Alizadeh, A. (2011). *Principles Applied Hydrology*. Mashhad: University Ferdowsi.
- [6]. Dominique, C., Bernard, S., Albert, O. (2005). Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems*, 19: 223–249.
- [7]. Elhag, M., Psilovikos, A., Manakos, I., and Perakis, K. (2011). Application of the SEBS water balance model in estimating daily evapotranspiration and evaporative fraction from remote sensing data over the Nile Delta. *Water Resources Management*, 25(11): 2731-2742.
- [8]. Aronoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS Managers*. Translated by Darvishsefat. A. A, Pir Bavaghar M. & Rajab Pourrahmati. M. University of Tehran Press.
- [9]. Ayad, A. F., Ahmad, H. A., Adrian, O., Anna, J., and Adriana, M. (2016). Estimation of evapotranspiration using sebal algorithm and landsat-8 data-a case study: Tatra Mountains Region. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 6: 257-270.
- [10]. Mao, Y., and Wang, K. (2017). Comparison of evapotranspiration estimates based on the surface water balance, modified Penman-Monteith model, and reanalysis data sets for continental China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(6), 3228-3244.
- [11]. Nosrati, K., saravi, M. M., Ahmadi, H., and Agighi, H. (2016). Estimation of evapotranspiration in Taleghan watershed using SEBAL and MODIS model images. *Journal Iranian Natural Resources Pasture and Watershed*, 68, 385-398.
- [12]. Senay, G.B., Friedrichs, M., Singh, R.K., and Velpuri, N.M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*. 185: 171-185.
- [13]. Edward, P. G., Alfredo, R. H., Pamela L. N., and Katherine K. (2007). Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(3): 139-168.
- [14]. Yuei, A. L., and Sanjib, K. K. (2014). Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-A review. *Energies*, 7: 2821-2849.
- [15]. Abbasnezhad Alchin, A., Darvishsefat, A.A., and Bazrafshan J. (2018). Comparison of landsat 8 satellite data and SEBAL model for estimating evapotranspiration of Caspian forests with combined Penman Monteith. *Iranian Journal of Forest*, 3: 389-402.
- [16]. Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., and Tawfik, A. (2019). Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management*, 213: 682-692.
- [17]. Rahimzadegan, M., & Janani, A. (2019). Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery. *Agricultural Water Management*: 217: 383-390.
- [18]. Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., Cochrane, M., and Silva, S. (2017). Evaluation of Landsat-based METRIC modeling to provide high-spatial resolution evapotranspiration estimates for Amazonian forests. *Remote Sensing*, 9(1): 46-57.

- [19]. Valizadeh Kamran, K., and Longbaf, M. (2018). Application of satellite processing images in calculating the water requirement of arable plants (Case Study: The Part of Northern Land of the Khuzestan Province). *Journal of Geography and Planning*, 22: 287-299.
- [20]. Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., and Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and User's Manual- Idaho Implementation*, version, 1: 1-97.
- [21]. Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., and Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1): 2-13.
- [22]. Singh, K. R., and Senay, B. G. (2015). Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States, *Water*, 8(1): 9-22.

Preparation and estimating of evapotranspiration maps based on Landsat 8 satellite data and SEBAL model in Hyrcanian forests (Case study: Pol-Sefid and Kiasar forests)

A. Abbasnezhad Alchin; PhD. Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

A. A. Darvishsefat*; Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

J. Bazrafshan; Assoc., Prof., Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

(Received: 07 July 2019, Accepted: 15 October 2019)

ABSTRACT

Hyrcanian forests play an important role in absorbing carbon dioxide and reducing the severity of climate change and global warming. The accurate estimation of actual evapotranspiration can help to plan for conservation and management of these forests and their water resources. Direct measurement methods for evapotranspiration have limitations, one of the most important of them is the pointed measurements. Methods for distance measuring have been developed to address these constraints. The purpose of this study was to prepare and estimate actual instantaneous (ET_{INST}) and daily (ET_{24}) evapotranspiration maps from Landsat 8 satellite imagery and SEBAL model in Hyrcanian forests. For this purpose, Landsat 8 satellite images were prepared in two different dates, i.e. 2014/7/26 and 2016/5/28 in 200 thousand hectares of Hyrcanian forests in the cities of Pol-Sefid and Kiasar, and after processing and calculations, latent heat flux was estimated from images and from that basis, ET_{INST} and ET_{24} maps were prepared. To evaluate these maps, ET_{INST} and ET_{24} land values were calculated using weather data of Pol-Sefid and Kiasar stations and the FAO Penman Monteith method. The estimated ET_{INST} and ET_{24} means at the Pol-Sefid station were 0.53 and 5.39 and at Kiasar station, 0.48 and 4.98 respectively. The calculated mean of these two parameters, respectively, were 0.60 and 6.16, at the Pol-sefid station and 0.55 and 5.82, at the Kiasar station. The results showed that the percentage of estimated relative differences for ET_{INST} and ET_{24} is 0.068 and 0.809 respectively, and mean percentage of estimated relative differences for ET_{INST} and ET_{24} is 11.99% and 13.56%, respectively, which in total shows the high ability of the used approach for evapotranspiration maps.

Keywords: Hyrcanian forests, evapotranspiration map, remote sensing, Landsat 8, SEBAL.

* Corresponding Author, Email: Adarvish@ut.ac.ir, Tel: +982632223044