

مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.20080891.1400.15.4.5.6

تلفیق تکنیک‌های فائو-۵۶ و سنجش از دور به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه نیمه خشک

استان اصفهان

ناهید مشتاق^۱، رضا جعفری^{۲*}، سعید سلطانی^۳، نفیسه رضانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

چکیده

پهنه‌بندی مکانی مقادیر تبخیر و تعرق (ET) به‌طور غیرمستقیم برای مدیریت و احیاء مراتع دارای اهمیت فراوان می‌باشد. نقشه تبخیر و تعرق می‌تواند نشانگر تغییرات مکانی نیاز آبی گیاهان باشد. در روش‌های پهنه‌بندی تبخیر و تعرق استفاده از داده‌های سنجش از دور به دلیل پوشش مکانی و زمانی و همچنین استفاده بهینه از زمان و هزینه، گزینه مناسبی برای اندازه‌گیری‌های گسترده تبخیر و تعرق می‌باشد و در بین روش‌های متداول در این زمینه، مدل فائو-۵۶ می‌باشد. لذا، هدف مطالعه حاضر برآورد توزیع مکانی مقدار ET با استفاده هم‌زمان از تکنیک‌های مدل فائو-۵۶ و سنجش از دوری در غرب استان اصفهان می‌باشد. برای محاسبه ET شاخص گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) و دمای سطح زمین از تصویر زمین مرجع شده ماهواره لندست TM مربوط به ۱۱ خرداد ۱۳۸۸ استفاده شد و تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀) نیز با استفاده از معادله فائو-۵۶ به‌دست آمد. سپس فاکتورهای ضریب محصول (Kc)، تبخیر و تعرق محصول (Kcb) و تبخیر و تعرق خاک (Ke) با استفاده از تصاویر NDVI محاسبه شد. نتایج نشان داد که اراضی کشاورزی با ۶/۹ میلی‌متر در روز و اراضی بایر با ۰/۱۲۰ میلی‌متر در روز بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تبخیر و تعرق را در منطقه دارند. همبستگی بالای نقشه ET با نقشه‌های شناخته‌شده سنجش از دوری مثل NDVI (بیش از ۹۹ درصد) و دمای سطحی (بیش از ۹۲ درصد)، بیان می‌دارد که پهنه‌بندی ET در سطح منطقه با صحت بالا انجام شده است، بنابراین، می‌توان گفت که این روش می‌تواند مکمل ارزشمندی برای روش‌های میدانی در تعیین نیاز آبی گیاهان و اهداف احیایی باشد.

واژه‌های کلیدی: شهرستان فریدن، دمای سطح زمین، لندست TM، مادون قرمز حرارتی، NDVI.

^۱ - دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۲ - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: reza.jafari@cc.iut.ac.ir

^۳ - استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

مقدمه

اهمیت مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در منطقه خاورمیانه و کشورهای در حال توسعه، به‌دلیل افزایش تقاضا برای بهره‌برداری‌های مختلف است و وابستگی به بارندگی برای تولید محصول یک محدودیت عمده در تولید مواد غذایی مستمر و پایدار این کشورها در آینده ایجاد می‌کند (۲۸). بنابراین نیاز فوری به شناسایی و گسترش یک روش استاندارد، دقیق و قابل قبول در سطح جهانی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع برای محاسبه دقیق آب مورد نیاز گیاهان توسط محققان مختلف تأکید شده است (۲). تبخیر و تعرق مرجع، بیش‌ترین مقدار تبخیر و تعرقی است که در شرایط بدون محدودیت آب از سطحی که با پوشش گیاهی کامل مانند چمن یا یونجه پوشیده شده باشد، صورت گیرد (۴). مدل‌های مختلفی توسط دانشمندان برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع پیشنهاد شده است که عبارتند از پنمن-رایت^۱، پنمن-مانتیث^۲، بلانی-کریدل^۳، فائو-پنمن-مانتیث^۴، هارگریوز^۵ و غیره (۲). بسیاری از این مدل‌ها نیاز به واسنجی محلی دارند که پذیرش آن‌ها را در سطح جهانی محدود کرده است. عملکرد بالاتر مدل فائو-پنمن-مانتیث (فائو-۵۶) در مناطق مختلف جهان در مقایسه با سایر مدل‌ها باعث شد که در سال ۱۹۹۰ این مدل از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی^۶ (ICID) و سازمان خواروبار جهانی^۷ (FAO) بعنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روی داده‌های اقلیمی معرفی شود (۲). ۱۲ و ۱۳). در روش فائو-۵۶، تبخیر و تعرق محصول^۸ از ترکیب تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی^۹ محاسبه می‌شود (۸). در این روش داده‌های خاص هواشناسی مانند دمای حداقل و حداکثر روزانه، سرعت باد، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی مورد نیاز است که به سادگی از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه قابل دسترس می‌باشد (۲). تبخیر و تعرق کمیتی بسیار متغیر در مکان و زمان است.

در بعد مکان به علت تغییرات وسیع مکانی میزان بارندگی، رفتار هیدرولوژیک خاک و وجود انواع پوشش‌های گیاهی و تراکم آنها متغیر است؛ از طرفی با زمان نیز متغیر است، زیرا مقدار پارامترهای اقلیمی با زمان تغییر می‌کند. برای رفع این محدودیت‌ها از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک سنجش از دور در سطوح وسیع استفاده شده است. مزیت استفاده از داده‌های سنجش از دور این است که ETc را می‌توان بدون نیاز به کمی کردن سایر فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیک برای سطوحی وسیع و در یک لحظه محاسبه نمود. استفاده از روش فائو-۵۶ در ترکیب با تکنولوژی سنجش از دور در محاسبه تبخیر و تعرق امکان محاسبه این پارامتر را در سطوح وسیع با دقت بالا و هزینه کم فراهم می‌کند (۸) و (۹). در طول دهه گذشته روش‌های متعددی برای برآورد ETc بر اساس ترکیبی از مدل‌سازی محصول و داده‌های سنجش از دور توسعه یافته است، شاخص‌های گیاهی^{۱۰} از جمله این روش‌ها است که به‌دلیل سادگی محاسبات بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد (۸). تحقیقات مختلفی در زمینه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از شاخص‌ها و مدل‌های مختلف در خارج و داخل کشور انجام شده است که به نمونه‌هایی از آنها در ذیل اشاره شده است. راکی و همکاران (۲۰۰۷) از سه روش بر پایه روش فائو-۵۶، به برآورد تبخیر و تعرق واقعی گندم زمستانه تحت شرایط مختلف آبیاری در مناطق نیمه‌خشک الحازو مراکش پرداختند. این سه روش در محاسبه ضریب محصول و کسر پوشش سطح خاک متفاوتند. در روش اول مقدار Kcb^{۱۱} از جدول فائو-۵۶ و FC^{۱۲} بدون واسنجی از ضریب Kcb به‌دست آمد. در روش دوم Kcb را به‌صورت منطقه‌ای و مقادیر FC از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای به‌دست آمد. در روش سوم از شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) که از داده‌های سنجش از دور به دست می‌آید برای تخمین Kcb و FC استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی فصلی شاخص گیاهی NDVI با Kcb دارای تشابه است و روابط بین Kcb و

7- Food and Agriculture Organization

8- Crop evapotranspiration

9- Crop coefficient

10- Vegetation index

11- Basal crop coefficient

12- Cover fraction

1- Penman-Wright

2- Penman-Montieth

3- Blaney- Kriddle

4- FAO-Penman-Montieth

5- Hargreaves

6- International Commission on Irrigation & Drainage

ایران کشوری است که بحران آب چالش اصلی آن است. در گذشته به دلیل کم بودن جمعیت، بحران آب به اندازه امروز محسوس نبود، ولی افزایش جمعیت و نیاز به تأمین غذای بیش‌تر همراه با تداوم خشکسالی روز به روز این بحران را نمایان‌تر کرده است. بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب کشور است، بنابراین تلفات عمده آب نیز به این بخش به‌ویژه در بخش آبیاری تعلق دارد. مطابق مطالعات انجام شده ۹۹ درصد آب مورد مصرف گیاه در اثر فرآیند تبخیر و تفرق تلف می‌شود (۱ و ۱۰). بنابراین استفاده از روش مناسب در برآورد تبخیر و تفرق مرجع در ایران جهت محاسبات نیاز آبی گیاهان و برنامه‌ریزی مؤثر و اجرای سیاست‌های مختلف در پروژه‌های احیایی بسیار ضروری است. طبق بررسی‌های بعمل آمده، تحقیقی که بطور هم‌زمان از مدل فائو-۵۶ و تکنیک‌های سنجش از دوری در برآورد تبخیر و تفرق در داخل کشور استفاده کرده باشد، در مرور منابع یافت نشد که این موضوع می‌تواند از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر باشد. لذا هدف تحقیق حاضر برآورد تبخیر و تفرق با استفاده از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای لندست و روش فائو-۵۶ در اراضی زراعی و مرتعی مناطق نیمه‌خشک غرب استان اصفهان می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در احیاء مراتع به‌خصوص در تعیین نیاز آبی گیاهان مرتعی و انتخاب نوع آنها بر اساس میزان مصرف آب برای کاشت در دیم زارهای رهاشده مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه و ایستگاه هواشناسی

مطالعه حاضر در شهر دامنه شهرستان فریدن و اراضی اطراف آن در غرب استان اصفهان انجام گرفت. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی را در ایران و استان اصفهان نشان می‌دهد. این منطقه با ارتفاع ۲۴۰۰ متر از سطح دریا دارای میانگین بارش ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. میانگین درجه حرارت در تیرماه ۲۳ درجه و در دی‌ماه ۲/۸- گزارش شده است. مساحت منطقه نیز ۱۶۷۰۰ هکتار را دربرمی‌گیرد (۲۰).

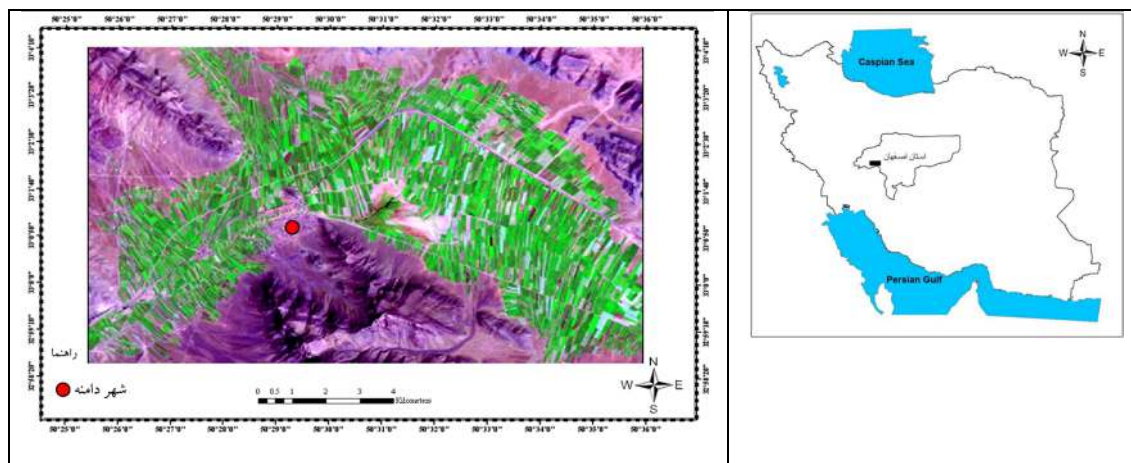
NDVI و FC نشان داده است که تعیین ضریب محصول با داده‌های سنجش از دور و واسنجی کردن منطقه‌ای داده‌ها، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد و می‌تواند برای تعیین نیاز آبی محصول در محیط مزرعه به کار گرفته شود و مصرف کلی آب را در مقیاس منطقه‌ای محاسبه نماید. سیمونوکس و همکاران (۲۰۰۸) در اراضی کشاورزی بخش مرکزی مراکش با استفاده از NDVI تبخیر تفرق گیاه مرجع، ET واقعی را برای مزارع گندم محاسبه نمودند. در واقع محققان زیادی شباهت بین الگوی فصلی شاخص‌های گیاهی و تفرق سالانه گیاهان را نشان داده‌اند (۷، ۹، ۱۵، ۱۶، ۳۱، ۳۳ و ۳۴). مطابق نتایج این مطالعات ضریب محصول می‌تواند با استفاده از شاخص‌های گیاهی برآورد شود. از دلایل آن ارتباط ضریب محصول و شاخص‌های گیاهی به شاخص سطح برگ^۱ و پوشش جزئی زمین^۲ است (۱۴، ۱۷ و ۱۸). شاخص گیاهی NDVI و شاخص سطح برگ برای این منظور و برآورد تبخیر و تفرق در مطالعات بسیاری در داخل کشور از جمله صالحی و همکاران (۲۰۲۰) در اراضی کشت و صنعت امیرکبیر جنوب استان خوزستان و نوری و همکاران (۲۰۲۰) در دشت ورامین استان تهران و همچنین خارج کشور مانند رمپازو و همکاران (۲۰۲۱) در برزیل، وانگ و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه آبخیز بای‌یانگ‌دیان^۳ چین، و سونی و سید (۲۰۲۱) در چهار حوضه آبخیز اصلی هند مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برآورد مقدار تبخیر و تفرق در داخل کشور با استفاده از روش‌های مختلفی انجام شده است. به‌طور مثال شرقی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل فائو ۵۶ مقدار تبخیر و تفرق گیاه مرجع را در ۲۹ ایستگاه هواشناسی و کلیماتولوژی استان یزد محاسبه کردند. سپس با برقراری ارتباط بین پارامتر تبخیر و تفرق با ارتفاع و همچنین روش عکس مجذور فاصله نقشه‌های مقادیر تبخیر و تفرق گیاه مرجع در سطح استان را پهنه‌بندی نمودند. اصغرزاده و ثنائی‌نژاد (۲۰۰۵) نیز با استفاده از معادله توازن انرژی و مدل هارگرویز تبخیر و تفرق را در حوزه تنگ‌کنشت کرمانشاه محاسبه کردند و نتایج نشان داد که همبستگی بیش از ۰/۹ بین این مدل‌ها وجود دارد.

³- Baiyangdian

¹- Leaf area index

²- Fractional ground cover



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان اصفهان. تصویر ماهواره‌ای لندست رنگ طبیعی با باندهای ۳، ۲ و ۱ را نشان می‌دهد که روی نقشه استان اصفهان با جعبه سیاه مشخص شده است.

غالب مزارع آن یونجه و گندم است که به صورت بارانی آبیاری می‌گردد. پوشش غالب مراتع نیز گیاهان بوته‌ای گون (*Astragalus verus*) و گراس‌های چند ساله (*Bromus tomentellus*) می‌باشد.

جهت برآورد داده‌های هواشناسی از اطلاعات نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه که ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهر داران مرکز شهرستان فریدن واقع در اقلیم نیمه‌خشک معتدل با زمستان‌های سرد بود استفاده شد. مشخصات این ایستگاه و داده‌های هواشناسی مربوط به آن در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اقلیم منطقه کشت

جدول ۱: موقعیت و داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه داران در تاریخ ۱۳۸۸/۳/۱۱

ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	حداقل دما ($^{\circ}\text{C}$)	حداکثر دما ($^{\circ}\text{C}$)
۲۲۹۰	$50^{\circ} 22'$	$32^{\circ} 58'$	$7/4$	$23/6$
سرعت باد (m/s)	رطوبت نسبی (%)	فشار بخار اشباع (Kpa)	ساعت آفتابی	
۱/۵۴	۴۲	۰/۵۱۹	۱۳/۵	

توپوگرافی با استفاده از عملگر Topographic Normalize نرم‌افزار ERDAS IMAGINE 9.1 انجام شد. پس از آماده‌سازی تصویر منطقه‌ای به مساحت ۱۶۷۰۰ هکتار شامل اراضی مرتعی و کشاورزی بر روی تصویر انتخاب و جداسازی شد.

تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از باندهای انعکاسی

برای محاسبه تبخیر و تعرق به کمک باندهای انعکاسی از روش فائو-۵۶ استفاده شد. فرض این مدل بر آن است که ضریب هر محصول می‌تواند با توجه به یک محصول استاندارد محاسبه گردد که این ضریب با توجه به دوره

آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه از باندهای انعکاسی با قدرت تفکیک ۳۰ متر تصویر ماهواره لندست-۵ سنجنده TM در تاریخ ۱۱ خرداد ۱۳۸۸ استفاده شد. تصویر مذکور ابتدا با استفاده از نقاط کنترل زمینی به‌دست آمده از عوارض ثابت و تقاطع جاده‌ها و آبراه‌ها به نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ به روش نزدیک‌ترین همسایه با به کارگیری معادله چند جمله‌ای درجه یک در سیستم مختصات متریک (UTM= zone 39N) با خطای کم‌تر از نیم‌پیکسل زمین مرجع شد. سپس جهت حذف اثر پستی و بلندی‌های منطقه تصحیح

به دست آمد که پارامترهای آن در جدول ۲ ارائه شده است (۳).

رابطه (۷)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \left[\frac{890}{T + 273} \right] U(ea - ed)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده در روش فائو-۵۶

علامت اختصاری	توضیح پارامتر
ET _o	تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی متر بر روز)
Rn	تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگا ژول بر متر مربع بر روز)
T	متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سانتی گراد)
U ₂	سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)
ea - ed	کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (کیلو پاسکال)
γ	ضریب رطوبتی (کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد)
G	شار گرمای داخل خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز)
Δ	شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد)

شیب منحنی فشار بخار که در جدول ۲ به آن اشاره شده است از رابطه زیر محاسبه می شود.

رابطه (۸)

$$\Delta = \frac{2504 \exp \left[\frac{17.25T}{(T + 237.3)} \right]}{(T + 237.3)^2}$$

به منظور بررسی صحت تبخیر و تعرق به دست آمده از تحلیل رگرسیون در نرم افزار SPSS استفاده شد. جهت ایجاد همبستگی بین تبخیر و تعرق با مقادیر دمای سطحی و NDVI از میانگین سه پارامتر در بافرهای ۱۰۰ متری در اطراف ۱۲۰ نقطه با پراکنش مناسب در سطح منطقه استفاده شد. لازم به ذکر است که جهت ارزیابی صحت دمای سطح زمین به دست آمده از تصویر لندست، داده های دمای سطح زمین از ۱۰ ایستگاه موجود در منطقه در پیکسل های متناظر استخراج و مقایسه انجام شد.

بحث و نتیجه گیری

داده های هواشناسی به دست آمده از ایستگاه سینوپتیک داران مطابق جدول (۱) برای محاسبه تبخیر و

رویشی گیاه متغیر است. طبق این مدل میزان تبخیر و تعرق از رابطه زیر به دست می آید (۲۹).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن؛ ET_c برابر تبخیر و تعرق محصول بدون داشتن استرس آب، ET_o برابر تبخیر و تعرق گیاه مرجع که از فرمول فائو-۵۶ محاسبه می شود و K_c ضریب محصول مورد مطالعه می باشد. K_c یا ضریب محصول که یک ضریب جهانی است از مجموع تبخیر آب از سطح خاک (K_e) و تعرق گیاه (K_{cb}) طبق رابطه محاسبه شده است (۲۹).

$$K_c = K_e + K_{cb} \quad \text{رابطه (۲)}$$

طبق مطالعه آلن و همکاران (۱۹۹۸)، K_{cb} می تواند طبق رابطه زیر با استفاده از شاخص NDVI به دست آید، برای محاسبه پارامترهای K_c که همان K_e و K_{cb} می باشد می توان از تصاویر ماهواره ای استفاده نمود (۵).

رابطه (۳)

$$K_{cb} = 1.64(NDVI - NDV_{min})$$

$$NDVI_{min} = 0.15$$

NDVI: شاخصی است که به میزان و وضعیت پوشش

گیاهی وابسته است و از رابطه (۴) به دست می آید (۲۶).

رابطه (۴)

$$NDVI = \frac{R_4 - R_3}{R_4 + R_3}$$

که در آن R₄ و R₃ بترتیب بازتابندگی طیفی باندهای مادون قرمز و قرمز سنجنده TM از طیف الکترومغناطیس می باشند.

برای محاسبه K_c از رابطه زیر می توان استفاده نمود

(۹).

رابطه (۵)

$$K_e = (1 - FC)K_{e, Max}$$

$$K_{e, max} = 0.3$$

FC در رابطه بالا همان کسر پوشش گیاهی است که

از رابطه ۶ حاصل می شود.

رابطه (۶)

$$FC = 1.18(NDVI - NDV_{min})$$

با استفاده از روابط ۳، ۴ و ۵ می توان K_c را به دست

آورد سپس با ضرب آن در ET_o، مطابق رابطه ۱ مقدار تبخیر و تعرق برای منطقه مورد مطالعه حاصل می شود. محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روش فائو-۵۶ طبق رابطه زیر

پوشش گیاهی کم‌تر باشد مقدار این ضریب نیز کم‌تر می‌شود. همانطوری که مقایسه این نقشه با نقشه شاخص گیاهی NDVI نشان می‌دهد، مناطق با مقادیر NDVI بالاتر (اراضی زراعی) ضریب گیاهی بیش‌تری نیز دارند.

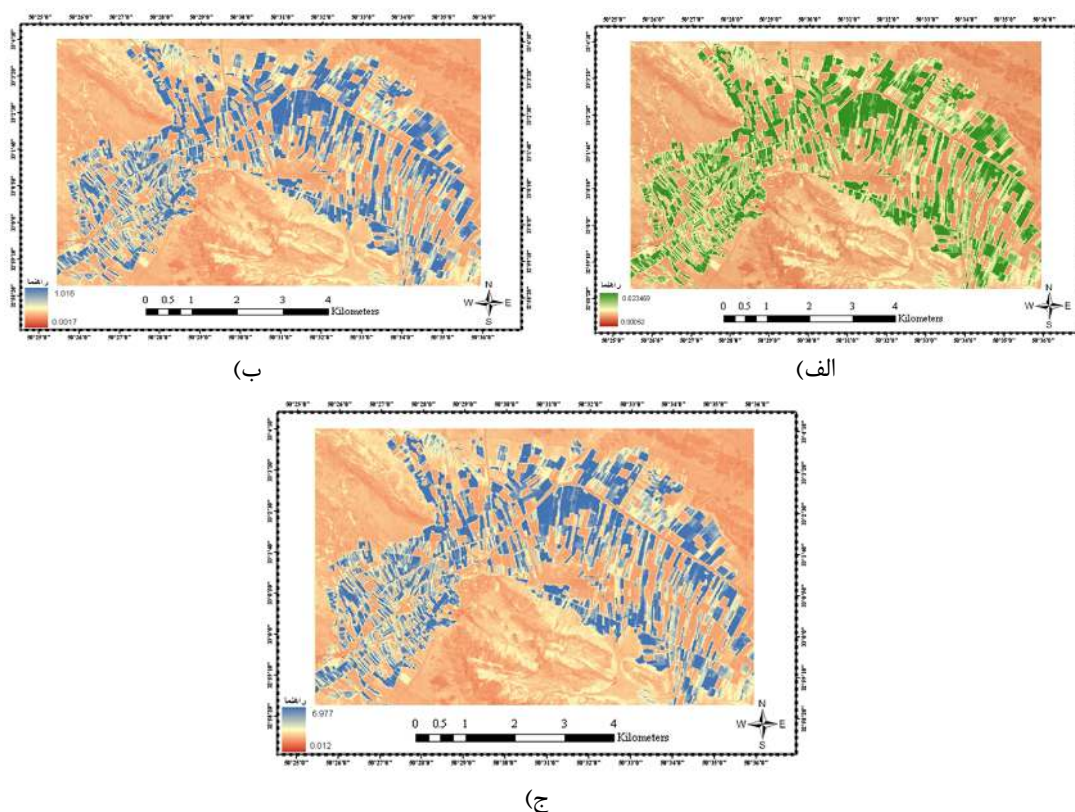
مطالعات پیشین نحوه تأثیر NDVI روی ضریب محصول را بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که FC مشاهداتی ترکیب خطی از بازتاب طیفی خاک لخت و تاج پوشش گیاهی است. بررسی عوامل مختلف مؤثر در این ترکیب خطی نشان می‌دهد که به‌طور کلی هر چقدر شاخص سطح برگ در واحد زمین در داخل تاج پوشش گیاهی بیش‌تر باشد، مقادیر NDVI بالاتری به ازای مقادیر معین FC تولید می‌شود. به‌علاوه افزایش سایه پوشش گیاهی بر روی سطح خاک لخت نیز مقدار NDVI بالاتری را ایجاد می‌کند (۱۷ و ۳۵).

جهت تبدیل تبخیر و تعرق پتانسیل به مقدار واقعی آن پس از محاسبه ضریب گیاهی در منطقه مطابق رابطه (۱) با استفاده از نقشه Kc و عدد تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست آمده از روش فائو-۵۶ نقشه تبخیر و تعرق واقعی روزانه به صورت پیکسلی تولید شد که در شکل ۲، ج ارائه شده است. تغییرات مقدار تبخیر و تعرق واقعی اراضی کشاورزی، شهر دامنه و مراعات اطراف آن در روز ۱۱ خرداد سال ۱۳۸۸ (زمان تصویر ماهواره‌ای) بین ۰/۱۲ تا ۶/۹۷۷ میلی‌متر در روز برآورد شد. اراضی کشاورزی منطقه با کشت غالب یونجه و گندم بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق را دارند و هر چه پوشش گیاهی کم‌تر می‌شود مقدار تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد که کم‌ترین مقدار آن در اراضی بایر می‌باشد. اراضی مرتعی مقادیر متوسط را نشان دادند. تغییرات تبخیر و تعرق بر اساس مقادیر مختلف پوشش گیاهی در تحقیقات پیشین نیز اشاره شده است (۲۷، ۳۰ و ۳۲). با توجه به اینکه میزان تبخیر و تعرق به تغییرات دما نیز بستگی دارد لازم است تغییرات دمایی منطقه نیز ذکر گردد. پهنه‌بندی دمای سطحی انجام شده در منطقه مطالعاتی توسط مشتاق و همکاران (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که در منطقه مطالعاتی پراکنش دمایی بین ۲۹۱ تا ۳۲۸ درجه کلون می‌باشد که زمین‌های

تعرق گیاه مرجع (ET₀) استفاده و تبخیر و تعرق برای منطقه مورد نظر با استفاده از (رابطه ۷) ۶/۵۹۸ میلی‌متر در روز به‌دست آمد. طبق بررسی‌های انجام شده کشت غالب مزارع منطقه مربوط به یونجه و در درجه دوم گندم است که به صورت بارانی آبیاری می‌گردد، در زمان برداشت تصویر که یازدهم خردادماه است گندم به رشد حداکثر خود رسیده و یونجه نیز دوره قبل از گلدهی را می‌گذرانند. در اراضی مرتعی نیز گیاهان بوته‌ای مانند گون (*Astragalus verus*) و گراس‌های چند ساله مانند (*Bromus tomentellus*) غالب بودند.

جهت محاسبه ضریب محصول (Kc) مطابق مطالعات آلن و همکاران (۱۹۹۸) نیاز به محاسبه شاخص گیاهی NDVI بعنوان معیار پوشش گیاهی سبز می‌باشد. پوشش گیاهی سبز سالم به‌دلیل وجود کلروفیل در عملیات فتوسنتز در ساختار داخلی برگ نور قرمز را جذب کرده و آن را در طول موج مادون قرمز منعکس می‌کنند. NDVI رابطه خطی با میزان زیتوده گیاه و مقدار سبزی‌نگی آن دارد و مقدار آن از -۱ تا +۱ متغیر است. هر چه پوشش گیاهی منطقه متراکم باشد این شاخص بالاترین مقادیر مثبت را دارد و در اراضی بایر، مناطق زراعی آیش و خاک‌های لخت کمترین مقدار مثبت و در صورت وجود منابع آبی و سطوح مرطوب مقدار منفی نشان می‌دهد (۱۱ و ۱۹). در نقشه تولید شده NDVI منطقه مطابق شکل ۲، الف مقدار ۰/۸۲ برای اراضی زراعی کشت یونجه که کاملاً متراکم و پوشیده از گیاه می‌باشد به‌دست آمد و برای اراضی بایر خاک‌های لخت خشک و اراضی آیش مقادیر آن بین ۰/۰۸ تا ۰/۲ متغیر بود.

با استفاده از رابطه ۲ محاسبه ضرایب گیاهی در مدل فائو-۵۶ و ارتباط این ضرایب با شاخص گیاهی NDVI، مقدار ضریب محصول (Kc) برای منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد که در شکل ۲، ب نشان داده شده است. همانطوری که در شکل مشاهده می‌شود محدوده این ضریب در منطقه مطالعه بین ۱/۰۱۶-۰/۰۱۷ است که بیش‌ترین مقدار این ضریب که با رنگ آبی در شکل نشان داده شده است مربوط به اراضی کشاورزی در منطقه می‌باشد. هر چه



شکل ۲: (الف) نقشه شاخص گیاهی NDVI، (ب) نقشه ضریب گیاهی، (ج) نقشه پراکنش تبخیر و تعرق واقعی روزانه بر حسب میلی متر در روز

برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز برآورد تبخیر و تعرق اشاره دارد و نشان می‌دهد که هر چه پوشش گیاهی بیش‌تر باشد دمای سطحی کم‌تر و تبخیر و تعرق بالاتر می‌شود. نوپاوا و همکاران (۲۰۰۳) تبخیر و تعرق روزانه را با استفاده از داده‌های ماهواره AVHRR در حوزه رودخانه ناتوری ژاپن برآورد نمودند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که بیش‌ترین مقدار تبخیر و تعرق از پیکسل‌هایی است که دمای سطحی پایین و مقدار شاخص NDVI بالاتری دارند و کم‌ترین مقدار مربوطه به پیکسل‌هایی با دمای بالا و شاخص NDVI کم‌تر است و به‌طور کلی این مطالعه دقت تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های سنجش از دور نسبت به برآورد زمینی قابل را قبول نشان داد. نگلر و همکاران (۲۰۰۷) تبخیر و تعرق را در گراسلندها و بوته‌زارهای حوضه آبخیز منطقه نیمه‌خشک جنوب غربی آریزونا با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS برآورد نمودند. نتایج رابطه قوی بین تبخیر و تعرق با شاخص گیاهی را نشان داد. این مطالعه

کشاورزی با پوشش کامل گیاهی حداقل دمای به‌دست آمده (۲۹۱ درجه کلون) را دارند. هر چه پیکسل میزان پوشش گیاهی کم‌تری داشته باشد، دما افزایش می‌یابد. حداکثر دما در منطقه (۳۲۸ درجه کلون) مربوط به خاک‌های لخت و زمین‌های بایر بود و میانگین دمای منطقه نیز ۳۱۰ درجه کلون در لحظه گذر ماهواره به‌دست آمد. ضریب همبستگی نقشه دمای به‌دست آمده از لندست با داده‌های ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در منطقه و حاشیه آن بالاتر از ۰/۸۴ به‌دست آمد که نشان از دقت مناسب نقشه خروجی از داده‌های لندست می‌باشد. مقایسه دو نقشه NDVI و تبخیر و تعرق با تغییرات دمای منطقه از لحاظ آماری در تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد که مقدار تبخیر و تعرق و NDVI با دمای سطحی ضریب تعیین منفی ۰/۹۲ و ضریب تعیین بین شاخص گیاهی و مقدار تبخیر و تعرق بالاتر از ۰/۹۹ می‌باشد. این نتایج به‌طور کلی به تطابق خوب بین نقشه‌های سنجش از دوری به‌دست آمده در این مطالعه

کم‌ترین مقدار تبخیر و تعرق (0.12 میلی‌متر در روز) را نشان دادند. با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر پتانسیل‌سنجی داده‌های سنجش از دور در اجرای مدل فائو-۵۶ بوده است و اینکه نقشه تبخیر و تعرق به‌دست آمده فقط با نقشه‌های پوشش گیاهی و دمای صحت‌سنجی شده مورد ارزیابی قرار گرفت، لذا پیشنهاد می‌شود نقشه تبخیر و تعرق حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با مقادیر تبخیر و تعرق که با برداشت‌های زمینی توسط دستگاه لایسیمتر برای گیاهان مرتعی و زراعی حاصل می‌شود، مقایسه گردد. به طور کلی نتایج مطالعه حاضر حاکی از آن است که تلفیق داده‌های سنجش از دور با روش فائو-۵۶ کارایی بالایی در تخمین و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق واقعی دارند و می‌توان از آن در تهیه نقشه بهره‌وری آب گیاهان در مناطق مختلف کشور استفاده نمود. به علت مزایای فراوان این فن آوری از جمله پهنه‌بندی تبخیر و تعرق در ابعاد وسیع و ارتباط نزدیک نیاز آبی گیاهان با تبخیر و تعرق، پژوهش حاضر استفاده گسترده آن را به محققان بخش مدیریت مراتع پهناور کشور و احیاء دیم‌زارهای رها شده توصیه می‌نماید. البته برخی از محدودیت‌ها مانند عدم هم‌زمانی تصاویر و داده‌های زمینی و همچنین خطاهای مکانی مربوط به تصحیح هندسی تصاویر و سامانه موقعیت‌یاب جهانی برای پهنه‌بندی تبخیر و تعرق و واسنجی آن وجود دارد که باید در تحقیقات به آنها توجه و در جهت رفع آنها اقدام نمود.

به‌طور کلی گزارش کرد که شاخص پوشش گیاهی می‌تواند برای اندازه‌گیری‌های ET در چشم اندازهای وسیع مراتع مناطق نیمه‌خشک استفاده شود. سیمونوکس و همکاران (۲۰۰۸) در اراضی بخش مرکزی کشور مراکش با استفاده از شاخص NDVI از داده‌های سنجنده لندست و تبخیر تعرق گیاه مرجع، ET واقعی را محاسبه نمودند. این مطالعه با استفاده از ضریب گیاهی به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای تبخیر تعرق واقعی محصولات مورد مطالعه را با دقت بالا برآورد کرد.

این مطالعه با هدف برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تلفیق داده‌های سنجش از دور و روش فائو-۵۶ در اراضی مرتعی و زراعی منطقه نیمه‌خشک غرب استان اصفهان انجام گرفت. باندهای انعکاسی سنجنده TM ماهواره لندست ۵ به شاخص گیاهی NDVI تبدیل شدند و سپس با استفاده از تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌دست آمده از روش فائو-۵۶، نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق واقعی منطقه تهیه شد. مطابق نتایج، تبخیر و تعرق با دمای سطحی و پوشش گیاهی NDVI همبستگی بالا و به‌ترتیب منفی 0.92 و مثبت 0.99 را نشان داد. این همبستگی منفی و مثبت بیان‌گر آن است که تبخیر و تعرق با پوشش گیاهی رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد. در منطقه مطالعاتی اراضی کشاورزی با پوشش کامل گندم و یونجه بالاترین میزان تبخیر و تعرق ($6/977$ میلی‌متر در روز)، مراتع مقادیر متوسط و اراضی بایر و رها شده با دمای سطحی زیاد

References

1. Abedi-Koupai, J., 2006. Method of water resources loss prevention. 2nd Symposium of National Resources Loss Prevention, Iran, Tehran. (In Persian)
2. Adeboye, O. B., J. A. Osunbitan, K. O. Adekalu & D. A. Okunade, 2009. Evaluation of FAO-56 Penman Monteith and Temperature Based Models in Estimating Reference Evapotranspiration. Agricultural Engineering International Journal, 11: 1-25.
3. Alizadeh, A., 2008. Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University Press, 927 p. (In Persian)
4. Alizadeh, A., 2013. soil-water- plant relationship, Imam reza University Press, 615 p. (In Persian)
5. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes & M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome.
6. Asgharzadeh, H. & S. H. Sanaeinejad, 2005. Using RS and GIS for estimation of evapotranspiration: A case study in Tange Kenesht. 1st Irrigation and Drainage Network Management National Conference Chamran University, Ahvaz. (In Persian)
7. Duchemin, B., R. Hadria, S. Erraki, G. Boulet, P. Maisongrande, A. Chehbouni, R. Escadafal, J. Ezzahar, J. C. B. Hoedjes, M. H. Kharrou, S. Khabba, B. Mougenot, A. Olioso, J. C. Rodriguez & V. Simonneaux, 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. Agricultural Water Management, 79 (1): 1-27.

8. Er-Raki, S., A. Chehbouni & B. Duchemin, 2010. Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region. *Remote Sensing*, 2 (1): 375-387.
9. Er-Raki, S., A. Chehbouni, N. Guemouria, B. Duchemin, J. Ezzahar & R. Hadria, 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 87 (1): 41-54.
10. Farg, E., S. M. Arafat, M. S. Abd El-Wahed & A. M. El-Gindy, 2012. Estimation of Evapotranspiration ET_c and Crop Coefficient K_c of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1): 83-89.
11. Fatemi, S. B. & Y. Rezaei, 2006. Fundamentals of Remote Sensing, Azadeh, 269 p. (In Persian)
12. Garcia, M., D. Raes, R. G. Allen & C. Herbas, 2006. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agriculture and Forest Meteorology*, 125: 67-82.
13. Gavila'n, P., I. J. Lorite, S. Tornero & J. Berengena, 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 81:257-281.
14. Hankerson, B., J. Kjaersgaard & C. Hay. 2012, Estimation of Evapotranspiration from Fields with and without Cover Crops Using Remote Sensing and in situ Methods. *Remote Sensing*, 4(12): 3796-3812.
15. Hunsaker, D., P. Pinter, J. Kimball & A. Bruce, 2005. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. *Irrigation Science*, 24(1): 1-14.
16. Hunsaker, D. J., P. J. Pinter, E. M. Barnes & B. A. Kimball, 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation Science*, 22(2): 95-104.
17. Johnson, L. F. & T. J. Trout, 2012. satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California (San Joaquin Valley). *Remote Sensing*, 4(2): 439-455.
18. Kamble, B., A. Kilic & K. Hubbard, 2013. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, 5 (4): 1588-1602.
19. Kiage, L. M., K. B. Liu, N. D. Walker, N. Lam & O. K. Huh, 2007. Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: evidence from Landsat TM and ETM+. *International Journal of Remote Sensing*, 28(19): 4285 - 4309.
20. Moshtagh, N., 2012. Evaluating the potential of remote sensing data to estimate evapotranspiration in semi - arid regions. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology. MSc Thesis, Isfahan. (In Persian)
21. Nagler, P. L., E. P. Glenn, H. Kim, W. Emmerich, R. L. Scott, T. E. Huxman & A. R. Huete, 2007. Relationship between evapotranspiration and precipitation pulses in a semiarid rangeland estimated by moisture flux towers and MODIS vegetation indices. *Journal of Arid Environments*, 70: 443-462.
22. Noori, B., H. Noori., Gh. Zehtabian, A. H. Ehsani, H. Khosarvi & H. Azarnivand, 2020. Estimation of virtual water and water requirement of desert margin vegetation using satellite images (a case study: Varamin Plain). *Journal of Hydrology and Soil Science*, 23 (4): 113-127.
23. Nourbaeva, G., S. Kazama & M. Sawamoto, 2003. Assessment of Daily Evapotranspiration Using Remote Sensing Data. *Environmental Informaticse Archives*, 1: 421-427.
24. Rampazo, N. A. M., M. C. A. Picoli, A. H. De Castro Teixeira & C. K. N. Cavaliero, 2021. Water consumption modeling by coupling MODIS images and agrometeorological data for sugarcane crops. *Sugar Tech*, 23 (3): 524-535.
25. Rosenberg, N. J., B. L. Blad & S. B. Verma, 1983. Microclimate, the biological environment. *The Quarterly Review of Biology*, 51(2): 1-27.
26. Rouse, J. W., R. W. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering & J. C. Harlan, 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green ware effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT, Type 3, Final Report, Greenbelt, MD, USA.
27. Salehi, H., A. Shamsoddini & S.M. Mirlatifi, 2020. Spatio-temporal resolution improvement of actual evapotranspiration using MODIS and Landsat-8 data fusion. *Iranian Water Resources Research*, 16 (1): 408 - 419.
28. Sharghi, T., H. Bari Abarghuei, M. A. Asadi & M. R. Kousari, 2010. Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province. *Arid Biom Scientific and Research Journal*, 1 (1): 25-33.
29. Simonneaux, V., B. Duchemin, D. Helson, S. Er-Raki, A. Oliso & A. G. Chehbouni, 2008. The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1): 95-116.
30. Soni, A. and T. H. Syed, 2021. Analysis of variations and controls of evapotranspiration over major Indian River Basins (1982-2014). *Science of The Total Environment*, 754: 141892.

31. Tang, R., & Z. Li. 2017. An end-member-based two-source approach for estimating land surface evapotranspiration from remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10): 5818-5832.
32. Wang, H., X. Lv & M. Zhang, 2021. Sensitivity and attribution analysis of vegetation changes on evapotranspiration with the Budyko framework in the Baiyangdian catchment, China. *Ecological Indicators*, 120: 106963.
33. Wate, O., S.K. Mantel, A. Finca, L.A. Gibson, Z. Munch, & A.R. Palmer, 2019. Estimating evapotranspiration in semi-arid rangelands: connecting reference to actual evapotranspiration and the role of soil evaporation. *African Journal of Range & Forage Science*, 36: 17-25.
34. Xuelong, C., Z. Su, Y. Ma & E. M. Middleton, 2019. Optimization of a remote sensing energy balance method in different canopy applied at global scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279: 107633.
35. Zhao, J., X. Chen, J. Zhang, H. Zhao & Y. Song, 2019. Higher temporal evapotranspiration estimation with improved SEBS model from geostationary meteorological satellite data. *Scientific Reports*, 9(1): 14981.

Integrating FAO-56 and Remotely-Sensed Techniques for Estimating Actual Evapotranspiration in Semi-arid Region of Isfahan Province

N. Moshtagh¹, R. Jafari^{*2}, S. Soltani³, N. Ramezani¹

Received: 20 April 2021, Accepted: 20 June 2021

Abstract

Spatial mapping of evapotranspiration (ET) rates can indirectly be very important for rangeland management and rehabilitation. The map of evapotranspiration can be an indicator of plant water requirement. Mapping of ET from remote sensing data is more appropriate than field methods, because the spatial and temporal coverage of this method is very extend and time and cost are optimized. Among the evapotranspiration mapping methods using remote sensing data, the FAO-56 model is one of the usual ones. Therefore, this study aimed to spatially estimate the amount of ET in semi-arid region of Isfahan province using the integration of FAO-56 and remote sensing techniques. To calculate ET, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) were obtained from geometrically corrected TM 2009 image and the standard crop evapotranspiration (ET₀) was calculated using FAO-56 equation and then the crop coefficient (K_c), crop transpiration (K_{cb}) and soil evaporation (K_e) were extracted from NDVI data. Results showed that agricultural lands with 6/977 mm/day and bare ground with 0.012 mm/day had the highest and lowest ET in the study area. High relationships of ET map with well-known remote sensing maps such a NDVI (>99%) and LST (>92%) indicated that ET mapping in the region has been achieved with a high accuracy, therefore, it is a valuable supplementary technique to field methods in determining plant water requirements for rehabilitation purposes.

Keywords: Feridan county, Land surface temperature, Landsat TM, Thermal infrared, NDVI.

¹- Graduated MSc in Range Management, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

²- Associate professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

^{*}: Corresponding Author: reza.jafari@cc.iut.ac.ir

³- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.