

مقاله علمی-پژوهشی

تخمین تبخیر-تعرق واقعی بر اساس آخرین ویرایش اصلاح شده از الگوریتم بیلان انرژی روی سطح با استفاده از داده‌های لایسیتر

محدثه السادات فخار^۱، عباس کاویانی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

چکیده

در روش‌های متداول برآورد تبخیر-تعرق از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای استفاده می‌شود اما در تکنیک سنجش‌ازدور، مانند الگوریتم بیلان انرژی روی سطح مقدار شار تبخیر-تعرق لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره به‌عنوان باقی‌مانده معادله بیلان انرژی برای هر پیکسل محاسبه می‌شود. در این مطالعه دو مدل رایج تبخیر-تعرق تک منبعی برآورد شده از SEBAL و PYSEBAL با نتایج یک لایسیتر زهکش‌دار کشت‌شده با چمن در محدوده دشت قزوین مورد مقایسه قرار گرفتند. داده‌های ماهواره‌ای بر اساس اطلاعات سه سنجنده MODIS، LANDSAT-5-TM و LANDSAT-7-ETM+ در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که الگوریتم PYSEBAL در هر سه سنجنده به ترتیب با مقدار RMSE (۰/۴۵، ۰/۴۶ و ۲/۰۲ میلی‌متر بر روز) عملکرد بهتری را نسبت به مدل SEBAL داشته است. همچنین بررسی‌های صورت گرفته از سه سنجنده مورد بررسی نشان داد که سنجنده MODIS با مقدار خطای استاندارد (۰/۱۵ میلی‌متر بر روز) و ضریب همبستگی (۰/۹۸) در مقایسه با دو سنجنده ETM+ و TM با مقدار ضریب همبستگی به ترتیب (۰/۹۷ و ۰/۵۳)، خطای استاندارد (۰/۱۷ و ۲/۲۶ میلی‌متر بر روز) و همچنین قدرت تفکیک مکانی بالاتر توانسته است نتایج بهتری را ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: دشت قزوین، PYSEBAL، MODIS، Landsat-5 و Landsat-7

مقدمه

تابش خورشیدی، درجه حرارت، سرعت باد، میزان رطوبت نسبی هوا، بافت خاک نوع گیاه و مقدار رطوبت خاک از جمله عوامل مؤثر بر تبخیر-تعرق هستند و با توجه به این موضوع، محاسبه مقدار دقیق تبخیر-تعرق، کاری بسیار مشکل است (Chang et al., 2019). استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای یکی از روش‌های جدید در تعیین نیاز آبی گیاهان است (Zhang et al., 2016). این روش نیاز آبی محصولات و مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه در یک سطح وسیع را با استفاده از پارامترهایی نظیر دمای سطحی، ضریب آلبیدو و شاخص پوشش گیاهی تعیین کرده که به لحاظ اقتصادی نیز روشی کاملاً مقرون‌به‌صرفه است. (Carlson et al., 1995). امروزه با استفاده از بیلان انرژی و فناوری سنجش‌ازدور می‌توان تغییرات مکانی نرخ تبخیر-تعرق را در مقیاس مکانی و زمانی مختلف، بدون نیاز به داشتن دیگر فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی، مورد بررسی قرار داد. در این راستا الگوریتم‌های مختلفی همچون SEBS^۳

وجود اطلاعات دقیق از مؤلفه‌های مختلف بیلان آب می‌تواند کمک بسزایی برای مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق‌تر منابع آب در اختیار مدیران قرار دهد (Nyolei et al., 2019). تبخیر-تعرق یکی از اجزای معادله بیلان آب و بیلان انرژی سطح زمین است و اطلاعات پایه‌ای مورد نیاز در تحقیقات علوم کشاورزی، منابع آب و تغییر اقلیم را در اختیار می‌گذارد (Guo et al., 2020).

عوامل بسیار زیادی در تبخیر-تعرق دخالت دارند که برآورد میزان تبخیر-تعرق را در فرآیندی بسیار پیچیده قرار می‌دهد. شدت و مدت

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: Kaviani@eng.ikiu.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.1.15.2

Santos et al., 2020). الگوریتم SEBAL علی‌رغم موفقیت بالایی که محاسبه تبخیر-تعرق داشته است متکی به فردی متخصص برای انتخاب پیکسل سرد و گرم بوده و قابل‌استفاده برای کاربرانی کم‌تجربه نخواهد بود. PYSEBAL نسخه‌ای از الگوریتم SEBAL است که در محیط پایتون توسعه‌یافته است (Hessels et al., 2017). از جمله ویژگی‌های این مدل انتخاب تمام‌خودکار پیکسل‌های سرد و گرم در میان بسیاری از ویژگی‌های دیگر همچون جداسازی تبخیر از تعرق و برآورد نقشه‌های خروجی از مقدار رطوبت خاک محسوب می‌شود با توجه به دقت بالای این الگوریتم در برآورد تبخیر-تعرق، پژوهش‌های مختلفی در همین راستا در کشورهای مختلف به انجام رسیده است به‌طوری‌که در حوضه آبریز Makanya واقع در کشور آفریقا به بررسی الگوریتم PYSEBAL با استفاده از تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2 پرداخته شد. نتایج PYSEBAL با توجه به اطلاعات محلی در مورد عملکرد محصول، تخصیص آب و شیوه‌های مدیریت کشاورزی در مناطق مختلف کشاورزی و اکولوژیکی در حوضه آبریز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد عملکرد شبیه‌سازی‌شده با عملکرد محصول گزارش شده مطابقت دارد (Nyolei et al., 2019). در پژوهشی بر روی منطقه Bekka Valley در لبنان از اطلاعات سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۷ تصاویر Landsat و روش‌های METRIC و PYSEBAL استفاده شده است. برآورد میانگین سالیانه ET در دوره کشت در این سال ± 53 میلی‌متر بود که این نتیجه به‌طور مشترک از دو روش METRIC و PYSEBAL به‌دست‌آمده است. بیشترین میزان ET برابر با ۶۴٪ از تبخیر از سطح آب‌و‌خاک در فصل خشک (ماه‌های می و اکتبر) به‌دست‌آمده است و ET در فصل مرطوب بیش از ۷۰ درصد بارش در Bekaa Valley است و روش METRIC، ۱۵ درصد برآورد بیشتری را نسبت به PYSEBAL برای زمین‌های غیر کشاورزی در تابستان نشان داد (Jaafar and Ahmad, 2020). در بررسی میزان تبخیر-تعرق در منطقه Burkina Faso به وسعت ۱۲۰۰ هکتار نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق در طول فصل رشد به‌طور متوسط با مقادیر روزانه‌ی (۷/۷ تا ۴/۰۹) میلی‌متر بر روز توانسته است رضایت‌بخش باشد و استفاده از مدل PYSEBAL در محیط‌های نیمه‌خشک می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه استراتژی‌ها برای بهبود مدیریت آب آبیاری در کشورهایی با اقلیم خشک باشد (Sawadogo, Gundogdu, et al., 2020). در پژوهشی در آدانا ترکیه به برآورد تبخیر-تعرق واقعی با مدل PYSEBAL و مقایسه آن با تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده به‌وسیله لایسیمتر پرداختند. در این پژوهش از پنج تصویر Landsat5-TM استفاده کردند. نتایج نشان داد که رابطه خوبی بین تبخیر-تعرق برآورد شده و مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر مشاهده شده است. به‌طوری‌که ضریب همبستگی ۰/۷۳ و

SEBAL^۱ و METRIC^۲ توسعه داده شده است که هر کدام نرخ تبخیر-تعرق را با دقت‌های مختلفی محاسبه می‌کند. الگوریتم SEBAL یک الگوریتم مبتنی بر روابط تجربی و فیزیکی است که ابتدا در مصر و اسپانیا با استفاده از تصاویر Landsat به‌منظور برآورد نرخ تبخیر-تعرق واقعی در مناطق کشاورزی، تعیین یکنواختی محصول، تنش آبی و مدیریت شبکه‌های آبیاری به کار گرفته شد (Bastiaanssen et al., 1998). مطالعات زیادی نشان-دهنده کارایی روش SEBAL در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای و حوضه‌های بزرگ است (Almhahab and Busu, 2008; Jaafar and Ahmad, 2020). در پژوهشی مقدار تبخیر-تعرق با استفاده از روش SEBAL و تصاویر Landsat در دو منطقه واقع در کشور چین برآورد گردید. دقت تبخیر-تعرق برآورد شده در روش SEBAL برای یک روز در مقیاس ۱۰۰ هکتار ۸۵ درصد و برای یک فصل تا ۹۵ درصد افزایش یافت. دقت تبخیر-تعرق سالانه برای حوضه‌های بزرگ با استفاده از این روش به‌طور میانگین ۹۶ درصد بود. به‌طور کلی استفاده از این روش برای برآورد تبخیر-تعرق در مقیاس‌های بزرگ و بلندمدت نتایج بهتری به همراه داشت (Sun et al., 2011). همچنین در مطالعه‌ای به بررسی الگوریتم SEBAL به‌وسیله تصاویر Landsat7-ETM+ و با استفاده از شاخص‌های آماری به مقایسه آن با داده‌های لایسیمتری مزرعه تحقیقاتی در کشور هند پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که الگوریتم SEBAL با مقدار $RMSE=0/56$ میلی‌متر بر روز از دقت خوبی برخوردار بوده و بررسی نتایج با استفاده از شاخص‌های آماری نشان داد که می‌توان از الگوریتم SEBAL برای برآورد تبخیر-تعرق در اراضی با وسعت بالا استفاده کرد (Bala et al., 2016). در پژوهشی به بررسی الگوریتم SEBAL با استفاده از تصاویر Landsat8 به‌منظور بررسی توزیع مکانی و زمانی ET_c روی دلتای نیل پرداخته شد. که خروجی مدل نشان از این داشت که الگوریتم SEBAL با مقدار $RMSE=0/83$ میلی‌متر بر روز و $R^2=97/83$ تخمین قابل قبولی از توزیع زمانی و مکانی ET_c ارائه می‌دهد (Elmer et al., 2019). پیشنهاد شده است که محل قرارگیری پیکسل‌های سرد مناطقی با پوشش گیاهی متراکم و پیکسل‌های گرم مناطقی با پوشش گیاهی کم و یا تنک فرض شود (Allen et al., 2002) مدل SEBAL به‌طور دقیق جریان آب را در فصل مرطوب نشان می‌دهد اما در فصل گرم و خشک سال این امکان به‌راحتی وجود ندارد، یکی از دلایل آن می‌تواند محدوده باریک بین پیکسل‌های سرد و گرم در یک تصویر باشد. زیرا الگوریتم برای پارامترهای ورودی و به‌ویژه در فصل خشک، به این محدوده باریک متکی است. (dos

- 1- Surface Energy Balance Algorithm for Land
- 2- Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration

متر است که میانگین ارتفاع از سطح دریا برابر با ۱۲۹۰ متر در نظر گرفته می‌شود. از نظر آب و هوایی منطقه مورد مطالعه در اقلیم سرد و نیمه خشک قرار می‌گیرد که متوسط بارش سالیانه در منطقه تقریباً ۳۱۰ میلی‌متر است. (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱) در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی ارائه شده است. دشت قزوین یکی از مهم‌ترین دشتهای کشاورزی در کشور محسوب می‌شود به همین دلیل برای هدف این پژوهش انتخاب شده است.

داده‌های هواشناسی و مشخصات لایسیمتر

انجام مطالعات مبتنی بر سنجش از دور مستلزم استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. در این مطالعه از داده‌های ثبت شده توسط ایستگاه سینوپتیک قزوین در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ استفاده شده است که این داده‌ها عبارت‌اند از دمای هوا (برحسب سانتی‌گراد) به صورت دمای کمینه و بیشینه و دمای متوسط روزانه، سرعت باد در ارتفاع ده متری (برحسب متر بر ثانیه) که در محاسبات به ارتفاع ۲ متری تبدیل می‌گردد و رطوبت نسبی (برحسب درصد). نقشه کاربری اراضی به منظور مشخص کردن مناطق زراعی برای انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم توسط الگوریتم PYSEBAL لازم است. لایسیمتر یکی از معتبرترین روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق است. داده‌های مرتبط با تبخیر-تعرق توسط لایسیمتر زهکش‌دار در منطقه واقع در ایستگاه تحقیقاتی آب‌و خاک اسماعیل‌آباد قزوین با ابعاد ۱×۲ و به عمق ۱/۵ m مساحتی برابر با ۲ m² را می‌پوشاند. لایسیمتر در وسط قطعه زمینی به ابعاد ۵۰ m × ۵۰ m (۲۵۰۰ m²) نصب گردید. به طوری که پوشش گیاهی در جهت شمال به جنوب و غرب به شرق حدود ۵۰ m است. داده‌برداری از لایسیمتر بر اساس تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ است و به صورت روزانه و هفتگی اجرا شده است. (ابراهیمی پاک، ۱۳۷۹).

داده‌های ماهواره‌ای

در این مطالعه از تصاویر سه سنجنده MODIS، Landsat-TM و Landsat-7-ETM+ استفاده شد که جزئیات آن در جدول (۱) نشان داده شده است.

در این پژوهش اندازه‌گیری تبخیر-تعرق در شش ماه نخست سال‌های مورد مطالعه صورت گرفت که دلیل نوسانات موجود در تبخیر-تعرق برآورد شده، مقادیر متفاوت آن در طی سال‌های مختلف است. با توجه به تفکیک زمانی پایین سنجنده LANDSAT-TM و LANDSAT-ETM+ و همچنین وجود ابر و برف بر روی تصاویر در برخی از ماه‌های سال، در این پژوهش از ۱۵ تصویر TM، ۲۲ تصویر ETM+ و ۲۴ تصویر MODIS بدون ابر و برف استفاده شده است که به طور معمول یک تا دو تصویر برای هر ماه از سال‌های

RMSE=۰/۵۱ میلی‌متر بر روز شد. در نتیجه تبخیر-تعرق واقعی محصول سویا را می‌توان با دقت بالا در آنادا ترکیه تخمین زد (Sawadogo, Hessel, et al., 2020). در لبنان نیز با توجه به تغییرات آب و هوایی به بررسی تبخیر-تعرق فصلی در فصل‌های بهار و تابستان با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و مقایسه مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش FAO-56 پرداختند که مقدار RMSE در فصل بهار و تابستان به ترتیب برابر با ۰/۳۸ و ۱/۹۳ میلی‌متر در روز شد. همچنین مقدار MAE برآورد شده بین الگوریتم و روش FAO-56 به ترتیب ۰/۳۳ و ۱/۶۴ میلی‌متر در روز برآورد شد (Caiserman & Faour, 2021).

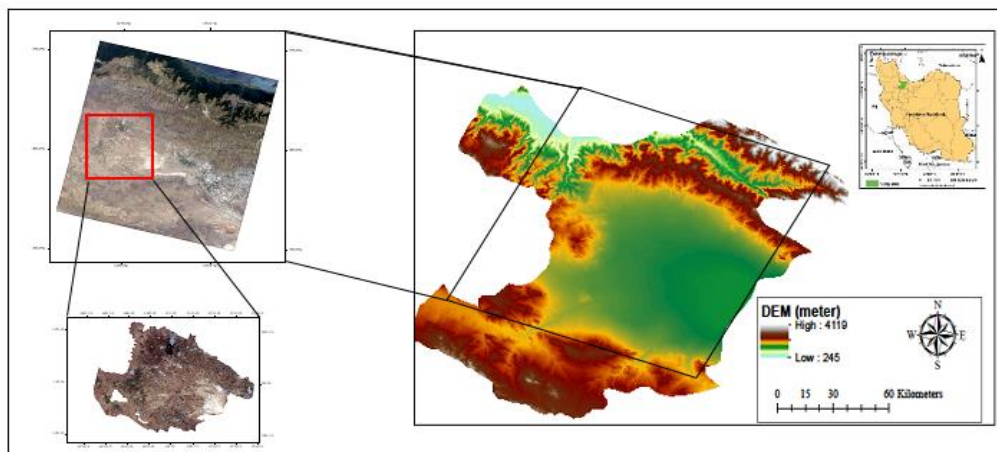
به منظور گسترش و توسعه سیستم‌های نوین آبیاری و مصرف بهینه آب و کاهش هزینه‌های بخش کشاورزی جهت دستیابی به کشاورزی پایدار در سطح ملی و منطقه‌ای با نگاه کلان و حوضه‌ای، ناگزیر استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های جدید و به روز همچون سنجش از دور و هوش مصنوعی در مدیریت آب مصرفی گیاهان و تأمین نیاز آبی امری ضروری محسوب می‌شود تا به واسطه آن مقادیر تبخیر-تعرق واقعی گیاهان به صورت پیوسته تحت پایش قرار گیرد. انتخاب صحیح و مناسب پیکسل‌های سرد و گرم در محاسبه مقدار تبخیر-تعرق تأثیر بسزایی در سنجش اعتبار هر الگوریتم داشته است. با توجه به تفاوت در داده‌های ورودی و روش‌های متفاوت محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، استفاده از برخی از این الگوریتم‌ها نیازمند صرف زمان بیشتر و دقت بالاتر در برآورد مقدار تبخیر-تعرق و انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم است لذا هدف از این پژوهش ارزیابی الگوریتم PYSEBAL بر اساس کالیبراسیون تمام خودکار در روند انجام محاسبات مربوط به تابش خالص سطح زمین، شار گرمایی خاک و شار حرارت محسوس به‌ویژه انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم بر اساس هوش مصنوعی و مقایسه آن با الگوریتم SEBAL است که با استفاده از تصاویر MODIS، Landsat-5-TM و Landsat-7-ETM در طول سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ به منظور ارزیابی دقت هر یک از الگوریتم‌ها با داده‌های لایسمتری منطقه انجام شده است.

منطقه مطالعه و داده‌های تحقیق

منطقه مورد مطالعه دشت قزوین با عرض جغرافیایی 35°43'6.0"N تا 36°23'46.8"N و طول جغرافیایی 49°25'10.0"E تا 50°38'11.4"E در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز واقع شده است. این دشت با مساحت ۵۰۶۲۱۸ هکتار محدوده‌ی مرکزی و شرق استان را تشکیل می‌دهد که شیب آن از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد. مطابق با نقشه (STRM) DEM پایین-ترین و بالاترین نقاط ارتفاعی استان به ترتیب برابر با ۲۴۵ و ۴۱۱۹

امری مشکل خواهد بود به همین منظور (Allen et al., 2007) پیشنهاد کردند در زمان خارج از فصل رشد و یا در صورت استفاده از سنجنده‌هایی همچون MODIS به جای استفاده از ضریب ۱/۰۵ برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی، می‌توان نسبت تبخیر-تعرق پیکسل سرد به تبخیر-تعرق مرجع را تابعی از شاخص NDVI در نظر گرفت.

۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ انتخاب شده است که تاریخ‌های مورد بررسی از سنجنده‌های مورداستفاده در جدول (۲) نمایش داده شده است. به منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی در این پژوهش از سه نوع سنجنده MODIS، LANDSAT-TM و LANDSAT-ETM+ استفاده شد. به دلیل آن که قدرت تفکیک مکانی سنجنده MODIS برابر با 1(Km) است پیدا کردن چنین پیکسل سردی در اکثر مناطق



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت قزوین در استان قزوین

جدول ۱- داده‌های سنجنده‌های ورودی به همراه مشخصات هر یک از آن‌ها به منظور اجرای الگوریتم

تصاویر استفاده شده	نام سنجنده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی
نقشه رقومی ارتفاعی (DEM)	SRTM	۳۰	-
بازتاب سطحی (Albedo)	MOD09GA	۱۰۰۰	روزانه
دمای سطح زمین (LST)	MOD11A1		
شاخص پوشش گیاهی (NDVI)	MOD13Q1		
باندهای ۱ الی ۵ و ۷	LANDSAT-TM	۳۰	روز ۱۵
باندهای ۱ الی ۷	LANDSAT-ETM	۳۰	روز ۱۵

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

در این معادله λET شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) است. انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، شامل تعیین یک معیار از پیش تعیین شده است. معیارهای از پیش تعیین شده شامل دمای سطح (T_s)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، طول زبری برای انتقال مومنتوم (Z_{om}) و آلبدو سطح (α) است. مقدار R_n با کسر تمام جریان‌های تابشی خروجی از همه‌ی شارهای تابشی ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

روش تحقیق

الگوریتم PYSEBAL

در محیط پایتون توسعه پیدا کرده است که الگوریتم SEBAL را با پردازش نیمه خودکار تصاویر ماهواره‌ای اجرا می‌کند. PYSEBAL انتقال انرژی از تابش خورشید به انتقال آب به اتمسفر را تخمین می‌زند. این مدل پیکسل‌های سرد و گرم را به صورت خودکار محاسبه کرده و از جمله ویژگی‌های این مدل می‌توان به جداسازی تبخیر از تعرق، تخمین بیومس و رطوبت خاک نیز اشاره کرد. اساس این مدل استفاده از معادله بیلان انرژی و محاسبه مقدار شار گرمای نهان تبخیر به عنوان باقی‌مانده این معادله برای هر پیکسل است.

جدول ۲- لیست تصاویر بدون ابر و برف مورد بررسی در هر سنجنده

MOD (13Q1,11A1,09GA)	Landsat-7-ETM+	Landsat-5-TM
۱۳۷۹/۰۱/۰۲	۱۳۷۹/۰۱/۰۷	۱۳۷۹/۰۲/۱۶
۱۳۷۹/۰۲/۱۹	۱۳۷۹/۰۲/۰۴	۱۳۷۹/۰۳/۱۰
۱۳۷۹/۰۳/۲۰	۱۳۷۹/۰۳/۰۵	۱۳۷۹/۰۴/۰۲
۱۳۷۹/۰۴/۲۱	۱۳۷۹/۰۴/۲۲	۱۳۷۹/۰۴/۲۷
۱۳۷۹/۰۵/۲۲	۱۳۷۹/۰۵/۲۳	۱۳۷۹/۰۵/۱۹
۱۳۷۹/۰۶/۰۷	۱۳۷۹/۰۶/۰۸	۱۳۷۹/۰۵/۲۸
۱۳۸۰/۰۱/۱۷	۱۳۸۰/۰۱/۱۰	۱۳۷۹/۰۶/۱۳
۱۳۸۰/۰۲/۱۹	۱۳۸۰/۰۲/۰۳	۱۳۸۰/۰۲/۱۸
۱۳۸۰/۰۳/۲۰	۱۳۸۰/۰۲/۱۹	۱۳۸۰/۰۳/۱۲
۱۳۸۰/۰۴/۲۱	۱۳۸۰/۰۳/۱۱	۱۳۸۰/۰۴/۱۳
۱۳۸۰/۰۵/۲۲	۱۳۸۰/۰۴/۰۵	۱۳۸۰/۰۵/۰۵
۱۳۸۰/۰۶/۲۳	۱۳۸۰/۰۵/۲۲	۱۳۸۰/۰۶/۲۲
۱۳۸۱/۰۱/۱۸	۱۳۸۱/۰۱/۰۵	۱۳۸۱/۰۲/۳۰
۱۳۸۱/۰۲/۰۳	۱۳۸۱/۰۳/۰۷	۱۳۸۱/۰۳/۱۵
۱۳۸۱/۰۳/۲۰	۱۳۸۱/۰۵/۰۹	۱۳۸۱/۰۵/۰۱
۱۳۸۱/۰۴/۲۱	۱۳۸۱/۰۶/۲۶	
۱۳۸۱/۰۵/۲۲	۱۳۸۲/۰۱/۰۸	
۱۳۸۱/۰۶/۲۳	۱۳۸۹/۰۲/۰۹	
۱۳۸۲/۰۱/۱۹	۱۳۸۲/۰۲/۲۵	
۱۳۸۲/۰۳/۲۰	۱۳۸۲/۰۴/۲۷	
۱۳۸۲/۰۴/۰۵	۱۳۸۲/۰۵/۰۳	
۱۳۸۲/۰۴/۲۱	۱۳۸۲/۰۷/۰۵	
۱۳۸۲/۰۵/۲۲		
۱۳۸۲/۰۶/۰۷		
۱۳۸۲/۰۶/۲۳		

که در آن ρ چگالی هوا (Kg/m^3)، C_p گرمای ویژه در فشار معین $[1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$ ، r_{ah} مقاومت آئرو دینامیکی در برابر انتقال حرارت بین z_1 و z_2 (m/s) است. پارامتر dT اختلاف دما بین دو ارتفاع نزدیک به سطح است ($z_2 = 2 \text{ m}$ و $z_1 = 0.1 \text{ m}$) بالای لایه کنوپی (K)، که به عنوان یک تابع خطی از دمای سطحی اصلاح شده $T_{s, datum}$ ، تخمین زده می شود (معادله ۵). ضرایب (a) و (b) در معادله (۵) برای پیکسل های سرد و گرم به صورت تکراری تعیین می شود. بنابراین برای هر تصویر ماهواره ای یا منطقه خاص مقداری متفاوت است.

$$dT = a + b \times T_{s, datum} \quad (۵)$$

$$a = \frac{dT_{hot} - dt_{cold}}{T_{s, datum, hot} - T_{s, datum, cold}} \quad (۶)$$

$$b = \frac{dT_{hot} - a}{T_{s, datum, hot}} \quad (۷)$$

از جمله تفاوت هایی که روش SEBAL و PYSEBAL دارا می-باشند در انتخاب پیکسل سرد و گرم است که این مورد در

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s, \downarrow} + (W / m^2) \cdot \epsilon_0 R_{L, \downarrow} - \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (۲)$$

که در این معادله R_s طول موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L, \downarrow}$ طول موج بلند ورودی (W/m^2)، ϵ_0 انتشار سطحی، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) و T_s دمای سطح زمین (برحسب کلون) است. G به عنوان کسری از R_n محاسبه می شود و PYSEBAL از معادله تجربی G توسعه داده شده توسط باستیانسن (Bastiaanssen, 1995) استفاده می کند.

$$G = T_{s, datum} (0.0038 + 0.007\alpha)(1 - 0.98NDVI^4) \times R_n \quad (۳)$$

$T_{s, datum}$ دمای تصحیح شده از سطح زمین است و T_s بر اساس DEM منطقه مورد نظر و با در نظر گرفتن شیب به دست می آید. یک کالیبراسیون داخلی H در PYSEBAL اعمال می شود بنابراین نیازی به تصحیح اتمسفری T_s نخواهد بود. H در مدل PYSEBAL با استفاده از مقاومت آئرو دینامیکی مطابق معادله (۴) محاسبه می شود.

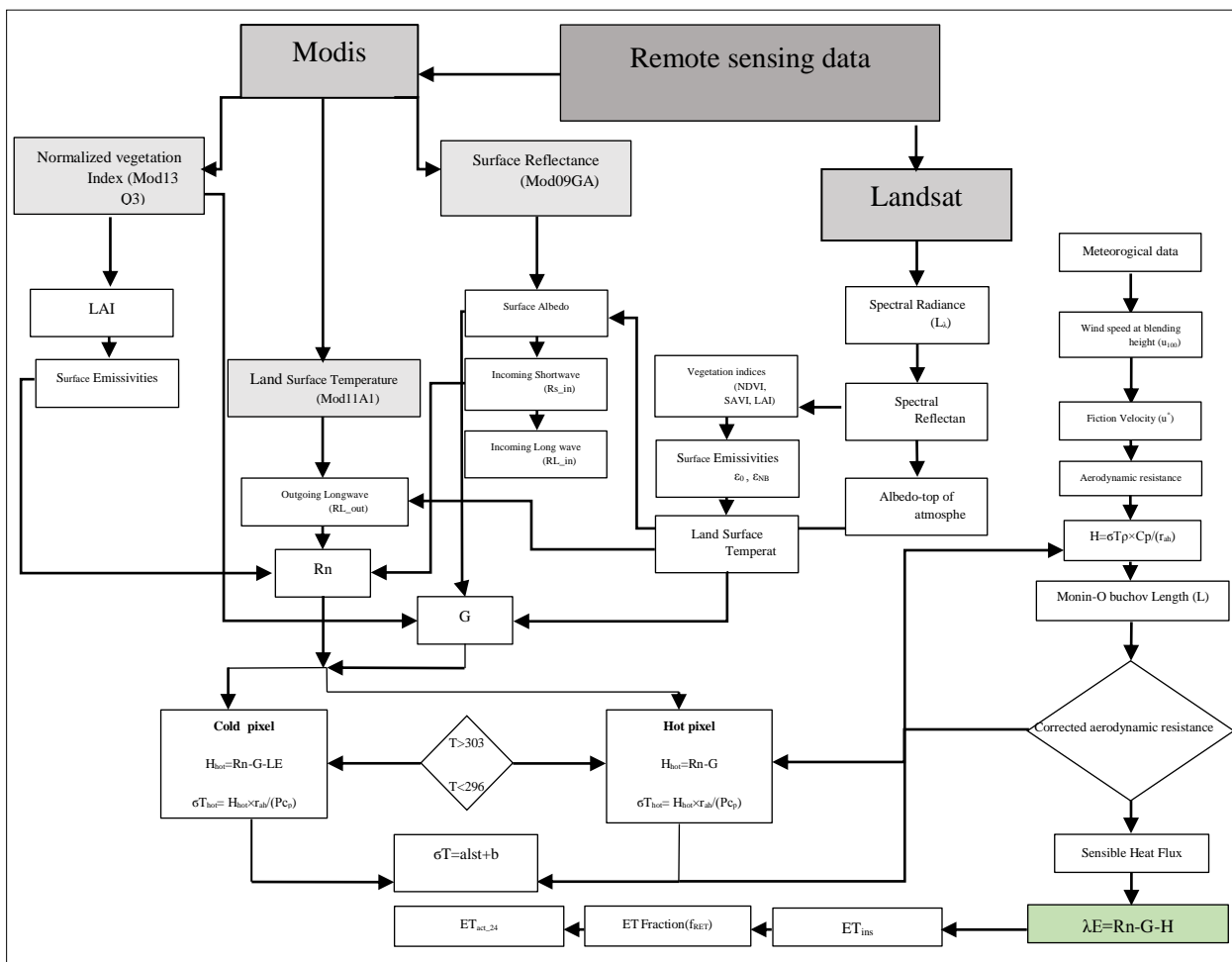
$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (۴)$$

پیکسل‌های دمای سطح که با استفاده از نقشه طبقات ارتفاعی STRM 30 m اصلاح شده‌اند و همچنین پیکسل‌هایی که دارای حداکثر مقدار NDVI هستند، به دست می‌آید. در حالی که پیکسل‌های گرم بر اساس پراکندگی NDVI انتخاب می‌شوند. در جدول (۳) خصوصیات از پیکسل‌هایی که به عنوان سرد و گرم انتخاب می‌شوند، اشاره شده است همچنین مراحل کلی PYSEBAL در شکل (۲) نمایش داده شده است.

شاخص‌های آماری

با هدف مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم PYSEBAL و SEBAL با مقادیر مشاهداتی از لایسیمتر در منطقه مورد مطالعه از آماره‌هایی متداول همچون میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، خطای اریب میانگین (MBE) و r ضریب همبستگی استفاده شده است.

الگوریتم PYSEBAL به صورت خودکار انجام می‌شود. همچنین لازم به ذکر است این انتخاب خودکار در الگوریتم PYSEBAL در صورت نداشتن شناخت کافی نسبت به منطقه، به سبب تراکم و ناهمگنی پوشش کاربری اراضی در دشت و همچنین تغییر در دمای متوسط برای مجموعه پیکسل‌های حدی، می‌تواند سبب ایجاد خطای قابل توجه در برآورد تبخیر-تعرق گردد. مهم‌ترین عوامل بهبود یافته در مدل PYSEBAL شامل، بهبود در انتخاب خودکار پیکسل‌های سرد و گرم، امکان اعمال محدوده خاص در مجاورت ایستگاه هواشناسی به منظور انتخاب پیکسل‌های حدی، امکان انتخاب پیکسل‌های سرد بر روی پهنه‌های آبی و یا مزارعی که به خوبی آبیاری شده و هیچ‌گونه تنش‌ی بر آن‌ها وارد نشده است، امکان انتخاب پیکسل گرم بر روی مناطق بایر و یا مناطق با پوشش گیاهی فقیر و در نهایت امکان تغییر آستانه‌های شاخص‌های پوشش گیاهی برای انتخاب پیکسل‌های حدی است. تمامی موارد مطرح شده از جمله تفاوت‌هایی است که مدل PYSEBAL نسبت به مدل SEBAL دارا می‌باشد. در مدل PYSEBAL پیکسل‌های سرد بر اساس پراکندگی



شکل ۲- فلوجارت مدل PYSEBAL با استفاده از تصاویر MODIS و Landsat

جدول ۳- شرایط انتخاب پیکسل سرد و گرم در مدل PYSEBAL

مقدار		شاخص		مقدار		شاخص	
	۲۹۶-۲۷۸	T_s (K)		۳۰۳-۳۲۰	T_s (K)		
پیکسل های سرد	۰/۶۵-۰/۹	NDVI	پیکسل های گرم	۰-۰/۴	NDVI		
	۰/۱-۰/۳	albedo		۰/۰۱-۰/۲	albedo		
	۲۱۷۷-۱۱۳۳	تغییرات ارتفاعی (m)		۲۱۷۷-۱۱۳۳	تغییرات ارتفاعی (m)		

سه سنجنده MODIS، TM و ETM+ (۰/۴۵، ۰/۴۶ و ۲/۰۲ میلی-متر بر روز) به عنوان الگوریتم برتر در منطقه معرفی شده است. طبق بررسی های انجام شده سنجنده MODIS و ETM+ در هر دو الگوریتم همبستگی بالایی با مقادیر لایسیمتری دارد. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL با داده های لایسیمتری نشان داد که این الگوریتم عملکرد ضعیف تری را نسبت به PYSEBAL دارا بوده است که این مورد در سنجنده TM مشهودتر است

نتایج نشان داد که هرچه به ماه های گرم سال نزدیک می شویم، با افزایش دما مقدار تبخیر-تعرق افزایش می یابد به طوری که نتایج حاصل از سنجنده LANDSAT-TM نشان داد در ماه های گرم سال این سنجنده برآورد بهتری را نسبت به سایر ماه ها خواهد داشت. نتایج شاخص های آماری در جدول (۴) نشان می دهد LANDSAT-TM در مدل های PYSEBAL و SEBAL با مقدار RMSE به ترتیب (۰/۵۳ و ۲/۰۲ و ۲/۰۳ میلی متر بر روز) و مقدار ضریب همبستگی (۰/۷۳) ضعیف ترین نتایج را از خود نشان داد. سنجنده ETM+ برآورد بهتری را نسبت به سنجنده TM داشته است به طوری که مقدار شاخص خطای استاندارد در سنجنده ETM+ مقداری کمتر از یک را دارا بوده است. در حالی که در سنجنده TM در هر دو مدل مورد بررسی با مقداری برابر با ۲/۲۶ و ۱/۴۶ میلی متر بر روز برخوردار است. به طور کلی شاخص خطای استاندارد در دو مدل از سنجنده های MODIS و ETM+ مقداری کمتر از یک برآورد شده است که نشان دهنده نزدیک بودن و پراکندگی کم داده های برآورد شده نسبت به اندازه گیری های صورت گرفته از لایسیمتر است. همان طور که در شکل (۳) نیز قابل ملاحظه است سنجنده MODIS بهترین برآورد را نسبت به دو سنجنده دیگر در منطقه داشته است، به طوری که مقدار ضریب همبستگی در این سنجنده در هر دو مدل PYSEBAL و SEBAL به ترتیب مقداری برابر با (۰/۹۸ و ۰/۹۴) همراه بوده است. طبق بررسی های انجام شده به استثنای الگوریتم SEBAL در سنجنده TM، پارامتر MBE در مابقی الگوریتم ها مقداری منفی را داشته است که نشان از کم برآورد بودن الگوریتم محاسبه شده را دارد.

ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه را نشان می دهد که مقداری بین عدد (۱ و -۱) است. میانگین خطای مطلق نشان دهنده صحت مدل است و مقدار صفر آن نشان دهنده صحت ۱۰۰ درصد است به طوری که هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد، حاکی از کم شدن صحت مدل است.

معیار ارزیابی MBE نیز بیانگر میانگین انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل)، مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده را نیز نشان می دهد. MBE برابر با صفر نشان می دهد که برآورد مدل مناسب بوده و در آن هیچ گونه انحرافی وجود ندارد. هر چه میانگین جذر مربعات خطا کمتر باشد نشان دهنده صحت بیشتر مدل خواهد بود. خطای استاندارد راهی برای برآورد میزان دقت احتمالی بین متغیرهای مورد بررسی می باشد. به طوری که هر چه مقدار آن کمتر باشد، نشان دهنده صحت برآورد صورت گرفته است.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{mod} - ET_L|}{n} \quad (9)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)}{n} \quad (10)$$

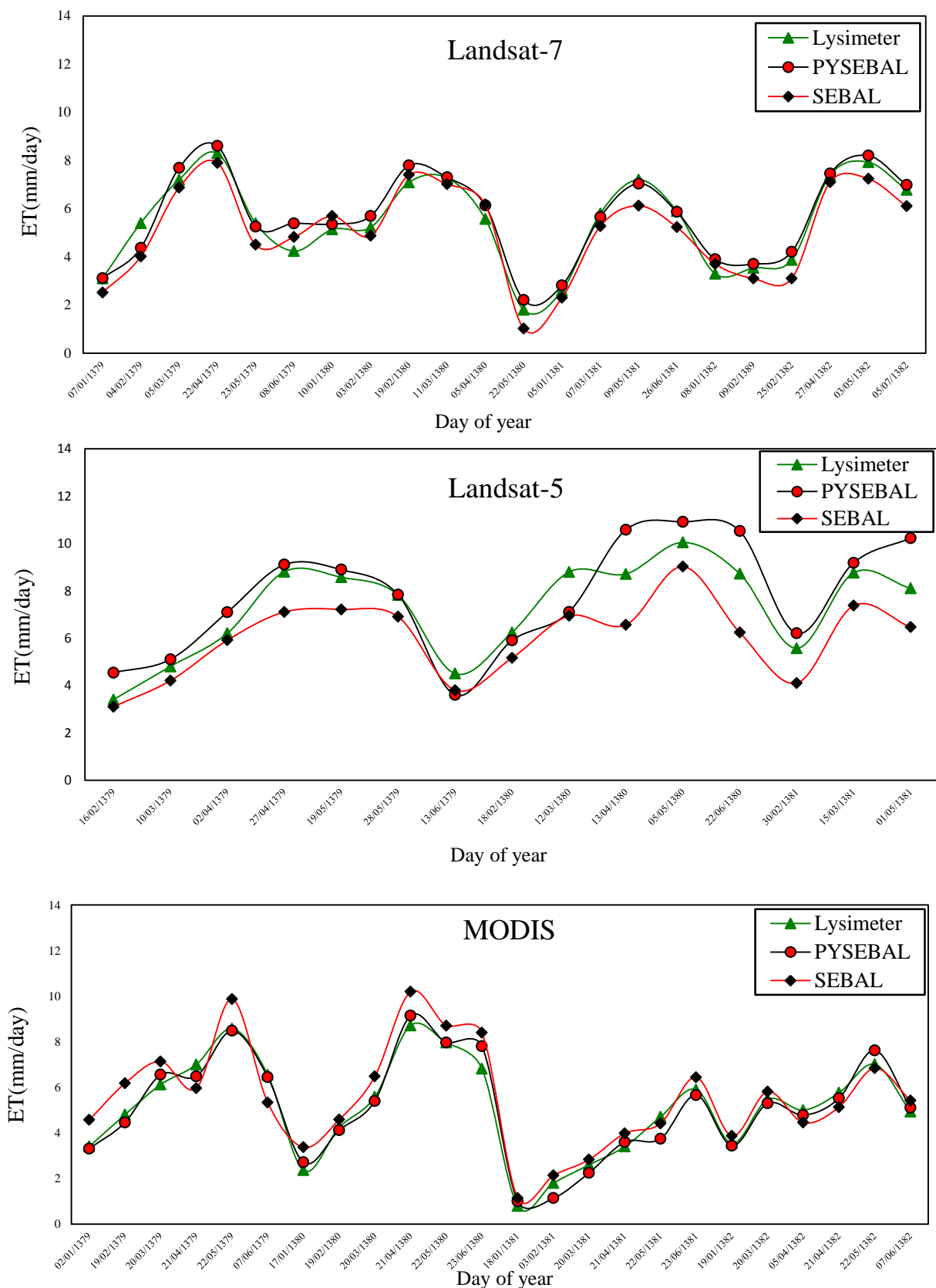
$$SE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})}{\sqrt{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2 \sum (ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})^2}} \quad (12)$$

نتایج و بحث

مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده تبخیر-تعرق، در شکل (۳) قابل ملاحظه است. از آنجاکه هدف از مقایسه این مدل های مبتنی بر سنجش از دور، تخمین تبخیر-تعرق واقعی به صورت روزانه برای برنامه ریزی آبیاری است، به همین منظور به اعتبارسنجی و ارزیابی هر یک از الگوریتم ها با استفاده از شاخص های آماری مختلف پرداخته شد.

طبق نتایج آماری از بین دو الگوریتم مورد بررسی، الگوریتم PYSEBAL با کمترین مقدار جذر خطای میانگین مربعات در هر



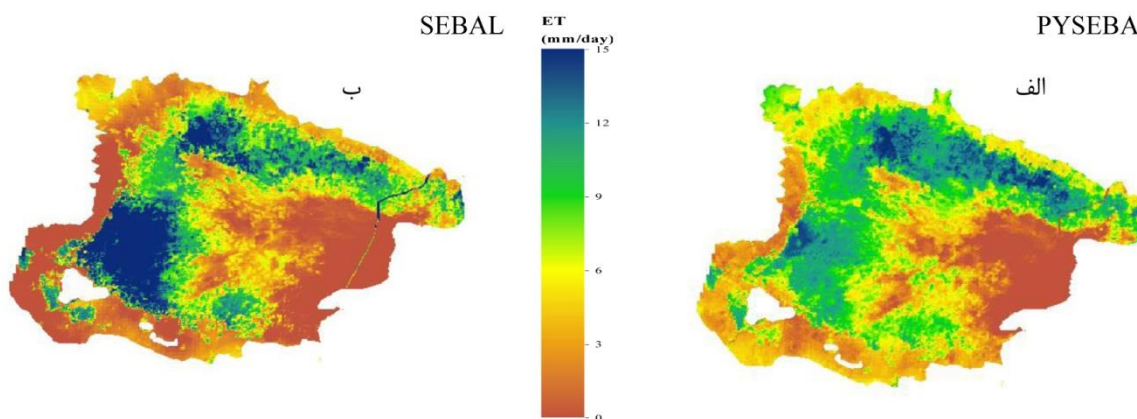
شکل ۳- مقادیر تبخیر-تعرق تخمین زده با استفاده از دو الگوریتم SEBAL و PYSEBAL توسط سه سنجنده در دشت قزوین

جدول ۴- مقایسه نتایج تبخیر-تعرق تخمین زده شده با استفاده از دو الگوریتم SEBAL و PYSEBAL توسط سه سنجنده

		MAE(mm/day)	MBE	RMSE(mm/day)	R(-)	SE(mm/day)
MODIS	PYSEBAL	۰/۳۶	-۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۹۸	۰/۱۵
	SEBAL	۰/۷۴	-۰/۴۳	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۴۶
Landsat-7	PYSEBAL	۰/۳۵	-۰/۲۱	۰/۴۶	۰/۹۷	۰/۱۷
	SEBAL	۰/۵۹	-۰/۳۶	۰/۶۵	۰/۹۶	۰/۲۷
Landsat-5	PYSEBAL	۱/۸۱	-۰/۱۷	۲/۰۲	۰/۵۳	۲/۲۶
	SEBAL	۲/۰۱	۱/۶۰	۲/۰۳	۰/۷۳	۱/۴۶

خواهد شد. در شکل (۴) قابل ملاحظه است که در الگوریتم SEBAL با توجه به عدم رعایت محدودیت‌های بیشتر و همچنین تأثیر پارامتر-های کمتر در انتخاب نوع پیکسل سرد و گرم، در انتخاب مناطقی که مستعد و دارای شرایط انتخاب این گونه پیکسل‌ها هستند، دچار خطای بیشتری شده است که این عامل خود سبب برآورد کمتر مقدار تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه شده است.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که الگوریتم PYSEBAL نتایج بهتر و دقیق‌تری را نسبت به الگوریتم SEBAL ایجاد کرده است که می‌توان این استدلال را داشت که از جمله دلایلی که این الگوریتم عملکرد بهتری داشته است، به انتخاب دقیق‌تر پیکسل‌های سرد و گرم اشاره کرد. زیرا عدم وجود دقت کافی در انتخاب درست پیکسل‌ها سبب ایجاد خطا در محاسبه مقدار شار حرارت محسوس

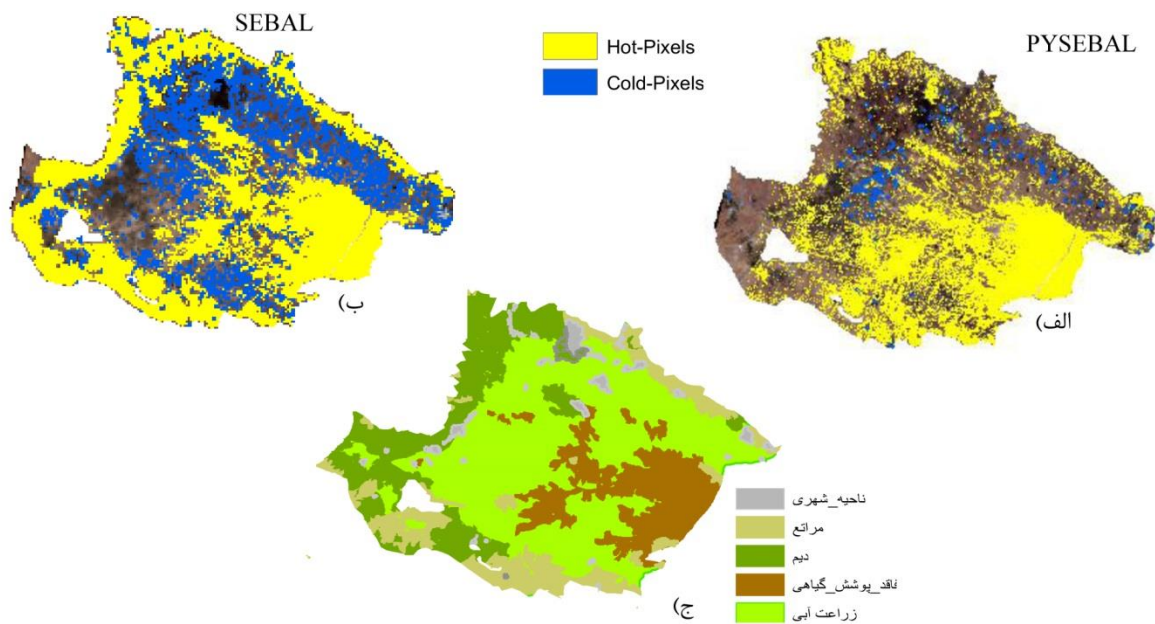


شکل ۴- نقشه تبخیر-تعرق برآورد شده توسط سنجنده MODIS در دو مدل PYSEBAL (الف) و مدل SEBAL (ب)

آنجا حایز اهمیت است که اگر پیکسل گرم روی مناطق با پوشش گیاهی صورت گیرد، ممکن است فرض برقراری رابطه خطی بین اختلاف دمای هوای نزدیک سطح و دمای سطح برقرار نباشد (Allen et al., 2002).

در یک بررسی کلی از سنجنده MODIS که نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به دو سنجنده دیگر نشان می‌دهد با توجه به شکل (۳) می‌توان این‌گونه استنباط کرد که استفاده از الگوریتم PYSEBAL در ماه‌های گرم سال نتایج بسیار دقیق‌تری را از خود نشان می‌دهد به طوری که طبق بررسی‌های انجام شده در ماه‌های تیر و مرداد با کمترین اختلاف نسبت به داده‌های لایسیمیتری بوده است که دلیل این موضوع می‌تواند وجود پوشش گیاهی متراکم‌تر در هر کدام از تاریخ‌های مورد بررسی باشد در حالی که مدل SEBAL به این صورت نبوده و تقریباً از یک‌روند ثابتی در برآورد تبخیر-تعرق برخوردار است.

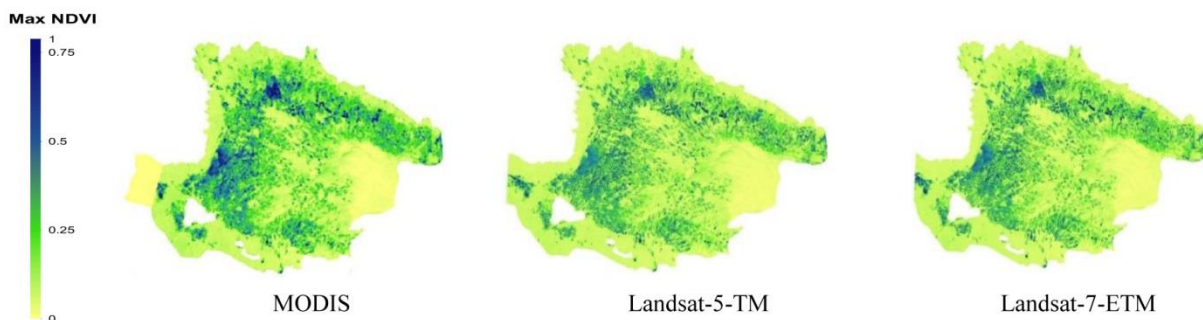
بررسی و مقایسه پیکسل‌های سرد و گرم توسط تصاویر LANDSAT-7 در شکل (۵) نشان می‌دهد که با توجه به نقشه کاربری دشت استان مدل PYSEBAL در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم از دقت بالاتری نسبت به مدل SEBAL برخوردار است زیرا در مدل SEBAL تقریباً تمامی مناطقی که شامل زراعت آبی است را به عنوان پیکسل سرد و یا به بیانی دیگر اراضی با پوشش گیاهی با تراکم بالا در نظر گرفته شده و به عنوان پیکسل سرد انتخاب شده است همین‌طور در انتخاب پیکسل‌های گرم با توجه به شکل (۵-ب)، تعداد نقاطی که انتخاب شده، بسیار بیشتر از پیکسل‌های گرم انتخابی در مدل PYSEBAL است به طوری که در مدل SEBAL مراتع و اراضی دیم را جزء مناطق مستعد پیکسل گرم انتخاب کرده است. در حالی که انتخاب پیکسل‌های گرم طبق مطالعات انجام شده شامل آن دسته از پیکسل‌هایی می‌شود که زمین غیر زراعی و نواحی خاکی که از درجه حرارت بالا برخوردار هستند را شامل می‌شوند. این مساله از



شکل ۵ - نقشه پیکسل‌های سرد و گرم در دشت قزوین با استفاده دو مدل PYSEBAL (الف) و SEBAL (ب) و مقایسه آن با نقشه کاربری اراضی منطقه (ج).

طبقه‌بندی اراضی مختلف حاصل شود که این همبستگی در اراضی که دارای پوشش گیاهی هستند مانند باغات و اراضی کشاورزی با تراکم محصول بالا بیشتر باشد. شکل (۶) حداکثر مقدار NDVI روزانه دشت قزوین را در طی یکی از سال‌های بررسی شده نشان می‌دهد. مناطقی با سایه سبز تیره‌رنگ مناطقی هستند که رشد رویشی بالاتری را داشته‌اند. به‌عنوان مثال مناطقی از دشت که اراضی کشاورزی را شامل می‌شود به‌وضوح می‌توان تشخیص داد زیرا بالاترین میزان NDVI را دارند همچنین قابل توجه است برخی از مناطق کوهستانی در نواحی شمالی دشت مقادیر NDVI نسبتاً بالاتری را شامل شده که پوشش گیاهی قابل توجهی را برای بخشی از سال نشان می‌دهد.

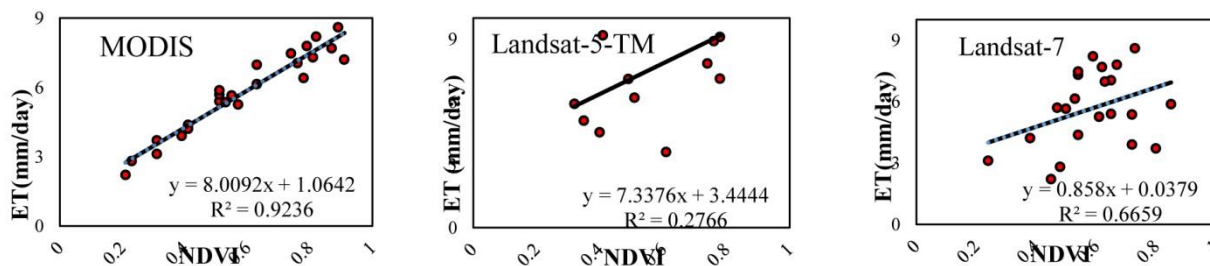
در صورتی که مطالعات برآورد تبخیر-تعرق برای محاسبه اراضی با وسعت زیاد مدنظر باشد استفاده از سنجنده MODIS در الگوریتم PYSEBAL با توجه به حجم کمتر تصاویر مورد استفاده و مدت زمان کوتاه‌تر به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق، می‌تواند برآورد کلی و قابل-قبول تری از الگوی تغییرات مکانی تبخیر-تعرق نسبت به تصاویر Landsat داشته باشد. برآورد ET_a مبتنی بر سنجش‌ازدور در بسیاری از مطالعات با ایجاد رابطه تجربی مستقیم بین NDVI و ضریب محصول (KC) به‌جای حل معادله بیلان انرژی سطحی انجام می‌شود (Glenn et al., 2011; Hunsaker et al., 2003; Kamble et al., 2013). بنابراین بررسی رابطه بین مقادیر ET_a حاصل از الگوریتم PYSEBAL و مقادیر مستقل NDVI که به‌صورت مستقیم توسط سنجنده محاسبه می‌شود می‌تواند امکان اعتبارسنجی قوی را ارائه دهد. انتظار می‌رود که بین ET_a و NDVI یک همبستگی کلی در



شکل ۶ - نقشه NDVI حاصل از سه سنجنده در دشت قزوین در مردادماه ۱۳۸۰

رشد پوشش گیاهی با افزایش دسترسی به آب است و شاخص‌های پوشش گیاهی از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند رشد پوشش گیاهی را به خوبی توصیف کنند و در نتیجه می‌توانند روند استفاده از آب را نیز توضیح دهند. این اساس برآورد ET_a با محاسبه ضرایب محصول (kc) از شاخص‌های پوشش گیاهی است.

در این پژوهش به تجزیه و تحلیل ET_a روزانه و مقدار NDVI در کل محدوده مورد مطالعه پرداخته شد (شکل ۷). این مقایسه همبستگی بالایی بین برآورد ET_a و NDVI گزارش داد به طوری که میزان همبستگی صورت گرفته از تصاویر MODIS، $R^2=0.92$ ، Landsat-5 $R^2=0.77$ و Landsat-7 $R^2=0.66$ نشان داد. رابطه خطی بین ET_a و NDVI در تمام انواع کاربری اراضی نشان‌دهنده



شکل ۷- ارتباط ET (mm/day) و NDVI در سه سنجه استفاده شده در طول دوره مورد مطالعه

آب مورد نیاز برای تبخیر-تعرق در هر نوع کشت و با هر کاربری اراضی آگاه شد و از این طریق دیدگاه‌های مدیریتی حاکم بر منابع آب هر دشت را هدفمند نمود و نهایتاً گامی مؤثر به سوی اصلاح الگوی مصرف و مدیریت پایدار آب در بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی آن دشت برداشته شود.

در این پژوهش علاوه بر مدل SEBAL از مدل PYSEBAL برای برآورد ET_a استفاده شد که از رویکرد بیلان انرژی به جای وابستگی به ضرایب محصول و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده می‌کند بنابراین پاسخ مورد انتظار ET_a به رشد پوشش گیاهی همان طور که توسط NDVI نشان داده شده است تضمین و دقت بالایی نقشه‌های ET_a روزانه توسعه یافته را نشان می‌دهد.

منابع

ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۷۹. تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) به روش لایسیمتر و مقایسه با روش‌های تجربی در قزوین. وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی قزوین. هدایتی دزفولی، ا. و کاکاوند، ر. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی اقلیمی استان قزوین. نیوار. ۳۶ (۷۶-۷۷): ۵۹-۶۶.

Allen, R G, Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R. and Bastiaanssen, W. 2002. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)-Advanced training and Users Manual. Kimberly: Idaho Implementation.

Allen, Richard G., Tasumi, M. and Trezza, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 133(4): 380-394.

Almhab, A. A. and Busu, I. 2008. Estimation of Evapotranspiration with Modified SEBAL model using landsat-TM and NOAA-AVHRR images in arid mountains area. 2008 Second Asia International

نتیجه گیری

برآورد دقیق تبخیر-تعرق اهمیت قابل توجهی در تخمین نیاز آبی گیاه در مرحله طراحی پروژه‌های آبیاری و تعیین وسعت قابل کشت، انتخاب الگوی کشت و تقویم آبیاری دارد. در این تحقیق حاضر سعی شد تا با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS، TM و ETM و اجرای دو الگوریتم بیلان انرژی سطحی بهترین مدل و سنجنده به منظور کاهش انجام فرآیندهای محاسبه تبخیر-تعرق که با صرف هزینه و زمان زیادی همراه خواهد بود، انتخاب شود. بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از الگوریتم PYSEBAL توسط سنجنده MODIS، مناسب برآورد تبخیر-تعرق در مقیاس منطقه‌ای است و توانسته است نتایج رضایت‌بخشی را ارائه کند. استفاده از الگوریتم PYSEBAL در مناطق ناهموار و کوهستانی دشت قزوین که دارای اقلیمی سرد و نیمه خشک است می‌توان نتیجه گرفت که روش مذکور جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی در این منطقه مناسب است و می‌تواند مقادیر تبخیر-تعرق را به خوبی برآورد کند. این کار ضمن به روزرسانی اطلاعات قدیمی، فرصتی فراهم می‌آورد تا از میزان

- W., Faouzi, M., Mohamed, Y. and ErRaji, A. 2017. pySEBAL Version 3.3. 7.
- Hunsaker, D.J., Pinter, P.J., Barnes, E.M. and Kimball, B.A., 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation Science*. (22): 95–104.
- Jaafar, H. H. and Ahmad, F. A. 2020. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment*. (238): 111034.
- Kamble, B., Irmak, A., Hubbard, K. and Gowda, P., 2013. Irrigation Scheduling Using Remote Sensing Data Assimilation Approach. 258–268
- Nyolei, D., Nsaali, M., Minaya, V., van Griensven, A., Mbilinyi, B., Diels, J., Hessels, T. and Kahimba, F. 2019. High resolution mapping of agricultural water productivity using SEBAL in a cultivated African catchment, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. (112): 36–49.
- Sawadogo, A., Gundogdu, K. S., Traoré, F., Kouadio, L. and Hessels, T. 2020. estimating i-season actual evapotranspiration over a large-scale irrigation scheme in resource-limited condition. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare Des Sciences*. 73(10).
- Sawadogo, A., Hessels, T. İ. M., Gündoğdu, K. S., Demir, A. O., Mustafa, Ü. and Zwart, S. J. 2020. comparative analysis of the PYSEBAL model and lysimeter for estimating actual evapotranspiration of soybean crop in Adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 5(2): 60–65.
- 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 Modelling*. 54(3–4): 1086–1092.
- Zhang, K., Kimball, J. S. and Running, S. W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 3(6): 834–853.
- Conference on Modelling & Simulation (AMS). 350–355.
- Bala, A., Rawat, K. S., Misra, A. K. and Srivastava, A. 2016. Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Lysimeter data of IARI agricultural farm, India. *Geocarto International*. 31(7): 739–764.
- Bastiaanssen, Wilhelmus Gerardus Maria. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Wageningen University and Research.
- Bastiaanssen, Wim G M, Menenti, M., Feddes, R. A. and Holtslag, A. A. M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*. (212):198–212.
- Caiserman, A. and Faour, G. 2021. Spatial variability of evapotranspiration and pressure on groundwater resources: remote sensing monitoring by crop type in the Bekaa plain, Lebanon. *Journal of Applied Remote Sensing*. 15(1): 14517.
- Carlson, T. N., Capehart, W. J. and Gillies, R. R. 1995. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*. 54(2): 161–167.
- Chang, X., Wang, S., Gao, Z., Luo, Y. and Chen, H. 2019. Forecast of daily reference evapotranspiration using a modified daily Thornthwaite equation and temperature forecasts. *Irrigation and Drainage*. 68(2): 297–317.
- dos Santos, C. A. C., Mariano, D. A., Francisco das Chagas, A., Dantas, F. R. da C., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, L. L., da Silva, B. B., Bezerra, B. G., & Safa, B. 2020. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. (85): 101982.
- 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.
- Glenn, E.P., Neale, C.M.U., Hunsaker, D.J. and Nagler, P.L., 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process*. (25): 4050–4062.
- Guo, Y., Zhao, X., Zhao, F., Jiao, Z., Zhou, X. and Yu, G. 2020. Tailoring surface wetting states for ultrafast solar-driven water evaporation. *Energy & Environmental Science*. 13(7): 2087–2095.
- Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen,

Estimation of Actual Evapotranspiration Based on the Latest Modified Version of the Surface Energy Balance Algorithm Using Lysimeter Data

M. S. Fakhar¹, A. Kaviani^{2*}

Received: Oct.22, 2021

Accepted: Nov.28, 2021

Abstract

Conventional methods use point measurements for estimating evapotranspiration; however, in remote sensing techniques, such as Surface Energy Balance Algorithm, the instantaneous evapotranspiration flux during satellite transit is calculated as the remainder of the equation in the form of energy balance for each pixel. In this study, two standard mono-source evapotranspiration models were estimated from SEBAL and PYSEBAL and were compared with the results of a drainage lysimeter planted with grass in the Qazvin plain. Satellite data were based on the data from three sensors, MODIS, LANDSAT-5-TM, and LANDSAT-7-ETM, from 2000 to 2003. The results of this study showed that the PYSEBAL model in all three sensors with RMSE (0.45, 0.46, and 2.02 mm/day) respectively had better performance than the SEBAL model. Also, the studies performed from the three sensors showed that the MODIS sensor with standard error value (0.15 mm / day) and correlation coefficient (0.98) compared to the two ETM and TM sensors with correlation coefficient values (0.97 and 0.53), standard error (0.17 and 2.26 mm/day) as well as higher spatial resolution have been able to produce better results.

Keywords: Landsat-5, Landsat-7, MODIS, PYSEBAL, Qazvin plain

1- M.Sc. graduated, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Associate professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Qazvin, Iran

(*- Corresponding Author Email: kaviani@eng.ikiu.ac.ir)