

# برآورد ضرایب گیاهی فضای سبز شهری با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر

## لندست (مطالعه موردی: شهر مشهد)

علی میثاقی<sup>۱</sup>، حسین انصاری<sup>۲\*</sup>، کامران داوری<sup>۳</sup>، علیرضا فریدحسینی<sup>۴</sup>

### چکیده:

برآورد دقیق مقدار آب صرف شده جهت تبخیر- تعرق در فضاهای سبز شهری، برای مدیریت بهتر و برنامه‌ریزی صحیح‌تر منابع آب، خصوصا در مناطق دارای بحران آب بسیار با اهمیت می‌باشد. در خصوص برآورد تبخیر- تعرق فضای سبز علاوه بر ضریب گیاهی باید ضرایب مربوط به خرداقلیم، تعدیل تراکم بوته و تنظیم گونه گیاهی خاص نیز محاسبه گردند. در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و اطلاعات ایستگاه سینوپتیک مشهد میزان تبخیر- تعرق واقعی فضای سبز محاسبه گردید و سپس با استفاده از پارامترهای اقلیمی و محیطی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل سبال، رابطه‌ای بین ضریب میکروکلیم و دمای هوا و نیز رابطه‌ای بین ضریب تراکم و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی برقرار شد. در نهایت با پایش رطوبت خاک به صورت میدانی در پارک غدیر شهر مشهد، صحت سنجی روابط به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت. با تعیین موقعیت مکان‌های میدانی بر روی تصویر ماهواره‌ای، درجات روشنایی پیکسل‌های مربوط به شاخص NDVI استخراج گردیدند و رابطه بین این درجات روشنایی و ضریب تراکم فضای سبز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین مدل ارائه شده با استفاده از رگرسیون خطی به صورت  $K_d = 0.9941 * NDVI + 0.5058$  با ضریب همبستگی برابر  $0.98$  می‌باشد و حداکثر درصد خطا بین تبخیر- تعرق محاسبه‌شده برای فضای سبز با استفاده از روابط استخراج شده و مقادیر اندازه‌گیری شده از پایش وزنی رطوبت کمتر از ۲۴ درصد می‌باشد. به دلیل کم‌آبباری شدید در فضاهای سبز جنگلی و در دسترس نبودن آب به میزان کافی در اختیار گیاه، محاسبه تبخیر- تعرق فضای سبز با استفاده از مدل سبال مناسب نبوده و دارای خطای زیادی می‌باشد. بنابراین به جای استفاده از مدل سبال می‌توان از روابط استخراج شده برای تعیین ضرایب گیاهی و نیاز آبی فضاهای سبز شهری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، شاخص پوشش گیاهی، ضریب خرداقلیم، ضریب تراکم فضای سبز.

۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، تلفن: ۰۹۱۵۹۱۲۹۳۴۶، ایمیل: l\_misaghi@yahoo.com

۲ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایمیل: ansariran@yahoo.com (نویسنده مسئول)

۳ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۴ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه:

نیاز آبی گیاهان به پارامترهای بسیاری مثل ظرفیت نگهداری خاک، دمای هوا، شیب، خشکی هوا، میزان وزش بادهای دایمی، سایه و غیره بستگی دارد و نه فقط از جایی به جای دیگر فرق می‌کند بلکه حتی در یک شهر از محلی به محل دیگر و حتی در یک محل از نقطه‌ای به نقطه دیگر با توجه به پارامترهای بالا فرق می‌کند. حال با توجه به محاسبه سه ضریب اضافی برای تبخیر و تعرق فضای سبز نسبت به تبخیر و تعرق گیاهان زراعی مشکل محاسبه دقیق این پارامترها دوچندان شده، و دقت زیاد و استفاده از روش‌های مناسب را طلب می‌کند (گروه کار کمیته ملی، ۱۳۸۷). با توجه به تغییرات مکانی پارامترهای هواشناسی و نتیجتاً تبخیر- تعرق، استفاده از روش‌هایی از جمله روش‌های مبتنی بر سنجش از دور که این تغییرات را در نظر می‌گیرند، مطلوب است. اگرچه الگوریتم‌های سنجش از دور بسیاری جهت برآورد تبخیر- تعرق وجود دارد اما الگوریتم‌های کلاسیک سنجش از دوری برای مقیاس‌های متوسط و ماکرو مناسب نیستند. در نتیجه استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تری از قبیل SEBAL و SEBS برای نواحی وسیع و ناهمگن ضروری است. اساس این تکنیک‌ها معادله بیلان (توازن) انرژی می‌باشد. کاستلو و همکاران (۲۰۰۰) در شش منطقه مختلف در کالیفرنیا در زمینه نیاز آبی گیاهان فضای سبز و نیز ضرایب گیاهی صورت پذیرفت. آن‌ها پیشنهاد دادند که ضریب گیاهی فضای سبز متشکل از سه ضریب متفاوت تنوع گیاهی، تراکم و خرداقلیم می‌باشد. آن‌ها ضریب تنوع گیاهی برای حدود ۱۸۰۰ گونه مختلف را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و برای هر کدام دامنه‌های مختلفی را ارائه دادند. همچنین پیشنهادهاتی در زمینه تعیین ضریب تراکم پوشش گیاهی و نیز ضریب خرداقلیم در شرایط مختلف ارائه دادند. یزدانی و ابراهیمی (۱۳۹۲) به مقایسه برآورد ضریب گیاهی فضای سبز به کمک روش سبال و روش لیمپ در شهر مشهد پرداختند. آن‌ها با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای و مدل سبال و اطلاعات ایستگاه سینوپتیک مشهد میزان تبخیر- تعرق فضای سبز پارک ملت مشهد را با روش‌های مختلف محاسبه نموده و با روش سبال مورد مقایسه قرار

دادند. مقادیر ضریب فضای سبز به دست آمده در این تحقیق رابطه مستقیم و تنگاتنگی با شاخص پوشش گیاهی داشته و با افزایش آن افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از ضریب به دست آمده از مدل سبال نتایج بهتری از ضریب محاسبه شده توسط مدل لیمپ را ارائه می‌دهد. پورمحمد و همکاران (۱۳۹۵) میزان تبخیر- تعرق واقعی محصولات عمده دشت نیشابور را با استفاده از الگوریتم سبال به دست آورده و سپس با استفاده از تابع تولید میزان تولید را تخمین و میزان بهره‌وری اقتصادی آب با در نظر گرفتن عمق آب زیرزمینی و میزان انرژی لازم برای استخراج آب را محاسبه نمودند. یزدان پناه و همکاران (۱۳۹۶) به کاربرد و توسعه مدل LIMP<sup>۲</sup> برای برنامه ریزی آبیاری فضای سبز شهری در شهر اصفهان پرداختند. آن‌ها به منظور محاسبه تبخیر- تعرق مرجع فضای سبز (ET<sub>OL</sub>) و ضریب خرداقلیم از پنج ایستگاه هواشناسی در سطح شهر اصفهان که از لحاظ پوشش سطح، تراکم جمعیت و ترافیک متفاوت بودند، استفاده نمودند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که ایستگاه‌هایی که در مناطق مسکونی و تجاری با ترافیک بالای خودرو و سطح نفوذناپذیر بیشتر بودند، در طول سال ضرایب خرداقلیم بزرگتری دارند و ایستگاه‌هایی که در مناطق با پوشش گیاهی بیشتر، چمن گسترده و وجود آبناها و دریاچه‌های مصنوعی هستند، ضریب خرداقلیم کوچکتری دارند. نوری و همکاران (۲۰۱۳) در استرالیا در زمینه استفاده از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور جهت پیش بینی تبخیر- تعرق پوشش‌های ترکیبی فضای سبز تحقیقی انجام داده اند که برخی مطالعات ذکر شده در این تحقیق، روش‌های مبتنی بر شاخص پوشش گیاهی را برای فضاهای سبز ترکیبی مناسب دانسته اند. در تحقیق دیگری نوری و همکاران (۲۰۱۳) در استرالیا به مقایسه سه روش مختلف جهت تعیین نیاز آبی فضاهای سبز شهری پرداختند. آن‌ها داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی را در پارک آدلاید در جنوب استرالیا جمع‌آوری نمودند و سه فاکتور تعدیل ضریب گیاهی برای سه روش WUCOLS<sup>۳</sup>، PF<sup>۴</sup> و IPOS<sup>۵</sup> را تخمین و مقدار آب آبیاری واقعی و پیش بینی شده را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش WUCOLS برآورد دقیق‌تری از میزان آب آبیاری

<sup>۴</sup> Plant Factor

<sup>۵</sup> Irrigated Public Open Space

<sup>۱</sup> Surface Energy Balance Algorithms for Land

<sup>۲</sup> Landscape Irrigation Management Program

<sup>۳</sup> Water Used Classification Of Landscape Species

ناخالص مورد نیاز پوشش گیاهی شهری نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌دهد. همچنین تحقیقی در خصوص ارتباط بین تبخیر- تفرق فضای سبز شهری و شاخص‌های گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای توسط نوری و همکاران (۲۰۱۴) در یکی از پارک‌های شهر استرالیا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا صورت پذیرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که همبستگی بالایی بین تبخیر- تفرق و شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی وجود دارد که بالاترین همبستگی بین تبخیر- تفرق و شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی برای باغ ترکیبی فضای سبز صرفنظر از نوع پوشش گیاهی بوده و پایین‌ترین همبستگی برای چمن می‌باشد. در نهایت آن‌ها نشان دادند که می‌توان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تعیین شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی ابزار پیش‌بینی موثری جهت تخمین تبخیر- تفرق در کشت‌های فضای سبز ترکیبی در شرایط بدون تنش فراهم نمود.

علیرغم این‌که مطالعات گسترده‌ای در کشور با استفاده از سنجش از دور در زمینه تبخیر- تفرق صورت گرفته است، اما به مطالعات نیاز آبی فضای سبز و ضرایب آن کمتر پرداخته شده است. بنابراین با توجه به این‌که ضرایب فضای سبز یکی از ارکان اصلی محاسبه نیاز آبی فضای سبز می‌باشند، در این تحقیق به بررسی و ارزیابی این ضرایب پرداخته شده است. همچنین با توجه به کمبود دائمی آب در شهر مشهد و وجود بحران‌هایی مقطعی نظیر خشکسالی، تخمین مقدار آب مورد نیاز و تأمین آب فضای سبز شهری موجود و توسعه این فضا، به برنامه ریزی دقیقی احتیاج دارد. لازم به ذکر است که در هیچ کدام از مطالعات صورت پذیرفته، تحقیقی بر روی ضرایب سه گانه فضای سبز و به خصوص ضرایب خرداقلیم و تراکم صورت نگرفته است، اما در این تحقیق و به صورت خاص، تمرکز بر روی ضرایب خرداقلیم و تراکم بوده و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های اقلیمی و محیطی تعیین گردیده است.

## مواد و روش‌ها

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی با ۲۰۴ کیلومتر مربع مساحت، در شمال شرق ایران و در طول

جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه و در حوضه آبریز کشف رود، بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد واقع است. میزان نزولات جوی در ارتفاع و سطح دشت تفاوت زیادی دارد به طوری که در ارتفاعات هزارمسجد ۸۰۰ میلی‌متر و در سطح دشت مشهد متوسطاً ۲۵۰ میلی‌متر گزارش شده است. دشت مشهد در حوضه آبریز کشف‌رود، پهنه‌ای به طول ۱۰۰ کیلومتر و عرض ۲۵ کیلومتر با وسعت ۲۵۰۰ کیلومتر مربع دارد. خراسان رضوی هم‌اکنون بحرانی‌ترین منابع آبی زیرزمینی در سطح کشور را داراست. از مجموع ۳۷ دشت آب در خراسان رضوی ۳۴ دشت وضعیت 'ممنوعه' دارند. در حالی که میانگین بارندگی سالانه در کشور حدود ۲۵۰ میلیمتر است، همین میانگین در خراسان رضوی ۲۰۸ میلیمتر است. اطلاق بحران به وضعیت کنونی آب دشت مشهد رسا نیست زیرا کلمه بحران دوره‌ای موقت را نشان می‌دهد در حالی که وضعیت آب در این دشت به حالت وخیم رسیده است. در حال حاضر میزان آب تجدیدپذیر سالانه دشت مشهد حدود ۸۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد، اما میزان برداشت سالیانه از دشت مشهد حدود یک میلیارد و ۱۵۰ میلیون متر مکعب می‌باشد، با این احتساب میزان مصرف فعلی ما حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب بیشتر از حد استاندارد است. بر اساس طبقه‌بندی جدید یونسکو مشهد دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. حداکثر درجه حرارت در تابستان‌ها ۳۵ درجه بالای صفر و کمترین آن در زمستان‌ها ۱۵ درجه زیر صفر می‌باشد. شهر مشهد به دلیل ورود سالانه میلیون‌ها نفر مسافر دارای پارک‌ها و فضاهای سبز بسیاری می‌باشد. بر اساس آخرین آمار، سرانه فضای سبز شهر مشهد به حدود ۱۶ مترمربع رسیده است. مرز مورد مطالعه از قسمت جنوب شرقی به اراضی جیم‌آباد و شمال غربی به پارک وکیل‌آباد و از شمال به کشف رود و از جنوب به کوه‌های بینالود محدود می‌گردد. در این تحقیق مطالعات بر روی سه پارک بزرگ شهری (شکل ۱) به نام‌های پارک‌های جنگلی غدیر و طرق (با وسعت هر کدام حدود ۱۰۰ هکتار و درختان غالب کاج و چنار و مختصات

<sup>۱</sup> شروع مطالعات از پارک جنگلی غدیر و طرق، به دلیل کشت تک گونه ای

۷۳۵۰۸۷، ۴۰۱۳۹۸۹ و ۷۳۵۷۴۰، ۴۰۱۱۹۴۲ به ترتیب)، پارک خورشید (با وسعت حدود ۴۰۰ هکتار و درختان غالب سرو نقره‌ای و کاج و مختصات ۷۲۲۶۵۱، ۴۰۲۰۲۲۷) و پارک ملت (با وسعت حدود ۶۳ هکتار و درختان غالب چنار و چمن و گل دائم و فصلی و مختصات ۷۲۷۸۰۶، ۴۰۲۲۵۱۹) انجام شد.

### داده‌های مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز در سطح شهر مشهد از ۱۰ ایستگاه سنجش کیفیت هوا در درون شهر از سازمان شهرداری مشهد و یک ایستگاه سینوپتیک از سازمان هواشناسی خراسان رضوی (جدول ۱) در قالب چندین فایل صفحات گسترده دریافت گردید. بدین منظور فایل‌های دریافتی بر اساس نیاز مرتب گردیدند. پس از مرتب‌سازی و جمع‌آوری اطلاعات ۱۱ ایستگاه مذکور در یک فایل صفحات گسترده آماده گردید.



شکل (۱): موقعیت استان خراسان رضوی در ایران و مشهد در خراسان رضوی و پارکهای مورد مطالعه در شهر مشهد

### تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای مورد استفاده

جهت انجام تحقیق حاضر به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و در دسترس بودن تصاویر لندست ۷، از ۹ تصویر در سال ۱۳۹۵ و ۶ تصویر در سال ۱۳۹۷ استفاده گردید. در این مطالعه از نرم‌افزارهای ERDAS Imagine و ENVI و QGIS جهت انجام پردازش‌های تصویری و اجرای الگوریتم سبال و نرم‌افزار ArcGIS جهت ترسیم نقشه‌های تبخیر-تعرق در محیط GIS استفاده گردید. لازم به ذکر است که مراحل مختلف الگوریتم سبال با استفاده از امکانات Model Maker در نرم‌افزار ERDAS Imagine برنامه نویسی شده و الگوریتم سبال برای هر تصویر بعد از انجام اصلاحات مورد نیاز اجرا گردید.

### الگوریتم سبال

برای محاسبه ضرایب فضای سبز در این تحقیق نیاز به برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETA) است. بدین منظور

تکنیک الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای سطح زمین (SEBAL) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ مورد استفاده قرار گرفت. برای تخمین لحظه ای اجزاء تعادل انرژی سطحی، مدل سبال از تکنیک سنجش از دور همراه با داده‌های هواشناسی تکمیلی منطقه برای این تخمین استفاده می‌کند (جدول ۲). اساس این روش استفاده از معادله توازن انرژی و محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر به عنوان باقی‌مانده این معادله برای هر پیکسل می‌باشد (Bastiaanssen et al, 2002).

### پهنه بندی تبخیر-تعرق گیاه مرجع

به دلیل این‌که در نزدیکی پارک‌های مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک وجود نداشت، با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های درون‌شهری و نیز ایستگاه سینوپتیک پهنه بندی تبخیر-تعرق مرجع در محدوده مورد مطالعه برای تدقیق محاسبات صورت پذیرفت. به گونه‌ای که با عنایت به

<sup>۱</sup> داندلود از سایت <http://earthexplorer.usgs.gov/>

## محاسبه ضریب میکروکلیم

با توجه به این که در روش ضریب فضای سبز برای هر کدام از ضرایب فضای سبز دامنه‌ای از اعداد تعریف شده است و کارشناسان برای یک شرایط مشابه، اعداد متفاوتی را با دید کارشناسی انتخاب می‌نمایند، به دست آوردن روابطی جهت تعیین این ضرایب به گونه‌ای که دید و نظر کارشناسی را حذف نماید، ضروری به نظر می‌رسد.

شرایط خرداقلیم متوسط در حکم شرایط ETo می‌باشد، یک فضای باز عمومی بدون بادهای غیرعادی یا منابع گرمایی غیرمعمول در محل. این میکروکلیم در واقع به وسیله ساختمان‌های نزدیک، سازه‌ها، سنگفرش‌ها، شیب‌ها یا سطوح منعکس‌کننده تأثیر نمی‌پذیرد. بنابراین طبق تعریف، ضریب میکروکلیم بایستی تفاوت خرداقلیم یک نقطه را نسبت به نقطه دیگر که دارای شرایط خرداقلیم نمی‌باشد (مانند ایستگاه سینوپتیک و یا شرایط بالا) را نشان دهد. محققین مختلفی به تأثیر مستقیم و معنی دار پارامترهای هواشناسی بر تبخیر- تعرق به خصوص دما اشاره داشته‌اند (پایپر ۱۹۸۹، لی و همکاران ۱۹۹۴، گوپال ۲۰۰۴، دین پژوه و شریفی ۱۳۹۲). بر اساس مطالعات صورت گرفته دمای هوا بیشترین تأثیر را بر مقدار تبخیر- تعرق دارد. بنابراین پارامتر دمای هوا به عنوان مهم‌ترین عامل موثر بر تبخیر- تعرق در این بخش از تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و ارتباط بین این پارامتر با ضریب میکروکلیم برقرار گردید. لازم به ذکر است که پارامترهای هواشناسی دیگر نظیر تابش ورودی نیز تأثیر زیادی بر ETo دارند، اما رویکرد این تحقیق استفاده از پارامترهایی است که زودیافت بوده و به راحتی قابل اندازه‌گیری باشند و به همین دلیل فقط ارتباط بین دمای هوا با ضریب میکروکلیم مورد بررسی قرار گرفته و معادله مربوطه استخراج گردید. با توجه به تعاریف بیان شده از ضریب خرداقلیم، در این بخش از لایه رستری دمای هوا در خلال محاسبه تبخیر- تعرق واقعی از مدل سبال استفاده گردید. لذا در پارک بزرگ غدیر پیکسل‌هایی به عنوان پیکسل شاهد در نظر گرفته شد، ویژگی این پیکسل‌ها عدم وجود هرگونه خرداقلیم در داخل و اطراف پیکسل‌ها می‌باشد. در ادامه پیکسل‌هایی انتخاب گردیدند که دارای خرداقلیم‌هایی متفاوت (همجواری با بزرگراه، جاده‌های آسفالتی، وجود

وجود داده‌های مختلف هواشناسی در ایستگاه‌های درون شهری منطقه، و سپس با تکیه بر روش محاسبه سپس درون‌یابی ("Calculate-then-Interpolate", "CI") و روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی، نقشه‌های پهنه بندی تبخیر- تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه و در روزهای دارای تصویر با استفاده از روش فائو- پنمن- مانیتیت تهیه گردید.

## تعیین نیاز آبی فضای سبز شهری

### روش ضریب فضای سبز (WUCOLS)

کسری از تبخیر- تعرق مرجع در فضاهای سبز شهری بایستی جهت برقراری سلامت گیاه و نیز زیبایی آن به کار رود. این کسر می‌تواند توسط یک فاکتور تعدیل ( $K_L$ ) تخمین زده شود. بدین منظور، کاستلو و همکاران (۱۹۹۴) یک روش عملی (WUCOLS) را معرفی کردند (رابطه ۱). WUCOLS بر اساس روشی در برآورد نیاز آبی محصول (فائو-۲۴ و فائو-۵۶) می‌باشد که به ضریب فضای سبز توجه می‌کند، شامل فاکتور تنوع ( $K_S$ )، فاکتور تراکم ( $K_d$ ) و فاکتور خرداقلیم ( $K_{mc}$ ) (رابطه ۲).

$$ET_L = K_L \times ET_O \quad (1)$$

$$K_L = K_S \times K_{mc} \times K_d \quad (2)$$

تفاوت در گونه‌های گیاهی توسط تعیین یک فاکتور گونه (تنوع) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر این ضریب از خیلی کم (کمتر از ۰/۱ تا زیاد (بین ۰/۷ تا ۰/۹) متغیر است. تراکم پوشش گیاهی در اینجا به مجموع سطح برگ تمامی کشت‌ها در فضای سبز اشاره دارد. اختلاف در تراکم پوشش گیاهی یا سطح برگ، منجر به تفاوت در تلفات آب می‌گردد. این فاکتور در ۳ گروه کم (بین ۰/۵ تا ۰/۹)، متوسط (۱) و زیاد (۱/۱ تا ۱/۳) طبقه بندی شده است. خرداقلیم در هر فضای سبزی وجود دارد و در تخمین تلفات آب گیاه باید در نظر گرفته شود. ویژگی‌های معمول فضاهای سبز شهری (ساختمان‌ها، سنگفرش‌ها، معابر و ...) بر دما، سرعت باد، شدت نور و رطوبت نسبی تأثیر می‌گذارد. فاکتور خرداقلیم بر اساس این روش نیز به سه گروه کم (بین ۰/۵ تا ۰/۹)، متوسط (۱) و زیاد (۱/۱ تا ۱/۴) تقسیم بندی می‌شود.

استخر بزرگ ذخیره آب، وجود ساختمان و کمپ های زائر،  
همجواری با زمین بازی کودکان می باشند.

جدول(۱): موقعیت و اطلاعات ایستگاه های مورد مطالعه در دوره آماری تحقیق

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	متوسط حداقل دما (درجه سانتی گراد)	متوسط حداکثر دما (درجه سانتی گراد)	میانگین دما سالانه (درجه سانتی گراد)	رطوبت نسبی حداقل (درصد)	رطوبت نسبی حداکثر (درصد)	میانگین رطوبت نسبی سالانه (درصد)	میانگین سرعت باد سالانه (متر بر ثانیه)
۱	طرق	۴۰۱۱۵۷۷	۷۳۷۱۴۶	۹/۲	۲۲/۵	۱۵/۹	۲۸/۸	۶۸/۹	۴۸/۸	۲/۴
۲	سمزقند	۴۰۲۲۶۸۵	۷۳۴۹۱۲	۱۰/۸	۲۲/۵	۱۶/۸	۲۵/۰۱	۶۲/۵	۴۲/۶	۰/۶۴
۳	خیام شمالی	۴۰۲۴۵۶۱	۷۳۲۰۲۹	۱۱/۲	۲۲/۵	۱۷/۳	۲۳/۸	۵۸/۱	۴۰/۸	۰/۹۷
۴	چمن	۴۰۲۴۷۵۱	۷۲۷۰۵۲	۱۱/۶	۲۲/۵	۱۷/۷	۲۳/۴	۵۶/۵	۴۰/۰۸	۰/۷
۵	الهیه	۴۰۲۸۷۰۷	۷۲۱۹۹۱	۱۰/۲	۲۰/۸	۱۶/۳	۲۲/۹	۵۴/۸	۴۰/۳	۱/۲۵
۶	کریمی	۴۰۲۲۰۲۲	۷۳۲۹۶۰	۱۱/۷	۲۳/۱	۱۸/۱	۲۲/۷	۵۳/۶	۳۹/۵	۰/۶۱
۷	مفتح	۴۰۲۰۵۱۲	۷۳۷۳۶۸	۱۲/۰۱	۲۳/۶	۱۷/۷	۲۲/۲	۵۶/۰۲	۳۸/۱	۰/۶
۸	آوینی	۴۰۲۰۲۲۸	۷۳۹۱۴۹	۱۱/۱	۲۴/۳	۱۷/۳	۲۳/۸	۶۰/۲	۴۱/۳	۰/۶۸
۹	خاقانی	۴۰۱۹۳۷۱	۷۲۷۸۹۷	۱۱/۷	۲۲/۹	۱۷/۳	۲۵/۴	۵۹/۲	۴۱/۰۹	۰/۵۵
۱۰	سرافرازان	۴۰۲۰۰۸۵	۷۲۴۹۴۰	۱۱/۳	۲۰/۷	۱۶/۲	۲۳/۷	۵۵/۱	۳۸/۳	۱/۰۱
۱۱	امامیه	۴۰۲۵۹۵۶	۷۲۶۱۳۵	۱۱/۳	۲۲/۱	۱۷/۱	۲۳/۶	۵۵/۰۳	۳۹/۴	۰/۷۹

جدول(۲): روابط اصلی محاسبه تبخیر- تعرق واقعی توسط الگوریتم سبال

معرفی پارامترها	رابطه	شاخص
$R_n$ : شار تابش خالص در سطح زمین، $G$ : شار گرمای خاک، $H$ : شار گرمای محسوس، $\lambda ET$ : شار گرمای نهان تبخیر (وات بر مترمربع). $\alpha$ آلبیدوی سطحی (بی بعد)، $\downarrow RS$ تابش با طول موج کوتاه (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) رسیده به سطح زمین (وات بر مترمربع)، $\downarrow RL$ تابش با طول موج بلند (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) رسیده به سطح زمین (وات بر مترمربع)، $\uparrow RL$ تابش با طول موج بلند خروجی از سطح زمین (وات بر مترمربع)، $\epsilon_0$ : گسیلمندی حرارتی سطحی (بی بعد)، $NDVI$ : شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی و $T_s$ دمای سطح زمین (درجه کلونین)، $\rho_{air}$ چگالی هوا ( $Kg/m^3$ ), $C_p$ گرمای ویژه هوا ( $J/(Kg^{\circ}K)$ ), $dT$ اختلاف دما میان دو ارتفاع $Z_1$ و $Z_2$ (درجه	$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H$	شار لحظه ای گرمای نهان تبخیر
	$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow}$	شار تابش خالص
	$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} [0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2][1 - 0.978NDVI^4]$	نسبت شار گرمای خاک به شار تابش خالص
	$H = \frac{\rho_{air} C_p dT}{r_{ah}}$	شار گرمای محسوس
	$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda}$	تبخیر- تعرق واقعی لحظه ای
	$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}}$	کسر تبخیر- تعرق مرجع

$$ET_{24h} = (ET_r F)(ET_r - 24h)$$

کلوبن)، rah: مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (s/m)  
 ETinst: میزان تبخیر و تعرق واقعی برای لحظه گذر ماهواره (میلیمتر در ساعت، ETr-24h مقدار تبخیر و تعرق مرجع در طی بازه زمانی ۲۴ ساعته

گونه که قبلاً بیان گردید، پیکسل‌های انتخابی دارای مقادیر ضریب تراکم و ضریب گونه مشابهی نسبت به پیکسل شاهد می‌باشند، لذا با توجه به این‌که تغییر در میزان تبخیر-تعرق، در واقع همان میزان تغییر در ضریب میکروکلیمای می‌باشد، بدین‌صورت رابطه‌ای بین ضریب میکروکلیمای پارامتر تغییرات دمایی هوا برقرار گردید.

### محاسبه ضریب تراکم

برای به‌دست آوردن رابطه‌ای جهت ضریب تراکم، از مکان‌های مختلف فضای سبز در پارک‌های مورد مطالعه به صورت میدانی و از نزدیک تصویر تهیه گردید و همراه با آن نشانه گذاری با دستگاه GPS انجام پذیرفت. سپس با دید تیم کارشناسی و نظر خبره برای هر کدام از تصاویر با توجه به پیشنهاد WUCOLS مقدار ضریب تراکم فضای سبز تعیین گردید. در مطالعات مختلف، شاخص NDVI به عنوان بهترین شاخص از لحاظ همبستگی با پوشش گیاهی معرفی شده است (مختاری و همکاران، ۱۳۷۹) که بیانگر شدت و ضعف تراکم پوشش‌های گیاهی می‌باشد و مقدار آن بین اعداد +۱ و -۱ می‌باشد. مقادیر منفی این شاخص حاکی از عدم حضور پوشش گیاهی است (پترولی و همکاران، ۲۰۰۵). بنابراین از این شاخص برای ارتباط با ضریب تراکم فضای سبز بهره‌گیری شد. در ادامه تحقیق برای هر کدام از پیکسل‌های در نظر گرفته شده و مورد بررسی، شاخص NDVI تعیین و بر این اساس، رابطه‌ای بین Kd و NDVI برقرار گردید. به گونه‌ای که می‌توان با داشتن شاخص NDVI از روی تصاویر، مقدار ضریب تراکم فضای سبز را استخراج نمود.

### پایش رطوبت خاک

در این تحقیق جهت صحت سنجی روابط به دست آمده برای محاسبه ضرایب میکروکلیمای و ضریب تراکم و تعیین تبخیر-تعرق واقعی فضای سبز از پایش رطوبت در پارک

باید اشاره داشت که تمامی پیکسل‌های انتخاب شده شامل پیکسل‌های شاهد و دیگر پیکسل‌ها دارای شاخص NDVI برابر (به عنوان معرف ضریب تراکم) و نیز دارای ضریب گونه برابر (گونه‌های گیاهی مشابه) بودند تا بتوان فقط تأثیر خرداقلیم را بر تبخیر-تعرق مورد مقایسه و بررسی قرار داد. در این بخش از تحقیق از پارک‌های جنگلی با گونه‌های ثابت (دارای ضریب گونه ثابت و مشخص) استفاده گردید و میزان تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از مدل سببال در هر کدام از پیکسل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با استفاده از نرم افزار Ref ET و قرار دادن دماهای مختلف در آن (با ثابت قراردادن دیگر پارامترهای موردنیاز)، میزان تبخیر-تعرق‌های مرجع مختلف به ازای آن‌ها به دست آمد. برای تحلیل حساسیت تبخیر-تعرق به پارامترهای هواشناسی در این مطالعه از روش ارائه شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شد. ابتدا مقدار ضریب حساسیت از رابطه زیر بدست آمد:

$$SC'' = \frac{\Delta ET_0}{\Delta V} \quad (3)$$

که در آن  $SC''$  ضریب حساسیت،  $\Delta V$  میزان تغییر در یک پارامتر هواشناسی مشخص (در اینجا دمای هوا) و  $\Delta ET_0$  میزان تغییر در  $ET_0$  ناشی از تغییر پارامتر هواشناسی مورد نظر می‌باشد. چون مقیاس پارامترهای هواشناسی یکسان نیست، بنابراین می‌توان استنباط کرد میزان  $SC''$  حساس به نوع متغیرهای هواشناسی و یا  $ET_0$  خواهد بود. بنابراین برای حل این مشکل از شاخص بی بعد  $SC$  به شرح زیر استفاده گردید:

$$SC = \frac{\frac{\Delta ET_0}{\Delta V}}{V} \quad (4)$$

که در آن  $SC$  ضریب بی بعد حساسیت می‌باشد. در این رابطه  $ET_0$  و  $V$  به ترتیب مقادیر پایه  $ET_0$  (در پیکسل شاهد) و متغیر هواشناسی مورد نظر (در اینجا دمای هوا) برای تحلیل حساسیت قبل از اعمال تغییر می‌باشند. همان

غدیر مشهد استفاده گردید. بدین صورت که هر ۱۶ روز یکبار (در فصول آبیاری هر ۸ روز یکبار) و در روزهای گذر ماهواره اندازه گیری های رطوبت در سه محل مختلف (جدول ۳) از پارک غدیر به صورت وزنی و تا ۴ عمق مختلف (از صفر تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی متر از سطح خاک) توسط آگر و در تمامی فصول سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ انجام پذیرفت و بلافاصله نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و وزن نمونه‌های مرطوب اندازه گیری و یادداشت

شده و سپس نمونه‌ها در داخل ظرف های مخصوص منتقل شده و به مدت ۴۸ ساعت در گرمخانه نگهداری شده و وزن نمونه‌های خشک شده نیز اندازه‌گیری می گردید. همچنین از هر پلان، نمونه‌ای جهت تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک و نیز رطوبت در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم برداشت و آزمایشات لازم در این زمینه انجام گردید.

جدول(۳): موقعیت و مشخصات نقاط نمونه برداری در پارک غدیر

نام نقطه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	بافت خاک	نوع گونه
پلان یک	۴۰۱۴۳۹۶	۷۳۴۶۱۳	سبک- شنی	درختان کاج و زبان گنجشک
پلان دو	۴۰۱۴۱۶۴	۷۳۴۸۱۲	سنگین-رسی	درختان چنار و زبان گنجشک
پلان سه	۴۰۱۴۴۰۰	۷۳۴۸۱۷	متوسط- لومی شنی	درختان کاج و سپیدار

### صحت سنجی

با به دست آوردن رطوبت حجمی خاک در لحظه گذر ماهواره از پایش رطوبت و دیگر پارامترهای موردنیاز اقدام به تعیین نیاز آبی نموده که با نیاز آبی واقعی به دست آمده از روابط به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. آب آبیاری موردنیاز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) و خطای مطلق میانگین (MAE) استفاده شد (روابط ۶ تا ۹). مقادیر RMSE نشان گر مقدار خطای مدل در برآورد داده‌هاست و مقدار آن همواره مثبت یا صفر است و با نزدیک شدن آن به صفر، دقت روابط برای برآورد نیاز آبی فضای سبز افزایش می یابد.

$$d_n = \sum_{i=1}^n (F_c - \theta_i) \times D \times \rho_b \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(y_{est,i} - y_{obs,i}) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est,i} - y_{obs,i})^2} \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)]} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est,i} - y_{obs,i}) \quad (9)$$

در این معادله  $d_n$  مقدار آب مورد نیاز گیاه بر حسب میلی متر،  $F_c$  ظرفیت زراعی مزرعه بر حسب درصد،  $\theta_i$  رطوبت لایه خاک قبل از آبیاری (در زمان نمونه برداری و لحظه گذر ماهواره)،  $D$  عمق خاک (عمق هر لایه بر حسب میلی متر)،  $\rho_b$  وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و  $n$  تعداد لایه‌های خاک می‌باشد. بدین ترتیب اعتبار سنجی و صحت سنجی روابط به دست آمده صورت پذیرفت و روابط موجود اصلاح و کالیبره شد.

که در آن‌ها  $y_{est,i}$  مقادیر تخمینی،  $y_{obs,i}$  مقادیر مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

الگوریتم سبال از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است و طی این فرآیند پارامترهایی نظیر شاخص گیاهی NDVI، الییدوی سطحی و دمای هوا با استفاده از اطلاعات تصاویر محاسبه می شوند. در این مطالعه برای هر ۱۵ تصویر مورد اشاره، شاخص گیاهی NDVI و دمای هوا و تبخیر- تعرق لحظه‌ای به صورت لایه رستری به دست آمد که به دلیل

### اعتبارسنجی

اعتبارسنجی روابط به دست آمده برای ضرایب گیاهی فضای سبز توسط آنالیزهای آماری بین مقادیر مشاهداتی پایش رطوبت در پارک غدیر و مقادیر به دست آمده از روابط انجام پذیرفت. برای بررسی آماری صحت پیش بینی مدل

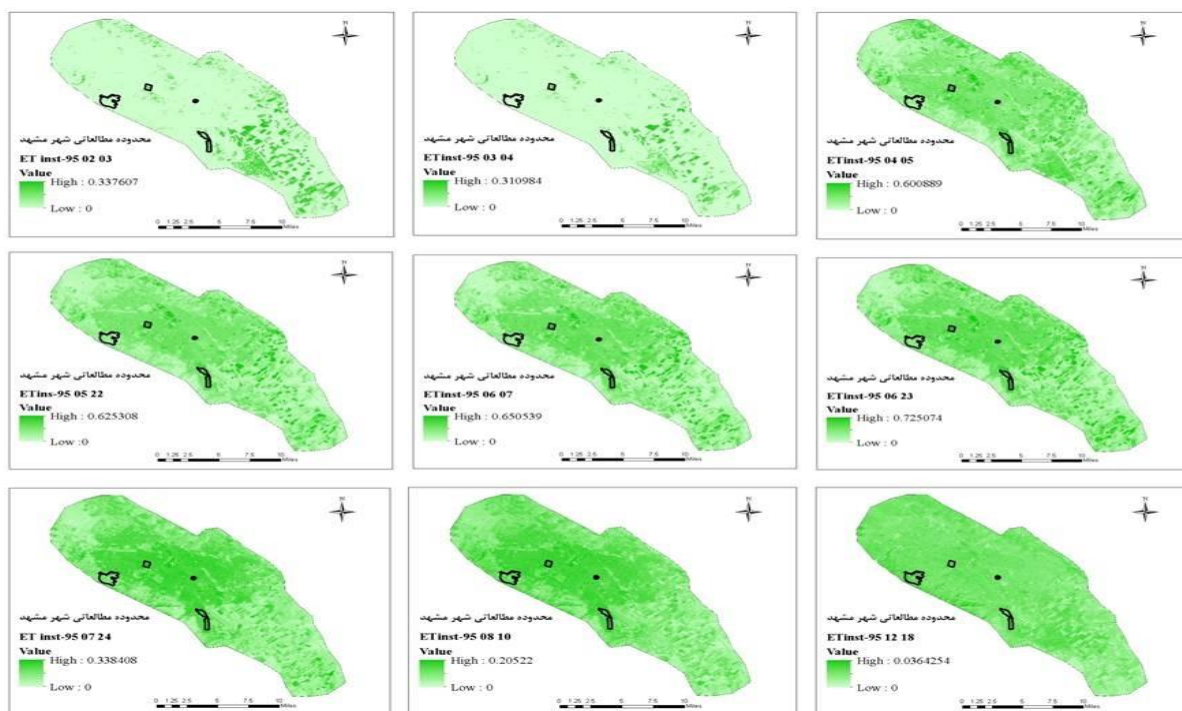


جلوگیری از تطویل مقاله، فقط نتایج لایه رستری تبخیر- تعرق لحظه‌ای درج گردید. در ادامه، نتایج به دست آمده برای تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم سبال با مقادیر به دست آمده از پایش رطوبت مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است محدوده مورد مطالعه طوری انتخاب گردید که علاوه بر شهر مشهد و پارک‌های مورد بررسی، اراضی کشاورزی طرق تا جیم آباد نیز شامل شود (تصاویر ۴ تا ۹) تا بتوان در زمینه پیکسل‌های سرد و گرم (از مهمترین مراحل الگوریتم سبال) بهترین پیکسل‌ها انتخاب گردند تا گام‌های الگوریتم سبال تا تعیین تبخیر- تعرق واقعی به درستی انجام پذیرد.

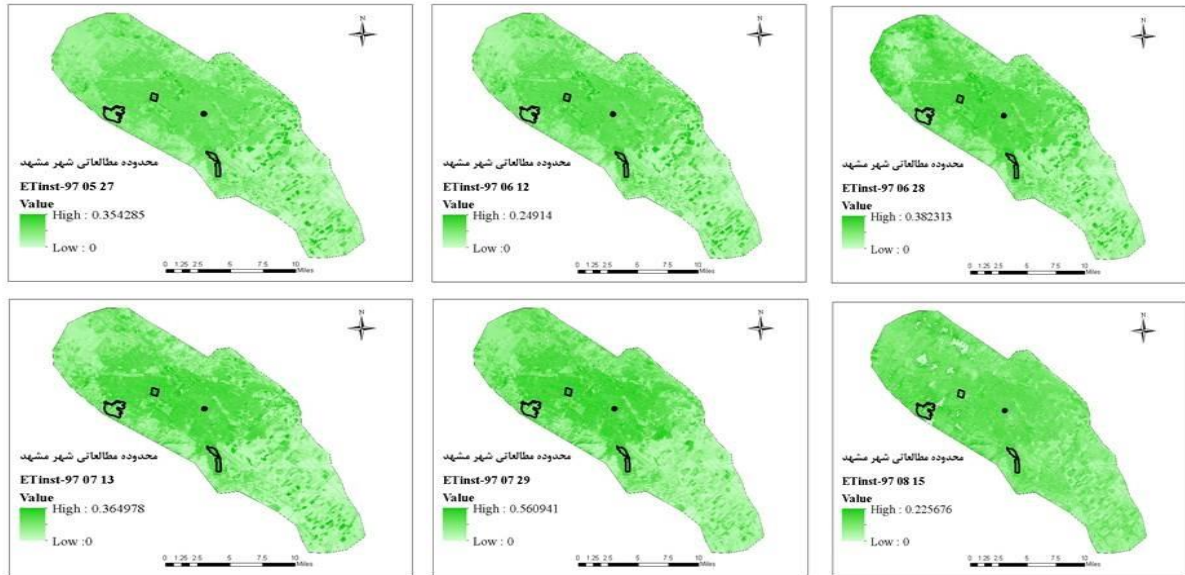
### پهنه بندی تبخیر- تعرق لحظه‌ای (ET<sub>inst</sub>)

همان‌گونه که قبلا بیان شد، میزان ET<sub>o</sub> جهت تمامی ایستگاه‌ها با استفاده از روش فائو- پنمن- مانیت محاسبه و سپس با تکیه بر روش محاسبه سپس درون‌یابی ("Calculate-then-Interpolate", "CI") و روش زمین آماری کریجینگ معمولی، نقشه پهنه بندی تبخیر- تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه و در روزهای دارای تصویر تهیه گردید. در این تحقیق مشخص شد که تفاوت نوع پوشش-کاربری زمین به‌طور تقریبی، حداکثر ۲۸ درصد

تفاوت در مقدار تبخیر- تعرق مرجع بین نقاط مختلف سطح شهر ایجاد می‌کند. سپس تبخیر- تعرق لحظه‌ای برای تصاویر ماهواره‌ای در تاریخ‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل سبال تهیه گردید. مقدار تبخیر- تعرق لحظه‌ای بین ۰/۰۳ (۱۳۹۵/۱۲/۱۸) تا ۰/۷۲ میلی متر (۱۳۹۵/۰۶/۲۳) متغیر است. همان‌طور که در شکل‌ها قابل مشاهده است (اشکال ۲ و ۳) هرچقدر به سمت ماه‌های گرم سال پیش می‌رویم، به دلیل افزایش دمای هوا میزان تبخیر- تعرق نیز بیشتر می‌گردد. همچنین به دلیل وجود پارک‌های مورد مطالعه در داخل شهر و وجود جزایر حرارتی در نقاط مختلف شهر و خصوصا در نقاط پررفت و آمد، میزان تبخیر- تعرق نیز تحت تأثیر قرار گرفته و نیاز آبی در پارک‌های داخل شهر (پارک ملت و پارک‌های جنگلی و طرق) نسبت به پارک‌های حاشیه شهر (پارک خورشید) بیشتر می‌باشد. نتایج نشان داد که نواحی دارای شاخص پوشش گیاهی بالا و دمای پایین (پارک‌ها و فضاهای سبز شهری و اراضی کشاورزی در قسمت جنوب شرقی محدوده مطالعاتی) نسبت به سایر نواحی که دارای شاخص پوشش گیاهی پایین و دمای بالا (قسمت‌های مرکزی منطقه) هستند از میزان تبخیر- تعرق بیشتری برخوردارند.



شکل (۲): تبخیر - تعرق لحظه‌ای (ETinst) محاسبه شده برای تصاویر اردیبهشت تا اسفندماه سال ۱۳۹۵ محدوده مورد مطالعه



شکل (۳): تبخیر - تعرق لحظه‌ای (ETinst) محاسبه شده برای تصاویر مرداد تا آبان ماه سال ۱۳۹۷ محدوده مورد مطالعه

Y: تبخیر - تعرق پتانسیل (در اینجا ضریب میکروکلیم)

$$X: \text{نسبت } \frac{\Delta Ta}{Ta}$$

$\Delta Ta$ : تغییرات دمای هوا نسبت به پیکسل شاهد

$Ta$ : دمای هوا در پیکسل شاهد

پیکسل شاهد: پیکسلی که در داخل و اطراف آن هیچگونه خرداقلیمی وجود ندارد.

در رابطه فصل بهار، افزایش ۲۲ درصدی دمای هوا سبب افزایش ۱۰ درصدی ضریب میکروکلیم شده و با کاهش ۳۰ درصدی دمای هوا، ضریب ۱۵ درصد کمتر از یک خواهد شد. بر اساس نتایج به دست آمده در فصل تابستان، جهت میکروکلیم‌های کمتر از یک، رابطه خطی دارای همبستگی بیشتری است. در این رابطه افزایش ۲۱ درصد در دمای هوا، سبب افزایش ۱۰ درصدی ضریب خرداقلیم شده و با کاهش ۳۰ درصدی دمای هوا، ضریب ۱۵ درصد کمتر از یک خواهد شد. اما جهت میکروکلیم‌های بیشتر از یک، رابطه درجه ۲ دارای همبستگی بیشتری است. در این رابطه افزایش ۱۷ درصد در دمای هوا، افزایش ۱۰ درصدی ضریب را به دنبال داشته و افزایش ۲۷ درصد در دمای هوا سبب افزایش ۲۰ درصدی ضریب، معادل ۱/۲ می‌گردد. در رابطه ارائه شده برای فصل پاییز، افزایش ۲۱ درصد در دمای هوا، افزایش ۱۰ درصدی ضریب و با افزایش ۴۲ درصدی دمای

رابطه ضریب خرداقلیم ( $K_{mc}$ )

در این بخش با توجه به توضیحات قبل، ضریب میکروکلیم در فصول مختلف سال ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات تبخیر - تعرق گیاه مرجع به عنوان معیار تغییرات ضریب میکروکلیم (با شرایط توضیح داده شده) در مقابل تغییرات دمای هوا رسم گردید و بهترین رابطه با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف برازش داده شد (شکل ۴). مقادیر ضریب تعیین بین ۰/۵۷ تا ۰/۹۲ در فصول مختلف در تغییر است.

$$K_{mc} = -0.2709X^2 + 0.4649X + 0.0118 + 1 \quad (10\text{-شکل الف})$$

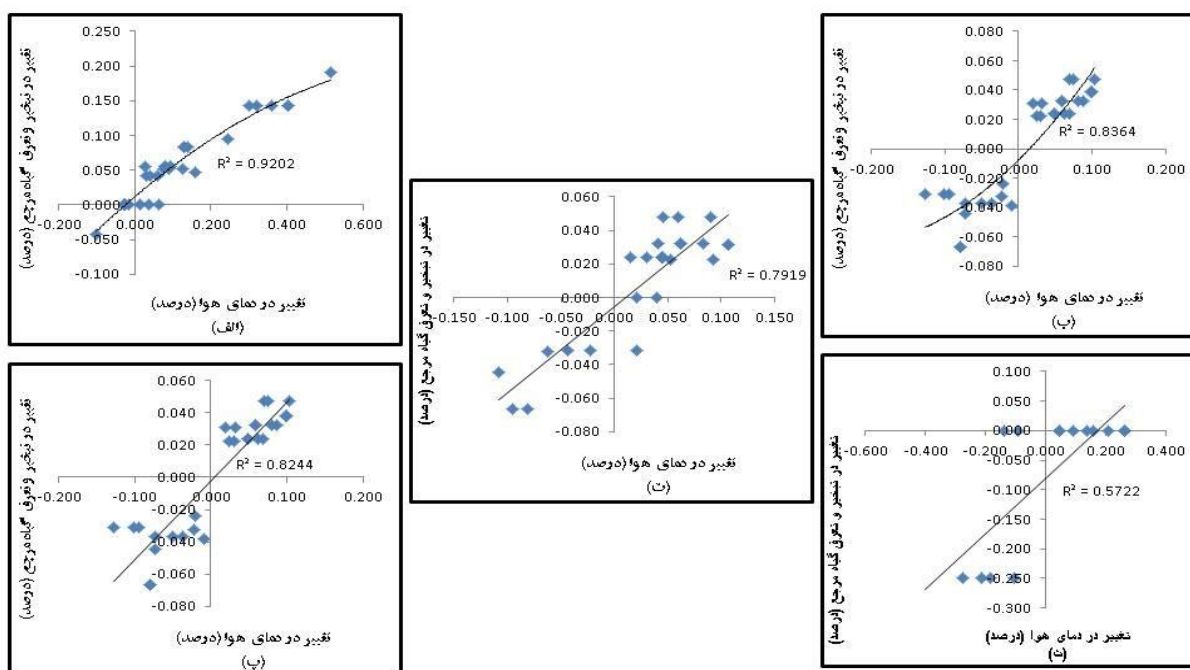
$$K_{mc} = 0.487x - 0.0024 + 1 \quad (11\text{-شکل ب})$$

$$K_{mc} = 1.0536x^2 + 0.4955x - 0.0077 + 1 \quad (12\text{-شکل پ})$$

$$K_{mc} = 0.5112x - 0.0057 + 1 \quad (13\text{-شکل ت})$$

$$K_{mc} = 0.4654x - 0.0814 + 1 \quad (14\text{-شکل ث})$$

هوا، ضریب ۲۰ درصد بیشتر از یک خواهد شد و با کاهش ۲۸ درصد در دمای هوا، ضریب ۱۵ درصد کمتر از یک خواهد شد.



شکل (۴): تغییرات تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقابل تغییرات دمای هوا در (الف) فصل بهار، (ب) فصل تابستان و در میکروکلیمای بالای یک، (پ) فصل تابستان و در میکروکلیمای کمتر از یک، (ت) فصل پاییز و (ث) فصل زمستان (سال ۱۳۹۵)

افزایش دمای هوا در فصول مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد.

#### رابطه ضریب تراکم (Kd)

با توجه به راهنمای کالیفرنیا در خصوص در نظر گرفتن مقدار عددی برای ضریب تراکم فضای سبز شهری و با عنایت به وضعیت موجود فضای سبز در پارکهای مورد مطالعه و تنوع گونه‌های موجود، ارتباط بین ضریب تراکم با شاخص NDVI به صورت زیر برقرار گردید. طبق راهنمای کالیفرنیا، درختان با سطح سایه انداز ۷۰ تا ۱۰۰ درصد یک پوشش گیاهی کامل ایجاد کرده و بایستی فاکتور تراکم متوسط را برای آن ایجاد کرد، و در درختان با سطح سایه انداز کمتر از ۷۰ درصد، تراکم کم در نظر گرفته می‌شود. همچنین زمانی که برای هر یک از انواع پوشش‌های گیاهی سطح سایه‌انداز کامل باشد، با افزایش در تعداد پوشش‌های گیاهی، تراکم نیز افزایش می‌یابد. این ترکیب انواع پوشش‌های گیاهی، یک لایه بندی یا رده بندی پوشش گیاهی را ایجاد می‌کند که بیانگر افزایش پتانسیل تلفات آب می‌باشد.

در رابطه زمستانه افزایش ۴۰ درصد در دمای هوا، افزایش ۱۰ درصدی ضریب و افزایش ۶۰ درصدی دمای هوا، سبب افزایش ضریب به میزان ۲۰ درصد بیشتر از یک و با کاهش ۲۵ درصدی، ضریب ۲۰ درصد کمتر از یک خواهد شد. در همین راستا بر اساس نتایج دین پژوه و شریفی (۱۳۹۲) و تفضلی و همکاران (۱۳۸۷)، با افزایش ۲۰ درصد در متوسط دمای هوا در مقیاس سالانه، مقدار  $ET_0$  با استفاده از رابطه فائو پنمن مانیتث ۵۶ حدود ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت که با نتایج این تحقیق در فصول تابستان و بهار و پاییز مطابقت دارد. اما در فصل زمستان ضریب خرداقلیم به تغییرات دمای هوا حساسیت کمتری دارد. روابط نشان داد که در فصول سرد حساسیت ضریب خرداقلیم نسبت به کاهش دمای هوا نسبت به فصول گرم بیشتر است و با کاهش دمای هوا، افزایش چشمگیرتری در کاهش ضریب خرداقلیم نسبت به فصول گرم حاصل خواهد شد. یکی از دلایلی که سبب شد برای هر فصل رابطه جداگانه‌ای برازش داده شود، این است که تغییرات ضریب میکروکلیمای

$$K_d = 0.9941 * NDVI + 0.5058 \quad (15)$$

### صحت سنجی مدل

با توجه به این که در سطح پارک‌های مورد مطالعه وسیله اندازه‌گیری تبخیر- تعرق وجود نداشت، در این مطالعه جهت ارزیابی، نتایج روابط استخراج شده با مقادیر نیاز آبی به‌دست آمده از پایش رطوبت در سه پلان مختلف در پارک غدیر مقایسه گردید (جدول ۴). مقدار نیاز خالص آبی در نقاط مشخص شده و از طریق رابطه ۱۲ به دست آمد و مقادیر آن‌ها با مقدار نیاز آبی به دست آمده از روابط ۲۶-۲۲ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. جهت به‌دست آوردن نیاز خالص آبی نقاط برداشت شده، روزهای آبیاری هر پلان از شهرداری منطقه اخذ گردید تا بتوان نیاز آبی در روز مورد مطالعه (روز دارای تصویر) را به‌دست آورد. همچنین اینکه مقدار ضریب گونه از لیست ارائه شده توسط روش WUCOLS با توجه به نوع درختان موجود در هر پلان در نظر گرفته شد.

زمانی که هر سه نوع پوشش گیاهی در یک کشت به مقدار قابل توجهی وجود دارد، شرایط تراکم بالا ( $K_d=1/3$ ) رخ می‌دهد. در برقرار کردن این ارتباط، فرضیات زیر با توجه به توضیحات بالا در نظر گرفته شد.

$0.75 < NDVI < 0.85$	, $K_d = 1.3$
$0.65 < NDVI \leq 0.75$	, $K_d = 1.2$
$0.55 < NDVI \leq 0.65$	, $K_d = 1.1$
$0.45 < NDVI \leq 0.55$	, $K_d = 1.0$
$0.35 < NDVI \leq 0.45$	, $K_d = 0.9$
$0.25 < NDVI \leq 0.35$	, $K_d = 0.8$
$0.15 < NDVI \leq 0.25$	, $K_d = 0.7$
$0.05 < NDVI \leq 0.15$	, $K_d = 0.6$
$NDVI \leq 0.05$	, $K_d = 0.5$

با در نظر گرفتن پیکسل‌های مختلف در پارک‌های مورد مطالعه و تصاویر تهیه شده و نظرات کارشناسی و خبره، برای تصاویر مختلف و پیکسل‌های مختلف مقادیر ضریب تراکم تعیین گردید و با توجه به مقدار NDVI به دست آمده برای همان پیکسل‌ها، رابطه زیر برقرار گردید. مقدار بالای ضریب  $R^2 (0.98)$  نشان از همبستگی بالا بین ضریب تراکم با شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی دارد.

جدول شماره ۴- مقایسه تبخیر- تعرق روزانه فضای سبز در پارک غدیر با استفاده از پایش رطوبت و مقادیر به دست آمده از روابط

تاریخ	پلان	پایش رطوبت (میلی متر بر روز)	روابط به دست آمده (میلی متر بر روز)	تفاضل مطلق (میلی متر بر روز)	تفاضل نسبی (درصد)	میانگین تفاضل مطلق (میلی متر بر روز)
۹۷/۰۵/۲۷	پلان یک	۵/۱۶	۴/۹۹	۰/۱۷	۳/۳۶	۰/۴۶
	پلان دو	۶/۰۳	۵/۴۵	۰/۵۸	۹/۵۹	
	پلان سه	۶/۱۸	۵/۲۵	۰/۹۳	۱۴/۹۹	
۹۷/۰۶/۱۲	پلان یک	۴/۸۷	۴/۹	-۰/۰۳	-۰/۵۳	
	پلان دو	۵/۴۲	۴/۴۸	۰/۹۳	۱۷/۲۴	
	پلان سه	۶/۵۷	۵/۹۸	۰/۵۹	۸/۹۷	
۹۷/۰۶/۲۸	پلان یک	۳/۵۵	۲/۸۸	۰/۶۶	۱۸/۷۵	
	پلان دو	۳/۰۷	۲/۶۱	۰/۴۶	۱۴/۹۴	
	پلان سه	۳/۰۳	۲/۶۱	۰/۴۲	۱۳/۷۶	
۹۷/۰۷/۱۳	پلان یک	۳/۳۳	۲/۸۳	۰/۵	۱۵/۰۴	
	پلان دو	۳/۳۶	۲/۵۶	۰/۸	۲۳/۷۲	
	پلان سه	۳/۱۷	۲/۷۸	۰/۳۹	۱۲/۳۲	
۹۷/۰۷/۲۹	پلان یک	۲/۸	۲/۴	۰/۴	۱۴/۲۴	
	پلان دو	۲/۷۵	۲/۳۸	۰/۳۷	۱۳/۵۳	
	پلان سه	۲/۶۲	۲/۴	۰/۲۲	۸/۵۱	
۹۷/۰۸/۱۵	پلان یک	۱/۳	۱/۱۳	۰/۱۷	۱۲/۸۴	

۲۱/۹۴	۰/۳۲	۱/۱۴	۱/۴۶	پلان دو
۲۱/۰۴	۰/۳۲	۱/۲۱	۱/۵۳	پلان سه

جدول شماره ۵- نتایج آماره‌های ریاضی بین تبخیر- تعرق به دست آمده از روابط و نیاز آبی حاصل از پایش رطوبت

The Mean Absolute Deviation	MAD	0.459
Mean Square Error	MSE	0.272
The Root Mean Square Error	RMSE	0.521
Mean Absolute Percentage Error	MAPE	16.3
Mean Bias Error	MBE	-0.456
The Mean Absolute Error	MAE	0.459
Coefficient of Determination	R <sup>2</sup>	0.970

کاربرد تری را به ویژه برای مدل‌های هیدرولوژیک در اختیار می‌گذارد، زیرا پارکها و فضاهای سبز شهری را به خوبی متمایز می‌کند. مقایسه بین مقادیر تخمینی تبخیر-

تعرق از روابط به دست آمده و مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از پایش رطوبت وزنی در پارک غدیر دقت رضایت بخشی (حداکثر تفاوت کمتر از ۲۴ درصد) را نشان داد. این همبستگی خوب نشان داد که می‌توان با تکیه بر این روابط و با استفاده از پارامترهای زودیافت، ضرایب فضای سبز را برای هر قطعه از فضای سبز محاسبه نمود و در برنامه ریزی آبیاری فضاهای سبز و طرح‌های منابع آب شهری از آن‌ها استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که پارامتر پوشش گیاهی همسو و پارامتر دمای هوا در جهت مخالف با تبخیر- تعرق تغییر می‌کند. به طوری که در پارک‌های با پوشش گیاهی خوب و متراکم و دمای هوای کم، تبخیر- تعرق بیشتر از پارک‌های دیگر است. نتایج این پژوهش نشان داد که هرچه تاریخ تصویر و انجام محاسبات تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال به روز آبیاری محدود شده مورد نظر نزدیک تر باشد، خطای کمتری در محاسبات ایجاد می‌گردد و هرچه این فاصله بیشتر باشد، به دلیل عدم وجود آب کافی در منطقه توسعه ریشه گیاه، نتایج تبخیر- تعرق برآورد شده با استفاده از الگوریتم سبال دارای خطای بیشتری می‌باشد. بنابراین به صورت کلی به

با توجه به جدول شماره ۴ مشاهده می‌گردد که تفاوت بین مقادیر محاسبه شده با روابط به دست آمده و اندازه‌گیری شده توسط پایش رطوبت کمتر از ۰/۹۳ میلی‌متر در روز بوده و بیشترین تفاوت مربوط به روز ۹۷/۰۷/۱۳ و در پلان دو با ۲۳/۷۲ درصد می‌باشد. نتایج فوق نشان داد که هرچه فاصله بین آبیاری پلان موردنظر با تاریخ تصویر نزدیکتر باشد، خطای کمتری در محاسبات وجود دارد (پلان یک تاریخ‌های ۲۷ مرداد و ۱۵ مردادماه) و هرچه این فاصله بیشتر باشد، خطای بیشتری حاصل می‌گردد (پلان دو تاریخ ۱۳ مهر و ۱۲ شهریور) که دلیل آن در دسترس نبودن آب به میزان کافی در منطقه توسعه ریشه می‌باشد که سبب کاهش تبخیر- تعرق می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده در تاریخ پایش رطوبت (۱۲ شهریورماه) با توجه به کاهش نیاز آبی (آبیاری به تازگی صورت گرفته بود) پارامتر تفاضل مطلق منفی شده است. میانگین تفاضل مطلق بین نتایج به دست آمده از روابط و نیز پایش رطوبت برابر ۰/۴۶ میلی‌متر بر روز می‌باشد که بیانگر اینست بین مقادیر محاسبه شده از روابط و مقادیر پایش رطوبت تطابق خوبی وجود دارد. همان‌طور که نتایج آماره MBE نشان می‌دهد، روابط استخراج شده در تخمین تبخیر- تعرق فضای سبز کم برآورد بوده است (جدول ۵).

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده، تصاویر ماهواره لندست ۷ به دلیل قدرت تفکیک مکانی زیاد، برآورد دقیق تر و

دلیل کم آبیاری شدید در فضا‌های سبز درون شهری (به استثنای فضا‌های دارای گیاه پوششی چمن) و خصوصاً در پارک‌های جنگلی، استفاده از مدل سبال جهت محاسبه تبخیر- تعرق مناسب نبوده و دارای خطای زیادی می‌باشد. بنابراین به جای استفاده از مدل سبال می‌توان از روابط

استخراج شده برای تعیین ضرایب گیاهی و نیاز آبی فضا‌های سبز شهری به خصوص در شهرهایی با اقلیم مشابه مشاهد که دارای سطح فضای سبز زیاد و منابع آبی کم می‌باشد، استفاده نمود.

## منابع

۱. پورمحمد، ی.، موسوی بایگی، س.م.، علیزاده، ا.، ضیایی، ع.ن.، بنایان اول، م. ۱۳۹۵. برآورد بهره وری آب محصولات عمده دشت نیشابور و بهینه سازی سطح زیر کشت محصولات. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۳۱، شماره یک، ص ۱۲۶-۱۱۲.
۲. جهانبخش اصل، س.، لطفی قرانچای، ش.، عابدی قشلاقی، ح.، بهادری، ح. ۱۳۹۵. کاربرد شاخص NDVI در برآورد تأثیر عناصر دما و بارش بر پوشش‌های گیاهی (مطالعه موردی: شهرستان ورزقان). دومین کنگره بین المللی علوم زمین و توسعه شهری.
۳. دین پژوه، ی.، شریفی، ع. ۱۳۹۲. حساسیت تبخیر- تعرق گیاه مرجع به تغییر در پارامترهای هواشناسی (مطالعه موردی: سنندج و سبزوار). نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۳، شماره ۳ ص: ۴۲-۲۵.
۴. سبزی پرور، ع.ا.، تفضلی، ف.، زارع آبیانه، ح.، بانژاد، ح.، غفوری، م.، موسوی بایگی، م.، مریانجی، ز. ۱۳۸۷. ارزیابی حساسیت مدل‌های مختلف تبخیر- تعرق مرجع (ETO) به سیگنال‌های تغییر اقلیم در اقلیم سرد نیمه خشک همدان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال دوازدهم. شماره ۴۶. ۵۹۲-۵۸۱.
۵. فرج زاده، م.، فتح نیا، ا.، علیجانی، ب.، ضیائیان، پ. ۱۳۹۰. ارزیابی تأثیر عوامل اقلیمی بر رشد پوشش گیاهی در مراتع متراکم ایران با استفاده از تصاویر AVHRR. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۷۵.
۶. گروه کار کمیته ملی، ۱۳۸۷. تبخیر و تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان). نشر کمیته ملی آبیاری و زهکشی، ۲۵۱ صفحه.
۷. مختاری، ا.، فیض نیا، س.، احمدی، ح.، خواجه الدین، س.ج.، رهنما، ف.ا. ۱۳۷۹. کاربرد سنجش از دور در تهیه لایه های اطلاعاتی کاربری اراضی و پوشش سطح زمین در مدل فرسایش خاک MPSIAC. مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۴۶. ص: ۸۷-۸۲.
۸. یزدانی، و.، ابراهیمی، ح. ۱۳۹۲. مقایسه برآورد ضریب گیاهی فضای سبز به کمک روش سبال و روش لیمپ (مطالعه موردی مشهد). علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۷، شماره ۴، زمستان ۹۳.
۹. یزدان پناه، ن.، قیصری، م. ۱۳۹۶. کاربرد و توسعه مدل لیمپ برای برنامه ریزی آبیاری فضای سبز شهری (مطالعه موردی: شهرستان اصفهان). پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی.

10. Bastiaanssen, W.G.M. Menentia M. Feddesb R.A. and Holtslagc A.A.M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), Journal of Hydrology 212-213 (1998) 198-212.
11. Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., and Waters, R. 2002. SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and Users Manual Version 1.0. 98 pp.
12. Costello L. R. Matheny N.P. and Clark J.R. 2000. A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California The Landscape Coefficient Method And WUCOLS III. University of California Cooperative Extension and California Department of Water Resources.
13. Goyal.R.K, 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). Agricultural Water Management 69: 1-11.

14. Ley, T.W., R.W. Hill and D.T. Jensen. 1994. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses Trans. ASCE 37(6): 1853-1861.
15. Nouri ,H., Beecham, s., Kazemi, F., Hassanli, A.M., & Anderson, s. 2013. Remote sensing techniques for predicting evapotranspiration from mixed vegetated surfaces. Hydrology and Earth System Sciences.10.3897-3925.
16. Nouri ,H., Beecham, s., Hassanli, A.M., & Kazemi, F., 2013. Water requirements of urban landscape plants: A comparison of three factor-based approaches. Ecological Engineering. 57 . 276– 284.
17. Nouri ,H., Beecham, s., Anderson, s., & Nagler, P. 2014. High Spatial Resolution WorldView-2 Imagery for Mapping NDVI and Its Relationship to Temporal Urban Landscape Evapotranspiration Factors. remote sensing. 6. 580-602.
18. Pettorelli, N., J.O., Vik. A., Mysterud, J.M., Gaillard, C.J. Tucker. and N.C. Stenseth, 2005. Using the satellite – derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. J.Trends in ecology and evolution. Vol.20 No.9.
19. Piper, B. S. 1989. Sensitivity of Penman estimates of evapotranspiration to errors in input data. Agric. Water Manag. 15(3): 279-300.
20. Zhang X, Kang S, Zhang L and Lu J, 2010. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. Agriculture Water Management. 97: 1506- 1516.

## **Estimation of Urban LandSpace Vegetation Coefficients Using SEBAL Algorithm and Landsat Images (Case Study: Mashhad)**

### **Abstract**

Accurate estimation of evapotranspiration in urban landscape, for better management and better planning of water resources, especially in areas with a water crisis, it is very important. For estimating evapotranspiration of landscape, in addition to vegetation coefficient, coefficients related to microclimate, plant density adjustment and specific plant species adjustment must also be calculated. In this study, using Landsat 7 satellite images and Mashhad Synoptic Station data, the actual evapotranspiration of landscape was calculated then, using climatic and environmental parameters obtained from satellite images and Seabl model, a relationship between microclimate coefficient and air temperature as well as relationship between density coefficient and normalized difference index of vegetation was established. Finally, the obtained relationships were evaluated by field monitoring of soil moisture in Ghadir Park of Mashhad. By determining the locations of field locations on the satellite image, the pixels of NDVI index were extracted and the relationship between these degrees of brightness and the landscape density coefficient was investigated. The results showed that the best model presented using linear regression as  $Kd = 0.9941 * NDVI + 0.5058$  with a correlation coefficient of 0.98 that the maximum percentage of error between calculated evapotranspiration for landscape using extracted relationships and measured values from moisture weight monitoring is less than 24%. due to severe water deficit in the forest landscape and insufficient water availability of the plant, evapotranspiration calculation using the Sabal model is inappropriate and has many errors. Therefore, instead of using the Sebal model, the extracted relationships can be used to determine the vegetation coefficients and the water requirement of urban landscape.

**Keywords: Remote Sensing, Vegetation index, the coefficient of microclimate, landscape density.**

---

<sup>1</sup> PhD student, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.  
Tell:091591291346. Email: l\_misaghi@yahoo.com

<sup>2</sup> Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Corresponding Author: \* Email: Ansariran@yahoo.com

<sup>3</sup> Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad