بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
دانشکده مهندسی زراعی
گروه مهندسی آب

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته آبیاری و زهکشی

برآورد تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS
مطالعه موردی: دشت ناز- ساری

استاد راهنما :
دکتر محمدعلی غلامی سفیدکوهی

استادان مشاور :
دکتر محمود رائینی سرجاز
مهندس سمیرا نوری

دانشجو :
سعید رحیمی

بهمن ۱۳۹۱

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
دانشکده مهندسی زراعی
گروه مهندسی آب

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته آبیاری و زهکشی

برآورد تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS
مطالعه موردی: دشت ناز- ساری

استاد راهنما :
دکتر محمدعلی غلامی سفیدکوهی

استادان مشاور :
دکتر محمود رائینی سرجاز
مهندس سمیرا نوری

استادان داور :
دکتر میرخالق ضیاءتبار احمدی
دکتر علی شاهنظری

دانشجو :
سعید رحیمی

بهمن ۱۳۹۱

سپاسگزاری

در هیچ کتابی اولین و آخرین حرف گفته نشده است. همواره قبل از نخستین گفتار و بعد از کلام پایانی، هزاران حرف ناتمام در ذهن مؤلف باقی می ماند که شتابشان نکرده و حتی آن ها را به شمار نمی توان آورد.

در آغاز سخن بر خود فرض می دانم از استاد دانشمند جناب آقای دکتر غلامی که بر من منت نهاده زحمت راهنمایی رساله را پذیرا شدند و تمامی رساله را با صبر و حوصله وصف-ناپذیر مطالعه کرده، با ارشادات عالمانه خود مرا از افتادن در بیراهه های خطا و اشتباه مصون داشتند سپاسگزاری نمایم.

از استادان فرزانه جناب آقای دکتر رائینی و سرکار خانم مهندس نوری که با پذیرفتن مشاوره رساله، مرا بر سفره پربرکت دانش خود نشاندند و در گیرودار کار پژوهش همگام و همراه سختی ها و مشکلات من بوده اند تشکر می نمایم.

از استادان بزرگوار، جناب آقای دکتر ضیاء تبار احمدی و جناب آقای دکتر شاهنظری که در محضر علم و ادب ایشان متعلم بوده ام تشکر می نمایم.

قطع این مرحله بی همری خضر مکن

ظلمات است بترس از خطر گمراهی

از آقای مهندس سعیدی که در تهیه داده های مورد نیاز کمک شایانی نمودند تشکر می کنم. همچنین از آقای مهندس کیوانلو برای یاری های صادقانه شان کمال سپاسگزاری را دارم.

در این جا لازم می دانم از مسئولین محترم سازمان فضایی ایران به خاطر در اختیار گذاشتن تصاویر ماهواره ای مودیس قدردانی نمایم.

آرزومندم با تقدیم این ناچیز به پیشگاه پدر صبور و مادر مهربانم که دریچه معرفت و دانش را به رویم گشودند ذره ای از بی نهایت محبت ایشان را شکرگزار بوده باشم.

چکیده

تبخیر- تعرق را می‌توان پس از بارندگی به عنوان یکی از مؤثرترین مؤلفه‌ها برای تعیین بیلان آبی منطقه دانست. داشتن برآورد دقیق از شار تبخیر- تعرق برای برنامه‌ریزی کشاورزی و مدیریت منابع آبی امری ضروری است. مدل‌های مختلفی برای برآورد تبخیر- تعرق ارائه شده است. با توجه به تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای هواشناسی موثر در فرآیند تبخیر- تعرق، نتایج بدست آمده از این مدل‌ها تنها برای سطوح اطراف ایستگاه هواشناسی کاربرد عملی دارند. از دیگر راه‌های برآورد میزان تبخیر- تعرق استفاده از روش‌های توازن انرژی است که پارامترهای آن به وسیله تکنیک سنجش از دور دست یافتنی است. الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های برآورد تبخیر- تعرق به وسیله تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. این مدل از طریق برآورد تمامی مؤلفه‌های انرژی در سطح زمین همچون شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس اقدام به برآورد تبخیر- تعرق می‌نماید. هدف از این پژوهش بررسی دقت برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاهان توسط الگوریتم سبال در مقایسه با مقادیر محاسبه شده توسط روش فائو- پنمن- مانتیث در حوضه رودخانه تجن و محدوده شرکت زراعی دشت ناز ساری بود. در این پژوهش از هفت تصویر سنجنده مودیس مستقر بر ماهواره ترا در بازه زمانی بهمن ۱۳۸۹ تا مرداد ۱۳۹۰ استفاده شد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد در برآورد تبخیر- تعرق ساعتی و روزانه، تفاوت معنی داری میان روش سبال و روش فائو- پنمن- مانتیث وجود ندارد (P-Value > ۰/۰۵). همچنین می‌توان تبخیر- تعرق ساعتی را برای منطقه مورد مطالعه با ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE= ۰/۰۹۱) میلیمتر و تبخیر- تعرق روزانه را با ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE= ۱/۴۹) میلیمتر نسبت به روش شاهد برآورد نمود.

کلمات کلیدی: تبخیر- تعرق، دشت ناز، سبال، مودیس

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه و کلیات ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ فرضیات پژوهش ۴

۱-۳ اهداف پژوهش ۴

۱-۴ تبخیر و تعرق ۵

۱-۵ روش‌های اندازه‌گیری تبخیر- تعرق ۵

۱-۵-۱ روش‌های مستقیم ۶

۱-۵-۱-۱ روش لایسیمتری ۶

۱-۵-۱-۲ روش‌های بیلان هیدرولوژیکی ۷

۱-۵-۲ روش‌های غیرمستقیم ۷

۱-۵-۲-۱ روش‌های آیرودینامیک ۸

۱-۵-۲-۲ روش‌های توازن انرژی ۸

۱-۵-۲-۳ روش‌های ترکیبی ۸

۱-۵-۲-۴ روش‌های تجربی ۹

۱-۵-۳ روش‌های نوین ۹

۱-۵-۳-۱ روش شبکه‌های عصبی مصنوعی ۹

۱-۵-۳-۱ روش زمین‌آمار ۱۰

۱-۶ اصول سنجش از دور ۱۱

۱-۶-۱ نور و طیف الکترومغناطیس ۱۲

۱-۶-۲ ویژگی‌های طیفی آب- خاک و گیاه ۱۲

۱-۶-۳ سکوها و سنجنده‌ها ۱۵

۱-۷ روش‌های برآورد تبخیر- تعرق با داده‌های سنجش از دور ۱۸

۱-۷-۱ روش‌های مستقیم تجربی ۱۸

۱-۷-۲ روش‌های مبتنی بر شاخص‌های گیاهی (VIs) ۱۸
۱-۷-۳ روش‌های قطعی ۱۹
۱-۷-۴ روش‌های مبتنی بر توازن انرژی سطح ۱۹
فصل دوم- مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۲۲
فصل سوم- مواد و روش‌ها ۳۱
۳-۱ منطقه مورد مطالعه و داده‌های زمینی مورد استفاده ۳۱
۳-۲ تصاویر ماهواره‌ای ۳۲
۳-۲-۱ مشخصات عمومی ماهواره و سنجنده مورد استفاده ۳۲
۳-۲-۲ تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده ۳۵
۳-۳ الگوریتم توازن انرژی سطح برای خشکی (سبال) ۳۶
۳-۳-۱ شار تابش خالص سطحی (Rn) ۳۷
۳-۳-۱-۱ آلبیدوی سطحی ۳۷
۳-۳-۱-۲ تابش موج کوتاه ورودی ($R_{S\downarrow}$) ۳۹
۳-۳-۱-۳ تابش موج بلند خروجی ($R_{L\uparrow}$) ۴۱
۳-۳-۱-۴ برآورد دمای سطح زمین (LST) ۴۳
۳-۳-۱-۵ انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم ۴۴
۳-۳-۱-۶ تابش موج بلند ورودی ($R_{L\downarrow}$) ۴۶
۳-۳-۱-۷ تابش خالص (Rn) ۴۶
۳-۳-۲ شار گرمای خاک (G) ۴۷
۳-۳-۳ شار گرمای محسوس (H) ۴۷
۳-۳-۴ شار گرمای نهان و تبخیر- تعرق لحظه‌ای ۵۴
۳-۳-۵ کسر تبخیر- تعرق مرجع (ETrF) ۵۵
۳-۳-۶ تبخیر- تعرق ۲۴ ساعته ۵۶
۳-۴ نرم‌افزارهای مورد استفاده ۵۶
فصل چهارم- یافته‌ها و بحث ۵۹
۴-۱ برآورد مقادیر آلبیدوی سطحی (α) ۵۹

۴-۲ برآورد دمای سطح زمین (LST) ۶۲
۴-۳ برآورد مقادیر شار تابش خالص سطحی (Rn) ۶۵
۴-۴ برآورد مقادیر شار گرمای خاک (G) ۶۷
۴-۵ برآورد مقادیر شار گرمای محسوس (H) ۶۹
۴-۶ برآورد مقادیر تبخیر- تعرق واقعی ۶۹
۴-۷ نتیجه‌گیری ۷۶
۴-۸ پیشنهادات ۷۸
منابع ۸۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

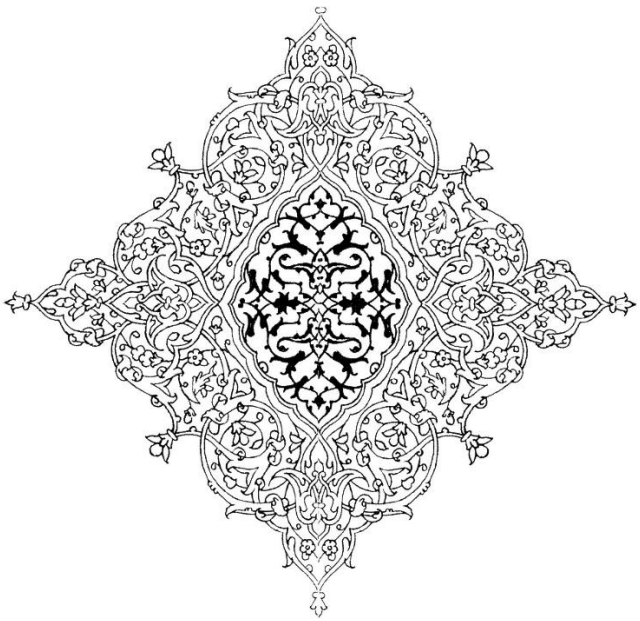
شکل ۳-۱ موقعت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ۳۲
شکل ۳-۲ روند محاسبه شار گرمای محسوس ۵۴
شکل ۳-۳ مراحل انجام پژوهش ۵۷
شکل ۴-۱ مقادیر آلبیدو برآورد شده برای تصویر روز ۱۳۸۹/۱۱/۰۴ ..... ۶۱
شکل ۴-۲ مقادیر آلبیدو برآورد شده برای تصویر روز ۱۳۹۰/۰۴/۲۸ ..... ۶۲
شکل ۴-۳ برآورد دمای سطح زمین تصویر روز ۱۳۸۹/۱۱/۰۴ ..... ۶۴
شکل ۴-۴ برآورد دمای سطح زمین تصویر روز ۱۳۹۰/۰۴/۲۸ ..... ۶۴
شکل ۴-۵ برآورد شار تابش خالص، تصویر روز ۱۳۸۹/۱۱/۰۴ ..... ۶۶
شکل ۴-۶ برآورد شار تابش خالص، تصویر روز ۱۳۹۰/۰۴/۲۸ ..... ۶۶
شکل ۴-۷ شار گرمای خاک، تصویر روز ۱۳۸۹/۱۱/۰۴ ..... ۶۸
شکل ۴-۸ شار گرمای خاک، تصویر روز ۱۳۹۰/۰۴/۲۸ ..... ۶۸
شکل ۴-۹ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۸۹/۱۱/۰۴ ..... ۷۳
شکل ۴-۱۰ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۹۰/۰۱/۲۱ ..... ۷۳
شکل ۴-۱۱ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۹۰/۰۲/۱۵ ..... ۷۴
شکل ۴-۱۲ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۹۰/۰۳/۲۷ ..... ۷۴
شکل ۴-۱۳ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۹۰/۰۴/۱۷ ..... ۷۵
شکل ۴-۱۴ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۹۰/۰۴/۲۸ ..... ۷۵
شکل ۴-۱۵ تبخیر- تعرق ساعتی سبال، ۱۳۹۰/۰۵/۰۹ ..... ۷۶

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ مشخصات برخی سنجنده‌های پرکاربرد ۱۷
جدول ۳-۱ مشخصات ماهواره ترا ۳۴
جدول ۳-۲ مشخصات باندهای انعکاسی سنجنده مودیس ۳۴
جدول ۳-۳ مشخصات باندهای حرارتی سنجنده مودیس ۳۵
جدول ۳-۴ مشخصات تصاویر مورد استفاده ۳۶
جدول ۴-۱ مقادیر آلبیدو پیشنهاد شده برای غلات و خاک ۶۰
جدول ۴-۲ مقادیر آلبیدو برآورد شده برای پیکسل‌های سرد و گرم ۶۰
جدول ۴-۳ مقادیر برآوردی دمای سطح زمین برای پیکسل‌های سرد و گرم ۶۳
جدول ۴-۴ مقادیر شار تابش خالص سطحی (W/m^2) برای پیکسل‌های سرد و گرم ۶۵
جدول ۴-۵ مقادیر شار گرمای خاک (W/m^2) برای پیکسل‌های سرد و گرم..... ۶۷
جدول ۴-۶ مقادیر شار گرمای محسوس (W/m^2) برای پیکسل‌های سرد و گرم ۶۹
جدول ۴-۷ مقایسه تبخیر- تعرق ساعتی بدست آمده از الگوریتم سبال و روش فائو- پنمن- مانتیث ۷۱
جدول ۴-۸ مقایسه تبخیر- تعرق روزانه بدست آمده از الگوریتم سبال و روش فائو- پنمن- مانتیث..... ۷۲

فصل اول: مقدمه و کلیات



فصل اول- مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

بیشتر مساحت ایران را مناطق خشک و نیمه خشک تشکیل می‌دهد و مسئله مدیریت منابع آب در این مناطق از مسائلی است که همیشه مورد توجه بوده است. از این رو نیاز است تا بتوان برآورد خوبی از مقدار آب موجود در سطح منطقه بدست آورده و راهکارهای مدیریتی مناسب را اعمال کرد (نوری و همکاران، ۱۳۸۹). تعیین میزان تبخیر- تعرق در پهنه های وسیع و با فاصله زمانی مناسب، ابزاری کارا در امر مدیریت بهینه منابع آب و مدیریت کشاورزی برای تعیین کشت بهینه برای مناطق مختلف می‌باشد.

به‌دلیل گستردگی عوامل مؤثر بر شدت و میزان تبخیر- تعرق، پژوهش و آزمایش‌های فراوانی به منظور تعیین میزان دقیق تبخیر- تعرق صورت گرفته است. به طور مثال از عمده پارامترهای مؤثر بر تبخیر- تعرق می‌توان به پارامترهای هواشناسی، عوامل گیاهی و مدیریت زراعی و محیطی اشاره کرد، که هرکدام متأثر از چندین فاکتور دیگر می‌باشد. به دلیل این پیچیدگی‌ها اندازه‌گیری تبخیر- تعرق ساده نبوده و برای تعیین آن، تجهیزات خاص و اندازه‌گیری دقیق عوامل فیزیکی یا موازنه آب خاک در لایسیمترها مورد نیاز است. این‌گونه روش‌ها اغلب پرهزینه بوده و نیازمند دقت است و تنها توسط پژوهشگران آموزش دیده و ورزیده به طور کامل قابل اجرا می‌باشد. بر این اساس و به دلیل دشواری

اندازه‌گیری دقیق در مزرعه، تبخیر- تعرق به طور معمول با استفاده از داده‌های هواشناسی برآورد می-شود. معادله‌های تجربی و نیمه تجربی بسیاری برای برآورد تبخیر- تعرق گیاهان یا تبخیر- تعرق سطح مرجع از روی داده‌های هواشناسی معرفی شده است. برخی روش‌ها، تنها تحت شرایط اقلیمی و زراعی خاص اعتبار دارند و توسعه آن به شرایط متفاوت امکان‌پذیر نیست (کمیته ملی آبیاری و زهکشی، ۱۳۸۷).

داده‌های مورد نیاز برای محاسبه تبخیر- تعرق تابع تغییرات مکانی و زمانی است. بیشتر مدل-های موجود برای محاسبه این مؤلفه، غیر مکانی بوده و غالباً با استفاده از داده‌های نقطه‌ای و مقادیر توصیه شده برای پارامترهایی مانند ضریب گیاهی K_C نسبت به برآورد تبخیر- تعرق اقدام می‌نمایند. به عنوان مثال دما، سرعت باد و شرایط کاربری زمین در یک فاصله طولی کم می‌توانند تغییرات عمده‌ای داشته باشند، که باعث تغییر در مقدار K_C و در نهایت ET_{Crop} گردد (غلامی و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین، اگرچه استفاده از مقادیر توصیه شده K_C راهنمای عملی مناسب و سریع برای برنامه‌ریزی آبیاری محسوب می‌گردد ولی باید توجه داشت که ممکن است به لحاظ تغییرات شدید مکانی و زمانی این پارامتر مقادیر قابل توجهی خطا در محاسبه میزان آب مورد نیاز گیاه ایجاد شود (Jagtap and Jones, 1989). بنابراین می‌توان گفت دقت روش‌های کلاسیک محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان برای استفاده در یک سطح وسیع ممکن است کافی نباشد و در نتیجه کاربرد کمتری دارند (Dominique Courault *et al.*, 2005).

از دیگر راه‌های برآورد میزان تبخیر- تعرق استفاده از روش‌های موازنه انرژی است که پارامترهای آن به وسیله فناوری سنجش از دور دست‌یافتنی است. سنجش از دور این قابلیت را دارد تا مقدار تبخیر- تعرق گیاه را تخمین زده و حتی توزیع مکانی آن را مورد بررسی قرار دهد، زیرا تنها روشی است که می‌تواند پارامترهایی همچون دمای سطحی، ضریب سپیدی و نمایه پوشش گیاهی (نمایه مساحت برگ) را به صورت منطبق یا سازگار با محیط فراهم کرده و همچنین از لحاظ اقتصادی

مقرون به صرفه باشد (علی‌اصغرزاده و ثنائی‌نژاد، ۱۳۸۵) . همچنین با توجه به متغیر بودن ضریب K_C در طول دوره رشد گیاه، با استفاده از سنجش از دور می‌توان در هر لحظه مقدار K_C مربوطه را برآورد و بدین وسیله برآورد دقیق‌تری از میزان تبخیر- تعرق گیاه در طول دوره رشد بدست آورد. به طور کلی می‌توان گفت نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی گیاهان که با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای تولید شده‌اند دارای دقت کافی و قابل اطمینان برای طراحی و مدیریت فعال در ارزیابی عملکرد پروژه‌های آبیاری هستند (Allen and Bastiaanssen, 2005).

۱-۲ فرضیات پژوهش

با استفاده از سنجش از دور، اندازه‌گیری ضریب گیاهی در مراحل رشد امکان‌پذیر است.

امکان تعیین تبخیر-تعرق گیاهان زراعی به کمک سنجش از دور با دقت قابل قبولی وجود دارد.

روش سنجش از دور نسبت به روش‌های کلاسیک در تعیین تبخیر-تعرق محصولات زراعی در سطوح وسیع برتری دارد.

۱-۳ اهداف پژوهش

تعیین ضریب K_C برای محصول مورد نظر در منطقه انتخاب شده و در طول فصل زراعی به کمک سنجش از دور.

تعیین میزان تبخیر-تعرق در منطقه مورد نظر به کمک سنجش از دور و تعیین میزان دقت آن در مقایسه با روش فائو- پنمن- مانتیث به عنوان مرجع.

۱-۴ تبخیر و تعرق

تبدیل مایع به بخار را تبخیر[۱] و تبخیر آب در درون بافت گیاه و انتقال بخار حاصل به اتمسفر را می‌نامند. در رابطه با کشت‌های آبی اولین سؤالی که برای پژوهشگران آبیاری مطرح می‌شود، نیاز آبی گیاه می‌باشد. در ابتدا کارشناسان امر آبیاری و زراعت پدیده‌ی "تبخیر" و "تعرق" را به طور جداگانه مورد بررسی قرار داده و سعی کردند از جمع این دو به جواب برسند. اما در اوایل قرن بیستم به این نتیجه رسیدند که تفکیک تعرق از تبخیر در مزرعه کاری اشتباه و از نظر علمی اصولی نیست. در دهه ۱۹۳۰ نظر پژوهشگران به پدیده جدیدی جلب شد که نه تعرق است و نه تبخیر بلکه تلفیقی از آن دو است که بستگی به انرژی خورشید دارد. بنابراین این پدیده را "Evapotranspiration" نامیدند. این اصطلاح در زبان فارسی به عنوان کلمه واحد " تبخیر- تعرق" به‌کار می‌رود. عوامل هواشناسی نظیر تابش، دما، رطوبت و سرعت باد، عوامل گیاهی مانند نوع گیاه، مرحله رشد، ارتفاع و ناهمواری پوشش گیاهی و بالاخره شرایط مدیریتی و محیطی نظیر شوری خاک، عناصر غذایی موجود در خاک، آفات و بیماری‌ها، تراکم گیاه، روش آبیاری و نظایر آن‌ها، عوامل مؤثر بر میزان تبخیر- تعرق می‌باشند (Allen *et al.*, 1998).

۱-۵ روش‌های اندازه‌گیری تبخیر- تعرق

در عمل برای تعیین میزان تبخیر- تعرق هر گیاهی، ابتدا تبخیر- تعرق مرجع برآورد می‌گردد و سپس با اعمال ضریب گیاهی مناسب (Kc)[۳]، تبخیر- تعرق واقعی گیاه (ETa)[۴] تعیین می‌شود.

۱ - Evaporation
۲ - Transpiration
۳ - Crop Coefficient
۴ - Actual Evapotranspiration

$$ETa = Kc \times ETr \quad (۱-۱)$$

تبخیر- تعرق مرجع (ETr)[۱]، طبق تعریف نشریه فائو ۵۶، شدت تبخیر- تعرق سطحی پوشیده از چمن به ارتفاع ۰/۱۲ متر است که مقاومت سطحی آن ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبیدو آن ۰/۲۳ بوده و سطح وسیعی را بدون کمبود آب در برگرفته و به طور کامل و یکنواخت زمین را پوشش داده باشد به گونه‌ای که تبخیر- تعرق بدون محدودیت در آن صورت گیرد (Allen *et al.*, 1998).

منظور از تعیین تبخیر- تعرق برآورد مقدار آبی است که باید به یک پوشش زراعی داده شود تا در طول دوره رویش صرف تبخیر و تعرق نموده، بدون آنکه با تنش آبی مواجه شود رشد خود را تکمیل کرده و حداکثر مقدار محصول را تولید نماید. از آنجایی که عوامل بسیار زیادی در تبخیر- تعرق دخالت دارند، بنابراین برآورد دقیق تبخیر- تعرق کاری بسیار مشکل است. روش‌هایی که برای تخمین تبخیر- تعرق به کار برده می‌شوند را می‌توان در سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد که عبارتند از: روش‌های مستقیم، روش‌های غیر مستقیم (محاسبه‌ای) و روش‌های نوین. هرچند هیچ‌کدام از این روش‌ها نمی‌توانند تبخیر- تعرق را به طور دقیق برآورد نمایند ولی برخی از آن‌ها در بعضی مناطق نتایجی را بدست می‌دهند که بیشتر با واقعیت مطابقت دارد. از نظر علمی روشی مطلوب است که آسان بوده و نتایج حاصل از آن واقعی‌تر باشد (علیزاده، ۱۳۸۷).

۱-۵-۱ روش‌های مستقیم

در روش‌های مستقیم بخش کوچک و کنترل شده‌ای از مزرعه را مجزا کرده و مقدار تبخیر- تعرق را در یک دوره زمانی مشخص مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش لایسیمتری و روش بیلان هیدرولوژیکی اشاره کرد.

۱-۵-۱-۱ روش لایسیمتری

لایسیمتر یک مخزن با ابعاد مشخص است که در داخل خاک قرار داشته و از خاک مزرعه پر و گیاه

۱ - Reference Evapotranspiration

مورد نظر در آن کاشت می‌شود. این روش بر اساس بیلان آب در یک حجم کنترل شده‌ای از خاک قرار داشته و با اندازه‌گیری جریان‌های ورودی و خروجی آب طی یک دوره زمانی مشخص، تبخیر- تعرق با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود.

$$ET = I + P - D \pm \Delta S \quad (۲-۱)$$

در رابطه فوق ET تبخیر- تعرق گیاه، I آب آبیاری، P بارندگی، D آب خارج شده از خاک و ΔS تغییرات رطوبت خاک بین دو زمان اندازه‌گیری است. در حال حاضر لایسیمترها به ویژه لایسیمترهای حساس وزنی به عنوان مطمئن‌ترین روش اندازه‌گیری ET محسوب می‌شوند، هرچند لایسیمترها هم بدون مشکل نیستند.

۱-۵-۱-۲ روش‌های بیلان هیدرولوژیکی

روش‌های هیدرولوژیکی غالباً با نام "روش‌های ورودی- خروجی" مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این روش از معادله موازنه جرم برای یک حوزه آبخیز، یک مزرعه و یا یک منطقه استفاده شده است. یکی از مشکلات مهم در استفاده از این روش این است که نمی‌توان برای برآوردهای کوتاه مدت از آن استفاده نمود. همچنین امکان جداسازی تبخیر- تعرق برای یک محصول خاص وجود ندارد. اما از مزیت‌های این روش می‌توان به امکان محاسبه کاهش جریان که اساس قوانین حقوقی آب است اشاره کرد.

۱-۵-۲ روش‌های غیرمستقیم

در روش‌های غیرمستقیم که می‌توان آن‌ها را محاسبه‌ای دانست از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از روی ارتباط آن‌ها با تبخیر- تعرق و معادله‌هایی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، تبخیر- تعرق پوشش گیاهی موردنظر تخمین زده می‌شود. روش‌هایی که برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع پیشنهاد شده است هرکدام از نظر داده‌های مورد لزوم نیازهای متفاوتی دارند. به طور خلاصه تعدادی از روش‌ها اساس فیزیکی دارند و تعدادی فقط از روی تجربه بدست

آمده‌اند. این روش‌ها را می‌توان در چهار گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از:

۱-۵-۲-۱ روش‌های آیرودینامیک

آب از سطح مرطوب خاک و گیاه از طریق پخشیدگی مولکولی وارد لایه نازک هوای مجاور شده و سپس از طریق پخشیدگی متلاطم وارد هوای مجاور می‌شود. جریان بخار از سطح به هوا به اختلاف فشار بخار بین هوای چسبیده به سطح و هوای اطراف و همچنین سرعت باد بستگی دارد. این روش‌ها فقط در شرایط تحقیقاتی قابل استفاده می‌باشند، زیرا در وهله اول اندازه‌گیری سرعت باد و دانسیته بخار آب باید با دقت صورت گیرد که کاری بسیار مشکل است. از طرفی نیاز به دستگاه‌هایی دارد که هزینه آن‌ها زیاد بوده و همچنین برای کاربرد این دستگاه‌ها نیاز به افراد ماهر و کارآزموده است.

۱-۵-۲-۲ روش‌های توازن انرژی

اساس این روش‌ها تعیین انرژی مصرف شده به‌وسیله آب تبخیر شده می‌باشد. منبع اصلی این انرژی، تابش خورشید می‌باشد. بنابراین برآورد تابش خالص بخش اصلی در روش‌های توازن انرژی است. در این روش با چشم‌پوشی از انرژی افقی، انرژی موردنیاز برای فتوسنتز و انرژی که در خاک ذخیره می‌شود، معادله توازن انرژی به صورتی کاهش می‌یابد که فقط تبادل عمودی انرژی به حساب آورده می‌شود (علیزاده و کوچکی، ۱۳۵۷). این روش‌ها قابلیت تعیین تبخیر- تعرق برای دوره‌های یک ساعته یا کمتر را دارند. دلیل اصلی محدود بودن استفاده از روش‌های توازن انرژی در برآورد تبخیر- تعرق، تجهیزات موردنیاز برای اندازه‌گیری داده‌های ضروری است (نوری، ۱۳۸۹).

۱-۵-۲-۳ روش‌های ترکیبی

معادله اصلی پنمن قدیمی‌ترین معادله تئوری است که همه‌ی پارامترهای تأثیرگذار بر تبخیر شامل تشعشع، دما، رطوبت و باد را بررسی می‌کند. پنمن (۱۹۴۸) روش‌های آیرودینامیکی و توازن انرژی را به منظور بدست آوردن یک فرمول تقریبی که در آن نیازی به اندازه‌گیری‌های سطحی نباشد ترکیب نمود که به روش ترکیبی یا معادله پنمن معروف شد. فرمول وی بر اساس اصول فیزیکی استوار بوده و

نباید آن را یک فرمول تجربی دانست (علیزاده و کوچکی، ۱۳۵۷).

روش پنمن به مقدار قابل ملاحظه‌ای توسط مونتیث (۱۹۶۵) تعمیم یافت. تغییر مونتیث نسبت به روش پنمن در برگیرنده‌ی استفاده از یک پارامتر مقاومت گیاه و کاربرد وسیع‌تری از پارامتر مقاومت آئرودینامیکی است. روش پنمن- مونتیث می‌تواند یک روش بسیار مفید برای محاسبه تبخیر- تعرق در یک حوضه آبریز با پوشش گیاهی متفاوت باشد (نوری، ۱۳۸۹).

۱-۵-۲-۴ روش‌های تجربی

این روش‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی، تبخیر- تعرق را به طور غیر مستقیم برآورد می‌نمایند. معادلات تجربی نیز به دو دسته‌ی روش‌های تشعشعی و روش‌های دمایی تقسیم می‌شوند. از روش‌های دمایی می‌توان به تورنت وایت (۱۹۴۸) و هارگریوز (۱۹۷۵) و از روش‌های تشعشعی می‌توان به پریسلی و تیلور (۱۹۷۲) و ماکینک (۱۹۵۷) اشاره نمود. روش‌های دمایی از دمای هوا به عنوان پارامتر معرف انرژی در دسترس برای تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند. روش‌های تشعشعی از عامل انرژی خورشیدی مانند تابش خورشیدی و یا تابش خالص برای تعیین تبخیر- تعرق استفاده می‌کنند. کلیه فرمول‌های تجربی از یک همبستگی بین تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده و یک یا دو عامل هواشناسی نتیجه شده‌اند و از آنجا که چنین رابطه‌ای از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر می‌کند، فرمول‌های تجربی از یک ارزش عمومی برخوردار نیستند.

۱-۵-۳ روش‌های نوین

همگام با پیشرفت تکنولوژی و علوم کامپیوتری، پیشرفت‌هایی نیز در زمینه برآورد تبخیر- تعرق صورت گرفته است و روش‌های جدیدی برای برآورد آن ارائه شده است.

۱-۵-۳-۱ روش شبکه‌های عصبی مصنوعی

از آنجا که تبخیر- تعرق پدیده‌ای غیرخطی و پیچیده بوده و پارامترهای هواشناسی بسیاری در برآورد آن مؤثرند و از طرفی به علت عدم اندازه‌گیری برخی از این متغیرها در بعضی نقاط، امروزه کارشناسان

تمایل دارند تا از روش‌هایی که بتواند برآورد تبخیر- تعرق را با حداکثر دقت و حداقل تعداد پارامتر-های مورد نیاز تخمین بزند، استفاده نمایند (Y. M. Wang *et al.*, 2008). شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)[1] ابزاری مؤثر برای مدل کردن سیستم‌های غیر خطی هستند زیرا این شبکه‌ها نیازی به رابطه ریاضی برای پدیده پیچیده مورد بررسی ندارند (Kumar *et al.*, 2002).

تا کنون مطالعات زیادی در رابطه با قابلیت استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر- تعرق در سطح جهان انجام شده است. زنتی و همکاران (۲۰۰۷) تنها با استفاده از دمای هوا، تابش فرا زمینی و ساعات آفتابی روزانه توانستند به نتایج قابل قبولی در زمینه برآورد تبخیر- تعرق دست یابند. در مطالعه‌ای دیگر که در ایستگاه سینوپتیک مشهد انجام شد، با استفاده از روش شبکه-های عصبی مصنوعی و تنها با اندازه‌گیری دمای کمینه و بیشینه و محاسبه‌ی تابش فرازمینی که در منطقه و برای هر روز از سال ثابت است، میزان تبخیر- تعرق پتانسیل با خطایی کمتر از ۰/۳ میلیمتر در روز برآورد گردید (نوری و همکاران، ۱۳۸۸). مشکلی که روش شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز مانند روش‌های کلاسیک با آن روبروست، برآورد تبخیر- تعرق به صورت نقطه‌ای است که برای برآورد تبخیر- تعرق منطقه‌ای مانند روش‌های کلاسیک نیازمند عملیات درون‌یابی می‌باشد.

۱-۵-۳-۱ روش زمین‌آمار

زمین‌آمار مجموعه‌ای از روش‌های آماری به منظور تخمین متغیرهای مکانی است. بنابراین در این روش به بررسی آن دسته از متغیرها پرداخته می‌شود که از خود ساختار فضایی بروز می‌دهند. در روش زمین‌آمار با استفاده از ساختار فضایی حاکم بر یک پدیده می‌توان از داده‌های یک کمیت در مختصات معلوم بهره برده و مقدار همان کمیت را در نقطه‌ی دیگری با مختصات معلوم واقع در درون دامنه‌ای که ساختار فضایی حاکم است، تخمین زد. از جمله روش‌های زمین‌آمار می‌توان روش‌های

۱ - Artificial Neural Networks