معرفی جهات نظری و کاربردی

روش پنمن ـ مانتیس

و

ارائه تبخیر تعرق مرجع استاندارد برای ایران

گروه کار آب مورد نیاز گیاهان
و مدیریت محصولات زراعی
کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شماره ۱۶ / ۷۶

معرفی جهات نظری و کاربردی

روش پنمن ـ مانتیس

و

ارائه تبخیر تعرق مرجع استاندارد برای ایران

گروه کار آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

دکتر جمشید خیرابی

مهندس علیرضا توکلی

مهندس محمدرضا انتصاری

مهندس علیرضا سلامت

وزارت نیـــرو
دفتر توسعه شبکه‌های آبیاری و زهکشی
کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

نـام‌کتاب : معرفی جهات نظری و کاربردی روش پنمن ـ مانتیس
تهیه‌کننده : کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
ناشـــر : کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
تیـــراژ : ۱۰۰۰ نسخه
چاپ اول : بهار ۱۳۷۶
حروفچینی : دفتر توسعه شبکه‌های آبیاری و زهکشی

حق چاپ برای کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران محفوظ است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
سخن دبیر کمیتهٔ ملی آبیاری و زهکشی ایران	۱
۱ - مقدمه، کلیات و حدیث کهن آب موردنیاز گیاهان، توسط دکتر جمشید خیرابی سرپرست گروه آب موردنیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی	۵
۱/۱ - «گیاه به چه مقدار آب نیاز دارد؟» دریافتهای اولیه در رابطه با آب موردنیاز گیاهان	۵
۱/۲ - «مزرعه به چه مقدار آب نیاز دارد ؟» دریافت‌های اولیه در رابطه با سطوح تحت کشت نباتی و پدیدهٔ تبخیر تعرق	۶
۱/۳ - تبخیر تعرق مزرعه چه مقدار است؟ و پدیدهٔ تبخیر تعرق پتانسیل پوشش گیاهی مرجع	۹
- انتخاب گیاه مرجع بر کدامین مبانی استوار است ؟	۱۱
- چه فوایدی بر پوشش گیاهی مرجع مترتب است؟	۱۳
۱/۴ - تبخیر تعرق گیاه مرجع ET_o چه مقدار است؟	۱۳
- فرمولهای مختلف «تجربی، ریاضی» جهت تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع	۱۶
- تعریف تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_o)، و گیاهان دیگر (ET_c)	۱۸
۱/۵ - ضریب همبستگی بین تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع ET_c و گیاهان دیگر ET_c	۱۸
۱/۶ - باران موثر و راندمان آبیاری چه مقدار است؟	۱۹
۱/۷ - پاسخ به پرسش‌های مطروحه	۲۰
۲ - تنظیم پرسشنامه، تکمیل آن توسط کارشناسان ایرانی و تحلیل آن	۲۴
۳ - شرحی مختصر و مستخرج از مقاله بخش جوان کمیتهٔ ملی آبیاری و زهکشی، موضوع «مقایسه روش پنمن - مانتیس با سایر روشها، در چند منطقهٔ ایران»	۲۸
- تجربیات جهانی	۲۹
- مناطق موردبررسی ونتایج به دست آمده	۳۰

عنوان **صفحه**

- نتیجه‌گیری ۳۷
۴- ارائه نتایج گردهمایی مشورتی خبرگان بین‌المللی جهت بازنگری در روشهای پیشنهادی FAO در رابطه با آب موردنیاز گیاهان ۳۸
مقدمه ۳۸
- اهداف گردهمایی ۴۰
- برگزای جلسات گردهمایی و موضوعات موردبحث ۴۱
- اسناد و گزارشهای علمی اجلاس ۴۲
- خلاصه نتایج حاصله و توصیه‌های انجام شده ۴۴
- روش‌های برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_o) ۴۴
الف - روش ترکیبی (روش پنمن - مانتیس) ۴۴
ب - روش تشعشع ۴۵
ج - روش برآورد ET_o با استفاده از دما ۴۵
د - روش تشتک تبخیر ۴۶
- پارامترها و متغیرهای اقلیمی ۴۷
- آب موردنیاز گیاهان ۴۸
+ تبخیر تعرق مرجع ۴۸
+ ضریب گیاهی ۴۸
□ برآورد یک مرحله‌ای ۴۹
- طراحی و مدیریت آبیاری ۵۰
- خلاصه بحث‌های انجام شده ۵۰
- گروه و مجمع فنی I : ارزیابی روش‌های مختلف برای تخمین تبخیر تعرق مرجع ۵۱
الف - انتخاب معادلات تبخیر تعرق مرجع ۵۱
ب - روش‌های ترکیبی ۵۲
ج - روش‌های تشعشع ۵۳

عنوان **صفحه**

د – روش استفاده از دما ۵۴
ه – روش تشتک تبخیر ۵۴
– گروه فنی شماره II : تجزیه و تحلیل مفاهیم و روش‌های مختلف محاسبهٔ ET_o و پارامترهای مربوطه ۵۵
الف – فرمول ترکیبی ۵۵
ب – فرمول تشعشع ۵۸
ج – روش‌های دمایی ۵۸
د – بحث پیرامون روش تشتک تبخیر ۵۹
– گروه و مجمع فنی شماره III : پارامترهای فیزیکی و اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی ۵۹
الف – پارامترهای فیزیکی ۵۹
ب – توصیه در رابطه با انتخاب سیستم واحدها ۶۲
ج – مراحل مختلف اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی ۶۲
+ داده‌های مربوط به تشعشع ۶۳
+ داده‌های مربوط به سرعت باد ۶۴
+ داده‌های مربوط به تبخیر ۶۴
د – دستگاه‌ها و تجهیزات و ایستگاه‌های هواشناسی ۶۴
ه – مقیاس زمانی ۶۵
و – محاسبهٔ ساعتی ۶۵
– گروه و مجمع فنی IV : تبخیر تعرق و ضرایب گیاهی ۶۶
الف – انتخاب گیاه مرجع ۶۶
ب – بازنگری در ضریب گیاهی (K_c) پیشنهادی FAO – ۲۴ (روش دومرحله‌ای) ۶۶
ج – ضریب گیاهی و روش یک مرحله‌ای ۶۷
د – دوره‌های مختلف رویش و رشد نباتی و فصل رشد ۶۷

عنوان	صفحه
هـ - ضریب گیاهی مرحلهٔ نمو اولیه (K_{c1})	۶۸
و - باران موثر	۶۸
ز - طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری	۶۹
ح - آب موردنیاز و همکاری‌ها	۶۹
ط - ادامه مباحث گردهمایی و بررسی‌های انجام شده	۶۹
- روش‌های تخمین تبخیر تعرق مرجع	۷۰
+ روش ترکیبی	۷۰
+ محاسبه ET_o ساعتی (ساعت به ساعت)	۷۰
+ ارزیابی کارآیی روش پنمن - مانتیس توصیه شده	۷۱
+ بازنگری در روش تشعشع	۷۱
+ بازنگری در روش دمایی	۷۲
+ تخمین تبخیر تعرق براساس تشتک تبخیر	۷۲
• بازنگری در ضرایب تشتک تبخیر	۷۲
• استاندارد کردن شرایط نصب و نگهداری تشتک	۷۲
- پارامترهای فیزیکی و متغیرهای اقلیمی	۷۲
+ کمبود فشار بخار	۷۳
+ داده‌های مربوط به تشعشع	۷۳
+ شارگرمایی خاک	۷۴
+ سرعت باد	۷۴
+ وسایل و تجهیزات ایستگاههای هواشناسی	۷۴
+ متغیرهای اقلیمی و تغییرات مکانی	۷۵
+ تغییرات زمانی	۷۵
- آب موردنیاز گیاهان	۷۶
+ مقایسه گیاهان مرجع	۷۶
+ بازنگری در رابطه با ضریب گیاهی K_c (روش دومرحله‌ای)	۷۶

عنوان **صفحه**

+ تبخیر از سطح خاک ۷۷
+ دوره‌های رشد و دوران رشد گیاهی ۷۷
+ تدارک مقدمات کار برای اعمال روش یک مرحله‌ای Kc ۷۸
+ آب موردنیاز گیاهان و مدیریت آبیاری ۷۸
۴/۱- مقایسهٔ بیست روش محاسبه و برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع ET_o برای مقادیر ماهانه ۷۹
۴/۲- طرح محاسبه ET_o استاندارد مرجع براساس فرمول ترکیبی (پنمن - مانتیس) ۸۳
۴/۲-الف : پارامترهای مورداستفاده در معادلات تبخیر تعرق مرجع استاندارد ET_o ۸۳
۱- ضرایب تبدیل آحاد سیستم بین‌المللی متری به سیستم C.G.S ۸۳
۲- گرمای نهان تبخیر ۸۴
۳- شیب منحنی تغییرات فشار بخار ۸۴
۴- ثابت سایکرومتری ۸۴
۵- فشار اتمسفر ۸۵
۶- چگالی هوا ۸۵
۷- فشار بخار اشباع (e_a) ۸۷
۸- فشار بخار واقعی (e_d) ۸۷
۹- کمبود فشار بخار ۸۹
۱۰- تشعشع رسیده به بالای جو (R_a) ۹۰
۱۱- ساعات روشنایی روز (N) ۹۱
۱۲- سرعت باد (U_2) ۹۱
۱۳- باد روزانه ۹۲
۴/۲- ب : معادلهٔ پنمن - مانتیس ۹۳
۱- فاکتورهای مقاومت ۹۴

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ـــ

عنوان **صفحه**

۱/۱ – مقاومت سایه‌انداز پوشش گیاهی (r_c) ۹۴
۱/۲ – مقاومت آئرودینامیکی هوا (r_a) ۹۵
۱/۳ – ثابت سایکرومتری اصلاح شده (γ^*) ۹۷
۲– بخش آئرودینامیکی معادله ترکیبی ۹۷
۳– بخش تشعشع معادله ترکیبی ۹۹
۳/۱ – تشعشع خالص (R_n) ۱۰۰
۳/۱/۱ – تشعشع خالص با طول موج کوتاه (R_{ns}) ۱۰۰
۳/۱/۲ – تشعشع خالص موج بلند (R_{nL}) ۱۰۳
۳/۲ – جریان گرمایی خاک ۱۰۷
۴/۲– ج : توصیه و معرفی فرمول ترکیبی برای تبخیر تعرق ۱۰۸
۴/۳ : پیوستها ۱۱۱
– پیوست I – لیست و آدرس شرکت‌کنندگان ۱۱۲
– پیوست II برنامه گردهمایی ۱۱۷
– پیوست III اسناد گردهمایی و مقالات ارائه شده ۱۱۹
فهرست منابع ۱۲۱
فهرست مقالات ارائه شده در گردهمایی ۱۲۴
۵– تحقیقات و تاییدات معتبر دیگر در رابطه با فرمول پنمن – مانتیس ۱۲۷
۵/۱ تحقیقات آقای آلن ۱۲۷
۵/۲ آخرین نتایج تحقیقات ارائه شده در کنفرانس بین‌المللی سان‌آنتونیوی تگزاس ۱۹۹۶ ..... ۱۴۳
۵/۳ آخرین تحقیقات ارائه شده به سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر – ایران ۱۳۷۵ ..... ۱۴۶
۶– ارائه ارقام تبخیر تعرق استاندارد ET_o براساس فرمول پنمن – مانتیس برای ایستگاههای پرآمار ایران ۱۴۸
۶/۱ – ارایه ET_o به صورت جدول برای ماه‌های مختلف ۱۴۹
۶/۲ – ارائه ET_o به صورت منحنی ، برای ماه‌های مختلف ..... ۱۵۵ تا ۱۶۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

قسمت ۳-

شکل ۱- مقایسه روش پنمن - مانتیس با سایر روش‌ها در خوزستان ۳۱
شکل ۲- مقایسه روش پنمن - مانتیس با سایر روش‌ها در ارومیه ۳۴
شکل ۳- مقایسه روش پنمن - مانتیس با سایر روش‌ها در مازندران ۳۵
شکل ۴- مقایسه روش پنمن - مانتیس با سایر روش‌ها در کالیفرنیا ۳۶

قسمت ۴-

شکل ۱- تغییرات جزیی T_{kv} در رابطه با مقادیر مختلف دما، رطوبت و ارتفاع . ۸۶
شکل ۲- مقایسه روش ایدسو و جکسون و روش برونت ۱۰۶

قسمت ۵-

شکل ۱- مقایسه ET_o متوسط ماهانه، براساس معادله پنمن (۱۹۶۳) با ET_o متوسط ماهانهٔ اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری ۱۳۹
شکل ۲- مقایسه ET_o متوسط ماهانه، محاسبه شده براساس معادله کمبرلی - پنمن (۱۹۷۲)، با متوسط ET_o اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری ۱۳۹
شکل ۳- مقایسه ET_o متوسط ماهانه، محاسبه شده براساس معادلهٔ کمبرلی - پنمن (۱۹۸۲)، با متوسط ET_o اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری ۱۴۰
شکل ۴- مقایسه ET_o متوسط ماهانه، محاسبه شده براساس معادله پنمن اصلاح شده FAO-۲۴، با متوسط ET_o اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری ۱۴۰
شکل ۵- مقایسه ET_o متوسط ماهانه، محاسبه شده براساس معادله پنمن - مانتیس، با متوسط ET_o اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری ۱۴۱
شکل ۶- مقایسه ET_o متوسط روزانه، محاسبه شده براساس معادلهٔ پنمن با متوسط ET_o، اندازه‌گیری شده با لیسیمتر در منطقه کمبرلی.. ۱۴۱
شکل ۷- مقایسه ET_o متوسط روزانه، محاسبه شده براساس معادلهٔ پنمن - مانتیس با متوسط ET_o اندازه‌گیری شده با لیسیمتر در منطقه Coshocton, oh ... ۱۴۲
شکل ۸- مقایسه ET_o متوسط روزانه، محاسبه شده براساس معادله پنمن - مانتیس، با متوسط ET_o اندازه‌گیری شده در دیویس ۱۴۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

قسمت ۴ :

جدول ۱- خلاصه اولویت‌بندی آماری روش‌های تعیین تبخیر تعرق ماهانه (در مقام مقایسه با لیسیمتر) در مناطق خشک ۸۰

جدول ۲- خلاصه اولویت‌بندی آماری روش‌های تعیین تبخیر تعرق ماهانه در مناطق مرطوب ۸۱

جدول ۳- خلاصه اولویت‌بندی آماری روش‌های تعیین تبخیر تعرق ماهانه در مناطق دیگر ۸۲

قسمت ۵ :

جدول ۱- محل نصب و اندازه‌گیری لایسیمترها، دوره‌های اندازه‌گیری و مجریان اصلی طرحهای تحقیقاتی ۱۳۰

جدول ۲- گیاهان موردکشت در لایسیمتر و مدیریت مصرف آب ۱۳۱

جدول ۳- ارتفاع گیاهی که به عنوان مرجع در محاسبات روش پنمن - مانتیس به کار رفته است ۱۳۲

جدول ۴- متوسط تبخیر تعرق پتانسیل محاسبه شده با استفاده از فرمول‌ها و اندازه‌گیری شده به وسیله لیسیمتر برحسب میلی‌متر در روز برای ماه‌های حداکثر مصرف ۱۳۳

جدول ۵- طبقه‌بندی ایستگاه‌های لیسیمتری مناطق خشک و مرطوب..... ۱۳۴

جدول ۶- خطای استاندارد برآورد ET_o با استفاده از فرمول‌های مختلف در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لیسیمتری..... ۱۳۵

جدول ۷- ضریب رگرسیون و ضریب همبستگی ET_o محاسبه شده از طریق فرمول‌ها و ET_o اندازه‌گیری شده از طریق لیسیمتر..... ۱۳۶

جدول ۸- خطای استاندارد برآورد ET_o با فرمول‌های مختلف و مقایسه آن با ET_o اندازه‌گیری شده با لیسیمتر ۱۳۸

قسمت ۶:

جدول تبخیر تعرق استاندارد مرجع، ET_o در ایستگاه‌های پرآمار کشور، براساس آمار هواشناسی منتشر شده توسط FAO ۱۴۹

نمودارها

عنوان — صفحه

۱- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در آبادان ۱۵۰
۲- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در اهواز..... ۱۵۰
۳- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در انزلی ۱۵۰
۴- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در اراک ۱۵۱
۵- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در بابلسر ۱۵۱
۶- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در کرمانشاه..... ۱۵۱
۷- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در بم..... ۱۵۲
۸- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در بندر لنگه ۱۵۲
۹- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در بندر بندر عباس ۱۵۲
۱۰- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در بیرجند ۱۵۳
۱۱- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در بوشهر..... ۱۵۳
۱۲- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در چابهار ۱۵۳
۱۳- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در دزفول ۱۵۴
۱۴- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در اصفهان ۱۵۴
۱۵- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در فسا ۱۵۴
۱۶- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در گرمسار..... ۱۵۵
۱۷- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در قزوین ۱۵۵
۱۸- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در گرگان ۱۵۵
۱۹- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در ایرانشهر ۱۵۶
۲۰- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در جاسک ۱۵۶
۲۱- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در کشف رود..... ۱۵۶
۲۲- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در کاشان..... ۱۵۷
۲۳- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در کرمان..... ۱۵۷

عنوان	صفحه
۲۴- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در خرم‌آباد	۱۵۷
۲۵- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در خوی	۱۵۸
۲۶- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در مشهد	۱۵۸
۲۷- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در نوژه	۱۵۸
۲۸- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در ارومیه	۱۵۹
۲۹- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در رامسر	۱۵۹
۳۰- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در رشت	۱۵۹
۳۱- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در سبزوار	۱۶۰
۳۲- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در سقز	۱۶۰
۳۳- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در سنندج	۱۶۰
۳۴- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در سمنان	۱۶۱
۳۵- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در شهرکرد	۱۶۱
۳۶- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در شاهرود	۱۶۱
۳۷- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در شیراز	۱۶۲
۳۸- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در طبس	۱۶۲
۳۹- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در تبریز	۱۶۲
۴۰- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در تهران	۱۶۳
۴۱- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در تربت حیدریه	۱۶۳
۴۲- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در ورامین	۱۶۳
۴۳- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در یزد	۱۶۴
۴۴- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در زابل	۱۶۴
۴۵- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در زاهدان	۱۶۴
۴۶- منحنی تغییرات ET_o در ماههای مختلف سال ، در زنجان	۱۶۵

پیشگفتار دبیرکل کمیته آبیاری و زهکشی

در سال ۱۹۹۰ همایش علمی بزرگی توسط *FAO*، با شرکت بسیاری از خبرگان سطح بالای جهان ازهفت کشور و مشارکت سازمانهای معتبر بین‌المللی، ازجمله کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی *(ICID)*، و سازمان هواشناسی جهانی *(W.M.O)* و موسسه تحقیقات گیاهان گرمسیری و مناطق خشک *(I.C.R.I.S.A.T)* برگزار گردید تا در روش‌های پیشنهادی خود در سال ۱۹۷۷ در رابطه با تعیین تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع، و تعیین آب مورد نیاز گیاهان، موضوع نشریه معروف *FAO-24* تجدید نظر نماید.

در این اجلاس روی کارآیی، جنبه‌های نظری و کاربردی جدیدترین روش، یعنی روش پنمن ـ مانتیس وبرتریهای آن در اکثر شرایط، تاکید گردید.

به‌نظر می‌رسید، باارتباطات وسیع وسریع امروز جهان، همه کارشناسان ایرانی دربخش‌های مختلف، نسبت به آن آگاهی کافی و وقوف کامل و اشراف وافی داشته و به حد کفایت توجیه شده باشند. ولی بعدها معلوم شد که چنین نیست وپیام به‌تمام دریافت نشده‌است.

اولین بار که مقاله «تحلیلی – تحقیقی» در رابطه با کارآیی روش پنمن ـ مانتیس، به ویژه در شرایط ایران، توسط بخش جوان کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، در هشتمین سمینار این کمیته (۱ تا ۲ آبان ماه ۱۳۷۵) در تهران، ارایه‌گردید بحث‌هایی به‌میان آمد که ازچند نظر شایان توجه وحائز اهمیت بود:

اول اینکه، معلوم گردید همه کارشناسان درجریان کامل جنبه‌های نظری وکاربردی این روش نیستند و یا آن گونه که شایسته است، توجیه نیستند.

دوم آنکه معلوم شد بررسی بیشتر در احوال این روش، وکسب اطلاع از نظر کارشناسان در سطح کشور در رابطه با کاربری آن در شرایط ایران ضرورت دارد.

سوم آنکه معلوم گردید معرفی کامل این روش، از کلیه جهات، و توجیه کارشناسان از طریق مرجع معتبری مثل کمیته ملی آبیاری و زهکشی، ضروری است.

به دلایل مزبور «گروه کار آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی» باتوجه به

رسالت خود و با احساس مسئولیت، به این مهم اقدام کرد و به نظرخواهی از کارشناسان ایرانی در سطح کشور پرداخت و معلوم گردید که حدود نیمی از آنان روش پنمن ـ مانتیس را توصیه می‌نمایند، درصورتیکه حدود ۵۰٪ بقیه روش‌های متفرقه دیگر را پیشنهاد، و یا عمل می‌کنند. تفرق آراء به‌گونه‌ای است که هریک از روش‌ها دو درصد، و حداکثر دوازده درصد آراء را به خود تخصیص می‌دهد. پاره‌ای از این روش‌ها حتی از چهارچوب روش‌های *FAO-24* نیز خارج است.

از این نظرخواهی می‌توان، به درستی، به نتایج زیر رسید:

۱ـ ممکن‌است پیشنهاد روش‌های متفرقه مبتنی به‌دلایل موجه باشد، که در این صورت این نتایج بسیار مغتنم خواهد بود، چراکه، همیشه و همه جا، نمی‌توان ونباید تنها از یک روش، بدون اتکاء به‌دلایل مدلل ومحکم استفاده شود.

۲ـ ممکن‌است تفرق آراء به‌علت عدم اشراف کامل وتوجیه نبودن کارشناسان ورفتارهای سلیقه‌ای، به ویژه در بخش اجرا، بوده باشد ، که در این صورت لازم است روش پنمن ـ مانتیس که خطوط اصلی، و وجوه عمده آن مورد تائید اکثر مراجع اعلم ایرانی و خارجی است، به تمام معرفی گردد، و جنبه‌های نظری و جهات کاربردی آن به شکل توجیهی توضیح داده شود، که تصمیم گروه کار آب مورد نیاز گیاهان به‌انتشار نشریه شماره ۳نیز براین مبنا اتخاذ گردیده، ودرآن به‌معرفی این روش اقدام شده‌است.

در این نشریه آقای دکتر خیرابی سرپرست گروه شرحی در رابطه با تاریخچه تعیین آب موردنیاز گیاهان، تبخیر تعرق گیاه مرجع، وتبخیر تعرق استاندارد، از اواخر قرن نوزدهم تااواخر قرن حاضر ۱۹۹۶، و مراحل مختلف تحول و تکامل مفاهیم فنی، و ابداع روش‌های مربوطه، طی یک قرن اخیر را ارایه داده‌اند که تازگی وطراوت ویژای دارد، ومقدمه‌ای روشنگر وجاذبی‌است.

سپس چکیده‌ای از مضمون مقاله بخش جوان کمیته ملی آبیاری وزهکشی، موضوع مقایسه روش پنمن ـ مانتیس باسایر روش‌ها، که درهشتمین سمینار آبیاری و زهکشی معرفی شده‌است، آمده‌است.برای انعکاس نظر کارشناسان خارجی گزارش کامل جریان

گردهمایی *FAO* در ۱۹۹۰ در رم موضوع بازنگری در روش‌های تخمین آب موردنیاز گیاهان، که فوقاً به‌آن اشاره شد، ترجمه شده و چکیده چند مقاله وزین، ارایه شده در کنفرانس *ICID* در سال ۱۹۹۶، تحت عنوان «تبخیرتعرق، وبرنامه‌ریزی آبیاری»، در رابطه با معرفی روش پنمن ـ مانتیس توسط پروفسور آلن وهمکاران، آمده‌است، که همه موید این مطلب‌است که این روش جدیدترین، کاربردی‌ترین، وکارآترین روش ترکیبی، دراکثر شرایط ایستگاه‌های پرآمار ایران وبسیاری نقاط جهان‌است. یکی از ویژگیهای مهم دیگر آن، برای مناطق خشک ونیمه خشک مثل ایران، این است که ET_O محاسبه شده باروش پنمن ـ مانتیس، درمقام مقایسه با اکثر روش‌های دیگر، مقادیر کمتری را نشان می‌دهد این امر اگر به‌دلیل دقت روش باشد که تحصیل حاصل است، در غیر این صورت هم، گرایش به«کم آبیاری» دارد که بازهم مغتنم‌است، چراکه درحال حاضر سیاست کلی دستگاه‌های اجرایی صنعت آب کشور در همین راستا است و این امر، موجبات مصرف آب کمتر را فراهم می آورد.

در این نشریه، ضمیمه‌ای نیز، حاوی محاسبه «تبخیر تعرق استاندارد مرجع» براساس روش پنمن ـ مانتیس برای تمام ایستگاه‌های پرآمار ایران، همراه با منحنی تغییرات آن در ماه‌های مختلف، براساس داده‌های هواشناسی *FAO*، آمده‌است.

در خاتمه با تشکر از گروه کار آب موردنیاز گیاهان و آرزوی توفیق برای این گروه، این نشریه که مکمل نشریات قبلی در این زمینه است، عنقریب با یک سند معتبر ملی در رابطه با تعیین آب مورد نیاز گیاهان تکمیل خواهد شد، و نشریات بعدی این گروه نیز که با هدف تنظیم تقویم آبیاری برای محصولات مختلف در سطح کشور برنامه ریزی شده، و تدوین خواهد شد، این کار را کامل‌تر خواهد کرد.

در ضمن از مهندسان مشاور و بخش های اجرایی پروژه‌های آبیاری نیز انتظار دارد محاسبات آب مورد نیاز را حول روش های موجه، و هماهنگ در سطح ملی سازمان‌دهی نمایند.

درمقطع کنونی، و برای ایستگاه‌های پرآمار، به‌نظر نمی‌رسد که خارج ازروش پنمن ـ مانتیس و روش‌های پیشنهادی *FAO-24*، دیگر روش‌های (جز استثنائات) بتواند

جوابگو باشد.

در این جا برخود لازم می‌دانم از زحمات سرپرست گروه آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی، آقای دکتر جمشید خیرابی، و اعضاء گروه آقایان مهندس محمدرضا انتصاری، مهندس علی رضا سلامت، مهندس علیرضا توکلی که با دقت نظر و حوصله، کار نگارش، تدوین و ترجمه این کتاب را سامان داده‌اند، همچنین از کمک رسانی آقایان مهندس محمدحسین سادات میرئی و مهندس مهرزاد احسانی وگروه کامپیوتر و تایپ تشکر نمایم.

در خاتمه ضمن تشکر از همه اساتید، سروران، کارشناسان وهمکاران محترم که برای آب وخاک کشور خدمت می‌کنند، ازهمه این عزیزان و بزرگواران انتظار دارد که از ارایه‌هرگونه نظر ارشادی، اصلاحی، و هرگونه همکاری دریغ نفرمایند.

مهندس سید اسدالله اسدالهی

دبیر کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

بسمه تعالی

«هرگاه آب به‌اندازه باشد واز مقدار لازم نه‌افزون شود ونه‌کم گردد، آبادانی زمین‌پایدار می‌ماند»

استاد الکرجی

۱ـ مقدمه ،کلیات و حدیث کهن آب موردنیاز گیاهان:

توسط

دکتر جمشید خیرابی

سرپرست گروه کار آب موردنیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی

در قرن نوزدهم که شاخه‌های مختلف علوم و فنون به شکل منظم ومدون، و به صورت کلاسیک در اروپا و آمریکا شکل گرفت، به موازات آن و باانذک تاخیر، رشته مهندسی کشاورزی، وپس از آن مهندسی زراعی (یا مهندسی آبیاری و آبادانی، یا مهندسی آبیاری و عمران، GENIE RURAL یا AGRICULTURAL ENGINEERING)؛ به عنوان تکنیک مهندسی که بتواند مسائل مطروحه در اراضی زراعی و محیط‌های روستایی و سطوح تحت کشت آبی را حل و فصل نماید، پا به عرصه حضور و ظهور گذاشت. در این مرحله، در رابطه با آبیاری کشت‌های آبی اولین سوالی که برای مهندسان آگرونومی به ویژه برای متخصصان و محققان آبیاری مطرح شد این بودکه:

۱/۱ «گیاه به چه مقدار آب نیاز دارد؟»

دریافت‌های اولیه در رابطه با آب موردنیاز گیاهان:

در اواخر قرن نوزدهم گیاه شناسان مشکل خود رابا ردیابی پدیده «تعریق» و«تعرق» گیاه درزیر سرپوش، و در محفظه‌های دربسته و اندازه‌گیری آن در شرایط آزمایشگاهی (IN VITRO) حل کردند، و در حیطه کار، تخصص واهداف خود، تا اندازه‌ای هم به پاسخ رسیدند. ولی این پاسخ‌ها برای مهندسان آبیاری وآگرونومها حلال معما نگردید، چراکه

آنان درپهنه‌های زراعی وکشت‌های آبی، آب موردنیاز این عرصه‌ها راجستجوگر بودند ومی‌خواستند آن را برآوردکنند، ونیاز واقعی را تعیین نمایند، لذا آنان سئوال مزبور را به‌شکل دیگری مطرح کردند:

۱/۲ «مزرعه به‌چه مقدار آب نیاز دارد؟»؛

دریافتهای اولیه در رابطه با سطوح تحت کشت نباتی و پدیدهٔ تبخیر تعرق:

جهت پاسخ‌گویی به این سئوال، آنان، در آغاز، همراه باگیاه شناسان تلاش‌های بسیاری درزمینه برقراری رابطه بین آب مصرفی وماده خشک گیاهی نمودند ، وبسیاری آزمایشات گلدانی انجام دادند، و به نتایج کاربردی مفیدی نیز دست یافتند، ولی جواب اصلی سئوال را درنیافتند، به ویژه که بدون تخمین آب موردنیاز محصولات مختلف در مزرعه و در پهنه‌های تحت کشت، خشت اول تمام پروژه‌های آبیاری از آغاز کج نهاده می‌شد و تا آخر هم کج می‌رفت و این، مسئله بسیار مهمی بود که در آن زمان به آن توجه کردند لذا به حساسیت سئوال مزبور افزوده گشت.

از آن پس به تدریج نیازها افزون می‌شد و به تعداد سئوالات مطروحه نیز افزوده می‌گردید. دراواخر قرن نوزدهم واوایل قرن بیستم گسترش کشت‌های آبی مکانیزه، ضرورت ایجاد شبکه‌های آبیاری، و احداث سدها و مهار و تنظیم آبها حکم می‌کرد که به این سئوال جواب دقیق تر، ودرعین حال کاربردی‌تری داده شود تا معلوم گردد کشت‌های آبی، تحت پوشش محصولات مختلف، و در مناطق مختلف، با خاک‌ها و شرایط اقلیمی متفاوت به چه مقدار آب نیازمندند، تا آن را تامین کنند، انتقال دهند، و توزیع نمایند.

اساتید فن، چراغ به‌دست، به دنبال گمشده خود بودند تا اینکه توجه پیدا کردند که در مزرعه علاوه بر «تعرق» یعنی مقدار آبی که به صورت بخار، از اعماق نسوج گیاهی سر می‌کشد وبه‌آسمانها پرمی‌گشاید، مقادیر دیگری از آب نیز مستقیماً درمعرض تبخیر قرار می‌گیرد، از آنجمله‌است:

ذرات آب که ازاستوماتهای آبی بر روی برگ‌ها ظاهر می‌شود، شبنم که بر روی گل و گیاه می‌نشیند، قطرات باران رحمت که به مزرعه فرود می‌آید، آب آبیاری و یا باران که

خاک سطحی رامی‌خیساند، آبی که در انهار آبیاری مزرعه روان است، آبی که در استخرها، مخازن، حوضها و حوضچه‌ها، برکه‌ها و مانداب‌ها وجود دارد، و هر گونه نم و رطوبت که بر سطح مزرعه نشسته باشد.

پس از عطف توجه به پدیده تبخیر در مزرعه، محققان مهندسی آبیاری و زراعت، تحقیقات فیزیکدانان نیوار و هواشناسان کشاورزی راکه پدیده تبخیر را بررسی کرده بودند (و نتایجی هم گرفته بودند و قوانینی هم بر آن وضع کرده بودند) چاشنی تحقیقات قبلی خود در زمینه «تعرق» نمودند وخواستند از جمع‌جبری مقدار تعرقی که گیاه‌شناسان به‌دست آورده بودند، بامقدار تبخیری که فیزیکدانان و هواشناسان محاسبه کرده بودند، گمشده خود را بیابند که نیافتند، وازاین طریقت نیز کمال مطلوب حاصل نگردید، ومعما همچنان حل ناشده باقی ماند.

ولی در اوایل قرن بیستم محققان هوشمند به این نکته توجه پیدا کردند که تفکیک «تعرق» از تبخیر به هر صورت ممکن (تعریق، تصعید از سطح برف و یخ و یا تبخیر مستقیم آب) در مزرعه کار عبثی است و از نظر علمی اصولی نیست، چراکه در طبیعت و در بطن مزرعه هر دو پدیده، از نظر هویت اصلی و ماهیت بنیادی، به تمام، پدیده فیزیکی ناب هستند، و در هر دو حال و به هر صورت، سخن از استحاله آب به بخار است، و چنین تغییر احوالی نیز نیازمند مقادیری انرژی و کالری است، که منبع اصلی آن نیز، در هر حال، و در هر زمان و مکانی، جز انرژی ساطعه از گوی آتشین آسمانی و انرژی حاصل از آفتاب عالمتاب (تشعشع و نور) چیز دیگری نیست، و معما چو حل گشت، آسان گردید، لذا اولین معادله، به عنوان ساده‌ترین و در عین حال مهم‌ترین و معتبرترین معادله، بدینسان شکل گرفت و به قرار زیر نوشته شد که در یک طرف آن انرژی رسیده خورشید به سطح مزرعه و در طرف دیگر آن استحاله آب به بخار (چه در درون گیاه، یا خاک و یا بیرون از آن) قرار بگیرد:

«مقدار معینی استحاله آب به بخار = مقدار انرژی که از خورشید به مزرعه می‌رسد»

در این مقطع بودکه به‌نتایج حاصل از آزمایشات آقایان بریگس *(BRIGGS)* و شانتز *(SHANZ)* که برای بررسی نیاز آبی محصولات در رابطه باعوامل جوی دراوایل دهه دوم قرن حاضر انجام گرفته بود وزن و بهای بیشتری داده شد و توجه بیشتری به آن

مبذول گردید. با اینکه این آزمایشات در مزرعه انجام نگرفته بود ولی محققان به این نتیجه صوبی رسیده بودند که انرژی خورشید مهمترین عامل «تعرق» و تنها عامل «تبخیر» به‌حساب می‌آید.

از رابطه فوق‌الذکر که راه‌گشا ومشکل‌گشابود به‌سهولت معلوم گردید:

مقدار انرژی که دریک مکان، و فصل و زمان «معینی»، طی مدت «معین»، از طرف خورشید به سطح «معینی» از مزرعه می‌رسد مقدار «معینی» است، و قابل احتساب است، و در آن سوی معادله نیز مقدار آبی که با این مقدار انرژی می‌تواند تغییر حالت دهد مقدار معین و مشخصی است. در این مقطع بود که توجه محققان به پدیده جدیدی جلب شد که نه تعرق است، و نه تبخیر، و نه جمع جبری آن دو، بلکه پدیده مستقلی است که در رابطه با انرژی (خورشید که به سطح مزرعه می‌رسد) قرار دارد، لذا اسم علمی چنین پدیده نو یافته‌ای را EVAPOTRANSPIRATION نام نهادند که در دهه ۱۹۳۰ به کار رفت و همست تاریخی آن توسط آقای تورنز وایت (THORNTHWAITE) توضیح داده شد. این اصطلاح که ما درزبان خود آن را «تبخیرتعرق» به عنوان کلمه واحده، به‌کار می‌بریم، کاملتر شد وآن را تبخیر تعرق واقعی (REAL EVAPOTRANSPIRATION)، و انرژی مربوطه را هواشناسان کشاورزی و فیزیکدانان جو تحت عنوان انرژی پنهانی (بخشی از انرژی ست که صرف تبخیر از سطح آب، گیاه و خاک می‌شود) تعریف کردند به طوری که ۵۸۵ کالری از آن با استحاله یک گرم‌آب (در ۲۰ درجه سانتیگراد) درطرفین معادله مشهور مزبور قرار می‌گیرد. تبخیر تعرق واقعی‌درمقابل «تبخیر تعرق پتانسیل» معنی‌دار شد، که شرح آن خواهد آمد.

همانگونه که قبلاً گفته شد «تبخیرتعرق» ماهیتاً ونهایتاً یک پدیده به‌تمام فیزیکی‌است که معادله آن نوشته شد، ولی از نظر مهندسی، وکاربردی، واستفاده از مفاهیم ونتایج عملی آن در سطح مزرعه، می‌توان به آن، به عنوان پدیده "فیزیکی - بیولوژیکی"، (به اعتبار این که آب و گیاه، هر دو، در معرض تابش آفتاب وَ تشعشع خورشیدی قرار می‌گیرند، و نقش و اثر ویژه‌ای که هریک از آنها در رابطه با دریافت انرژی، اصطکاکها و استهلاکها و پس‌ماندها ایفا می‌کنند)، نگریست و در آن تامل کرد.

اصطلاح تبخیر تعرق اولین بار در سال ۱۹۳۰ به‌کار رفت و توسط آقای تورنز وایت در

۱۹۴۴ به عنوان " مقدار آبی که از سطح تحت کشت نباتی با استفاده از انرژی پنهانی بخار شده و وارد اتمسفر می‌شود" تعریف گردید.

کشف پدیده « تبخیر تعرق » مرحله‌ای از پیشرفت جهت تعیین آب موردنیاز واقعی محصولات بود ولی هنوز پس از آن همه تلاش و کنکاش، قدم اول بودکه برداشته شد، چرا که « دفتر به پایان نامد» و «حکایت همچنان باقی ماند»، و لذا این بار سئوال به‌شکل دشوارتر ازپیش وبه‌قرار زیر مطرح شد:

۱/۳ تبخیر تعرق مزرعه چه‌مقداراست؟

پدیده تبخیر تعرق پتانسیل پوشش گیاهی مرجع :

سئوال بسیار دشوار بود، و پیدا کردن پاسخ آن مایوس کننده می‌نمود، زیرا ملاحظه گردید که تبخیر تعرق مزرعه به عواملی چند، با اثر متقابل پیچیده، و اکثراً غیرقابل کنترل و اندازه‌گیری بستگی دارد، از آن جمله می‌توان برشمرد:

نوع گیاه، سن گیاه، مرحله رشد گیاه، نوع عملیات زراعی، کاشت و داشت، تراکم وانبوهی، رطوبت خاک، جنس خاک، روش آبیاری، مدیریت مزرعه وآبیاری، وسعت مزرعه، موقعیت جغرافیایی وعرض محل، ارتفاع محل، میل خورشید، بالانس انرژی ورودی و خروجی، فصل کشت، آب و هوا، و غیره.

مشکل هنگامی پیچیده‌تر شد، که توجه گردید هریک از عوامل مذکور (که به‌ظاهر اسم واحدی به‌آن نهاده شده‌است) به مثابه سیستم بغرنجی به‌حساب می‌آید که در درون خود دربرگیرنده عوامل ثانویه بسیاری‌است که سیستم تابعی از آنها، واثرگذاری متقابل آنها است، هم‌چنانکه عامل اقلیم تابع عوامل جوی بسیاری چون "دما، رطوبت نسبی، باد، ابرناکی، تشعشع، فشار و غیره " است، عامل نوع گیاه تابع "تنوع گیاهی گسترده، نوع برگ، تعداد روزنه‌ها ومورفولوژی استوماتها، درصد سطح روزنه‌ها، رژیم باز و بسته شدن آنها، مقاومت برگ ها و استومات ها در مقابل تعرق، سطح برگ، رنگ برگ، زاویه برگ، عمق و گستره ریشه دوانی، مقاومت به خشکی، کرک‌دار بودن یا مومیایی بودن سطح برگ ، شاخص سطح برگ *(LAI)* " و عامل بالانس انرژی تابع "کل تشعشع ورودی موج کوتاه و

بلند به سطح مزرعه، انرژی حاصل از تنفس گیاه، قابلیت جذب انرژی سطح مزرعه و ضریب انعکاس آن، جریان جانبی انرژی، انرژی جابه‌جایی (کنوکسیون که موجب گرم شدن هوا می‌شود)، انرژی پنهانی، انرژی ذخیره شده در خاک، گیاه، تاسیسات و ساختمان‌های موجود در مزرعه، انرژی فتوشیمیایی (که صرف فتوسنتز می‌شود) و غیره" است، هم‌چنین است نوع خاک که به بافت، ساختمان، ثبات ساختمان، رنگ، گرمای ویژه، تخلخل، عمق و وزن مخصوص و سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و غیره، و عامل شرایط زراعی نیز به‌همین ترتیب تابع عوامل ثانویه بسیاری است و اگر این مقوله را به صورت منظم و سیستماتیک ادامه دهیم و کشدار کنیم شاید تا بی‌نهایت کش بیاید وپای عوامل درجه سوم و چهارم نیز به‌میان آید؛ به عنوان نمونه عامل ثانویه بافت خاک خود به عوامل درجه سوم مثل فرم ذرات، نوع رس، فرم منحنی تغییرات قطر ذرات و قدرت چسبندگی و حد اتربرگ، و قدرت جذب و تبالات آنیونی وکاتیونی وغیر آن بستگی پیدا می‌کند.

بدین سان، از این مقوله معلوم گردد که:

اولاً: تبخیر تعرق به‌بسیاری از عوامل بستگی دارد.

ثانیاً: این عوامل متعدد و وابستگی آنهابه هم دیگر پیچیده و بغرنج است.

ثالثاً: این عوامل وشاخه‌ها و انشعابات عوامل فرعی تابعه، وتاثیرات متقابل آنها پیچیده‌تراست.

رابعاً: عوامل مزبور، اعم از اصلی و یا عوامل فرعی تابعه و تاثیر متقابل آنها، و اثر آنها روی «تبخیر تعرق» اکثراً قابل اندازه‌گیری، و یا قابل برآورد نیست و به رقم کشیدن آنها چه بسا ناممکن است.

خامساً: برقراری رابطه بین این عوامل و تبخیر تعرق، از جنبه‌های عملی وکاربردی (که در امور مهندسی آبیاری اصل اساسی بسیار مهمی است)، بازهم مشکل‌تر است، و موضوع دست و پاگیری است.

متخصصان آبیاری و اگرونوم ها، همراه با فیزیک‌دانان نیوار و هواشناسان کشاورزی و با همکاری گیاه‌شناسان پس از یک دوره سردرگمی، از نظر روش‌شناسی علمی به روش و راه‌حل ویژه‌ای روی آوردند، و آن اینکه معادله چندین مجهولی لاینحل را، به صورت

معدله تک مجهولی قابل حل و ساده درآورند، تا سپس در مرحله بعد، چاره‌ای بیاندیشند و راه را برای حل معادله چندمجهولی هموار سازند.

در این رابطه تلاش محققان و متخصصان ذیربط در سطح جهانی، هماهنگی‌ها و هم‌فکری‌های نزدیک آنان (که یکی از مشخصه‌های اصلی و مهم در تبادلات افکار و آثار علمی و نتایج تحقیقاتی در قرن حاضراست) به تمهیداتی برای انتخاب گیاهی به عنوان «گیاه مرجع» به قرار زیر منجر شد.

انتخاب گیاه مرجع بر کدامین مبانی استوار است؟

۱- در آغاز، ودرگام اول به این فکر افتادند که آزمایشات را (مرتبط با سئوال تبخیر تعرق مزرعه چه مقداراست؟) فقط روی یک نوع گیاه انجام دهند تا عامل تنوع گیاهی حذف شود (یعنی عامل گیاه، در شرایط مشخص وتعریف شده وثابت قرار بگیرد).

۲- سپس برای اینکه عامل تغییرات پوشش گیاهی و ضریب سایه اندازی حل شود، (یعنی سایه‌اندازی نیز در شرایط مشخص و ثابت قرار بگیرد)، به گیاهی فکر کردند که در تمام دوران رشد سایه‌اندازی کامل داشته باشد.

۳- برای حذف عامل تنوع شرایط زراعی فکر کردند که کشت و کار، کاشت و داشت محصول را در شرایط اپتیمم انجام دهند (که خود هدف نهایی ومطلوب پروژه‌های آبیاری وکشت‌های آبی است).

۴- برای حذف اثر تنوع جنس خاک، و پروفیل زراعی PROFIL CULTURAL از یک‌سو و حذف اثر تغییرات مربوط به درجات مختلف رطوبت خاک از سوی دیگر، فکر کردند که پروفیل زراعی خاک را در شرایط رطوبت اپتیمم (حد ظرفیت نگهداری) قرار دهند. در این صورت تبخیر از سطح خاک مستقل از جنس خاک بوده، و سایه‌اندازی کامل نیز به این امر کمک می‌کند. از طرفی رطوبت درحد ظرفیت نگهداری، کمال مطلوب، در مدیریت پروژه‌های آبیاری نیز به‌حساب می‌آید.

۵- برای حذف اثر تغییرات ارتفاع گیاه، (و یا تعدیل آن) فکرکردند ارتفاع را درحد، و یا محدوده قابل قبولی تحت کنترل قرار دهند، ونگهدارند.

۶- برای اینکه اثر عامل دوره‌های مختلف رشد (نمو اولیه ـ نمو ثانویه و دوره‌های فعال گیاهی و رسیدن) روی تبخیر تعرق حذف شود به گیاهی فکر کردند که در آن این دوره‌ها نباشد و یا عامل تعیین کننده و موثر نباشد، و یا در اثر عمل بوته زنی (برای ثابت نگاهداشتن ارتفاع گیاه) حذف شده باشد.

۷- برای حذف عامل جریان جانبی هوا، وانتقال افقی انرژی (از عوامل جوی غیرقابل کنترل واندازه‌گیری) فکر کردند که گیاه مزبور در سطح آن چنان وسیعی کشت شود تا اثر این عامل حذف شود یا به حداقل قابل قبول برسد. (سطوح وسیع تحت پوشش گیاهی، عملاً" شبیه مناطق فاریاب ، وگستره کشت‌های آبی است).

بدین سان، با توجه به‌ملاحظات وتمهیدات فوق‌الذکر، یک مبداء مختصات تعریف شده، معین ومشخص به‌دست می‌آید، بطوریکه بتوان کلیه پارامترها و عوامل موثر درتبخیر تعرق وتغییرات آن را، نسبت به این مبداء، سنجید و مورد مقایسه و برازش قرار داد، و یا به‌بیان ریاضی، معادله چند مجهولی غیرقابل حل رابه معادله یک، و یا چند مجهولی قابل حل تبدیل کرد.

در این مرحله، گیاهی که دارای خصوصیات مزبور باشد و بتواند نقش مبداء مختصات را ایفاء نماید بنام «گیاه مرجع» یا «گیاه رفرانس» نام نهاده شد، وتبخیر تعرق انجام شده در شرایط، بالا "تبخیر تعرق گیاه مرجع" (ET_O)، (و یا تبخیر تعرق گیاه رفرانس ET_r) و یا تبخیر تعرق پتانسیل ماگزیمم (ET_{pmax}) نامیده شد.

(اصطلاح پتانسیل به‌اعتبار اینکه شرایط زراعی ورطوبت خاک درحد اپتیمم قرار دارد و«ماگزیمم» به اعتبار اینکه پوشش گیاهی کامل و روزنه‌های گیاه مرجع اکثراً باز بوده و بعکس نور در داخل بوته‌های این گیاه چندین بار منعکس می‌شود و در نتیجه انرژی بیشتری جذب می‌گردد.)

به عنوان گیاه مرجع، گیاهان چندین ساله‌ای مثل یونجه (بیشتر توسط محققان آمریکایی) وگیاه چمنی FETUQUE یاFESTUCA (بیشتر توسط محققان فرانسوی)، وسایر گیاهان چمنی سبز، کوتاه وحائز شرایط انتخاب گردید.

چه فوایدی بر پوشش گیاهی مرجع مترتب است؟

گیاه مرجع چه‌خصوصیاتی دارد؟ و چه فوایدی از آن ناشی می‌شود؟ و چگونه می‌تواند حل معما کند؟ و راه‌گشا باشد؟

جواب این سئوالات تحت عنوان " شرایط گیاه مرجع" در ۷ بند آمده است. همان گونه که گفته شد خط فکری انتخاب گیاه مرجع این بود که بسیاری از عوامل و متغیرها را حذف کنند، و یا آنها را در شرایط تعریف شده معینی به صورت استاندارد (به طوری که قابل کنترل و قابل اندازه‌گیری باشد) قرار دهند.

در صورتی که شرایط گیاه مرجع محقق شود، در این صورت تبخیر تعرق آن (تبخیر تعرق پتانسیل ماگزیمم)، به طور عمده در رابطه با آب و هوا، و عوامل جوی قرار می‌گیرد زیرا متغیرهای دیگر مثل اثر گوناگونی نوع و وارتیه گیاه، تنوع نوع خاک، اثر درجات مختلف رطوبت، اثر عامل سن وارتفاع ودرجه سایه‌اندازی، دوره‌های بحرانی و دوره‌های مختلف رشد و اثر عامل جریان های جانبی هوا و انتقال افقی انرژی و غیره حذف می‌گردد.

از این مرحله به‌بعد سئوال به‌قرار زیر مطرح گردید:

۱/۴ «تبخیر تعرق گیاه مرجع ET_O چه مقداراست؟»

«چگونه می‌توان ET_O را اندازه گیری کرد؟»

اندازه‌گیری تبخیر تعرق گیاه مرجع (در اقلیم، و محل داده شده)، مشکلی بود که با طرح ساختمان محفظه‌های قابل کنترل به نام جعبه‌های کشت، و یا لیسیمتر (LYSIMETER) حل شد. لیسمتر، عبارت است از محوطهٔ و بخش جداسازی شدهٔ (مکانیکی) مزرعه (تحت کشت گیاه مرجع)، به طوری که علاوه‌بر امکان کاشت و داشت گیاه مرجع در شرایط اپتیمم، و مطابق استانداردهای فنی توصیه شده (از نظر عملیات زراعی، وآبیاری و کنترل ارتفاع گیاه و غیره)، بتوان کلیه شرایط لیسیمتر، به‌ویژه واردات

وصد دراب آبی، رطوبت خاک لیسیمتر را به‌دقت کنترل و اندازه‌گیری کرد. از طرفی لازم ست کلیه شرایط داخل لیسیمتر، از نظر خصوصیات خاک (به‌ویژه خصوصیات فیزیکی)، گیاه مرجع که در سطح آن کاشته شده، همچنین نیروی مکشی که به بخش تحتانی منطقه وسعه ریشه‌ها (در رابطه با تخلیه آب ثقلی) اعمال می‌شود و حرکت آب در خاک و غیره، ـ شرایط طبیعی مزرعه مطابقت داشته باشد به طوری که « مشت نمونه خروار باشد ».

به ظاهر، جداسازی مکانیکی و ساختمانی، بامعیارهای معماری و بنایی، کار بسیار سهل و ساده‌ای است، ولی جداسازی با شرایط فوق‌الذکر، با اهداف کارهای تحقیقاتی، و ـ آن دقتی که باید کار دنبال شود (لیسیمتر عیناً مثل مزرعه عمل کند)، کار بسیار دشواری است، و طراحی، ساختمان، نصب سیستم و کارگذاری بخش‌های مختلف آن و طرح آزمایشات لیسیمتری ظرایف بسیار دارد.

مدیریت ایستگاه لیسیمتری نیز به جهات زیر مشکل و حائز کمال اهمیت است:

۱ـ لازم‌است رطوبت خاک داخل لیسیمتر همواره درحول وحوش ظرفیت نگهداری نگاهداشته شود وشرایط زراعی آن درحداپتیمم باشد.

۲ـ لازم‌است مزرعه‌ایکه محیط برلیسیمتر، وتحت کشت گیاه مرجع‌است، از نظر ابعاد، عملیات زراعی، آبیاری، وارتفاع یکنواخت گیاه مرجع، و هماهنگی آن با لیسیمتر، دارای شرایط استاندارد واپتیمم باشد.

۳ـ لازم‌است کار کنترل و کلیه اندازه‌گیری‌ها و یادداشت‌برداری ها با دقت زیاد، و با پیگیری بی‌وقفه طی سالهای متمادی صورت بگیرد به طوری که تحصیل ارقام قابل اعتماد و قابل اعتنا میسر باشد والا سرمایه‌گذاری های چند ساله و چند ده ساله به هدر خواهد رفت، ونتیجه مطلوب به‌دست نخواهد آمد.

۴ـ لازم است ارقام به دست آمده از لیسیمتر و نتایج تجربی با استفاده از علوم ریاضی و مدل‌های مربوطه مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد.

۵ـ لازم‌است ایستگاه هواشناسی مجهز درایستگاه لیسیمتری ایجاد وکلیه عوامل جوی به‌دقت وافر، طی سالهای متمادی همراه وهمگام با اندازه‌گیری‌های لیسیمتری رکوردگیری و ثبت، و سپس مورد تجزیه وتحلیل قرار بگیرد.

۶ـ با استفاده از داده‌های تجربی (مندرج در بند ۴ و ۵)، و با استفاده از روابط ریاضی و

مدلهای مربوطه به عنوان ابزار کار، رابطه بین داده‌های لیسیمتری (تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع ET_0) و داده‌های هواشناسی برقرار گردد، و فرمول‌هایی (که از فرمول‌های تجربی - ریاضی می‌نامیم) جهت تعیین ET_0 ارایه شود.

عده ی دیگر از محققان به ویژه متخصصان فیزیک جو، فیزیکدانان و هواشناسان کشورهای بزرگ، بیشتر با استفاده از قوانین آئرودینامیکی و با تکیه به قوانین تبخیر به صورت عام (عمل تعرق توسط گیاه و یا تبخیر از سطح آب و خاک و گیاه) رابطه بین تبخیر تعرق و داده‌های جوی را برقرار ساختند وعده دیگر نیز از روش‌های ترکیبی استفاده کردند، و رابطه ی بین تبخیر تعرق پتانسیل ماگزیمم، وپدیده تبخیر از سطوح تعریف شده، به‌کمک ضریبی، پیوند برقرار کردند.

حاصل همه این تلاش ها به ویژه در نیم قرن اخیر و درکشورهای اروپایی و آمریکا، (با توجه مختصری که ذکر شد)، همراه با تداوم کار ایستگاه‌های لیسیمتری معتبر جهانی و همراه با نتیجه آزمایشات و تحقیقات محلی و صحرایی در نقاط مختلف جهان و جمع‌بندی آنها، دهها فرمول معتبر «تجربی - ریاضی» است که سالهاست مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با این حال جهت تکمیل و تدقیق این فرمولها راه به پایان نرسیده، و هنوز کمال مطلوب به دست نیامده است و لذا اسانید فن از تلاش و کنکاش جهت به پایان بردن راه و تکامل هر چه بیشتر فرمول ها و روش ها باز نمی‌مانند، و برای حل هر چه کاملتر معما از تکاپو باز نمی‌ایستند.

از دهه ۱۹۳۰ تاکنون دهها روش و فرمول برای تعیین ET_0 توسط پژوهشگران ارایه شده است و در تمام این مدت نیز، همه آنها در عمل به بوته آزمایش گذاشته شده، و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته، و اصلاحات لازم توسط خانواده جهانی محققان، در آنها صورت پذیرفته است، وهنوز هم این بحث باهمان طراوت و تازگی و با همان اهمیت ادامه دارد و تشخیص صحت و سقم هر یک در شرایط مختلف دنیا، و یا درجه دقت هر یک، موضوع بحث و بررسی‌ها و موضوع اظهارنظرها و قضاوت های متفاوت، در مراجع تحقیقی، علمی، اجرایی و ترویجی است.

فرمولهای مختلف «تجربی - ریاضی» جهت تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع :

تعدادی از معتبرترین آنها را به‌قرار زیر می‌توان نام برد:

۱ـ فرمول تورنز وایت THORNTHWAITE

۲ـ فرمول تورک TURC

۳ـ روش پریستلی ـ تایلور PRIESTLEY - TAYLOR

۴ـ روش تشتک تبخیر PAN - EVAPORATION

۵ـ تشتک تبخیر کریستیانس CHRISTIANSEN PAN

۶ـ روش بلانی - کریدل اصلاح شده توسط موسسه حفاظت خاک آمریکا SCS BLANEY - CRIDDLE

۷ـ روش تشتک تبخیر ارایه شده در نشریه FAO-۲۴ (FAO-24PAN)

۸ـ روش پنمن اصلاح شده و ارایه شده در نشریه شماره FAO-24 FAO -24 CORRECTED PENMAN

۹ـ روش بوسینگر ـ وان باول BUSINGER - VAN BAVEL

۱۰ـ روش اوسترومکی OSTROMECKI

۱۱ـ روش ایوانف IVANOV

۱۲ـ روش هارگریوز وهمکاران HARGREAVES et al

۱۳ـ روش لیناکر LINACRE

۱۴ـ روش پاپا داکیس PAPADAKIS

۱۵ـ روش جنسن ـ هیز JENSEN - HAISE

۱۶ـ روش پنمن ـ رایت PENMAN - WRIGHT

۱۷ـ روش کریستیانسن ـ هارگریوز بنا استفاده از تشعشع رسیده به‌سطح مرزعه CHRISTIANSEN - HARGEAVES

۱۸ـ استفانز ESTEFANZ

۱۹ـ روش پنمن، ارایه‌شده در نشریه شماره FAO-24 (باضریب واحد)

FAO - 24 PENMAN (C=1)

۲۰ـروش کریستیانسن ـ هارگریوز با استفاده از تشعشع رسیده به بالای جو

۲۱ـروش مک کینگ اصلاح شده CORRECTED MAKKING METHOD

۲۲ـروش بلانی ـ کریدل ارایه شده در نشریه شماره FAO - 24

FAO - 24 BLANEY - CRIDDLE

۲۳ـروش اولیور OLIVER

۲۴ـروش مک کینگ MAKKING

۲۵ـروش بلانی ـ کریدل BLANEY - CRIDDLE

۲۶ـروش تشعشع ارایه شده در نشریه شماره FAO - 24

FAO-24 RADIATION

۲۷ـروش پنمن اصلاح شده توسط کانکا و جنسن KP

۲۸ـروش کمبرلی ـ پنمن (۱۹۷۲) KIMBERLY - PENMAN (1972)

۲۹ـروش تشتک تبخیر باضریب K_p

۳۰ـروش پنمن VPD، ۱۹۶۳ PENMAN (1963) VPD

۳۱ـروش تشتک تبخیر با ضریب KP پیشنهادی آقای کانکا،

۳۲ـروش پنمن PENMAN (1963)

۳۳ـروش جنسن ـ هیز اصلاح شده توسط آقای سامانی (۱۹۸۹)

۳۴ـروش پنمن ارایه شده توسط FAO(FAO - PPP - 17 ,PENMAN)

۳۵ـروش تشتک تبخیر باضریب K_p ارایه‌شده توسط پروت و همکاران

۳۶ـروش کمبرلی ـ پنمن ۱۹۸۲ KIMBERLY - PENMAN (1982)

و بالاخره جدیدترین و آخرین روش که معرفی آن موضوع این نشریه است روش پنمن ـ مانتیس PENMAN - MONTHEITHاست.

در این روش هارابطه تبخیر تعرق پتانسیل ماگزیمم (ETPmax یا ETOگیاه مرجع) بایک و یا چند، و یا چندین عامل جوی برقرار گردیده‌است.

تعریف تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع ET_O و گیاهان دیگر ETc

تعریف علمی تبخیر تعرق گیاه مرجع، همگام با تکامل روش‌ها و مفاهیم، کامل‌تر شده است. پنمن در سال ۱۹۴۸ تبخیر تعرق را پتانسیل ماگزیمم نامید درشرایطی که کمبود آب در خاک وجود نداشته باشد، پوشش نباتی سبز وکوتاه باشد ـ وسایه افکنی کامل باشد.

آقایان دور نبوسن و پروت (DOORENBOS, J and W. O. PRUITT) در ۱۹۷۵ تبخیر تعرق گیاه مرجع را به‌تبخیر تعرق سطح وسیع پوشیده از چمن سبز اطلاق کردند که درحال رشد فعال بوده و ارتفاع آن یکنواخت و بین ۸ تا ۱۵ سانتیمتر، و با سایه‌افکنی کامل باشد، وکمبود آب در خاک وجود نداشته باشد. کمیته منابع طبیعی ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۳ تبخیر تعرق سطوح تحت کشت گیاهان را به ارتفاع آبی اطلاق کرد که صرف تعرق گیاه ـ ساختمان نسوج گیاهی از یک سو، و صرف تبخیر از سطح خاک، باران و برف از سوی دیگر شود، این مقدار تبخیر تعرق را اصطلاحاً تبخیر تعرق واقعی (ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION یا ETa EVAPOTRASPIRATION و یا REAL EVAPOTRANSPIRATION) می‌نامند.

در صورتی که تبخیر تعرق محصول همراه با عملیات زراعی اپتیمم و رطوبت خاک مزرعه در حد اپتیمم منظور شود، آن را تبخیر تعرق پتانسیل و یا ET_P و یا ET_C، می‌نامند.

پس از اینکه تبخیر تعرق گیاه مرجع، بدان گونه که تشریح گردید، تعریف شد، و مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و فرمول‌های مربوطه ارایه شد، آخرین سئوال مربوط به آب موردنیاز گیاهان، به قرار زیر مطرح گردید:

۱/۵ ضریب همبستگی بین تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع ET_O، و تبخیر تعرق پتانسیل محصولات چه مقدار است؟

در این مرحله، تعریف تبخیر تعرق پتانسیل محصولات مطرح گردید و همانگونه که گفته شد، عبارت از تبخیر تعرق مزرعه و یا عرصهٔ تحت کشت نباتی است که عملیات زراعی کاشت وداشت آن درشرایط اپتیمم باشد، وکمبود رطوبت درخاک وجود نداشته

باشد. گواینکه درکشت‌های آبی، ملاحظات مزبور و برقراری شرایط فوق به طور کامل میسر نیست ولی در عرصه‌هایی که با روش‌های مهندسی و فنی آبیاری می‌شوند می‌توان قبول کرد که شرایط زراعی، مناسب و کمبود رطوبت خاک باید در حد مجاز باشد (اگرچه حالت اپتیمم به معنی ایده‌آل آن برقرار نباشد)، در اینجا به ناچار باید تبخیر تعرق پتانسیل را با همان چهارچوب نظری (باکمی تفاوت در مراحل کاربردی) قبول کرد.

بنابراین برای پاسخگویی به سئوال مطروحه در این مرحله لازم است K_c در رابطه $ET_c = K_c ET_o$ معلوم و مشخص شود که بعداً در این رابطه بحث خواهد شد.

تبخیر تعرق پتانسیل گیاهان بامنظور کردن بخشی از بارندگیها که مورد استفاده مزرعه قرار می‌گیرد (باران موثر E_r)، به‌عنوان آب مورد نیاز خالص نامیده می‌شود (آب مورد نیاز خالص محصول $= ET_c - E_r$).

پس از آن بحث راندمان های آبیاری به میان آمد چراکه توجه پیدا کردند که در عمل، آبیاری و انتقال آب به پهنه‌های وسیع وکشت‌های آبی و رساندن آب موردنیاز خالص به گیاه و توزیع آن در مزرعه، بدون تلفات عملی نیست و لذا یکی دیگر از سئوالات عمده به قرار زیر مطرح گردید:

۱/۶ «باران موثر و راندمان آبیاری چه مقدار است ؟»

در دنباله تاریخچه تعیین آب مورد نیاز گیاهان، در پاسخ به این سوال که : «مزرعه به چه مقدار آب نیاز دارد» پارامترهای جنبی دیگر نیز منظور شده و مورد بررسی قرار گرفته است، که مهم‌ترین آنها باران موثر و دیگری راندمان آبیاری است E_r یا باران موثر بخشی از بارندگی‌ها است که در خاک ذخیره می‌شود و مورد استفاده گیاه قرار می‌گیرد. معمولاً در پروژه‌های آبیاری $(ET_c - E_r)$، به عنوان آب موردنیاز خالص درنظر گرفته می‌شود. برای تعیین مقادیر باران موثر در شرایط آب و هوایی و رژیم‌های بارندگی مختلف تلاش هایی توسط متخصصان فن‌آبیاری و هیدرولوژی انجام گرفته است و جداول و نمودارهای کاربردی نیز تنظیم و ارایه گردیده است که به طور عمده براساس مقدار بارندگی ماهانه، بدون درنظرگرفتن توزیع زمانی و شدت آن و بدون توجه و مداقه دقیق‌تر و بیشتر در احوال

سایر شرایط موثر (مثل پوشش نباتی، توپوگرافی و شیب، قابلیت نفوذپذیری خاک و غیره)، به دست می آید. مرحله آخر جهت تعیین آب موردنیاز محصولات، (که عملاً باید در مزرعه توزیع شود) منظور کردن راندمان آبیاری E_a است، و بابی‌است که در نیم قرن اخیر، به موازات بررسی های دیگر، مرتبط با آب موردنیاز، در این زمینه نیز تلاش‌ها و بررسی های بسیاری انجام شده، و راندمان های آبیاری تعریف و تعیین گردیده است که با در نظر گرفتن این راندمان‌ها «آب موردنیاز واقعی» مزرعه و منطقه تحت کشت آبی، و شبکه انتقال مربوط و ظرفیت منابع آب مورد لزوم محاسبه می‌شود.

تلاش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده و پاسخ‌های کارسازی نیز به دست آمده است ولی هنوز هم باب بحث باران موثر و راندمان‌ها باز است و تامل و تعمق در این عرصه باز هم ادامه دارد.

۱/۷ پاسخ به پرسش‌های مطروحه :

به هر حال ازنیم قرن به این سو، با توجه به برآوردهای ET_0، K_C و ET_C و E_a (باران موثر)، و انواع راندمان‌های آبیاری، پاسخ به سئوالی که در اواخر قرن نوزدهم در رابطه با آب موردنیاز گیاهان (محصولات کشاورزی در واحدهای زراعی و در عرصه‌های طبیعی) مطرح شد، در حد قابل قبول داده شده‌است و در تمام نقاط جهان دهه‌های متمادی است که از این روش‌ها در پروژه‌های بزرگ آبیاری و آبرسانی استفاده‌های شایان و ذی‌قیمت به عمل آمده و می آید.

ولی این همه نشانه و دلیل پایان راه نیست وهمانگونه که گفته شد حکایت هم‌چنان باقی است، و تکامل این روش‌ها یکی از مبرم‌ترین وظایف محافل علمی و تحقیقاتی است و در همین راستا است که در این نشریه، به عنوان یک ضرورت، جهات نظری و کاربردی جدیدترین و کاراترین روش تخمین ET_0 یعنی روش پنمن مانتیس مشروحاً ارایه‌می‌گردد.

در ایران برای اولین بار آب موردنیاز گیاهان برای تمام مناطق کشور و برای کشت‌های عمده، با استفاده از فرمول بلانی کریدل، در سال ۱۳۴۹ توسط گروه مهندسی آبیاری و زه کشی به مدیریت استاد ومدیر سابق این گروه شادروان روحا... فرزانه، توسط آقای

مهندس فردوسیان و با همکاری و معاضدت نگارنده و با اعتبار اداره کل مهندسی زراعی سابق در سه مجلد، برای دو سطح راندمان آبیاری ۵۰ و ۶۰ درصد محاسبه گردید. در آن مقطع یک بررسی معتبرترین کاری بود که انجام پذیرفت، ولی متاسفانه کلیه کارهایی که در کشور در رابطه با آب موردنیاز گیاهان، هرجا و از هر قبیل که انجام گرفته است بیشتر سلسله‌ای و موضعی و مقطعی بوده، و مثل بسیاری از زمینه‌های دیگر، هیچگاه تداوم و تکامل نیافته و ادامه منظم یک خط فکری و یک جریان نظام یافته واحد هیچگاه در میان نبوده است و این نقیصه بسیاری از تلاش‌های ما را در ایران کم رنگ و گاه بی‌مقدار کرده است. ما از سه فرقه این سو از روش‌های مربوط به تعیین آب موردنیاز گیاهان، (مبتنی بر تحمیل درصدی معین راندمان آبیاری، ET_0 و K_c) استفاده کرده‌ایم، بسیاری تحقیقات مستمر نیز در ایستگاه‌های تحقیقاتی (به ویژه توسط دانشگاه‌ها و وزارت کشاورزی)، و یا بررسی هایی در چهارچوب پایان‌نامه‌ها و یا به صورت مقالات تحلیلی توسط اساتید و کارشناسان انجام گردیده‌است و ایستگاه‌های لیسیمتری نیز، با همه مشکلات و نارسایی‌ها از همه مراحل طرحی، ساختمان و نصب، مدیریت، دقت و پی‌گیری اندازه‌گیری‌ها و مسائل فنی تک اندازه‌گیری و غیره) تجربه شده است، ولی همان گونه که گفته شد متاسفانه با وجود کارهای بسیار (گاه معتبر و با ارزش) همه به صورت پراکنده ارایه شده و با وجود همه تلاش‌ها و سرمایه‌گذاری‌های زیاد نتوانسته‌ایم، به یک نتیجه واحد (حتی اگر هم غیردقیق و غیرمطمئن) که در آن همه کارشناسان اعلم و خبرگان در سطح کشور متحدالقول بوده باشیم، و هماهنگی و همدلی و همزبانی فنی داشته باشیم، برسیم، هیچگاه به یک تصمیم متمرکز و منسجم که از یک مرکز کارشناسی و از یک مرجع خبرگان کشوری هدایت شده باشد نرسیده‌ایم تا بتوانیم به صورت استاندارد و متحدالشکل فتوا بدهیم که در شرایط و مناطق مختلف کشور ترجیحاً از چه روش و از چه فرمولی و از چه داده‌هایی استفاده گردد و نیز هیچگاه یک خط فکری تکاملی را با تداوم لازم دنبال نکرده‌ایم (در این مرتگر زنده و نسل او که در امر آبیاری، آب و خاک و زمینه‌های مرتبط و هواشناسی کشاورزی به عنوان متولیان، عمری به سر آورده‌ایم، قصور بسیار داریم).

در مورد استفاده از روش‌های مختلف به صورت سلیقه‌ای ادامه داشت تا اینکه سروش عالم غیب بسیاری خوش داد. وسازمان خواربارجهانی (FAO) در اواخر دهه ۱۹۷۰

باانفاس خوش خود از راه رسید و در نشریه شماره ۲۴ خود، از میان بیش از سی روش متداول جهانی، ۵ روش از معتبرترین، کارآترین و کاربردی ترین آنها را، به جهانیان و به‌ویژه کشورهای جهان سوم و با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ارایه داد. در این نشریه براساس یک جمع بندی از کلیه تحقیقات و تجربیات در مقیاس جهانی توسط خبرگان طراز اول دنیاروش‌های پنمن (مشهور به‌پنمن *FAO-24*)، پنمن اصلاح شده، بلانی کریدل اصلاح شده، روش تشتک تبخیر، روش تشعشع، به صورت کاربردی، با ذکر و حل مثال‌های عملی، همراه با جداول ، آباکها و نمودارها و ارایه راه‌حل کاربردی در رابطه با ترسیم منحنی‌های K_c (که یکی از مشکل‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل کار است) مطرح شده‌است، و سالها است که ازاین روش در کشورهای مختلف از جمله ایران استفاده می‌شود. ولی به علت اینکه درکشور ما، کار به صورت منظم و منسجم از مراکز علمی و تحقیقاتی هدایت نمی‌شود، لذا در انتخاب هریک از ۵ روش بازهم رفتار سلیقه‌ای حاکم‌است (و حتی گاه از روش‌های خارج از این محدوده نیز، به دلخواه، و براساس استنباطات شخصی استفاده می‌شود) با این حال پس از انتشار نشریه مزبور وضعیت بهتر از سابق دنبال شده است. در اوایل دهه ۱۹۹۰، *FAO* که راه را به‌طور مستمر ادامه می‌دهد، جمع بندی مجددی از نتایج حاصله در مقیاس جهانی از کاربرد این روش‌ها، و سایر تجربیات و تحقیقات و فرمول‌های تکامل یافته و اصلاح شده دیگر به عمل آورد، و در آن خبرگان آبیاری و هواشناسی و متخصصان ذی‌ربط دنیا روی جدیدترین و کامل‌ترین و کاراترین فرمول، برتری ها و نقاط قوت آن در اکثر شرایط، و راه تکاملی که می‌پیماید یعنی روش پنمن ـ مانتیس تاکید کردند و آن را توصیه نمودند.

هدف این نشریه (شماره ۳) به‌طور عمده آنست که این روش به صورت نظری و کاربردی، و به صورت علمی و اصولی از تریبون معتبری چون کمیته ملی آبیاری و زهکشی، که اولین بار توسط بخش جوان این کمیته، طی مقاله‌ای در هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران (۱ تا۲ آبانماه ۷۵) مطرح شد، (و آوای خوش آن برای اولین بار از بلندگوی یک مرجع علمی در سطح کشور بلند شد وبحث‌های بسیاری را برانگیخت)، با صدای باز هم رساتر و با صلابت و اصالت بیشتری عنوان شود تا کارشناسان را در سطح کشور هدایت گر باشد، و از پراکنده‌کاری‌ها، و رفتارهای سلیقه‌ای تا

حدودی جلوگیری کند.

مقاله بخش جوان پیام مهمی داشت دایر به‌اینکه روش پنمن-مانتیس جدیدترین و کارآمدترین فرمول و روشی است که در بسیاری از نقاط جهان و در ایران کارآیی آن براساس مقایسه نتایج و برآوردهای نتایج حاصل از آن با داده‌ها و اندازه‌گیری‌های لیسیمتری معتبر دنیا (همچنین نظم تغییرات ET_0 در ماه‌های مختلف)، به تایید رسیده است. در این مقاله گرایش منحنی به سوی مصرف آب کمتر نیز امتیاز دیگری برای شرایط ایران، عنوان گردید.

ارایه این مقاله در سمینار بحث‌های موافق و مخالف را برانگیخت که خود نشانه اهمیت موضوع بود. گروه کار آب موردنیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی کمیته ملی آبیاری و زهکشی که نسبت به جهت‌گیری کلی این مقاله نظر موافق داشت، بحث‌هایی را که در اطراف آن انجام شد به فال نیک گرفت و بر آن شد که در این مورد تامل و تفحص بیشتر نماید و نظر کارشناسان و خبرگان اعلم ایرانی و خارجی را در تمام بخش ها اعم از مراجع علمی، تحقیقاتی، اجرایی در این مورد جو یا شود و این روش را از طریق تریبون وزین کمیته ملی آبیاری و زهکشی، به جهات نظری و کاربردی معرفی نماید، درضمن ET_O تخمینی با روش پنمن مانتیس را برای ایستگاه‌های پرآمار ایران، براساس داده‌های هواشناسی و برنامه کامپیوتری FAO محاسبه و ارایه نماید.

در این راستا، کارهای زیر صورت پذیرفت:

۲ـ تنظیم پرسشنامه، تکمیل آن توسط کارشناسان ایرانی و تحلیل آن:

در این مرحله پرسشنامه‌هایی تنظیم گردید و به کلیه مراجع ذیصلاح ارسال شد، وپاسخها مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفت. در پرسشنامه‌ها نظر کارشناسان وخبرگان ایرانی در رابطه با مناسبترین روش تعیین آب موردنیاز گیاهان سئوال شده‌بود.

از تجزیه وتحلیل پاسخها معلوم گردید:

۱ـ ۴۸/۵٪ از پرسش شوندگان ایرانی به این عقیده استوارند و پا می‌فشارند که روش پنمن مانتیس در شرایط ایران (برای ایستگاه‌های پرآمار)، بهترین است و کارشناسان مهندسان مشاور و بخش اجرا از آن استفاده می‌کنند، و اساتید آن را توصیه می‌نمایند.

۲ـ بقیه کارشناسان جواب‌های پراکنده و متفرقی را عنوان نمودند و توزیع آراء به‌قرار زیر به‌دست آمد:

- بلانی کریدل اصلاح شده از هر قبیل، و اصلاح شده توسط داده‌های لیسیمتری ۱۲٪ آراء
- بلانی کریدل ۱۰/۳٪ آراء
- پنمن اصلاح شده *FAO*: ۱۰/۳٪ آراء
- روش تشتک تبخیر ۵/۲٪ آراء
- جنسن هیز ۵/۲٪
- بلانی کریدل اصلاح شده توسط *SCS* (سرویس حفاظت خاک آمریکا) ۳/۴٪ آراء
- پنمن (باتقدم روش هم اقلیمی) ۳/۴٪ آراء
- روش تورک ۱/۷٪ آراء

از ارقام به‌دست آمده نتیجه می‌شود:

۱ـ حدود ۵۰٪ کارشناسان روش پنمن مانتیس را تائید می‌کنند.

۲ـ آراء پراکنده ۵۰٪ بقیه کارشناسان بخوبی نشان می‌دهد که درصد قابل ملاحظه‌ای از کارشناسان ایرانی هنوز هم از روش پنمن مانتیس بی‌اطلاع هستند، حتی درصدی نیز از روش‌های انسجام یافته، قابل‌قبول و توصیه شده *FAO-24* نیز

استفاده نمی‌کنند و برای ایستگاه‌های پرآمار روش‌های بلانی کریدل ـ ترک ـ جنسن هیز وبلانی کریدل اصلاح شده توسط *SCS* را مناسبترین اعلام می‌نمایند.

۳ـ موارد مندرج دربند ۲، تاکیدی‌است برضرورت معرفی روش پنمن مانتیس درایران.

جهت اطلاع مستند از نظر کارشناسان اعلم وفتاوی اساتید اصلح در سطح جهان، بهتر آن دیدیم که غیر از تماس های مستقیم با این مراجع، آخرین منابع و نشریات علمی را در رابطه با صلاحیت و حقانیت روش پنمن مانتیس، از جمله نتیجه گردهمایی خبرگان امر از هفت کشور جهان در رم (در سال ۱۹۹۰) که توسط *FAO* سازمان‌دهی و برگزار شده است، و هم‌چنین آخرین تایپدیه‌ها و مقالات علمی حول این مسئله از جمله نشریه وزین انجمن مهندسی زراعی آمریکا *(ASAE)* (موضوع مقالات ارایه شده در کنفرانس بین‌المللی در رابطه با « تبخیر تعرق» و برنامه‌ریزی آبیاری برگزار شده توسط کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی، ۳ تا۶نوامبر ۱۹۹۶)، را منعکس کنیم.

نتایج به‌دست آمده از این بررسی سیستماتیک، بدان گونه که در این نشریه خواهد آمد، و خوانندگان عزیز توجه خواهند فرمود همگی موید این واقعیت است که روش پنمن مانتیس می‌تواند در اکثر مناطق و ایستگاه‌های پرآمار ایران، به دلایل فنی، نظری وکاربردی موجه باشد، و در مقطع کنونی به عنوان بهترین روش مورد استفاده قرار بگیرد، و لذا ضرورت انتقال این خط فکری، و این طرز تفکر، و نحوه برخورد با آن، به کارشناسان ایرانی، (از مقاله بخش جوان کمیته ملی آبیاری و زهکشی گرفته، تا نظر کارشناسان ایرانی و خارجی ذیصلاح)، تدوین و انتشار نشریه شماره ۳ را، با فوریت و ضرورت بیشتر، الزام‌آور نمود، به ویژه که در ضمیمه این نشریه، ET_O محاسبه شده با روش پنمن مانتیس برای همه ایستگاه‌های پرآمار ایران، که داده‌های هواشناسی و برنامه کامپیوتری آن توسط *FAO* فراهم آمده است، توسط گروه کارآب موردنیاز ومدیریت محصولات زراعی محاسبه شده، همراه با منحنی تغییرات ماهانهٔ متوسط ET_O روزانه، برای ماه‌های مختلف سال و برای هر یک از ایستگاهها در اختیار علاقمندان قرار می‌گیرد.

لازم به یادآوری است، همان گونه که در این نشریه خواهد آمد، آقایان پنمن ومانتیس درروش ترکیبی و تکمیلی خود ونوآوریهای بسیار، تحول بزرگی نیز در رابطه با مبداء مختصات، که از آن به‌عنوان گیاه مرجع یاد شد، (وکلیه اساتید، تا عصر پنمن مانتیس آن را از میان گیاهان واقعی مثل یونجه و چمن سبز و غیره انتخاب می‌کردند)، به وجود آوردند،

و آن را به صورت یک گیاه و مدل فرضی، با مشخصات استاندارد، به عنوان «تبخیر تعرق مرجع استاندارد» تعریف کردند و در محاسبات خود وارد نمودند که خود اصالت باز هم بیشتری نسبت به‌تبخیر تعرق گیاه مرجع‌دارا است واصولیت آن برای مرجعیت باز هم بیشتراست.

همانگونه که گفته شد یکی از پیچیده‌ترین مراحل کار مربوط به تعیین آب موردنیاز گیاهان این بوده است که نتایج تبخیر تعرق مرجع ET_O، چگونه و با چه ضریبی با متغیرهای تنوع گیاهی، دوره‌های مختلف نمو (از نظر سایه‌اندازی)، تنوع گونه و واریته‌های گیاهی، دوره‌های رشد فعال و دوره‌های بحرانی گیاه (دوره‌های گلدهی و باروری)، رطوبت خاک، نوع خاک و برنامه‌ریزی آبیاری ارتباط داده شود.

معادله مربوطه به قرار زیر نوشته شد: $ET_C = K_c ET_O$

که در آن ET_C تبخیر تعرق پتانسیل محصول مورد نظراست و K_C ضریب گیاهی است که لازم است برای هریک از محصولات و گیاهان (اعم از زراعی، باغی، زینتی، و یا درختان غیر مثمر و فضای سبز و غیره)، و برای دوره‌های مختلف رشد (از مرحله جوانه‌زنی تارسیدن محصول) مشخص گردد تا ET_C از معادله فوق حاصل شود. در اینجا، عملاً سخن از منحنی تغییرات K_C در طول دوران رشد است.

دشواری تعیین K_C مربوط به تعدد متغیرهای کمی و کیفی، (قابل اندازه‌گیری و یا غیر قابل اندازه‌گیری) موثر در آن است. زیرا به جز شرایط زراعی، و شرط قرار گرفتن رطوبت درحد اپتیمم (تقریباً نزدیک به شرایط گیاه مرجع و با قبول این اصل که کشت‌های آبی برمبنای معیارهای مهندسی و فنی انجام می‌گیرد)، مشکل بقیه متغیرها که قبلاً به آنها اشاره شد، هم چنان به جای خود باقی است. از طرفی در عمل شرط رطوبت اپتیمم خاک که در سطح در معرض تبخیر مستقیم، (به ویژه در مراحل اول رشد که پوشش گیاهی کامل نیست) قرار می‌گیرد، جز یک الی دو روز پس از آبیاری چندان برقرار نیست، به دلیل پیچیدگی‌های مزبور طی نیم قرن اخیر تلاش‌های وسیعی در ارتباط با تعیین منحنی تغییرات K_C انجام پذیرفته است. پایه و اساس این بررسی‌ها، به گونه‌ای که قابل اعتماد باشد، به‌طور عمده در مراکز و در ایستگاه‌های لیسیمتری معتبر جهان (به وسیله لیسیمتر) صورت پذیرفته است. در درجه دوم، ازنظر دقت کار، برآورد K_C براساس تحقیقات وآزمایشات محلی در مزارع (با برقراری شرایط زراعی اپتیمم، و شرایط رطوبت خاک

نزدیک به اپتیمم) مورد بررسی قرار گرفته است و مجموعه همه این تلاش‌ها را FAO در نشریه ۲۴ ارایه داده است

معمولاً دوران رشد به چهار دوره نمو اولیه، نمو ثانویه، دوران رشد فعال و دوران رسیدن (پختگی) تقسیم می‌شود. دوران نمو اولیه وثانویه، واثر آن روی K_C بیشتر درارتباط با متغیر سایه‌افکنی پوشش گیاهی (نمو اولیه تا ۱۰٪ ومرحله نموثانویه تا ۸۰٪) و در دوران رشد فعال بیشترین اثر آن روی K_C، در رابطه با دوره‌های بحرانی (دوره‌هایی مثل گلدهی، باردهی وباروری ونیاز بیشتر گیاه به آب) قرار دارد. دوران رسیدن و اثر آن روی K_C، بیشتر در رابطه با نیاز کمتر گیاه به آب (وگاه در رابطه با نیاز به تنش آبی جهت وارد آوردن نوعی شوک به گیاه از این طریق) است.

نشریه FAO - 24 برای محصولات اصلی، جداولی ارایه داده است که در آن ها طول دوران رشد از یک سو، و طول دوره‌های نمو اولیه، ثانویه، دوران رسیدن، از سوی دیگر آمده است. هم‌چنین دو سری ارقام مربوط به K_{C2} و K_{C3}(K_{C2}مربوط به دوره نمو ثانویه وحدود ۱۰ الی ۱۵٪ کمتر از K_C ماگزیمم مربوط به دوره رشد فعال، و K_{C3} مربوط به دوره رسیدن محصول) ارایه شده است. در هر محل K_{C1} مربوط به دوره نمو اولیه براساس تواتر و فواصل آبیاری (و یا بارندگی در مناطق مرطوب) و ET_O مربوط به این دوره، و نموداری که در نشریه فوق‌الذکر ارایه شده است به‌دست می‌آید و بر این اساس منحنی K_C، با در دست داشتن داده‌های مزبور، ترسیم می‌شود، که K_{C1} و K_{C3} در روی منحنی و K_{cmax} (نقطه ماگزیمم منحنی) کمی بالاتر از K_{c2} قرار می‌گیرد.

کارهای تکمیلی بسیار ارزشمندی که در سالهای اخیر توسط پنمن مانتیس در رابطه با ضریب گیاهی، و براساس مقاومت استومات های گیاهی، و خاک و اتمسفر در مقابل تبخیر انجام گرفته است مکتبی را بنیان گذاشته، و بابی را باز کرده است که در آینده نه چندان دور K_C و محاسبات مربوطه براساس ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ در فرمول پنمن‌مانتیس ادغام خواهد شد که به آن روش «یک مرحله‌ای» نام نهاده شده است، و در حال حاضر برای استفاده از این روش، برای هر نوع گیاه به تحقیقات محلی نیاز وجود دارد.

ولی تحول تازه‌ای که درمحاسبه وبرآورد K_C درسالهای اخیر انجام گرفته‌است مربوط به‌دخالت دادن پارامترهای جوی جهت تکمیل روش ارایه‌شده توسط FAO است.

۳ـ شرحی مختصر ومستخرج از مقاله بخش جوان کمیته ملی آبیاری و زهکشی، موضوع مقایسه روش پنمن ـ مانتیس با سایر روشها، جهت محاسبه ET_O درچند منطقه ایران[۱] توسط: مهندس محمدرضاانتصاری و همکاران[۲].

به‌منظور محاسبه نیاز آبی محصولات، طی چندین دهه اخیر روش‌های متعدد و مختلف اعم از ساده (مانند روش تشتک) و یا کامل (مانند روش پنمن) و یا ترکیبی (مانند روش پنمن-مانتیس) ارایه شده است.

سازمان خواربار جهانی *FAO* در سال ۱۹۷۷ در نشریه ۲۴ خود استفاده از پنج روش تشتک، پنمن،پنمن اصلاح شده، تشعشع، و بلانی کریدل اصلاح شده را توصیه نمود. هریک از این روش‌ها پاره‌ای داده‌های اقلیمی را طلب می‌کند تا بتوان ET_O را محاسبه نمود.

فرمول پنمن، دیگر بار در سال ۱۹۸۶ توسط مانتیس اصلاح گردید تا پاره‌ای از مشکلات روش "پنمن اصلاح شده" را حل نماید.

اخیراً سازمان خواربار جهانی روش پنمن ـ مانتیس را جهت محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل ترجیحاً توصیه و در برنامه تعیین آب موردنیاز (*CROPWAT*) از این روش بهره جسته‌است.

این روش درپاره‌ای از نقاط ایران که مورد بررسی قرار گرفته، پایین‌ترین رقم را، در مقایسه با سایر روش‌های توصیه شده در نشریه *FAO-24* نشان می‌دهد و دارای منحنی تغییرات منظم‌تری‌است که خود شایان توجه است.

در این بررسی تبخیر تعرق پتانسیل مرجع (ET_O) درچند نقطه از ایران با توجه به آمارهای اقلیمی، با روش پنمن ـ مانتیس همراه با روش‌های توصیه شده *FAO-24* محاسبه

---

۱ - ارائه شده به‌هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۱ تا ۲ آبان‌ماه ۱۳۷۵ـ تهران.

۲ - آقایان مهندس نوروزی، مهندس توکلی ، مهندس سلامت و مهندس احسانی

و مقایسه گردیده‌است، و قابلیت اتکاء به این روش تجزیه وتحلیل گردیده، و در ضمن در رابطه با تحولی که این روش می‌تواند در پروژه‌های تامین آب کشاورزی ایجاد نماید بحث گردیده‌است.

هم‌اکنون در طرح‌های آبیاری از روش‌های تشتک، بلانی کریدل اصلاح شده، پنمن، پنمن اصلاح شده، تشعشع وروش پنمن ـ مانتیس استفاده می‌شود.

روش بلانی کریدل اصلاح شده از آمارهای اندازه‌گیری شده درجه حرارت، تخمین رطوبت، باد، و ساعات آفتابی استفاده می‌نماید. روش تشعشع از آمارهای اندازه‌گیری شده درجه حرارت و تشعشع (در صورت موجود بودن) و آمارهای تخمینی باد و رطوبت بهره می‌گیرد. روش پنمن مانتیس از پارامترهای درجه حرارت، رطوبت، باد، تشعشع و جریان گرمایی خاک استفاده می‌نماید.

سازمان خواربار جهانی، روش پنمن ـ مانتیس را به‌دلایل زیر بیش از همه توصیه نموده‌است:

۱ـ تکاء آن به پارامترهای فیزیکی، بیشتر اززروش‌های فوق‌الذکر

۲ـ تطابق بیشتر و بهتر آن باداده‌های لیسیمتری

تشک درچند اقلیم ایران، ویک اقلیم درکالیفرنیا روش پنمن ـ مانتیس را همراه باروش‌های دیگر مورد محاسبه ومقایسه قرار می‌دهیم.

تجربیات جهانی:

سازمان خواربار جهانی FAO در سال ۱۹۹۲ در برنامه کامپیوتری محاسبه نیاز آبی محصولات (CROPWAT) از روش پنمن – مانتیس جهت محاسبه تبخیر تعرق استفاده نموده و براساس آن یک برنامه جامع کامپیوتری را ارایه داده‌است. این برنامه با استفاده از پارامترهای اقلیمی بحث شده، میزان تبخیر تعرق را به روش پنمن ـ مانتیس محاسبه می‌نماید. متعاقب آن در سال ۱۹۹۴ سازمان مذکور در برنامه کامپیوتری CLIMWAT FOR CROPWAT صحه مجددی براین روش گذاشته، ضمن آن‌که آمارهای اقلیمی موردنیاز جهت اجرای برنامه CROPWAT در کشورهای مختلف از جمله ایران را نیز

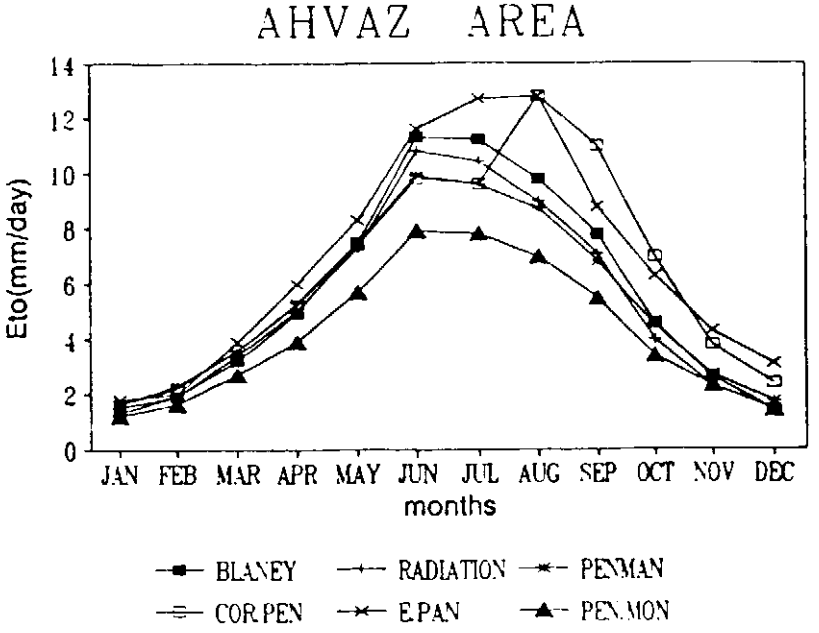
ارایه داده است. در سال‌های اخیر سازمان خواروبار جهانی به طور غیرمستقیم اصرار بسیاری جهت استفاده از روش پنمن ـ مانتیس نموده‌است. این روش همچنین توسط کمیته ملی آبیاری و زهکشی آمریکا به عنوان یک روش استاندارد ارایه‌شده‌است.

مناطق مورد بررسی

مناطق مورد بررسی شامل اهواز در استان خوزستان، ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی، بابلسر در استان مازندران می‌باشند. از طرف دیگر نتایج به دست آمده با یک منطقه در کالیفرنیا نیز مقایسه شده‌است.

نتایج بدست آمده

الف- در منطقه خوزستان (شکل ۱) محاسبات مذکور برای ناحیه اهواز انجام پذیرفت. عرض جغرافیایی ۳۱/۲ و ارتفاع از سطح دریا ۲۰ متر بود. آمارهای بلند مدت از منطقه قابل دسترس بود. متوسط تبخیر تعرق پتانسیل روزانه با روش بلانی کریدل اصلاح شده ۵/۶۳ میلی متر، با روش تشعشع ۵/۳۶ میلی متر، روش پنمن ۵/۳۵ میلی متر پنمن اصلاح شده ۵/۲۸ میلی متر و تشتک تبخیر ۶/۹ میلی‌متر می‌باشد و اما روش پنمن مانتیس رقم ۴/۲۶ میلی متر را نشان می‌دهد که از متوسط روزانه همه روش‌ها کمتر می‌باشد. کل تبخیر تعرق پتانسیل سالانه به روش بلانی‌کریدل اصلاح شده ۲۰۰۴/۲ میلی‌متر، روش تشعشع ۱۹۵۶/۴ میلی‌متر، روش پنمن ۱۹۵۲/۷ میلی‌متر، پنمن‌اصلاح شده ۱۹۲۷/۲میلی‌متر و تشتک تبخیر ۲۵۱۸/۵ میلی‌متر بود و اما کل تبخیر تعرق پتانسیل سالانه روش پنمن‌مانتیس ۱۵۵۴/۹ میلی‌متر محاسبه گردید که در اینجا نیز با کلیه روش‌های مذکور تفاوت زیادی داشته و کمترین رقم را نشان داده است و بیشترین رقم متعلق به روش تشتک تبخیر می‌باشد. نتایج داده‌ها در شکل مربوطه نشان داده شده‌است. همان گونه که در منحنی مذکور مشهود است بقیه روش‌ها بین روش تشتک تبخیر و پنمن مانتیس در حال نوسان می‌باشند.



شکل شماره ۱ ـ مقایسه روش پنمن مانتیس با سایر روش ها در خوزستان

ب ـ در آذربایجان‌غربی و در منطقه ارومیه آمارهای بلندمدت در اختیار بود. لذا این منطقه نیز مورد آزمایش قرارگرفت. عرض جغرافیایی ایستگاه موردنظر ۳۷/۳ وارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۴۰ متر می‌باشد. در این منطقه متوسط تبخیر تعرق پتانسیل روزانه به روش‌های بلانی‌کریدل اصلاح شده ۲/۹۹ میلی‌متر، تشعشع ۳/۹۵ میلی‌متر، پنمن ۳/۴۶ میلی‌متر، پنمن اصلاح شده ۳/۵۳ میلی‌متر و تشتک تبخیر ۳/۰۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شد واما روش پنمن‌مانتیس رقم ۲/۸ میلی‌متر را نشان داد که از متوسط روزانه همهٔ روش‌ها کمتر می‌باشد.

میزان تبخیر تعرق پتانسیل سالانه با روش‌های بلانی‌کریدل اصلاح شده ۱۰۹۱/۳ میلی‌متر، تشعشع ۱۴۴۱/۷ میلی‌متر، پنمن ۱۲۶۲/۹ میلی‌متر، پنمن اصلاح شده ۱۲۸۸/۵ میلی‌متر و تشتک تبخیر ۱۱۲۴/۲ میلی‌متر محاسبه گردید. اما کل تبخیر

تعرق پتانسیل سالانه روش پنمن مانتیس ۱۰۲۲ میلی‌متر محاسبه گردید که از همه پایین‌تر بود. در ارومیه برخلاف خوزستان بیشترین رقم متعلق به روش تشعشع می‌باشد در حالی که در خوزستان بیشترین رقم متعلق به روش تشتک تبخیربود. لازم به ذکراست که نمی‌توان به ارقام روش بلانی‌کریدل اصلاح شده در منطقه اتکا نمود. توصیه شده‌است که در مناطق ساحلی از این روش استفاده نگردد نتایج داده‌ها در شکل ۲ مربوطه نمایش داده شده‌است.

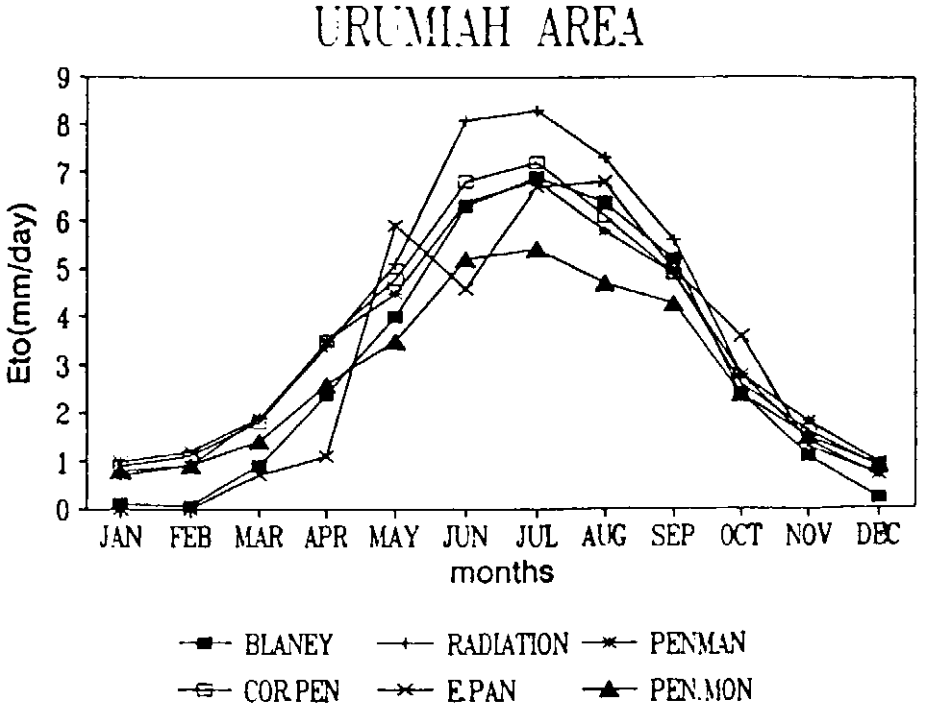
ج - دراستان مازندران (شکل ۳) برنامه برای ایستگاه بابلسر اجرا گردید عرض جغرافیایی منطقه ۳۶/۴۳ وارتفاع ۳۱ متر ازسطح دریا می‌باشد. متوسط تبخیر تعرق پتانسیل روزانه با روش بلانی‌کریدل اصلاح شده ۲/۵۸ میلی‌متر، تشعشع ۳/۲۷ میلی‌متر، پنمن ۲/۹۸ میلی‌متر می‌باشد[1] واما روش پنمن مانتیس رقم ۲/۳۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. متوسط سالانه تبخیر تعرق به روش بلانی‌کریدل اصلاح شده ۹۴۱ میلی‌متر، تشعشع ۱۱۹۳ میلی‌متر، پنمن ۱۰۹۵ میلی‌متر، پنمن اصلاح شده ۱۱۶۸ میلی‌متر و روش پنمن مانتیس ۸۵۶ میلی‌متر را از خود نشان‌داد. با توجه به این موضوع که استفاده از روش بلانی‌کریدل اصلاح شده در نواحی ساحلی توصیه نشده‌است در این منطقه نیز روش پنمن مانتیس از روش‌های پنمن، تشعشع وبلانی‌کریدل رقم پایین‌تری را از خود نشان می‌دهد.

د - جهت بررسی دقیق تر، روش‌های مذکور برای منطقه‌ای با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ارتفاع ۳۱ متر از سطح دریا در کالیفرنیا به اجرا در آمد. لازم به ذکراست منطقه مذکور ساحلی نمی‌باشد لذا محدودیتی برای استفاده از روش بلانی‌کریدل اصلاح شده ایجاد نمی‌نماید. متوسط تبخیر تعرق پتانسیل روزانه با روش بلانی کریدل اصلاح شده ۶/۳۵میلی‌متر، تشعشع ۶/۰۱ میلی‌متر، پنمن ۵/۹ میلی‌متر، پنمن اصلاح شده ۵/۸۷ میلی‌متر و تشتک تبخیر ۵/۱۴ میلی‌متر می‌باشد و اما متوسط روزانه به روش پنمن‌مانتیس رقم ۴/۸ میلی‌متر محاسبه گردید. دراینجا نیز کمترین مقدار متعلق به روش پنمن مانتیس می‌باشد.کل تبخیر تعرق پتانسیل سالانه

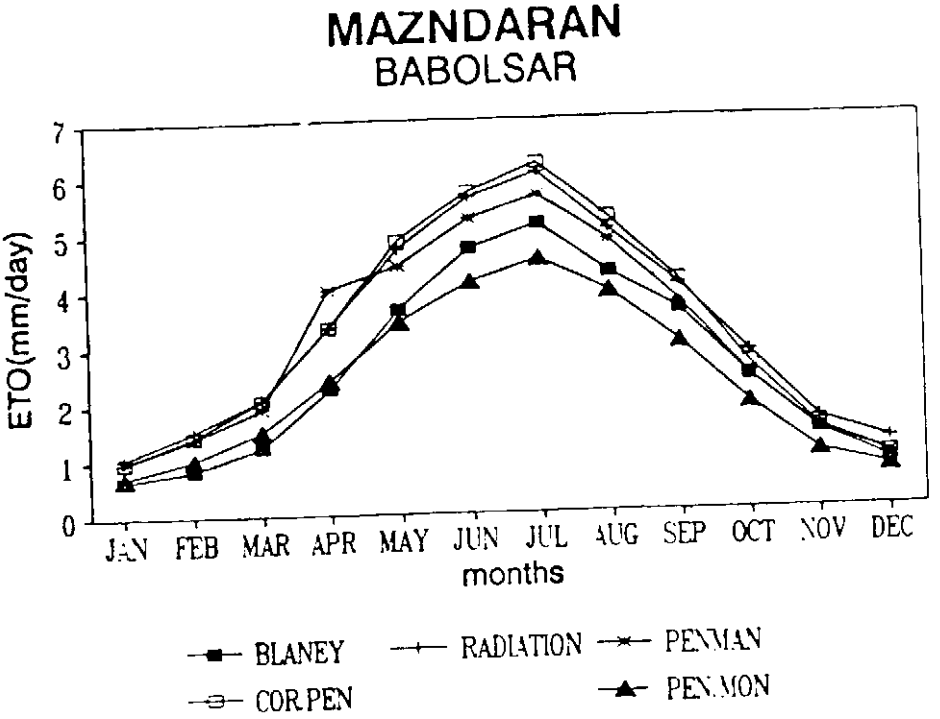
---

۱ - مردقیقی درموردتبخیر ازتشتک دردسترس نمی‌باشد.

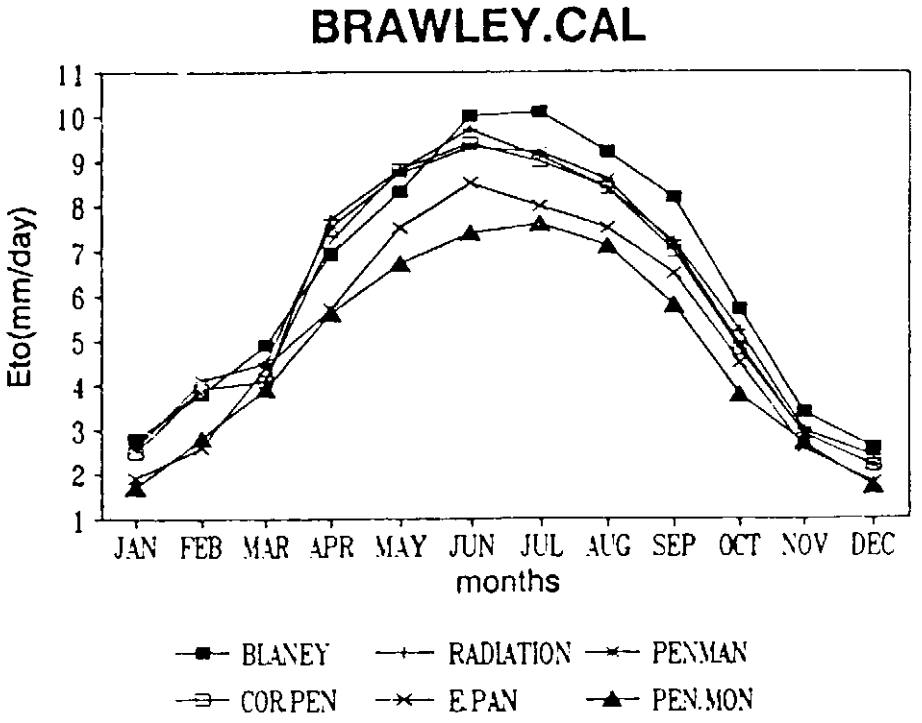
با روش بلانی‌کریدل اصلاح شده ۲۳۱۷ میلی‌متر، تشعشع ۲۱۹۳ میلی‌متر، پنمن ۲۱۵۳ میلی‌متر، پنمن اصلاح شده ۲۱۴۲ میلی‌متر و تشتک تبخیر ۱۸۷۶ میلی‌متر بود در حالی که کل تبخیر تعرق پتانسیل سالانه با روش پنمن مانتیس ۱۷۵۲ میلی‌متر محاسبه گردید که از همه پایین‌تر می‌باشد. نتایج داده‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌گردد بیشترین اختلاف روش پنمن‌مانتیس با تشتک تبخیر در فصل رویش گیاهی می‌باشد.



شکل شماره ۲ـ مقایسه روش پنمن مانتیس با سایر روش ها در ارومیه



شکل شماره ۳ـ مقایسه روش پنمن مانتیس با سایر روش ها در مازندران



شکل شماره ۴ـ مقایسه روش پنمن مانتیس با سایر روش ها درکالیفرنیا

نتیجه‌گیری

در اکثر مناطق ایران وهمچنین یک نقطه در خارج از کشور روش پنمن‌مانتیس کمترین رقم را از خود نشان می‌دهد. از تحقیقات بعمل آمده در خارج از ایران تطابق روش فوق با داده‌های لیسیمتری در مناطق متفاوت بسیار بالا بوده‌است و در شرایط متفاوت آب و هوایی ارقام بدست آمده با این روش همخوانی بسیار نزدیکتری نسبت به روش‌های دیگر ، با ارقام حاصل از لیسیمتر دارد. نحوه پردازش منحنی تغییرات پنمن مانتیس در ماه‌های مختلف شکل طبیعی‌تری دارد. در این روش از پارامترهای فیزیکی بیشتری استفاده شده است. این روش به تازگی از طرف سازمان خواربار جهانی توصیه شده و در کشور آمریکا به صورت روشی استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است، لذا با توجه به محدودیت منابع آب در کشور و ضرورت استفاده بهینه از آن استفاده از روش‌های دقیق‌تر را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. اگر روش پنمن‌مانتیس ملاک عمل طراحی قرار گیرد رقم نیاز آبی کاهش می‌یابد و به تبع آن هیدرومدول طراحی کاهش یافته، ظرفیت سیستم انتقال وتوزیع نقصان می‌یابد و همچنین ابنیه و تاسیسات مورد استفاده تحت تاثیر قرار می‌گیرد، نفوذ عمقی کاهش یافته ومشکلات زهکشی اراضی تقلیل می‌یابد نهایتاً بازدهی اقتصادی طرح‌ها به نحو چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. همان گونه که در آنالیز روش‌ها مشاهده گردید در هر منطقه یک روش و در منطقه دیگر روش دیگری بالاترین رقم را از خود نشان می‌دهد در حالی که روش پنمن مانتیس همیشه پایین‌ترین رقم را به خود اختصاص داده‌است.

با توجه به مسایل فوق‌الذکر توصیه می‌شود در طرح‌های توسعه منابع آب و خاک و کشاورزی روش پنمن‌مانتیس به عنوان یک روش بسیار قابل اتکا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از محققین و مراکز تحقیقاتی انتظار می‌رود که با تحقیق روی این روش و مقایسه با اعداد و ارقام لیسیمتری و یا سایر روش‌هایی که برای محاسبه نیاز آبی گیاهان به طور عملی مورد استفاده قرار می‌دهند راه را برای استفاده از این روش باز نموده تا از این طریق صرفه‌جویی زیادی در منابع آبی کشورمان صورت پذیرد. هم‌چنین از مهندسان مشاور انتظار می‌رود که در محاسبات خود از این روش بهره جسته و با توجه به مسایل مختلف در هر منطقه محاسبات خود را با استفاده از دقیق‌ترین ومناسب‌ترین روش و با توجه به شرایط آبی کشور تنظیم و ارایه نمایند.

۴ـ ارائه نتایج گردهمایی مشورتی خبرگان بین‌المللی جهت بازنگری در روشهای پیشنهادی *FAO* در رابطه با تعیین آب موردنیاز گیاهان

مقدمه:

در سال ۱۹۹۰ گردهمایی مشورتی خبرگان بین‌المللی جهت بازنگری درروش‌های پیشنهادی *FAO* در نشریه شماره ۲۴، در رابطه با تعیین آب موردنیاز گیاهان، درچهارچوب برنامه همکاری‌های فنی سازمان خواروبار جهانی (فائو)، با هدف توسعه و ترویج روش‌های عملی و فنی، از تاریخ ۲۸ لغایت ۳۱ مه، توسط این سازمان برگزار و دنبال شد تا از این راه بتواند کارشناسان و متخصصان کشورهای عضو را جهت بالابردن کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی، و بهبود وضع روستاییان این کشورها مورد حمایت و هدایت قرار دهد.

در جهت همین سیاست، بخش توسعه خاک و آب، تاکنون بیش از چهل و پنج نشریه در زمینه آبیاری و زهکشی منتشر کرده‌است. در رابطه با مدیریت آبیاری دستورالعملهایی با دامنه کارآیی گسترده در نقاط مختلف جهان در زمینه‌های: آب موردنیاز گیاهان، باران موثر، ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی و لیسیمترها و غیره منتشر کرده‌است.

در این زمینه، واز این سری نشریات، نشریه شماره ۲۴ فائو در رابطه با برآورد آب موردنیاز گیاهان نمونه بسیار برجسته‌ای به شمار می‌آید. این نشریه که شهرت جهانی یافته‌است، روش‌های ارایه شده در آن به صورت روش استاندارد بین‌المللی، در تمام دنیا توسط مهندسان آبیاری، مهندسان زراعت واگرونومی، متخصصان هیدرولوژی (آبشناسی وبررسی آبهای سطحی) و محیط زیست به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نشریه به چهار زبان زنده، و با تیراژ ۲۰/۰۰۰، در سطح جهان منتشر گردیده‌است. روش‌های ارایه‌شده درآن، دربسیاری‌از بررسیها و طرح‌های توسعه کارآیی دارد و توسط اکثر سازمانهای مالی، و موسسات عمران و توسعه به عنوان روش قابل‌قبول، توصیه و پیشنهاد شده‌است.

در مراکز، و موسسات آموزشی و انستیتوها و دانشگاه ها، روش *FAO* جزو برنامه درسی قرار گرفته است.

شکی نیست که صحت ودقت روش‌های پیشنهادی *FAO* همراه با ارایه‌دستورالعمل نحوه انجام محاسبات مربوطه، وحل مثالهای عملی، وارایه‌جداول لازم موجب گردیده‌است که نشریه شماره ۲۴، مورد استفاده متخصصان از یک سو، و دانش‌آموختگان و دانشجویان از سوی دیگر، قرار بگیرد.

در دهه ۱۹۷۰ که نشریه شماره ۲۴ فائو منتشر شد و استفاده از روش‌های پیشنهادی آن توسعه یافت، از آن پس، تحقیقات زیادی در زمینه رابطه «آب، خاک وگیاه» (آب موردنیاز گیاهان) انجام گرفته و از طرفی وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی و وسایل اندازه‌گیری تکامل یافته است لذا، در رابطه با تعیین آب موردنیاز، اطلاعات وسیع تر و داده‌های دقیق‌تری به‌دست آمده است. هم چنین استفاده از کامپیوتر، کاربرد و کارآیی روش‌ها و دستگاه‌های پیشرفته‌تر را امکان‌پذیر ساخته، و از آنجا دقت داده‌ها افزایش پیدا کرده‌است.

لذا پس از انتشار نشریه شماره ۲۴، تماسهای زیادی با اشخاص و هم چنین با مراجع و موسسات تحقیقاتی مختلف دنیا گرفته شد، و نتایج حاصل از کاربرد روشهای FAO-24 مورد بررسی قرار گرفت و بدین گونه بود که ضرورت بازنگری در روش‌های قبلی تعیین آب موردنیاز گیاهان احساس گردید.

برای تحقق این مهم، همکاری طیف وسیعی‌از مراجع وافراد صلاحیتدار، درمقیاس جهانی لازم بود تابتوان به طور اطمینان‌بخش، درروش‌های برآورد آب موردنیاز گیاهان بگونه‌ای بازنگری به عمل آورد وآنها را طوری به هنگام نمود تا مورد قبول عام قرار بگیرد.

به این‌منظور از کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی انجمن آمریکایی مهندسان آبیاری و آبادانی (مهندسی زراعی) (AGRICULTURAL ENGINEERING) مهندسان فنی (CIVIL ENGINEERING) و سازمان جهانی هواشناسی جهت همکاری های لازم دعوت به عمل آمد.

با همکاری این نهادها، سازمان خواروبار جهانی گردهمایی وسیعی را با شرکت برجسته‌ترین خبرگان ومحققان مربوطه درکشورهای مختلف دنیا از۲۸ تا ۳۱ مه ۱۹۹۰ در رم، ایتالیا، جهت مشورت درباره بازنگری مزبور برگزار کرد. نتیجه این گردهمایی که دربرگیرنده نظرها و توصیه‌های کارشناسان ذیصلاح در بالاترین سطح و از کشورهای مختلف جهان است، در این فصل (نشریه) آمده‌است.

اهداف گردهمایی:

اهداف گردهمایی عبارت بودند از:

- بازنگری درروش‌های پیشنهادی FAO، در رابطه با آب موردنیاز محصولات کشاورزی وروش تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع.
- مشاوره درمورد چگونگی بازنگری.

چهل کارشناس خبره، در سطوح بالا، از هفت کشور جهان به طور تمام وقت در این گردهمایی شرکت فعال داشته‌اند.

کشورهای شرکت‌کننده عبارت بودند از: استرالیا، فرانسه، ایتالیا، هلند، پرتقال، انگلستان وایالات متحده آمریکا.

در این گردهمایی، همچنین نمایندگان سه سازمان معتبر جهانی حضور داشتند که عبارت بودند از:

۱ـ کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی ICID[1]،

۲ـ موسسه بین‌المللی تحقیقات گیاهان گرمسیری ومناطق نیمه‌خشک (ICRISAT)[2]،

۳ـ سازمان جهانی هواشناسی (WMO)[3]

در این گردهمایی، علاوه‌برنمایندگان بخش‌های مختلف سازمان فائو (AGR - AGLS - AGLW - DDC)کشور ترکیه و نمایندگی منطقه خاور نزدیک نیز شرکت فعال داشته‌اند.

مسئولیت برگزاری گردهمایی را دبیرخانه فنی منابع‌آب «بخش عمران»، و بخش «مدیریت آبیاری» عهده‌دار بوده‌اند.

در ضمیمه شماره ۱ فهرست کامل شرکت‌کنندگان آمده‌است.

1- INTERNATIONAL COMMISSION FOR IRRIGATION AND DRAINAGE

2- INTERNATIONAL CROP RECHEARCH INSTITUTE FOR THE SEMI ARID TROPICS

3- WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION

برگزاری جلسات گردهمایی وموضوعات مورد بحث:

گردهمایی به مدت چهار روز برگزار شد و در ۲۸ ماه مه ۱۹۹۰ توسط معاون دبیرکل بخش کشاورزی FAO افتتاح گردید واهداف گردهمایی به صورت مشروح، تشریح گردید وجنبه های فنی اجلاس، به ویژه در رابطه با مقالات ارایه‌شده توسط دبیرفنی گردهمایی توضیح د ده شد.

موضوعات مختلف گردهمایی درچهار مجمع فنی (THECNICAL SESSION) به قرار زیر مورد بررسی قرار گرفت:

- ارزیابی روش های مختلف تبخیر تعرق مرجع (ET_O)
- تجزیه وتحلیل مفاهیم، وروش های محاسبه ET_O
- بررسی پارامترهای فیزیکی وداده‌های هواشناسی، قابل دسترس وقابل اعتماد بودن آنها، و توصیه در مورد دوره‌های مناسب (روزانه ـ ده روزه ـ و دوره‌های ماهانه) برای محاسبه ET_O، با روش های مختلف
- بحث و تبادل نظر در رابطه با تبخیر تعرق محصولات مختلف، وضریب گیاهی K_C وروش های بررسی ضرائب گیاهی درشرایط مختلف آب وهوایی.

عناوین موردبحث، در آغاز درجلسات مقدماتی مطرح گردید. زمینه‌های بحث در گروه‌های فنی تخصصی (TECHNICAL GROUP)، و براساس محتوای مقالات، و توصیه‌ها و دستورالعمل های کارشناسان مختلف مشخص گردید. روش کار بدین گونه بود که مسائل و سئوالات مطروحه در مقالات مختلف، در سه گروه فنی تخصصی، به طورجداگانه بحث می‌شد و سپس در مجمع فنی باحضور همه متخصصان ذیربط مورد بحث قرار می‌گرفت.

هریک از مجامع فنی، گزارشات رسیده از سه گروه فنی تخصصی را بانتایج و اطلاعات دسته‌بندی شده، حاصل بحث ها و توصیه‌های کارشناسی و فنی، مورد بررسی قرار می‌داد.

در این گردهمایی بازدیدهایی هم به دعوت مراکز آموزشی و تحقیقاتی (۱ و ۲) انجام گردید.

پیشنهادات و توصیه‌ها و گزارشات ارایه شده توسط مجامع فنی چهارگانه در یک جلسه تخصصی دیگر جهت بازنگری درروش‌های تعیین آب موردنیاز گیاهان مورد بررسی ونتیجه‌گیری نهایی و مطمئن قرار گرفت.

کارشناسان و سازمان های شرکت‌کننده قطعنامه‌ای در رابطه با نتایج فعالیت‌های مزبور صادر کردند.

اجلاس در پایان گردهمایی یک گزارش جامع، حاوی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و ارایه خطوط اصلی و هدایت‌گر در مورد تجدید نظر در روش‌های برآورد آب موردنیاز گیاهان ارایه داد.

اسناد و گزارشات علمی اجلاس:

گزارشات و اسناد علمی پایه به صورت نشریات مختلف در رابطه با تجدیدنظر درروش‌های تعیین‌آب موردنیاز محصولات کشاورزی تدارک دیده شد. فهرست کامل اسناد فنی پایه که برای این گردهمایی تدارک دیده شده بود، همچنین گزارشات گروههای فنی تخصصی، و فهرست مقالات ارایه‌شده و سایر نشریات در قسمتهای بعدی این مجموعه، منضم به اسناد علمی، که طی گردهمایی توزیع گردید، آمده است.

یک سند علمی مقدماتی، باهمکاری *ICID* درژانویه ۱۹۹۰ تهیه گردید وبین شرکت‌کنندگان واعضاء گروه کارآب موردنیاز گیاهان کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی *(ICID)* و اعضاء زیرکمیته آب موردنیاز محصولات و عده‌ای از محققان مراکز تحقیقاتی جهان، توزیع گردید.

1- INSTITUO DI AGROTECHNICA OF THE UNIVERSITY OF TUSUA, VITERBO.

2- INSTITUO SPERIMENTALE PER LA NUTRIZIONE DELLE PIANTE,RONME

نقطه‌نظرها و پیشنهادات زیادی از طرف شرکت‌کنندگان دریافت شد که به صورت مکتوب تهیه و تدوین شده بود و در جریان گردهمایی در اختیار شرکت‌کنندگان قرار گرفت. نقطه‌نظرهای جنبی، و بحث‌های متفرقه دیگر نیز طی جلسات گردهمایی و نشست‌های مجامع فنی و گروه‌های فنی تخصصی مطرح گردید. به‌علاوه نقطه نظرهایی هم از طرف گروه کارآب موردنیاز گیاهان، پس از کنفرانس سالانه ریودوژانیرو همچنین از *ASAE* دریافت گردید. مطالعات وبررسی های مقایسه‌ای توسط *FAO/AGL* و دبیرخانه فنی انجام‌گرفت که در آن موارد و مراتب مطروحه زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت:

- روش برآورد و تعیین ET_0 براساس مقایسه روش‌های ترکیبی مختلف، روش تشعشع و روش دمایی، همچنین روش تشتک تبخیر.
- داده‌های هواشناسی که جهت تخمین ET_0 به‌کار برده می‌شود.
- استفاده از فرمول های فیزیکی جهت پارامترهای مختلف در معادله تبخیر تعرق.

در یکی از ضمایم جدولی برای تبدیل واحدهای اندازه‌گیری مختلف از شکل قدیمی آن به سیستم بین‌المللی متری (*SI*) آمده‌است. همچنین روش پنمن مانتیس به صورت مشروح مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفته‌است.

براساس کلیه تحلیل‌ها که باتوجه به مباحثات و مشاوره‌های انجام شده در گردهمایی انجام گرفت، روش ترکیبی پنمن ـ مانتیس به طور متفق‌القول مورد قبول واقع گردید.

طی این گردهمایی شرکت‌کنندگان نتایج تحقیقات و یافته‌هایی راکه مستقیماً با موضوع اجلاس مربوط می‌شد مطرح کردند. تعدادی از مقالات معتبر و نشریات پایه نیز به عنوان مرجع انتخاب و معرفی گردید.

نشریه‌ای با عنوان «تبخیر و نیاز آبی» تحت نظر *ASCE* و توسط آقای جنسن و همکاران (*JENSEN et al 1990*) براساس بررسی‌های گسترده، تهیه گردید. این نشریه مشتمل بربسیاری تحلیل‌های مقایسه‌ای مهم بین روش‌های مختلف تخمین ET_0 است، که از بسیاری جهات، می‌توان از آن به عنوان نتیجه مهم گردهمایی نام برد.

در بخش‌های بعدی، بیست روش تخمین تبخیر تعرق ماهانه که برای مناطق خشک، مرطوب و سایر مناطق (مورد بررسی *ASCE*) محاسبه شده، آمده است.

در این گردهمایی تعدادی از گزارش‌های گروه های فنی تخصصی، و مجامع فنی که

نظرها و توصیه‌های مربوطه را منعکس می‌کند تکثیر و در اختیار شرکت‌کنندگان و علاقمندان قرار گرفت. این نشریه اساس و پایه نتایج حاصله و توصیه‌های انجام شده به حساب می‌آید، که در همین گزارش آمده است.

خلاصه نتایج حاصله وتوصیه‌های انجام شده:

چکیده نتایج و توصیه‌های مربوط به روش‌های مختلف تخمین نیاز آبی گیاهان به صورت زیر خلاصه می‌شود:

روش‌های برآورد تبخیرتعرق گیاه مرجع (ET_O):

با توجه به محدودیت داده‌های اقلیمی قابل دسترس وقابل قبول دربسیاری از مناطق، استفاده از روش‌های مختلف جهت تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع براساس داده‌های اقلیمی موجود درهرمحل، توصیه می‌شود. برای معنی‌دار بودن مقایسه‌ها، ضروری‌است که رابطه دقیقی بین روش‌های مختلف وجود داشته باشد. لذا اصول وروش‌های زیر توصیه وتشریح می‌گردد.

الف - روش ترکیبی (روش پنمن ـ مانتیس)

این روش مبتنی برکارهای اولیه پنمن (۱۹۴۸)، در رابطه با تبخیر تعرق گیاه مرجع می‌باشد. داده‌های اقلیمی اندازه‌گیری شده وموردنیاز این روش عبارتنداز: دما (درجه حرارت)، رطوبت، تشعشع (انرژی) خورشیدی وباد. برای هماهنگ کردن این روش با شرایط محلی، اصلاحات متعددی توسط محققان مختلف با وارد کردن انواع پارامترها، صورت گرفته ودرآن تغییراتی داده شده‌است. دورنبوس و پروت *(Doorenbos & Pruitt)* پس از تجزیه وتحلیل داده‌های لیسیمتری در نقاط مختلف جهان، روش پنمن اصلاح شده *FAO-24* را پیشنهاد کردند که در پروژه‌های توسعه ومدیریت آبیاری، کاربرد جهانی و گسترده‌ای پیدا کرد ولی مشخص بود که این روش تحت شرایطی‌که جریان جانبی هوا وجود ندارد، تبخیر تعرق را بیش از مقادیر واقعی، پیش‌بینی و برآورد می‌کند.

بررسی‌های مقایسه‌ای جدیدی که به راهبری *ASCE* وکمیسیون اروپایی انجام گرفت،

نشان داد که روش موسوم به «پنمن ـ مانتیس» دراقالیم مختلف از دقت بالایی برخوداراست. این نتیجه با نتایج تحقیقاتی که درسالهای اخیر توسط اشخاص مختلف انجام شد، مورد تایید قرار گرفت.

دراجلاس مشورتی‌که برای توصیه روش پنمن ـ مانتیس صورت گرفت، متفقاً روی این نظر که درحال حاضر، بهترین روش، روش ترکیبی (پنمن ـ مانتیس) می‌باشد، توافق حاصل گردید. پارامترهای مختلفی که برای تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد و جزییات آن طی نشست‌های مشاوره‌ای محققان مختلف، تشریح گردیده‌است.

ب - روش تشعشع:

معادلات مختلفی برای تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع فقط براساس داده‌های تشعشع خورشیدی و درجه حرارت توسط محققان ومتخصصان متعدد معرفی گردیده‌است. دورنبوس وپروت *(Doorenbos & Pruitt)* روش تشعشع (تشعشع ـ*FAO*) راکه براساس معادله ماکینک *(Makkink, 1957)* به دست آمده است، با درنظر گرفتن فاکتور تصحیح (براساس تخمین شرایط با دو رطوبت برای جبران شرایط جابجایی هوا)، ارایه داده‌اند. این روش، بویژه درمناطق مرطوب، نتایج خوبی نشان داده‌است.

نتایج اجلاس متخصصان همچنین نشان داد که روش تشعشع *FAO*، ممکن‌است با جایگزینی تشعشع طول موج بلند بجای پارامتر تشعشع *Priestley - Taylor* وبا درنظر گرفتن پارامتر آئرودینامیکی ساده شده فرمول ترکیبی همراه با شرایط استاندارد رطوبت و باد، کامل گردد. برای ارایه روش جدید با ضریب اطمینان بالا، مطالعات بیشتری لازم است.

ج - روش برآورد ET_o با استفاده از دما (درجه حرارت):

با توجه به اینکه بسیاری از کارشناسان جهت تعیین تبخیر تعرق فقط به داده‌های درجه حرارت و بارندگی دسترسی دارند، لذا در روش دمایی، استفاده و ملحوظ نمودن شرایط محلی و واسنجی (کالیبراسیون) ضرورت دارد.

روش دمایی ـ *FAO* که توسط دورنبوس وپروت *(Doorenbos & Pruitt)* توصیه

شده‌است، مبتنی برروش بلانی‌کریدل می‌باشد وضریب اصلاحی، براساس تخمین رطوبت، تابش خورشید وباد درآن اعمال گردیده‌است.

با وجود آنکه ارزش تاریخی روش بلانی‌کریدل وصحت کارآیی آن درمناطقی‌که ضریب تصحیح واسنجی اعمال شده، برمتخصصین روشن‌است، لیکن این فرمول را به علت مشکلاتی که ازنظر تخمین رطوبت، تابش خورشید وپارامترهای باد در نواحی دوردست دارد، توصیه نمی‌کنند. این روش در مناطقی که فقط درجه حرارت متوسط روزانه دردسترس باشد و ضریب تصحیح مناسب مورداستفاده قرار گرفته باشد، هنوز با ارزش‌است.

استفاده از درجه حرارت حداکثر وحداقل درروش دمایی ، البته باکمی تفاوت، نتایج رضایت‌بخشی را به همراه داشته‌است. اختلاف درجه حرارت حداقل و حداکثر را می‌توان، بطور موفقیت‌آمیز با تشعشع خالص خورشیدی وشرایط رطوبتی ارتباط داد. در این رابطه همچنین می‌توان به روش هارگریوز مراجعه کرد.

مطالعات زیادی برای دستیابی به روش دمایی رضایت‌بخش، تحت شرایط اقلیمی متفاوت انجام گرفته‌است.

د - روش تشتک تبخیر

استفاده ازیک پارامتر اقلیمی (مثل تبخیر) برای تخمین تبخیر تعرق مرجع به نظر جالب می‌آید، ولی اندازه‌گیری تبخیر از تشتک استاندارد (مانند تشتک کلاس A کالیفرنیا) که نشانگر وضعیت تبخیر روزانه آب می‌باشد، تحت تاثیر شرایط محیطی، چون باد، جریان گرمایی خاک، پوشش‌گیاهی اطراف گیاه، رنگ و شرایط نصب و نگهداری تشتک وتوری‌که روی آن کارگذاشته می‌شود و محل نصب و غیره قرار می‌گیرد و نسبت به آنها حساس است.

رابطه بین تبخیر ازتشتک با شرایط متنوع محیطی‌وجریان هوا، توسط دورنبوس وپروت در *FAO-24* به‌خوبی برآورد شده است و قابل توصیه می‌باشد.

ارزش کاربردی روش «تبخیر از تشتک» خصوصاً درمطالعات مقایسه‌ای ودربرنامه‌ریزی‌های عملی آبیاری به خوبی شناخته شده‌است. درهرحال، استفاده از روش

«تشتک تبخیر» دربرآورد تبخیر تعرق مرجع، تنها درشرایطی قابل توصیه است که وسایل وابزار مورد استفاده وهمچنین محل کارگذاشتن تشتک به درستی واسنجی شده ونگهداری آن هم درشرایط خوب انجام بگیرد.

پارامترها ومتغیرهای اقلیمی:

برای بدست آوردن یکنواختی لازم درمراحل محاسباتی، پارامترهای گوناگون درمعادلات مختلف بطور گسترده وبراساس تحلیل مقایسه‌ای مورد بازبینی وبررسی قرار گرفت. توافق کامل روی پارامترهای معین واستفاده از سیستم متریک *(SI)* صورت گرفت.

الگوریتم‌ها جهت تعیین پارامترهای مختلف وروش تعیین هر پارامتر با توجه به سادگی و صحت آن همچنین پذیرش عمومی، واینکه محاسبات مربوطه بطور یکنواخت انجام گیرد، مورد تجدیدنظر قرار گرفت. مقادیر چندین پارامتر براساس معیارهای کلی وجهانی تثبیت گردید.

جزئیات کامل پارامترهای گوناگون، الگوریتم ومقادیر وواحدهای توصیه شده برای آنها، در مباحث بعدی بیان گردیده‌است.

معرفی الگوریتم بویژه برای کامپیوتری نمودن اطلاعات، اهمیت دارد. بااینحال از آنجایی‌که خیلی از استفاده‌کنندگان به کامپیوتر دسترسی ندارند، استفاده از جداول وتشریح روش‌های محاسباتی توصیه گردیده‌است.

متغیرهای اقلیمی گوناگون بطور خلاصه مورد بازبینی قرار گرفت. قرائت داده‌ها، نگهداری دستگاه‌های اندازه‌گیری مربوطه وروش‌های کاربردی وساده، جهت اندازه‌گیری وآنالیز آماری داده‌ها، به تمام معرفی گردید.

در این رابطه استاندارد کردن، به عنوان مسئله کلیدی درنظر گرفته شد و از سازمان هواشناسی جهانی *(W.M.O)*[1] جهت تهیه دستورالعملهای اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی وهمچنین استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی خودکار، دعوت بعمل آمد.

1- World meteorological organization

آب موردنیاز گیاهان

درروش‌های پیشنهادی دورنبوس وپروت، جهت تعیین آب موردنیاز گیاهان، توجه زیادی به سهولت، سادگی وکاربردی بودن آنها مبذول شده‌است. در این رابطه، آنها فهرستی از فاکتورهای گیاهی و مراحل مختلف رشد را برای طیف وسیعی ازمحصولات (که هنوز هم به تمام معتبراست) ارایه‌نموده‌اند.

نتایج وتوصیه‌های مربوطه شامل موارد زیر می‌باشد:

تبخیر تعرق مرجع:

معمولاً تبخیر تعرق مرجع به قرار زیر تعریف می‌شود:

«تبخیر تعرق مرجع» عبارتست از میزان تبخیر تعرق از سطح وسیع پوشیده ازچمن سبز با ارتفاع یکنواخت ۸ تا۱۵ سانتیمتر، با رشد فعال وبا سایه‌اندازی کامل ودرشرایط بدون کمبودآب».

اگرچه هنوز، پوشش چمن خصوصیات خود رابه عنوان گیاه مرجع حفظ نموده‌است، لیکن تبخیر تعرق مرجع، تعریف شده توسط پنمن ـ مانتیس، در رابطه با یک گیاه مفروض با پارامترها وضرایب مقاومت گیاهی ثابت (ومشخص) کامل‌تر می‌باشد.

در این رابطه می‌توان تبخیر تعرق گیاه مرجع (مثل چمن، یونجه، چمن *KIKUYU* وفستوکا *FESTUCA* و غیره) راکه توسط لیسیمتر و یاسایر روش‌ها اندازه‌گیری شده است، با منظورکردن متغیرهای مربوط به نوع گیاه مرجع (مثل مقاومت گیاه[1]، شاخص یا نمایه سطح برگ[2])، به طورکاملاً معنی داری، به تبخیر تعرق گیاه مرجع استاندارد، معرفی شده درروش پنمن ـ مانتیس تبدیل کرد.

ضریب گیاهی:

ضرایب گیاهی معرفی شده توسط دورنبوس وپروت در*FAO-24*گسترش یافته و

1- Crop resistance

2- Leaf Area Index (LAI)

به طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته است. هنوز هم تحقیقات زیاد و جدیدی که پس از انتشار نشریه *FAO-24* انجام گرفته، آن را تکمیل و تصحیح نموده است. داده‌ها را به روز (به هنگام) کرده و در ضرایب گیاهی بازنگری‌هایی صورت پذیرفته است.

ملاحظات زیر در بازنگری‌های مربوط به فاکتورهای گیاهی در نظر گرفته شده است:

- به روز (به هنگام) نمودن ضرایب گیاهی بویژه برای درختان میوه وپاره‌ای محصولات چند ساله.
- بازنگری در رابطه با ضریب گیاهی مرحله نمو اولیه براساس تخمین تبخیر از سطح خاک وتعرق گیاه پایه بطور جداگانه.
- بازنگری در رابطه با اثر اقلیم وجریان جانبی هوا روی فاکتور گیاهی.
- بازنگری وبه روز کردن یافته‌ها در رابطه با طول مراحل مختلف رشد و در صورت امکان، برقراری تابع رشد، که پارامترهای رشد گیاهی (شاخص یا نمایه سطح برگ *LAI*، میزان تولید ماده خشک وارتفاع گیاه) را با متغیرهای اقلیمی (دما، تشعشع وطول روز)، ارتباط می‌دهد.
- بازنگری در رابطه با فاکتورهای گیاهی مستلزم مطالعه دقیق ومبتنی برداده‌های حاصل از مطالعات آب موردنیاز گیاهان در مقیاس جهانی می‌باشد.

برآورد یک مرحله‌ای (مستقیم):

استفاده از فرمول پنمن ـ مانتیس، همانگونه که دراجلاس مشورتی توصیه گردیده است، مفاهیم مربوط به فاکتورهای گیاهی و تبخیر تعرق مرجع را به طور منطقی و اصولی تغییر می‌دهد به طوری که تبخیر تعرق به طور مستقیم ازفرمول مربوطه با در نظر گرفتن فاکتورهای مقاومت هوا وگیاه (که درخود فرمول منظور شده‌است)، حاصل می‌شود.

باتوجه به‌مشکلاتی که هنوز هم در رابطه با بدست آوردن مقادیر قابل اطمینان برای مقاومت گیاهی تحت شرایط مختلف رشد ورطوبت خاک وجود دارد، چنین توصیه می‌شود که فعلاً روش برآورد دومرحله‌ای (ET_O, K_c) حفظ شود، ولی از مفاهیم جدید که از روش پنمن ـ مانتیس حاصل شده‌است، جهت بدست آوردن پارامترهای

زیر استفاده گردد:

- ارزیابی اثر جریان جانبی هوا (بطور افقی) روی فاکتور گیاهی.
- کار منظم (سیستماتیک) در رابطه با بازنگری درنتایج تحقیقات مختلف درجهت توسعه روش‌های ساده و عملی جهت برآورد مقادیر مقاومت گیاهی برای انواع محصولات.
- بازنگری در رابطه با کاهش تبخیر تعرق دراثر تنش رطوبتی و در شرایط دشوار ونامناسب رشد.

لازم است فراخوانی از تمام موسسات تحقیقاتی دنیا برای سوق دادن جهت تحقیقات در این زمینه مهم انجام بگیرد ولی درهرحال لازم است قبلاً کار وبررسی بیشتری جهت استفاده از روش یک مرحله‌ای انجام گیرد تانتایج منطقی‌تری بدست آید.

طراحی و مدیریت آبیاری:

در طول گردهمایی، از بین انواع مختلف روش‌ها، روشی که باید بعنوان مرجع مورد استفاده قرار گیرد در نشریه شماره ۲۴، «طراحی و مدیریت آبیاری [1]» معرفی گردید.

بلافاصله پس از این گردهمایی روی اهمیت بازنگری در رابطه با سایر جنبه‌های آبیاری، طراحی و مدیریت آن به تمام تاکید گردید، به ویژه توجه خاصی در مورد تجدید نظر در نشریه ۲۴ فائو در رابطه با موارد زیر مبذول گردید:

- باران موثر، دقت و قابل اعتماد بودن آن.
- کنترل شوری ومیزان آبشویی.
- برنامه‌ریزی آبیاری.

خلاصه بحثهای انجام شده:

در این گردهمایی موضوعات مختلفی درچهار گروه با حضور همه اعضاء موردبحث قرار گرفت.

1- *Irrigation planning and management*

مسائل موردبحث هریک از گروهها درگزارشات مستقلی عنوان شده‌است که ذیلاً خلاصه‌ای از آنها ارایه‌می‌گردد:

گروه‌ومجمع فنی I :ارزیابی روش‌های مختلف برای تخمین تبخیرتعرق مرجع:

خلاصه توصیه‌ها وپیشنهادات ارایه شده توسط متخصصان برای روش‌های مختلف ET_O (سند شماره ۳) به‌شرح زیراست:

الف - انتخاب معادلات تبخیر تعرق مرجع (ET_O):

- در صورتی که پارامترهای هواشناسی دردسترس باشد، روش‌های متعددی می‌تواند به کار رود وروشی که بطور نظری کامل‌تر ومعتبرتر است دراولویت قرار می‌گیرد. در شرایطی که دسترسی به‌داده‌های اقلیمی دارای محدودیت باشد روش‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- براساس بررسی‌های سالهای اخیر ومقایسه روش‌های برآورد تبخیر تعرق ، بهترین آنها همانا روش پنمن ـ مانتیس در نظر گرفته شد که منطبق با پارامترهای مخصوص گیاه مرجع استاندارد (چمن باارتفاع ۱۲سانتیمتر) می‌باشد، ضمناً لازم است اعتبار ودقت این روش دربرخی اقالیم مورد ارزیابی قرار بگیرد.
- چارچوب کلی روش‌های محاسبه تبخیر تعرق مرجع (ET_O) نیاز به‌معرفی دارد تا استفاده‌کنندگان ازمیان روش‌های مختلف، روش مناسب را براساس داده‌های قابل دسترس انتخاب نمایند.
- روش‌های معرفی شده به‌عنوان گزینه وجایگزین روش استاندارد (پنمن ـ مانتیس) باید دارای مشخصه‌های زیر باشند:
  - وجود ارتباط وهمبستگی روش انتخابی با روش‌های معرفی‌شده درنشریه *FAO۲۴*
  - گزینه درمناطقی که پارامترهای مختلف هواشناسی دردسترس نیست، پاسخگوی نیاز باشد.
  - از پارامترهای ناقص توسط افراد بی‌تجربه‌استفاده نشود.

- به استفاده‌کنندگان اجازه داده شود تا در بین روش‌ها حق انتخاب داشته باشند و بتوانند از روش‌های ساده‌تر استفاده نمایند.

□ انتخاب روش پنمن ـ مانتیس بعنوان روش استاندارد جهت محاسبه تبخیر تعرق گیاه باهر دوروش یک‌مرحله‌ای (در نظر گرفتن مقاومت گیاهی) و دومرحله‌ای (K_C و ET_C) امکان‌پذیر می‌باشد. البته انتظار می‌رود که راه حل یک مرحله‌ای که نیاز به تحقیقات محلی بیشتری دارد طی ده سال آینده، توسعه بیشتری پیدا کند.

□ استاندارد نمودن پاره‌ای از پارمترها درمعادله پنمن ـ مانتیس، نیاز به‌بازنگری درتعریف ET_O به‌شرح زیر دارد:

«تبخیر تعرق مرجع (ETO) عبارتست از میزان تبخیر تعرق از یک‌گیاه فرضی به‌ارتفاع ۱۲ سانتیمتر ومقاومت پوشش گیاهی (مقاومت روزنه‌ای) ثابت و برابر با ۷۰ ثانیه برمتر (S.m-1) و ضریب آلبیدو برابر با۰/۲۳ که مشابه میزان تبخیر تعرق از یک سطح گسترده با پوشش چمن سبز با ارتفاع یکنواخت و با رشد فعال، با سایه‌اندازی کامل روی زمین و بدون کمبود آب می‌باشد.»

بنابراین روش پنمن ـ مانتیس امکان می‌دهد تابتوان رابطه بسیار معنی دارتری، بین داده‌های هواشناسی اقالیم مختلف از یکسو وشرایط پوشش گیاهی از سوی دیگر برقرار کرده وآنرا واسنجی (کالیبره) نمود.

هم‌چنین لازم است روش‌هایی برای واسنجی تبخیر تعرق اندازه‌گیری شده نسبت به‌تبخیر تعرق استاندارد (بدانگونه که تعریف شد)، ارایه‌گردد که این، شامل تبدیل تبخیر تعرق گیاه مرجع یعنی یونجه به‌مقادیر تبخیر تعرق مرجع استاندارد نیز می‌باشد.

ب - روشهای ترکیبی

□ روش ترکیبی توصیه شده، همان روش پنمن ـ مانتیس با در نظرگرفتن ضرایب مقاومت استاندارد شده (گیاهی و آئرودینامیکی) می‌باشد.

□ سنجش اعتبار (میزان کارآیی) هر روش در اقالیم مختلف، ضرورت دارد. لازم است روی روش واسنجی و برقراری تابع تغییرات خصوصیات گیاهان مختلف (و تبخیر تعرق آنها) با مشخصه‌های اقلیمی، در مراکز تحقیقاتی، کاربیشتری صورت بگیرد.

□ طرز محاسبه مستقیم تبخیر تعرق گیاه با استفاده از روش پنمن ـ مانتیس (برآورد یک

مرحله‌ای) در بخش مربوط به تبخیر تعرق گیاهان تشریح شده‌است (به «مقدمه‌ای بر روش یک مرحله‌ای» مراجعه شود)

با توجه به ارزش روش پنمن و کثرت استفاده‌کنندگان از این روش، لازم است، اطلاعات کافی در رابطه با درجه صحت و دقت و موارد برتری روش پنمن ـ مانتیس نسبت به‌روش‌های پنمن، ارایه‌شده توسط *FAO*، جمع‌آوری شود. هم چنین باید تفاوت دو روش (یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای) در ارتباط با اقالیم مختلف مشخص شود.

- همچنین بررسی‌ها باید شامل ناسازگاری‌های روش پنمن ـ *FAO* در رابطه با:
- استاندارد نبودن تابع باد
- ضریب تصحیح نامناسب
- خطای قابل ملاحظه در رابطه با سرعتهای بالای باد، باشد.

انواع روش‌های تعیین ET_o، مبتنی برروش پنمن توسط متخصصان وموسسات مختلف توسعه عمران توصیه شده، و به طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته است. این امر ممکن است افراد کم تجربه را مشتبه سازد ولازم باشد تا در مورد این روش‌ها یک طبقه‌بندی برپایه پارامترهای تجربی مختلف ومبانی واسنجی، ودرجه کارآیی آنها برای ایستگاه‌ها و شرایط هواشناسی مختلف صورت بگیرد.

ج - روشهای تشعشع:

روش تشعشع از نظر کاربردی واعتبار، به‌ویژه درشرایط آب وهوای مرطوب مورد تایید قرار گرفته است. درشرایط آب و هوای خشک، و یا در شرایطی که جریان جانبی هوا وجود دارد لازم است این روش با احتیاط بیشتری مورد استفاده قرار بگیرد.

- پیشنهاد گردید روش تشعشع *FAO* مورد استفاده قرار بگیرد ولی لازم است با واسنجی (کالیبره کردن) روش پنمن ـ مانتیس از طریق واردکردن پارامترهای تجربی، وبا استفاده از تخمین باد و رطوبت، وجایگزین کردن آن با فاکتور اصلاحی اصلی روش تشعشع *FAO*، حتی‌الامکان این روش را تکمیل کرد.
- با توجه به‌روش پریستلی ـ تایلور *(PRIESTLEY - TAYLOR)* استفاده از تشعشع خالص (ساعات آفتابی نظری در بالای جو N) به‌جای تشعشع خورشیدی (ساعات

آفتابی واقعی n) پیشنهاد گردید.

لازم است تشعشع خورشیدی را به طور عینی مثل روش ترکیبی، با استفاده از تشعشع موج بلند، که توسط ایدسو - جاکسون *(IDSO - JACKSON)* درسال ۱۹۶۹ توصیه شده‌است، برآوردنمود.

- در آینده پیشرفت تکنولوژی دستگاه‌های حساس این امکان را فراهم خواهد کرد که بتوان داده‌های مربوط به تشعشع خورشیدی و درجه ابرناکی را در سطح گسترده، و از راه دور به دست آورد، در این صورت کارآیی روش تشعشع افزایش خواهد یافت.

د - روش استفاده از دما:

- □ نیاز به‌تعیین ET_O تنها بااستفاده از دما وروش‌های مربوطه، درشرایط محدودیت داده‌های اقلیمی مورد توجه جمع کثیری از کارشناسان بوده است.
- □ غیر از ظرایف روش پیشنهاد شده توسط FAO که براساس روش بلانی کریدل پایه‌گذاری شده‌است، این روش در شرایطی که به‌دست آوردن نتایج دقیق ورضایتبخش وباواسنجی محلی درسطح گسترده موردنیاز باشد، توصیه نمی‌شود.
- □ لازم است پیدا کردن گزینه‌ای برای روش استفاده از دما، براساس تشعشع بالای جو، وبااستفاده از درجه حرارت ماگزیمم و می‌نیمم همان گونه که در روش هارگریوز به‌کاربرده می‌شود، طرف توجه قرار بگیرد ودر این رابطه مطالعات ویژه‌ای صورت پذیرد.

ه - روش تشتک تبخیر

- □ اهمیت استفاده از روش تشتک تبخیر، به‌عنوان روش عملی جهت تخمین ET_O وکاربرد وسیع آن درمناطق فاریاب به‌خوبی شناخته شده‌است.
- □ اعتبار روش تشتک تبخیر که توسط FAO وبا دخالت دادن فاکتور مربوط به اثر جانبی هوادرشرایط مختلف، پیشنهاد شده‌است، آنگاه که داده‌های محلی واسنجی شدهٔدیگر در دسترس نباشد به عنوان روش مناسب برای تخمین ET_O مورد تایید قرارگرفت.
- □ هنگامی که، درپاره‌ای شرایط محلی بارندگیها وجریان جانبی هوا اثرات زیادی روی

تبخیر از تشتک می‌گذارد استفاده از این روش دچار محدودیت خواهد شد.

- تجربیات محلی متعددی در رابطه با شرایط ایستگاه اندازه‌گیری تبخیر، از قبیل انتخاب محل مناسب، نگهداری و مراقبت‌های لازم در رابطه با عوامل اثرگذار در روی تخمین تبخیر، آموزش های لازم مرتبط با طراحی، نصب، نگهداری و سایر عملیات لازم توسعه یافته است که باید جهت هدایت هر چه بیشتر استفاده‌کنندگان از روش تشتک تبخیر، از این تجربیات استفاده شود.
- تجزیه وتحلیل بیلان انرژی تشتک تبخیر ومقایسه، وبرقراری رابطه آن با تبخیر تعرق مزرعه، در صورت تجدیدنظر در ضریب تشتک امکان می‌دهد تا بتوان از آن، در شرایط اقلیمی مختلف برای تعیین ET_O استفاده کرد.

گروه و مجمع فنی شماره II: تجزیه وتحلیل مفاهیم وروش‌های مختلف محاسبه ET_O وپارامترهای مربوطه:

در سند اصلی گردهمایی (سند علمی شماره ۴) نقطه نظرها و نتیجه مذاکرات متخصصان درباره مقایسه تحلیلی روش‌های مختلف تعیین آب موردنیاز گیاهان و مفاهیم نحوه محاسبات مربوطه آمده است.

نظریه معتبر روش ترکیبی که در ذیل عنوان می‌شود در بخش ۴ این نشریه تشریح شده است.

الف - فرمول ترکیبی:

- استفاده از روش‌های *FAO-24* حایز اهمیت تلقی گردید و توصیه شد حتی‌الامکان پاره‌ای اصطلاحات ومفاهیم آن حفظ شود.
- در رابطه با کلیات فرمول‌بندی روش ترکیبی توصیه‌های زیر به‌عمل آمد:
- به جای فاکتور وزنی W، از فاکتور $\frac{\Delta}{(\Delta+\gamma)}$ استفاده شود.
- فاکتوراصلاحی که درروش پنمن اصلاح شده *FAO-24* به‌کاربرده شده است حذف گردد.

- در فرمول پنمن ـ مانتیس موارد زیر منظور گردد:

□ لازم است فرمول نهایی پنمن ـ مانتیس با توجه به فاکتور مقاومت (وارد کردن فاکتور مقاومت برگ و گیاه در مقابل جریان بخار آب و منظورکردن مقاومت خاک مرطوب در مقابل این جریان و بررسی های مربوطه) تکمیل شود. این کار موجب می‌شود تا بتوان مفاهیم مربوط به‌روش یک مرحله‌ای (ادغام ضریب گیاهی K_c در فرمول) را بهتر درک کرد و آن را به مورد اجرا گذاشت.

- لازم است امکان انجام محاسبات به‌صورت ساده و کاربردی فراهم شود به طوری که همه بتوانند آنرا به‌کار ببندند. در شکل نهایی و کامل فرمول، جهت محاسبه ET_O باید فاکتور مقاومت استاندارد شده در آن ادغام گردد.

□ بحث پیرامون تشعشع با طول موج کوتاه R_s و توصیه‌ها:

- لازم است حتی‌الامکان از مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شود.
- لازم است محاسبه تشعشعات رسیده به‌بالای جو R_a همراه با محاسبات تشعشع خورشیدی که به‌سطح زمین می‌رسد درشرایط بدون ابر R_{so} انجام بگیرد.

  برای شرایط متوسط، رابطه $R_{so}=0.75R_a$ در نظر گرفته شود.
- لازم است تشعشعات رسیده به‌بالای جو، نسبت به‌تشعشعات رسیده به‌سطح زمین از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\frac{R_s}{R_a}=a+b(\frac{n}{N})$$

- در شرایطی که نسبت $\frac{R_s}{R_a}$ درمحل اندازه‌گیری نشده باشد، مقادیر زیر برای a و b توصیه می‌شود:

$$b=۰/۵ \text{ و } a=۰/۲۵$$

- لازم است نسبت R_s به R_a درتمام فصل رشد، مشخص شده باشد.

□ یک اصلاح مختصر برای آلبیدوی استاندارد شده، به‌قرار زیر توصیه می‌شود:

$$\alpha=۰/۲۳$$

در هر حال لازم است به این نکته توجه شود که a باعرض جغرافیایی وبا فصل تغییر می‌نماید (به‌مقادیر ارایه‌شده توسط کمبرلی (KIMBERLEY) ورایت (WRIGHT) درمجله آبیاری وزهکشی ASCE درسال ۱۹۸۲، مراجعه شود.)

□ بحث پیرامون تشعشع با طول موج بلند وتوصیه‌های انجام شده:

- بهتراست، ترجیحاً از R_h به‌جای R_l روی خط (in Line)، همانگونه که دراکثر نشریات‌بین‌المللی آمده است استفاده شود.
- لازم است R_h براساس تشعشع موج بلند درشرایط بدون ابر R_{bo}، با استفاده از نسبت $\frac{R_s}{R_{so}}$ محاسبه شود (پارامترهای a وb، مطابق آنچه که درنشریه FAO-۲۴ آمده است، به‌ترتیب a=۱/۳۵ و b=۰/۳۵ در نظر گرفته شود).
- لازم است انتشار خالص ε' (ε' = NET EMISSIVITY) مطابق روشی که در FAO-۲۴ به‌کار رفته است مورد محاسبه قرار بگیرد.
(که درآن a_1=۰/۳۴ و b_1=۰/۱۴ است).
- لازم است انتشار خالص ε' ، در روش تشعشع، بااستفاده از معادله ایدسو ـ جاکسون (IDSO-JACKSON) محاسبه شود که درآن، در شرایطی که داده‌های مربوط به‌رطوبت ویا درجه حرارت می‌نیمم هوا در دسترس نیست، فقط از درجه حرارت متوسط هوا استفاده می‌شود.
- لازم است T^4 براساس متوسط‌گیری از توان چهارم T_{max} و T_{min} (ونه براساس توان چهارم درجه حرارت متوسط) محاسبه می‌شود.
- لازم است تشعشع خالص محاسبه شده V_S، با تشعشع خالص اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرارگیرد، و از آن، جهت تعیین مناسبترین ضرائب محلی وفصلی، دریک طیف گسترده، استفاده شود.

□ بحث پیرامون جریان (شار) گرمایی خاک G:

- لازم است شارگرمایی (G) درفرمول ادغام ومنظور شود.
- در هر حال اثر شارگرمایی، به ویژه در بلندمدت جزیی و اندک است.
- جهت‌تخمین شارگرمایی خاک می‌توان ازتوابع تجربی، برای دوره‌های زمانی با مقیاس روز، وياماه، براساس روش جنسن وهمکاران (JENSEN et al. 1990) استفاده کرد.

□ بحث پیرامون اثر باد:

- در فرمول پنمن ـ مانتیس اثر باد درضریب مقاومت آئرودینامیکی منظور شود.
- در مورد معادله پنمن گفته شد بهتر است رابطه خطی $(a_w + b_w u)$، بدان گونه که درنشریه *FAO-24* توصیه شده است حفظ شود، ولی بازنگری در پارامترهای a_w و b_w می‌تواند با استفاده از بخش آیرودینامیکی فرمول پنمن ـ مانتیس جهت واسنجی (کالیبره کردن) آن مورد استفاده قرار بگیرد.

ب - فرمول تشعشع:

تابع $ET_O = a + bWR$ درحالت کلی مورد بحث قرار گرفت، و نقطه‌نظرهای اصولی زیر ارایه گردید:

- □ لازم است فاکتور وزنی W با $\frac{\Delta}{(\Delta+\gamma)}$ جایگزین شود.
- □ پارامتر "a" را درفرمول می‌توان حذف کرد.
- □ پارامتر "b" را (مشابه فاکتور α درمعادله پریستلی ـ تایلور) می‌توان در رابطه با شرایط محلی تصحیح کرد. راه‌حل‌های دیگر که در *FAO-24* آمده است، توصیه گردید. کالیبره کردن با روش پنمن ـ مانتیس به‌این امرکمک می‌کند. برای این کار لازم است بررسی‌های مقایسه‌ای ضروری انجام بگیرد.
- □ لازم است مشابه روش پریستلی ـ تایلور $(R_n\text{-}G)$ تشعشع خالص (تشعشع نظری، که به‌بالای جو می‌رسد) با تشعشع واقعی خورشیدی (روش تشعشع *FAO*) جایگزین شود.

پارامتر انتشار *(EMISSIVITY)* همان گونه که توسط آقایان ایدسو وجاکسون (۱۹۷۱) مشخص شده است، باید براساس درجه حرارت برآورد شود.

ج - روش‌های دمایی:

- □ کار و بررسی بیشتر روی روش بلانی کریدل-*FAO* جهت کامل‌ترکردن آن (بیشتر از آنچه که تاکنون انجام گرفته است)، به‌دلیل تجربیات زیادی که در این زمینه وجود دارد، توصیه نمی‌شود (و ضرورت ندارد).
- □ جایگزینی راه حلهای چند مرحله‌ای (وغیر مستقیم)، با راه‌حل تفسیر گرافیکی فاکتور

تصحیح درفرمول بلانی ـ کریدل (اصلاح شده) FAO، که توسط فری‌ورت و همکاران (FREVERT et al, 1983) و آقایان آلن وپروت (ALLEN & PRUITT, 1986) توسعه یافته است دربررسی‌های مقایسه‌ای انجام پذیرد. ولی درهرحال باید توجه داشت که (بهتر است) از داده‌های اندازه‌گیری شده پرهیز شود و به جای آن، ترجیحاً از مشاهدات و مشخصه‌های محلی استفاده به‌عمل آید.

- به‌نظر می‌رسد ابداع روش دمایی دیگری، مبتنی بر تشعشع خالص ودرجه حرارت ماگزیمم ومی‌نیمم امکان پذیر باشد. در این مورد بررسی های مقایسه‌ای و مبتنی بر واسنجی با فرمول پنمن ـ مانتیس می‌تواند مورد تایید باشد.

د - بحث پیرامون روش تشتک تبخیر:

- روش تشتک فعلی کافی ارزیابی گردید.
- چند روش غیر مستقیم (POLYNOMINAL) نیز توسط فری‌ورت FREVERT, 1986، وجنسن و همکاران (JENSEN et al, 1990) براساس تخمین رطوبت نسبی، باد و شرایط و ارتفاع وزش باد (UPVIND FETCH CONDITIONS) جهت سهولت محاسبات پایه مورد استفاده قرار بگیرد.

گروه ومجمع فنی شماره III: پارامترهای فیزیکی واندازه‌گیری داده‌های هواشناسی:

الف - پارامترهای فیزیکی:

در این گردهمایی دستوالعمل‌های محاسبه وتعیین پارامترهای مختلف معادله تبخیر تعرق، تحت عنوان: «تجزیه وتحلیل روش‌های آب مورنیاز گیاهان» (سند علمی شماره ۴) مورد بحث وبررسی قرار گرفت. توصیه‌های مربوط در این زمینه به‌قرار زیر ارایه‌گردید که شرح کامل آن در قسمتهای بعدی این گزارش آمده است.

دستورالعمل‌های زیر جهت تبدیل تمام سیستم‌های آحاد به سیستم بین‌المللی (متریک) توصیه شده است:

□ در رابطه با گرمای نهان تبخیر (λ): توصیه گردید تاطبق روش هاریسون (HARRISON,1963) عمل شود.

□ در رابطه با فشار بخار اشباع (e): توصیه گردید طبق روش ته‌تنس (TETENS 1930) عمل شود.

□ در رابطه با شیب تغییرات فشار بخار آب نسبت به‌درجه حرارت (Δ) توصیه شد با مشتق گیری از رابطه ته‌تنس (TETENS) عمل شود.

□ در رابطه با ثابت سایکرومتری γ توصیه شد طبق روش برونت (BRUNT, 1952) عمل شود.

□ در رابطه با فشار اتمسفر (P) توصیه شد مطابق باروش بورمان وهمکاران (BURMAN et al 1987) عمل شود.

□ در رابطه با چگالی اتمسفر (ρ) توصیه شد مطابق با قانون گازهای کامل و درجه حرارت واقعی، بدان گونه که توسط جنسن وهمکاران (JENSEN et al, 1990) تعریف شده است، عمل شود.

□ در رابطه با فشار واقعی بخار آب (که به مثابه فشار بخار اشباع دردمای نقطه شبنم (e_d) تعریف می‌شود) توصیه گردید طبق روش ته‌تنس (TETENS 1930) عمل شود.

□ جهت تخمین e_d روش‌های زیر توصیه گردید:

- در رابطه با نحوه استفاده از داده‌ها برای به‌دست آوردن رطوبت نسبی (RH)، بهتر است از RH می‌نیمم ودرجه حرارت ماگزیمم ومی‌نیمم جهت محاسبه e_d، به‌جای متوسط گیری از داده‌های مربوط به‌رطوبت نسبی (RH) استفاده شود.
- لازم است رطوبت نسبی و درجه حرارت به‌طور همزمان اندازه‌گیری شوند. از متوسط گیری دمای تر و خشک (و استفاده از آن به‌عنوان معدل درجه حرارت خشک) و استفاده از متوسط رطوبت نسبی (RH) پرهیز شود.
- در مورد داده‌های مربوط به سایکرومتری (دمای خشک و دمای تر) می‌توان معادله سایکرومتری (رطوبت سنجی) رابراساس واسنجی آن در رابطه با شرایط مختلف از نظروزش باد به کار برد.

- در شرایطی که داده‌های اندازه‌گیری شده سایکرومتری (رطوبت سنجی) ویا رطوبت نسبی (هیگرومتری) در دسترس نباشد، در مناطقی با آب و هوای مرطوب، درجه حرارت می‌نیمم می‌تواند جهت تخمین دمای نقطه شبنم قابل قبول باشد.

□ **فاکتورهای مقاومت در معادله پنمن ـ مانتیس:**

- جهت شبیه‌سازی تبخیر تعرق پوشش گیاهی لازم است ثابت سایکرومتری (رطوبت سنجی) اصلاح شده، و بدانگونه که آقای مانتیس پیشنهاد می‌کند، به‌کاربرده شود.
- لازم است مقاومت گیاه بدان گونه که آقای آلن و همکاران (ALLEN et al, 1989) توصیه می‌کنند همراه با ضریب همبستگی LAI (شاخص سطح برگ) آن باگیاه چمن ویونجه تخمین زده شود.
- لازم است مقاومت آیرودینامیکی همان گونه که آقای آلن و همکاران ALLEN et al, (1989) توصیه کرده‌اند همراه با رابطه استاندارد شده برای مقدار اصطکاک (زبری) حرکت جنبشی، و انتقال بخار آب، برای سطح مقایسه جابه‌جایی نیمرخ باد (جهت به دست آوردن ارتفاع سرعت باد و اندازه‌گیری دما و رطوبت)، تخمین زده شود.

□ **تشعشع بالای جو:**

- فرمول پیشنهادی دوفی ـ بیک‌مان (DUFFIE & BECKMAN, 1980) به‌عنوان فرمولی که جهت محاسبه تشعشع بالای جو و طول مدت روز دارای دقت کافی است، توصیه گردید. محاسبه براساس برآورد میل خورشیدی، فاصله نسبی خورشید اززمین و «درجه ساعت غروب» (SANSET HOUR ANGLE)، بدان گونه که آقای جنسن و همکاران (JENSEN et al, 1990) پیشنهاد می‌کنند، به‌طور ساده انجام می‌شود.
- برای استفاده از این فرمول باید توجه داشت که ارقام محاسبه شده برای عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۵۵ درجه (>۵۵N.L)، به‌ویژه در ماه های زمستان، سازگاری و هماهنگی لازم را ندارد. جهت تعیین این انحرافات (و ناسازگاری ها) می‌توان ازجداول تهیه شده توسط آقای اسمیت سونیان (SMITH SONIAN) استفاده کرد.
- لازم است محاسبه طول روز براساس «زاویه ساعت غروب» برآورد شود.

ب - توصیه در رابطه با انتخاب سیستم واحدها:

- لازم است همیشه از سیستم متریک که به‌عنوان سیستم استاندارد بین‌المللی مورد قبول همگان می‌باشد استفاده شود.

□ لازم است لیست کامل واحدها، باضرایب تبدیل ازسیستم *C. G. S* به‌سیستم متریک *(M.K.S)* تهیه شود.

- نظر به گسترش استفاده از داده‌های دیجیتالی درمراحل مختلف، لازم است استفاده از الگوریتمها به‌جای جداول، اساس همه روش‌هاس محاسباتی قرار بگیرد.
- لازم است برای استفاده کنندگانی که دسترسی به تسهیلات مربوطه ندارند امکان استفاده از جداول و فرم‌هایی که انجام محاسبات را تسهیل می‌کند، به نحو مقتضی فراهم گردد.

ج - مراحل مختلف اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی:

این موضوع براساس چکیده نقطه‌نظرهای کارشناسان مختلف در رابطه با داده‌های هواشناسی مورد بحث و بررسی قرار گرفت (سند علمی شماره ۳ وشماره ۴ فصل دوم گردهمایی بزرگ).

در این میان موارد زیر مورد بحث وبازنگری قرار گرفت:

□ **داده‌های مربوط به‌درجه حرارت:**

- روش استاندارد دایر به‌محاسبه درجه حرارت متوسط براساس درجه حرارت ماگزیمم ومی‌نیمم ($\frac{T_{max}+T_{min}}{2}$) به‌عنوان روش مناسب (برتر) ارزیابی گردید. باید توجه داشت در شرایطی که «داده‌های ساعتی» برای محاسبه درجه حرارت متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد، نتایج ممکن است با متوسط شبانه‌روزی تفاوت داشته باشد.
- در رابطه با مناطق خشک لازم است ضریب «شاخص خشکی» دخالت داده شود *(ALLEN & PRUITT, 1986)* تا تفاوت شرایط جوی، بین یک منطقه وسیع که تحت کشت قرارگرفته است (و میکروکلیمایی به‌آن حاکم است)، باشرایط ایستگاه هواشناسی (که درمنطقه خشک قرار دارد) به‌حساب بیاید.

□ **داده‌های مربوط به‌رطوبت:**

- اندازه گیری رطوبت به‌طور معمول با سایکرومتر (دماسنج تروخشک) و یا هیگرومتر (اندازه‌گیری رطوبت نسبی RHکالیبره شده) انجام می‌گیرد.
- برای محاسبه درجه حرارت نقطه شبنم لازم است تعیین فشار واقعی بخار براساس مشاهدات (قرائت) نیمه اول روز انجام بگیرد، ونه براساس متوسط داده‌های روزانه دماسنج تر وخشک. (همچنین به‌بخش پارامترهای فیزیکی ـ فشار واقعی بخار مراجعه شود).
- لازم است محاسبه درجه حرارت نقطه شبنم براساس متوسط روزانه رطوبت نسبی، به‌تمام، منسوخ گردد.
- روش‌های مختلفی برای محاسبه کمبود فشار بخار (VPD) برای برآورد اثر متقابل بین سرعت باد وکمبود فشار بخار در معادله باد وجود دارد.

در این گردهمایی توصیه گردید که رابطه کاربردی استاندارد زیر حفظ شود:

$$VPD = \frac{[e(T_{max}) + e(T_{min})]}{۲} - e(T_{dew})$$

□ **داده‌های مربوط به‌تشعشع:**

دقت داده‌های تشعشع از نظر اثر زیاد آن روی برآوردET_Oاهمیت به‌سزایی دارد. داده‌های استاندارد دراکثر حالات از محاسبه مقادیر تشعشع بالای جو ونسبت ساعات آفتابی به‌دست می‌آید.

- به‌نظر می‌رسد بهنگام کردن معادله تجربی و استفاده از آن برای برآورد تشعشع موج کوتاه وموج بلند مناسبتر باشد، به‌ویژه که منحنی تشعشع خورشیدی درشرایط بدون ابر وانتشار امواج بلند درهوای صاف، درآن منظور شده‌است.
- در حال حاضر تشعشع سنج های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که قبل از هرگونه مقایسه نتایج حاصل ازآنها (و تجزیه و تحلیل آن) لازم است احتیاطات و دقت‌های لازم در ارتباط با انواع حساس (سنسوردار)، همچنین در رابطه با طراحی و عمر مفید دستگاهها، و نحوه نگهداری آنها انجام بگیرد. برای این کار توصیه می‌شود وسایل و

دستگاه ها استاندارد و واسنجی شده (و قبل از استفاده از آنها) از صحت کارآنها اطمینان حاصل شود وتست‌های لازم انجام بگیرد.

□ **داده‌های مربوط به‌سرعت باد:**

- اندازه‌گیری سرعت باد کلاً ساده وقابل اعتماد است وبهتراست با بادسنج‌های تجمعی اندازه‌گیری شود (INTEGRATING ANEMOMETER) محل کار گذاشتن بادسنج اثر زیادی روی داده‌های مربوط به‌سرعت باد و از آنجا روی برآورد ET_o می‌گذارد لذا لازم است، جهت استفاده از داده‌های مربوط به‌سرعت باد به‌محل کارگذاشتن بادسنج توجه شود که زیاد بادگیر نباشد وبه‌عکس درمحل حفاظت شده (درمیان موانع، ساختمانها وتاسیسات وغیره) قرار نگرفته باشد.

بسط و انتقال نتایج (EXTRAPOLATION) مربوط به‌اندازه‌گیری سرعت باد دارارتفاعات مختلف به‌ارتفاع دومتری براساس استفاده از معادله لگاریتمی که توسط آلن وهمکاران (ALLEN et al, 1989) پیشنهاد شده‌است میسر می‌باشد. در این معادله عامل زبری سطح زمین در نظر گرفته شده است.

□ **داده‌های مربوط به‌تبخیر:**

- در رابطه با داده‌های تشتک تبخیر، به‌نقطه نظرهای ارایه‌شده دربخش نیازهای تجهیزاتی «روش تبخیر» ارجاع داده می‌شود.
- اندازه‌گیری تبخیر با استفاده از لیسیمتر ویا سایر داده‌های اندازه‌گیری شده رابطه ادی (EDDY CORRELATION) و کسر بوون (BOWEN RATIO) می‌تواند موضوع یک دستورالعمل جداگانه‌ای باشد.

د - دستگاه ها، و تجهیزات وایستگاه‌های هواشناسی:

در رابطه با اندازه‌گیری داده‌های اقلیمی ونحوه کارآنها لازم است توصیه‌های اساسی زیر مورد توجه قرار بگیرد:

- لازم است همکاریهای نزدیک باسازمان جهانی هواشناسی، به‌ویژه در رابطه با

تجهیزات، دستگاهها و دستورالعمل‌های مربوطه (و کاربرد صحیح آنها) از جمله کسب اطلاعات لازم در مورد دستگاه‌های جدید دیجیتال، هرچه بیشتر گسترش پیدا کند.

- لازم است پاره‌ای از دستگاه‌ها قبل از نصب، براساس روش‌های الکترونیکی و یا مکانیکی مورد آزمایش و تست قرار می‌گیرد.

هـ - مقیاس زمانی:

انتخاب مقیاسهای زمانی مختلف، براساس مورد کاربرد از یکسو ودقت مورد انتظار از روش‌های اندازه‌گیری که به‌کاربرده می‌شوند، از سوی دیگر، انجام می‌گیرد.

در این رابطه توصیه‌های زیر ارایه گردید:

+ برای برنامه ریزی آبیاری: برآورد بامقیاس ماه انجام بگیرد.
+ برای طراحی آبیاری: برآورد با مقیاس ۱۰روز انجام بگیرد.
+ برای تنظیم تقویم آبیاری (IRRIGATION SCHEDULING) برآورد بامقیاس روز انجام بگیرد.
+ برای تحقیقات آبیاری: برآورد بامقیاس ساعت انجام بگیرد.

مقیاس زمان در رابطه با روش مورداستفاده (ودقت مورد انتظار):

+ برای روش پنمن ـ مانتیس ازمقیاس ساعت ـ روز ـ ده روز وماه استفاده شود.
+ برای روش تشعشع ازمقیاس ساعت ـ روز ـ ده روز و ماه استفاده شود.
+ برای روش دمایی ازمقیاس ده روز ـ ماه استفاده شود.
+ برای روش تبخیر از مقیاس ده روز ـ ماه استفاده شود.

و - محاسبه ساعتی:

- از اندازه‌گیری داده‌ها ومقیاس ساعتی، بیشتر درکارهای تحقیقاتی استفاده می‌شود. دراینمود لازم است دستورالعمل های جداگانه‌ای تدوین شود، ودر مورد پاره‌ای از روابط باید تجدیدنظر صورت بگیرد.
- از نظر محدودیت استفاده‌کنندگان از داده‌هایی که با مقیاس ساعت اندازه‌گیری می‌شود وپیچیدگی تفسیر معادلات مختلف، برای FAO درمرحله کنونی پرداختن به‌دستورالعمل مربوط به‌محاسبات، با مقیاس ساعت توصیه نگردید.

گروه ومجمع فنی IV : تبخیر تعرق، وضرایت گیاهی؛

بحث‌های این مجمع در رابطه با سئوالات ومسائل مطروحه توسط کارشناسان مختلف (موضوع سند علمی شماره۴) بوده‌است.
نقطه نظرها وسئوالات مهم واساسی به‌قرار زیر بوده‌است.

الف - انتخاب گیاه مرجع:

همچنانکه قبلاً بحث شد، گیاه مرجع باید یک گیاه فرضی در نظر گرفته شود، به‌طوری که از نظر فاکتورهای مقاومت، آلبیدو وسایر متغیرهای گیاهی، بدان گونه که درمعادله پنمن ـ مانتیس پیش‌بینی شده است، استاندارد باشد با اینکه به طور کلی یونجه مشابهت بیشتری با محصولات زراعی دارد، با این حال گیاهی که به‌عنوان مرجع توصیه می‌شود باید به طور دقیق شبیه چمن متراکم به‌ارتفاع ۱۲سانتیمتر باشد. از این نوع چمن درایستگاه‌های هواشناسی جهت مشاهدات (و اندازه‌گیری های) استاندارد استفاده می‌شود.

مقایسه و ارزشیابی روش‌ها وتبدیل ارقام به‌دست آمده از هرگیاه مرجع دیگر، مثل یونجه (به‌گیاه مرجع استاندارد فرضی فوق الذکر) با استفاده از ضریب همبستگی که درمعادله پنمن ـ مانتیس پیش‌بینی شده است، به‌سهولت میسر خواهد بود.

این ضریب براساس بازنگری درمقادیر فاکتور مقاومت گیاهی، ومقاومت آئرودینامیکی به‌دست آمده است.

ب - بازنگری درضریب گیاهی (K_c) پیشنهادی *FAO-24* (روش دو مرحله‌ای):

- با اینکه حذف ضریب گیاهی (K_c) دربرنامه کار روش پنمن ـ مانتیس قرار دارد، ولی درحال حاضر اطلاعات قابل اطمینان در مورد فاکتور مقاومت گیاهی دردسترس نیست، لذا استفاده از ضریب گیاهی (روش دومرحله‌ای)، هنوز هم باید به‌عنوان روشی که کارآیی آن مورد تایید قرارگرفته است، توصیه گردد.
- لازم است اثر باد ورطوبت روی ضریب گیاهی،که درحال حاضر براساس بازنگریهای انجام شده توسط پنمن ـ مانتیس صورت گرفته است، بیشتر مورد بررسی، وتجزیه

وتحلیل قرار گیرد. این امر موجب خواهد شد تابتوان ضریب گیاهی را در اقلیم‌های مختلف، به‌سهولت به‌کاربرد.

- به‌روز کردن ضریب گیاهی، مبتنی بر کارهای تحقیقاتی درسطح جهان وبازنگری مربوطه، موجب اصلاح ضرایب فعلی خواهد شد.
- لازم است ضریب گیاهی در رابطه با درختان، کشت‌های حفاظت شده (وبا شرایط ویژه مثل کشت های زیر نایلون، کشت های گل خانه‌ای و غیره) و روش آبیاری قطره‌ای و اثرات خاصه آنها روی این ضریب، بیشتر مورد بررسی قرار بگیرد.

ج - ضریب گیاهی وروش یک مرحله‌ای:

- به‌موازات تکمیل اطلاعات در رابطه باضریب گیاهی (وروش دومرحله‌ای)، لازم است اطلاعات وداده‌های مربوط به اثر فاکتور مقاومت گیاهی، *LAI* (شاخص سطح برگ)، ارتفاع گیاه، آلبیدو (بازگشت انرژی از سطح گیاه) درطول فصل رشد، در روی ضریب گیاهی جمع‌آوری، و مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد، تا راه برای استفاده از روش یک مرحله‌ای هموار شود. انتظار می‌رود این کار در ده سال آینده تحقق پیدا کند.
- لازم است مطالعات و بررسی‌های ویژه‌ای در رابطه باساختار گیاهان، تغییرات فاکتور مقاومت گیاهی در رابطه با شرایط خاک، آب و هوا، طی فصل رشد، همچنین اثر رطوبت و مقاومت سطح خاک روی تبخیر انجام پذیرد.
- لازم است انرژی، اندازه‌گیری‌های مربوط به‌ضریب بوون *(BOWEN)* مدل‌های شبیه‌سازی به‌عنوان مبانی وابزارهایی جهت بالابردن دقت تجزیه وتحلیل مورد استفاده قرار بگیرد.

د - دوره‌های مختلف رویش و رشد نباتی و فصل رشد :

- لازم است همزمان باتکمیل اطلاعات مربوط به‌ضریب گیاهی (روش دومرحله‌ای)، وفاکتورمقاومت گیاهی (روش یک مرحله‌ای)، اطلاعات مربوط به‌مراحل مختلف رویش ورشد (نمو اولیه، نمو ثانویه، رشد فعال، مرحله رسیدن)نیز گرد آوری شود.
- با استفاده از مدل های پیشرفته، و ترجیحاً با به‌کارگیری داده‌های مربوط به‌درجه

حرارت، شبیه‌سازی «درجه ـ روز»، میزان تشعشع که صرف فتوسنتز می‌شود، طول روز، می توان روش تعیین مراحل رویش ورشد را، برپایه میزان انرژی، تکمیل کرد.

هـ - ضریب گیاهی درمرحله نمواولیه (Kc1):

- روشی که درنشریه FAO-24، شکل ۶، جهت تعیین ضریب گیاهی درمرحله نمواولیه ارایه‌شده است هنوز هم کارآیی لازم را دارد ولی لازم است به‌هنگام شود.
- مدلی و مفاهیمی که در مدل‌های مختلف، مربوط به آب موجود درخاک گسترش پیدا کرده است، می‌تواند جهت تکمیل روش تعیین ضریب گیاهی درمرحله نمو اولیه کمک نماید.
- مفاهیمی که توسط پنمن ـ مانتیس به‌کاربرده می‌شود، ممکن است بتواند ضریب مربوط به‌مقاومت گیاه و مقاومت خاک را، تواماً مورد استفاده قرار دهد.

و - باران موثر:

- عوامل مختلف، مثل ذخیره آب درخاک، نفوذ آب، زهکشی سطحی وزهکشی عمقی بعلاوه خصوصیات بارندگی‌ها (مثل مقدار بارندگی ـ شدت بارندگی و غیره) در تعیین باران موثر نقش دارد.
- باران موثر وعوامل موثر درآن، موضوع بررسی‌های جداگانه‌ای است که کلاً خارج از حیطه برنامه کار «بازنگری درروش‌های تعیین آب موردنیاز گیاهان» وچهارچوب نشریه حاضر، قرار دارد.

- استفاده از مدل‌های برآورد روزانه آب موجود در خاک، به‌گونه‌ای که در سطح مزرعه کاربرد داشته باشد، کمک می‌کند تابتوان در روش‌های محاسبه باران موثر تجدیدنظر به عمل آورد.
- تخمین مولفه بخشی از باران که درخاک نفوذ می‌کند، بااستفاده از روش «شماره منحنی» سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS CURVE NUMBER METHOD) امکان‌پذیر خواهد بود.

ز - طراحی و برنامه ریزی آبیاری:

- در حال حاضر بررسی طراحی‌های آبیاری وبرنامه‌ریزی دردستور کار این نشریه، موضوع تجدیدنظر درروش‌های تخمینی آب موردنیاز گیاهان قرار ندارد. درگردهمایی پیشنهاد گردید تااین کار به‌عهده گروه جداگانه‌ای محول شود تااین گروه رابطه بین روش‌های مختلف تعیین آب موردنیاز گیاهان ومحاسبات مربوطه را، با موضوع طراحی، وبرنامه‌ریزی ومدیریت آبیاری (تنظیم تقویم آبیاری وزمانبندی آبیاری) برقرار سازد
- لازم است نیاز آبی یا شامل آب موردنیاز (خالص) گیاهان، آب موردنیاز خاکشویی، منظور کردن سهم آب زیرزمینی وراندمان آبیاری، باتوجه به‌اطلاعات قابل اعتماد روش‌هایی که دردهسال اخیر توسعه یافته است مورد تجدیدنظر قرار بگیرد.

ح - اب موردنیاز و همکاری ها:

- در شرایط دیم لازم است حالتهای ویژه، مثل باران موثر، تبخیر تعرق درشرایط تنش (کمبود آب)، مورد توجه و بررسی قرار بگیرد.
- محتملاً مبانی و مفاهیمی راکه در روش پنمن ـ مانتیس بسط داده شده‌است، ترجیحاً بتوان با استفاده از مدل‌های مختلف و پیشرفته بیلان رطوبت خاک، برای توضیح مفاهیم مرتبط با روش‌های تعیین آب مصرفی دیمکاری‌ها، به‌کار بست.

ط - ادامه مباحث گردهمایی وبررسیهای انجام شده:

طبق توصیه کارشناسان، جهت تدوین وتکمیل روش‌ها وگزینه‌های دیگر (برای تبخیر تعرق مرجع)، لازم است تحقیقات وسیعی انجام بگیرد نتایج این تحقیقات جمع‌آوری و جمع‌بندی شود. منابع *FAO* جهت انجام این تحقیقات و بررسی ها کافی نیست. ولی، خوشبختانه کارشناسان و محققان مراکز تحقیقات معتبر، در سطح جهان علاقمندی خود را جهت مشارکت در این بررسی ها نشان داده‌اند. در این میان *FAO* به‌عنوان هماهنگ‌کننده فعالیتها، با برقراری ارتباط با موسسات تحقیقاتی درسراسر دنیا و فراهم آوردن داده‌های لازم، نقش خود رادر این مطالعات ایفاء خواهد کرد. مساعدت موسسات

بین‌المللی، مثل کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی *(ICID)* نیز در این میان بسیار مفید خواهد بود.

خطوط اصلی موضوعات مورد بررسی، که باید انجام بگیرد، به‌قرار زیراست:

روش‌های تخمین تبخیر تعرق مرجع

روش ترکیبی

ارزیابی درجه اعتبار روش پنمن ـ مانتیس:

بررسی‌های زیادی جهت ارزیابی (درجه اعتبار و کارآیی) روش پنمن ـ مانتیس در اقالیم مختلف، به‌ویژه درآب و هوای گرم ومرطوب، و در شرایطی که جریانهای جانبی هوا وجود دارد، انجام شده‌است.

مطالعات لازم در مورد یک روش واسنجی (کالیبره کردن)، به‌طوریکه بتوان تبخیر تعرق گیاهان مرجع را به خصوصیات هواشناسی ارتباط داد، موردنیاز خواهد بود.

برای انجام این مطالعات لازم است داده‌های قابل اطمینان ودقیق مربوط به‌تبخیر تعرق از طریق لیسیمتر ویااز طریق روش بیلان انرژی در دسترس قرار بگیرد. به‌این منظور میتوان ایستگاه‌های لیسیمتری مجهزی با مدیریت صحیح و داده‌هایی باکیفیت قابل قبول تاسیس کرد.

محاسبه ET_O ساعتی (ساعت به‌ساعت):

در رابطه با تهیه دستورالعمل برای تعیین تبخیر تعرق براساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی خودکار، که درآنها اندازه‌گیری‌ها هرساعت یکبار (ساعت به‌ساعت) انجام می‌گیرد، تنظیم معادلات مختلف به طوری که داده‌های این اندازه‌گیری‌ها (داده‌های هواشناسی) را به‌تبخیر تعرق ساعتی ارتباط دهد ضروری است.

ارزیابی کارآیی روش پنمن ـ مانتیس توصیه شده:

با توجه به ارزش تاریخی روش پنمن و کثرت استفاده‌کنندگان از این روش درحال حاضر، لازم است همه این تجارب و شواهد، که به‌حدکافی، از کاربرد روش پنمن و در جهت تایید روش پنمن FAO به‌دست آمده است، جمع آوری (و جمع‌بندی) شوند. تفاوت در نتایج اخذ شده از دو روش (پنمن ـ مانتیس و پنمن) باید درشرایط جوی مختلف مورد برآورد وارزیابی قرار بگیرد.

لازم است بررسی ها و توضیحات شامل نارسایی های روش پنمن – FAO در موارد زیر باشد:

- □ استاندارد نبودن تابع باد
- □ کافی نبودن درجه اطمینان ضریب اصلاحی
- □ ناهماهنگی زیاد وعدم کفایت فرمول در رابطه با بادهای شدید

بازنگری در روش تشعشع:

در این گردهمایی نتیجه‌گیری گردید که ممکن است بتوان روش اصلی تشعشع FAO را که برفرمول تشعشع ماکینک (MAKKINK) و ضریب تصحیح رطوبت و باد استوار است به قرار زیر تکامل بخشید:

- □ وارد کردن عامل تشعشع باطول موج بلند درفرمول، دربخش مربوط به‌تشعشع (پریستلی وتایلور PRIESTLY - TAYLOR) وبه‌کاربردن درجه حرارت، درارتباط باهمبستگی آن با پارامتر انتشار EMISSIVITY (ایدسو و جاکسون - IDSO JACKSON).
- □ در صورت امکان، برقراری ارتباط بین کمبود فشار بخار از یکسو ودرجه حرارت ماگزیمم ومی‌نیمم از سوی دیگر، پارامتری که امکان دهد تابتوان بخش آیرودینامیکی را برآورد نمود.

بازنگری در روش دمایی:

در این گردهمایی توصیه گردید بررسی‌های بیشتری جهت جایگزین کردن روش بلانی کریدل فعلی با یک گزینه دیگر، صورت پذیرد.

با استفاده از درجه حرارت ماگزیمم و می‌نیمم ممکن است بتوان بین آنها، و شرایط اقلیمی، رابطه لازم رابرقرار نمود. واسنجی مربوطه، با استفاده از روش پنمن ـ مانتیس، به‌عنوان مرجع، امکان پذیر خواهد بود

تخمین تبخیر تعرق براساس تشتک تبخیر

بازنگری در ضرایب تشتک:

با تجزیه وتحلیل بیلان انرژی تشتک تبخیر می‌توان تبخیر از تشتک را به تبخیر تعرق گیاه، ارتباط داد، مشروط به‌اینکه درضرایب تبخیر تجدید نظر شود ودرجه کارآیی آنها دراقالیم مختلف، وشرایط نصب تشتک (وشرایط ایستگاه اندازه‌گیری) مورد ارزیابی قرار بگیرد.

استاندارد کردن شرایط نصب و نگهداری تشتک:

نظر به‌تجربیات محلی زیاد در رابطه باانتخاب محل مناسب ونحوه تاسیس ایستگاه اندازه‌گیری و نصب تشتک تبخیر و نحوه نگهداری و مدیریت آن، و تاثیر به‌سزای این عوامل روی تخمین تبخیر، لازم است آموزش‌های لازم در رابطه با طراحی، نصب، نگهداری و نحوه اندازه‌گیری به استفاده‌کنندگان از این روش داده شود و دستورالعمل های مربوطه در اختیار آنان گذاشته شود.

پارامترهای فیزیکی و متغیرهای اقلیمی

پارامترهای فیزیکی:

لازم است لیست کاملی از ضرایب تبدیل آحاد از سیستم متریک *(SI)* به سیستم *CGS*

تهیه شود.

برای تشعشع باید از واحد [Wm^{-2}] به‌جای [$MJm^{-2}d^{-1}$] که مستقل از بعد زمان است، استفاده شود.

لازم است الگوریتم‌های مربوطه جهت تعیین پارامترهای مختلف همراه با ارایه جداول و روش‌های محاسباتی، برای آن عده از استفاده کنندگان که دسترسی به‌کامپیوتر ندارند، تهیه شود.

متغیرهای اقلیمی

کمبود فشار بخار VPD:

تجربیات وراههای مختلفی جهت تعیین متوسط روزانه کمبود فشار بخار (VPD) براساس داده‌های رطوبت نسبی (HYGROMETER) و رطوبت سنجی، سایکرومتری (PSYCHROMETER) وجود دارد.

براساس داده‌های مربوط به اقالیم مختلف می‌توان با استفاده از مقادیر ساعتی VPD، تبخیر تعرق را براساس رطوبت نسبی (RH) و e_d محاسبه کرد و بین آنها بهترین همبستگی را برقرار نمود.

داده‌های مربوط به‌تشعشع:

به هنگام کردن معادلات تجربی جهت برآورد تشعشع خالص با طول موج کوتاه وبلند حائز کمال اهمیت است.

جهت بررسی‌های مقایسه‌ای بازنگریهای زیر ضرورت دارد:

- بازنگری در رابطه با آنگستروم (ANGSTROM) برای آب وهواهای مختلف وتغییرات زمانی (فصلی) ومکانی آنها.
- بازنگری در منحنی تشعشع خورشیدی درشرایط بدون ابر وانتشار امواج بلند.
- بازنگری در مقادیر ضریب انعکاس α برای گیاهان مختلف و تغییرات فصلی (زمانی) و

مکانی آنها.

تشعشع سنج های مختلفی وجود دارد که مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله این دستگاهها، قبل از هرگونه تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای (و نتیجه‌گیری) لازم است در رابطه با سیستم سنسور (SENSOR در انواع سنسوردار)، از طراحی، سالهای کارکرد و شرایط نگهداری، دقت و صحت این دستگاه ها اطمینان کامل حاصل شود.

جریان (شار) گرمایی خاک:

برای ارزیابی اثر شار گرمایی خاک روی میزان تبخیر تعرق درشرایط مختلف (از نظر نوع خاک ـگیاه ـو آب و هوا) و با مقیاس‌های زمانی مختلف (ساعت ـروز و ماه) و راه های عملی جهت برآورد آنها بررسی‌های بیشتری ضرورت دارد.

سرعت باد:

محل نصب بادسنج‌ها، بسته به اینکه در فضای باز و یا بسته کارگذاشته شده باشند، اثرزیادی روی داده‌های مربوط به سرعت باد خواهند داشت. داده‌های کلی‌تر، امکاناً براساس تعمیم و بسط نتایج (EXTRAPOLATION) اندازه‌گیری باد در ارتفاعات بالا، برای اینکه نتایج دقیق‌تری داشته باشد، به مطالعات بیشتری نیاز دارد.

اثر باد روزانه و شبانه در روی تبخیر تعرق، می‌تواند بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرد.

وسایل، تجهیزات و ایستگاه‌های هواشناسی:

توصیه‌های اساسی جهت اندازه‌گیری و شناخت پروسه داده‌های اقلیمی به طور وسیع موردنیاز می‌باشد.

همکاری های نزدیک با سازمان جهانی هواشناسی و تدوین دستورالعمل‌هایی در رابطه باوسایل وتجهیزات ایستگاه‌های هواشناسی وتاسیس آنها، همراه با معرفی بخشی از وسایل جدید دیجیتال، لازم است توسعه یابد. این بخش می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- معرفی تکنیک‌های مختلف اندازه‌گیری‌ها با دستگاههای الکترونیکی ومکانیکی.
- تشتک تبخیر: استاندارد کردن طراحی تشتک‌های تبخیر، طرز نصب و شرایط مختلف نصب و نگهداری آنها جهت به‌دست آوردن دقت لازم دراندازه‌گیری‌های حساس.
- وسایل تبخیر سنجی: اندازه‌گیری‌های مربوط به‌لیسیمتر وداده‌های اندازه‌گیری شده دیگر، مثل ضریب همبستگی ادی (EDDY) وداده‌های مربوط به «کسر بوون» (BOWEN RATE) را می‌توان طی دستورالعملهای جداگانه، ویژه محققان، تدارک دید ودراختیار آنان گذاشت.
- تشعشع سنج و پیرانومتر: لازم است دستورالعمل‌های مختلفی را در رابطه با طرز کاربرد، نگهداری وواسنجی جهت استاندارد کردن، درجه حساسیت اندازه‌گیری تشعشع خالص خورشید، تنظیم کرد تامورد استفاده قرار بگیرد.

متغیرهای اقلیمی:

تغییرات مکانی:

کاربرد داده‌های یک ایستگاه هواشناسی برای منطقه وسیع، محدودیت های خاص خود را دارا می‌باشد. روش تعیین تبخیر تعرق مناطق باید براساس تفاوتهای مربوط به‌میکروکلیما، گیاه، خاک و تغییرات ارتفاع صورت بگیرد.

در نظر گرفتن میزان تاثیر ارتفاع، طبق روش پیشنهادی هارگریوز (HARGREAVES, 1980) در این مورد می‌تواند نمونه خوبی به‌حساب بیاید. استفاده از تکنیک ردیابهای حساس از راه دور می‌تواند اطلاعات بیشتری از تغییرات مکانی عوامل جوی به‌دست دهد.

تغییرات زمانی:

باآنکه واریانس استاتیستیکی (انحراف معیار آماری) بارندگیها به‌صورت یک روش محاسباتی متداول درآمده است، ولی چنین روش‌هایی معمولاً برای تبخیر تعرق گیاه مرجع وسایر متغیرهای اقلیمی به‌کارگرفته نمی‌شود. هم‌چنین برای بررسی‌های مقایسه‌ای، لازم است تغییرات تبخیر تعرق و سایر متغیرهای اقلیمی طی سال‌های

مختلف مورد ارزیابی قرار بگیرد، وروش‌های عملی جهت منظور کردن اثر آن در برنامه‌ریزی مدیریت آبیاری توصیه شود. لازم است یک پیوست مشتمل بر دستورالعمل برای تجزیه و تحلیل آماری دقیق در نظر گرفته شود.

آب موردنیاز گیاهان:

مقایسه گیاهان مرجع:

جهت مقایسه وارزیابی درجه صحت روش‌های تبخیرسنجی (تشتک تبخیر) لازم است از تبخیر تعرق گیاهان مرجع مثل یونجه که (به‌وسیله لیسیمتر) اندازه‌گیری شده باشد، استفاده به‌عمل آید و ضریب همبستگی آن با تبخیر تعرق گیاه مرجع استاندارد (تبخیر تعرق مرجع استاندارد) مشخص گردد. جهت انجام تبدیلات لازم (تبدیل تبخیر تعرق مرجع استاندارد به‌تبخیر تعرق سایر گیاهان) لازم است مقدار دقیق ضریب مقاومت آیرودینامیکی، همانگونه که روش پنمن ـ مانتیس پیشنهاد می‌کند، مشخص گردد (و در رابطه وارد شود).

بازنگری در رابطه با ضریب گیاهی K_c (روش دومرحله‌ای):

با اینکه هدف نهایی روش پنمن ـ مانتیس حذف ضریب گیاهی است ولی در حال حاضر اطلاعات دقیق در رابطه با مقاومت گیاهی در دست نیست، لذا روش تعیین ضریب گیاهی K_c (FAO-24) باید حفظ شود. با این حال وقت آن رسیده است تا در ضریب گیاهی بازنگری صورت پذیرد و به‌هنگام شود.

جهت بازنگری لازم است عوامل زیر بیشتر موردبررسی، وتجزیه وتحلیل قرار بگیرد:

- به‌هنگام کردن ضریب گیاهی، و بازنگری در آن براساس نتایج تحقیقات درخور، در سطح دنیا، و در مورد همه محصولات و تعریف ضریب گیاهی درقالب ET مرجع استاندارد (به‌معادلات ET_o مراجعه شود).
- □ لازم است اطلاعات ومعلومات، در رابطه با درختان وپاره‌ای محصولات که حالت ویژه‌ای دارند دقیق‌تر و کامل‌تر شود.
- □ لازم است اثر باد ورطوبت (روی K_c) با در نظر گرفتن خصوصیات ویژه گیاهان مثل ارتفاع، شاخص سطح برگ LAI آلبیدو وغیره، بدان گونه که پنمن ـ مانتیس در روش

خود مطرح می‌نماید، بیشتر مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار بگیرد.

□ لازم است روش‌های کاهش مقادیر K_c برای مناطقی که شرایط زراعی درآنها اپتیمم نیست، یادر شرایط خشک (وکمبود شدید آب) قرار دارند در نظر گرفته شود.

□ لازم است در روش‌های محاسبه مقدار K_c فواصل آبیاری (و یا فواصل بارندگی و خیس خوردگی خاک مزرعه)، نوع خاک، و سایه‌افکنی، آرایش و ترکیب گیاهان و شکل و شمایل آنها (ارشیتکتور) رامورد توجه قرار داد.

تبخیر از سطح خاک:

روش فعلی (برآورد تبخیر از سطح خاک) که بستگی به فواصل آبیاری (ویا بارندگی وخیس خوردگی خاک مزرعه)، و میزان تبخیر تعرق گیاه مرجع است، هنوز هم قابل قبول می‌باشد. ولی می‌توان آنرا تکامل بخشید. برای تجدیدنظر در ضریب گیاهی درمرحله نمو اولیه میتوان از برداشت ها و مفاهیمی که آوایان پنمن و مانتیس به کار می‌بندند استفاده کرد، و مقادیر ضریب مقاومت خاک وگیاه را درهم ادغام نمود. مدل‌های مختلف، مربوط به آب موجود درخاک می‌تواند جهت استفاده از پارامترهای ویژه، برای تعیین K_c درمرحله نمواولیه کمک نماید.

دوره‌های رشد ـ ودوران رشدگیاهی:

به موازات جمع‌آوری (و جمع‌بندی) اطلاعات، در رابطه با ضریب گیاهی (روش دو مرحله‌ای)، در رابطه با مقاومت گیاهی (روش یک مرحله‌ای)، می‌توان در مورد دوره‌های رشد گیاهی نیز اطلاعات لازم را جمع‌آوری کرد.

مدل‌های مختلفی برای دوره‌های رشد، براساس درجه حرارت، «درجه ـ روز» (*DEGREE - DAYS*)، فعالیت خورشیدی و یا تشعشع موثر در کربن‌گیری (فتوسنتز) و طول روز تهیه شده‌است که می‌تواند، ترجیحاً جهت اصلاح (تکمیل) روش برآورد دوره‌های رشد مورد استفاده قرار بگیرد.

لازم است دستورالعمل لازم، جهت محاسبه طول دوره‌های رشد (رویش، نمو اولیه، نمو ثانویه، رشد و رسیدن) برای تمام دوران رشد (فصل رشد یا فصل آبیاری) با طول مدت‌های مختلف تهیه شود.

تدارک مقدمات کار برای اعمال روش یک مرحله‌ای K_c:

به‌موازات تکمیل اطلاعات در رابطه با ضریب گیاهی *(K_c)* لازم است داده‌های مربوط به مقاومت گیاهی، شاخص سطح برگ *(LAI)*، ارتفاع گیاه وآلبیدوی پوشش نباتی در دوران رشد، جمع‌آوری شود، تاراه برای استفاده از روش یک‌مرحله‌ای (که انتظار می‌رود در ده سال آینده عملی شود) هموار و مقدمات کار فراهم شود.

تحلیل‌ها وبررسی‌های ویژه‌ای نیز در رابطه با تغییرات زمانی ساختار و مقاومت گیاهی در رابطه با شرایط خاک و اقلیم، هم‌چنین تکمیل معلومات واطلاعات در رابطه با روش‌های محاسبه مقاومت آیرودینامیکی ضرورت دارد.

آب موردنیاز گیاهان و مدیریت آبیاری:

تعیین هرچه دقیقتر آب موردنیاز برای آبیاری گیاهان مختلف، برای مراحل طراحی، برنامه‌ریزی ومدیریت آبیاری ضرورت دارد. جهت این کار لازم است موارد زیر مورد توجه واقع شود:

- جنبه‌های مختلف و وجوه ویژه آب موردنیاز آبیاری مرتبط با مقدار آب خاکشویی (آبشویی)، سهم آب زیرزمینی در تامین آب موردنیاز گیاهان، و راندمان آبیاری (هم چنین روش‌های جدید که طی دهه‌های اخیر توسعه یافته است)، باید بیشتر و دقیق‌تر مورد بررسی قرار بگیرد.
- در رابطه با باران موثر، وجهات مختلف آن، مثل وضعیت سطوح بارانگیر (توپوگرافی)، نفوذپذیری، جریان سطحی ونفود عمقی پس از هربارندگی (که درمیزان باران موثر و تعیین آن نقش دارند) جادارد که بطور جداگانه مورد تجزیه وتحلیل قرار بگیرد.

  مدل‌های بیلان آب درخاک، که جهت کاربرد درمزارع اختصاص دارند، می‌توانند به بازنگری درروش‌های کنونی باران موثر کمک رسانند.
- در رابطه با تبخیر تعرق تحت شرایط استرس (کم‌آبیاری ویا تنش آبی) لازم است اثر کاهش رطوبت خاک روی تبخیر تعرق، در دورنهایی مطالعات مربوط به K_c وضریب مقاومت گیاهی مورد بررسی قرار گیرد.

  مدل‌های مختلفی در رابطه بارشد گیاه وجود دارد که می‌توانند با به‌کارگیری پارامترهای مربوطه به‌طور گسترده‌تری، به این امر کمک کند.
- برای تنظیم تقویم آبیاری *(IRRIGATION SCHEDULING)* لازم است محاسبه آب موردنیاز آبیاری با در نظر گرفتن روش آبیاری مزرعه، موجودی ذخایر و منابع آب، شرایط مختلف مدیریت کشت‌های آبی، صورت بگیرد.

۴/۱ - مقایسه ۲۰ روش محاسبه و برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_O) برای مقادیر ماهانه در :

- مناطق خشک
- مناطق مرطوب
- سایر مناطق

از

Jensen, M.E,Burman, R.D., & Allen, R.G. 1990

تبخیر و آب موردنیاز گیاهان

نشریه شماره ۷۰، *ASCE*

جدول ۱: خلاصه اولویت‌بندی آماری روشهای تعیین تبخیر تعرق ماهانه (درمقام‌مقایسه باآلیسیمتر) در سواحل جنوبی خزر

Rank [1]	Method [2] روش تعیین ET_O	All Months تمام ماه‌ها					Peak Month ماه حداکثرمصرف					Weighted SEE[7] [13] خطای استاندارد وزنی
		%[2] [3]	SEE[3] [4]	b[4] [5]	r[5] [6]	ASEE[6] [7]	% [8]	SEE [9]	b [10]	r [11]	ASEE [12]	
1	Penman-Monteith	99	0.41	1.01	0.99	0.41	96	0.72	1.04	0.97	0.62	0.49
2	1982 Kimberly-Penman	103	0.48	0.98	0.99	0.45	102	0.72	0.98	0.96	0.70	0.54
3	FAO-24 Radiation	106	0.64	0.95	0.98	0.57	102	0.64	0.98	0.97	0.61	0.62
4	Penman(1963), VPD#3	106	0.65	0.96	0.97	0.60	96	0.80	1.04	0.96	0.69	0.67
5	FAO-PPP-17 Penman	106	0.69	0.95	0.97	0.62	98	0.71	1.02	0.97	0.68	0.68
6	FAO-24 Penman(c=1)	112	0.83	0.91	0.97	0.63	101	0.50	0.99	0.98	0.50	0.69
7	Penman(1963)	98	0.58	1.04	0.98	0.54	89	1.22	1.12	0.98	0.55	0.70
8	1972Kimberly-Penman	106	0.73	0.96	0.96	0.70	95	0.81	1.06	0.97	0.59	0.73
9	FAO-24 Blaney-Criddle	100	0.66	0.99	0.97	0.66	97	0.99	1.01	0.93	0.98	0.76
10	FAO-24 Corrected Penman	118	1.17	0.86	0.97	0.68	111	1.47	0.90	0.92	1.02	1.10
11	Businger-van Bavel	111	1.10	0.97	0.93	1.01	98	1.26	1.02	0.88	1.23	1.12
12	Jensen-Haise	88	0.94	1.11	0.96	0.76	87	1.85	1.14	0.84	1.41	1.13
13	Hargreaves et al.(1985)	91	0.92	1.11	0.96	0.74	88	2.02	1.15	0.79	1.59	1.17
14	FAO-24Pan	105	0.99	0.94	0.94	0.93	94	1.93	1.04	0.69	1.89	1.25
15	SCS Blaney-Criddle	84	1.29	1.06	0.89	1.19	86	1.58	1.15	0.94	0.93	1.29
16	Christiansen pan	94	1.02	1.03	0.95	0.99	85	2.43	1.14	0.58	2.13	1.41
17	Pan evaporation	121	1.53	0.86	0.94	0.93	109	2.12	0.90	0.71	1.85	1.54
18	Turc	4	1.54	0.93	0.93	0.97	69	3.32	1.45	0.87	1.28	1.88
19	Priestley-Taylor	73	1.32	0.96	0.94	0.89	70	3.40	1.44	0.79	1.62	1.89
20	Thornthwaite	63	1.57	0.93	0.75	1.72	63	3.93	1.61	0.88	1.22	2.40

۱- کلیه برآوردهای تبخیر تعرق، حاصل از معادلات (و روش ها)، نسبت به تبخیر تعرق [illegible] مرجع (که از طریق لیسیمتر به دست آمده) تنظیم و اولویت‌بندی شده‌اند.

۲- متوسط درصد اندازه‌گیری های لیسیمتری

۳- خطای استاندارد برآورد تبخیر تعرق برحسب میلی‌متر در روز، که براساس رابطه رگرسیون خطی محاسبه گردیده است.

۴- شیب رگرسیون ارقام مبنای مقایسه (مربوط به اندازه‌گیری‌های لیسیمتری) نسبت به برآورد های حاصل از معادلات.

۵- ضریب همبستگی رگرسیون مربوط به اندازه‌گیری‌های لیسیمتری و برآوردهای حاصل از معادلات.

۶- خطای استاندارد برآورد تبخیر تعرق برحسب میلی‌متر در روز که نسبت به رگرسیون مبنای (اندازه گیری‌های لیسیمتری) تنظیم شده است.

۷- خطای استاندارد وزنی برآوردها که به قرار زیر محاسبه شده است:

[(ستون ۱۲) ۰/۳ + (ستون ۹) ۰/۶۷] ۰/۳ + [(ستون ۷) ۰/۳ + (ستون ۴) ۰/۷] ۰/۷

جدول ۲: خلاصه اولویت‌بندی آماری روشهای تعیین تبخیر تعرق ماهانه (درمقام‌مقایسه بالیسیمتر) در مناطق مرطوب

Rank [1] ردیبندی	Method [2] روش تعیین ET_O	All Months تمام ماه‌ها					Peak Month ماه حداکثرمصرف					Weighted SEE[7] [13] خطای استاندارد وزنی
		%[2] [3]	SEE[3] [4]	b[4] [5]	r[5] [6]	ASEE[6] [7]	% [8]	SEE [9]	b [10]	r [11]	ASEE [12]	
1	Penman-Monteith	104	0.31	0.98	0.97	0.30	98	0.37	1.02	0.93	0.36	0.32
2	Turc	105	0.49	0.94	0.93	0.45	100	0.75	1.00	0.66	0.75	0.56
3	Penman(1963)	114	0.57	0.88	0.94	0.41	109	0.84	0.91	0.74	0.67	0.60
4	FAO-PPP-17 Penman	116	0.64	0.87	0.93	0.45	111	0.95	0.90	0.69	0.72	0.67
5	Priestley-Taylor	97	0.55	0.97	0.88	0.54	102	0.99	0.97	0.20	0.98	0.68
6	Penman(1963), VPD#3	120	0.71	0.84	0.94	0.43	113	0.96	0.88	0.78	0.63	0.69
7	1982 Kimberly-Penman	110	0.59	0.89	0.93	0.47	111	1.09	0.88	0.57	0.82	0.69
8	1972 Kimberly-Penman	118	0.75	0.85	0.89	0.56	109	0.83	0.91	0.75	0.65	0.71
9	FAO-24 Blaney-Criddle	116	0.71	0.85	0.91	0.50	115	1.26	0.85	0.47	0.88	0.74
10	Hargreaves et al.(1985)	125	0.86	0.81	0.92	0.49	114	1.02	0.88	0.70	0.71	0.79
11	FAO-24 Radiation	122	0.81	0.81	0.93	0.45	119	1.33	0.84	0.55	0.83	0.83
12	Jensen-Haise	82	0.76	1.14	0.84	0.67	79	1.27	1.24	0.68	0.73	0.84
13	Thornthwate	96	0.79	0.98	0.77	0.79	94	1.02	1.04	0.11	1.00	0.86
14	FAO-24 Penman (c=1)	129	0.99	0.78	0.90	0.55	121	1.34	0.82	0.75	0.66	0.93
15	SCS Blaney-Criddle	117	1.05	0.80	0.80	0.75	120	1.35	0.82	0.70	0.70	1.01
16	Businger-van Bavel	132	1.12	0.76	0.87	0.62	122	1.45	0.81	0.68	0.73	1.03
17	FAO-24Pan	95	0.88	0.93	0.67	0.85	97	1.60	0.97	0.09	1.59	1.09
18	Christiansen pan	90	0.89	0.98	0.64	0.88	91	1.65	1.02	0.09	1.65	1.12
19	FAO-24 Corrected Penman	135	1.17	0.73	0.92	0.48	134	2.02	0.74	0.65	0.76	1.14
20	Pan evaporation	114	1.17	0.79	0.70	0.82	117	1.98	0.81	0.10	1.54	1.29

۱- کلیه برآوردهای تبخیر تعرق، حاصل از معادلات (و روش ها)، نسبت به تبخیر تعرق گیاه مرجع (که از طریق لیسیمتر به دست آمده) تنظیم و رویت‌بندی شده‌اند.

۲- متوسط درصد اندازه‌گیری های لیسیمتری

۳- خطای استاندارد برآورد تبخیر تعرق برحسب میلی‌متر در روز که براساس رابطه رگرسیون تنظیم نگردیده است

۴- شیب رگرسیون ارقام مبنای مقایسه (مربوط به اندازه‌گیری‌های لیسیمتری) نسبت به برآوردهای حاصل از معادلات

۵- ضریب همبستگی رگرسیون مربوط به اندازه‌گیری‌های لیسیمتری و برآوردهای حاصل از معادلات

۶- خطای استاندارد برآورد تبخیر تعرق برحسب میلی‌متر در روز که نسبت به رگرسیون مبداء (اندازه‌گیری‌های لیسیمتری) تنظیم شده است

۷- خطای استاندارد وزنی برآوردهایی که به شرح زیر محاسبه شده است

[(ستون ۱۲) ۰/۳ + (ستون ۹) ۰/۶۷] ۰/۳ + [(ستون ۷) ۰/۳ + (ستون ۴) ۰/۶۷]

جدول ۳: خلاصه اولویت‌بندی آماری روشهای تعیین تبخیر تعرق ماهانه (درمقایسه بالیسیمتر) در تمام مناطق دیگر

Rank [1] ردیف	Method [2] روش تعیین ET_O	All Months تمام ماه‌ها					Peak Month ماه حداکثر مصرف					Weighted SEE[7] [13] خطای استاندارد وزنی
		%[2] [3]	SEE[3] [4]	b[4] [5]	r[5] [6]	ASEE[6] [7]	% [8]	SEE [9]	b [10]	r [11]	ASEE [12]	
1	Penman-Monteith	101	0.36	1.00	0.99	0.36	97	0.52	1.03	0.99	0.47	0.40
2	1982 Kimberly-Penman	107	0.53	0.95	0.98	0.49	107	0.79	0.96	0.96	0.73	0.59
3	FAO-PPP-17 Penman	111	0.66	0.93	0.97	0.56	105	0.72	0.99	0.97	0.72	0.66
4	Penman(1963)	106	0.57	0.99	0.97	0.57	99	0.95	1.07	0.96	0.81	0.67
5	Penman(1963), VPD#3	113	0.67	0.93	0.97	0.57	105	0.77	1.00	0.96	0.77	0.68
6	1972 Kimberly-Penman	112	0.74	0.93	0.96	0.67	102	0.72	1.03	0.97	0.70	0.72
7	FAO-24 Radiation	114	0.73	0.91	0.97	0.59	110	0.88	0.95	0.96	0.78	0.73
8	FAO-24 Blaney-Criddle	108	0.68	0.95	0.96	0.64	106	0.98	0.98	0.94	0.97	0.76
9	FAO-24 Penman (c=1)	121	0.91	0.88	0.96	0.65	111	0.84	0.95	0.96	0.76	0.82
10	Jensen-Haise	85	0.84	1.11	0.95	0.71	83	0.44	1.15	0.92	1.06	0.95
11	Hargreaves et al.(1985)	108	0.88	1.00	0.93	0.88	101	1.47	1.07	0.87	1.39	1.05
12	Businger-van Bavel	121	1.10	0.87	0.92	0.90	110	1.19	0.97	0.91	1.16	1.08
13	FAO-24 Corrected Penman	127	1.16	0.82	0.96	0.65	122	1.53	0.86	0.93	1.00	1.10
14	FAO-24Pan	100	0.92	0.94	0.92	0.88	95	1.58	1.03	0.82	1.57	1.11
15	SCS Blaney-Criddle	101	1.16	0.99	0.87	1.15	103	1.31	1.05	0.89	1.26	1.20
16	Christiansen pan	92	0.95	1.03	0.91	0.94	88	1.88	1.11	0.78	1.73	1.21
17	Pan evaporation	118	1.34	0.82	0.92	0.87	113	1.82	0.88	0.83	1.56	1.35
18	Turc	90	1.30	1.20	0.89	1.07	85	2.26	1.31	0.84	1.49	1.46
19	Priestley-Taylor	85	1.29	1.22	0.90	1.02	86	2.34	1.28	0.78	1.72	1.48
20	Thornthwate	79	1.68	1.24	0.78	1.47	79	2.69	1.41	0.79	1.70	1.84

۱- کلیه برآوردهای تبخیر تعرق، حاصل از معادلات (و روش ها)، نسبت به تبخیر تعرق گیاه مرجع (که از طریق لیسیمتر به دست آمده) تنظیم و اولویت‌بندی شده‌اند.

۲- متوسط درصد اندازه‌گیری های لیسیمتری

۳- خطای استاندارد برآورد تبخیر تعرق برحسب میلی‌متر در روز، که براساس رابطه رگرسیون تنظیم نگردیده است.

۴- شیب رگرسیون ارقام مبنای مقایسه (مربوط به اندازه‌گیری‌های لیسیمتری) نسبت به براوردهای حاصل از معادلات.

۵- ضریب همبستگی رگرسیون مربوط به اندازه‌گیری‌های لیسیمتری و برآوردهای حاصل از معادلات.

۶- خطای استاندارد برآورد تبخیر تعرق برحسب میلی‌متر در روز که نسبت به رگرسیون مبداء (اندازه‌گیری‌های لیسمتری) تنظیم شده است.

۷- خطای استاندارد وزنی برآوردها که به قرار زیر محاسبه شده است:

[(ستون ۱۲) ۰/۳ + (ستون ۹) ۰/۶۷] ۰/۳ + [(ستون ۷) ۰/۳ + (ستون ۴) ۰/۶۷]

۴/۲- طرز محاسبه ET_0 استاندارد مرجع براساس فرمول ترکیبی (پنمن ـ مانتیس)

۴/۲ - الف: پارامترهای مورد استفاده در معادلات تبخیر تعرق استاندارد مرجع استاندارد (ET_0):

۱ـ ضرایب تبدیل آحاد سیستم SI (متریک) به سیستم $C.\ G.\ S$

از این ضرایب جهت تبدیل سیستم $C.\ G.\ S$ به سیستم بین‌المللی متریک استفاده می‌شود:

فشار: $1mbar \cong 0/1\ Kpa$ (میلی‌بار) (کیلوپاسکال)

تشعشع: $1cal.\ cm^{-2}.\ d^{-1} \cong 0/041868\ MJ.\ m^{-2}.\ d^{-1}$

$1MJ.\ m^{-2}.\ d^{-1} \cong 23/884 cal.\ cm^{-2}.\ d^{-1}$

$1MJ.m^{-2}\ .\ d^{-1} \cong 0/408\ mm.\ d^{1}$

$1mm.\ d^{-1} \cong 2/45 MJ.\ m^{-2}.\ d^{-1}$

$1mm.d^{-1} \cong 58/6 cal.\ cm^{-2}.\ d^{-1}$

$1W\ m^{-2} \cong 0/0864\ MJ.\ cm^{-2}.\ d^{-1}$

$1W.\ m^{-2} \cong 2/064\ cal.\ cm^{-2}.\ d^{-1}$

۲ـ گرمای نهان تبخیر (λ): *(Harrison, 1963)*

$$\lambda = ۲/۵۰۱ - (۲/۳۶۱ \times ۱۰^{-۳})T \qquad (۱)$$

λ: گرمای نهان تبخیر برحسب مگاژول برکیلوگرم

T: دمای هوا برحسب درجه سانتیگراد

نظر به تغییرات اندک λ خارج از دمای نرمال، به‌ازای $T=۲۰$ درجه سانتیگراد، می‌توان نوشت:

$$\lambda = ۲/۴۵ \text{ مگاژول برکیلوگرم} \qquad (۲)$$

۳ـ شیب منحنی تغییرات فشاربخار (Δ):

$$\Delta = \frac{۴۰۹۸ e_a}{(T+۲۳۷/۳)^۲} \qquad (۳)$$

Δ : شیب منحنی تغییرات فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بردرجه سانتیگراد.

T : دمای هوابرحسب درجه سانتیگراد.

e_a : فشار بخار اشباع دردمای T برحسب کیلوپاسکال.

(که از معادله ۱۰، *Tetens, 1930* و *Murray, 1967* به دست آمده است.)

۴ـ ثابت سایکرومتری (رطوبت سنجی)، (γ) *(Brunt, 1952)*:

$$\gamma = \frac{C_p^P}{\varepsilon . \lambda} \times ۱۰^{-۳} = ۰/۰۰۱۶۳ \frac{P}{\lambda} \qquad (۴)$$

γ : ثابت سایکرومتری *(Kpa. $C^{\circ -1}$)*

C_p : گرمای ویژه هوای مرطوب معادل ۱/۰۱۳ کیلوژول برکیلوگرم بر سانتی‌گراد.

P : فشار اتمسفر برحسب کیلوپاسکال.

ε :نسب وزن مولکولی بخار آب به‌وزن مولکولی هوای خشک که معادل ۰/۶۲۲ می‌باشد.

λ : گرمای نهان برحسب مگاژول برکیلوگرم.

۵ـ فشار اتمسفری (P)، *(Burman وهمکاران، 1987)*

$$P = P_o \left[\frac{T_{ko} - \propto (Z-Z_o)}{T_{ko}}\right]^{g/\propto r} \qquad (۵)$$

P : فشار اتمسفر (جو) درارتفاع Z (کیلوپاسکال)

P_o : فشار اتمسفر (جو) درسطح دریا *(Kpa)*

Z : ارتفاع *(m)*

Z_o : ارتفاع سطح مقایسه *(m)*

g : شتاب ثقل که معادل ۹/۸ متر برمجذورثانیه است.

R : ثابت ویژه گازها که معادل ۲۸۷ ژول برکیلوگرم بردرجه کلوین است.

T_{ko} :دمای مبنا (درجه کلوین) درارتفاع Z_o

$T_{ko} = ۲۷۳ + T$ (درجه سانتی‌گراد)(درجهٔ کلوین)

α : ثابت اشباع هوا $\alpha = ۰/۰۰۶۵ K^{o}.\ m^{-1}$

بادر نظر گرفتن P_o معادل ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال برای سطح مقایسه Z_o و $T_{ko} = ۲۹۳$ به ازای $T = ۲۰$ درجه سانتی‌گراد می‌توان نوشت :

$$P = ۱۰۱/۳ \left[\frac{۲۹۳ - ۰/۰۰۶۵Z}{۲۹۳}\right]^{۵/۲۶} \qquad (۶)$$

۶ـ چگالی هوا (ρ) **که ازرابطه زیربدست می‌آید:**

$$\rho = \frac{1000P}{T_{kv}R} = ۳/۴۸۶\frac{P}{T_{kv}} \qquad (۷)$$

که درآن:

ρ: چگالی هوا، $(Kg.m^{-3})$

p: فشارهوا درارتفاع Z *(KPa)*

R : ثابت گازها $R = ۲۸۷J.Kg^{-۱}.k^{-۱}$

T_{kv} : دمای حقیقی (واقعی) برحسب درجه کلوین که ازرابطه زیربدست می آید:

$$T_{kv}=T_k(۱-۰/۳۷۸\frac{e_d}{p})^{-۱} \qquad (۸)$$

که درآن:

T_k : دمای مطلق (درجهٔ کلوین) که معادل است با:

$T_k = ۲۷۳ + T$ (درجه سانتی‌گراد) T_k(درجهٔ کلوین)

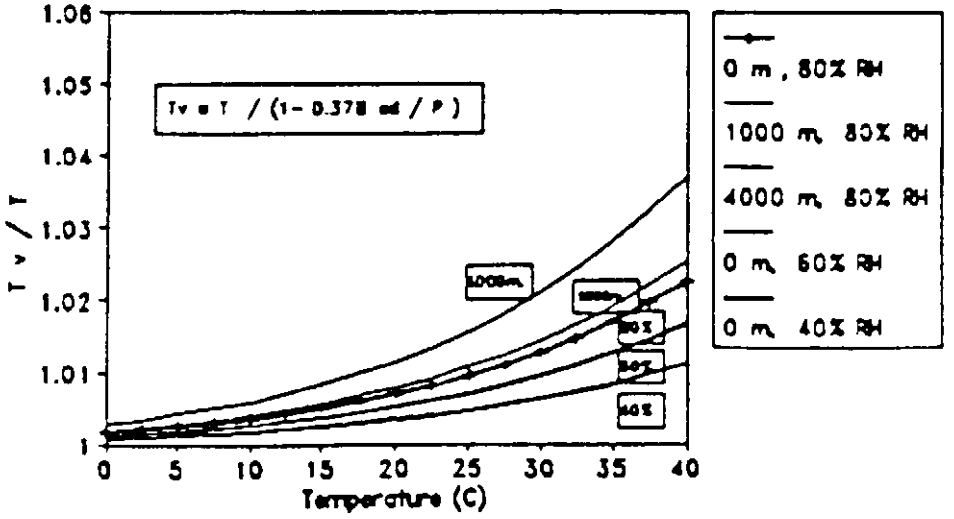
e_d : فشار بخار درنقطه شبنم (KPa)

P : فشار اتمسفر درارتفاع Z (KPa)

برای شرایط متوسط:

e_d معادل ۱ تا ۵ کیلوپاسکال و P معادل ۸۰ تا ۱۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

$$Tkv = ۱/۰۱(T+۲۷۳) \qquad (۹)$$



شکل ۱ـ تغییرات جزیی T_{kv} در رابطه با مقادیر مختلف دما، رطوبت و ارتفاع

۷ـ فشار بخار اشباع، *(Tetens, 1930)*

$$e_a = ۰/۶۱۱ \exp\left(\frac{۱۷/۲۷T}{T+۲۳۷/۳}\right) \qquad (۱۰)$$

e_a : فشار بخار اشباع *(kpa)*

T : دما (درجه سانتی‌گراد)

۸ـ فشار بخار واقعی (e_d)

فشار بخار اشباع دردمای نقطه شبنم (e_d) بیانگر فشار بخار واقعی یا متوسط فشار بخار روزانه است که به قرار زیر تعیین می‌شود:

الف – اندازه‌گیری براساس رطوبت نسبی *(RH)*:

متوسط فشار بخار روزانه از برآورد مقادیر رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده روزانه در T_{max} (هنگام بعدازظهر) و T_{min} (هنگام صبح) به دست می آید :

$$e_d = \frac{e_{d(Tmin)} + e_{d(Tmax)}}{۲} = \frac{۱}{۲} e_{a(Tmin)} \cdot \frac{RH_{max}}{۱۰۰} + \frac{۱}{۲} e_{a(Tmax)} \frac{RH_{min}}{۱۰۰} \qquad (۱۱)$$

که در آن:

e_d :متوسط فشار بخار روزانه براساس اندازه‌گیری به‌هنگام صبح:

RH_{max} : حداکثر رطوبت نسبی روزانه (درصد)

T_{min} : حداقل دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)

$e_{a(Tmin)}$: فشار بخار اشباع دردمای حداقل روزانه *(KPa)*

$e_{d(Tmin)}$: فشار بخار واقعی دردمای حداقل روزانه *(KPa)* و براساس اندازه‌گیری در بعدازظهر (حدود ساعت ۱۴:۰۰)

RH_{min} : حداقل رطوبت نسبی روزانه (٪)

T_{max} : حداکثر دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)

$e_{a(Tmax)}$: فشار بخار اشباع دردمای ماکزیمم روزانه برحسب کیلوپاسکال.

$e_{d(Tmax)}$: فشار بخار واقعی دردمای ماکزیمم روزانه برحسب کیلوپاسکال.

متوسط رطوبت نسبی روزانه به‌قرار زیر تعریف می‌شود:

$$RH_{mean}=\frac{RH_{max}+RH_{min}}{۲} \qquad (۱۲)$$

که درآن:

RH_{mean}: متوسط رطوبت نسبی روزانه (٪)

فشار بخار واقعی در طول روز چندان تغییر نمی‌کند به طوری که:

$$e_{d(Tmax)} \cong e_{d(Tmin)}$$

بنابراین RH_{mean} را می‌توان براساس متوسط فشار بخار روزانه وT_{max} وT_{min} به‌قرار زیر محاسبه کرد:

$$RH_{maen} = e_d[\frac{۵۰}{e_{a(Tmin)}}+\frac{۵۰}{e_{a(Tmax)}}] \qquad (۱۳)$$

هم چنین بادردست داشتن RH_{mean}: متوسط فشار بخار روزانه بدست می‌آید:

$$e_d=RH_{mean} / (\frac{۵۰}{e_{a(Tmin)}}+\frac{۵۰}{e_{a(Tmax)}}) \qquad (۱۴)$$

تبصره: برای محاسبه RH_{mean} یاe_dبرحسب T_{mean}، نتایج فوق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اندازه‌گیری‌های سایکرومتری (رطوبت سنجی) براساس دماسنج‌های خشک وتر، *(Bosen, 1958)*:

$$e_d=e_{a(Twet)}-\gamma_{asp}(T_{dry}-T_{wet})P \qquad (۱۵)$$

که درآن:

γ_{asp} : معادل ۰/۰۰۰۶۶ به‌ازاء سرعت باد برابر ۵متر برثانیه، برحسب درجه سانتیگراد (C^{-1}) می‌باشد.

γ_{asp} : معادل ۰/۰۰۰۸ به ازاء سرعت معمولی باد یعنی یک متر برثانیه، برحسب درجهٔ سانتیگراد می‌باشد.

γ_{asp} : معادل ۰/۰۰۱۲ در شرایط بدون باد وسرعت صفر متربرثانیه، برحسب

درجهٔ سانتیگراد می‌باشد.

$Tdry$: درجه حرارت دماسنج خشک برحسب درجه سانتیگراد.

$Twet$: درجه حرارت دماسنج تر برحسب درجه سانتیگراد.

p : فشار اتمسفر برحسب کیلوپاسکال.

$e_{a(Twet)}$: فشار بخار اشباع در درجه حرارت دماسنج تر، (KP_a)

اگر داده‌های رطوبتی موجود نباشد:

می‌توان فشار بخار را بااین فرض که دمای حداقل برابر دمای نقطه شبنم است، محاسبه کرد. به‌هرحال لازم است به‌ویژه برای مناطق خشک، واسنجی (کالیبراسیون) دقیقی جهت اصلاح تساوی دمای حداقل بادمای شبنم صورت پذیرد:

$$e_d = ۰/۶۱۱ exp(\frac{۱۷/۲۷ T_{min}}{T_{min} + ۲۳۷/۳}) \qquad (۱۶)$$

۹ـ کمبود فشار بخار (VPD):

کمبود فشار بخار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$VPD = e_a - e_d = \frac{e_{a(Tmax)} + e_{a(Tmin)}}{۲} - e_d \qquad (۱۷)$$

که درآن:

VPD : کمبود فشار بخار، (KP_a)

$e_{a(Tmax)}$: فشاربخاراشباع در درجه حرارت حداکثربرحسب کیلوپاسکال(معادله ۱۰)

$e_{a(Tmin)}$: فشاربخار اشباع در درجه‌حرارت حداقل برحسب کیلوپاسکال(معادله ۱۰)

e_d : فشار بخار واقعی برحسب کیلو پاسکال (معادلات ۱۵، ۱۱ و یا ۱۴)

۱۰ـ تشعشع رسیده به بالای جو (R_a)

$$R_a = \frac{۲۴\times۶۰}{\pi} . G_{sc} . d_r(\omega_s . sin\varphi . sin\delta + cos\varphi . sin\omega_s . cos\delta) \qquad (۱۸)$$

$$R_a = ۳۷/۶.d_r (\omega_s sin\varphi.sin\delta + cos\varphi . sin\omega_s . cos\delta) \qquad (۱۹)$$

که در آن:

R_a : تشعشع رسیده به بالای جو برحسب مگاژول برمترمربع در روز.

G_{sc} : ثابت خورشیدی معادل ۰/۰۸۲ مگاژول برمترمربع در دقیقه است.

d_r : فاصله نسبی زمین تاخورشید.

δ : زاویه میل خورشیدی (برحسب رادیان).

φ : عرض جغرافیایی (رادیان).

ω_s : زاویه میل خورشیدی به‌هنگام طلوع آفتاب (رادیان).

$$\omega_s = arc.\ cos\ (-tan\varphi.\ tan\delta) \qquad (۲۰)$$

$$d_r = ۱ + ۰/۰۳۳cos\ (\frac{۲\pi}{۳۶۵}.\ J\ ) = ۱ + ۰/۰۳۳\ cos\ (۰/۰۱۷۲J) \qquad (۲۱)$$

$$\delta = ۰/۴۰۹\ sin(\frac{۲\pi}{۳۶۵} J - ۱/۳۹) = ۰/۴۰۹ sin\ (۰/۰۱۷۲J - ۱/۳۹) \qquad (۲۲)$$

که در آن :

J: تعداد روزهای سال است.

مرجع : *DUFFIE & BECKMAN (1980)*

مقادیر ماهانه J را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد :

$$J = integer(۳۰/۴۲M - ۱۵/۲۳) \qquad (۲۳)$$

که در آن :

M: شماره ترتیب ماه موردنظر (۱ تا ۱۲) است.

مرجع : GOMMES (1983)

مقادیر روزانه J را به صورت زیر می‌توان برآورد نمود:

$$J = \text{integer}\ (۲۷۵\frac{M}{۹} - ۳۰ + D) - ۲ \qquad (۲۴)$$

اگر M کوچکتر از ۳ باشد : J = J + ۲

اگر سال کبیسه بوده و M بزرگتر از ۲ باشد : J = J + ۱ در نظر گرفته می‌شود.

D : شماره ترتیب روز ماه (روز و ماه موردنظر) می‌باشد.

مرجع : Craig (1984)

یادآوری: برای ماه‌های زمستان و در عرض جغرافیایی بالاتر از ۵۵ درجه به کاربردن این معادلات دارای یک محدودیت اعتباری است و برای تشخیص خطا و انحرافات احتمالی باید به جداول اسمیت سونیان (SMITHSONIAN) مراجعه کرد.

۱۱- ساعات روشنائی روز (N) :

$$N = \frac{۲۴}{\pi} \times \omega_s = ۷/۶۴\omega_s \qquad (۲۵)$$

که در آن :

N : ماگزیمم ساعات آفتابی در روز است.

۱۲- سرعت باد (U_2)

اگر سرعت باد در ارتفاع ۲ متری اندازه‌گیری نشده باشد، برای استفاده در معادلهٔ تبخیر تعرق می‌توان آن را با فرمول زیر اصلاح و واسنجی کرد و به ارتفاع ۲ متری تعمیم داد:

$$U_2 = U_z \frac{L_n\left[\frac{Z_0 - d}{Z_0}\right]}{L_n\left[\frac{Z - d}{Z_0}\right]} \qquad (۲۶)$$

برای گیاه مرجع استاندارد به ارتفاع ۰/۱۲ متر فاکتور تبدیل و تعمیم سرعت باد به ارتفاع ۲ متری، با رابطهٔ زیر صورت می‌گیرد:

$$\frac{U_2}{U_z} = \frac{۴/۸۷}{L_n\,(۶۷/۸Z - ۵/۴۲)} \qquad (۲۷)$$

که در آن:

U_z : سرعت اندازه‌گیری شده باد در ارتفاع z برحسب متر بر ثانیه است.

U_2 : سرعت اندازه‌گیری شده باد در ارتفاع ۲ متری برحسب متر بر ثانیه است.

Z : ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد برحسب متر است.

Z_2 : ارتفاع استاندارد اندازه‌گیری سرعت باد برحسب متر، در ارتفاع ۲ متری است.

d : ارتفاع سطح مقایسه (پلان صفر) جابجایی نیمرخ باد (برحسب متر) و معادل ۰/۰۸ متر است (به معادله ۳۷ مراجعه شود).

Z_0 : تأثیر پارامتر زبری در مقابل حرکت باد (برحسب متر) و معادل ۰/۰۱۵ متر است (به معادلهٔ ۳۸ مراجعه شود).

مرجع : آلن و همکاران (۱۹۸۹)

۱۳- باد روزانه:

معمولاً سرعت متوسط باد روزانه براساس اندازه‌گیری آن طی ۲۴ ساعت تعیین می‌شود. برای تعیین سرعت باد در روز (از ساعت ۷ تا ۱۹) از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود :

$$U_d = \frac{2U(U_d/U_n)}{(1+U_d/U_n)} \qquad (۲۸)$$

که در آن :

U_d : سرعت باد در طول روز (از ساعت ۷ تا ۱۹)، برحسب متر بر ثانیه است.

U_n : سرعت باد در طول شب (از ساعت ۱۹ تا ۷) برحسب متر بر ثانیه است.

U : سرعت متوسط باد طی ۲۴ ساعت بر حسب متر بر ثانیه است.

برای شرایط کلی می‌توان از روابط زیر استفاده کرد :

$$U_d/U_n \cong ۲ \qquad (۲۹)$$

$$U_d = ۱/۳۳\,U$$

۴/۲ - ب: معادلهٔ پنمن-مانتیس:

شکل اصلی معادلهٔ پنمن-مانتیس به صورت زیر می‌باشد:

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p (e_a - e_d)/r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \qquad (۳۰)$$

که در آن:

λET_o : شارگرمای نهان تبخیر برحسب کیلوژول بر متر مربع در ثانیه $[kJm^{-2}S^{-1}]$ است.

R_n : شار تشعشع خالص در سطح است $[kJm^{-2}S^{-1}]$.

G : شارگرمای خاک است $[kJm^{-2}S^{-1}]$.

ρ : وزن مخصوص اتمسفر برحسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

C_p : گرمای ویژه هوای مرطوب برحسب کیلوژول بر کیلوگرم است $[kJk_g^{-1}{}^{\circ}C^{-1}]$

(e_a-e_d) : کمبود فشار بخار برحسب کیلوپاسکال است.

r_c : مقاومت سایه انداز پوشش گیاهی برحسب ثانیه بر متر است $[Sm^{-1}]$.

r_a : مقاومت آئرودینامیکی هوا برحسب ثانیه بر متر است.

Δ : شیب منحنی فشار بخار است $[KP_a^{\circ -1}]$.

γ : ثابت سایکرومتری است $[KP_a^{\circ -1}]$.

λ : گرمای نهان تبخیر برحسب مگاژول بر کیلوگرم است $[MKkg^{-1}]$

مرجع : مانتیس ۱۹۶۵، ۱۹۸۱

برای ساده شدن آنالیز و تجزیه و تحلیل معادله ترکیبی فوق بخش‌های آئرودینامیکی *(aero)* و تشعشع *(rad)* آن به قرار زیر نشان داده می‌شود:

$$ET_o = ET_{rad} + ET_{aero} \qquad (۳۱)$$

که در آن :

ET_o : تبخیر تعرق پوشش گیاهی مرجع استاندارد برحسب میلیمتر در روز است $[mmd^{-1}]$

ET_{rad} : تبخیر تعرق ناشی از بخش تشعشع برحسب میلیمتر در روز است.

ET_{aero} : تبخیرتعرق ناشی از بخش آئرودینامیکی معادله برحسب میلیمتر در روز است.

ذیلاً پارامترهای مختلف معادلهٔ ترکیبی بیشتر تعریف شده و مورد آنالیز قرار می‌گیرند:

۱ - فاکتورهای مقاومت:

۱ ۱ - مقاومت سایه‌انداز گیاه (r_c) :

$$r_c = \frac{R_L}{0/5\text{LAI}} = \frac{200}{LAI} \qquad (۳۲)$$

که در آن :

R_l : متوسط روزانه (۲۴ ساعته) مقاومت روزنه‌ای یک برگ برحسب ثانیه برمتر و حدوداً معادل ۱۰۰ است.

LAI : شاخص سطح برگ (بدون بعد) است.

مرجع : آلن و همکاران ۱۹۸۹.

برای چمن کوتاه :

$$LAI = 24h_c \qquad (۳۳)$$

که در آن :

h_c : ارتفاع گیاه، و معادل ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ متر است.

مرجع : آلن و همکاران ۱۹۸۹.

برای یونجه و سایر محصولات زراعی :

$$LAI = ۵/۵ + ۱/۵L_n\ (h_c) \qquad (۳۴)$$

که در آن :

(h_c) : ارتفاع گیاه، و معادل ۰/۱ تا ۰/۵ متر است.

مرجع : آلن و همکاران ۱۹۸۹.

برای گیاه مرجع (چمن) h_c و LAI به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$h_c = ۰/۱۲^m$$

$$LAI = ۲۴ \times ۰/۱۲ = ۲/۸۸$$

لذا مقاومت سایه‌انداز برحسب ثانیه بر متر به قرار زیر به دست می‌آید:

$$r_c = \frac{۲۰۰}{۲/۸۸} \cong ۷۰ \qquad (۳۵)$$

۱/۲ – مقاومت آئرودینامیکی هوا (r_a)

مقاومت آئرودینامیکی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$r_a = \frac{L_n\left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}}\right] . L_n\left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}}\right]}{K^۲ U_z} \qquad (۳۶)$$

که در آن:

r : مقاومت آئرودینامیکی برحسب ثانیه بر متر است.

Z_m : ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد برحسب متر است.

Z_h : ارتفاع اندازه‌گیری رطوبت و دمای هوا برحسب متر است.

K : ثابت وون کارمن (VON KARMAN) و معادل ۰/۴۱ (بدون بعد) است.

U_z : سرعت اندازه‌گیری شده باد در ارتفاع Z_m برحسب متر بر ثانیه است.

مرجع : آلن و همکاران ۱۹۸۹

d : ارتفاع سطح مقایسه جابجایی نیمرخ باد برحسب متر است که به قرار زیر محاسبه می‌شود:

$$d = \frac{۲}{۳} h_c = ۰/۰۸ \qquad (۳۷)$$

مرجع : مانتیس ۱۹۸۱

Z_{om} : پارامتر مربوط به اثر زبری در رابطه با حرکت هوا و برحسب متر است.

$$Z_{om} = ۰/۱۲۳ h_c = ۰/۰۱۵ \qquad (۳۸)$$

Z_{oh} : اثر پارامتر زبری در رابطه با حرارت و بخار آب برحسب متر است.

$$Z_{oh} = ۰/۱ Z_{om} = ۰/۰۱۲۳ h_c = ۰/۰۰۱۵ \qquad (۳۹)$$

مرجع: BRUTSAERT (1975)

مقاومت آئرودینامیکی به ازاء ارتفاع استاندارد اندازه‌گیری سرعت باد، رطوبت و دما (۲ متر)، و ارتفاع استاندارد گیاه مرجع (۰/۱۲ متر) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_a = \frac{۲۰۸}{U_2} \qquad (۴۰)$$

که در آن :

r_a : مقاومت آئرودینامیکی برحسب ثانیه بر متر است. $[Sm^{-1}]$

U_2 : سرعت اندازه‌گیری باد در ارتفاع ۲ متری برحسب متر بر ثانیه است.

۲۰۸ :ضریب بدون بعد، که بیانگر نسبت مقدار اندازه‌گیری شدهٔ دما به رطوبت در ارتفاع ۲ متری می‌باشد. این ضریب از طرف سازمان جهانی هواشناسی به

صورت استاندارد برای ایستگاههای کشاورزی پیشنهاد شده است.

یادآوری : ضریب بدون بعد ۱۹۹ که بیانگر نسبت مقدار اندازه‌گیری شده دمای هوا به رطوبت، در ارتفاع ۱/۵ متری است هنوز هم در بسیاری از ایستگاههای هواشناسی که دما براساس قرائت مستقیم (با چشم) ، و با دستگاه‌های حساس (سنسور) (هم‌سطح چشم یک ناظر) انجام می‌گیرد، به صورت رایج به کار برده می‌شود.

۱/۳ – ثابت سایکرومتریی اصلاح شده (γ^*):

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \qquad (۴۱)$$

که در آن :

γ : ثابت سایکرومتری اصلاح شده است $[KP_aC^{-1}]$

: ثابت سایکرومتری است $[KP_aC^{-1}]$

r_a : مقاومت سایه‌انداز پوشش گیاهی برحسب ثانیه بر متر است.

r_c : مقاومت آئرودینامیکی است $[Sm^{-1}]$.

مرجع : مانتیس ۱۹۶۵

جهت استفاده از معادلات (۳۵) و (۴۰) برای گیاه مرجع، می‌توان ثابت سایکرومتری اصلاح شده را با فرمول زیر تعیین کرد :

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + 0/34 U_2 \right) \qquad (۴۲)$$

۲- بخش آئرودینامیکی معادلهٔ ترکیبی:

در فرمول اصلی پنمن – مانتیس (معاله ۳۰) بخش آئرودینامیکی معادله به صورت زیر بیان شده است:

$$ET_{aero} = \frac{86/4}{\lambda} \cdot \frac{1}{\Delta + \gamma^*} \cdot \frac{\rho C_p}{r_a} (e_a - e_d) \qquad (۴۳)$$

که در آن:

ET_{acre} : تبخیر تعرق، مربوط به بخش آئرودینامیکی، برحسب میلیمتر در روز است.

۸۶/۴ : فاکتور تبدیل به میلیمتر در روز است.

γ^* : ثابت سایکرومتری اصلاح شده است $[KP_a\ C^{-1}]$ (به معادلات ۴۱ و ۴۲ رجوع شود).

C_p : که در معادلهٔ (۴) نیز به کار رفته است با رابطهٔ زیر بیان می‌گردد،

$$C_p = \gamma \frac{۰/۶۲۲\lambda}{P} \times ۱۰^{-۳} \qquad (۴۴)$$

که در آن:

C_p : گرمای ویژه هوای مرطوب است $[KJk_g^{-1}C^{-1}]$

P : فشار اتمسفر برحسب کیلوپاسکال است.

λ : گرمای نهان تبخیر برحسب مگاژول بر کیلوگرم است.

$۱۰^{-۳}$: فاکتور تبدیل مگاژول $[MJ]$ به کیلوژول $[KJ]$ است.

معادلهٔ (۴۳) را می‌توان به صورت زیر نیز بازنویسی کرد:

$$ET_{acre} = \frac{\lambda}{\Lambda + \gamma^*} \cdot \rho \frac{۰/۶۲۲\lambda}{P} \cdot \frac{۸۶۴۰۰}{\lambda} \cdot \frac{(e_a - e_d)}{r_a} \qquad (۴۵)$$

با توجه به قانون گازهای کامل (معادلهٔ ۷) می‌توان نوشت :

$$\rho = \frac{۱۰۰۰P}{T_{kv}R} = ۳/۴۸۶\frac{P}{T_{kv}} \qquad (۴۶)$$

که در آن:

ρ : وزن مخصوص هوا برحسب کیلوگرم برمترمکعب است.

P : فشار اتمسفر ارتفاع Z (متر) برحسب کیلوپاسکال است.

R : ثابت ویژهٔ گازها، و معادل ۲۸۷ $[Jk_g^{-1}K^{-1}]$ است.

T_{kv} : دمای واقعی $(VIRTUAL)$ $[K]$ و معادل $(T + ۲۷۳)$ ۱/۰۱ است. (به معادله ۹ مراجعه شود).

r : مقاومت آئرودینامیکی ، و معادل $۲۰۸/U_2$ است.

(به معادله ۴۰ مراجعه شود).

ترم آئرودینامیکی معادلهٔ ترکیبی را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$ET_{aero} = \frac{\gamma}{\Delta+\gamma^*} \times \frac{۰/۶۲۲}{P} \times \frac{۳/۴۸۶P}{۱/۰۱(T+۲۷۳)} \times ۸۶۴۰۰ \frac{U_2}{۲۰۸} (e_a - e_d) \quad (۴۷)$$

و

$$ET_{aero} = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma\ (۱ + ۰/۳۴U_2)} \times \frac{۹۰۰}{(T+۲۷۳)} \times U_2(e_a - e_d) \quad (۴۸)$$

که در آن:

ET_{aero} : تبخیر تعرق مربوط به ترم آئرودینامیکی ET_0، برحسب میلیمتر در روز است.

U_2 : سرعت باد برحسب متر در ثانیه است.

$e_a - e_d$: کمبود فشار برحسب کیلوپاسکال است.

T : دمای هوا برحسب سانتیگراد است.

۹۰۰ : ضریب تبدیل است.

یادآوری: نظر به اینکه مقادیر مربوط به زبری، و برآورد آن ماهیتاً تقریبی است، لذا بهتر است به جای مقدار ۸۹۲ (مربوط به نسبت $\frac{\text{دمای اندازه‌گیری شده}}{\text{رطوبت اندازه‌گیری شده}}$ در ارتفاع ۲ متری) و ۹۳۲ (مربوط به همین نسبت در ارتفاع ۱/۵ متری) از مقدار ۹۰۰ استفاده شود (به معادلهٔ ۳۵ مراجعه شود).

۳- بخش تشعشع معادلهٔ ترکیبی:

$$ET_{rad} = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma^*} (R_n - G) \frac{۱}{\lambda} \approx \frac{۰/۴۰۸\Delta(R_n-G)}{\Delta + \gamma\ (۱ + ۰/۳۴U_2)} \quad (۴۹)$$

که در آن:

ET_{rad} : تبخیر تعرق مربوط به بخش تشعشع در معادلهٔ ترکیبی برحسب میلیمتر در روز

است.

R_n : تشعشع خالص برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است $[MJm^{-2}d^{-1}]$

G : شارحرارتی برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

λ : گرمای تبخیر برحسب مگاژول بر کیلوگرم $[MJK_g^{-1}]$ و معادل ۲/۴۵ است.

۳/۱- تشعشع خالص (R_n):

$$R_n = R_{ns}\downarrow - R_{nL}\uparrow \qquad (۵۰)$$

که در آن :

R_n : تشعشع خالص برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است $[MJm^{-2}d^{-1}]$

R_{ns} : تشعشع خالص ورودی با طول موج کوتاه برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

R_{nL} : تشعشع خالص خروجی با طول موج بلند برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

۳/۱/۱- تشعشع خالص با طول موج کوتاه (R_{ns}):

تشعشع خالص با طول موج کوتاه آن قسمت از تابش موج کوتاه خورشیدی است که به صورت موثر توسط سایه‌انداز گیاه جذب می‌شود. بقیه امواج با طول موج کوتاه به صورت بازتاب از دسترس گیاه خارج می‌گردد.

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \approx 0/77R_s \qquad (۵۱)$$

که در آن:

α : آلبیدو، و یا ضریب بازتاب سایه‌انداز پوشش گیاهی است که برای اکثر گیاهان چمنی مقدار متوسط آن برابر ۰/۲۳ می‌باشد.

R_s :امواج خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد، برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

تابش آفتاب در اکثر ایستگاههای هواشناسی کشاورزی پیشرفته به کمک تشعشع‌سنج‌های مختلف و پیرانومترها (PYRANOMETER) قابل اندازه‌گیری می‌باشد. ولی این دستگاه‌ها نیاز به نصب، واسنجی (کالیبراسیون) و نگهداری دقیق دارند.

اگرچه ایستگاه‌های هواشناسی الکترونیکی به پیرانومترهای جهانی مجهز بوده، ودر سطح گسترده‌ای از آنها استفاده می‌شود ولی با این حال مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ تشعشع خورشیدی در بسیاری از ایستگاههای هواشناسی کشاورزی قابل‌دسترس نمی‌باشد.

مقادیر آنگستروم

در بسیاری حالات تشعشع امواج با طول‌موج کوتاه را می‌توان با اندازه‌گیری تعداد ساعات آفتابی و به‌کمک معادلهٔ عمومی (جهانی) زیر برآورد نمود :

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a \qquad (۵۲)$$

که در آن:

a_s : بخشی از تشعشع است که در شرایط ابرناکی به سطح زمین می‌رسد (نسبت امواج رسیده به سطح زمین به امواج خورشیدی رسیده به بالای جو (R_a) در یک روز ابری) و مقدار آن (برای شرایط متوسط) ۰/۲۵ است.

$a_s + b_s$: بخشی از تشعشع خورشیدی است که در شرایط هوای بدون ابر، به سطح زمین می‌رسد و مقدار آن (برای شرایط متوسط) ۰/۷۵ است، و لذا b_s در شرایط متوسط، ۰/۵ خواهد بود.

$\frac{n}{N}$: نسبت تابش آفتاب (و بدون بعد) است.

n : تعداد ساعات آفتابی در روز است.

N : کل ساعات روشنایی روز است.

R_a : تشعشع رسیده به بالای جو زمین برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است $[MJm^{-2}d^{-1}]$

ضرایب انگستروومی b_s و a_s رامی‌توان بارگرسیون‌گیری از داده‌های محلی تابش آفتاب و آنالیز آن، طبق معادلهٔ زیر برآورد کرد:

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \approx 0/75R_a \qquad (53)$$

$$R_{sc} = a_sR_a \qquad (54)$$

که در آن :

R_{so} : تشعشع موج کوتاه، اندازه‌گیری شده در طول روز آفتابی، برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

R_s : تشعشع موج کوتاه، رسیده به سطح زمین، در روز تمام ابری برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

R_a : تشعشع خورشیدی، رسیده به بالای جو برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است. $[MJm^{-2}d^{-1}]$ (به معادلهٔ ۱۹ مراجعه شود).

مقادیر انگسترم (a_s و b_s) بسته به شرایط اتسمفر (رطوبت و ابرناکی)و درجهٔ میل خورشید و تغییرات آن، تغییر می‌نماید.

در شرایطی که داده‌های واقعی (اندازه‌گیری شده) مربوط به تشعشع خورشیدی در دست نباشد، و نتوان برای اصلاح پارامترهای a_s و b_s واسنجی (کالیبراسیون) انجام داد، می‌توان از مقادیر زیر که برای شرایط آب و هوای متوسط ارائه شده است استفاده کرد :

$$a_s = 0/25$$

$$b_s = 0/5$$

برای گیاه مراجع (چمن) : $\propto = ۰/۲۳$

تشعشع خالص با طول موج کوتاه را می‌توان براساس معادله رایج زیر برآورد نمود :

$$R_{nS} = ۰/۷۷ \left(۰/۲۵ + ۰/۵\frac{n}{N} \right) R_a \qquad (۵۵)$$

۳/۱/۲ - تشعشع خالص موج بلند (R_{nl})

تشعشع گرمایی که از خاک و پوشش گیاهی به سمت اتمسفر ساطع می‌شود و تشعشع برگشتی از اتمسفر و ابرها (به سوی زمین) به کمک قوانین تشعشع زیر بیان می‌شود:

$$R_{nl} = -R_{ld} \downarrow + R_{lu} \uparrow = f[\varepsilon_{vs}(\varepsilon_a - ۱)]\sigma . T_k^4 = f (\varepsilon_a - \varepsilon_{vs}) \sigma T_k^4 \qquad (۵۶)$$

که در آن :

R_{nl} : تشعشع خالص با طول موج بلند $(MJ . m^{-2} . d^{-1})$

Rlu : تشعشع گرمایی منعکس شده بوسیله خاک وپوشش گیاهی به‌سمت اتمسفر (جریان روبه‌بالا) برحسب مگاژول بر مترمربع در روز

R_{ld} : تشعشع (گرمایی) برگشتی ازاتمسفر وپوشش ابر به‌سمت زمین (جریان روبه‌پایین)، برحسب مگاژول بر متر مربع در روز

f : ضریب تصحیح برای پوشش ابری (ابرناکی)

ε_a : میزان پخشیدگی وانتشار موثر اتمسفر

ε_{vs} : میزان پخشیدگی وانتشار که برای گیاهان (۰/۹۴تا۰/۹۹) وبرای خاک (۰/۸تا۰/۹۸) و بطورمتوسط معادل ۰/۹۸ است.

σ : ثابت استفان ـ بولتزمن *(Stefan- Boltzmann)*

$$\sigma = 4.9 \times 10^{-9} \ (MJ . m^{-2} . {}^{\circ}k^{-4} . d^{-1})$$

T_k : میانگین دمای هوا برحسب درجه کلوین

فاکتورابرناکی *(f)* *(Wright,& Jensen, 1972, Jensen, et,al, 1990);*

۱ـ هنگامی که داده‌های تشعشع خورشیدی در دسترس باشد تشعشع حرارتی خالص برآورد می‌شود وازآنجا فاکتور ابرناکی طبق رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$f = \frac{R_{nl}}{R_{nlo}} = (a_c \frac{R_s}{R_{so}} + b_c) \qquad (۵۷)$$

که درآن :

f: فاکتورابرناکی (بدون بعد)

R_{nl}: تشعشع خالص با طول موج بلند $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

R_{nlo}: تشعشع خالص با طول موج بلند برای آسمان صاف $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

R_s: تشعشع خورشیدی باطول‌موج کوتاه (اندازه‌گیری شده)، $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

R_{so}: تشعشع خورشیدی با طول‌موج کوتاه برای آسمان صاف، $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

$a_c + b_c$: فاکتور ابرناکی برای آسمان صاف، $a_c + b_c = ۱$ (بدون بعد)

a_c: برای مناطق خشک حدود ۱/۳۵ وبرای مناطق مرطوب حدود ۱+ می‌باشد.

b_c: از ۰/۳۵- تا صفر متغیر است.

مرجع : رایت و جنسن (۱۹۷۲) و جنسن و همکاران (۱۹۹۰)

پارامترهای a_c، b_c مقادیر واسنجی شده‌ای هستندکه از اندازه‌گیری‌های تشعشع با طول موج بلند وبراساس مطالعات ویژه محلی، تعیین می‌شوند. درغیراینصورت می‌توان ازمقادیر زیر استفاده کرد:

$$a_c = ۱/۳۵ \text{ و } b_c = -۰/۳۵$$

مرجع : *FAO-۲۴*

۲ـ برای ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده، از روی انتشار طول موج بلند برای آسمان نیمه‌ابری، می‌توان ازترکیب معادلات ۵۲، ۵۳ در رابطه ۵۷، به‌قرارزیر عمل‌کرد:

$$f = \frac{R_{nl}}{R_{nlo}} = (a_c \frac{b_s}{a_s+b_s})\frac{n}{N} + (b_c + \frac{a_s}{a_s+b_s} a_c) \qquad (۵۸)$$

به‌ازاء :

$$a_c = ۱/۳۵ \text{ و } bc = -۰/۳۵$$

و

$$a_s = ۰/۲۵ \text{ و } b_s = ۰/۵$$

بنابراین:

$$f = \frac{R_{nl}}{R_{nlo}} = (۰/۹ \frac{n}{N} + ۰/۱) \qquad (۵۹)$$

مرجع : $FAO-۲۴$

پخشیدگی وانتشارخالص ε' (Brunt, 1932, Jensen, et, al, 1990)

انتشار خالص از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon' = (\varepsilon_a - \varepsilon_{vs}) = (a_1 + b_1\sqrt{e_d}) \cong (۰/۳۴ - ۰/۱۴ \sqrt{e_d}) \qquad (۶۰)$$

که درآن :

ε': پخشیدگی وانتشارخالص

e_d : فشار بخار درنقطه شبنم (KP_a)

a_1 : ثابت تجربی ومعادل ۰/۳۴ تا ۰/۴۴ است (بدون بعد)

b_1 : ثابت تجربی ومعادل ۰/۱۴- تا ۰/۲۵- است (بدون بعد)

مرجع : BRUNT (۱۹۳۲) و جنسن و همکاران (۱۹۹۰)

برای شرایط متوسط جوی می‌توان، مقادیر زیر را مورد استفاده قرارداد:

$$b_1 = -۰/۱۴ \qquad \text{و} \qquad a_1 = ۰/۳۴$$

مرجع: $FAO-۲۴$

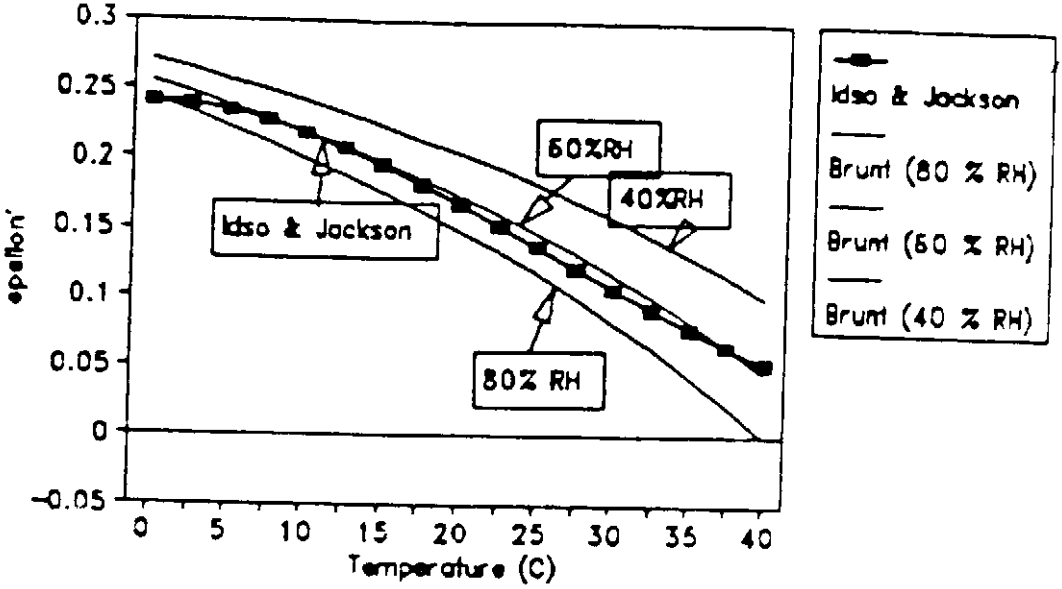
در صورتی که رطوبت اندازه‌گیری نشده‌باشد، ازحداقل دما بجای دمای نقطه شبنم، برای محاسبه متوسط فشار بخار استفاده می‌شود.

گزینه پخشیدگی خالص براساس درجه حرارت متوسط، باتوجه به‌معادله زیر تخمین زده می‌شود:

$$\varepsilon' = ۰/۲۶۱ \exp(-۷/۷۷ \times ۱۰^{-۴} \cdot T^۲) - ۰/۰۲ \qquad (۶۱)$$

که درآن:

T : میانگین دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد) *(Idso & Jackson, 1969)*



شکل ۲ ـ مقایسه روش ایدسو وجکسون (معادله ۶۱) و روش برونت (معادله ۶۰)

به‌ازاء $a_1 = ۰/۳۴$ و $b_1 = -۰/۱۴$ و برای سطوح رطوبت نسبی ۸۰٪ و ۶۰٪ و ۴۰٪:

$$R_{nl} = (a_c \frac{R_s}{R_{so}} + b_c)\ (a_1 + b_1 \sqrt{e_d})\ \sigma(T^*_{kx} + T^*_{kn})\ \frac{۱}{۲} \qquad (۶۲)$$

که در آن:

R_{nl} : تشعشع خالص با طول‌موج بلند $(MJ\ .\ m^{-2}\ .\ d^{-1})$

σ : ثابت استفان ـ بولتزمن ومعادل: $\sigma = ۴/۹ \times ۱۰^{-۹}\ MJ\ .\ m^{-2}\ .\ °k^{-4}\ .\ d^{-1}$

T_{kx} : حداکثر دمای روزانه $(°k)$

T_{kn} : حداقل دمای روزانه $(°k)$

برای اهداف کلی در صورتی که فقط داده‌های ساعات آفتابی ورطوبت در دسترس باشند، تشعشع خالص گرمایی را می‌توان ازمعادله زیربرآورد کرد:

$$R_{nl} = ۲/۴۵ \times ۱۰^{-۹}\ (۰/۹\frac{n}{N} + ۰/۱)\ (۰/۳۴ - ۰/۱۴\sqrt{e_d})\ (T^*_{kx} + T^*_{kn}) \qquad (۶۳)$$

۳/۲ - جریان گرمایی خاک (G)

گرما در خاک ذخیره وسپس آزاد می‌شود. برای محاسبه جریان گرمایی خاک دریک دوره معین از معادله زیر استفاده می‌شود: (V. Wijk & de Vries, 1963)

$$G = C_s \, d_s \, (\frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t}) \qquad (۶۴)$$

که در آن:

G : جریان گرمایی خاک $(MJ \, . \, m^{-2} \, . \, d^{-1})$

T_n : دما برحسب درجه سانتی‌گراد در روز(یاماه) nام

T_{n-1}: دما برحسب درجه سانتی‌گراد در روز (یاماه) $(n-1)$ام، (روز یا ماه ماقبل)

Δt : طول دوره n (برحسب روز و یا ماه)

C_s : ظرفیت حجمی گرمایی که برای خاک با رطوبت متوسط حدوداً معادل $(MJ \, . \, m^{-3} \, . \, C^{-1})$ ۲/۰ می‌باشد.

d_s : عمق موثر برآورد شده خاک (m)

V.Wijk, DE VRIES (1963)

جریان گرمایی خاک (برای عمق موثر ۰/۱۸ متر) ناشی‌ازنوسانات روزانه دما (تغییرات دما از یک روز به‌روز دیگر) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$G = ۰/۳۸ \, (T_{day\ n} - T_{day\ n-1}) \qquad (۶۵)$$

مرجع: ریت و جنسن ۱۹۷۲

برای تغییرات ماهانه دما، (برای عمق موثر خاک برابر با ۲متر)، جریان گرمایی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$G = ۰/۰۷ \, (T_{month\ n+1} - T_{month\ n-1}) \qquad (۶۶)$$

گر برآورد درجه حرارت برای ماه $(n+1)$ ممکن‌نباشد، در این صورت رابطه به‌قرار

زیر نوشته می‌شود: *(Jensen, et, al, 1990)*

$$G = ۰/۱۴ \ (T_{\text{month n}} - T_{\text{month n-1}}) \qquad (۶۷)$$

نظر به اینکه مقدارجریان گرمایی روزانه خاک در طول دوره‌های بیش از ۱۰ تا ۳۰ روز، نسبتاً کم می‌باشد معمولا از آن صرف‌نظر می‌شود و لذا می‌توان نوشت:

$$G = 0 \qquad (۶۸)$$

۴/۲ - ج: توصیه ومعرفی فرمول ترکیبی برای تبخیر تعرق مرجع (ET_o)

تبخیر تعرق گیاه فرضی مرجع ET_o چنین تعریف می‌شود:

تبخیر تعرق مرجع استاندارد عبارت است از: «میزان تبخیر تعرق ازیک گیاه مفروض با ارتفاع فرضی ۱۲ سانتی‌متر، با ضریب مقاومت روزنه‌ای ۷۰ ثانیه برمتر و ضریب آلبیدو ۰/۲۳ که دقیقاً معادل است با میزان تبخیر تعرق یک سطح وسیع پوشیده از چمن سبز، با ارتفاعی یکنواخت، رشدفعال، با سایه‌اندازی کامل و بدون کمبودآب».

تخمین تبخیر تعرق مرجع استاندارد (به قراری که تعریف شد) براساس فرمول ترکیبی، مبتنی بر روش پنمن - مانتیس صورت می‌پذیرد. هنگامی‌که داده‌های آیرودینامیکی وتشعشع (که‌دربخشهای فوق معرفی گردیدند) در دست باشد، فرمول ترکیبی (پنمن‌مانتیس) را می‌توان به‌قرار زیرتقریرکرد:

$$ET_O = \frac{۰/۴۰۸\Delta\ (R_n \quad G) + ۲ \frac{۹۰۰}{T + ۲۷۳} \times U_۲\ (e_a - e_d)}{\Delta + ۲(۱ + ۰/۳۴ \quad U_۲)} \qquad (۶۹)$$

که درآن:

ET_o: تبخیر تعرق ه مرجع استاندارد $(mm.d^{-1})$

R_n : تشعشع خالص از سطح گیاه $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

G : جریان گرمایی خاک $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$

T : میانگین درجه حرارت $(°C)$

U_2 : متوسط سرعت باد در طول شبانه‌روز در ارتفاع ۲ متری $(m.s^{-1})$

(e_a-e_d) : کمبود فشار بخار (KP_a) (معادله ۱۷)

Δ : شیب منحنی تغییرات فشاربخار، $(KP_a.°C^{-1})$ (معادله ۳)

γ : ثابت سایکرومتری (رطوبت سنجی)، $(KP_a.°C^{-1})$ (معادله ۴)

۹۰۰ : فاکتور یا ضریب تبدیل

تشعشع خالص، در صورتی که اندازه‌گیری نشده‌باشد، از روابط (۵۰) و (۵۵) و(۶۳) به‌قرار زیر تخمین زده می‌شود:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \qquad (۵۰)$$

$$R_{ns} = 0.۷۷(۰/۲۵ + ۰/۵\frac{n}{N})R_a \qquad (۵۵)$$

$$R_{nl} = ۲/۴۵ \times ۱۰^{-۹} (۰/۹\frac{n}{N} + ۰/۱) (۰/۳۴ - ۰/۱۴\sqrt{e_d}) (T'^{۴}_{kx} + T'^{۴}_{kn}) \qquad (۶۳)$$

جریان گرمایی خاک نیز طبق رابطه (۶۸)، معادل صفر در نظر گرفته می‌شود:

$$G = 0.14\ (T_{\text{month n}} - T_{\text{month n-1}}) \cong 0 \qquad (۶۸)$$

که در آن :

R_n : تشعشع خالص برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است $/ MJ_m{}^{-۲}d^{-۱})$

R_{ns} : تشعشع خالص موج کوتاه برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

R_{nl} : تشعشع خالص موج بلند برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

R_a: تشعشع در بالای جو، برحسب مگاژول بر متر مربع در روز است.

n/N: نسبت ساعات آفتابی (و بدون بعد) است (نسبت $\frac{\text{ساعات آفتابی}}{\text{ساعات روشنایی}}$)

T_{kx}: درجه حرارت ماگزیمم $[k]$

T_{kn}: درجه حرارت می‌نیمم $[k]$

e_d: فشار بخار واقعی برحسب کیلوپاسکال

G: شارگرمایی خاک برحسب مگاژول برمترمربع در روزاست (به معادله ۶۷مراجعه شود).

۴/۳ - پیوست‌ها

پیوست I - لیست و آدرس شرکت‌کنندگان

پیوست II - برنامه گردهمائی

پیوست III - اسناد گردهمایی و مقالات ارایه شده

پیوست ۱ - لیست و آدرس شرکت‌کنندگان

استرالیا: دکتر پ. م. فلمینگ Dr. p. m. Fleming متخصص علوم وتحقیقات پایه.
متخصص علوم و تحقیقات پایه بخش منابع آب سازمان علوم و تحقیقات صنعتی
DIVISION OF WATER RESOURCES
COMMONWEALTH SCIENTIFIC & INDUSTRIAL
ORGANIZATION
GPO BOX 1666, Canberra act 2601

فرانسه دکتر، آ.پریه Dr. A. Perrier
مرکز مطالعات هواشناسی کشاورزی، موسسه ملی تحقیقات کشاورزی (I. N. R. A)
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES AGRONOMIQUES
Grignon, F. 78850 thiverval

ایتالیا: پروفسور کاوازا، PROF. L. CAVAZZA موسسه زراعت دانشکده کشاورزی
دانشگاه بولونیا
INSTITUTO di AGRONOMIA GENERALE e COLTIVAZIONI ERBACEE -
FACOLTA di AGRARIA, UNIVERSITA di BOLOGNA.
VIA FILIPPO Re, 6-8, 40126 Bologna

انستیتوی تغذیه گیاهی
INSTITUTO SPERIEMENTALE PER LA NUTRIZIONE DELLE VIA della
Navicella, 200184 Rome

پروفسورل. تومبسی، ای.لوسیانی، ودسا.ر. ویلافرانکا

PROFS.L.TOMBESI E.LAUCIANI AND DSSA.R.VILLAFRANCA
INSTITUTO SPERIMENTALE PER LA NUTRIZIONE DELLE PIANTE.
VIA DELLA NAVICELLA,2,00184 ROME

هلند: پروفسور دکتر فدس prof. Dr. R. Feddes
گروه هیدرولوژی، فیزیک خاک وهیدرولیک دانشگاه کشاورزی واکنینگن
HEAD, DEPARTMENT OF HYDROLOGY, SOIL PHYSICS HYDRAULICS & UNIVERSITY OF AGRICULTURE&
NIEUWE KANAAL 11, Wageningen 6709 PA

پرتقال: پروفسور ل. سن توس پرره‌را PROFESSOR. L.SANTOS Pereira

دانشگاه فنی لیسبون. گروه مهندسی آبیاری وآبادانی
TECHNICAL UNIVERSITY oF LISBON.
DEPARTMENT OF AGRICULTURAL ENGINEERING.
TAPADA da AJUDA, 1399 LISBOA CEDEX

انگلستان: دکتر. ه گانستون Dr. H. Gunston
موسسه هیدرولوژی
INSTITUTE OF HYDROLOGY,
Maclean Building Wallingford OX108BB

ایالات متحده آمریکا: دکتر ریچاردآلن Dr. Richard Allen
استاد یار کالج مهندسی
گروه مهندسی کشاورزی وآبیاری دانشگاه ایالتی یوتا

ASSOCIATE PROFESSOR, COLLEGE OF ENGINEERING DEPARTMENT OF AGRICURAL AND IRRIGATION ENGINEERING.

UTAH STATE UNIVERSITY
LOGAN, Utah 84322-4105 U.S.A

ایالات متحده آمریکا: دکتر. م. جنسن Dr. M. E. JENSEN

مدیر موسسه مدیریت آبیاری کلرادو - مرکز خدمات دانشگاهی

COLORADO INSTITUTE FOR IRRIGATION MANAGEMENT UNIVERSITY SERVICES CENTER,

4th FLOOR FORT COLLINS CO80523

دکتر. و. پروت Dr. W. O. Pruitt مهندس آبیاری وعضو هیئت علمی گروه عمران اراضی، هواشناسی و منابع آب دانشگاه کالیفرنیا

LECTURER AND IRRIGATION ENGINEER. (EMERITUS).

LAND, AIR AND WATER RESOURCES DEPARTEMENT. UNIVERSITY OF CLIFORNIA DAVIS CA 95616

دکتر مانتیس Dr. J. L. Monteith

مدیر برنامه مدیریت منابع در موسسهٔ بین‌المللی تحقیقات گیاهان نیمه‌گرمسیری

Dr. J. L. MONTEITH

DIRECTOR, RESOURCE MANAGEMENT PROGRAMME.

INTERNATIONAL CROPS RESEACH INSTITUTE FOR THE SEMI ARID TROPICS (ICRISAT) CENTRE.

PANTANCHERU, ANDHRA PRADESH.

502324, INDIA

سرمدار هواشناسی جهانی دکتر د. ریکس مدیر گروه هواشناسی کشاورزی

DR. D. RIJKS CHIEF, AGROMETEOROLOGY DEPARTMENT. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

41, AVENUE GIUSEPPE MOTTA. CASE POSTALE 2300 CH - 1211 GENEVA 2 SWITZERLAND

سازمان خواربار جهانی FAO

آقای ه. ا. جاسیورسکی MR. H. A. JASIOROWSKI

معاون دپارتمان کشاورزی

آقای ج. ام. مایگنز Mr. G. M. Higgins

رئیس بخش توسعه اراضی ومنابع آب

آقای ج. دورنبوس Mr. J. Doorenbos

نماینده سازمان خواربار جهانی (FAO)، آنکارا، ترکیه

آقای س. ف. سکت Mr. S. F. Scott

رئیس بخش توسعه ومدیریت منابع آب

آقای ا. ابوخالد Mr. A. Aboukhaled

رئیس توسعه سیستمهای اراضی ومنابع آب، بخش توسعه اراضی ومنابع آب

آقای ج. بایرو Mr. J. Bairo

اداره عملیات وسرمایه‌گذاری

آقای م. اسپینوت MR. M. Espinot

رئیس اجرایی اداره عملیات کمک‌های ویژه

آقای ر. گمز Mr. R. GOMMES

رئیس سازمان هواشناسی کشاورزی ـ بخش توسعه تحقیقات وتکنولوژی

آقای ف. ناچرگائل Mr. F. NACHTERGAELE

مدیر فنی بخش منابع خاک ـ مدیریت حفاظت خاک

آقای د. سیمز Mr. D. Sims مدیر فنی بخش منابع آب ـ مدیریت و حفاظت خاک

آقای ج. ف. پوپوف Mr. G. F. POPOV

مدیر گروه هواشناسی کشاورزی

هئیت دبیران سازمان خواربار جهانی FAO/AGLW SECRETARIAT

آقای م. اسمیت Mr. M. Smith

مدیر فنی بخش توسعه اراضی ومنابع آب

آقای ای. سگران Mr. A. SEGEREN

مشاور سازمان خواروبار جهانی FAO

خانم س. د. اسمیت ردفرن Ms. C. D. SMITH - REDFERN

دبیر بخش توسعه اراضی ومنابع آب

پیوست II

برنامه گردهمایی (دستور جلسه وموارد مورد بحث):

دوشنبه ۲۸ ماه مه

جلسه افتتاحیه

۰۹/۰۰: ثبت نام

رئیس جلسه آقای ج. م. هایگنز MR. G. M. HIGGINS

رئیس بخش توسعه اراضی ومنابع آب FAO

۱۰/۰۰: افتتاح جلسه توسط آقای ه ای جاسیوروسکی Mr. H. A. JASIOROWSKI

معاون دپارتمان کشاورزی FAO

۱۱/۰۰: بحث مقدماتی ومعرفی جوانب فنی اجلاس آقای مارتین اسمیت Mr. MARTIN SMITH

مدیر فنی بخش توسعه اراضی و منابع آب + پرسش و پاسخ

مجمع فنی شماره ۱: به ریاست آقای م. جنسن Mr. M. JENSEN

۱۳/۳۰: بحث درموضوع I- روش های مختلف پیش بینی (وبرآورد) تبخیر تعرق مرجع + بحث وتبادل نظر جمعی

۱۶/۰۰: اظهار نظرهای جمعی (PLENARY PRESENTATION) + پرسش وپاسخ

۱۷/۰۰: پذیرایی درمحل «خانه اندونزی» به میزبانی معاون دپارتمان کشاوزی FAO

سه شنبه ۲۹ ماه مه

مجمع فنی ۲ـ به ریاست آقای پ. فلمینگ Mr. P. FLEMING

۰۹/۰۰: بحث درموضوع II- تجزیه وتحلیل مقاهیم وراههای آزمون درجه دقت وکارآیی روش های مختلف برآورد ET_o وپارامترهای مربوطه + بحث وتبادل نظر گروهی

۱۱/۳۰: بازدید از:

ویترب (VITERBO): بازدید از موسسه فنون کشاورزی دانشگاه توسیا (TUSCIA)، ویترب

سالاریا (SALARIA): بازدید از موسسه تغذیه گیاهی، رم چهارشنبه ۳۰ماه مه

چهارشنبه ۳۰ ماه مه

مجمع فنی ۳ـ رئیس جلسه آقای ر. فدس Mr. R. FEDDES

۰۹/۰۰: بحث درموضوع III- اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی، قابل دسترس بودن ودرجه دقت آنها. مقیاسهای زمانی توصیه شده برای روش‌های مختلف برآورد ET_O

۱۱/۳۰: اظهار نظرها و بحث‌های جمعی + پرسش و پاسخ

مجمع فنی ۴ـ به‌ریاست آقای ل. پریرا Mr. L. PEREIRA

۱۳/۳۰: بحث درموضوع IV - تبخیر تعرق وضریب گیاهی، روش‌های آزمون درجه صحت وکارآیی ضریب گیاهی در شرایط جوی مختلف + پرسش و پاسخ

۱۶/۰۰ تا ۱۷/۰۰: اظهارنظرها + پرسش وپاسخ

پنجشنبه ۳۱ماه مه

جلسه اختتامیه - رئیس جلسه آقای د. ریجکز Mr. D. RIJKS

۰۹/۰۰ ارایه‌مراحل کار، ونحوه بازنگری درروش‌های پیش‌بینی وبرآورد آب موردنیاز گیاهان وبرنامه کار

۱۱/۰۰: اظهارنظر هریک از کارشناسان در رابطه با مشارکت در برنامه‌های پیشنهادی

رئیس جلسه: آقای س. ف. اسکوت Mr S. F. SCOTT

۱۳/۳۰: ارایه‌قطعنامه ونتیجه‌گیری.

۱۵/۰۰: ختم اجلاس.

پیوست شماره III:

اسناد گردهمایی ومقالات ارایه‌شده:

- اسناد اصلی

۱ـ برنامه ودستور کار گردهمایی

۲ـ فهرست اسامی شرکت‌کنندگان

۳ـ مقالات وتوصیه‌های پیشنهادی توسط کارشناسان شرکت‌کننده در گردهمایی

۴ـ بررسی مقایسه‌ای روش‌های مختلف در رابطه با نیاز آبی گیاهان (۱۹۹۰)، توسط آقایان م. اسمیت (M. Smith) والف. سه‌ژرن (A. SEGEREN)

۵ـ روش‌های پیشنهادی جهت بازنگری در پیش‌بینی وبرآورد آب موردنیاز گیاهان (۱۹۸۹)، توسط ل. پریرا (L. PEREIRA) وم. اسمیت (M. SMITH)

۶ـ روش محاسبات معادله پنمن ـ مانتیس اصلاح شده با استفاده از کامپیوتر وماشین حساب (۱۹۸۸) توسط م. اسمیت

اسناد مربوط به مجامع فنی:

مجمع فنی I:

ـ خلاصه کامل (بعلاوه بازنگری ۳۱/۵)

ـ خلاصه گروه ۱

ـ خلاصه گروه ۲

مجمع فنی II:

ـ توصیه‌ها وپیشنهادات

ـ خلاصه گزارش گروه ۱

ـ خلاصه گزارش گروه ۲

- خلاصه گزارش گروه ۳

مجمع فنی III:

- موضوع بحث‌های پیشنهادی
- توصیه‌ها وپیشنهادات
- خلاصه گزارش گروه ۱
- خلاصه گزارش گروه ۲
- خلاصه گزارش گروه ۳

مجمع فنی IV:

- موضوع بحثهای پیشنهادی
- توصیه‌ها وپیشنهادات
- خلاصه گزارش گروه ۱
- خلاصه گزارش گروه ۲
- خلاصه گزارش گروه ۳

مجمع اختتامیه:

- نقطه‌نظرها جهت بحث و تبادل نظر

فهرست منابع و مآخذ :

References

Allen R.G. (1986). A penman for all seasons. J. Irrig. and Drain Engrg., ASCE, 112(4): 348-368

Allen R.G. and Pruitt W.O. (1986). Rational use of the Blaney-criddle formula. J. Irrig. and Drain. Engrg. ASCE 112(IR2): 139-155.

Allen R.G. Jensen M.E., Wright J. L. and Burman R.D. (1989). Operational estimates of evapotranspiration. Agron. J. 81: 650-662.

Bosen J.F. (1958). An approximation formula to compute relative humidity from dry bulb and dew point temperatures. Monthly Weather Rev. 86(12):486.

Brunt D. (1932). Notes on radiation in the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. oc. 58:389-418.

Brunt D. (1952). Physical and dynamical meteorology, 2nd ed. University Press, Cambbridge. 428pp.

Brutsaert W. (1975). The roughness length for water vapor, sensible heat and other scalars. J. Atm. Sci. 32:2028-2031.

Burman R.D., Jensen M.E. and Allen R.G. (1987). Thermodynamic factors in evapotranspiration. In: Proc. Irrig. and Drain Spec. Conf., James L. G. and English M.J. (eds). ASCE, Portland, Ore., July. pp. 28-30.

Craig J.C. (1984). Basic routines for the Casio computer. Wayne Green Books, Peterborough, NH 03458. 131pp.

Doorenbos J. and Ptuitt W.O. (1976). Guidelines for predicting crop

water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed. Rome. 156pp.

Duffie J.A. and Beckman W.A. (1980). Solar engineering of thermal processes. John Willey and Sons, New York. pp. 1-109.

Frere M. and Popov G.F. (1979). Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper 17. Rome. pp. 38-43.

Frevert D.K., Hill R. W. and Braaten B.C. (1983). Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. J. Irrig. and Drain. ASCE 109(IR2): 265-270.

Gommes R. a. (1983). Pocket computers in agrometeorology. FAO Plant Production and Protection Paper 45, Rome.

Harrison L.P. (1963). Fundamental concepts and definitions relating to humidity. In: Humidity and Moisture. Vol. 3. Wexler A. (ed). Reinhold publishing Company, New York.

Idso S.B. and Jackson R.D. (1969). Thermal radiation from the atmosphere. J. Geophys. Res. 74: 5397-5403.

Jensen M.E., Burman R.D. and Allen R.G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual No. 70.

Monteith J.L. (1965) Evaporation and the environment. In: The State and Movement of water in Living Organisms. XIX th Symposium. Soc. for xp. Biol., Swansea. Cambridge University Press. pp. 205-234.

Monteith J.L. (1981) Evaporation and surface temperature. Quarterly J. Royal Meteo. Soc. 107:1-27.

Monteith J.L. and Unsworth M.H. (1990). Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London.

Murray F. W. (1967). On the computation of saturation vapor pressure. J. Appl. Meteor. 6:203-204.

Smith M. (1988). Calculation procedures of modified Penman equation for computers and calculators. FAO, Land and Water Development Division, Rome.

TETENS O. (1930). Uber einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys. 6:297-309.

Van Wijk W.R. and de Vries D.A. (1963). Periodic temperature variations in a homogeneous soil. In. Physics of the Plant Environment. van Wijk W.R. (ed). North-Holland Publishing Co., Amsterdam. pp. 102-143.

Wright J.L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE 108(IR2):57-74.

Wright J. L. and Jensen M.E. (1972). Peak water requirements of crops in Southern Idaho. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE 96(IR1): 193-201.

فهرست مقالات ارائه شده در گردهمایی :

Allen R. G. and Pruitt W.O. FAO-24 Refernce Evapotranspiration coefficients. J. Irrig. and Drainage Engineering. In prepation.

Allen R. G. and Pruitt W.O. Rational use of the FAO Blaney- Criddle Formula. J. Irrig. and Drainage Engineering 112(2): 139-155. May 1986.

Allen R. G., Jensen M.E., Wright J.L. and Burman R.D. Operation estimates of reference evapotranspiration. Agronomy J. 81 (4): 650-662. 1989.

Batchelor C.H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified Penman equation. Irrig. Sci. 5:223-233. 1984.

de Bruin H.A.R. From Penman to Makkink. In: Evaporation and Weather. Proceedings and Information No. 39. Netherlands Organization for Applied Scientific Research. TNO Committee on Hydrological Research. pp. 5-31.

Feddes R.A. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration. In: Evaporation and Weather. Proceedings and Information No. 39. Netherlands Organization fot Applied Scientific Research. TNO Committee on Hydrological Research. pp. 33-45.

Gunston H. and Batchelor C.H. A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. Agric. Water Mgmt. 6:65-77. 1983.

Kizer M.A., Elliott R.L. & Stone J.F. Hourly ET model calibration with eddy flux and energy balance data. J. Irig. & Drainage Engineering 116(2): 172-181. 1990.

Monteith J.L. Does transpiration limit the growth of vegetation or vice

versa? J. Hydrology 100:57-68.1988.

Patwardhan A.S., Nieber J.L. and Johns E.L. Effective rainfall estimation methods. J. irrigation and Drainage Engineering 116(2): 182-193. 1990.

Perrier A. Projet de definitions concernant l'evapotranspiration en fonction de Considerations theoriques et pratiques. Rapports francais presentees au Colloque de la Commission Internationale des Irrigations et du Dranage (CIID), Budapest, Hungary. 26.29 mai 1977. La Meterologie. Vle Serie No. 11, Numero Special Evapotranspiration et Bilan Hydrique. decembre 1977.

Perrier A. Importance des definitions de l'evapotranspiration dams le domaine pratique de la mesure, de l'estimation et de la notion de coefficients culturaux. Question IV. Rapport 1. L'hydrotechnique au service d'une politique de l'eau. Societe Hydrotechnique de France. XV Journees de l'Hydaulique. Toulouse, 5-7 Sept. 1978.

Perrier A. Land surface processes. vegetation. In: Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models. P.S. Eagleson (ed). Cambridge University Press. 1982.

Piper B.S. Sensitivity of Penman estimates of evaporation to errors in input data. Agric. Water Mgmt 15:729-300.1989.

Stanghellini C. Bosma A.H., Gabriels P.C.J. and Werkhoven C. The water consumption of agricultural crops how crop coefficients are affected by crop geometry and microclimate. Institute of Agricultural Engineering, PO. Box 43, 6700 AA Wageningen, The Netherlands. 1988.

Stanghellini C. Bosma A.H., Gabries P.C.J. and Werkhoven C. The water consumption of agricultural crops how crop coefficients are affected by crop geometry and microclimate. Institute of Agricultural Engineering, P.O.Box 43, 6700 AA Wageningen, The Netherlands. 1988.

۵ - تحقیقات و تاییدات معتبر دیگر در رابطه با فرمول پنمن ـ مانتیس

۵/۱ تحقیقات آقای آلن *(Allen)* استادگروه مهندسی آبیاری دانشگاه یوتا، آقای جنسن *(Jensen)* استاد بخش مدیریت آبیاری در دانشگاه کلرادو ـ ایالات متحده امریکا ودیگرهمکاران ۱۹۸۹

در مقاله‌ای‌که تحت عنوان «محاسبات وبرآورد کاربردی تبخیرتعرق گیاه مرجع» که توسط ریچارد ـن، مارون‌جنسن، جیمزرایت و روبرت بورمان

(Richard, G, Allen. Marvin. E, Jensen. James, L. Wright, and Robert, D. Burman)

در سال ۱۹۸۹ ارائه شده‌است، تبخیرتعرق محاسبه شده با روشهای ترکیبی پنمن (پنمن ۱۹۶۳، پنمن‌کمبرلی ۱۹۷۲، پنمن‌کمبرلی ۱۹۸۲، پنمن‌اصلاح شده *FAO-24* وپنمن‌ـ مانتیس) بانتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیریهای لیسیمتری موردمقایسه قرارگرفته ومیزان متوسط تبخیر تعرق روزانه، متوسط تبخیرتعرق ماه حداکثر مصرف (ماه‌پیک *PEAK*) بررسی وارزیابی گردیده‌است.

ایستگاههای لیسیمتری که دراین‌تحقیق ازآنها استفاده شده‌است، ازعرض جغرافیایی ۳۸درجه جنوبی (اسپندال *Aspendal*، واقع دراسترالیا) و خط استوا (یانگامبی *Yangambi* واقع درزییر) تا عرضهای‌جغرافیایی مختلف شمالی (واقع درآمریکا ودانمارک) متغیربوده‌است که مشخصات عمومی‌این ایستگاهها، شامل عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح آبهای آزاد، طول دوره‌های آماری و طول دوران رشد گیاه درجدول شماره۱ آمده‌است

ایستگاه‌های لیسیمتری یازده‌گانه دارای پوشش‌گیاهی‌متنوع ودارای تقویم‌آبیاری ویژه‌ای بوده‌اندکه درجدول شماره۲ کلیات آن شرح داده شده‌است. ارتفاع متوسط گیاه درمراههای مختلف رشد، در درون لیسیمتر وخارج‌ازآن، درایستگاههای لیسیمتری یازده‌گانه، از۷سانتیمتر تا ۶۰ سانتی‌متر و درخارج‌آن از۷سانتی‌متر تا ۵۰سانتی‌متر متغیربوده‌است (جدول شماره۳).

جدول شماره ۴ متوسط تبخیر تعرق (ET_0) محاسبه شده (با معادلات پنمن) و اندازه‌گیری شده (به‌وسیله لیسیمتر) را،برای ماههای حداکثر مصرف در هر ایستگاه

نشان می دهد.

ماههای حداکثر مصرف، درهرایستگاه، برای اقالیم خشک ومرطوب درجدول ۵ نشان داده شده‌است.

دراین تحقیق خطای استانداردتخمین *(SEE)* برحسب میلی‌متر درروز براساس رابطهٔ زیر محاسبه شده‌است:

$$SEE = \sqrt{\frac{S(y - \bar{y})^2}{n-2}}$$

که درآن :

SEE: خطای استاندارد تخمین برحسب میلیمتر در روزاست.

y: تبخیرتعرق اندازه‌گیری‌شده توسط لیسیمتر، برحسب میلیمتر در روزاست.

$\bar{y}$: محاسبه مستقیم تبخیرتعرق با استفاده‌ازمعادلات «تجربی - ریاضی» ویا برآورد تبخیرتعرق اصلاح شده براساس آنالیز رگرسیونی.

n: تعداد مشاهدات واندازه‌گیریها.

میزان *SEE (Standard Errors of Estimate)* برای ایستگاه های مختلف لیسیمتری وبرای فرمولهای مختلف پنمن و پنمن اصلاح شده در اقالیم خشک و مرطوب و برای ماه‌های حداکثر مصرف در جدول ۶ خلاصه شده‌است.

همانطورکه‌ازاین‌جدول برمی‌آید، برآورد ET_o باروش پنمن- مانتیس دارای خطای استاندارد کمتری‌است واین، بیانگر دقت وصحت‌این روش درمقایسه بااندازه‌گیریهای لیسیمتری‌است.

خطای استاندارد برآورد ET_o بافرمول پنمن‌اصلاح شده با معادلات رگرسیونی ودرمقایسه با اندازه‌گیریهای لیسیمتری درجدول ۸ نشان داده شده‌است که بازهم بیانگر دقت وصحت روش پنمن - مانتیس می‌باشد.

درجدول شماره ۷ ضریب رگرسیون *(b)* وضریب همبستگی *(r)* به‌ازای تبخیر تعرق محاسبه شده براساس فرمولها وتبخیرتعرق اندازه‌گیری‌شده بوسیله لیسیمتر نشان داده شده‌است.

$$b = \frac{ET_0 \text{ اندازه‌گیری شده}}{ET_0 \text{ محاسبه شده}}$$

شکل‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ نشانگر ضریب رگرسیون *(b)*، ضریب همبستگی *(r)* متوسط تبخیرتعرق پتانسیل اندازه‌گیری شده برحسب میلیمتر در روز، برای یازده ایستگاه لیسیمتری از یک سو و ET_0 محاسبه شده با معادلات پنمن (پنمن ۱۹۶۳، پنمن ـ کمبرلی ۱۹۷۲، پنمن کمبرلی ۱۹۸۲، پنمن اصلاح شده *FAO-24* و پنمن ـ مانتیس) از سوی دیگراست.

باتوجه به‌این شکلها، ملاحظه می‌شود که ضریب رگرسیون، یا شیب خط ET_0 محاسبه شده براساس معادله پنمن ـ مانتیس، با ET_0 اندازه‌گیری شده از طریق لیسیمتر دقیقاً ۱:۱ *(B=1)* است.

شکلهای ۶، ۷ و ۸ نیز بیانگر وضعیت محاسبه تبخیرتعرق متوسط روزانه براساس معادله پنمن ـ مانتیس، درمقایسه باانداز‌ه‌گیریهای لیسیمتری در ایستگاههای کمبرلی *(Kimberly, ID)*، کوشوکتون *(Coshocton, OH)* و دیویس *(Davie, CA)* با پوششهای مختلف گیاهی می‌باشد که در دو ایستگاه اول، ضریب رگرسیون *(b)* بسیار بالا می‌باشد.

جدول ۹ و ۱۰ خلاصه نتایج برآورد متوسط تبخیرتعرق ماهانه و روزانه را نشان می‌دهد. روشهای مختلف پنمن برحسب حداکثر خطای استاندارد تخمین وزنی (*SEE* وزنی) اولویت‌بندی ومشخص گردیده‌است که درتمام شرایط (برآورد ماهانه درمناطق خشک، درمناطق مرطوب ومناطق دیگر و برآورد روزانه) بهترین روش محاسبه تبخیرتعرق (ET_0) معادله پنمن مانتیس است.

سایرمشخصات ونتایج تحقیق درجداول مزبور آمده‌است.

جدول ۱ـ محل (نصب ... اندازه‌گیری) لایسیمترها، دوره‌های اندازه‌گیری ومجریان اصلی طرحهای تحقیقاتی

مکان	عرض جغرافیایی	ارتفاع از (سطح دریا)(m)	سالهای آماری	دوره	تعداد ماههای دوران رشد	مراجع اصلی
Aspendale,Australia	38° S	3	3	1959-61	12	McIlroy & Angus(1963)
Brawley. CA. USA	34° N	-30	1	1971	8	Lement R.D.(Pers. Comm. 1973)
Copenhagen, Denmark	56° N	28	11	1955-66	8	Jensen, S.E. & Aslyng, H.C (Pers.Comm.1972)
Coshocton, OH. USA	40° N	360	3	1977-79	9	Harlukowicz T.J.(Pers.Comm.1984)
Davis, CA. USA	39° N	16	4	1959-63(1)	12	Pruitt, W.O. (Pers.Comm.1971)
Davis, CA. USA	"	"	3	1967-69(2)	"	Fruitt, W.O. (Pers.Comm.1971)
Kimberly, I.D. USA	42° N	1195	3	1969-71	7	Wright, J.L.(Pers.Comm.1983)
Lompoc, CA. USA	35° N	26	4		12	Nixon, P.R. (Pers.Comm.1971)
Scottsbluff, NE. USA	42° N	1280	1	1977	4	Weiss, A. (Pers.Comm.1981)
Seabrook, NJ. USA	39° N	37	10	1949-59	12	Mather, J.R. (Pers.Comm.1963)
South Park, CO. USA	39° N	2774	1	1969	4	Kruse & Haise (1974)
Yangambi, Zaire	0° N	487	1	1959	12	BERNA, J. & Frere (1970) & Pruitt, W.O. (Pers. Comm.1986)

۱ـ دوره‌های اندازه‌گیری‌که درآنالیزماهانه مورد استفاده قرارگرفته‌است. ۲ـ دوره‌های‌اندازه‌گیری که درانالیز روزانه مورد استفاده قرارگرفته‌است.

جدول ۲ـگیاهان موردکشت در لایسیمترها و مدیریت مصرف آب

مکان	شرح کشت	نوع مدیریت آبیاری
Aspendale	Clover وچمن چاودار چند ساله به ارتفاع ۶ تا ۱۰ سانتیمتر	اغلب روزانه (روزها)
Brawley	یونجه که بعنوان علوفه کاشته شده است.اندازه‌گیری پارامترهای اقلیمی درارتفاع ۱۲سانتیمتری	آبیاری به‌صورت نرمال(۱)
Copenhagen	چمن Clover متراکم به‌ارتفاع ۱۲تا ۱۴سانتیمتر	آبیاری هنگامی‌صورت گرفته که خاک با ۳۰ میلی‌متر کمبود آب مواجه بوده‌است.
Coshocton	چمن Legume که به‌عنوان علوفه کاشته می‌شود. اندازه‌گیری پارامترهای‌اقلیمی درارتفاع ۱۵Cm	(بدون‌آبیاری) متکی‌به‌بارندگی‌طبیعی (۱) و (۲)
Davis	چمن چاودار چندساله (۶۳-۱۹۵۹)، چمن‌آلفا- فستوکاFESTUCA ۶۸-۱۹۶۴به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری	آبیاری با ۵۰درصدتخلیه مجاز
Kimberly	یونجه (کاشته شده بعنوان‌علوفه) اندازه‌گیری پارامترهای‌اقلیمی‌درارتفاع ۱۲سانتی‌متری	آبیاری بصورت نرمال (۱)
Lompoc	چمن‌چاودارچندساله که‌به‌ارتفاع ۶تا۱۵سانتمترنگهداری‌شده‌است	بصورت هفتگی وتناوب کمتر
Scottsbluff	یونجه کاشته شده بعنوان علوفه	آبیاری‌بصورت نرمال (۱)
Seabrook	چمن چاودار چیده شده	روزانه وبا روش آبیاری بارانی
South Park	چمن محلی(کاشته شده بعنوان‌علوفه)	سطح‌ایستابی‌نزدیک به سطح زمین (۱) و (۲)
Yangambi	چمن‌بر اچیری‌موتیکا(brachiari Mutica)	لیسیمتر زهکش‌دار

۱ـدر این ایستگاه‌ها دوره‌های رشد بعد از برداشت (چین) در تعمیم و بسط منحنی‌های متوسط تبخیر وتعرق مرجع، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.
۲ـدر این ایستگاه ها دوره‌های تنش رطوبتی مهم (بحرانی) در تعمیم وبسط منحنی‌های متوسط تبخیر وتعرق مرجع، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

ادامه جدول ۳ ـ ارتفاع گیاهی که‌بعنوان مرجع درمحاسبات روش پنمن- مانتیس بکاررفته‌است

محل(ایستگاه)	ماه	ارتفاع‌گیاه‌در داخل لیسیمتر (m)	ارتفاع گیاه درمحوطه (m)بیرون‌از لیسیمتر
Aspendale	تمام‌ماهها	۰/۱	۰/۱
Brawley	آوریل	۰/۵	۰/۱۲
	می	۰/۴	۰/۱۲
	ژوئن	۰/۴۵	۰/۱۲
	ژوئیه	۰/۵	۰/۱۲
	اوت (اگوست)	۰/۵	۰/۱۲
	سپتامبر	۰/۳	۰/۱۲
	اکتبر	۰/۲۵	۰/۱۲
	نوامبر	۰/۲۵	۰/۱۲
Copenhagen	تمام‌ماهها	۰/۱۲	۰/۱۲
Coshocton	مارس	۰/۰۷	۰/۰۷
	آوریل	۰/۱	۰/۱
	می	۰/۲۵	۰/۱۵
	ژوئن	۰/۲۵	۰/۱۵
	ژوئیه	۰/۲۵	۰/۱۵
	اوت (اگوست)	۰/۲	۰/۱۵
	سپتامبر	۰/۲	۰/۱۵
	اکتبر	۰/۱۵	۰/۱۵
	نوامبر	۰/۱	۰/۱
Davis	تمام‌ماهها	۰/۱۲	۰/۱۲
Kimberly	آوریل	۰/۲۵	۰/۱۲
	می	۰/۴	۰/۱۲
	ژوئن	۰/۶	۰/۱۲
	ژوئیه	۰/۵	۰/۱۲
	اوت (اگوست)	۰/۴	۰/۱۲
	سپتامبر	۰/۴	۰/۱۲
	اکتبر	۰/۲	۰/۱۲

ادامه جدول ۳ ـ ارتفاع گیاهی که‌بعنوان مرجع درمحاسبات روش پنمن ـ مانتیس بکاررفته‌است

محل (ایستگاه)	ماه	ارتفاع‌گیاه‌در داخل لیسیمتر(m)	ارتفاع گیاه درمحوطه (m)بیرون‌از لیسیمتر
Lompoc	تمام‌ماهها	۰/۰۹	۰/۰۹
Seabrook	تمام‌ماهها	۰/۱۲	۰/۱۲
Scotsbluff	ژوئن	۰/۵	۰/۵
	ژوئیه	۰/۵	۰/۵
	اوت (اگوست)	۰/۴۵	۰/۴۵
	سپتامبر	۰/۵	۰/۵
South Park	می	۰/۱۲	۰/۱۲
	ژوئن	۰/۳۵	۰/۳۵
	ژوییه	۰/۳۵	۰/۳۵
Yangambi	تمام‌ماهها	۰/۲۵	۰/۲۵

جدول ۴ ـ متوسط تبخیرتعرق پتانسیل* ET_0 محاسبه شده با استفاده ازفرمولها واندازه‌گیری شده بوسیله لیسیمتر برحسب میلیمتر در روز برای ماههای حداکثر مصرف**

منطقه	پنمن (۱۹۶۳)	کیمبرلی‌پنمن (۱۹۷۲)	کیمبرلی‌پنمن (۱۹۸۲)	پنمن‌اصلاح‌شده (FAO-۲۴)	پنمن‌ـمانتیس	لیسیمتر
Aspendale	۷/۲	۷/۶	۸	۹/۵	۶/۳	۷/۷
Brawley	۹/۲	۹/۹	۱۰/۹	۱۱/۲	۱۰/۴	۱۰/۵
Copenhagen	۳/۷	۳/۸	۳/۹	۴/۸	۳	۳
Coshocton	۴/۴	۴/۳	۴/۶	۵/۳	۴/۴	۴/۱
Davis	۶/۸	۷/۳	۸	۸/۹	۶/۷	۶/۹
Kimberly	۷	۷/۴	۸	۸/۸	۷/۸	۷/۹
Scotsbluff	۸/۴	۸/۹	۹/۳	۹/۷	۹/۹	۱۰/۱
Seabrook	۵/۴	۵/۸	۶	۶/۸	۵/۱	۵/۴
South Park	۳/۶	۳/۷	۴	۴/۳	۴/۱	۴/۱
Yangambi	۳/۶	۳/۴	۳/۱	۴/۲	۳/۵	۳/۹
تمام مناطق	۵/۹	۶/۱	۶/۵	۷/۳	۶	۶/۲

* - برآورد ET_0 با فرمولها، نسبت به اندازه‌گیری ET_0 با لیسیمتر تصحیح و تنظیم شده است.

** - ماه‌های حداکثر مصرف هریک از مناطق در جدول ۵ آمده است..

جدول ۵ ـ طبقه‌بندی ایستگاههای لیسیمتری مناطق خشک ومرطوب

	ماه پیک		مناطق خشک (۱)
	Janvqry	ژانویه	*Aspendale*
	June	ژوئن	*Brawley*
	July	ژوییه	*Davis*
	July	ژوییه	*Kimberly*
	June	ژوئن	*Scotsbluff*
	July	ژوییه	*South Park*
	ماه پیک (حداکثر مصرف)		مناطق مرطوب (۲)
	June	ژوئن	*Copenhagen*
	June	ژوئن	*Coshocton*
	June	ژوئن	*Lompoc*
	July	ژوییه	*Seabrook*
	March	مارس	*Yangambi*

۱ـ مناطق خشک براین‌اساس طبقه‌بندی شده‌است که متوسط روزانه رطوبت نسبی در ماه پیک کمتر از ۶۰درصد باشد.

۲ـ مناطق مرطوب براین‌اساس طبقه‌بندی شده‌است که متوسط روزانه رطوبت نسبی درماه پیک ۶۰درصد یا بیشتر باشد.

جدول ۶ ـ خطای استاندارد برآورد(۱) ET_o با استفاده ازفرمولهای مختلف(۲) درمقایسه با اندازه‌گیریهای لیسیمتری (برحسب میلیمتر در روز)

منطقه	پنمن (۱۹۶۳)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۷۲)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۸۲)	پنمن‌اصلاح‌شده (FAO-۲۴)	پنمن-مانتیس
Aspendale	۰/۳۳	۰/۴۹	۰/۴۵	۱/۲۵	۰/۶۵
Brawley	۰/۹۷	۱/۱۱	۰/۵۷	۱/۴۷	۰/۴۴
Copenhagen	۰/۶۴	۰/۷۶	۰/۶۷	۱/۲۸	۰/۱۱
Coshocton	۰/۴	۰/۵۸	۰/۳۳	۰/۷۹	۰/۲۶
Davis	۰/۳۹	۰/۸۸	۰/۶۸	۱/۵۷	۰/۳۶
Kimberly	۰/۶۹	۰/۹۱	۰/۲۴	۱/۱۷	۰/۲۵
Lompoc	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۷۹	۱/۷۵	۰/۳۳
Scottsbluff	۱/۳۴	۰/۹۴	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۵۳
Seabrook	۰/۵۴	۱/۱۱	۰/۷۳	۱/۵۲	۰/۴۸
South Park	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۲۷
Yangambi	۰/۲۴	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۳۲
مناطق خشک	۰/۵۸	۰/۷۳	۰/۴۸	۱/۱۷	۰/۴۱
مناطق مرطوب	۰/۵۷	۰/۷۵	۰/۵۹	۱/۱۷	۰/۳۱
سایر مناطق ماه پیک (حداکثر مصرف)	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۵۳	۱/۱۶	۰/۳۶
مناطق خشک ماه پیک	۱/۲۲	۰/۸۱	۰/۷۲	۱/۴۷	۰/۷۲
مناطق مرطوب ماه پیک	۰/۸۴	۰/۸۳	۱/۰۹	۲/۰۲	۰/۳۷
سایر مناطق ماه پیک	۰/۹۵	۰/۷۲	۰/۷۹	۱/۵۳	۰/۵۲

۱ـ مقادیرخطای‌استاندار برآورد ET_o بافرمولهای‌مختلف براساس رگرسیون تصیح نشده‌است.

۲ـ برآورد ET_o بافرمولهای‌مختلف، براساس اندازه‌گیری‌های لیسیمتری تصیح شده‌است.

۳- تمام آمارها، جز موارد ذکر شده، مربوط به‌داده‌های ماهانه کل دوره‌های اندازه‌گیری است.

جدول ۷ ـ ضریب رگرسیون (b)(۱) وضریب همبستگی (r) ET_o محاسبه شده ازطریق فرمولها و ETo اندازه‌گیری شده‌ازطریق لیسیمتر(۲) و (۳)

ایستگاه‌لیسیمتری	پنمن (۱۹۶۳)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۷۲)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۸۲)	پنمن‌اصلاح‌شده (FAO-24)	پنمن -مانتیس
Aspendale	b= ۰/۹۸ r= ۰/۹۹	b= ۰/۹۳ r= ۰/۹۹	b= ۰/۹۷ r= ۰/۹۸	b= ۰/۷۹ r= ۱/۰۰	b= ۱/۱۴ r= ۰/۹۹
Brawley	b= ۱/۰۵ r= ۰/۹۵	b= ۰/۹۹ r= ۰/۹۲	b= ۰/۹۹ r= ۰/۹۸	b= ۰/۸۹ r= ۰/۹۳	b= ۱/۰۱ r= ۰/۹۹
Copenhagen	b= ۰/۷۸ r= ۰/۹۹	b= ۰/۷۵ r= ۰/۹۹	b= ۰/۷۷ r= ۰/۹۹	b= ۰/۶۴ r= ۰/۹۹	b= ۰/۹۷ r= ۱/۰۱
Coshocton	b= ۰/۹۳ r= ۰/۹۷	b= ۰/۹۱ r= ۰/۹۳	b= ۰/۹۴ r= ۰/۹۸	b= ۰/۸۲ r= ۰/۹۷	b= ۰/۹۴ r= ۰/۹۹
Davis	b= ۰/۹۵ r= ۰/۹۹	b= ۰/۸۶ r= ۰/۹۸	b= ۰/۸۷ r= ۱/۰۰	b= ۰/۷۵ r= ۱/۰۰	b= ۰/۹۷ r= ۰/۹۹
Kimberly	b= ۱/۰۷ r= ۰/۹۵	b= ۰/۹۶ r= ۰/۸۳	b= ۰/۹۸ r= ۰/۹۹	b= ۰/۸۸ r= ۰/۹۲	b= ۱/۰۰ r= ۰/۹۹
Lompoc	b= ۰/۷۸ r= ۰/۹۸	b= ۰/۷۹ r= ۰/۹۶	b= ۰/۸۲ r= ۰/۹۶	b= ۰/۶۶ r= ۰/۹۸	b= ۰/۹۵ r= ۰/۹۷
Scotsbluff	b= ۱/۱۲ r= ۰/۹۷	b= ۱/۰۸ r= ۰/۹۸	b= ۱/۰۵ r= ۰/۹۸	b= ۰/۹۷ r= ۰/۹۶	b= ۰/۹۸ r= ۰/۹۸
Seabrook	b= ۰/۹۰ r= ۰/۹۸	b= ۰/۷۸ r= ۰/۹۵	b= ۰/۸۴ r= ۰/۹۹	b= ۰/۷۰ r= ۰/۹۷	b= ۰/۹۵ r= ۰/۹۷
South Park	b= ۱/۰۸ r= ۰/۳۱	b= ۱/۰۲ r= ۰/۴۱	b= ۱/۰۰ r= ۰/۵۱	b= ۰/۹۴ r= ۰/۴۰	b= ۱/۰۳ r= ۰/۸۳
Yangambi	b= ۱/۰۲ r= ۰/۸۶	b= ۱/۱۱ r= ۰/۸۷	b= ۱/۱۴ r= ۰/۷۶	b= ۰/۹۰ r= ۰/۸۶	b= ۱/۰۷ r= ۰/۸۷

ادامه جدول ۷ ـ ضریب رگرسیون (b)(۱) وضریب همبستگی (r) ET_o محاسبه شده ازطریق فرمولها و ETo اندازه‌گیری شده‌ازطریق لیسیمتر(۲) و (۳)

ایستگاه‌لیسیمتری	پنمن (۱۹۶۳)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۷۲)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۸۲)	پنمن‌اصلاح‌شده (FAO-۲۴)	پنمن -مانتیس
مناطق خشک	b= ۱/۰۴ r= ۰/۹۸	b= ۰/۹۶ r= ۰/۹۶	b= ۰/۹۸ r= ۰/۹۹	b= ۰/۸۶ r= ۰/۹۷	b= ۱/۰۱ r= ۰/۹۹
مناطق‌مرطوب	b= ۰/۸۸ r= ۰/۹۴	b= ۰/۸۵ r= ۰/۸۹	b= ۰/۸۹ r= ۰/۹۳	b= ۰/۷۳ r= ۰/۹۲	b= ۰/۹۸ r= ۰/۹۷
سایرمناطق	b= ۰/۹۹ r= ۰/۹۷	b= ۰/۹۳ r= ۰/۹۶	b= ۰/۹۵ r= ۰/۹۸	b= ۰/۸۲ r= ۰/۹۶	b= ۱/۰۰ r= ۰/۹۹
ماه‌حداکثرمصرف مناطق خشک	b= ۱/۱۲ r= ۰/۹۸	b= ۱/۰۴ r= ۰/۹۷	b= ۰/۹۸ r= ۰/۹۶	b= ۰/۹۰ r= ۰/۹۲	b= ۱/۰۴ r= ۰/۹۷
ماه‌حداکثرمصرف مناطق مرطوب	b= ۰/۹۱ r= ۰/۷۴	b= ۰/۹۱ r= ۰/۷۵	b= ۰/۸۸ r= ۰/۵۷	b= ۰/۷۴ r= ۰/۶۵	b= ۱/۰۲ r= ۰/۹۳
ماه‌حداکثرمصرف سایرمناطق	b= ۱/۰۷ r= ۰/۹۶	b= ۱/۰۳ r= ۰/۹۷	b= ۰/۹۶ r= ۰/۹۶	b= ۰/۸۶ r= ۰/۹۳	b= ۱/۰۳ r= ۰/۹۹

۱- ردیف بالا (b) ضریب رگرسیون نسبت به مبداء مختصات می‌باشد.

۲- تمام آمارها جز موارد ذکر شده ، مربوط به داده‌های ماهانه دوره‌های اندازه‌گیری است.

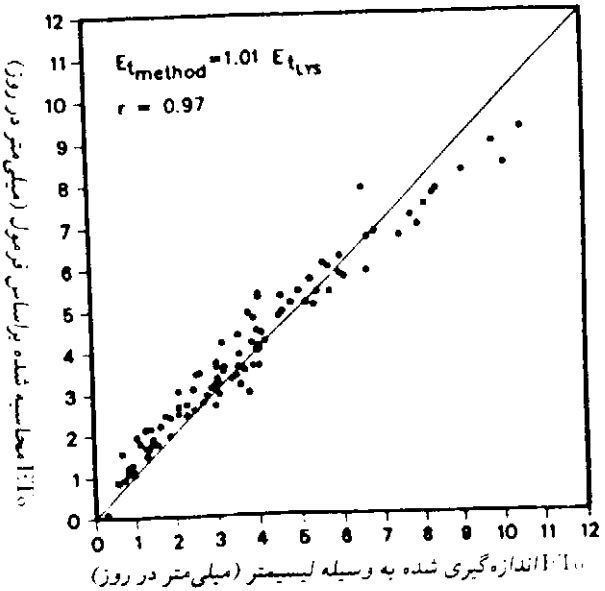
۳- ET_o برآورد شده‌ازطریق فرمول های مختلف براساس ET_o اندازه‌گیری شده ازطریق لیسیمتر، تصحیح و تنظیم شده ست.

جدول ۸ ـ خطای استاندارد برآورد ET_o با فرمولهای مختلف* برحسب میلیمتر در روز ومقایسه آن با ET_o اندازه‌گیری شده با لیسیمتر وبا استفاده ازمعادلات رگرسیون**

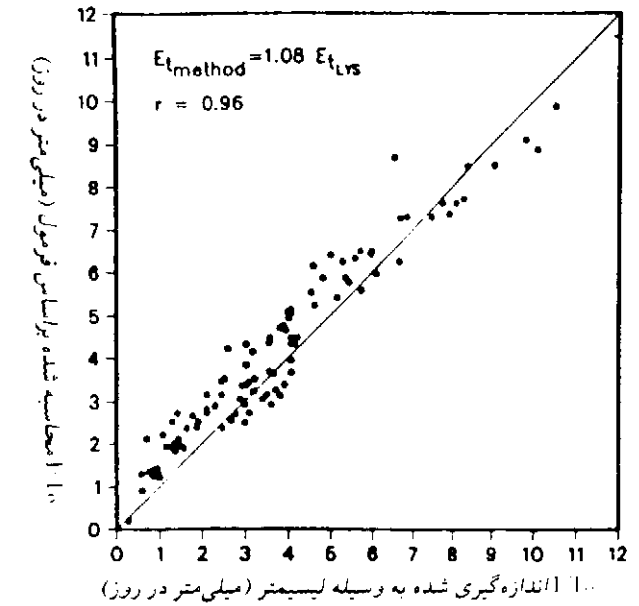
ایستگاه‌لیسیمتری	پنمن (۱۹۶۳)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۷۲)	کیمبرلی- پنمن (۱۹۸۲)	پنمن‌اصلاح‌شده (FAO-۲۴)	پنمن -مانتیس
Aspendale	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۴۳	۰/۲۳	۰/۳۲
Brawley	۰/۸۶	۱/۱۱	۰/۵۶	۰/۹۹	۰/۴۳
Copenhagen	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۰۹
Coshocton	۰/۳۱	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۱۴
Davis	۰/۳۰	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۳۲
Kimberly	۰/۵	۰/۸۵	۰/۲۱	۰/۵۹	۰/۲۵
Lompoc	۰/۲۴	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۲۴	۰/۲۹
Scotsbluff	۰/۶	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۶۷	۰/۴۹
Seabrook	۰/۳۹	۰/۵۹	۰/۲۸	۰/۴۴	۰/۴۴
South Park	۰/۵۳	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۲۳
Yangambi	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۳	۰/۲۳	۰/۲۳
مناطق خشک	۰/۵۴	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۶۸	۰/۴۱
مناطق مرطوب	۰/۴۱	۰/۵۶	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۳۰
سایرمناطق	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۴۹	۰/۶۵	۰/۳۶
ماه‌حداکثرمصرف مناطق خشک	۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۷۰	۱/۰۲	۰/۶۲
ماه‌حداکثرمصرف مناطق مرطوب	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۳۶
ماه‌حداکثرمصرف سایر مناطق	۰/۸۱	۰/۷۰	۰/۷۳	۱/۰۰	۰/۴۷

* – برآورد ET_o با فرمولها، نسبت به اندازه‌گیری ET_o با لیسیمتر تصحیح و تنظیم شده است.

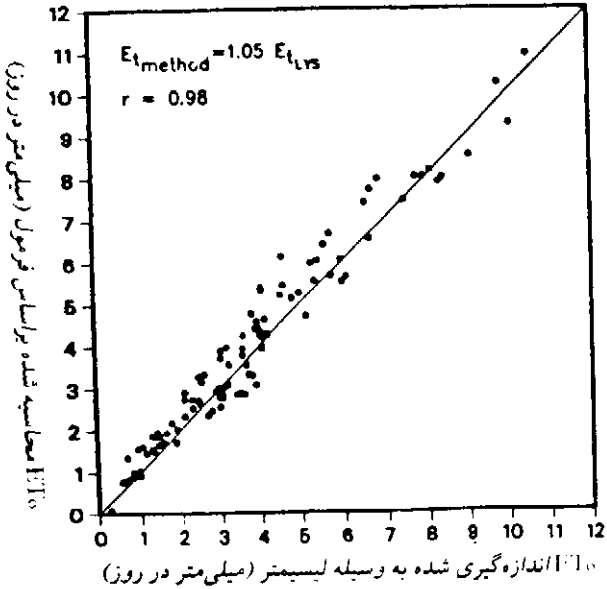
** – تمام آمارها، جز موارد ذکر شده، مربوط به داده‌های ماهانه کل دوره‌های اندازه‌گیری است.



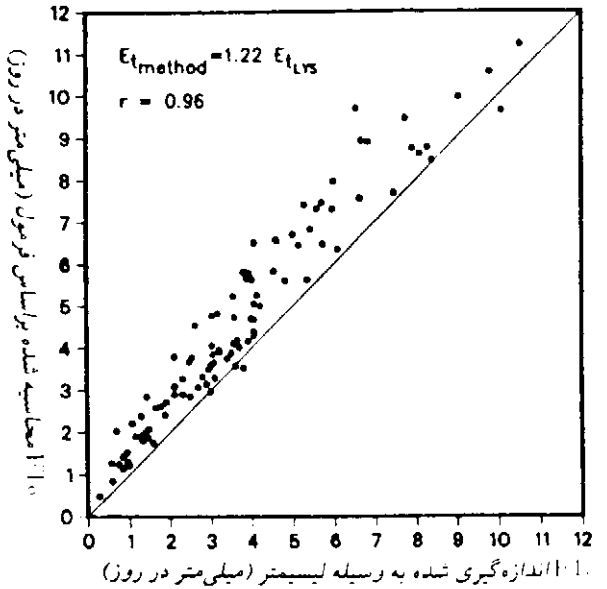
شکل ۱ – مقایسه ETo متوسط ماهانه، محاسبه شده براساس معادله پنمن (۱۹۶۳) با ETo متوسط ماهانه، اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری



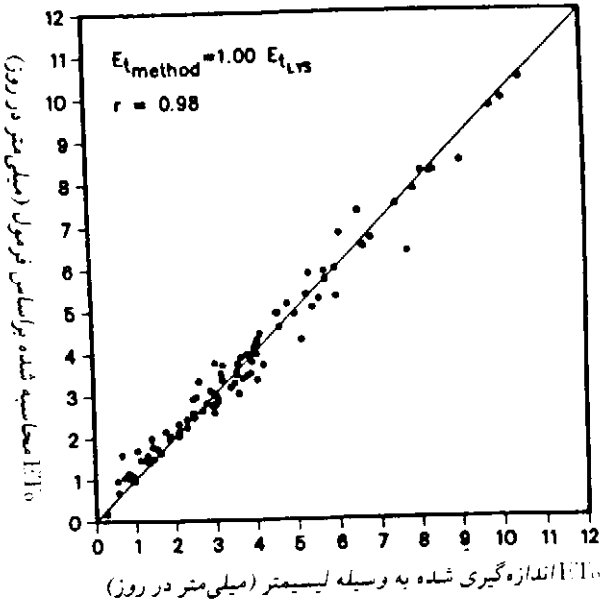
شکل ۲ – مقایسه ETo متوسط ماهانه محاسبه شده براساس معادله کمبرلی – پنمن (۱۹۷۲)، با متوسط ETo اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری



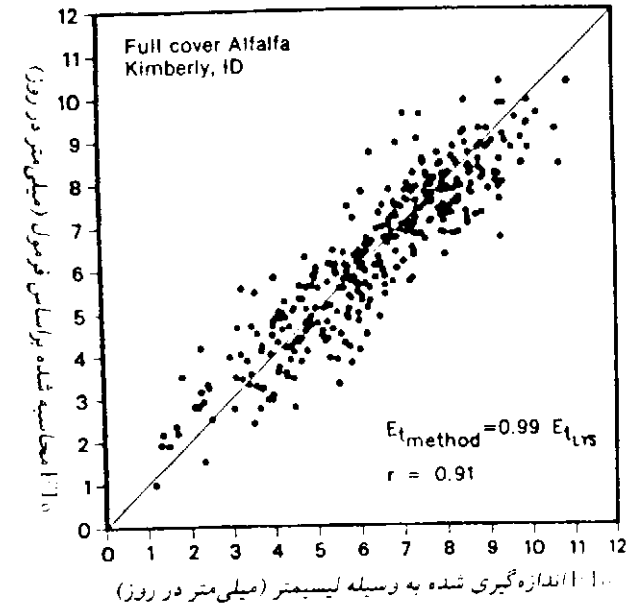
شکل ۳ - مقایسه ETo متوسط ماهانه، براساس معادله کمبرلی - پنمن (۱۹۸۲)، بامتوسط ETo اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری



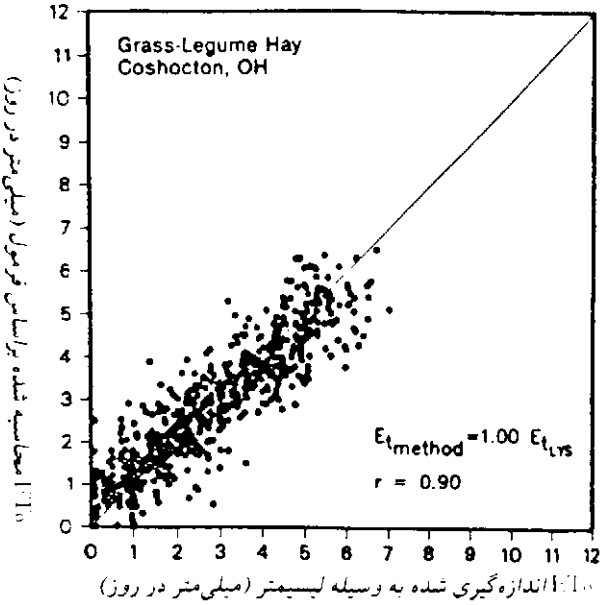
شکل ۴ - مقایسه متوسط ماهانه، محاسبه شده براساس معادله پنمن اصلاح شده FAO24 با متوسط ETo اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری



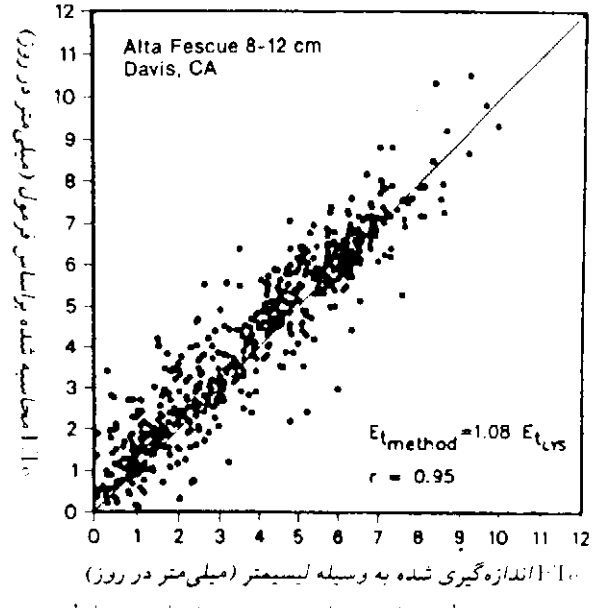
شکل ۵ - مقایسه ETo متوسط ماهانه محاسبه شده براساس معادله پنمن - مانتیس با متوسط ETo اندازه‌گیری شده در ۱۱ ایستگاه لیسیمتری



شکل ۶ - مقایسه ETo متوسط روزانه ، محاسبه شده براساس معادله پنمن - مانتیس با متوسط ETo اندازه‌گیری شده با لیسیمتر در منطقه کمبرلی



شکل ۷ - مقایسه ETo متوسط روزانه، محاسبه شده براساس معادله پنمن - مانتیس متوسط ETo اندازه‌گیری شده با لیسیمتر در منطقه Coshocton, oh



شکل ۸ - مقایسه ETo متوسط روزانه محاسبه شده براساس معادله پنمن - مانتیس با متوسط ETo اندازه‌گیری شده با لیسیمتر در منطقه دیویس

۵/۲ آخرین نتایج تحقیقات ارائه شده در کنفرانس بین‌المللی سان‌آنتونیوی تکزاس ۱۹۹۶

Evapotranspiration and Irrigation Scheduling.

Proceeding of the International confernce, November 3-6 1996.

San Antonio, Texas.

American society of Agricultural engineers the irrigation Association. The international comission on irrigation and drainage.

آخرین نتایج تحقیقات در رابطه با فرمول پنمن ـ مانتیس که درکنفرانس بین‌المللی سان‌آنتونیوی تکزاس، تحت عنوان «تبخیرتعرق‌وتنظیم تقویم‌آبیاری»، ازسوم تاششم نوامبر ۱۹۹۶ مطرح گردید تاییدی برکارآیی این روش، همخوانی‌وهماهنگی ارقام ET_0 بدست آمده ازطریق فرمول پنمن ـ مانتیس، با اندازه‌گیریهای لیسیمتری‌است.

درمقاله‌ای تحت عنوان «پیش‌بینی‌آب موردنیاز آبیاری‌گیاه نیشکر با استفاده ازفرمول پنمن ـ مانتیس» که توسط محققان مرکزتحقیقات نیشکر افریقای جنوبی ارائه‌گردیده:
(M. G. Mc Glinchey and N.G. Inman- Bamber)

گزارش شده‌است که درافریقای جنوبی برای برنامه‌ریزی‌آبیاری درکشت وصنعت نیشکر معمولا برای تعیین‌آب موردنیاز از روش تشتک تبخیر وضریب‌گیاهی استفاده می‌شود، ولی درسالهای اخیر برآورد آب مصرفی براساس روش پنمن ـ مانتیس، دقت کار را به‌طورقابل‌توجهی بالابرده‌است. آب موردنیاز روزانه نیشکر با استفاده از سه لیسیمتر وزنی (به‌ابعاد ۲/۱×۱/۵×۱/۴متر) وباتیمارهای لازم درپونگولا *(Pongola)* درشمال زولولند *(Zululand)* جهت مقایسه نتایج آن با داده‌های فرمول پنمن ـ مانتیس مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که بسیاررضایت‌بخش بود وهماهنگی لازم وبادقت کافی بین ارقام به‌دست آمده ازفرمول (پارامترهای لازم برای استفاده ازمعادله پنمن مانتیس به‌طور روزانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت) وارقام به‌دست آمده ازلیسیمتر برقرارگردید. به‌طوریکه ضریب همبستگی بین این دو $d = ۰/۹۵$ به‌دست آمد.

درمقاله‌ای تحت‌عنوان «برآورد تبخیر تعرق مرجع توسط فرمول پنمن ـ مانتیس درمناطق مدیترانه‌ای»، که نتیجه تحقیقات وهمکاری گروهی‌از محققان واساتید کشورهای

ایالات متحده امریکا (کالیفرنیا- دانشگاه دیویس) -ایتالیا -مصر -تونس -مراکش -الجزایر وترکیه بوده وبه‌کنفرانس ارائه گردید آمده‌است:

روش پنمن - مانتیس FAO *(FAO-PM)* در بسیاری از شرایط اقلیمی مختلف مقدار تبخیر تعرق (ET_0) را کمتر از دیگر روشها برآورد می‌کند. این روش در تمام دنیا برای برآورد تبخیر تعرق مرجع (روزانه) توسط آلن و همکارانش در سال *(AllEN et.al 1994)* توصیه شده‌است.

در مقاله‌ای تحت عنوان «تعیین‌ضریب مقاومت سطحی‌درمعادله پنمن مانتیس جهت برآورد تبخیرتعرق روزانه گیاه» که توسط اساتید دانشگاه ایالت واشنگتن ایالات متحده امریکا *(Claudio O. Stockle and jim kjel gaard)* ارایه شده، آمده است:

معادله پنمن- مانتیس برای برآورد تبخیرتعرق روزانه گیاه مرجع موفق بوده‌است، ولی‌اگر بخواهیم از فرمول به صورت مستقیم برای تعیین تبخیرتعرق پتانسیل محصولات مختلف ET_0 استفاده‌کنیم، تنها محدودیت فرمول مشخص نبودن ضریب مقاومت سطحی (T_s) این‌گیاهان‌است.

درمقاله‌ای تحت‌عنوان «ارزیابی معادلات مختلف تبخیر تعرق برای تگزاس و مکزیک» که توسط اساتید دانشگاه‌های ایالات متحده امریکا:

(Joseph C. Henggeler, Zohrab samani, Michael S. Flynn and Jon W.Zeitler).

ارایه گردیده است:

برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع توسط معادلات مختلف وبااستفاده از اطلاعات اقلیمی برای چهار منطقه در تگزاس انجام‌گردید. در این تحقیق بهترین فرمول از نظر تطابق بیشتر با داده‌های لیسیمتری فرمول پنمن- مانتیس بوده و معادلات پنمن وپنمن‌کمبرلی در درجه دوم اهمیت قرار داشت و معادلات هارگریوز- سامانی و بلانی‌کریدل *FAO* تشتک تبخیر *FAO* وپنمن *FAO* نتایج بسیارضعیفی به‌دست دادند.

معادله پنمن- مانتیس به‌عنوان استانداردی جهت محاسبه تبخیرتعرق مرجع به‌کار می‌رود و معادله هارگریوز- سامانی نیز بعد از معادله پنمن- مانتیس داری اعتبار خوبی جهت برآورد تبخیرتعرق مرجع به‌حساب می‌آید.

در مقاله‌ای تحت عنوان «استفاده ازمعادله پنمن- مانتیس برای‌اقلیم نیمه‌خشک در

جنوب‌غربی اسپانیا» که توسط محققان و اساتید اسپانیا و دانشگاه یوتا در ایالات متحده امریکا (*J. Javier Baselga and Richard G. Allen*) ارایه شده، آمده است :

هدف از ارائه این مقاله معرفی بهترین روش جهت برآورد تبخیر تعرق مرجع درمنطقه نیمه‌خشک جنوب غربی اسپانیا بوده‌است. روش پنمن ـ مانتیس برای پیش‌بینی وبرآورد تبخیر تعرق حقیقی درفواصل بیست‌دقیقه‌ای حتی در روزهایی‌که خاک (قبل‌ازآبیاری) با تنش رطوبتی همراه بوده ویا بعدازآبیاری (که خاک دارای رطوبت کافی بوده‌است) مناسب می‌باشد.

بیشتر روشها نتایج خوبی را ارائه می‌دهند لیکن تنها روش پنمن ـ مانتیس است که درمواقع روبروشدن خاک باکمبود تنش رطوبتی جواب خوبی ارائه می‌دهد.

در مقاله دیگری که توسط اساتید دانشگاههای پرتقال وفرانسه

Isabel Alves, Alain Perrier and Luis S. Pereira)

ارایه شده است، در رابطه با برآورد مقاومت آئرودینامیکی (مقاومت هوا) ومقاومت سطح برگ در رابطه با تبادلات آبی و حرارتی، روش سطح معادل *Big Laaf* در رابطه بامحاسبه یک مرحله‌ای ET_0 با روش پنمن‌مانتیس پیشنهاد ومورد بحث قرارگرفته‌است.

۵/۳ آخرین تحقیقات ارائه شده به سمینار سراسری ابیاری و کاهش تبخیر-ایران ۱۳۷۵:

در ششمین سمینار سراسری، تحت عنوان «آبیاری وکاهش تبخیر» که‌ازدهم تا یازدهم شهریورماه ۱۳۷۵ در کرمان تشکیل شد مقاله و زینی تحت عنوان «تخمین تبخیرتعرق یونجه وکنجد به‌روش پنمن ـ مانتیت در منطقه باجگاه» توسط آقای دکترعلیرضا سپاسخواه استاد بخش آبیاری دانشگاه شیراز وآقای مهندس اکبر محمدی محمدآبادی کارشناس ارشد موسسه تحقیقات پسته رفسنجان ارائه گردید که درآن گفته می‌شود: «نتایج آخرین پژوهشهای‌انجام شده نشان دادکه بین‌معادله‌های تجربی ونیمه‌تجربی موجود برای تخمین تبخیرتعرق گیاهان زراعی بهترین روش فرمول پنمن‌مانتیت می‌باشد....» دراین پژوهش با استفاده از داده‌های تبخیر تعرق یونجه وکنجد روابط بین‌ارتفاع گیاه و نمایهٔ سطح برگ (شاخص سطح برگ LAI) گیاه در معادله پنمن- مانتیس اصلاح شده‌است وبدین‌ترتیب تخمین دقیق‌تری از تبخیر تعرق گیاهان مذکور بدون استفاده از ضریب گیاهی حاصل گردیده‌است.

داده‌های این‌تحقیق نشان می‌دهد که با داشتن ارتفاع گیاه یونجه ویا کنجد در مراحل مختلف رشد ومقادیر روزانه داده‌های هواشناسی می‌توان از روش پنمن- مانتیس اصلاح شده مقدار روزانه تبخیرتعرق گیاهان مذکور را بدون‌نیاز به‌ضرایب گیاهی، بادقت بیشتری برآورد نموده ولذا توصیه شده‌است درپژوهشهای مربوط به‌تعیین تبخیر تعرق‌گیاهان زراعی ارتفاع گیاه به‌همراه شاخص سطح برگ LAI درمراحل مختلف رشد تعیین‌گردد تا به‌کمک آن بتوان معادلات مناسب تری برای گیاهان مختلف درمناطق مختلف آب وهوایی ارایه داد. در این تحقیق محققان روابط زیر را درباجگاه به‌ترتیب برای یونجه وکنجد که نشان‌دهنده رابطه شاخص سطح برگ با ارتفاع گیاه h_c است به قرار زیر ارائه داده‌اند.

$$LAI = ۰/۵۱۱ + ۸/۹۲۳ \times ۱۰^{-۳}(hc) + ۲/۶۰۸ \times ۱۰^{-۵}(hc)^{۲} + ۱/۹۲ \times ۱۰^{-۷} EXP(h_c)$$

و برای کنجد رابطه بین‌شاخص سطح برگ وارتفاع به‌قرار زیربه‌دست آمده‌است:

$$LAI = ۲/۱۱_{n}(h_{c}) - ۱/۲$$

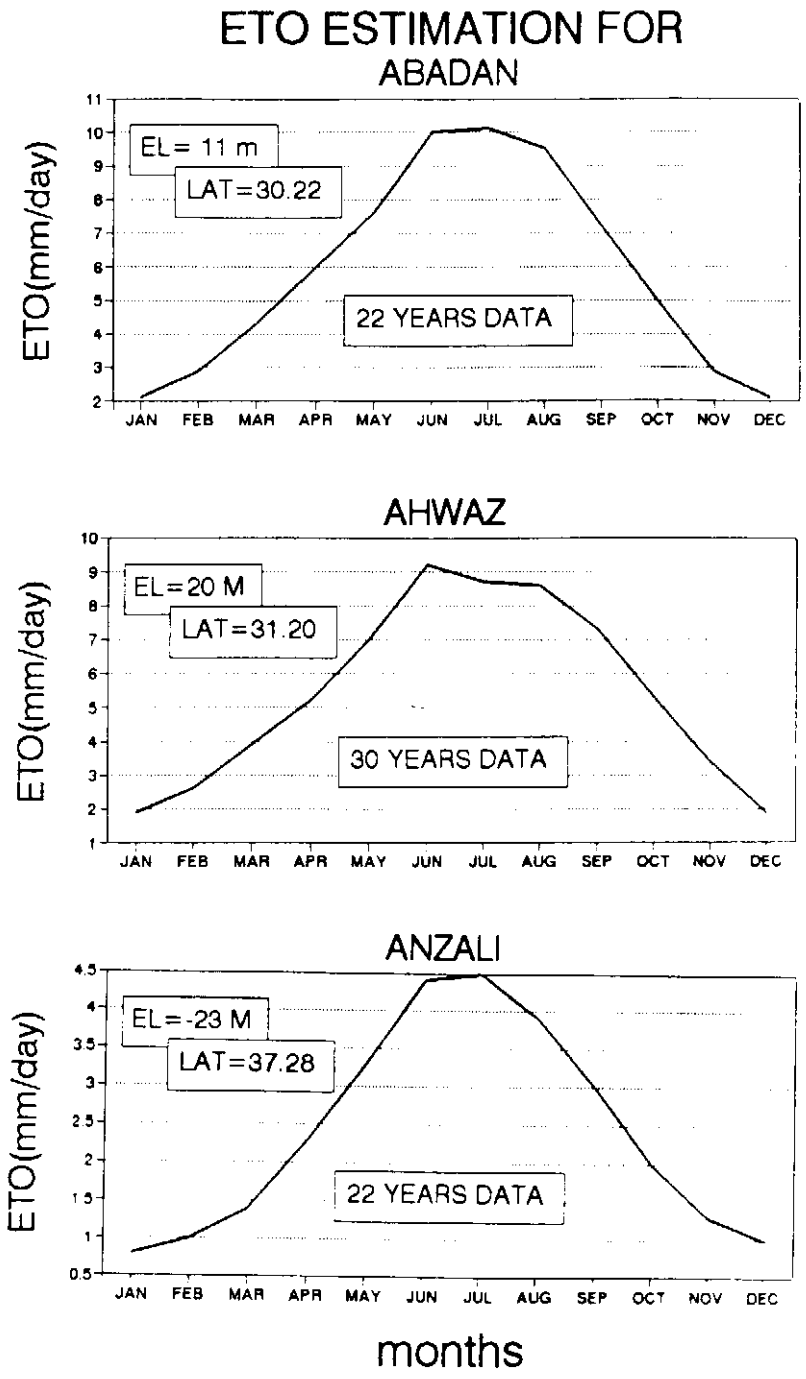
نظربه‌اینکه نمایه سطح برگ کنجد پس‌از ثابت شدن ارتفاع گیاه، دراثر زرد شدن برگ های زیرین کاهش می‌یابد لذا رابطه زیر برای نشان دادن کاهش نمایه سطح با شماره روزه‌های دوران رشد گیاه *(J)* ارائه شده‌است:

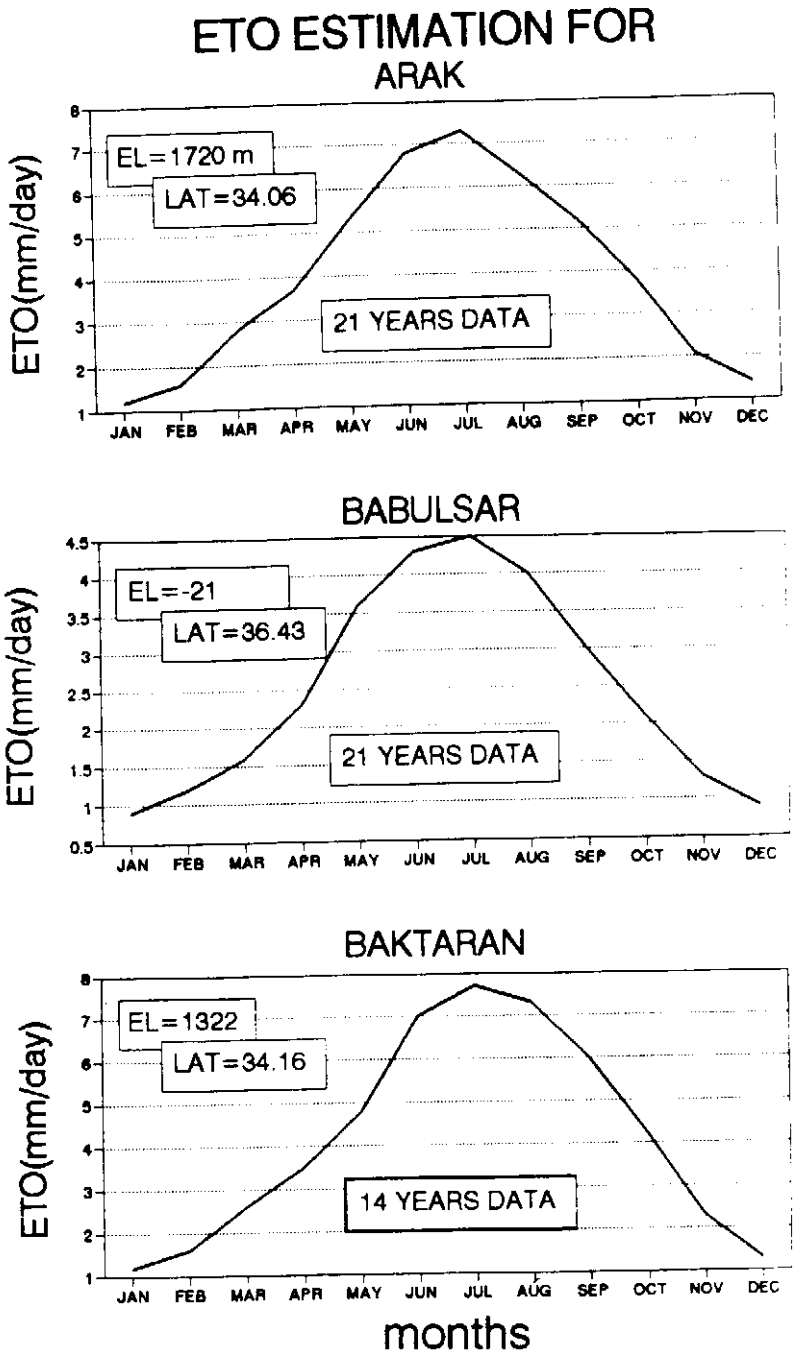
$$LAI = ۸۰/۵ - ۰/۲۷۵\ (J)$$

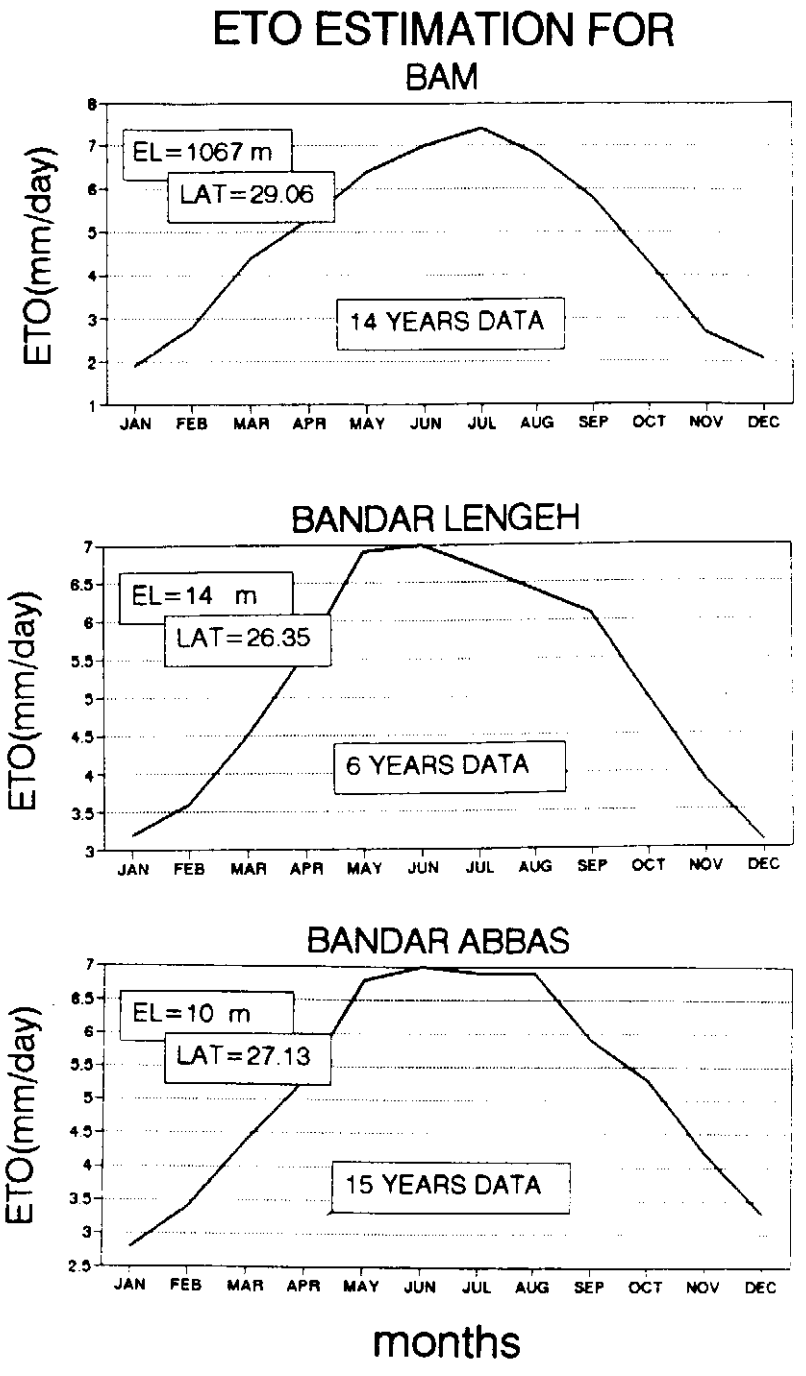
٦ - ارایه ارقام تبخیر تعرق استاندارد ET_0، براساس فرمول پنمن‌مانتیس برای ایستگاههای پرآمار ایران

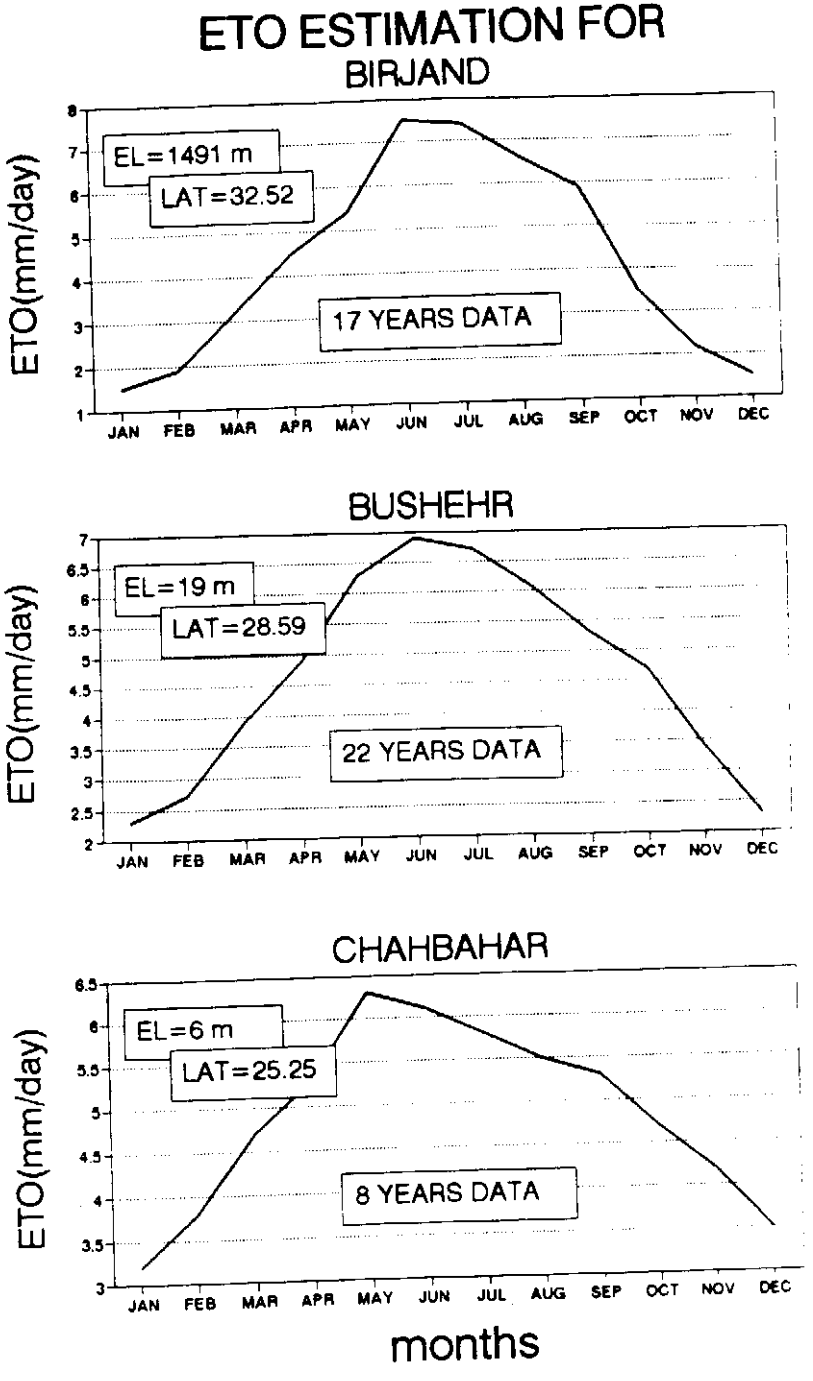
۶/۱- ارایه ET_0 به صورت جدول برای ماه‌های مختلف

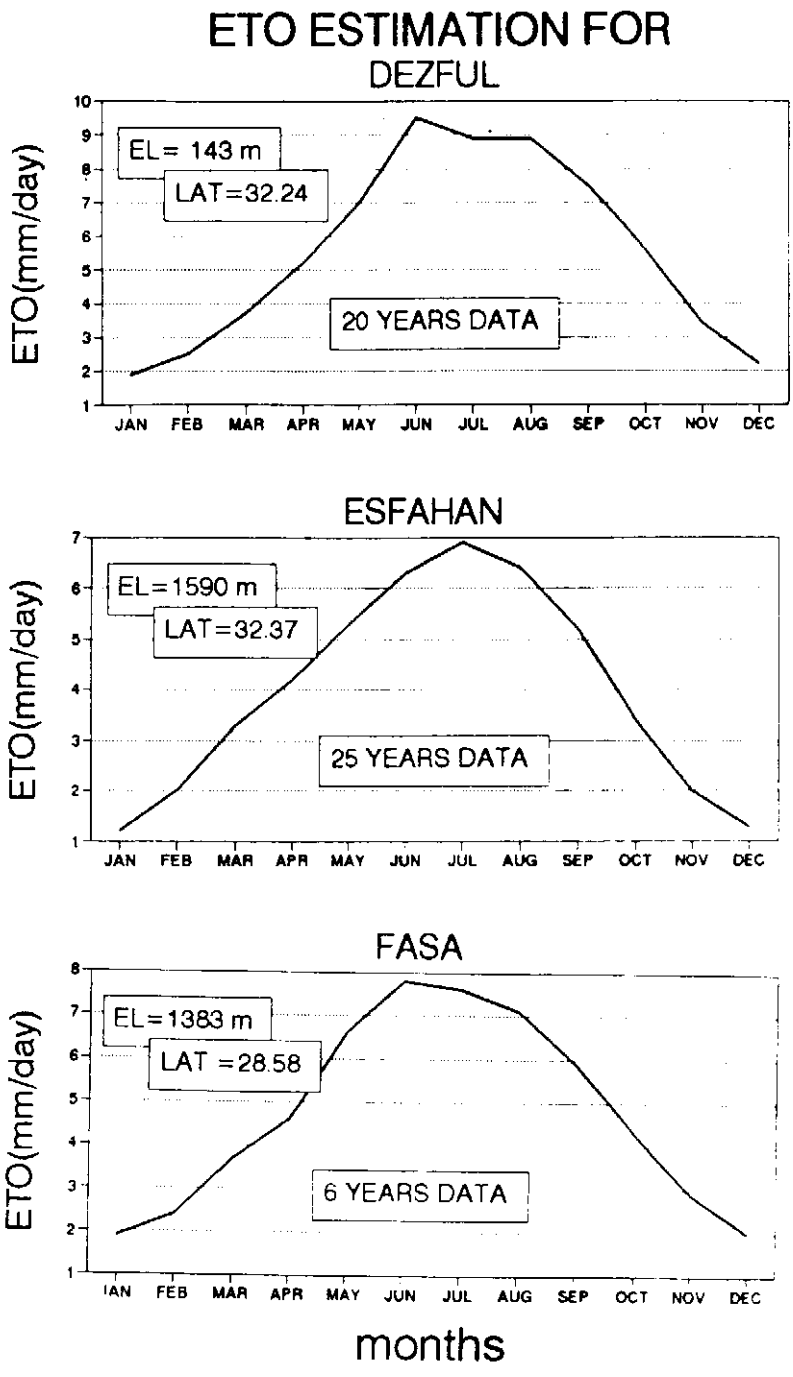
۶/۲- ارایه ET_0 به صورت منحنی، برای ماه‌های مختلف

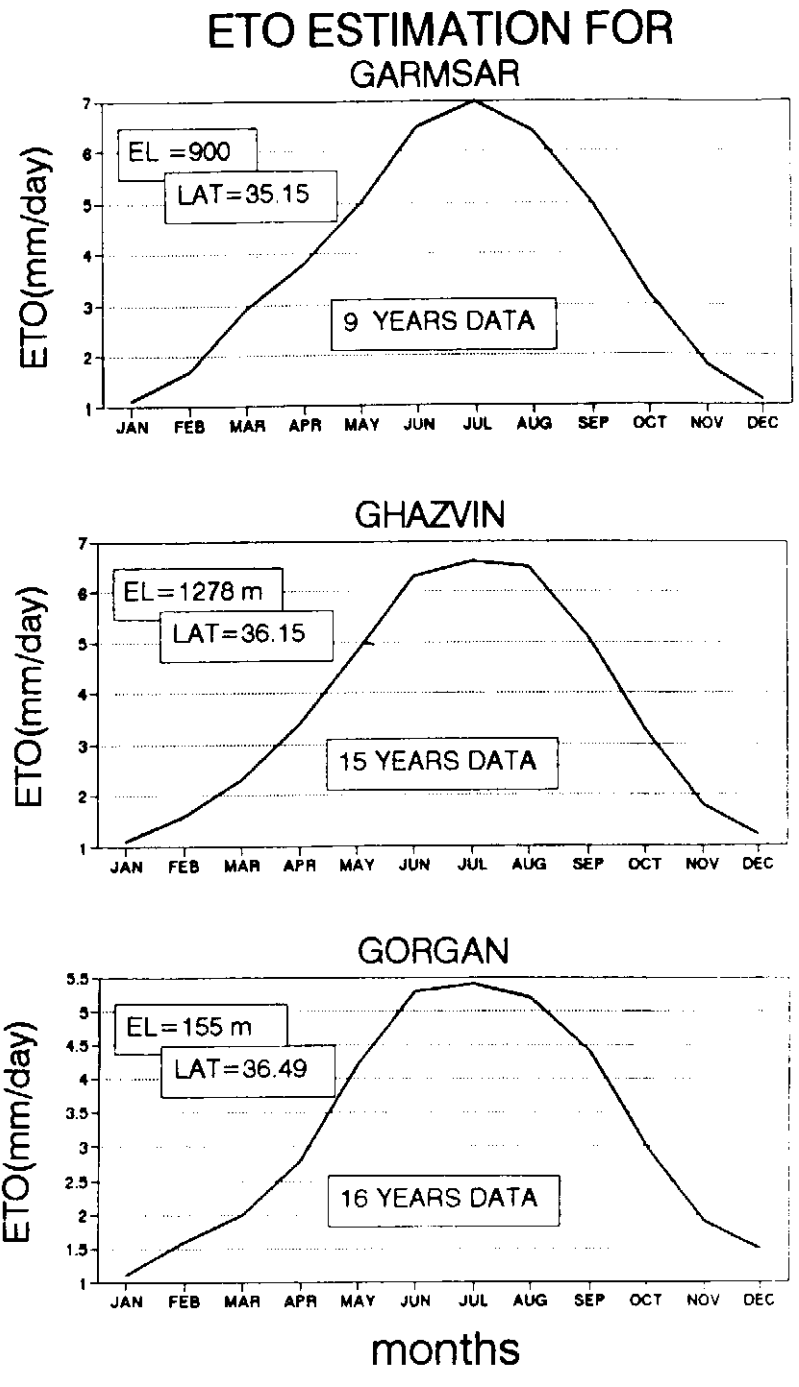

ETO ESTIMATION FOR
ABADAN
ETO(mm/day)
EL= 11 m
LAT=30.22
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
AHWAZ
ETO(mm/day)
EL=20 M
LAT=31.20
30 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
ANZALI
ETO(mm/day)
EL=-23 M
LAT=37.28
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

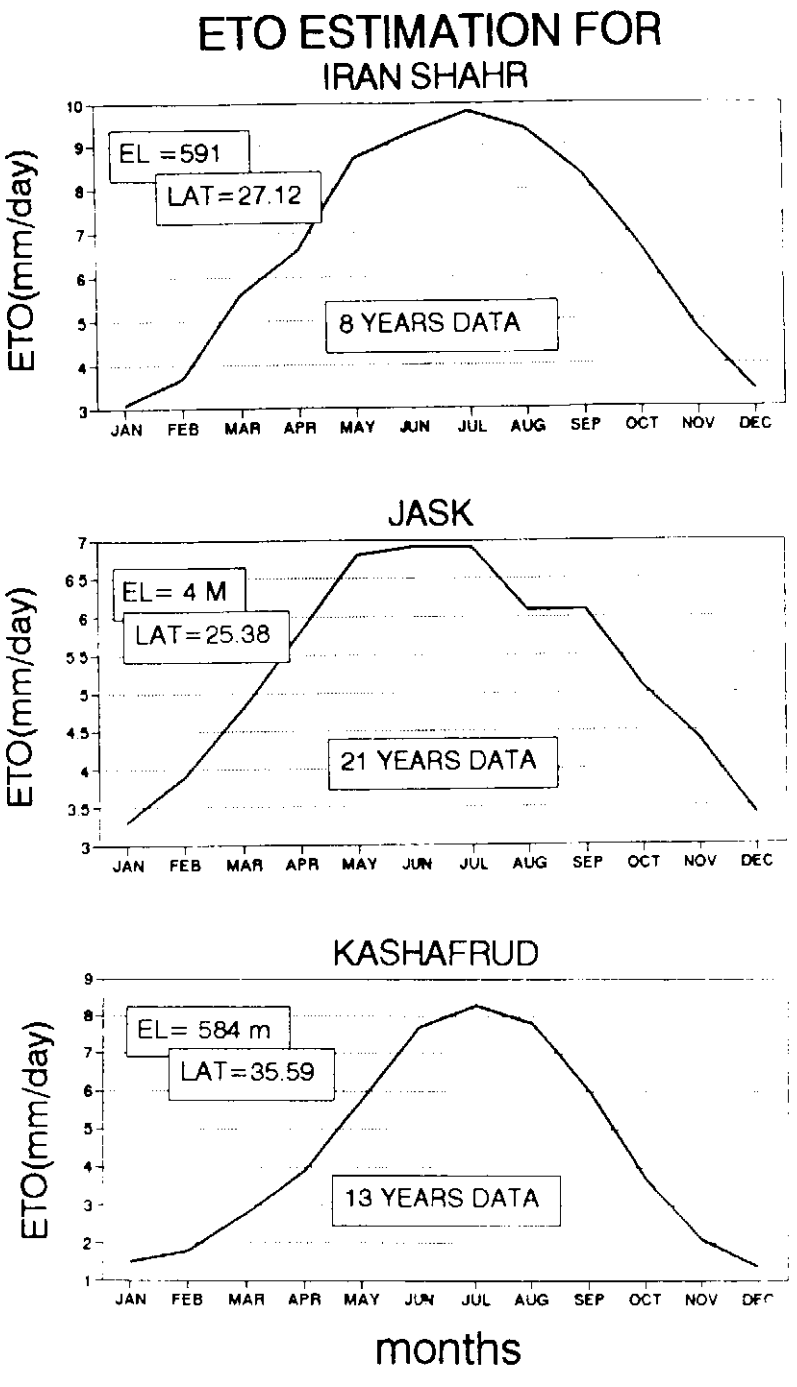

ETO ESTIMATION FOR
ARAK
ETO(mm/day)
EL=1720 m
LAT=34.06
21 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
BABULSAR
ETO(mm/day)
EL=-21
LAT=36.43
21 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
BAKTARAN
ETO(mm/day)
EL=1322
LAT=34.16
14 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

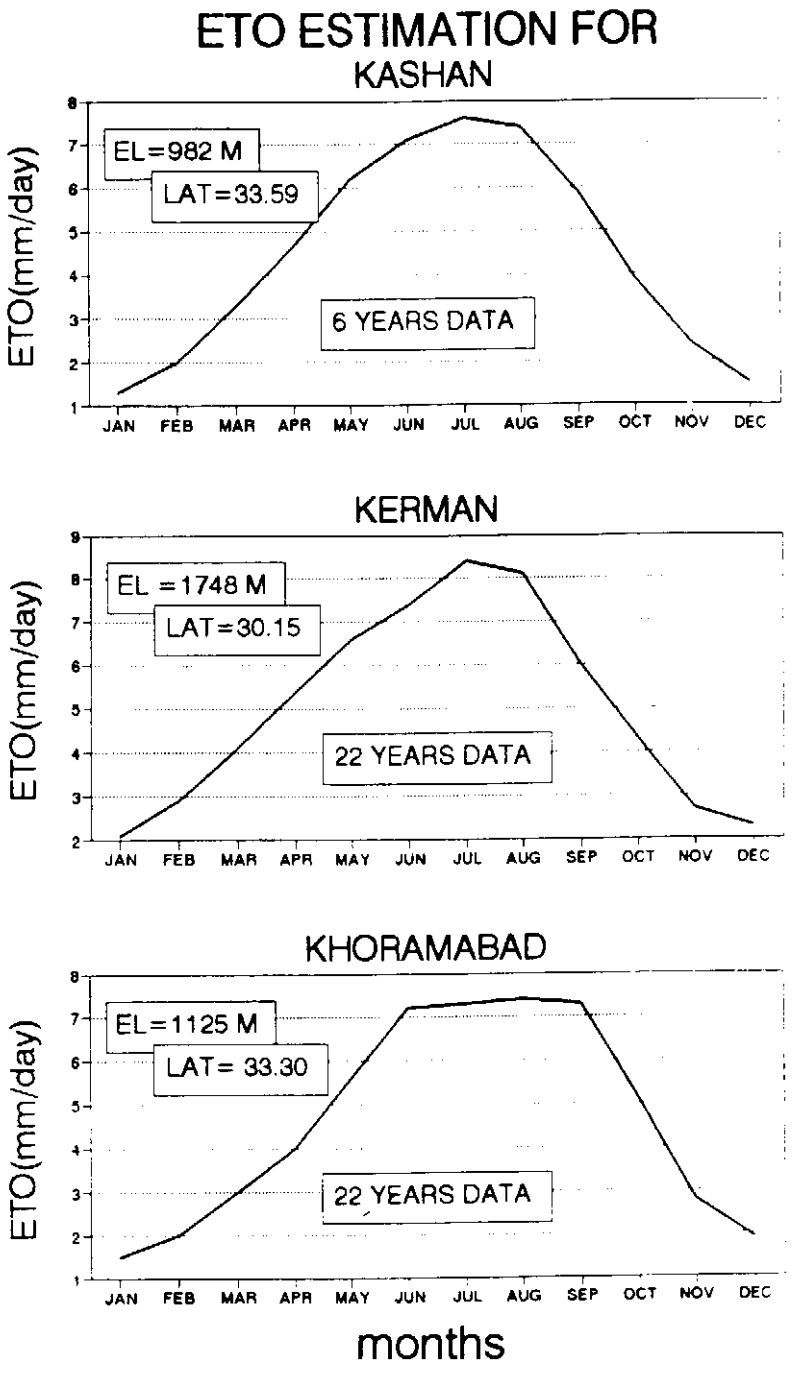

ETO ESTIMATION FOR
BAM
EL=1067 m
LAT=29.06
14 YEARS DATA
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
BANDAR LENGEH
EL=14 m
LAT=26.35
6 YEARS DATA
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
BANDAR ABBAS
EL=10 m
LAT=27.13
15 YEARS DATA
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

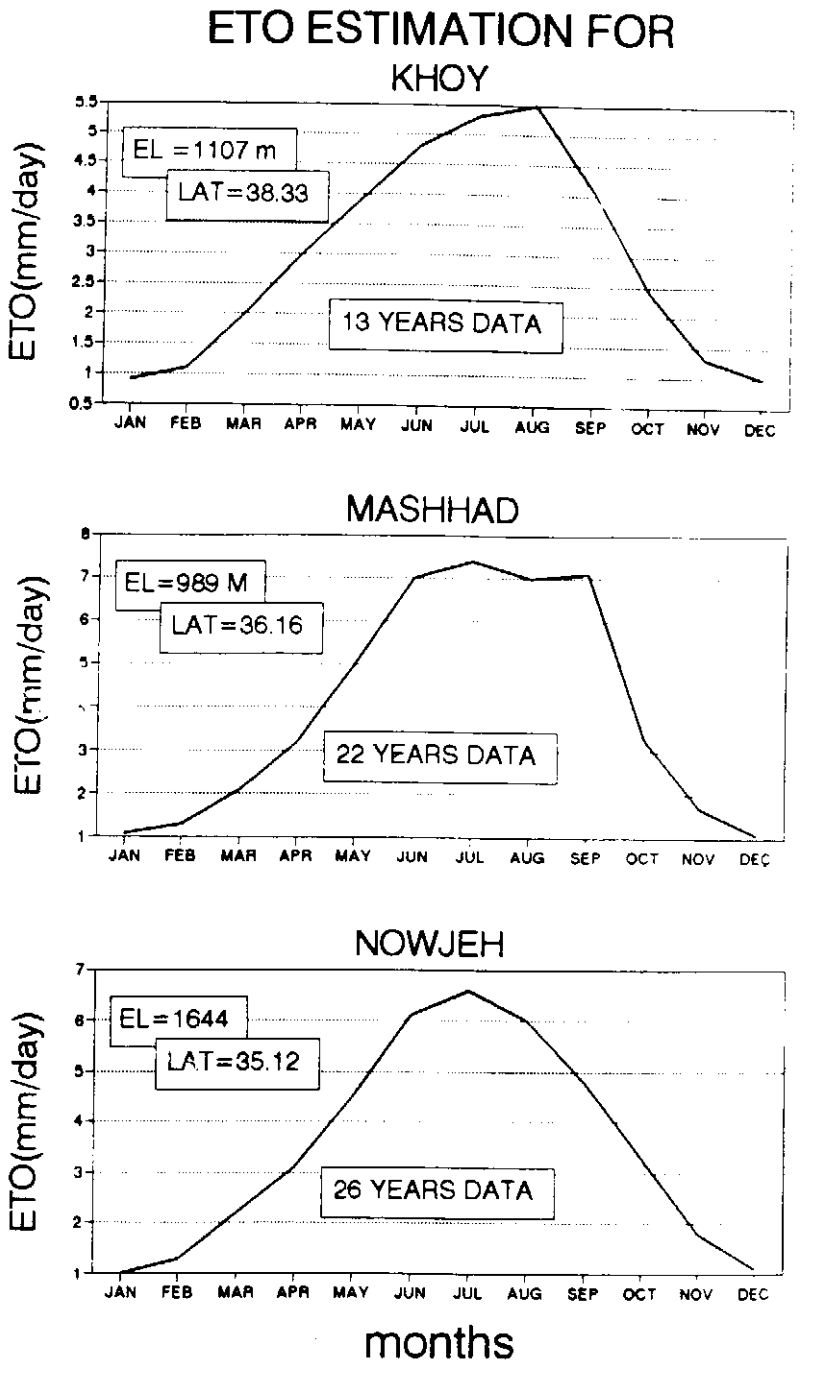

ETO ESTIMATION FOR
BIRJAND
ETO(mm/day)
EL=1491 m
LAT=32.52
17 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
BUSHEHR
ETO(mm/day)
EL=19 m
LAT=28.59
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
CHAHBAHAR
ETO(mm/day)
EL=6 m
LAT=25.25
8 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

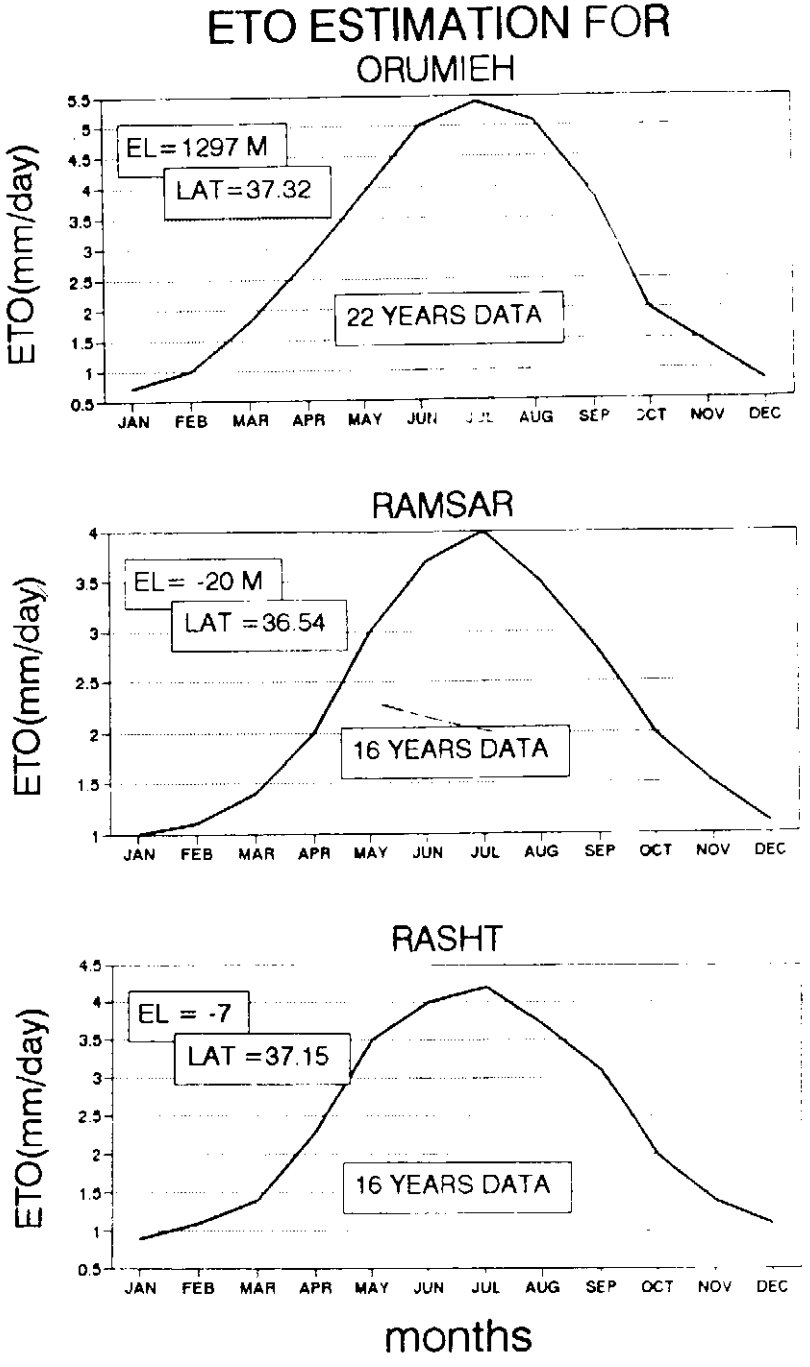

ETO ESTIMATION FOR
DEZFUL
ETO(mm/day)
EL= 143 m
LAT=32.24
20 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
ESFAHAN
ETO(mm/day)
EL=1590 m
LAT=32.37
25 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
FASA
ETO(mm/day)
EL=1383 m
LAT =28.58
6 YEARS DATA
IAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

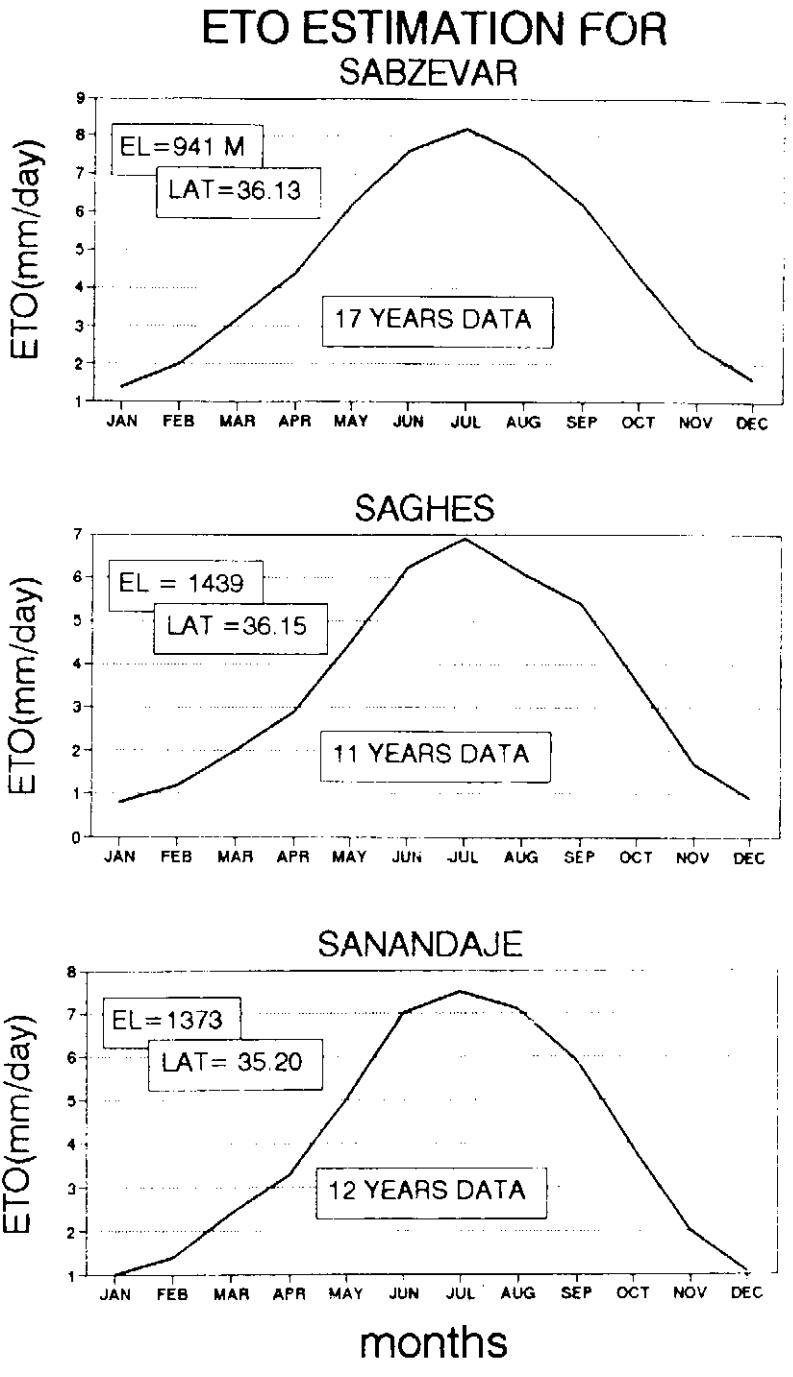

ETO ESTIMATION FOR
GARMSAR
EL =900
LAT=35.15
9 YEARS DATA
ETO(mm/day)
GHAZVIN
EL=1278 m
LAT=36.15
15 YEARS DATA
ETO(mm/day)
GORGAN
EL=155 m
LAT=36.49
16 YEARS DATA
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

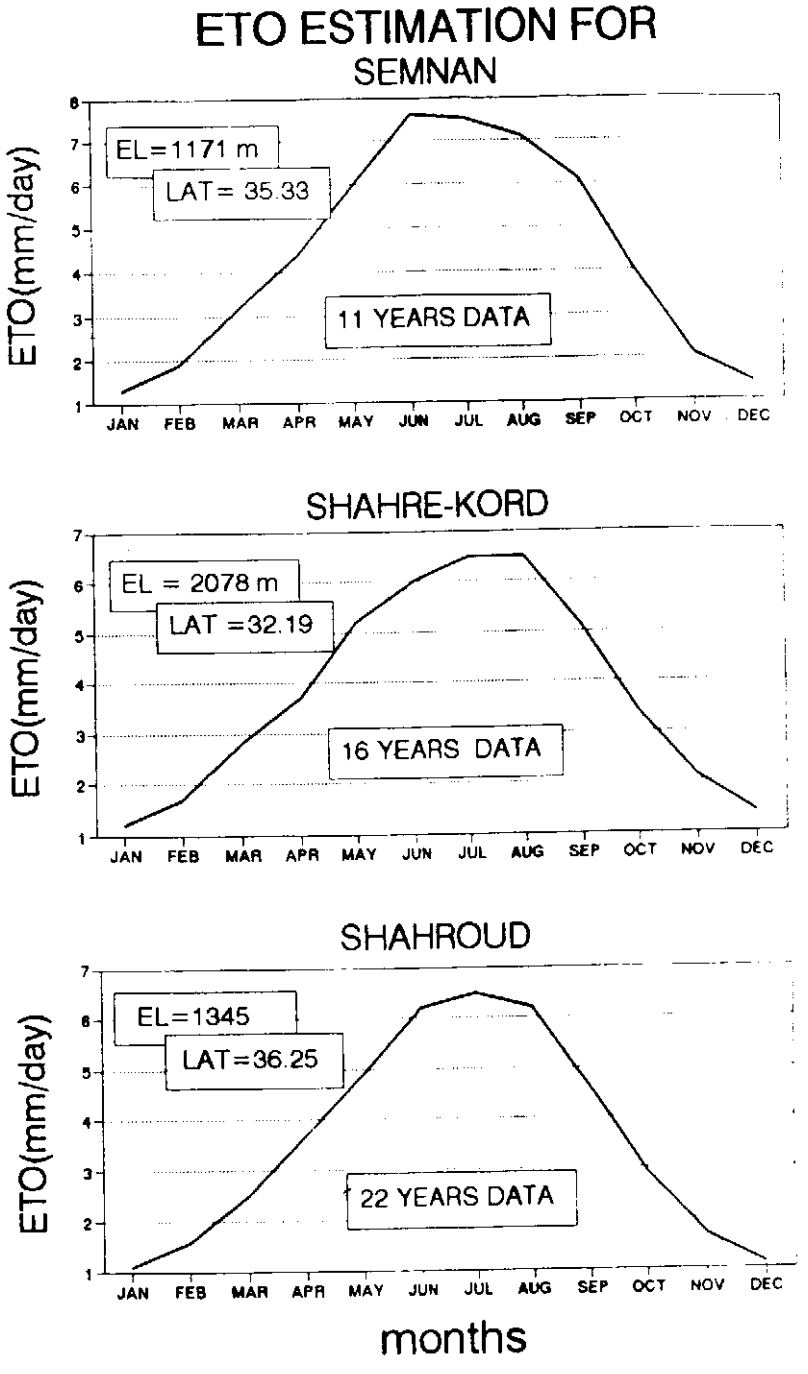

ETO ESTIMATION FOR
IRAN SHAHR
ETO(mm/day)
EL =591
LAT=27.12
8 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
JASK
ETO(mm/day)
EL= 4 M
LAT=25.38
21 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
KASHAFRUD
ETO(mm/day)
EL= 584 m
LAT=35.59
13 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

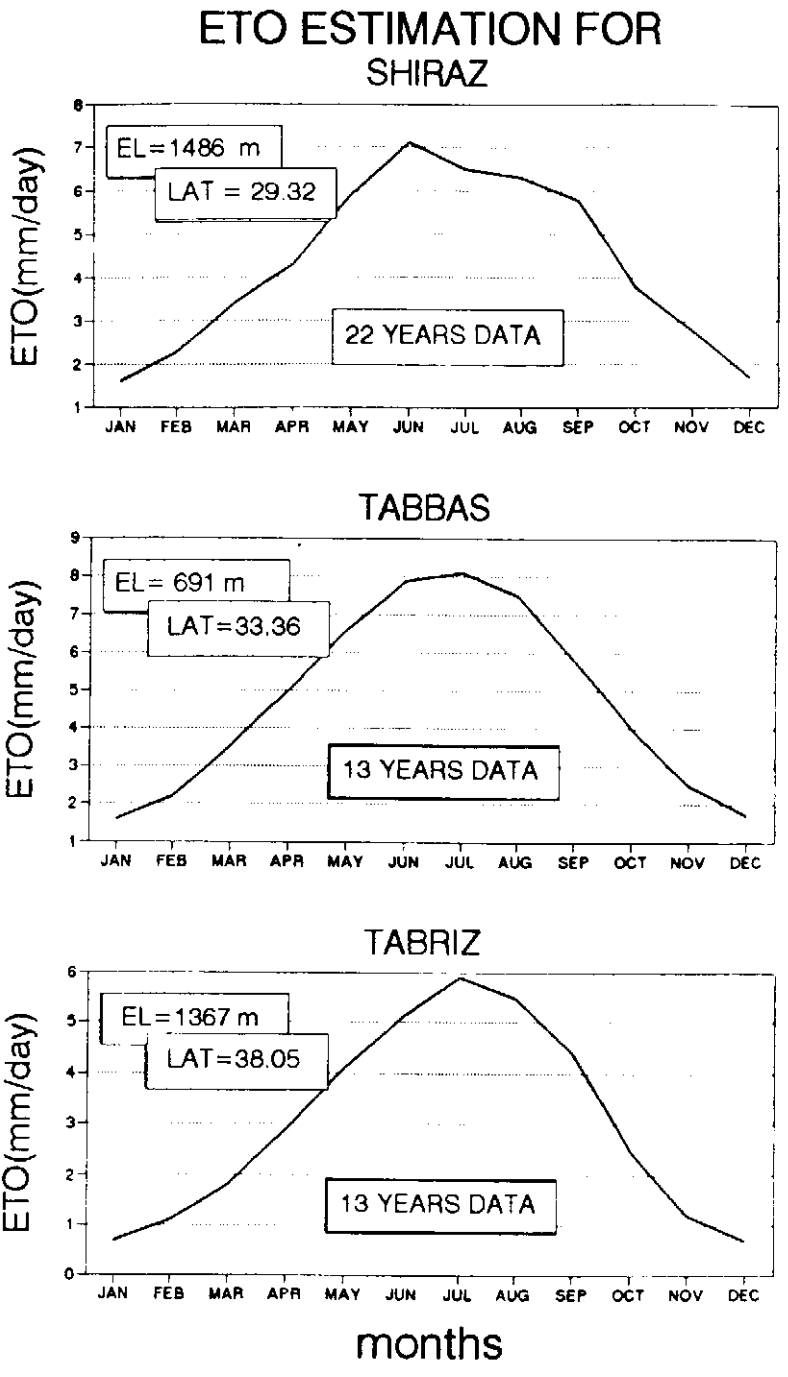

ETO ESTIMATION FOR
KASHAN
ETO(mm/day)
EL=982 M
LAT=33.59
6 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
KERMAN
ETO(mm/day)
EL =1748 M
LAT=30.15
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
KHORAMABAD
ETO(mm/day)
EL=1125 M
LAT= 33.30
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

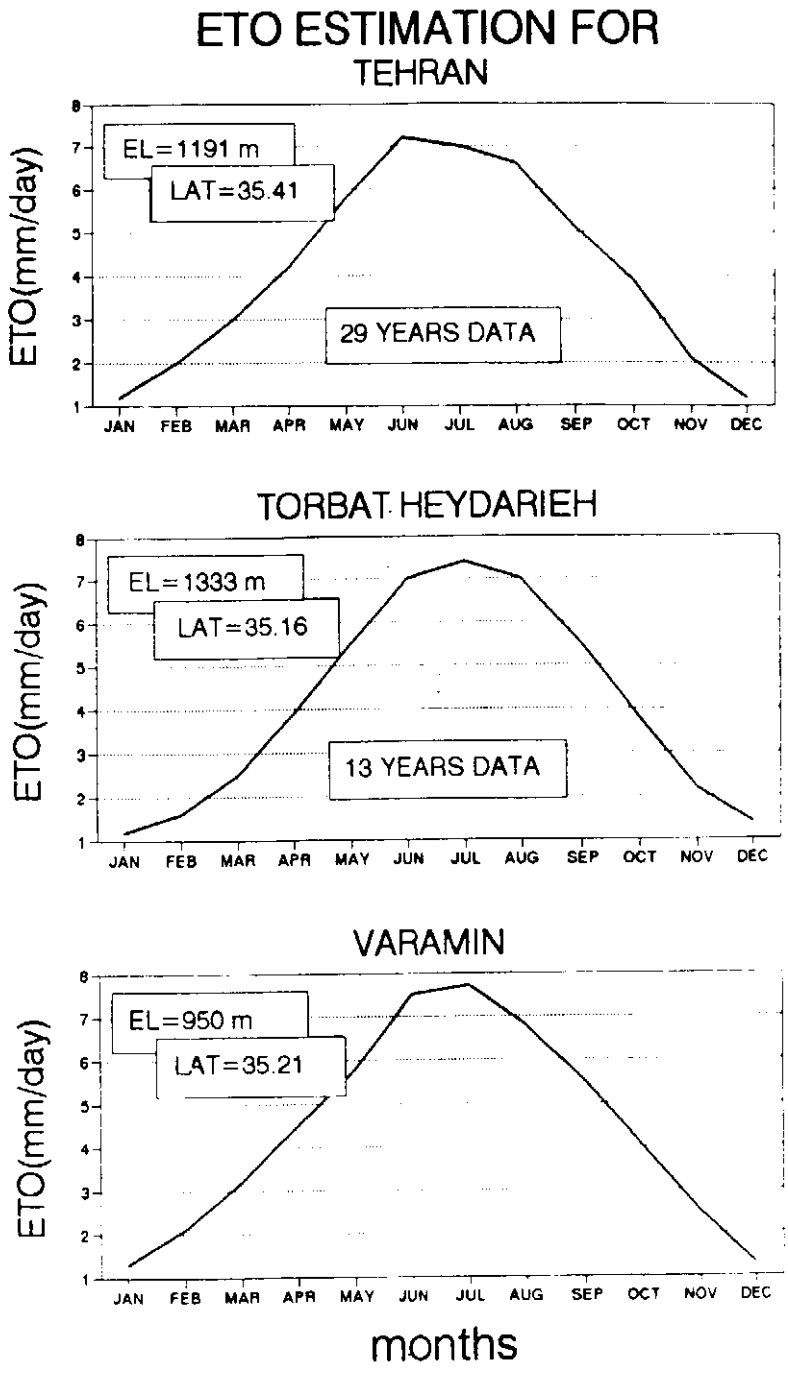

ETO ESTIMATION FOR
KHOY
ETO(mm/day)
EL =1107 m
LAT=38.33
13 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
MASHHAD
ETO(mm/day)
EL=989 M
LAT=36.16
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
NOWJEH
ETO(mm/day)
EL=1644
LAT=35.12
26 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

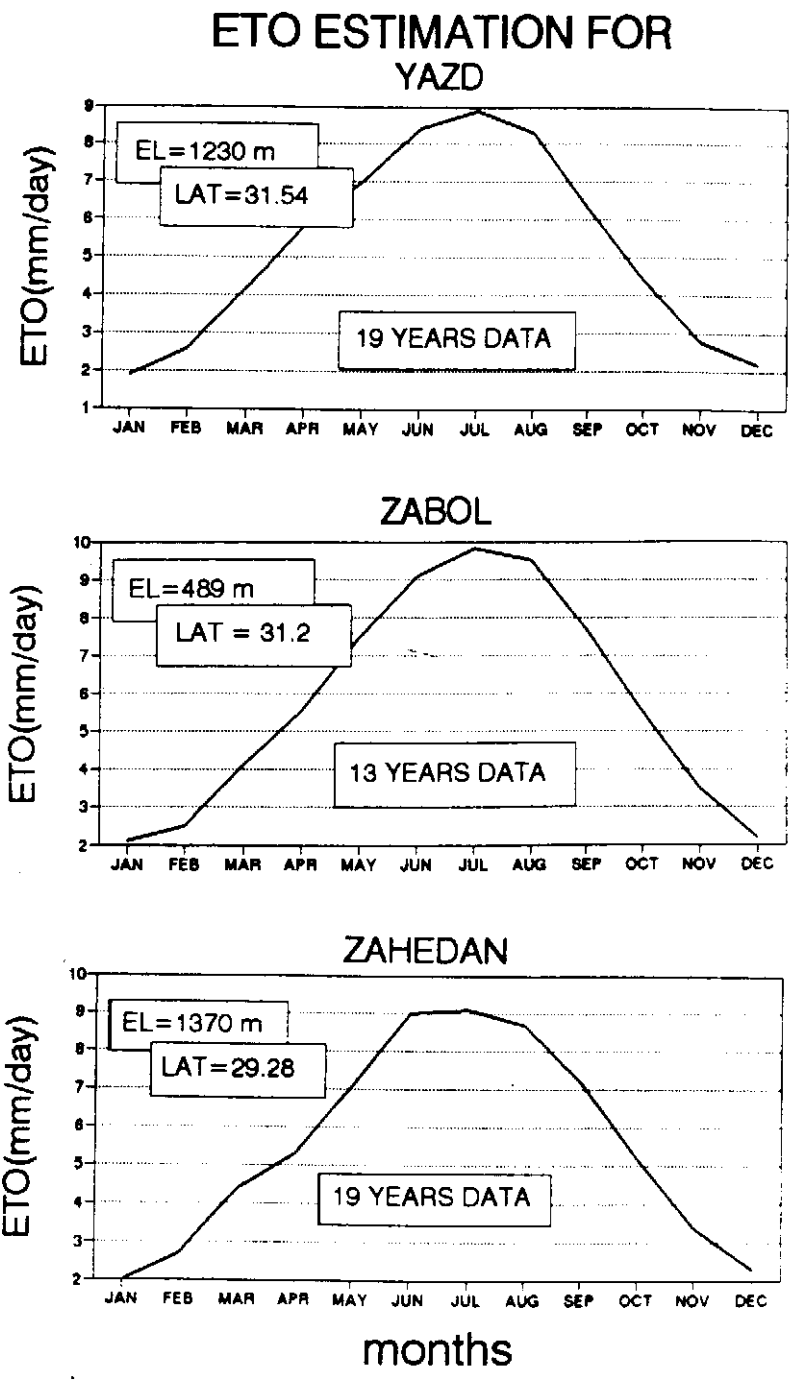

ETO ESTIMATION FOR
ORUMIEH
ETO(mm/day)
EL=1297 M
LAT=37.32
22 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
RAMSAR
ETO(mm/day)
EL= -20 M
LAT =36.54
16 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
RASHT
ETO(mm/day)
EL = -7
LAT =37.15
16 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months

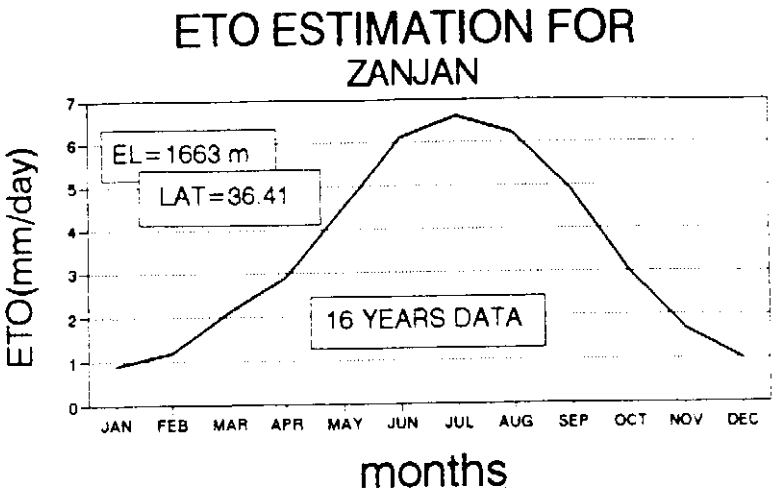

ETO ESTIMATION FOR
SABZEVAR
ETO(mm/day)
EL=941 M
LAT=36.13
17 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
SAGHES
ETO(mm/day)
EL = 1439
LAT =36.15
11 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
SANANDAJE
ETO(mm/day)
EL=1373
LAT= 35.20
12 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months


ETO ESTIMATION FOR
SEMNAN
EL=1171 m
LAT= 35.33
11 YEARS DATA
ETO(mm/day)
SHAHRE-KORD
EL = 2078 m
LAT =32.19
16 YEARS DATA
ETO(mm/day)
SHAHROUD
EL=1345
LAT=36.25
22 YEARS DATA
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months


ETO ESTIMATION FOR
SHIRAZ
EL=1486 m
LAT = 29.32
22 YEARS DATA
ETO(mm/day)
TABBAS
EL= 691 m
LAT=33.36
13 YEARS DATA
ETO(mm/day)
TABRIZ
EL=1367 m
LAT=38.05
13 YEARS DATA
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months


ETO ESTIMATION FOR
TEHRAN
EL=1191 m
LAT=35.41
29 YEARS DATA
TORBAT HEYDARIEH
EL=1333 m
LAT=35.16
13 YEARS DATA
VARAMIN
EL=950 m
LAT=35.21
ETO(mm/day)
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months


ETO ESTIMATION FOR
YAZD
ETO(mm/day)
EL=1230 m
LAT=31.54
19 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
ZABOL
ETO(mm/day)
EL=489 m
LAT = 31.2
13 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
ZAHEDAN
ETO(mm/day)
EL=1370 m
LAT=29.28
19 YEARS DATA
JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC
months



یادآوری: منحنی‌ها در ایستگاههای اهواز، بندر عباس، دزفول، جاسک و مشهد (که چهار ایستگاه دارای اقلیم گرم و خشک است) از خود ناهنجاری‌هایی نشان می‌دهند که توضیح و توجیه آن موضوع بررسی جداگانه‌ای است.

انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

ردیف	نام نشریات
شماره ۱	فرهنگ آبیاری و زهکشی
شماره ۲	تحلیلی بر راندمان‌های آبیاری
شماره ۳	سالنامه سال ۱۳۷۳
شماره ۴	سالنامه سال ۱۳۷۴
شماره ۵	دستورالعمل‌های کم آبیاری
شماره ۶	مجموعه مقالات ششمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۷	مجموعه مقالات هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۸	مجموعه مقالات هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۹	ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی وتشخیص عوامل موثر در آن
شماره ۱۰	آبیاری موجی
شماره ۱۱	آشنایی با آبیاری کابلی
شماره ۱۲	مدیریت محلی سیستم های آبیاری و زهکشی
شماره ۱۳	راهنمای اثرات زیست محیطی طرحهای آبیاری و زهکشی
شماره ۱۴	مجموعه مقالات کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
شماره ۱۵	راهنمای احداث زهکش‌های زیرزمینی

THEROTICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF PENMAN - MONTEITH METHOD

WORKING GROUP ON

SUSTAINABLE CROPS AND WATER USE

IRANIAN NATIONAL COMMITTEE ON

IRRIGATION AND DRAINAGE (IRNCID)

ISBN 964 - 6668 - 01 - 1

شابک ۱ - ۰۱ - ۶۶۶۸ - ۹۶۴

۷۱۱/۷
۷۲۳ ك
ن ۲

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

تهران - خیابان کریم خان زند - خیابان شهید عضدی ج

(آبان جنوبی) شماره ۸۹

تلفن: ۸۸۹۸۹۲۰ نمابر: ۸۹۶۶۴۹

قیمت: ۶۰۰۰ ریال

ICID