نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۶، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۱، ص. ۵۰۷-۴۹۴

Journal of Water and Soil
Vol. 26, No. 2, May-Jun 2012, p. 494-507

مدل‌سازی تبخیر- تعرق چمن تحت شرایط غیر استاندارد با استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی (Fuzzy Inference Systems)

حوریه مرادی[1*]- حسین انصاری[2]- امین علیزاده[3]- سید مجید هاشمی نیا [4]- محمد نادریان فر[5]

تاریخ دریافت:۹۰/۶/۳۰
تاریخ پذیرش:۹۱/۱/۲۱

چکیده

به منظور برآورد تبخیر- تعرق واقعی چمن، آزمایشی در سال ۱۳۸۹ در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. در این آزمایش، تبخیر- تعرق واقعی چمن در سطوح مختلف کم آبیاری (۱۰۰، ۸۱، ۶۳، ۵۷ و ۴۱ درصد) با سیستم آبیاری بارانی تک شاخه ای، در دوره-های دو روزه به روش بیلان آبی اندازه‌گیری گردید. همچنین تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش‌های پنمن- مونتیث فائو، هارگریوز-سامانی و تشت تبخیر نیز برآورد گردید. با محاسبه ضرایب گیاهی در هر سطح آبیاری و بررسی مدل‌های مختلف فازی و ترکیب‌های مختلف داده‌های روزانه هواشناسی، ۵ مدل فازی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه ارائه شد. در این مدل‌ها تبخیر- تعرق محاسبه شده از معادله پنمن- مونتیث فائو به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده و کارایی مدل‌های مورد مقایسه با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مربع خطا، خطای انحراف میانگین، ضریب تعیین و معیار جاکوویدز (t) و معیار صباغ و همکاران (R^2/t) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده در شرایط استاندارد با روش‌های پنمن- مونتیث فائو و هارگریوز- سامانی، در مقایسه با روش بیلان آبی به ترتیب، ۱۷ و ۱۴ درصد بیش برآورد داشته‌اند. با آنالیز مقادیر تبخیر- تعرق در شرایط غیر استاندارد مشخص شد که کم آبیاری چمن موجب کاهش تبخیر- تعرق واقعی آن می‌شود، در صورتی که اختلاف مقادیر تبخیر- تعرق در شرایط اعمال ۲۰ درصد کم آبیاری تأثیر معنی داری بر میزان تبخیر- تعرق نداشت. نتایج خروجی مدل‌های فازی هم نشان دادند که مدل‌های فازی توسعه یافته با روش مدل ترکیبی (PMF56) تطابق نسبتاً بالایی داشته و بنابراین توانایی لازم برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس روزانه را دارا می‌باشند.

واژه های کلیدی: تبخیر- تعرق واقعی، استنتاج فازی، بیلان آبی، پنمن- مونتیث فائو، هارگریوز- سامانی

مقدمه

کشور ما، از لحاظ اقلیمی و شرایط آب و هوایی جزء کشورهای خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود. در حال حاضر حدود ۹۴ درصد آب استیصالی از منابع آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و این در حالی است که سهم بخش آب شرب و صنعت به ترتیب ۵ و ۱ درصد می‌باشد (۶). طی سال‌های آینده علاوه بر افزایش جمعیت و نیاز این جمعیت به مواد غذایی با، توسعه صنعت و بالا رفتن سطح بهداشت الگوی مصرف آب در آینده تغییرات زیادی خواهد نمود.

بخش کشاورزی مصرف کننده اصلی آب در کشور است، بنابراین با بهبود مدیریت مصرف آب در این بخش و افزایش بهره‌وری مصرف آن می‌توان به نحو قابل توجهی در مصرف آب صرفه جویی کرد. یکی از مهم‌ترین روش‌های بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه، تخمین دقیق میزان آب مصرفی گیاه است. همچنین اطلاع دقیق از آب مورد نیاز گیاه علاوه بر صرفه جویی در مصرف آب، پایه و اساس برنامه ریزی آبیاری و طراحی ظرفیت سامانه‌های آبیاری محسوب می‌شود. به همین منظور محاسبه نیاز آبی گیاه، قبل از طراحی سامانه مورد نظر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که این مهم در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران اهمیتی دوچندان می‌یابد. با توجه به اهمیت تعیین تبخیر-تعرق در مدیریت منابع آب، شناخت و بررسی روش‌های تعیین تبخیر-تعرق و عوامل موثر مربوط به آن می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آبی کشور نقش مهمی را ایفا کند (۵).

طی نیم قرن گذشته مدل‌های متعددی به صورت روابط ساده تجربی تا معادلات پیچیده علمی، توسط دانشمندان به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از عوامل مختلف هواشناسی ارایه شده است. اغلب این روش‌ها تحت واسنجی محلی به دست آمده و از

۱،۲،۳،۴و۵- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار، استاد، مربی و دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: moradi.hu@yahoo.com)

اعتبار جهانی محدودی برخوردارند. اما ممکن است به دلیل مشکلات فنی و اقتصادی، امکان استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی مجهز برای جمع آوری و ثبت داده‌های دقیق هواشناسی وجود نداشته و یا در بعضی ایستگاه‌ها تنها برخی از پارامترهای هواشناسی اندازه گیری شود. در این صورت تخمین دقیق تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی محدود، مشکل خواهد بود. از طرف دیگر اثر متقابل پارامترهای هواشناسی از قبیل درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع و برخی پارامترهای ناشناخته سبب شده تا، روابط ارائه شده برای تخمین تبخیر-تعرق، به روابطی غیرخطی و پیچیده تبدیل شوند. بنابراین مدلی که بتواند با استفاده از کم‌ترین داده‌های هواشناسی، مقدار تبخیر-تعرق را به صورت دقیق برآورد کند، بسیار سودمند خواهد بود. نیاز آبی تحت شرایط غیراستاندارد با توجه به نوع گیاه و شرایط اعمال مدیریت‌های مختلف در مزرعه تعیین می‌شود. در محاسبه نیاز آبی دو پارامتر تبخیر-تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی باید برآورد شود. با ضرب این دو پارامتر، مقدار نیاز آبی گیاه تعیین خواهد شد. نسبت تجربی تبخیر- تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_C) به تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ETo) که ضریب گیاهی (K_C) نامیده شده، برای مرتبط کردن تبخیر-تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد به تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود ($ET_C=K_C\times ET_O$). تبخیر-تعرق گیاهان تحت شرایط غیر استاندارد (ETc_{adj})، همان تبخیر-تعرق گیاه تحت شرایط مدیریت زراعی و محیطی متفاوت از استاندارد است، که با استفاده از ضریب تنش آبی (K_s) یا اصلاح ضریب گیاهی (K_C) برای انواع تنش‌ها و محدودیت‌های محیطی مؤثر بر تبخیر- تعرق، محاسبه می‌شود (۹).

از آنجایی که تبخیر- تعرق واقعی پدیده‌ای غیر خطی و پیچیده است که تحت تأثیر پارامترهای متعددی همچون درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و شرایط غیرطبیعی سطح مزرعه بوده و به علت عدم قطعیت زیاد در داده‌های ورودی و نیز تعیین ضرایب اصلاحی، استفاده از منطق فازی امکان برآورد دقیق‌تر تبخیر- تعرق واقعی را با استفاده از مدل میسر می‌سازد.

در زمینه مدل کردن تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و منطق فازی مطالعاتی به انجام رسیده ا ست که در ذیل به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. زارع ابیانه و همکاران (۳) برای برآورد مدل‌های پیش‌بینی تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه همدان از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی فازی استفاده نمودند، آن‌ها در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که از میان مدل‌های بررسی شده، مدل ترکیبی فازی عصبی با ترکیب پارامترهای درجه حرارتی حداقل، درجه حرارتی حداکثر و ساعات آفتابی روزانه از دقت بالاتری جهت تخمین تبخیر- تعرق برخوردار است. احمدزاده قره گویز و همکاران (۱) از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم تطبیقی فازی-عصبی به منظور مدل‌سازی تبخیر- تعرق مرجع در مناطق بسیار خشک ایران استفاده نمود. ادهیامبو و همکاران (۱۹) روش منطق فازی را برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع بکار بردند. همچنین آیتک (۱۰)، دوگان (۱۳)، کیسی (۱۶) و منعم و همکاران (۱۸) تحقیقات مختلفی روی مدل‌سازی تبخیر- تعرق با استفاده از سیستم تطبیقی فازی- عصبی پرداختند (۱۱ و ۱۴).

با توجه به ویژگی‌های سیستم‌های استنتاج فازی و مشکلات موجود در برآورد دقیق تبخیر-تعرق واقعی، این پژوهش به منظور بررسی تأثیر کم آبیاری بر روی تبخیر- تعرق واقعی (شرایط غیر استاندارد) به عنوان فراسنج مدیریتی در منابع آب و امکان استفاده از کارآمدی و توانایی سیستم استنتاج فازی در ایجاد رابطه بین پارامترهای هواشناسی و تبخیر- تعرق واقعی و مقایسه دقت این سیستم در اندازه‌گیری تبخیر- تعرق واقعی با روش‌های برآورد تجربی به منظور انتخاب گزینه بهتر انجام شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات طرح و خصوصیات محل اجرای آزمایش

این پژوهش در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، با عرض جغرافیایی ۳۶/۲ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹/۴ درجه شرقی و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا انجام شد. بافت خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری، لوم سیلتی می‌باشد. با توجه به بافت خاک، رطوبت ظرفیت زراعی در عمق توسعه ریشه ۲۹ درصد و رطوبت نقطه پژمردگی دائم ۱۵ درصد است. چمن مورد استفاده در این پژوهش چمن از نوع لولیوم پرنه واریته پرمصرف چمن هلندی است که زود سبز می‌شود و زمین را می‌پوشاند. این نوع چمن در مقایسه با سایر ارقام چمن هلندی رشد کمتری دارد و به علت تحمل به خشکی، ظرافت برگ و مقاومت زیاد نسبت به پاخوری، گرما و بیماری‌های گیاهی، کاربرد وسیعی در زمینه های مختلف می‌باشد (۸). به منظور مدل‌سازی تبخیر- تعرق واقعی چمن تحت شرایط غیراستاندارد، نیاز به دامنه وسیعی از داده‌های اقلیمی و ضریب تنش در سطوح مختلف خشکی بود. برای تأمین این هدف و ایجاد گرادیان‌های مختلف آبیاری (ایجاد سطوح مختلف کم آبیاری)، در این پژوهش از سیستم آبیاری بارانی خطی استفاده شد این طرح در زمینی به مساحت ۴۰۰ مترمربع (۲۰ متر×۲۰ متر) اجرا شد. بر روی لوله تک شاخه‌ای ۷ آبپاش به فاصله ۳ متر از یکدیگر قرار گرفته بود. شمای کلی طرح در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری مقادیر آب رسیده به هر نقطه زمین بعد از هر بار چمن زنی، زمین به قطعات ۲ متر در ۲ متر (۴ مترمربع) تقسیم شده و در مرکز هر قطعه یک قوطی با سطح مقطع ۷۸/۶ سانتی متر مربع که بر روی پایه‌های چوبی نصب شده بود، قرار داده می‌شدند (جمعاً تعداد ۳۰ قوطی). پس از هر نوبت آبیاری، مقدار آب جمع شده درون قوطی‌ها اندازه‌گیری

می‌شد.

کلیه آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تکرار برای پنج تیمار کم آبیاری انجام گرفت. با توجه به اینکه داده-های اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف زمین در هر سطح صورت می‌گرفت؛ لذا اندازه‌گیری هر پارامتر در هر سطح آبیاری در نقاط مختلف به طور تصادفی انتخاب شده بود. سطوح آبیاری با سیستم اجرا شده توسط آبیاری بارانی تک شاخه‌ای برابر با ۱۰۰، ۸۱، ۶۳، ۵۷ و ۴۴ درصد با فاصله ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متری از ابتدای لوله و به ترتیب با عناوین تیمار اول (I_1)، تیمار دوم (I_2)، تیمار سوم (I_3)، تیمار چهارم (I_4) و تیمار پنجم (I_5) در نظر گرفته شدند. با توجه به اینکه آبپاش انتخابی از نوع تنظیم شونده فشار می‌باشد، سطوح آبیاری با تنظیم قطر، زاویه پاشش و تنظیم سرعت چرخش آبپاش بدست آمد. به این ترتیب تیمار اول به آبیاری کامل و تیمارهای بعدی به سطوح مختلف کم آبیاری اختصاص داده شد. با توجه به شکل هندسی زمین و طرح اجرا شده، داده برداری از ۳۰ نقطه زمین صورت گرفت. تجزیه و تحلیل واریانس داده‌ها با نرم افزار $MINITAB_{14}$ انجام گرفت و میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلافات معنی‌دار (LSD) مقایسه شد.

در این پژوهش از آبپاش‌های پلاستیکی تنظیمی ZM مدل ۸۴۲۷ ساخت چین استفاده شده است با حداکثر قطر پاشش ۱۲ متر و فشار کاری ۲/۱ اتمسفر و دور آبیاری ثابت دو روز استفاده شد. نیاز آبی بر اساس مقدار تجمعی آب تبخیر شده از تشت تبخیر، پس از اعمال ضریب تشت محاسبه شده از روش توصیه شده در نشریه فائو ۵۶ با توجه به موقعیت استقرار آن در محل تعیین شد. با توجه به مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده از تشت تبخیر و شدت پخش آبپاش‌ها، مدت زمان آبیاری برای هر نوبت از آبیاری از رابطه ۱ محاسبه و اعمال گردید.

$$T = \frac{60 \times I}{q} \qquad (۱)$$

که در آن، T: مدت زمان آبیاری بر حسب دقیقه است، I: عمق آبیاری بر حسب میلی متر و q: شدت پخش آبپاش بر حسب میلی متر بر دقیقه می‌باشند.

برآورد تبخیر- تعرق مرجع

روش بیلان آبی

به منظور برآورد تبخیر- تعرق چمن برای دوره‌های دو روزه از معادله ۲ استفاده گردید.

$$ET_o = I + P + \Delta S_w - D \qquad (۲)$$

که در آن : I و P و D به ترتیب عمق آب آبیاری، بارندگی و آب زهکشی شده از منطقه تحت کنترل رطوبت در خاک بر حسب میلی متر می‌باشند. ΔS_w: تغییر ذخیره آب خاک در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک، در طول دوره اندازه گیری تبخیر- تعرق بوده و برابر با اختلاف ذخیره آب خاک در ابتدا و انتهای دوره بر حسب میلی متر می‌باشد. مقدار P در طول مدت آزمایش (مرداد و شهریور ماه) صفر بود.

شکل ۱- شمای کلی طرح اجرا شده

با توجه به این که مقدار رطوبت در دو لایه ۱۵ سانتی‌متری در ابتدا و انتها دوره اندازه گیری می‌شد، مقدار تغییرات آن در این دو لایه دقیق کنترل شده و مقدار زهکشی از اختلاف رطوبت این دو لایه مشخص می‌شد. برای اندازه‌گیری رطوبت در این آزمایش‌ها از دستگاه رطوبت سنج الکترومغناطیسی[1] TDR مدل 6050X1Trase استفاده شد.

در ادامه تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله استاندارد (۹)، هارگریوز-سامانی و تشت تبخیر نیز محاسبه شد. مقادیر بدست آمده از تشت بیشتر از بیلان آبی است که این به دلیل نادقیق بودن ضریب تشت تبخیر بود که می‌توان با مقایسه تبخیر-تعرق به دست آمده از روش بیلان در تیمار اول و پذیرش ضریب گیاهی توصیه شده در نشریه فائو ۵۶ (۰/۸۵) به عنوان روش معتبر آن را اصلاح نمود. جهت محاسبه ضریب تشت تبخیر از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$k_p = \frac{ET_C}{k_c \times E_p} = \frac{ET_c(I_1)}{0.85 E_p} \quad (۳)$$

که در آن: k_p: ضریب تشت تبخیر (بی بعد)، ET_C: تبخیر-تعرق به دست آمده از سطح اول آبیاری، E_P: تبخیر از تشت بر حسب میلی متر بر روز، k_c: ضریب گیاهی در شرایط بدون تنش بی بعد، می‌باشد.

به منظور تعیین ضریب گیاهی چمن لولیوم پرنه (k_c) در شرایط بدون تنش، از رابطه ۴ استفاده شد.

$$k_c = \frac{ET_a(I_1)}{ET_O(PMF \quad or \quad Pan)} \quad (۴)$$

که در آن، k_c: ضریب گیاهی بی‌بعد، $ET_a(I_1)$: تبخیر-تعرق به دست آمده از سطح اول آبیاری، $ET_O(PMF)$: تبخیر – تعرق مرجع از رابطه پنمن- مونتیث- فائو (mm/day)، $ET_O(Pan)$: تبخیر- تعرق مرجع از تشت (mm/day).

به منظور برآورد ضریب گیاهی تحت سطوح مختلف آبیاری، در ابتدا ضریب گیاهی چمن در شرایط استاندارد (Kc) که منطبق بر تیمار I_1 (آبیاری کامل) بود، با استفاده از مقادیر به دست آمده از بیلان آبی و مقادیر محاسبه شده از رابطه پنمن- مونتیث فائو ۵۶ و همچنین تشت تبخیر به دست خواهد آمد. از این ضریب، تبخیر-تعرق در شرایط استاندارد (ETc) محاسبه می‌شود. در ادامه رابطه بین سطوح مختلف آبیاری و ضرایب تنش محاسبه می‌شود. جهت محاسبه نسبت کم آبیاری از رابطه ۵ استفاده می‌شود.

$$S = 1 - (I) \quad (۵)$$

که در آن : S: نسبت کم آبیاری، I: نسبت آبیاری انجام شده می‌باشند.

همچنین با محاسبه ضریب گیاهی اصلاح شده در سطوح مختلف کم آبیاری و تبخیر-تعرق محاسبه شده از رابطه پنمن-مونتیث فائو ۵۶، مقدار تبخیر-تعرق واقعی چمن از رابطه ۶ محاسبه شده و به عنوان خروجی‌های مدل‌ها در نظر گرفته شدند.

$$ETa = Ks(ETo) \quad (۶)$$

که در آن، ETo: تبخیر تعرق مرجع از رابطه پنمن-مونتیث فائو ۵۶ (میلی متر بر روز)، Ks: ضریب گیاهی اصلاح شده، ETa: تبخیر-تعرق واقعی چمن (میلی متر بر روز) می‌باشند.

مدل‌های توسعه داده شده فازی تبخیر - تعرق

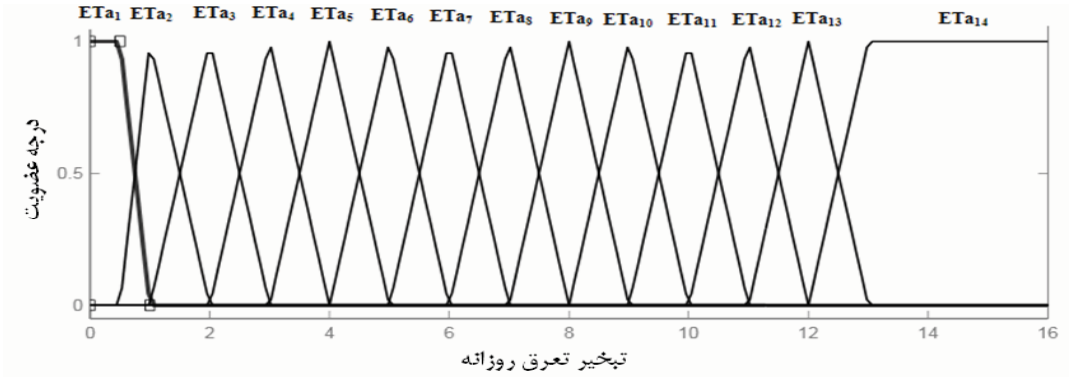
ساختار مدل فازی

به منظور ساخت مدل فازی در این تحقیق، پس از مشخص شدن فراسنج‌های ورودی که شامل درجه حرارت، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، باد و ضریب تنش خواهد بود؛ و فراسنج خروجی، تبخیر-تعرق واقعی چمن لولیم پرنه در منطقه مشهد می‌باشد. فراسنج‌های مورد نظر با استفاده از توابع عضویت فازی شده و با تشریح قواعد استنتاج جهت برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از داده‌های ورودی، مقادیر خروجی با استفاده از روش‌های نافازی‌سازی تولید شدند. برای فازی سازی شاخص‌های ورودی و خروجی، در ابتدا دامنه تغییرات آن‌ها بررسی و برای متغیرهای ورودی و خروجی مدل تعداد سطوح مناسب در نظر گرفته شد. به طوری که در این پژوهش برای پارامترهای درجه حرارت (T)، رطوبت نسبی (RH)، تابش خورشیدی (Rs)، باد (W) و ضریب تنش (S) به ترتیب ۱۰، ۱۰، ۹، ۱۰ و ۱۳ بازه بر اساس پیشنهادات محققین به ویژه فائو ۵۶ به کار گرفته شد (۱۰). همچنین خروجی مدل نیز با ۱۴ سطح و متناسب با تغییرات ورودی در دوره آموزش مدل مد نظر قرار گرفت. ضمناً برای تعیین توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی و خروجی و تعیین درجه همپوشانی توابع فازی، از خصوصیات فیزیکی مسئله مورد بحث و نظرات کارشناسی استفاده شد. با توجه به کاربرد گسترده توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مسائل کاربردی و نتایج حاصل از بررسی‌ها، در این تحقیق نیز برای فازی سازی متغیرهای ورودی و خروجی از هر دو تابع فوق استفاده گردید. به عنوان مثال در شکل ۲ توابع عضویت به کار گرفته شده برای پارامتر خروجی نشان داده شده است.

تعریف قوانین فازی و ترکیب توابع

از آنجایی که تعریف قوانین فازی متناسب با ورودی و خروجی مدل استنتاج فازی یکی از مهم‌ترین مراحل ساخت مدل فازی است، لذا با توجه به توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی و درجه همپوشانی آن‌ها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دوره آموزش، قوانین مختلفی با وزن‌های متفاوت تعریف شد.

1- Time Domain Reflectometry



شکل ۲- توابع عضویت تبخیر- تعرق روزانه

به منظور تکمیل مراحل مدل سازی، در این تحقیق برای استنتاج فازی از روش ممدانی[1] و استلزام[2] از روش حداقل و برای تجمیع قوانین فازی[3]، از روش حداکثر استفاده شد. در مدل سازی فازی، استنتاج نهایی منجر به یک نتیجه فازی می‌شود، لذا برای دستیابی به عدد حقیقی باید از روش‌های نافازی سازی، استفاده کرد. در این تحقیق با توجه به جامعیت روش مرکز ثقل، از این روش استفاده شد (۲، ۱۲، ۱۳ و ۱۷).

معیارهای ارزیابی و مجموعه‌های آموزشی و آزمون مدل-های فازی

در این مطالعه، در ابتدا رابطه بین سطوح مختلف تنش و ضریب تنش (Ks) از داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای بدست آمد و با توجه به اینکه در مرحله آموزش، مدل نیازمند به حالت‌های ممکن ترکیب پارامترها مختلف می‌باشد؛ لذا از داده‌های موجود در ایستگاه سینوپتیک مشهد برای دوره آماری ۵۰ ساله (۱۳۸۹- ۱۳۳۹) جهت محاسبه تبخیر- تعرق واقعی استفاده شد. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، کیفیت آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت. بدین منظور نخست به صورت تجربی، برخی داده های پرت شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف و سپس همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون ران تست مورد تایید قرار گرفت. پس از حذف نقاط پرت و گمشده، تعداد داده باقیمانده مناسب در مجموع ۳۲۲۹ داده روزانه برای هر پارامتر بود. با این تعداد داده هواشناسی و ۱۳ مقدار برای درصد کم آبیاری، در مجموع ۳۸۷۳۷ داده برای تبخیر- تعرق واقعی به دست آمد که از این تعداد ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل‌های فازی و ۲۰ درصد داده‌ها به منظور آزمون مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی مدل‌ها سه پارامتر ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، خطای انحراف میانگین (MBE) و ضریب تعیین برای ارزیابی روش‌های تجربی و مدل‌های فازی استفاده شد. همچنین بنا به اعتقاد جاکوویدز (۱۵) شاخص‌های RMSE و MBE به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل تخمین تبخیر- تعرق کافی نمی‌باشند؛ لذا به توصیه وی علاوه بر دو معیار فوق که عموماً برای مقایسه مدل‌های تبخیر- تعرق استفاده می‌شوند، می‌بایست از معیار سومی به نام t که ترکیبی از دو معیار فوق می‌باشد، استفاده شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2} \quad (۷)$$

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i) \quad (۸)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \overline{P}\right)\left(O_i - \overline{O}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \overline{P}\right)^2 \sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \overline{O}\right)^2} \quad (۹)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE^2)}{(RMSE^2 - MBE^2)}} \quad (۱۰)$$

که در آن، N: تعداد نمونه‌ها، P_i: مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، O_i: مقادیر واقعی، $\overline{P}$ میانگین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، و $\overline{O}$: میانگین مقادیر واقعی می‌باشند. t معیار جاکوویدز بوده و مقدار کمتر آن بیانگر دقت بهتر مدل می‌باشد. با توجه به این که در برخی موارد ممکن است نتایج یک مدل دارای ضریب R^2 بالا، ولی نمایه‌های (RMSE) و (MBE) و یا t قابل قبولی باشند، در چنین مواردی تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل بهینه دشوار است. بدین منظور، در تحقیق حاضر علاوه بر معیارهای معرفی شده توسط جاکوویدز، از معیار ترکیبی جدید صباغ و همکاران (۴) که حاصل نسبت R^2 به t می‌باشد (R^2/t) نیز استفاده شد، که مقادیر بالاتر آن بیانگر سازگاری بالاتر مدل با واقعیت است.

1- Mamdani
2- Implication
3- Aggregation

نتایج و بحث

تعیین الگوی پاشش سیستم آبیاری

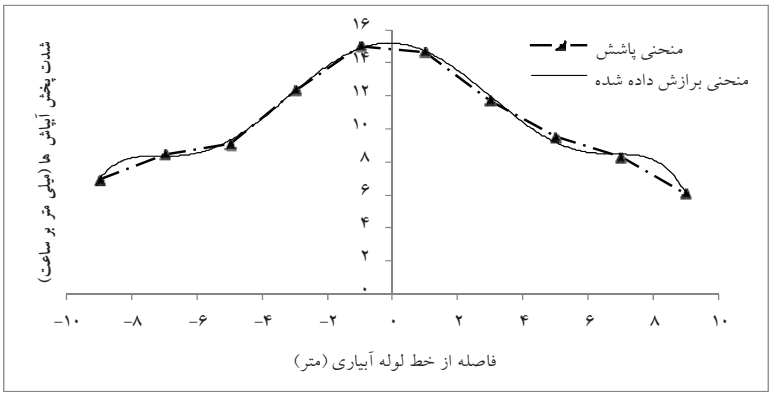
الگوی پاشش آب در سیستم اجرا شده در حالت دو بعدی، برای مقادیر متوسط عمق آب اندازه‌گیری شده در قوطی‌ها در ماه‌های مرداد و شهریور (دوره آزمایش) به صورت شکل ۳ به دست آمد. بیشترین مقدار آب به تیمار اول (I_1) رسیده و هرچه از خط لوله دور می‌شویم مقدار آبیاری کاهش و متعاقباً درصد کم آبیاری افزایش یافته است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، الگوی توزیع آب در اطراف آبپاش‌ها از یک رابطه چند جمله ای درجه ۶ (معادله ۱۱) پیروی می‌کند که این رابطه با ضریب تبیین بالا نشان دهنده انطباق بالای معادله برازش داده شده بر داده‌های اندازه گیری شده است. با توجه به اهداف پژوهش الگوی به دست آمده تا حد زیادی بر الگوی مورد نظر انطباق دارد.

$$I = -6E\text{-}05x^6 - 4E\text{-}05x^5 + 0.0083x^4 + 0.004x^3 - 0.4109x^2 - 0.0821x + 15.193 \quad (۱۱)$$
$$R^2 = 0.99$$

که در آن : I : مقدار آب رسیده به زمین بر حسب میلی متر، x : فاصله از خط لوله آبیاری بر حسب متر می‌باشد. با مقایسه میانگین مقدار آبیاری اعمال شده بر اساس تبخیر تجمعی دو روزه تشت تبخیر و میانگین آب رسیده به زمین مقدار تلفات به طور میانگین در مرداد ماه ۵ درصد و در شهریور ماه ۳ درصد برآورد گردید. به منظور تحلیل نتایج در ابتدا معنی‌دار بودن داده‌های اندازه‌گیری شده در تکرارها و تیمارها با استفاده از نرم‌افزار Minitab مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده، دوره‌هایی برای آنالیز نتایج انتخاب شدند که اختلافات در تکرارها بی‌معنی و در تیمارها معنی‌دار باشند (جدول ۱). بنابراین در پژوهش حاضر مقادیر آبیاری انجام شده در روزهای ۶، ۸، ۱۶ و ۱۸ مرداد ماه و ۶، ۱۰، ۱۲ شهریورماه به منظور تحلیل نهایی انتخاب شدند. با آنالیز آماری نتایج به دست آمده از مقدار آب رسیده به سطح زمین، معلوم شد که به طور میانگین مقدار آبیاری در تیمار I_1(آبیاری کامل) با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری در سطح احتمالاتی ۹۵ درصد دارد. تیمار I_2 نیز با تیمارهای بعدی اختلاف معنی‌داری داشته، اما تیمارهای I_3 و I_4 (۴۰ درصد کم آبیاری) با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند ولی با تیمار I_5 دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند (جدول ۱). تحلیل‌های آماری حاکی از آن است که سطوح متفاوتی از مقادیر آبیاری اعمال شده است که با توجه به اهداف پژوهش منطبق بر شرایط مورد نیاز (شرایط غیر استاندارد) بود.

بررسی و ارزیابی تبخیر- تعرق تحت شرایط استاندارد (بدون تنش)

به منظور بررسی و ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع چمن لولیوم پرنه تحت شرایط استاندارد، تبخیر- تعرق واقعی در شرایط بدون تنش که منطبق بر تیمار اول آبیاری بود، در دوره‌های دو روزه، به روش بیلان آبی اندازه‌گیری گردید. همچنین با استفاده از متغیرهای اقلیمی ایستگاه هواشناسی از قبیل درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و ... تبخیر-تعرق مرجع به روش‌های پنمن-مونتیث فائو، هارگریوز سامانی، تشت تبخیر نیز محاسبه شد. با در نظر گرفتن ضریب گیاهی توصیه شده برای چمن لولیوم پرنه در نشریه فائو ۵۶ (۰/۸۵)، مقادیر تبخیر-تعرق چمن در شرایط بدون محدودیت آبی با استفاده از روش‌های فوق برآورد گردید. جدول ۲ مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده به روش بیلان آبی و به دست آمده از سایر روش‌ها در هر دوره از آزمایش را نشان می‌دهد. همان گونه که عنوان شد، در محاسبه تبخیر-تعرق به روش بیلان آبی مقدار زهکشی بعد از تأثیر آبیاری بر رطوبت صفر منظور شد. از دلایل صحت این فرض می‌توان گفت که اختلاف میانگین تغییرات رطوبت در عمق توسعه ریشه در بازه زمانی بعد از آبیاری و قبل از آبیاری مجدد با میانگین رطوبت اضافه شده ناشی از آبیاری در مدت آزمایش کمتر از ۱ میلی‌متر بود.



شکل ۳- الگوی پاشش آب در سیستم اجرا شده

جدول ۱- تجزیه واریانس مقدار آبیاری انجام شده (سال ۱۳۸۹)

		میانگین مربعات			
تاریخ		٦ مرداد	٨ مرداد	١٦مرداد	١٨مرداد
منابع تغییرات	درجه آزادی	مقدار آبیاری			
تکرار	٥	٢/٠٥^{ns}	٢/٥٠^{ns}	١/٧٠^{ns}	١/٩٠^{ns}
تیمار	٤	٤٠/٠٧*	٣١/٦٧*	٣٠/٤*	٤٤/٦٢*
اشتباه	٢٠	١/٠٨	٠/٥١	٠/٥٠	١/٠١
تاریخ		٦ شهریور	١٠شهریور	١٢شهریور	میانگین کل دوره
تکرار	٥	٠/٣٨^{ns}	٠/٣٥^{ns}	٠/٥٢*	٠/٩١^{ns}
تیمار	٤	١٧/٢٧*	٢٠/٤٠*	٢١/٥٥*	٢٥/٩٦*
اشتباه	٢٠	٠/٢٣	٠/٢٤	٠/٣٧	/٤٥

ns و*: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

بنابراین با توجه به این که این اختلاف در میانگین کل قابل توجه نیست، می‌توان چنین استنباط نمود که تغییرات رطوبت در عمق توسعه ریشه بعد از آبیاری به مصرف گیاه رسیده و در واقع صرف تبخیر-تعرق شده است.

نتایج جدول ۳ نشان داد که همبستگی نسبتاً بالایی بین مقادیر به دست آمده از بیلان آبی و روش پنمن-مونتیث فائو و همچنین روش هارگریوز-سامانی وجود دارد، بطوری‌که مقادیر RMSE و MBE برای روش‌های پنمن-مونتیث فائو و هارگریوز-سامانی در دوره‌های دو روزه به ترتیب برابر ۱/۶۱، ۱/۱۸ و ۱/۳۸، ۱ میلی‌متر در روز به دست آمد، که نشان دهنده توافق خوب این دو روش در برآورد تبخیر-تعرق در شرایط استاندارد برای چمن لولیوم پرنه می‌باشد. با توجه به جداول ۲ و ۳ آشکارا می‌توان دریافت نتایج مقایسه روش سامانی و پنمن در مقایسه با بیلان آبی بسیار مشابه هم می‌باشند. بنابراین در شرایطی که هدف برآورد ET چمن لولیوم پرنه تحت شرایط استاندارد در دوره‌های دو روزه باشد، معادله هارگریوز- سامانی و پنمن-مونتیث فائو اولویت اول و در صورت اصلاح ضریب تشت می‌توان از آن در اولویت بعدی استفاده نمود.

نتایج نشان دادند که مقادیر بدست آمده از تشت بیشتر از بیلان آبی است که این به دلیل نادقیق بودن ضریب تشت تبخیر بود که می‌توان با مقایسه تبخیر-تعرق به دست آمده از روش بیلان در تیمار اول و پذیرش ضریب گیاهی توصیه شده در نشریه فائو ۵۶ (۰/۸۵) به عنوان روش معتبر آن را اصلاح نمود. میانگین ضریب تشت تبخیر کلاس A در طول دوره آزمایش بر مبنای معادلات ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ با توجه به موقعیت و محل استقرار آن روزانه بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ تغییر می‌کرد، در حالی که مقدار محاسبه شده آن از رابطه ۳ به طور متوسط برابر ۰/۷ بدست آمد.

مقدار k_c از رابطه ۴ به طور میانگین برای روش پنمن و تشت به ترتیب ۰/۸ و ۰/۹ به دست آمد. با میانگین گرفتن از این دو، مقدار ضریب گیاهی ۰/۸۵ محاسبه شد که به دلیل یکسان بودن با مقدار پیشنهادی فائو نیاز به اصلاح ندارد.

نتایج تبخیر - تعرق تحت شرایط غیر استاندارد (سطوح مختلف تنش)

در این قسمت نیز در ابتدا داده‌های به دست آمده برای تبخیر-تعرق در همه دوره های آزمایشی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. بر طبق نتایج آنالیز آماری دوره‌هایی برای مقایسه میانگین و تحلیل در نظر گرفته شدند که از نظر اختلافات و خطاهای آزمایشی، در بین تکرارها بی‌معنی و در تیمارها معنی‌دار باشند. بنابراین با توجه به توضیحات فوق، ۴ دوره در مرداد ماه و ۳ دوره در شهریور ماه انتخاب شدند.

همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است مقدار تبخیر-تعرق در مدت آزمایش با توجه به سطوح مختلف آبیاری (تیمارهای کم آبیاری اعمال شده) اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد داشته است، لذا مقدار آبیاری، تأثیر معنی‌داری بر مقدار تبخیر-تعرق چمن دارد. مقایسه میانگین مقادیر تبخیر-تعرق در هر یک از تیمارهای آزمایشی در طول آزمایش حاکی از آن است که مقدار تبخیر-تعرق در تیمار I_1 (آبیاری کامل) با تیمار I_2 (۲۰ درصد کم آبیاری) اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارد، اما با تیمارهای بعدی دارای اختلاف معنی‌داری هست.

جدول ۲- مقادیر تبخیر – تعرق چمن تحت شرایط استاندارد از روش‌های مختلف در دوره‌های دو روزه

تاریخ	بیلان آبی	هارگریوز -سامانی	پنمن – مونتیث - فائو	تشت تبخیر
/٤٥٨٩/ ٨٩/٥/٦	١٠/٢٣	١٠/٠٠	١٢/٤	١٠/٥٩
٨٩/٥/٨–٨٩/٥/٦	١٠/٣	١٠/٩٩	٤٢/٩	١٠/٠٧
٨٩/٥/١٠–٨٩/٥/٨	٩/٣٥	٩/٨٥	١٠/٣٧	١٠/٠٢
٨٩/٥/١٢–٨٩/٥/١٠	٩/٦١	١٠/٥	١١/٨٤	٩/٨٨
٨٩/٥/١٤–٨٩/٥/١٢	٨/٨٦	٩/٧٩	٩/٩١	٦٢/٨
٨٩/٥/١٦–٨٩/٥/١٤	٩/٧٨	١٠/٦٠	١١/٥٩	٩/٠٨
٨٩/٥/١٨–٨٩/٥/١٦	٩/٧٩	١٠/٧٠	١١/٧٤	١١/٨١
٨٩/٥/٢٠–٨٩/٥/١٨	٩/٦٧	١٠/٦٧	١٢/٠٠	٩/٩٨
٨٩/٦/٨–٨٩/٦/٦	٨/٤١	٩/٦٢	٩/٦٦	٨/٥١
٨٩/٦/١٠–٨٩/٦/٨	٨/١٥	١٠/٣٠	٩/٧٨	٨/٠١
٨٩/٦/١٢–٨٩/٦/١٠	٩/٦٧	١٠/٢١	١٢/٠٥	٧/٨٤
٨٩/٦/١٤–٨٩/٦/١٢	٧/٤٦	٧/٧١	٨/٨١	٨/٤٤
٨٩/٦/١٦–٨٩/٦/١٤	٧/٦٣	٩/٢٤	٨/٧٢	٧/٠٣
٨٩/٦/١٨–٨٩/٦/١٦	٧/٣٣	٩/٢٧	٩/١٢	٧/٠٣
٨٩/٦/٢٠–٨٩/٦/١٨	٧/٠٥	٨/٧٩	٧/٣٩	٧/٣٠

جدول ۳- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر – تعرق با روش بیلان آبی

مدل	R	RMSE (mm/d)	MBE (mm/d)
پنمن– مونتیث فائو	٠/٨٢	١/٦١	١/٣٨
هارگریوز– سامانی	٠/٨٠	١/١٨	١/٠٠
تشت تبخیر	٠/٧٨	١/٧٠	١/٤٥

همچنین با مقایسه تیمار I_2 با سایر تیمارها مشخص شد که، مقدار میانگین تبخیر–تعرق در این سطح آبیاری در مقایسه با تیمارهای I_3 و I_4 اختلاف معنی‌داری ندارد اما با تیمار I_5 دارای اختلاف معنی‌داری است. با آنالیز و مقایسه مقادیر میانگین تبخیر– تعرق در تیمار I_3 (۴۰ درصد کم آبیاری) با تیمارهای I_4 و I_5، معلوم شد که مقدار تبخیر– تعرق در این تیمارها اختلاف معنی‌داری ندارند. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل و نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس و مقایسه میانگین، در مجموع می‌توان گفت در تیمارهایی که مقدار کم آبیاری (۲۰ درصد) کمتر بوده است، مقدار تبخیر–تعرق اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد ندارد. با افزایش میزان کم آبیاری (۴۰ درصد) اختلافات موجود در تبخیر– تعرق بدست آمده در بین تیمارهای آزمایشی متفاوت بود، بطوری‌که در تیمارهای با میزان آبیاری بالا (I_1 تا I_3) اختلافات معنی دار بودند. نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

ضریب گیاهی اصلاح شده برای شرایط اعمال تنش آبی

در تمام روش‌هایی که توسط آن‌ها تبخیر–تعرق گیاه مرجع یا تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع محاسبه می‌شود، برای آنکه بتوان نتایج حاصله را به سطوح پوشش گیاهی مورد نظر تعمیم داد لازم است مقادیر به دست آمده را در ضریب گیاهی ضرب نمود. مطابق شکل ۴، واکنش ضریب اصلاح شده تنش به مقدار آب آبیاری انجام شده در هر سطح کم آبیاری، از یک تابع لگاریتمی (معادله ۱۰) تبعیت می‌کند. با استفاده از معادله بدست آمده، ضرایب تنش برای سطوح کم آبیاری محاسبه شد.

$$K_S = 0.55\,\mathrm{Ln}(I) + 0.88 \qquad R^2 = 0.97 \qquad (10)$$

که در آن : Ks : ضریب تنش، I : نسبت آبیاری انجام شده می‌باشد.

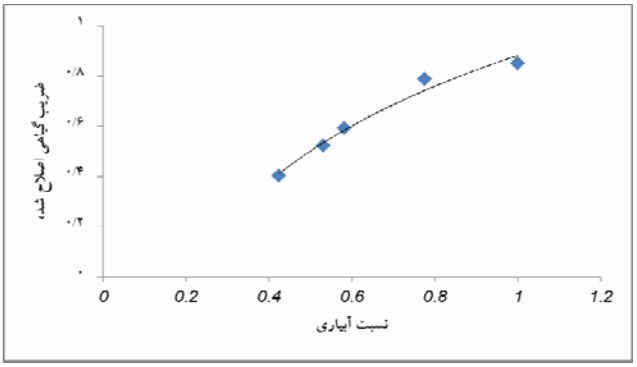
توسعه مدل‌های فازی برآورد تبخیر – تعرق واقعی

به منظور انجام مدل سازی با سیستم استنتاج فازی، در ابتدا باید ورودی‌ها و خروجی‌های مدل فازی مشخص شوند. در این پژوهش با توجه به اطلاعات موجود هواشناسی و مقایسه مدل‌های مختلف با یکدیگر، از پارامترهایی استفاده شده است که این عوامل به طور یکسان در سایر روابط تبخیر– تعرق موثر باشند. بنابراین در این مطالعه از میانگین سرعت باد روزانه، میانگین درجه حرارتی هوا روزانه، میانگین رطوبت نسبی روزانه، تابش خورشیدی روزانه و درصد کم آبیاری به عنوان ورودی‌های مدل‌های فازی استفاده شد.

جدول ٤- تجزیه واریانس مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده (سال ۱۳۸۹)

		میانگین مربعات			
تاریخ		۸-۷ مرداد	۱۰-۹ مرداد	۱۸-۱۷ مرداد	۲۰-۱۹ مرداد
منابع تغییرات	درجه آزادی	تبخیر – تعرق			
تکرار	٥	۱/۷٥ ns	٤/۸۷ ns	٦/۳٦ ns	۱/۲۲ ns
تیمار	٤	٥٥/٥۳*	۲٤/٤٤*	٤۳/۷۹*	۲۲/۸۰*
اشتباه	۲۰	۲/۱۰	٦/۹٤	٥/۳۹	۲/۹۸
تاریخ		۸-۷شهریور	۱۲-۱۱ شهریور	۱٤-۱۳ شهریور	میانگین کل دوره
تکرار	٥	۱/۳٤ ns	۳/۳۲ ns	۳/٦۱ ns	۱/۰۸ ns
تیمار	٤	۲۱/۰۷*	۲۱/۰٤*	۳۷/۹۲*	۳٤/۸٦*
اشتباه	۲۰	۲/۲۸	۳/٥٤	٥/۰۹	۲/٥

ns و*: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد



شکل ٤- رابطه بین مقدار سطوح مختلف آبیاری و ضرایب تنش بدست آمده (هر نقطه میانگین سه تکرار است)

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد درجه حرارتی هوا بیشترین و سرعت باد کمترین ضریب همبستگی را با تبخیر-تعرق مرجع روزانه در ایستگاه مورد بررسی دارد. با توجه به این که درجه حرارتی هوا مؤثرترین پارامتر در برآورد تبخیر-تعرق می‌باشد و همچنین به دلیل سهل‌الوصول بودن آن در بین سایر پارامترهای هواشناسی سعی شد که در مدل‌های فازی توسعه یافته، از این پارامتر در ترکیب با سایر پارامترها به منظور مدل سازی بهتر، استفاده شود. نتایج مدل‌های فازی ساخته شده با روش فائو پنمن-مونتیث به عنوان مدل مرجع و مقادیر تبخیر -تعرق به دست آمده از تشت تبخیر و همچنین رابطه هارگریوز- سامانی مقایسه شدند. همان‌طوری که در جدول ۶ نشان داده شده است، نتایج معیارهای ارزیابی نشان داد که معادله هارگریوز- سامانی همبستگی بیشتری نسبت به تشت تبخیر دارد.

جدول ۵- آماره‌های آزمون پارامترهای مختلف هواشناسی مؤثر بر تبخیر و تعرق روزانه

پارامترها	نماد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	ضریب همبستگی با تبخیر-تعرق
تابش خورشیدی (وات برمترمربع)	Rs	۲۴۶/۸	۷۵/۸	۴۷/۶	۳۵۱/۶	۰/۸۷
درجه حرارتی هوا (سانتی‌گراد)	T	۲۰/۶	۶/۴	۱	۳۵/۵	۰/۹
سرعت باد (متر بر ثانیه)	W	۲/۸	۱/۲	۰	۸/۳	۰/۴۵
رطوبت نسبی (درصد)	RH	۴۴	۱۷/۶	۱۳/۴	۹۹/۵	-۰/۷۲
تبخیر-تعرق (میلی متر بر ساعت)	ET_0	۰/۱	۰/۱۶۷	۰	۰/۹۲	-

جدول ٦- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل فائو با معادلات تشت تبخیر و هارگریوز – سامانی

مدل	R^2/t	T	R	RMSE(mm/d)	MBE(mm/d)
هارگریوز–سامانی	۰/۰۲٦	۳۱/٤۷	۰/۹۱	۲/۰۰	-۰/٦۱
تشت تبخیر	۰/۰۱۱	٥٦/٦۳	۰/۷۸	۱/٥۰	۰/۷۲

مقایسه مدل‌های فازی و مقادیر محاسبه شده از روش فائو پنمن- مونتیث

به منظور بررسی عملکرد مدل‌های فازی نسبت به روش پنمن- مونتیث فائو، همان‌طور که قبلاً اشاره شده است از معیارهای ارزیابی ارائه شده استفاده شد. نتایج نشان دادند که همبستگی بالایی بین مدل‌های فازی ارائه شده با مدل PMF56 وجود دارد. به طوری که بیشترین همبستگی در میان مدل‌های فازی، برای مدل ۵ پارامتری (T، RH، W، Rs، S[1]) و کمترین مقدار آن برای مدل با ۳ ورودی درجه حرارت و رطوبت نسبی و درصد کم آبیاری به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل فازی به خوبی می‌تواند تبخیر -تعرق روزانه چمن را با متغیرهای ورودی متفاوت محاسبه نماید. با محاسبه دیگر پارامترهای ارزیابی عملکرد برای مدل‌های فازی ارائه شده و مدل فائو پنمن-مونتیث در مرحله آموزش، میانگین خطای گرایش (MBE) بین ۰/۰۲۸- و ۰/۱۹ میلی متر در روز بدست آمد که این مقدار کم، نشان دهنده دقت بالای مدل‌های فازی توسعه یافته است. بررسی و مقایسه مقادیر پارامتر RMSE ارایه شده در جدول ۷، نیز نشان می‌دهد که اختلاف تک‌تک مقادیر پیش‌بینی شده در مدل فازی تا حدود زیادی با مقادیر محاسبه شده با مدل PMF56 متناظر است. مقدار این متغیر آماری برای مدل‌های فازی ارایه شده بین ۰/۲۶ تا ۰/۷۷ میلی‌متر در روز متغیر بود که این مقادیر کم، نشان دهنده دقت بالای سیستم استنتاج فازی است. همچنین با محاسبه آماره‌های t و R^2/t، نتیجه شد که مدل فازی با ۳ ورودی درجه حرارت، رطوبت نسبی و درصد کم آبیاری کم‌ترین مقدار معیار جاکوویدز (۴/۷۱) را دارا بوده و حداکثر آن (۲۲/۱۸) برای مدل ۵ پارامتری (T، RH، W، Rs، S) به دست آمد. نکته جالب توجه در مقایسه این پارامترها، این است که کمترین مقدار t که نشان دهنده تطابق بهتر مدل با مدل پنمن است، برای مدل پنجم (T، RH، S) محاسبه شده است هر چند که کمترین همبستگی را در بین سایر مدل‌ها داشته است. از طرف دیگر با در نظر گرفتن معیار صباغ و همکاران (۴)، مقدار این آماره برای دو مدل ۴ و ۳ متغیره (T، RH، Rs، S) و (T، Rs، S) تقریباً یکسان و از بین این دو مدل، مدل فازی با ورودی‌های درجه حرارت- تابش خورشیدی و درصد کم آبیاری نتایج بهتری داشته است. همچنین مدل ۴ پارامتری (T، RH، W، S) عملکرد تقریباً مشابهی با مدل ۳ پارامتری (T، RH، S) دارد. از نتایج بدست آمده از این دو مدل می‌توان دریافت که پارامتر سرعت باد در ایستگاه مورد بررسی تأثیر چندانی در برآورد تبخیر- تعرق ندارد. برای مشخص شدن بهترین مدل از رتبه‌بندی معیارهای مختلف استفاده شده و در نهایت مدلی که مجموع رتبه‌های آن کمتر بود به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. نتایج رتبه‌بندی در دوره آموزش مدل‌ها نشان داد که مدل ۴ متغیره (T، RH، W، S) عملکرد بهتری داشته است (جدول ۷ و شکل ۵- الف).

در مرحله آزمون مدل نیز، نتایج مشابه نتایج مرحله آموزش بوده و نتایج رتبه بندی مدل‌ها در دوره آزمون نیز حاکی از آن است که مدل ۴ متغیره با ورودی‌های درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و درصد کم آبیاری دارای عملکرد بهتری می‌باشد (جدول ۸ و شکل ۵- ب).

مقایسه مدل‌های فازی و مقادیر محاسبه شده از روش هارگریوز- سامانی و تشت تبخیر

به منظور بررسی کارایی مدل‌های فازی ارایه شده، مقایسه‌ای بین مدل‌های فازی و روش هارگریوز- سامانی نیز صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهند که در این حالت مدل‌های فازی ۳ متغیره (T، Rs، S) و ۴ متغیره (T، RH، Rs، S) بهترین و مدل فازی با ۳ متغیر (T، RH، W) کمترین همبستگی را داشته‌اند. همچنین نتایج مدل‌های فازی با ۴ متغیر (T، RH، S، Rs) و ۳ متغیر (T، S، Rs) تقریباً مشابه بوده و این نشان می‌دهد که پارامتر باد تأثیر کمتر دارد. به طور کلی نتایج رتبه‌بندی مدل‌ها نشان می‌دهد که در مجموع مدل ۳ متغیره با ورودی‌های درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی و درصد کم آبیاری دارای عملکرد بهتری بوده و رتبه اول در بین مدل‌ها را دارد (جدول ۹). در مورد روش تشت تبخیر مقدار پارامتر RMSE برای مدل‌های فازی ارایه شده بین ۱/۲ تا ۱/۴ میلی متر در روز متغیر بود که همان طور که توضیح داده شد این اختلاف به دلیل در نظر نگرفتن برخی پارامترها بود. همچنین با محاسبه آماره‌های t و R^2/t ، نتیجه شد که مدل‌های فازی توسعه یافته با تمام ورودی‌ها و در حالتی که تابش خورشیدی در نظر گرفته نشود، دارای نتایج مشابه بوده و می‌توان گفت که مقادیر برآورد شده از ورودی‌های درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و میزان کم آبیاری با استفاده از مدل فازی تقریباً در ۸۰ درصد موارد با مقادیر تشت همبستگی مثبت دارد.

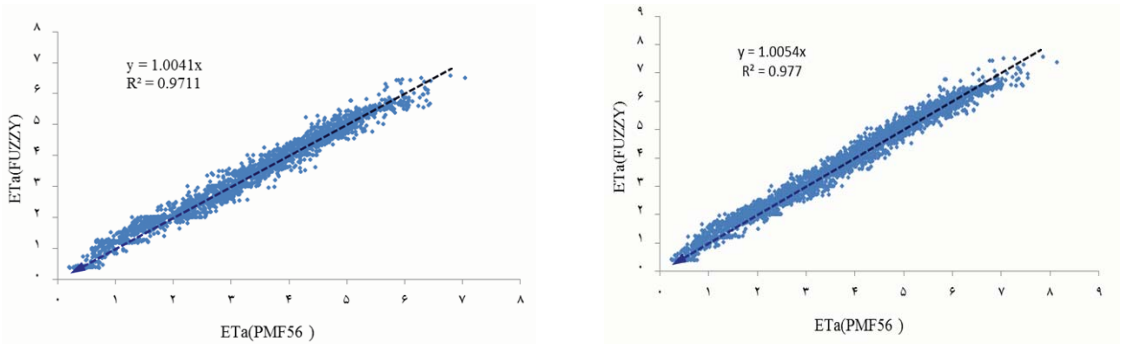
۱- درصد کم آبیاری

جدول ۷- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل ترکیبی PMF56 در مرحله آموزش

فراسنجهای ورودی مدل فازی	R^2/t	MBE(mm/d)	RMSE(mm/d)	R	T
T، RH، W، Rs، S	۰/۰۴۴۳	۰/۴۵۰	۰/۲۶	۰/۹۹	۲۲/۱۸
T، RH، Rs، S	۰/۱۰۵۵	۰/۰۴۱	۰/۶۲	۰/۹۵	۸/۵۵
T، RH، W، S	۰/۱۹۳۰	۰/۱۹	۰/۵۱	۰/۹۶	۴/۸۶
RH، W	۰/۱۱۵۵	۰/۰۴	۰/۶۷	۰/۹۴	۷/۶۶
W، Rs	۰/۱۸۰۸	-۰/۰۲۸	۰/۷۷	۰/۹۲	۴/۷۱

جدول ۸- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل ترکیبی PMF56 در مرحله آزمون

فراسنجهای ورودی مدل فازی	رتبه	R^2/t	T	R	RMSE(mm/d)	MBE(mm/d)
T، RH، W، Rs، S	۴	۰/۰۴۷۵	۲۰/۶۷	۰/۹۹	۰/۲۶	۰/۰۵۴
T، RH، Rs، S	۵	۰/۱۱۳۳	۷/۹۱	۰/۹۵	۰/۶۴	۰/۰۵۱
T، RH، W، S	۱	۰/۱۵۰۵	۶/۲۲	۰/۹۷	۰/۵۳	-۰/۰۳۲
RH، W	۲	۰/۲۱۷۰	۴/۰۴	۰/۹۴	۰/۷۱	۰/۰۲۹
W، Rs	۳	۰/۲۲۰۲	۳/۸۴	۰/۹۲	۰/۸	۰/۰۳۰



ب الف

شکل ۵- مقایسه نتایج محاسبه تبخیر - تعرق مدل فازی با ٤ ورودی (T، RH، W، S) در برابر مدل PMF56 الف: آموزش ب: آزمون

جدول ۹- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با روش هارگریوز - سامانی

فراسنجهای ورودی مدل فازی	رتبه	R^2/t	T	R	RMSE(mm/d)	MBE(mm/d)
T، RH، W، Rs، S	۵	۰/۰۰۹۰	۸۹/٦٤	۰۰/۹	۱/۱	۰/٦۳۱
T، RH، Rs، S	۴	۰/۰۰۷۵	۱۱٦/۷	۰/۹٤	۰/۹۳	۰/٦۲۷
T، RH، W، S	۲	۰/۰۰۹۲	۸۱/۵	۰/۸۷	۱/۰۵	۰/۵٦٦
RH، W	۳	۰/۰۰۷۱	۱۲٤/٦	۰/۹٤	۰/۸۹	۰/٦۲٦
W، Rs	۱	۰/۰۰۸۲	۱۰۰/۲	۰/۹۱	۰/۹	۰/۵۵۷

جدول ۱۰- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با روش تشت تبخیر

فراسنجهای ورودی مدل فازی	رتبه	R^2/t	T	R	RMSE(mm/d)	MBE(mm/d)
T، RH، W، Rs، S	۴	۰/۰۰۸۰	۷۸/۱٤	۰/۷۹	۱/٤	۰/۷٤
T، RH، Rs، S	۳	۰/۰۰۷۸	۸۳/٤۸	۰/۸۱	۱/۳	۰/۷۳
T، RH، W، S	۲	۰/۰۰۸۰	۷٤/۱	۰/۷۷	۱/۳٤	۰/٦۷
RH، W	۵	۰/۰۰۷۵	۸٦/۸۵	۰/۸	۱/۳	۰/۷۳
W، Rs	۱	۰/۰۰۷۷	۸۲/٤۳	۰/۸	۱/۲۲	۰/٦٦

مدل فازی با ۳ ورودی درجه حرارت و تابش خورشیدی و میزان کم آبیاری، حداقل مقدار معیار جاکوویدز (۷۴/۱) را دارا بوده و حداکثر آن (۸۶/۸۵) برای مدل ۳ پارامتری (T، S، Rs) به دست آمد. در این جا نیز نتایج رتبه بندی مدل‌ها نشان می‌دهد که در مجموع مدل ۳ متغیره با ورودی‌های درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی و درصد کم آبیاری دارای عملکرد بهتری بوده و رتبه اول در بین مدل‌ها را دارد. همچنین مدل فازی با ورودی‌های درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و درصد کم آبیاری در رتبه دوم قرار دارد. با حذف سرعت باد، مدل دوم به عنوان گزینه سوم مدل سازی نتیجه بهتری داشته است (جدول ۱۰).

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم آبیاری بارانی با استفاده از یک لوله آبیاری تک شاخه ای به خوبی می‌تواند گرادیان‌های مختلف آب را در مساحت کوچکی از مزرعه ایجاد کند به طوری که نقاطی که در مرکز زمین قرار داشتند آب را به صورت کامل دریافت کردند و آب رسیده به سایر نقاطی که دورتر از مرکز زمین هستند به تدریج کاهش یافت. بنابراین در کرت های نزدیک خط لوله، آبیاری کامل و در کرت های بعدی در هر بلوک، کم آبیاری متناسب با نوع سیستم بکار گرفته شده اعمال می‌شود. همچنین از تجزیه و تحلیل آماری مقادیر آبیاری و آب رسیده به زمین می‌توان چنین استنباط کرد که با تنظیم دقیق این سیستم (آبیاری بارانی تک شاخه ای) و آبیاری در زمان مناسب، به طور میانگین تا ۹۶ درصد سطوح آبیاری به طور یکنواخت در بلوک‌های آزمایشی اعمال شده‌اند. در بررسی مقادیر تبخیر–تعرق بدست آمده در شرایط استاندارد، با توجه به معیارهای ارزیابی نتیجه شد که روش‌های پنمن–مونتیث فائو و هارگریوز– سامانی نسبت به روش بیلان آبی به طور میانگین، ۱۷ و ۱۴ درصد بیش برآورد دارند. روش هارگریوز–سامانی برآورد نزدیک‌تری نسبت به روش پنمن– مونتیث فائو در مقایسه با روش بیلان آبی دارد هر چند که اختلاف این دو روش ناچیز است. با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز مقادیر تبخیر–تعرق در شرایط غیر استاندارد می‌توان دریافت که کم آبیاری چمن موجب کاهش تبخیر–تعرق واقعی آن می‌شود اما اختلاف مقادیر تبخیر–تعرق در شرایطی که به طور میانگین ۲۰ درصد کم آبیاری اعمال گردد، تأثیر معنی‌داری بر مقدار تبخیر–تعرق نداشته ولیکن با افزایش کم آبیاری اختلافات در سطح ۵ درصد معنی دار می‌شوند. با توجه به نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که مدل‌های فازی توسعه یافته با روش مدل ترکیبی مورد مقایسه (PMF56) تطابق نسبتاً بالایی داشته و لذا توانایی لازم برای برآورد تبخیر– تعرق در مقیاس زمانی روزانه را دارا می‌باشد. کاهش متغیرهای ورودی، می‌تواند کمک زیادی در برآورد سریع و کم هزینه تبخیر–تعرق روزانه به خصوص در مدل‌سازی نماید و همان طور که نتایج نشان دادند پارامتر درجه حرارت هوا به دلیل اینکه متأثر از منبع انرژی است بیشترین تأثیر را بر تبخیر– تعرق روزانه در این منطقه دارد و از طرفی هم چون در ساعات مختلف روز تغییرات زیادی ممکن است داشته باشد، به نظر می‌رسد باعث بروز تفاوت‌هایی در تبخیر–تعرق روزانه بدست آمده از سایر روش‌ها شود.

منابع

۱- احمدزاده قره گویز ک.، لطیفی م؛ و محمدی ک. ۱۳۸۹. مقایسه سیستم‌های هوش مصنوعی (ANFISو ANN) در تخمین میزان تبخیر – تعرق مرجع در مناطق بسیار خشک ایران. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۴. جلد ۲۴. ص ۶۸۹ – ۶۷۹.

۲- انصاری ح.، داوری ک؛ و ثنایی نژاد ح. ۱۳۸۹. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص جدید بارندگی تبخیر و تعرق استاندارد شده توسعه یافته بر اساس منطق فازی. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۱. جلد ۲۴. ص ۵۲ – ۳۸.

۳- زارع ابیانه ح.، بیات ورکشی م.، معروفی ص.، امیری چایجان ر. ۱۳۸۹. ارزیابی سیستم‌های هوشمند عصبی در کاهش پارامترهای تخمین تبخیر – تعرق گیاه مرجع. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۲، جلد ۲۴. ص ۳۰۵ –۲۹۷.

۴- سبزی پرور ع.ا.، تفضلی ف.، زارع ابیانه ح.، بانژاد ح.، موسوی بایگی م.، غفوری م.، محسنی موحد ا. و مریانجی ز. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد و نیمه خشک به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۲، جلد ۲۲. ص ۳۴۰ –۳۲۸.

۵- علیزاده ا. ۱۳۸۴. رابطه آب و خاک و گیاه چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۴۷۰ ص (ب).

۶- غفاری شیروان ج. ۱۳۷۷. مسائل آب و فاضلاب در شرایط جدید کشور. نشریه آب و محیط زیست، شماره ۲۹.

۷- غفاری ع. ۱۳۷۷. تفکر فازی، (تألیف :کاسکو، بارت). چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۸- وزیری ژ.، سلامت ا.، انتصاری م.ر.، ماسچی م.، حیدری ن.، دهقانی س. ۱۳۸۷. ترجمه: تبخیر– تعرق (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان).انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی.۳۶۲ صفحه.

9- Allen R.G,. Raes L.S., and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop WaterRequirements, FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 56, FAO, Rome, Italy. 301 p.
10- Aytek A. 2008. Co-active neurofuzzy inference system for evapotranspiration modeling, from Department of civil Engineering , Hydroulics Division Gaziantep university:http://www.spiringle.com.
11- Bardossy A., Bogardi I., and Duckstein L. 1990a. Fuzzy regression in hydrology. Water Resources Research, 26(7) ; pp.1497-1508.
12- Coa Z., and Kandel A. 1989. Application of some Fuzzy Implication Operators, FSS., 3, pp.42-52.
13- Dogan E. 2009. Reference Evapotranspiration Estimation using adaptive nero-fuzzy inference system, Journal of Irrigation and Drianage Engineering .58;pp.617-628.
14- Jacovides C.P. 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation ofevapotranspiraitonmodels . Agricultural water management 3:95-97.
15- Jia Bing C. 2004. Prediction of daily reference evapotranspiration using adaptive neurofuzzy inference system. Trans of the Chinese society of Agricultural Engineering. No. 20(4). pp 13-16.
16- Kisi O. 2010. Fuzzy Genetic Approach for modeling Reference Evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drianage Engineering .136(3) ;pp.175-183.
17- Lee C.C. 1990. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic in Controller – part I & II. TEEE Transaction on systems, Man, and Cybernetics March/April.
18- Monem M.J., Khorami J., and Heydariyan S.A. 2007. evaluation of irrigation networks Performance using fuzzy logic : A Case Study Maroon network. Modares Technical & Engineering. No. 27.
19- Odhiambo L.O., Yoder R.E., and Yoder D.C. 2001a. Estimating of reference crop evapotranspiration using fuzzy state models. Trans of the ASAE. No. 44(3). pp 543-550.

Journal of Water and Soil
Vol. 26, No. 2, May-Jun 2012, p. 494-507

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۶، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۱، ص. ۵۰۷-۴۹۴

Modeling Grass Evapotranspiration Under Non-Standard Using Fuzzy Inference System

H. Moradi[1]*- H. Ansari[2]- A. Alizadeh[3]- S.M. Hasheminia[4]- M. Naderian Far[5]

Received:21-9-2011
Accepted:9-4-2012

Abstract

To estimate actual evapotranspiration of grass, an experiment was a weather stationat, the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad in 1389 year. In this experiment, actual evapotranspiration grass Deficit irrigation at different levels (5 levels) with a single branch sprinkler system, at two-day period was measure the water balance method. Also was estimated the reference crop evapotranspiration with FAO Penman, Hargreaves-Samani and pan evaporation methods. Coefficients calculated for each plant with water level and FiveFuzzy model was provided for estimating actual daily evapotranspiration. In these models was considered FAO Penman evapotranspiration as the output model. Performance models were compared using RMES, MAE, MBE, t and R2/t. The results showed that evapotranspiration values calculated in terms of standard methods of FAO Penman and Hargreaves - Samani, compared with the water balance method, respectively, 17 and 14 percent more than had been estimated.With analysis of evapotranspiration values in non-standard conditions were found to reduce grass Deficit irrigation is the actual evapotranspiration, The difference amounts to 20 percent evapotranspiration Deficit irrigation conditions was not a significant effect on evapotranspiration. Fuzzy model output results also showed that the fuzzy models developed using the combined model (PMF56) had a high Match and the ability to estimate actual evapotranspiration are included in the daily scale.

Keywords: Actual Evapotranspiration, Fuzzy Inference, Water balance, FAO Penman, Hargreaves - Samani

1,2,3,4,5- MSc Student, Associate Professor, Professor, Lecture and PhD Student Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(*-Corresponding Author Email: moradi.hu@yahoo.com)