ارائه رابطه نوین برآورد ضریب تشت تبخیر روزانه با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن و مقایسه آن با روش‌های تجربی جهت محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: دشت بیرجند)

سعیده حسین آبادی[1]* عباس خاشعی سیوکی[2]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب دانشگاه بیرجند
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بیرجند
تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۵

چکیده

تعیین دقیق مقدار آبی که برای تبخیر- تعرق گیاهان مصرف می‌شود، از مهمترین پارامترهای مدیریت آب در مزرعه می‌باشد. در شرایط عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتری می‌توان از روش فائو-پنمن- مانتیث (FPM) به عنوان روش استاندارد، برای ارزیابی روش‌های ساده برآورد تبخیر- تعرق مرجع (ETo)، استفاده کرد. در این تحقیق، از داده‌های ۱۸ ساله (۱۳۹۵-۱۳۷۷) هواشناسی بیرجند، جهت معرفی بهترین روش از بین چهار روش تجربی برآورد ETo بر پایه ضریب تشت شامل روش کونیکا، آلن و پروت، اشنایدر و اورنگ استفاده گردید و نتایج این روش‌ها با روش استاندارد FPM مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت به کمک بهترین روش تجربی قابل استفاده در منطقه مورد مطالعه و پارامترهای آن، هدف اصلی این تحقیق که بررسی توانایی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی ضریب روزانه تشت تبخیر بر اساس داده‌های هواشناسی و ارائه رابطه جدید در این راستا بود، انجام شد. در این تحقیق برای انتخاب بهترین رابطه جهت تعیین این ضریب از فراسنجه‌های آماری ضریب تبیین، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا و درصد خطا استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد برای محاسبه ضریب تشت به صورت روزانه بهتر است از رابطه نوین ارائه شده توسط مدل بیان ژن با ضریب تبیین ۰/۷۷ و میانگین مربعات خطای۰/۰۲۱ میلی‌متر بر روز، در شرایط اقلیمی بیرجند استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: اشنایدر، آلن و پروت، اورنگ، فائو- پنمن- مانتیث، کونیکا

مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از مهمترین پارامترهایی است که دانستن آن برای برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب ضروری است. تاکنون روش‌های زیادی مبتنی بر داده‌های هواشناسی برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ETo) در شرایط اقلیمی و جغرافیایی متفاوت عرضه شده است که از میان این روش‌ها، روش فائو- پنمن- مانتیث (FPM) به منزله روش استاندارد برآورد ETo معرفی شده است (Allen & Pereira, 1998). با توجه به دقت مناسب روش FPM، این روش به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز دارد و تجهیز ایستگاه‌های هواشناسی این داده‌ها، به ویژه در کشورهای در حال توسعه هزینه‌بر است. لذا استفاده از مدل‌های ساده‌تر که به داده‌های هواشناسی کمتری نیاز دارند، برای برآورد ETo بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند.

یکی از روش‌های معمول برآورد ETo، روش تشت تبخیر است. تبخیر از تشت، نشانگر شاخصی از اثر توام دمای هوا، تشعشع و باد است. به دلیل تفاوت آب آزاد و سطوح گیاهی، باید طبق رابطه (۱) مقدار تبخیر از تشت را در یک ضریب تجربی ضرب کرد تا تبخیر- تعرق گیاه مرجع به دست آید. خطای کمی در پیش‌بینی این ضریب تجربی،

[1]نویسنده مسئول: سعیده حسین‌آبادی Saeide.hh123@gmail.com

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

می‌تواند باعث خطای قابل ملاحظه‌ای در ETo برآورد شده شود. بنابراین برآورد دقیق این ضریب ضروری به نظر می‌رسد (موسوی و اخوان، ۱۳۸۶).

$$ETo=Kpan* Epan \quad (۱)$$

در این رابطه، ETo تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع، Kpan ضریب تشت تبخیر و Epan میزان تبخیر از تشت تبخیر است.

برای کارایی بیشتر این روش در هر منطقه باید مقادیر تبخیر از تشت آن محل را با توجه به مقادیر دقیق ETo اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر واسنجی و تصحیح نمود. از آنجا که در منطقه مورد مطالعه، آمار تبخیر- تعرق گیاه مرجع وجود نداشت، از روش FPM به عنوان روش استاندارد و قابل قبول جهت ارزیابی مقادیر ETo بدست آمده از روش‌های تشت استفاده گردید. Jensen (1974)، جزو اولین نفراتی بود که موضوع به کارگیری تبخیر از تشت را جهت برآورد ETo مطرح نمود. در دهه‌های اخیر محققانی نظیر Frevert و همکاران (1983)، Cuenca (1989)، Allen و Pruitt (1991)، Snyder (1992) و Orang (1998) برای محاسبه Kpan معادلات مختلفی را ارائه نمودند که این معادلات توسط دیگر محققان مورد ارزیابی قرار گرفت. Sabziparvar و همکاران (2010) به بررسی و ارزیابی مدل‌های تجربی ضریب تشت برای برآورد ETo، در دو اقلیم خشک گرم و نیمه‌خشک سرد پرداختند. در این تحقیق دو مدل اورنگ و راگووانشی و والندر (Raghuwanshi & Wallender, 1998) در حکم بهترین مدل ضریب تشت در اقلیم نیمه خشک سرد پیشنهاد شد و همچنین مدل‌های اشنایدر و اورنگ برای استفاده در اقلیم خشک گرم معرفی شدند.

در پژوهشی، کارایی روش‌های متفاوت تجربی در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی و سامانه استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در برآورد ضریب تشت رده A و تبخیر- تعرق گیاه مرجع، در اقلیم گرم و خشک (کرمان و شیراز) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش روشن ساخت که روش عصبی- فازی نسبت به روش‌های دیگر نتایج بهتری در برآورد ضریب تشت و تبخیر- تعرق مرجع به دست می‌دهد و از بین روش‌های تجربی برآورد ضریب تشت، روش‌های کونیکا و اشنایدر بعد از روش‌های شبکه عصبی در برآورد ضریب تشت در اقلیم‌های خشک توصیه گردید (سبزی‌پرور و شادمانی، ۱۳۹۱).

در تحقیقی دیگر معادله‌های گوناگون ضریب تشت جهت محاسبه مقادیر ETo در منطقه گرم و مرطوب اهواز به صورت روزانه، ۱۰ روزه و فصلی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که برای محاسبه ضریب تشت تبخیر به صورت روزانه و فصلی بهتر است از روش آلن و پروت و در بازه ۱۰ روزه بهترین روش مورد استفاده، روش اشنایدر است (شکری و همکاران، ۱۳۹۴). در منطقه ساری نیز طی تحقیقی برای محاسبه مقادیر روزانه و ماهانه ضریب تشت و در نهایت تبخیر و تعرق گیاه مرجع، روش اورنگ به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب گردید (اکبری نودهی، ۱۳۸۹). پس از محاسبه ضریب تشت تبخیر در منطقه گرگان با استفاده از معادله‌های تجربی و مقایسه نتایج با مقادیر بدست آمده از روش فائو- پنمن- مانتیث، نتایج نشان داد که مقادیر ضریب تشت بدست آمده از روش اشنایدر نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار است (Kaboosi, 2012).

خوشحال و همکاران (۱۳۹۴) به منظور یافتن بهترین مدل برآورد تبخیر- تعرق مرجع منطبق بر تبخیر- تعرق حاصل از داده‌های تشت تبخیر برای حوضه آبریز شرق و جنوب شرقی کشور، از ۵۵ ایستگاه استفاده نمودند. در این پژوهش، بر اساس آزمون فیشر و توکی ایستگاه‌های مورد بررسی به ۳ خوشه تقسیم شدند و تبخیر- تعرق مستخرج از ۸ معادله تبخیر- تعرق مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصله روش‌های هارگریوز- سامانی، بلانی- کریدل- فائو ۲۴، تورک و پریستلی- تیلور با توجه به ابعاد زمانی مختلف، بهترین انطباق را با مقادیر تبخیر- تعرق مرجع حاصل از تشت تبخیر داشتند.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP[1])، یکی از روش‌های نوین هوش مصنوعی و تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد که بر اساس تئوری داروین[2] ارائه و در سال ۱۳۷۸ توسط فریرا[3] ابداع گردید (روشنگر و میرحیدریان، ۱۳۹۳). روش GEP جمعیتی از افراد را مطابق برازندگی انتخاب کرده و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی اعمال می‌نماید (ابارشی و همکاران، ۱۳۹۳). این روش از تکامل زیست شناسی جهت ایجاد یک برنامه کامپیوتری برای مدلسازی بعضی پدیده‌ها، تقلید می‌کند (روشنگر و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین یک تکنیک برنامه ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند.

بررسی‌هایی که تاکنون در زمینه‌های مختلف به وسیله مدل‌های GEP صورت گرفته است، نشان‌دهنده برتری و کارایی بهتر این مدل می‌باشد. در تحقیقی، مقایسه روش‌های سیستم استنتاج عصبی- فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد تبخیر از تشتک در خراسان جنوبی انجام گرفت. مقایسه نتایج آزمون دو مدل نشان داد که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن کارایی بهتری نسبت به مدل عصبی- فازی در برآورد روزانه تبخیر از تشتک را دارد (حقیقت‌جو و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع روزانه با استفاده از اطلاعات آب و هوایی و GEP در چین نیز نشان داد که بیان ژن توانایی خوبی برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق روزانه با کمترین خطا را داشته است (Traore et al., 2017). در تحقیقی دیگر برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل از مدل GEP و معادله پنمن- مانتیث استفاده گردید که نتایج، حاکی از کارایی مناسب و دقت بالای این مدل در پیش‌بینی تبخیر- تعرق پتانسیل داشت (شعیبی نوبریان و دربندی، ۱۳۹۲).

نوآوری این تحقیق را می‌توان در ارائه یک رابطه جدید برای تخمین مقادیر روزانه ضریب تشت تبخیر در دشت بیرجند، با توجه به داده‌های موجود عنوان نمود که در این خصوص تحقیق حاضر با در نظر گرفتن اهداف زیر انجام شده است:

۱- ارزیابی و مقایسه چهار روش مختلف برآورد ضریب تشت تبخیر به منظور محاسبه مقادیر تبخیر- تعرق مرجع با توجه به روش استاندارد فائو-پنمن- مانتیث و تعیین بهترین معادله برآورد تبخیر- تعرق مرجع از میان روش‌های ساده تجربی مبتنی بر ضریب تشت، به عنوان جایگزین مناسب برای روش فائو- پنمن- مانتیث، در اقلیم نیمه بیابانی شهرستان بیرجند.

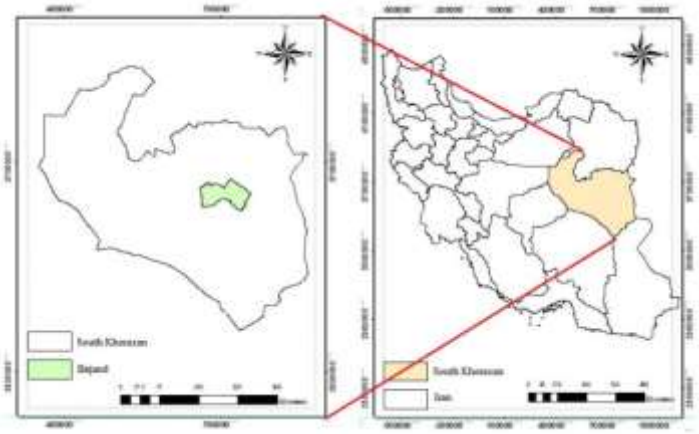
۲- ارزیابی توانایی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد ضریب تشت تبخیر و ارائه رابطه نوین در این راستا برای منطقه بیرجند با توجه به اهمیت برآورد این ضریب و اینکه تاکنون رابطه تجربی جدیدی برای مناطق خشک مشابه بیرجند ارائه نشده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی بیرجند، واقع در قسمت شمالی ارتفاعات باقران، از محدوده‌های حوضه آبریز کویر لوت ایران است. شهرستان بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی و با وسعت ۶۸۸۸ کیلومتر مربع، در ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه عرض جغرافیایی و در ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۱). شرایط اقلیمی این شهرستان نیمه بیابانی بوده که اطلاعات هواشناسی ۱۸ ساله موجود در جدول (۱) بیان‌کننده این وضعیت اقلیمی می‌باشد.

[1] Gene Expression Programming
[2] Darwin
[3] Ferreira

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]



شکل (۱): موقعیت مکانی شهرستان بیرجند

جدول (۱): مشخصات اقلیمی و جغرافیایی ایستگاه بیرجند

ایستگاه	طول (E)	عرض (N)	ارتفاع (m)	میانگین حداقل دما (°c)	میانگین حداکثر دما (°c)	میانگین دما (°c)	میانگین رطوبت نسبی (٪)	میانگین سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)	میانگین تبخیر از تشت (میلی‌متر بر روز)
بیرجند	۵۹° ۱۳	۳۲° ۵۳	۱۴۷۰	۱۰/۷۰	۲۷/۳۰	۱۱/۵۰	۲۹/۵۴	۶/۷۴	۸/۸۱

در این تحقیق برای معرفی مناسب‌ترین روش برآورد تعیین ضریب تشت تبخیر، ابتدا این ضریب با استفاده از اطلاعات هواشناسی ایستگاه بیرجند و به کمک چهار روش در دهه‌های اخیر محققانی نظیر، Cuenca (1989)، Allen و Pruit (1991)، Snyder (1992) و Orang (1998) که روابط آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است و همچنین معادله بدست آمده از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن که در ادامه بیان می‌گردد تعیین و پس از محاسبه ETo، با استفاده از ضرایب بدست آمده و مقادیر تبخیر از تشت، جهت ارزیابی هر کدام از این روش‌ها از نتایج روش استاندارد FPM استفاده شد. با استفاده از این معادله که یکی از مهمترین و عمومی‌ترین معادلات ترکیبی است، مقدار ETo به صورت زیر برآورد می‌گردد (Allen et al, 1998):

$$ETo=\frac{0.408\Delta\ (Rn-G)+\gamma[\frac{890}{T+273}]U_2\ (e_s-e_a)}{\Delta+\gamma\ (1+0.34U_2)} \qquad (۲)$$

در این رابطه، ETo تبخیر و تعرق مرجع (mm/day^{-1})، Δ شیب منحنی فشار بخار ($kPa°C^{-1}$)، R_n تابش خالص ($MJm^{-2}day^{-1}$ ،G) شار گرمایی خاک ($MJm^{-2}day^{-1}$)، γ ضریب ثابت رطوبتی ($kPa°C^{-1}$)، T میانگین دمای هوا (°C)، U_2 میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع دو متری (ms^{-1}) و e_s-e_a کمبود فشار بخار (kPa) است.

جدول (۲): چهار روش تجربی تخمین ضریب تشت در ایستگاه بیرجند

روش	معادله
کونیکا (۱۹۸۹)	$K_{pan}= 0.475- 2.4* 10^{-4}U +5.16* 10^{-3} RH + 1.18* 10^{-3}F- 1.6* 10^{-5}RH-1.01* 10^{-6}F^2 - 8* 10^{-9}RH^2U - 1* 10^{-8}RH^2F$
آلن و پروت (۱۹۹۱)	$K_{pan}= 0.108 – 3.31* 10^{-4}U +0.0422\ Ln\ (F) + 0.1434\ Ln\ (RH) – 6.31* 10^{-4}[\ (Ln\ (F)\ )^2 Ln\ (RH)$
اشنایدر (۱۹۹۲)	$K_{pan}=0.482 – 3.76* 10^{-4}U + 0.024\ Ln(F)+ 0.0045\ RH$
اورنگ (۱۹۹۸)	$K_{pan}= 0.51206 - 3.21*10^{-4}U + 0.031886Ln\ (F) + 0.00288945RH -1.07\ *10^{-4}RH*\ Ln\ (F($

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

در روابط ارائه شده در جدول (۲)، Kpan: ضریب تشت، U: سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m/s)، RH: میانگین رطوبت نسبی (درصد) و F: فچ یا فاصله محل استقرار تشت تبخیر از محیط بالا دست در جهت وزش باد (m) می‌باشد. در این تحقیق مقدار F برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است (Sabziparvar et al., 2010).

مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

برنامه‌ریزی بیان ژن روشی است که از تکامل زیست شناسی جهت ایجاد یک برنامه کامپیوتری برای مدل‌سازی بعضی پدیده‌ها، تقلید می‌کند (روشنگر و همکاران، ۱۳۹۴)، یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار است که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند و قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مولفه‌های آن می‌باشد (قربانی و صالحی، ۱۳۹۰). در برنامه‌ریزی بیان ژن، افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (ژنوم یا کروموزوم‌ها) کدگذاری شده و سپس به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (یعنی نمایش دیاگرام ساده یا بیان درختی[۱]) بیان می‌شوند (ابارشی و همکاران، ۱۳۹۳).

قبل از مراحل اجرایی برنامه‌ریزی بیان ژن گام‌های مقدماتی زیر باید توسط کاربر تعیین شوند:

۱- انتخاب مجموعه ترمینال‌ها

۲- انتخاب مجموعه عملگرهای و توابع ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها

۳- انتخاب تابع برازش مناسب (RRSE,RMSE,MSE,...) برای سنجش برازش فرمول‌ها

۴- تعیین پارامترهای کنترل‌کننده اجرای برنامه (اندازه جمعیت، احتمال مرتبط با به کارگیری عملگرهای ژنتیکی و نرخ آنها، انتخاب تابع پیوند (که تعیین کننده ارتباط بین زیر درخت‌ها است و جزئیات دیگر مربوط به اجرای برنامه)

۵- معیار پایان و ارائه نتایج اجرای برنامه (مثل تعداد تولید جمعیت جدید، تعیین یک مقدار مشخص برای برازش فرمول‌ها که اگر میزان برازش برابر یا بیشتر از آن مقدار شد، اجرا متوقف شود) (قربانی و صالحی، ۱۳۹۰). اگر کیفیت رضایت بخش از یک راه حل (فرمول) پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف شده و بهترین راه حل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف یافت نشود، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه داشته می‌شود (به معنای نخبه گزینی است) و بقیه راه حل‌ها به فرآیندی گزینشی واگذار می‌شوند (ابارشی و همکاران، ۱۳۹۳).

لازم به ذکر است که همه پارامترهای بالا با سعی و خطا تا دست‌یابی به حداکثر ضریب همبستگی مدل توسط کاربر انتخاب می‌شوند که در این تحقیق پس از اعمال مکرر سعی و خطا مقادیر این پارامترها در جدول (۳) ارائه شده است. در ادامه، شکل کلی فرآیند اجرایی گام به گام برنامه‌ریزی بیان ژن در (شکل ۲) نشان داده شده است (قربانی و صالحی، ۱۳۹۰).

در این تحقیق، برای بهره‌گیری از الگوریتم بیان ژن، از نرم‌افزار GenXproTools 5.0 استفاده شد که این نرم‌افزار می‌تواند مجموعه داده‌ها را با ده‌ها هزار متغیر پردازش کند و به آسانی مهمترین ویژگی‌ها و روابط آنها را استخراج کند. در این مطالعه پس از بررسی نتایج روش‌های تجربی محاسبه ضریب تشت تبخیر و انتخاب بهترین روش برای دشت بیرجند، نتایج و پارامترهای تاثیرگذار روش انتخابی، به عنوان داده انتخاب و وارد نرم‌افزار گردید. داده‌های ورودی به مدل به صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند. ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد آنها جهت آزمون اعتبارسنجی مدل به کار برده شدند.

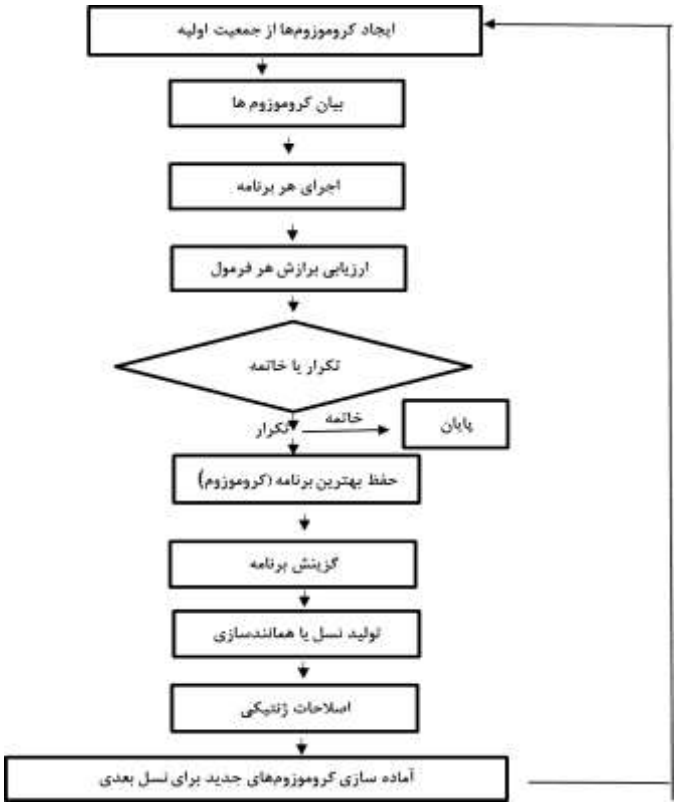
[۱] Expression Tree Structure

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

جدول (۳): پارامترهای مطلوب مورد استفاده نرم‌افزار GenXproTools5.0

پارامتر	مقدار
اندازه سر (Head Size)	۵
اندازه دنباله (Tail Size)	۹
تعداد کروموزوم‌ها (Number of Choromosomes)	۳۰
تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم (Number of Genes)	۳
نرخ جهش (Mutation Rate)	۰/۰۵
نرخ وارونسازی (Inversion Rate)	۰/۰۵
نرخ ترکیب تک نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب دو نقطه‌ای (Two-Point Recombination Rate)	۰/۲
نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)	۰/۲
نرخ ترانهش درجه متوالی (IS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ریشه درجه متوالی (RIS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ژن (Gene Transposition Rate)	۰/۱
معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)	RMSE
تابع پیوند (Linking Function)	تابع جمع "+"
مجموعه توابع (Function Set)	+,*, /,-, ln,sin,cos,arctan,x^2,√
تعداد اجرا (Number of Runs)	۲
تعداد جمعیت یا نسل (Number of Generation)	۱۰۰۰
نرخ عملگر جهش در ثوابت تصادفی (R.C Mutation Rate)	۰/۱
نرخ عملگر ترانهش در دامنه DC (DC Specific IS Transposition Rate)	۰/۰۵



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم بیان ژن

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

معیارهای ارزیابی

شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا[۱] (RMSE)، متوسط قدرمطلق خطا[۲] (MAE)، ضریب تبیین[۳] (R^2) و درصد خطا (PE) جهت ارزیابی نتایج هر کدام از روش‌ها با روش استاندارد FPM استفاده گردید. این شاخص‌ها با استفاده از رابطه (۳) تا (۶) قابل محاسبه هستند.

$$RMSE=\sqrt{(\sum(Xi-Yi)^2)/N} \quad (۳)$$

$$MAE = (\sum_{i=1}^{n} |Xi-Yi|)/N \quad (۴)$$

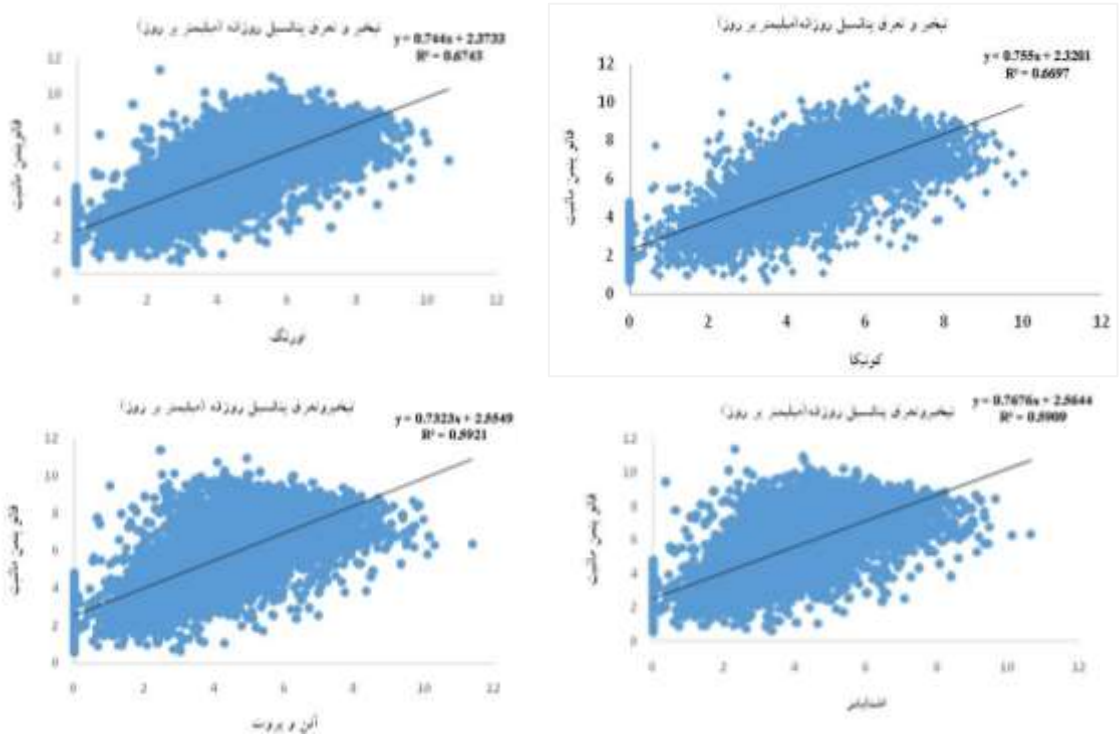
$$R^2=\frac{(\sum_{i=1}^{n} (Xi-\bar{X})(Yi-\bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^{n} (Xi-\bar{X})^2 (Yi-\bar{Y})^2)} \quad (۵)$$

$$PE = |\frac{\bar{X}-\bar{Y}}{\bar{Y}}| \times 100\% \quad (۶)$$

در روابط استفاده شده جهت ارزیابی عملکرد، N تعداد کل داده‌ها، Xi داده‌های محاسبه شده، Yi داده‌های مشاهداتی، i گام‌های زمانی، $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ میانگین داده‌های X و Y می‌باشند.

نتایج و بحث

هدف اصلی این تحقیق، انتخاب بهترین رابطه جهت محاسبه مقادیر ضریب تشت تبخیر در دشت بیرجند می‌باشد. در این خصوص، مقادیر روزانه ETo بر پایه ضریب تشت تبخیر (با استفاده از چهار روش ذکر شده) تعیین و با نتایج روش استاندارد FPM مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل (۳) و جدول (۴) نشان دهنده این مقایسه و ارزیابی چهار روش تجربی می‌باشد.



شکل (۳): مقایسه مقادیر روزانه ETo، محاسبه شده از مدل‌های برپایه ضریب تشت و روش استاندارد FPM (۱۳۹۵-۱۳۷۷)

[۱] Root mean squara error
[۲] Mean absolute error
[۳] Coefficient of determination

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

جدول (۴): تجزیه و تحلیل آماری *مقایسه مقادیر روزانه ETo محاسبه* شده از مدل‌های بر پایه ضریب تشت تبخیر با روش استاندارد FPM

پارامترهای آماری	روش اورنگ (۱۹۹۸)	روش اشنایدر (۱۹۹۲)	روش کونیکا (۱۹۸۹)	روش آلن و پروت (۱۹۹۱)
جذر میانگین مربعات خطا (**RMSE**)	۰/۰۲۶	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹
متوسط قدرمطلق خطا (**MAE**)	۱/۳۸	۱/۷۴	۱/۳۶	۱/۵۵
ضریب تبیین (R^2)	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۵۹
درصد خطا	۳۹/۳۲	۵۴/۳۹	۳۶/۳۷	۴۵/۹۷

نتایج بدست‌آمده از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

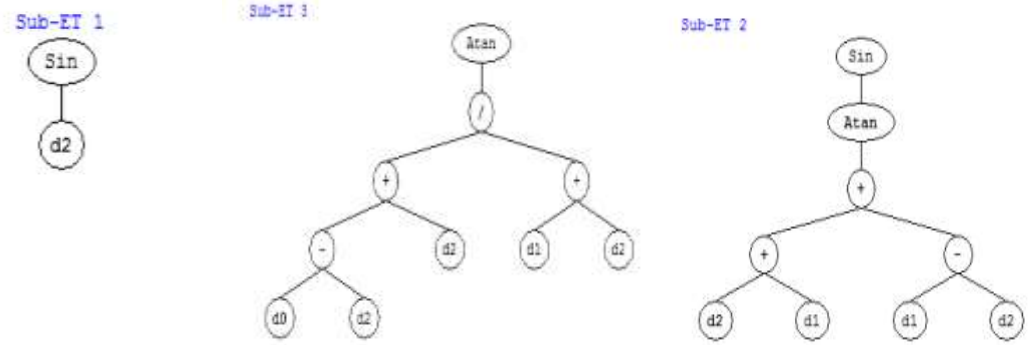
عملکرد مدل بیان ژن از طریق ارزیابی آماره‌های بهترین برازش (Best fitness)، ضریب همبستگی (R^2) و ریشه متوسط خطای مربعات (RMSE) است که در بهترین حالت (حالت آرمانی مدل) مقادیر BestFitness، R^2 و RMSE به ترتیب برابر ۱۰۰۰، ۱ و صفر می‌باشند. در این تحقیق با استفاده از یافته‌های قسمت قبل، از نتایج و پارامترهای روش کونیکا به عنوان مناسب‌ترین روش در دشت بیرجند برای استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد. به این صورت که پارامترهای این روش شامل: میانگین روزانه رطوبت نسبی به عنوان ورودی اول (d0)، میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری به عنوان ورودی دوم (d1) و فاصله محل استقرار تشت تبخیر از محیط بالادست در جهت وزش باد به عنوان ورودی سوم (d2) به مدل معرفی شد و همچنین مقادیر ضریب تشت تبخیر (نتایج حاصل از روش کونیکا)، به عنوان خروجی (y) در نظر گرفته شد.

در نهایت پس از اعمال سعی و خطاهای مکرر روی پارامترهای کنترل‌کننده اجرای برنامه، مناسب‌ترین برازش برای بدست آوردن ضریب تشت تبخیر ارائه شد که نتایج ارزیابی آن در جدول (۵) بیان شده است.

جدول (۵): نتایج مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

داده	Best fitness	R^2	RMSE
آموزش	۹۴۷/۰۲	۰/۸۱	۰/۰۵
آزمون	۹۲۹/۲۵	۰/۸۸	۰/۰۷

شکل (۴) ساختار خروجی مطلوب را به صورت درختی نشان می‌دهد که معادله‌ی نهایی نیز، از این ساختار بدست آمده است. از آنجا که سه ژن در اینجا تشکیل شده، هر یک از ژن‌ها یک زیردرخت و معادله مربوط به خود را دارد که در نهایت با توجه به تابع پیوند معادله نهایی حاصل می‌شود.



شکل (۴): ساختار درختی مطلوب مدل

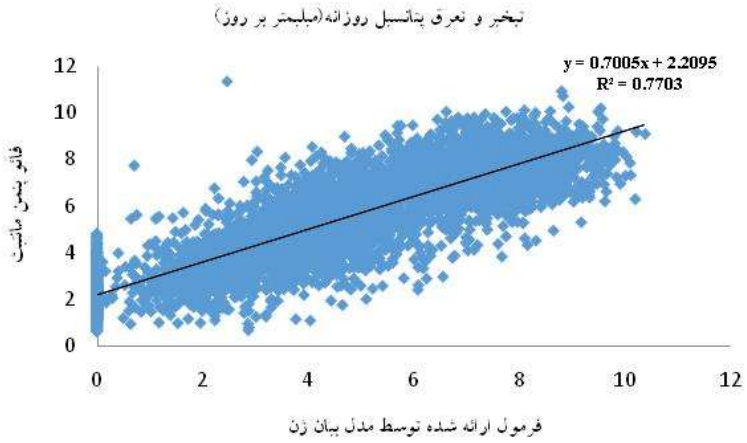
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

چون تابع پیوند، تابع جمع است برای بدست آوردن فرمول نهایی، باید معادلات چهار زیر درخت حاصله از ژن‌ها را با یکدیگر جمع نمود. در نهایت رابطه (۷)، به عنوان رابطه نوین در تعیین ضریب تشت تبخیر در منطقه بیرجند معرفی می‌گردد که در ادامه نتایج حاصل از این رابطه به کمک روش استاندارد FPM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$Kpan = Sin\,F + Sin\,[\tan^{-1}\,((F+U)+(U-F))\,] + Tan^{-1}\left(\frac{(RH-F)+F}{(U+F)}\right) \qquad (۷)$$

در این رابطه RH: میانگین روزانه رطوبت نسبی (درصد)، U: میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (میلی‌متر بر روز) و F: فاصله محل استقرار تشت تبخیر از محیط بالادست در جهت وزش باد (متر) می‌باشد.

پس از بدست آوردن نتایج ETo بر پایه ضریب تشت تبخیر حاصل از رابطه (۱) و مقایسه آن با نتایج روش استاندارد (شکل ۵)، مقدار RMSE برای نتایج این رابطه برابر ۰/۰۲۱ میلی‌متر بر روز، MAE برابر ۰/۹ میلی‌متر بر روز و R^2 برابر ۰/۷۷ برآورد شد. با دقت به این آمارها، در نهایت ملاحظه گردید که نتایج رابطه ارائه شده توسط مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با نتایج حاصل از چهار روش تجربی کونیکا، اشنایدر، اورنگ و آلن و پروت در دشت بیرجند دارای دقت بالاتری است.



شکل (۴): مقایسه مقادیر روزانه ETo برپایه ضریب تشت تبخیر حاصل از مدل GEP و روش استاندارد FPM (۱۳۹۵-۱۳۷۷)

نتیجه گیری

با توجه به اینکه در هر منطقه با انتخاب معادله مناسب جهت تعیین ضریب تشت تبخیر می‌توان مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع را برآورد نمود، در این مطالعه مقادیر روزانه این ضریب با استفاده از چهار روش تجربی و همچنین مدل برنامه‌ریزی بیان ژن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که رابطه نوین پیشنهادی توسط مدل برنامه‌ریزی بیان ژن دارای دقت بالا و کاربرد موثر در برآورد روزانه این ضریب در دشت بیرجند است. روش کونیکا نیز، پس از رابطه پیشنهادی، جهت برآورد ETo برپایه ضریب تشت تبخیر می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش ترکیبی نسبتا پیچیده FPM گردد.

منابع

۱. ابارشی، م.، ه. مفتاح هلقی، ا. ثانی خانی و ا. دهقانی (۱۳۹۳). مقایسه عملکرد سه روش هوشمند به منظور پیش بینی نوسانات سطح ایستابی (مطالعه موردی: دشت زرین گل). نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۱ (۱): ۱۶۳-۱۸۰.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

۲. اکبری نودهی، د. (۱۳۸۹). برآورد ضریب تشت تبخیر به منظور محاسبه تبخیر و تعرق (مطالعه موردی ایستگاه سینوپتیک ساری). پژوهش در علوم زراعی، ۲ (۷): ۷۴-۶۵.

۳. حقیقت‌جو، پ.، ز. محمدزاده شاهرودی و ا. محمدرضاپور (۱۳۹۶). مقایسه روش‌های سیستم استنتاج عصبی- فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد تبخیر از تشتک (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی). حفاظت منابع آب و خاک، ۶ (۴): ۱۱۷-۱۰۷.

۴. خوشحال، ج.، ح. زارع‌ابیانه و ع.ر. جوشنی (۱۳۹۴). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با روش تشت تبخیر فائو در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق کشور. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۸ (۲۸): ۱۶-۱.

۵. روشنگر، ک.، ح. بنکداری، س. اخگر و ف. هرسمی (۱۳۹۴). بررسی عملکرد برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) در پیش‌بینی استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی در رژیم جریان رویه‌ای (Skimming). دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران.

۶. روشنگر، ک. و ش. میرحیدریان (۱۳۹۳). استفاده از روش تکاملی برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد میزان آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای غیر چسبنده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و میدانی. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران بابل.

۷. سبزی‌پرور، ع. و م. شادمانی (۱۳۹۱). مقایسه ضرایب تشت برآورد شده با استفاده از روش‌های تجربی، شبکه عصبی مصنوعی و عصبی- فازی در برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۱): ۲۴۰-۲۲۹.

۸. شعیبی نوبریان، م. و ص. دربندی (۱۳۹۲). پیش‌بینی میزان تبخیر-تعرق پتانسیل معادله فائو- پنمن- مونتیث با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. دومین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

۹. شکری، س.، ع.ر. هوشمند و م. قربانی (۱۳۹۵). برآورد ضریب تشت تبخیر به منظور محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه اهواز. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۰ (۱): ۱۲-۱.

۱۰. قربانی، م.ع. و ا. صالحی (۱۳۹۰). استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن در بررسی تغییرات داده‌های کیفی آب زیرزمینی با نوسانات سطح آب در دشت برخوار اصفهان. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان.

۱۱. موسوی، ف. و س. اخوان (۱۳۸۶) اصول آبیاری. انتشارات کنکاش، ۴۱۵ صفحه.

12. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. *(1998). Crop evapotranspiration:Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper 56, *Rome, Italy, 300 pp.*

13. Allen R.G. and Pruitt W.O. *(1991). FAO-24 reference evapotranspiration factors*. Journal of irrigation and drainage engineering, *117 (5) , 758-773.*

14. Cuenca R.H. *(1989). Irrigation system design: An engineering approach*, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, NJ, *133 PP.*

15. Frevert D.K., Hill R.W. and Braaten B.C. *(1983). Estimation of FAO evapotranspiration coefficients.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, *109 (2): 265-270.*

16. Jensen M.E. *(1974). Consumptive use of water and irrigation water requirements*, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, *89: 15-41.*

17. Kaboosi K. *(2012). The investigation of error of pan evaporation data, estimation of pan evaporation coefficient by pan data and its comparison with empirical equations*, International Journal of Agriculture and Crop Sciences, *4 (19) , 1458-1465.*

18. Orang M. *(1998). Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables. Unpublished Rep., Calif, Dept. of Water Resources, Sacramento*.

19. Raghuwanshi N.S. and Wallender W.W. *(1998). Converting from pan evaporation to evapotranspiration*. J. Irrig. Drain. Eng. *118: 6. 977-980.*

20. Sabziparvar A.A., Tabari H., Aeini A. and Ghafouri M. (2010). *Evaluation of class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm arid climates*,Water Resources Management, *24 (5) , 909-920.*

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]

21. Snyder R.L. *(1992). Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, *118 (6), 977-980.*

22. Traore S., Luo Y. and Fipps G. *(2017). Gene-expression programming for short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using public weather forecast information.* Water resources management, *31 (15): 4891-4908.*

Presenting a new equation for estimation of daily coefficient of evaporation pan using Gene Expression Programming and comparing it with experimental methods (Case Study: Birjand Plain)

Saeideh Hosseinabadi[1*] Abbas Khashei Siuki[2]

1- MSc student, water resources management, water engineering Dept., University of Birjand

2- Associate Professor, water engineering Dept., University of Birjand

Received: 2019/05

Accepted: 2019/08

Abstract

One of the most important componenets of water management in farms is estimating crops' exact amount of evapotranspiration (water need). The FAO-Penman-Montheis (FPM) method is a standard method to evaluate other techniques which are used for easy calculation of potential evapotranspiration, when lysimeter datasheets are not available. This study was carried out based on 18 years' climatic data of Birjand (1998-2016), to determine the best experimental method based on coefficient of evaporation pan amongst methods proposed by Cuenica, Allen and Pruitt, Snyder and Orang. Then, the results were compared with the FPM method. The best method was used to assess the capabilities of gene expression method for prediction of daily coefficient of evaporation pan, which was the major goal of this study. The best equation for calculation of daily coefficient of evaporation pan was determined using these statistical factors: coefficient of determination, root mean squared error, mean absolute error, and percent error. The results showed that in Birjand's climatic conditions, it is best to use the equation of generated by the gene expression method with a coefficient of determination of 0.77 and mean squared error of 0.021 millimeter per day.

Keywords: Allen and Pruitt, Cuenca, FAO Penman Monteith, Orang, Snyder

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-09-12]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.2.6.6]