

تخمین تبخیر روزانه از تشت تبخیر با استفاده از مدل رگرسیونی چند متغیره و برنامه‌ریزی

آرمانی

سیامک ستاری^۱، حمیدرضا اسلامی^۲، معصومه عیوضی^۳

^۱رئیس گروه مطالعاتی آبهای زیرزمینی، شرکت آب منطقه‌ای اردبیل

^۲مدیرعامل شرکت پایشگر تدبیرافزار

^۳مدیر بخش منابع آب شرکت پایشگر تدبیرافزار

Masoomeh.eivazi@gmail.com

چکیده

تبخیر یکی از مولفه‌های مهم چرخه هیدرولوژیکی است که اندازه‌گیری و تخمین آن برای مدیریت منابع آب، طراحی مخازن و تحلیل‌های دیگر متغیرهای هیدرولوژیکی لازم می‌باشد. به دلیل تأثیر متقابل پارامترهای مختلف هواشناسی، محاسبه تبخیر پیچیده است. روابط غیرخطی برای تخمین مقدار آن وجود دارد که در صورت تعیین روابط درست، از دقت بالایی برخوردار خواهند بود. در این تحقیق، با استفاده از آمار روزانه هواشناسی ایستگاه سد قوری‌چای واقع در استان اردبیل و توابع ریاضی مختلف به مدل‌سازی میزان تبخیر روزانه از تشت تبخیر پرداخته شد. ترکیب‌های مختلف پارامترهای حداقل درجه حرارت، حداکثر درجه حرارت، حداقل رطوبت نسبی و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد و تشعشع به عنوان ورودی‌های مدل و تبخیر روزانه از تشت تبخیر بعنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. به منظور تعیین ضرایب مدل و حداقل نمودن خطا از برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شد. همچنین با استفاده از فرمول‌های تجربی، میزان تبخیر محاسبه شده با نتایج حاصل از مدل‌های ریاضی مورد مقایسه قرار گرفت. بمنظور بررسی تأثیر پارامترهای ورودی در تخمین تبخیر از آنالیز حساسیت استفاده شد. نتایج نشان داد مدل‌های ریاضی در تخمین تبخیر روزانه نسبت به روش‌های تجربی موجود از دقت بالایی برخوردار می‌باشند. ضمن اینکه پارامترهای دما و سرعت باد به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در تخمین مقدار تبخیر از تشت را دارا می‌باشند.

کلمات کلیدی: تبخیر، درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع، برنامه‌ریزی آرمانی.

مقدمه

فرآیند تبخیر یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه آب در طبیعت است که نقش اساسی در مطالعات کشاورزی، هیدرولوژی و هواشناسی، بهره‌برداری از مخازن، طراحی سیستم‌های آبیاری و زه‌کشی، زمان‌بندی آبیاری و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. روش‌های مستقیم و غیر مستقیم زیادی جهت برآورد شدت تبخیر وجود دارند. روش تشت تبخیر (Pan evaporation) جزء روش‌های مستقیم است که به طور معمول جهت برآورد تبخیر دریاچه‌ها و مخازن استفاده می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم، شدت تبخیر با استفاده از روش‌های تجربی (با استفاده از داده‌های هواشناسی) و فرمول‌های مبتنی بر موازنه جرم و بقای انرژی برآورد می‌شود.

یکی از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری تبخیر، تشت تبخیر کلاس A مرکز هواشناسی آمریکا است که در ایستگاه‌های هواشناسی ایران نیز از این نوع تشت تبخیر استفاده می‌شود. این تشت ۱۳۰ سانتی متر قطر و ۲۵ سانتی متر عمق دارد (مفتاح و همکاران، ۱۳۸۸). نصب تشت تبخیر دارای محدودیت‌های ابزاری و مشکلات عملی شامل خطای ناظر، کدورت آب و مشکلات نگهداری است که به همین دلیل از میزان دقت این ابزار می‌کاهد. بنابراین با توجه به مشکلات و محدودیت‌های تشت تبخیر، ارائه روش‌هایی برای برآورد میزان تبخیر با استفاده از دیگر متغیرهای هواشناسی ضروری است. از این‌رو محققین مختلفی به ارائه روش‌های مختلف جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی این پارامتر پرداخته‌اند. برتن و همکاران (۲۰۰۰)، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، تبخیر روزانه از تشتک را مورد

بررسی قرار دادند. بارندگی، درجه حرارت، رطوبت نسبی، تشعشعات خورشیدی و سرعت باد بعنوان پارامترهای ورودی شبکه و میزان تبخیر از تشتک بعنوان پارامتر خروجی شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج ایشان نشان داد که روش شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای کمترین خطا نسبت به سایر روشها بوده و خطایی برابر ۱/۱۱ میلی‌متر در روز داشته است. شالامو و همکاران (۲۰۱۰) به مدل‌سازی تبخیر از تشت با استفاده از مدل رگرسیونی و شبکه عصبی پرداختند. نتایج بدست آمده از تحقیقات آنها نشان داد که مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی نتایج یکسانی را ارائه کرده‌اند و با توجه به اینکه مدل‌های رگرسیونی پیچیدگی‌های مدل‌های رگرسیونی را نداشته، مدل رگرسیونی را پیشنهاد نموده‌اند. هدف از این تحقیق مدل‌سازی روزانه تبخیر از تشت با استفاده از توابع ریاضی و تعیین میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر مقدار تبخیر بوده است. در این تحقیق با استفاده از آمار ایستگاه هواشناسی سدقوری و بکارگیری توابع ریاضی، میزان تبخیر از تشتک تخمین زده شده است. پارامترهای ورودی توابع ریاضی، درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تشعشع خورشید است که بمنظور بررسی اثر این پارامترها از توابع و ترکیب‌های مختلف آنها برای تخمین میزان تبخیر از تشت استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی و مدل‌سازی تبخیر روزانه، از آمار هواشناسی روزانه ایستگاه سدقوری در سه ماه تیر، مرداد و شهریور سال ۱۳۹۰ استفاده شد. این ایستگاه در موقعیت جغرافیایی "۴۷° ۱۷' ۴۸" طول شرقی، "۲۸° ۰۴' ۳۸" عرض شمالی قرار گرفته است. پارامترهای روزانه هواشناسی عبارتند از: درجه حرارت، T ، رطوبت نسبی، RH ، سرعت باد، W ، تشعشع، S و تبخیر، E . پس از اطمینان از صحت داده‌های هواشناسی ایستگاه سدقوریچای و انجام آزمون‌های آماری لازم، به پیش‌بینی تبخیر پرداخته شد. پارامترهای آماری مجموعه داده‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. در جدول (۱)، X_{mean} ، میانگین داده‌ها، S_x ، انحراف معیار داده‌ها، CV ، ضریب تغییرات، C_{sx} ، ضریب چولگی، X_{max} ، مقدار حداکثر، X_{min} ، مقدار حداقل و R ، مقدار همبستگی داده‌ها با تبخیر می‌باشند.

جدول ۱- پارامترهای آماری مجموعه داده‌ها

R	C_{sx}	X_{min}	X_{max}	CV	S_x	X_{mean}	واحد اندازه‌گیری	مجموعه داده‌ها
۰/۲۶	-۰.۰۱	۹.۸۴	۲۷.۰۶	۰.۲۱	۳.۷۹	۱۸.۱۴	درجه سانتیگراد(°C)	درجه حرارت(T)
۰/۳۹	-۰.۱۱	۲۶.۱۳	۹۸.۶۴	۰.۲۸	۱۸.۱۵	۶۴.۹۷	%	رطوبت نسبی(RH)
۰/۲۹	۱.۱۶	۲.۴۴	۸.۳۹	۰.۲۷	۱.۱۶	۴.۳۴	متر بر ثانیه(m/s)	سرعت باد(W)
۰/۴۴	-۱.۱۷	۶۲.۲۰	۳۶۶.۹۱	۰.۲۷	۷۴.۰۳	۲۷۴.۴۳		تشعشع
	-۰.۱۷	۰.۹۰	۸.۷۰	۰.۳۶	۱.۷۸	۵.۰۱	میلی‌متر(mm)	تبخیر(E)

همانطور که مشخص است، از بین چهار پارامتر مورد بررسی، تشعشع و رطوبت نسبی بیشترین همبستگی و درجه حرارت و سرعت باد کمترین همبستگی را با تبخیر نشان داده و تأثیر آنها بر میزان تبخیر بیشتر است. با توجه به مقادیر ضریب چولگی، دنباله کشیده توزیع سرعت باد در سمت راست و پارامترهای دیگر (درجه حرارت، رطوبت نسبی، تشعشع و تبخیر) در سمت چپ قرار دارد. همچنین ضریب چولگی درجه حرارت نسبت به دیگر پارامترها کمتر بوده و تقریباً از توزیع نرمال تبعیت می‌کند.

با توجه به مشکلات و محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری تبخیر به وسیله تشت تبخیر، در این تحقیق به منظور مدل‌سازی تبخیر، از روابط ریاضی و پارامترهای آماری دیگر اندازه‌گیری شده در همان ایستگاه هواشناسی استفاده شد. برای این منظور از ۵ رابطه ریاضی ارائه شده در جدول ۲، استفاده شد. ابتدا رابطه ریاضی موجود بین تبخیر و

دیگر پارامترهای هواشناسی به صورت جداگانه تعیین و با ترکیب آنها با یکدیگر، مدل سازی تبخیر روزانه در سه ماه تیر، مرداد و شهریور سال ۱۳۹۰ ایستگاه سد قوری چای انجام گرفته شد.

جدول ۲- روابط استفاده شده در این تحقیق

خطی	درجه دو	توانی	نمایی	لگاریتمی
$Y=aX+b$	$Y=aX^2+bX+c$	$Y=aX^b$	$Y=ae^b$	$Y=a\ln(x)+b$

در این تحقیق از الگوریتم بهینه سازی برنامه ریزی آرمانی (GP) به منظور تعیین ضرایب پارامترها استفاده شد (محمدی و همکاران، ۲۰۰۶). ضرایب به گونه ای محاسبه شدند که علاوه بر کاهش میزان خطا و افزایش همبستگی بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر واقعی، درصد خطا در تمامی روزهای ماه های مورد بررسی کمتر از ۳۰ درصد باشد. به منظور بررسی و تعیین بهترین مدل پیش بینی، از معیارهای خطا سنجی شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و همبستگی (R) بر اساس روابط زیر، استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z(x_i) - Z^*(x_i)|}{n} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \overline{Z(x_i)})(Z^*(x_i) - \overline{Z^*(x_i)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \overline{Z(x_i)})^2 \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - \overline{Z^*(x_i)})^2}} \quad (4)$$

همچنین برای نشان دادن برتری این روش نتایج حاصل با نتایج روشهای تجربی موجود برای تخمین تبخیر مقایسه شد. تاکنون کوششهای زیادی بعمل آمده است تا رابطه ها و معادله های عملی و ساده ای برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب ارائه شود (علیزاده، ۱۹۹۸). از جمله رابطه های ارائه شده که در مطالعات هیدرولوژی از آنها استفاده می شود، عبارتند از:

$$E = 0.35(e_s - e_d)(0.5 + U_2/100) \quad (5)$$

در این فرمول E تبخیر از سطح آزاد آب (میلی متر در روز)، e_s و e_d به ترتیب، فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب (بر حسب میلی متر جیوه) در دمای متوسط روزانه هوا (T) و U_2 سرعت متوسط روزانه باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (بر حسب میل در روز) می باشد.

برای استفاده از رابطه (۱)، ابتدا لازم است مقدار $e_s - e_d$ که بنام کمبود فشار بخار معروف است محاسبه شود. کمبود فشار بخار، با در دست داشتن متوسط دمای روزانه (T) و رطوبت نسبی (RH)، از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$e_s - e_d = 4.581 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] (1 - RH/100) \quad (6)$$

در این رابطه T بر حسب درجه سلسیوس، RH بر حسب درصد و $e_s - e_d$ بر حسب میلی متر جیوه می باشد.

نتایج

در این تحقیق به منظور بررسی و پیش‌بینی سری زمانی روزانه تبخیر در سه ماه تیر، مرداد و شهریور، توابع مختلف (خطی، درجه دو، توانی، نمایی و لگاریتمی) به همراه پارامترهای هواشناسی مختلف (درجه حرارت، سرعت باد، تشعشع و رطوبت نسبی) بررسی و با استفاده از الگوریتم برنامه ریزی آرمانی (GP)، ضرایب مدل‌ها تعیین شد. سپس به منظور ارزیابی و بررسی عملکرد مدل‌های مورد آزمون و تعیین میزان دقت مدل طراحی شده از سه پارامتر میانگین مطلق خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) استفاده شد و در نهایت با استفاده از این پارامترها، برای هر یک از سری‌های زمانی روزانه بهترین مدل تشخیص داده شد. جدول (۲) مدل‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مدل‌های ارائه شده به همراه ضرایب بهینه‌سازی شده برای هر یک از ماه‌های فصل تابستان در ایستگاه سد قوری‌چای

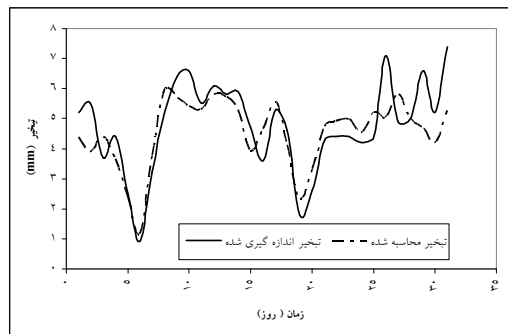
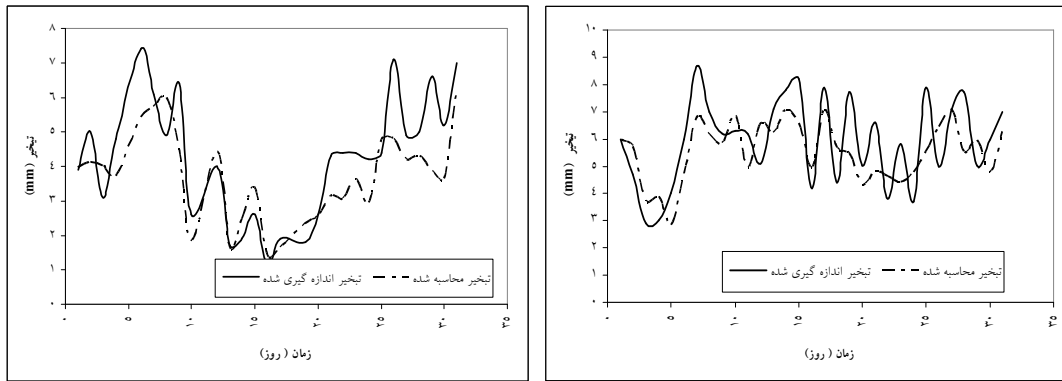
ماه	معادله
تیر	$E = (aW^2 + bW + c) + (dS^2 + eS + f) + (gLnH + h) + (iT \min^i) + (kT \max^k)$
مرداد	$E = (aW^2 + bW + c) + (dLnS + e) + (fLnH + g) + (hT \min^i) + (jT \max^k)$
شهریور	$E = (aW^2 + bW + c) + (dLnS + e) + (fLnH + g) + (hT \min^i) + (jT \max^k)$

مطابق با جدول ۲، تبخیر را می‌توان با استفاده از ۵ پارامتر سرعت باد، تشعشع، رطوبت نسبی، حداقل درجه حرارت و حداکثر درجه حرارت و توابع غیرخطی درجه دو، لگاریتمی و توانی بدست آورد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر سه ماه سرعت باد، رطوبت نسبی، درجه حرارت حداقل و درجه حرارت حداکثر دارای توابع یکسانی می‌باشند. همچنین به منظور بررسی کارایی و برتری مدل‌های ارائه شده، نتایج حاصل از آن با نتایج روش‌های تجربی نیز مقایسه شد. نتایج حاصل از این دو روش در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب توابع مختلف ریاضی به همراه ترکیب پارامترهای اندازه‌گیری شده نسبت به روش‌های تجربی بدست آمده در گذشته، برتر بوده و در هر سه ماه مورد بررسی تیر، مرداد و شهریور، میزان خطا کمتر و همبستگی بیشتری را بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده نشان داده‌اند.

جدول ۳- نتایج حاصل از توابع ریاضی و روش‌های تجربی برای هر یک از ماه‌های فصل تابستان

دوره مورد بررسی	نوع تابع	MAE	RMSE	R
تیر	توابع ریاضی	۱/۱۱	۱/۵۶	۰/۶۶
	روش عمومی (علیزاده، ۱۳۷۷)	۳/۸۷	۱۶/۹۱	۰/۴۷
مرداد	توابع ریاضی	۰/۹۲	۱/۳۱	۰/۸۱
	روش عمومی (علیزاده، ۱۳۷۷)	۲/۲۹	۷/۱۱	۰/۱۶
شهریور	توابع ریاضی	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷۹
	روش عمومی (علیزاده، ۱۳۷۷)	۳/۹۵	۱۷/۵۱	۰/۲۲

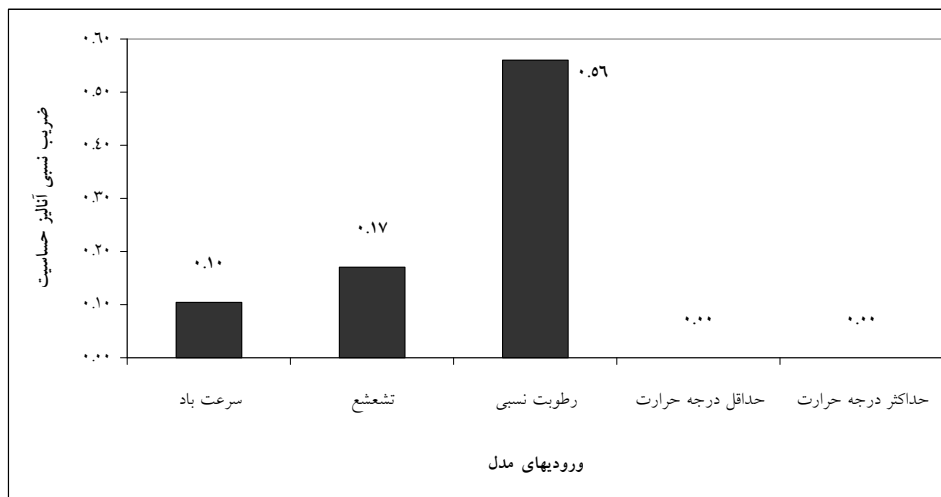
شکل ۱ نتایج حاصل از توابع ریاضی را به همراه مقادیر واقعی نشان می‌دهد. مطابق با این شکل توابع ریاضی در بخوبی توانسته تغییرات تبخیر را در بازه زمانی روزانه پیش‌بینی نماید.



شکل ۱- مقایسه نتایج حاصل از توابع ریاضی با مقادیر واقعی ایستگاه سد قوری چای، الف- تیر، ب- مرداد، ج- شهرپور

آنالیز حساسیت و تاثیر هر یک از پارامترها

بمنظور بررسی میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر مقدار محاسبه شده تبخیر از تشتک، از آنالیز حساسیت به روش هیل (۱۹۹۸) استفاده شد. در این روش هر بار یکی از پارامترهای ورودی به میزان ۱۰ درصد افزایش یافته و با ثابت نگاه داشتن مقادیر بقیه پارامترها، مقدار تبخیر با استفاده از توابع ریاضی محاسبه می‌گردد. سپس با توجه به اختلاف مقادیر محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، ضریب نسبی آنالیز حساسیت محاسبه شد. شکل ۱ ضریب نسبی آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف را در تیرماه نشان می‌دهد. مطابق باشکل زیر رطوبت نسبی بیشترین تغییر و حداقل و حداکثر درجه حرارت کمترین تغییر را نشان داده‌اند.



شکل ۲- مقادیر ضریب نسبی آنالیز حساسیت برای پارامترهای مختلف ورودی در تیرماه

نتایج و پیشنهادات

در این پژوهش پیش‌بینی زمانی پارامتر اقلیمی تبخیر با استفاده از توابع مختلف در ایستگاه تبخیرسنجی سدقوری چای مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که توابع ریاضی نسبت به روش‌های تجربی در تمامی ماه‌های فصل تابستان با دقت مناسب‌تری تغییرات تبخیر را پیش‌بینی می‌کند که می‌توان بدلیل ترکیب توابع و انعطاف‌پذیری توابع تناوبی دانست. با توجه به خودکارسازی ایستگاه‌های تبخیرسنجی و مشکلات عدیده‌ای که در ایستگاه‌های تبخیرسنجی برای اندازه‌گیری تبخیر وجود دارد، می‌توان این پارامتر را از مدل‌های ارائه شده بدست آورد. با توجه به وجود دو مولف قطعی و تصادفی در داده‌های تبخیر، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری با استفاده از توابع مختلف ریاضی و ترکیب آنها استفاده شود. با توجه به اینکه هر معادله برآورد کننده تبخیر در زمان و منطقه‌ای خاص و با شرایط آب و هوایی مربوط به آن محل و زمان استخراج می‌شود، لازم است که کارایی این معادلات جهت استفاده در مناطق و زمان‌های دیگر ارزیابی شود.

فهرست منابع

- علیزاده، ا.، ۱۳۷۸. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ یازدهم. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۶۲۲ ص
- مفتاح هلقی، م؛ پیری، م؛ حسام، م؛ دهقان، ا. ۱۳۸۸. تخمین تبخیر روزانه از تشت تبخیر با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، صفحه ۱-۷.
- Bruton, J. M., McClendon, R. W. and Hoogenboom, G. ۲۰۰۰. Estimating daily pan evaporation with artificial neural network. Trans. ASAE, ۴۳(۲), P. ۴۹۲-۴۹۶.
- Mohamadi, K., Eslami, H.R. and Kahawita, R. ۲۰۰۶. Parameter estimation of an ARMA model for river flow forecasting using goal programming, Journal of Hydrology, ۳۳۱, P. ۲۹۳-۲۹۹.
- Shalamu, A., Chunliang, C., King, Ph., Moreno, J. and Bawazir, S. ۲۰۱۰. Modeling of pan evaporation using partial least squares regression, Technological Sciences, ۵۴(۱), P. ۱۶۳-۱۷۴.

Estimation of Daily Pan Evaporation Using Multiple Regression Model and Goal programming

Siamak Sattari[\], Hamid Reza Eslami[^], Masoomeh eivazi[^]

[\]Chief of Ground Water Studies Group, Ardabil *Regional Water Authority*

[^]Director manager in PayeshgarTadbirAfzar Co.

[^]Head of Water Resource Department in PayeshgarTadbirAfzar

Masoomeh.eivazi@gmail.com

Abstract

Evaporation is an important component of the hydrologic cycle that its measurement and estimation is essential for water resource management, the design of reservoirs, and analysis of other hydrological variables. Due to interaction between various meteorology parameters, the estimation of evaporation is complicated. There are certain nonlinear relations for assessing the evaporation, if determine the true relationships, will lead high precision. In this study, using the daily data of station Sade ghoorichai in Ardebil Province and various mathematical functions, the daily rate of evaporation from Evaporation pan were modeled. The various combinations of daily climatic variables, i. e. minimum air temperature, maximum air temperature, minimum relative humidity, maximum relative humidity, wind speed and solar radiation was selected as the input parameters and evaporation was used as the output one. Goal programming (GP) was used to estimate coefficients and minimizing the error. Also using experimental formulae, the calculated rate of evaporation was compared to the results of mathematical models. To evaluate the effective input parameters on evaporation a sensitivity analysis was used. The results indicated in comparison with existing experimental relations, mathematical models have high percentage of accuracy. Moreover, air temperature and wind speed parameters, respectively have the most and the least impression on estimating the rate of evaporation from Evaporation pan.

Key words: Evaporation, Air Temperature, Relative Humidity, Wind speed, Solar Radiation, Goal Programming.