

نگرش ریاضی به نقش مؤلفه سرعت باد در رابطه فائو - پنمن - مونتیت برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع

محمد رضا حامی کوجه‌باغی^{1*}، امیرحسین ناظمی²، علی اشرف صدرالدینی²، رضا دلیر حسن‌نیا³

تاریخ دریافت: 94/02/09 تاریخ پذیرش: 94/09/25

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

3- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: abc.m.hami@gmail.com

چکیده

از دیدگاه ریاضی، رابطه فائو- پنمن- مونتیت، قالب یک تابع هموگرافیک را نسبت به متغیر سرعت باد دارد. تابع هموگرافیک دارای دو مجانب افقی و عمودی است. مجانب عمودی برای مقادیر منفی سرعت باد رخ می‌دهد ولی از آنجایی که علامت منفی در سرعت باد بیان‌گر جهت باد است و مقادیر مطلق کمیت‌ها در رابطه مورد استفاده قرار می‌گیرد، مجانب عمودی کاربردی ندارد. با افزایش سرعت باد از صفر، میزان تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد تا به یک مقدار حدی برسد. این مقدار حدی همان مجانب افقی تابع کسری رابطه فائو- پنمن- مونتیت هست. در این تحقیق اثر تغییرات سرعت باد بر میزان تبخیر-تعرق با توجه به قالب ریاضی رابطه فائو- پنمن- مونتیت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بدین منظور از آمار و اطلاعات ایستگاه سینوپتیک تبریز، اصفهان و رشت استفاده شد. نتایج نشان داد در رابطه فائو- پنمن- مونتیت، اثر سرعت باد بر روی میزان تبخیر و تعرق، به صورت غیرخطی هست و تغییرات در مقدار تبخیر و تعرق برای مقادیر مختلف سرعت باد در سرعت‌های کم باد، زیاد است و تبخیر-تعرق بیشتر تحت تأثیر سرعت باد قرار می‌گیرد و با افزایش سرعت باد، میزان تبخیر-تعرق به مقدار حدی یا مجانب تابع هموگرافیک میل نموده و شدت افزایش تبخیر-تعرق کمتر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تابع هموگرافیک، دیدگاه ریاضی، رابطه فائو- پنمن- مونتیت، سرعت باد، مقدار حدی

Mathematical View Point to the wind speed parameter role in the FAO Penman-Monteith Equation for Calculating ET_0

MR Hami Kouchebagi^{1*}, AH Nazemi², AA Sadraddini², R Delirhasannia³

Received: 29 April 2015 Accepted: 16 December 2015

¹- MSc Graduate of Irrigation and Drainage Engin., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

²- Professor, Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

³- Assistant Professor, Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: abc.m.hami@gmail.com

Abstract

From the mathematical point of view, the FAO Penman-Monteith equation shows a homographic function related to the wind speed. The homographic function has horizontal and vertical asymptotes. In this issue horizontal asymptote is applicable; because the vertical asymptote occurs for negative values of wind speed but the negative sign indicates the direction of the wind speed and only the absolute values of the quantities are used. By increasing wind speed from zero, evapotranspiration will increase until it reaches to a limited asymptote value. This value is the horizontal asymptote of the fractional function of FAO Penman Monteith equation. In this research the effect of wind speed variations on the evapotranspiration amounts was analyzed, with considering the mathematical framework of the Penman-Monteith equation. Meteorological data from three weather stations, including Tabriz, Isfahan and Rasht were used in this research. Results showed that in the FAO Penman-Monteith equation, wind speed effect on evapotranspiration is nonlinear and variation in evapotranspiration amounts is more at low wind speeds than high values of wind speeds. As a general result, evapotranspiration has tended to asymptote homographic function and the rate of increasing in evapotranspiration is reduced by wind speed increasing.

Keywords: Asymptote value, FAO Penman-Monteith, Homographic function, Mathematical point of view, Wind speed

تعرق گیاه منهای بارندگی مؤثر در طول فصل رشد آن است (ویلیامز 2001).

نیاز مداوم و مبرم به دانستن میزان تبخیر-تعرق، موجب ابداع روش‌های متعددی برای برآورد آن شده است. روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی، با توجه به محاسنی که دارد از دیرباز موردتوجه قرار گرفته و مدل‌های متعددی به-همین منظور توسعه‌یافته است. آنچه در برنامه‌ریزی-

مقدمه

یکی از حیاتی‌ترین نیازهای گیاهان در جهت رشد، تکامل و بقای آن‌ها آب هست. گیاهان آب موردنیاز خود را از طریق نزولات جوی دریافت می‌کنند در غیر این صورت انسان عمل آب رساندن به ناحیه ریشه گیاه را بر عهده می‌گیرد. برای محاسبه حجم آب آبیاری نیاز به دانستن میزان تبخیر - تعرق هست. مقدار آب موردنیاز به صورت طبیعی برابر با تبخیر

شاخص سطح آن 24 برابر ارتفاع گیاه باشد در نظر گرفته می‌شود (آلن و همکاران 1998).

اسلامی و قهرمان (1392) تحقیقی با موضوع تحلیل حساسیت و بررسی عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مدل‌های با ساختار ریاضی متفاوت انجام دادند. نتایج نشان داد که نااطمینانی داده‌ها در فصول سرد سال بیشتر از فصول گرم سال بوده و تمامی مدل‌های منتخب به دو پارامتر دمای بیشینه و کمینه T_{max} و T_{min} حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها داشتند. همچنین بیشترین ضریب همبستگی با مقدار $+0/52$ مربوط به جفت پارامتر بیشینه و کمینه رطوبت نسبی RH_{max} و کمترین آن با مقدار $+0/003$ مربوط به جفت پارامتر سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین و دمای بیشینه (U_2 و T_{max}) به دست آمد. یانگ و یانگ (2012) در بررسی روند تبخیر با استفاده از تشتک‌های تبخیر با مطالعه 54 ایستگاه هواشناسی طی یک دوره 40 ساله در کشور چین، کاهش قابل توجهی را در میزان تبخیر- تعرق مشاهده کردند که این تغییرات و کاهش روند را نتیجه نوسان میزان پارامترهایی چون سرعت باد، تابش دریافتی، دمای هوا و رطوبت نسبی دانستند. در محاسبه تبخیر- تعرق مرجع (ET_0)، مقدار هر دو عامل تبخیر و تعرق به صورت همزمان محاسبه می‌گردد و محاسبه جداگانه تبخیر و تعرق غیرممکن هست. ولی از آنجایی که در رابطه فائو- پنمن- مونتیث سطح وسیعی از زمین به طور کامل پوشیده از گیاه و به صورت یک برگ بزرگ در نظر گرفته می‌شود، در واقع بیشتر بر روی تعرق از گیاه تأکید شده است تا بر تبخیر از سطح خاک (آلن و همکاران 1998).

تعرق از سطح برگ به صورت عمده از دو منبع روزه‌ها و ترک‌های موجود در کوتیکول صورت می‌گیرد. این دو به صورت موازی باهم می‌باشند. مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده میزان تعرق از روزه‌ها، میزان باز بودن روزه‌ها هست. میزان باز بودن روزه‌ها تابع

های معمول پروژدهای آبی صورت می‌گیرد استفاده از مقادیر میانگین داده‌های ورودی هست (جنسن و همکاران 1990). طالبی و همکاران (1389) تحقیقی در زمینه بررسی عوامل مؤثر در تبخیر- تعرق مرجع، با استفاده از تحلیل حساسیت معادله فائو- پنمن- مونتیث و در سه ایستگاه یزد، طبس و مروست انجام دادند. نتایج این تحقیق نحوه اولویت‌بندی پارامترهای اقلیمی و میزان تأثیرگذاری آن‌ها را در ماه‌های مختلف سال در هریک از ایستگاه‌های مطالعاتی نشان داد. بر این اساس، تغییرات دو پارامتر بیشینه دما و سرعت باد در سال بیشترین تأثیر را در نوسانات تبخیر- تعرق در هر سه ایستگاه داشته است. همچنین ترتیب اولویت‌بندی عوامل مؤثر در تبخیر- تعرق در فصول مختلف متفاوت بود، به طوری که برای مثال در فصل بهار در هر سه ایستگاه دمای بیشینه، سرعت باد و دمای کمینه به ترتیب مؤثرترین عوامل بودند، در حالی که در فصل پاییز این ترتیب به صورت سرعت باد، دمای بیشینه و رطوبت نسبی تغییر یافت. بر اساس تحقیقات طالبی و همکاران (1389) دمای هوا و سرعت باد از مهم‌ترین عوامل در تعیین میزان تبخیر- تعرق با استفاده از فائو- پنمن- مونتیث هست. از آنجایی که دما هم به صورت مستقیم و هم به صورت غیر-مستقیم و در محاسبه سایر کمیت‌ها موردنیاز، در رابطه فائو- پنمن- مونتیث حضور دارد، نمی‌توان یک قالب ریاضی خاص برای آن لحاظ نمود ولی در مورد سرعت باد این‌گونه نیست و فرم تابع هموگرافیک مشهود است. طبق تحقیقات سانچز و همکاران (2011) در محاسبه میزان تبخیر- تعرق، نیاز به در نظر گرفتن جهت باد وجود ندارد و استفاده از مقدار عددی سرعت باد در میانگین‌گیری‌ها کفایت می‌کند. این معادله بر اساس روش‌های توازن انرژی و آیرودینامیک روی یک سطح مرطوب پوشیده از گیاه فرضی ارائه شده است. برای استفاده از این رابطه گیاه چمن به ارتفاع 12 سانتی‌متر و مقاومت روزه‌ای 70 ثانیه بر متر و ضریب بازتاب $0/23$ با این فرض که

مواد و روش‌ها

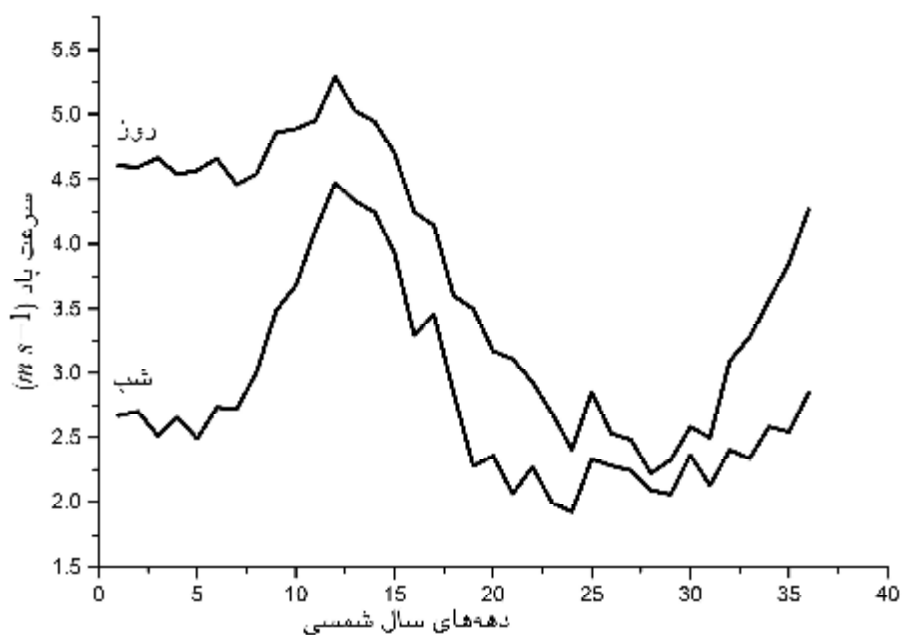
برای این پژوهش، از آمار و اطلاعات سه ایستگاه سینوپتیک برای دوره آماری 21 سال استفاده شد. ایستگاه سینوپتیک تبریز در طول جغرافیایی 46 درجه و 17 دقیقه شرقی و عرض 38 درجه و 41 دقیقه شمالی با ارتفاع 1361 متر از سطح دریا، ایستگاه سینوپتیک اصفهان واقع در طول جغرافیایی 51 درجه و 39 دقیقه شرقی و عرض 32 درجه و 381 دقیقه شمالی با ارتفاع 1570 متر از سطح دریا و ایستگاه سینوپتیک رشت واقع در طول جغرافیایی 49 درجه و 36 دقیقه شرقی و عرض 37 درجه و 18 دقیقه شمالی با ارتفاع 4 متر از سطح دریا واقع شده‌اند. خلاصه‌ای از مشخصات اقلیمی این ایستگاه‌ها در جدول 1 آمده است.

تغییرات سرعت باد در ارتفاع دو متر از سطح زمین بر اساس آمار برای هر سه ایستگاه استخراج گردید که در شکل 1 به‌طور نمونه برای ایستگاه تبریز در روز (از ساعت 6 تا 18) و شب (از ساعت 18 تا 6 صبح روز بعد) برای دوره‌های ده روزه ارائه شده است. از این داده‌ها برای محاسبه تبخیر - تعرق استفاده گردید.

عوامل متعددی است که سرعت باد جزء این عوامل هست به‌گونه‌ای که در سرعت‌های زیاد باد، روزنه‌های برگ، به‌علت تنش ناشی از سرعت باد بسته می‌شوند و تعرق از این طریق کاهش می‌یابد (ایرماک و موتیبوا 2009). تعرق از طریق کوتیکول وابسته به اختلاف فشار بخار آب در داخل برگ و لایه مرزی هوای چسبیده به سطح برگ (اختلاف پتانسیل فشار بخار) هست. با شروع به وزش باد و در سرعت کم باد، فشار بخار آب در لایه مرزی هوای چسبیده به سطح برگ کاهش می‌یابد و به‌تبع آن پتانسیل فشار بخار افزایش یافته و تعرق از این طریق بیشتر می‌گردد. وزش باد به‌خصوص در سرعت‌های بالا اثرات دیگری نیز بر روی برگ می‌گذارد. اول این‌که وزش باد باعث خنک شدن برگ و در نتیجه کاهش تعرق می‌گردد، همچنین وزش شدید باد باعث افزایش فشار بخار (به‌علت تلاطم) در داخل برگ می‌گردد. این دو در تضاد باهم قرار دارند و بسته به سایر شرایط جوی و گیاه، ممکن است وزش باد باعث کاهش و یا افزایش تبخیر - تعرق گردد. هدف از انجام تحقیق حاضر ایجاد یک نگرش ریاضی به شکل کلی رابطه فائو - پنمن - مونتیث برای محاسبه تبخیر - تعرق و تحلیل میزان تغییرات هر یک از پارامترها و اثرات آن بر مقادیر تبخیر - تعرق هست.

جدول 1- خلاصه‌ای از مشخصات اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز، اصفهان و رشت.

ایستگاه	میانگین رطوبت نسبی (%)	میانگین ساعات آفتابی	میانگین کمینه دما (°C)	میانگین بیشینه دما (°C)	میانگین سرعت باد (m s ⁻¹)
تبریز	52	8	7/6	12/7	3
اصفهان	41/5	8/8	9	23/4	4/8
رشت	81/3	4/7	11/3	20/6	2/8



شکل 1- تغییرات سرعت باد در دهه‌های مختلف در طول سال شمسی.

زمین (متر بر ثانیه)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع 2 متری (کیلو پاسکال)، D شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، g ضریب رطوبتی (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و G شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر مترمربع در روز) هست. جزئیات بیشتر از نشریه فائو 56 قابل استخراج است (آلن و همکاران 1998).

نگرش ریاضی

با نگرش ریاضی به رابطه فائو- پنمن - مونتیت، در اولین نگاه فرم تابع هموگرافیک نسبت به متغیر سرعت باد جلب نظر می‌کند. حالت کلی تابع هموگرافیک به صورت رابطه 2 هست:

$$f(x) = \frac{Ax + B}{Cx + D} \quad [2]$$

این تابع خود حالت خاصی از توابع کسری هست. حالت کلی اینگونه توابع به صورت رابطه 3 هست:

$$f(x) = \frac{p(x)}{g(x)} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n x^n}{\sum_{m=0}^{\infty} B_m x^m} \quad [3]$$

به منظور انجام تحلیل حساسیت نسبت به سرعت باد، داده‌های هواشناسی مربوط به دهه دوم (روز دهم تا روز بیستم) سال شمسی (مورد نیاز در رابطه 1) استفاده شد. علت استفاده از داده‌های این دوره زمانی وجود نوسانات زیاد سرعت باد در این دوره زمانی هست تا در انجام محاسبات، اعمال تغییر در مقدار سرعت باد، باعث ایجاد خطاهای زیاد در نتایج نگردد.

به منظور تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع از رابطه فائو- پنمن - مونتیت استفاده شده است. فرم کلی معادله به صورت معادله 1 هست:

[1]

$$ET_o = \frac{0.408D(R_n - G) + g \frac{890}{\Gamma + 273} U_2 (e_s - e_a)}{D + g(1 + 0.34U_2)}$$

که در آن ET_o تبخیر- تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n شار انرژی تابشی خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر مترمربع در روز)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (درجه سلسیوس)، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح

منظور از x در توابع فوق، سرعت باد است و منظور از $Y = f(x)$ ، تبخیر- تفرق گیاه مرجع یا ET_0 هست. با توجه به مطالب ذکر شده، تبخیر- تفرق گیاه مرجع دارای دو مجانب است. مجانب عمودی برای مقادیر منفی سرعت باد رخ می‌دهد ولی از آنجایی که علامت منفی در سرعت باد بیانگر جهت باد است و در تعیین میزان تبخیر- تفرق گیاهان از قدر مطلق سرعت باد استفاده می‌شود و مقادیر منفی سرعت باد بی‌معنی است. در نتیجه مجانب عمودی کاربردی ندارد و مجانب افقی قابل استفاده است. نمودار شکل 2 فرم عمومی رابطه 2 برای تبخیر- تفرق گیاه مرجع هست.

همان‌گونه که در شکل 2 دیده می‌شود، با افزایش سرعت باد از صفر، میزان تبخیر- تفرق افزایش می‌یابد تا به یک مقدار حدی برسد. این مقدار حدی همان مجانب افقی تابع کسری رابطه فائو- پنمن- مونتیت هست. افزایش میزان تبخیر- تفرق با افزایش سرعت باد u_2 به صورت خطی نیست و حالت مجانبی دارد در نتیجه شدت تغییرات تبخیر- تفرق در سرعت- های کم باد، بیشتر از میزان تغییرات تبخیر- تفرق در سرعت‌های زیاد باد هست.

به علت شیب کم این شاخه از منحنی، درکل میزان تغییرات تبخیر- تفرق به سبب سرعت‌های مختلف باد، به خصوص در سرعت‌های بالا زیاد نیست. شیب این شاخه را می‌توان با مشتق گرفتن از رابطه فائو- پنمن- مونتیت نسبت به سرعت باد، به دست آورد. با مشتق‌گیری از رابطه 2 رابطه 10 حاصل خواهد شد.

$$ET_0 \phi = \frac{AD - BC}{(Cx + D)^2} \quad [10]$$

که در آن $p(x)$ و $g(x)$ دو چندجمله‌ای بر حسب x می‌باشند. در صورتی که $n = m = 1$ باشد تابع هموگرافیک حاصل می‌شود (توماس 1988).

در مشابهت با رابطه فائو- پنمن- مونتیت، سرعت باد در ارتفاع 2 متری U_2 معادل کمیت متغیر x هست و سایر کمیت‌های ثابت در رابطه 3 عبارت‌اند از:

$$A = \frac{890g(e_s - e_a)}{T + 273} \quad [4]$$

$$B = 0.408D(R_n - G) \quad [5]$$

$$C = 0.34g \quad [6]$$

$$D = D + g \quad [7]$$

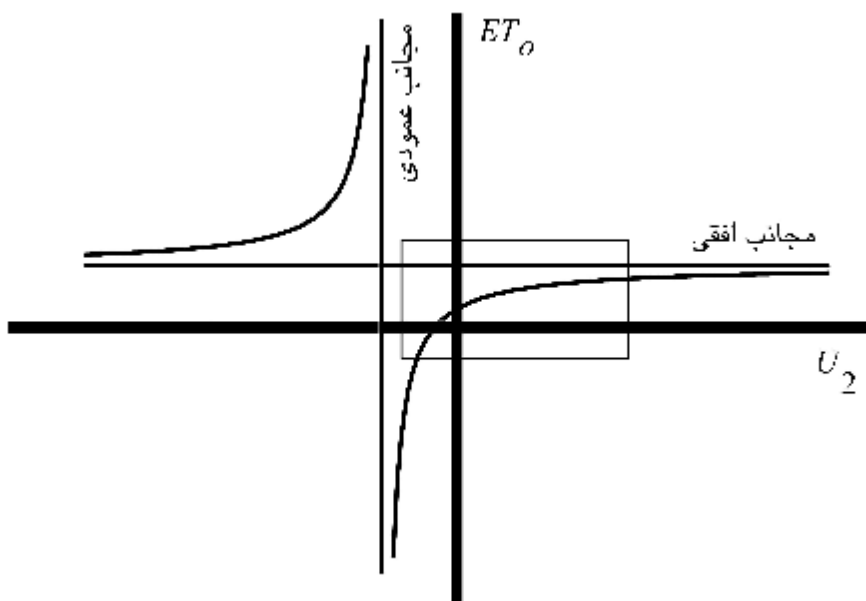
توابع هموگرافیک دارای دو مجانب افقی و عمودی است. مجانب عمودی زمانی مطرح می‌شود که مخرج کسر رابطه 2 برابر صفر شود در این صورت:

$$x = -\frac{D}{C} = -\frac{D+g}{0.34g} \quad [8]$$

چون D و g از نظر عددی مقادیر مثبت می‌باشند، این مجانب در سمت منفی محور x ها ($x < 0$) واقع خواهد شد. مجانب افقی نیز زمانی خودنمایی می‌کند که کمیت متغیر x به بی‌نهایت میل کند. با گرفتن حد از رابطه 2 رابطه 9 حاصل خواهد شد.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \frac{A}{C} \quad \text{پ} \quad Y = \frac{2617(e_s - e_a)}{T + 273} \quad [9]$$

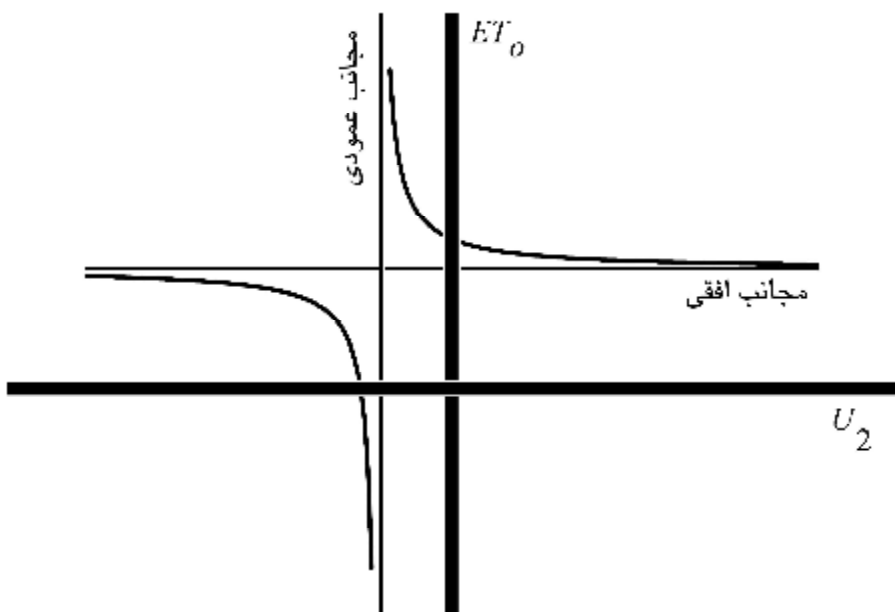
از آنجایی که فشار بخار اشباع e_s از نظر عددی معمولاً بیشتر از فشار واقعی بخار e_a هست در نتیجه حاصل رابطه 9 عدد مثبتی است و در سمت مثبت محور Y ها واقع می‌شود.



شکل 2- فرم عمومی رابطه کسری برای تبخیر- تعرق گیاه مرجع.

میزان تبخیر- تعرق کاهش خواهد یافت چنین حالتی در شکل 3 دیده می‌شود. کاهش میزان تبخیر- تعرق با افزایش سرعت باد در عمل رخ نمی‌دهد و اگر در محاسبه تبخیر- تعرق از طریق رابطه فائو- پنمن- مونتیث این نتیجه حاصل شود، دلیل بر اشکال در رابطه فائو- پنمن- مونتیث هست.

به علت وجود توان 2، مخرج رابطه 10 عدد مثبت هست. اگر صورت کسر نیز عدد مثبت باشد، شیب منحنی مثبت است. یعنی با افزایش سرعت باد، میزان تبخیر- تعرق افزایش می‌یابد اما اگر شرایطی پیش آید که صورت کسر رابطه 10 عدد منفی باشد ($AD < BC$) در این صورت با افزایش سرعت باد،



شکل 3- در صورتی که کسر در رابطه 10- عدد منفی باشد تبخیر- تعرق با سرعت باد رابطه عکس دارد.

جمله $AD - BC$ با جاگذاری مقادیر عبارت است از:

[11]

$$AD - BC = \frac{890g(D+g)(e_s - e_a)}{T + 273} - 0.139gD(R_n - G)$$

هرچند وجود شیب منفی در رابطه 11 دور از ذهن نیست اما در عمل g و D مقادیر بسیار کمی دارند (به عنوان مثال در منطقه مورد بررسی تبریز $D_{max} = 0.2$ و $g = 0.0573$ هست) که با ضرب شدن در عدد $0/139$ مقدار کل باز هم کوچکتر می-شوند. بنابراین به علت کوچک بودن عدد مربوط به جمله BC انتظار نمی رود در شرایط معمول آب و هوایی، شیب منفی در رابطه فائو- پنمن- مونتیت دیده شود (هرچند غیرممکن نیست).

از طرفی به ازای $x = 0$ (سرعت باد صفر) میزان ET_0 (تبخیر- تعرق) در حالت بدون باد تابع سایر کمیت های آب و هوایی هست و برابر است با رابطه 12:

$$ET_0 = \frac{B}{D} = \frac{0408(R_n - G)}{D+g} \quad [12]$$

این در صورتی است که وزش باد به صورت کامل وجود نداشته باشد. چنین شرایطی حالت خاص هست و ممکن است در گلخانه اتفاق افتد ولی در مزارع چنین حالتی رخ نمی دهد.

نتایج و بحث

با جمع بندی مطالب گفته شده با شروع وزش باد و در سرعت های کم باد، افزایش اختلاف پتانسیل فشار بخار به علت کاهش فشار بخار آب در لایه مرزی هوای چسبیده به سطح برگ ناشی از جابجایی هوا و همچنین افزایش فشار بخار آب در داخل برگ ناشی از تلاطم برگ، به وجود می آید و به تبع آن تعرق از برگ افزایش می یابد (ایرماک و موتیبوا 2009). در این حالت تعرق از طریق روزنه غالب هست. با افزایش سرعت باد، روزنه ها شروع به بسته شدن می نمایند همچنین فشار بخار آب در لایه مرزی هوای چسبیده به سطح برگ به یک مقدار ثابت می رسد و دیگر کم نمی شود و در نتیجه

افزایش اختلاف پتانسیل فشار بخار بین برگ و هوای سطح برگ با شیب کمتری افزایش می یابد. بنابراین با افزایش بیشتر سرعت باد، میزان تعرق با شیب کمتری افزایش می یابد و در نهایت در سرعت بی نهایت باد (منظور بی نهایت فیزیکی هست که مقداری محدود از نظر عددی هست)، میزان تعرق به یک مقدار ثابت که همان مقدار حدی یا مجانب افقی است می رسد. در این حالت میزان تعرق دیگر به سرعت باد وابسته نبوده و توسط سایر پارامترهای هواشناسی کنترل می گردد.

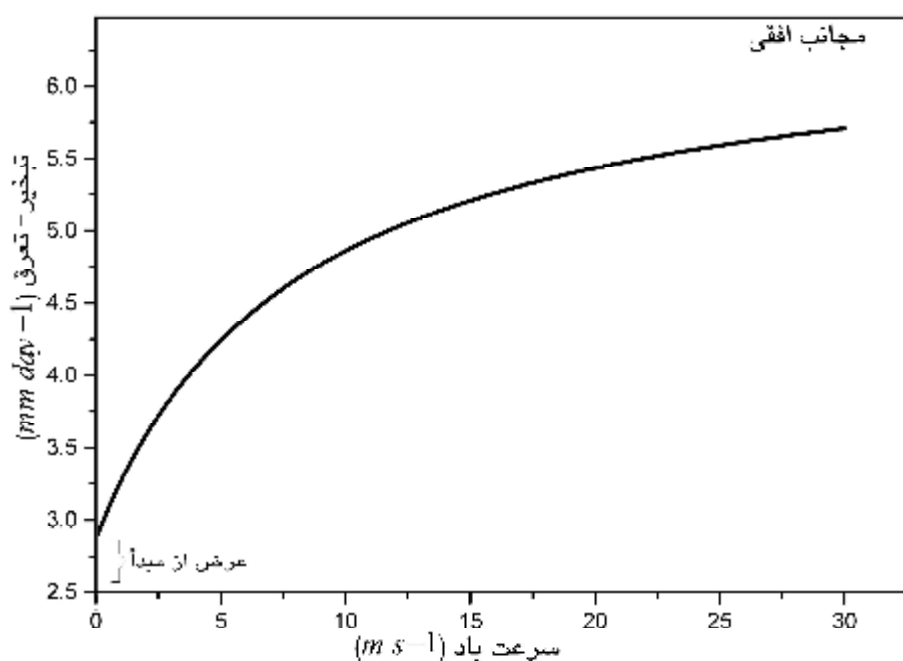
به عنوان نمونه ای از سه منطقه مورد بررسی، برای محاسبه تبخیر- تعرق از رابطه فائو- پنمن- مونتیت و از داده های هواشناسی موجود (مربوط به دهه دوم سال شمسی) برای ناحیه تبریز استفاده شد. در شکل 4 نحوه تغییرات تبخیر- تعرق بر حسب سرعت باد در ارتفاع دو متری در بازه صفر تا سی متر بر ثانیه (108 کیلومتر بر ساعت) در منطقه تبریز دیده می شود. علت انتخاب عدد سی متر بر ثانیه برای سرعت باد آن است که در طبیعت سرعت های بیش از 40 تا 50 متر بر ثانیه (معادل 145 تا 180 کیلومتر بر ساعت) باعث شکستن درختان می گردند (کالدول 1970) و بررسی تأثیر سرعت باد بر روی تبخیر- تعرق در بیشتر از این مقدار سرعت باد ضرورتی ندارد. مقدار حدی تبخیر- تعرق زمانی که سرعت باد به بی نهایت میل می کند برابر $6/48$ میلی متر در روز به دست آمد که به صورت مجانب افقی در شکل 5 نشان داده شده است.

در مطابقت با مطالب فوق، تبخیر- تعرق در ابتدا با شیب زیاد افزایش می یابد و با زیاد شدن سرعت باد در نهایت به یک حالت تقریباً افقی (با شیب بسیار کم) می رسد. باین حال مقدار حدی تبخیر- تعرق در سرعت بینهایت باد رخ می دهد. همچنین در شکل، بخشی با عنوان عرض از مبدأ نامیده شده است که میزان تبخیر- تعرقی است که در صورت عدم وزش باد اتفاق

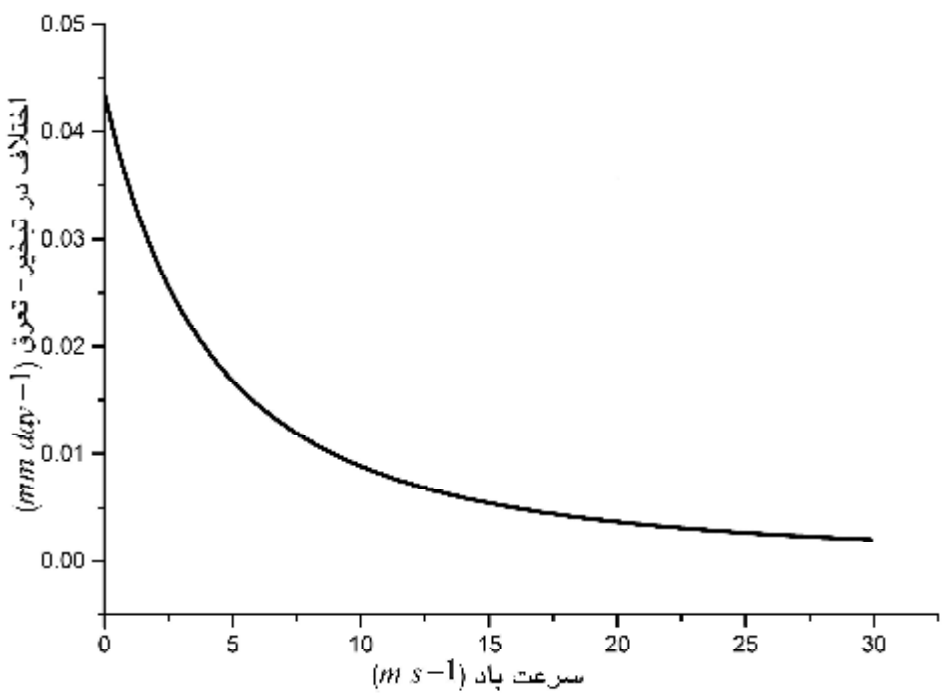
بر ثانیه به اندازه $0/04$ میلی‌متر در روز و به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد از 29 تا 30 متر بر ثانیه برابر $0/002$ میلی‌متر در روز هست. این بیان‌گر آن است که اثر تغییر به اندازه یک واحد در سرعت باد بر روی تبخیر- تعرق در سرعت‌های بالا، تا 20 برابر کمتر از اثر تغییر به‌اندازه یک واحد در سرعت باد بر روی تبخیر- تعرق در سرعت‌های پایین هست و تأثیر تغییرات در سرعت باد بر روی تبخیر- تعرق در سرعت‌های کم چشمگیرتر است.

می‌افتد و تابع سایر شرایط جوی نظیر دما و رطوبت هوا هست.

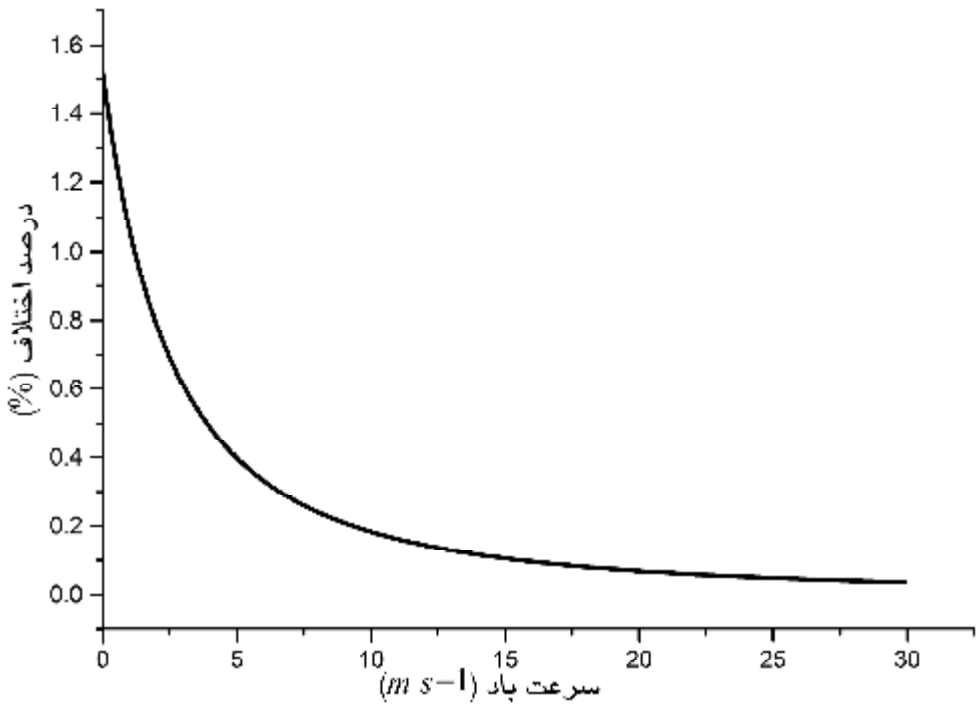
میزان تغییرات در مقدار تبخیر- تعرق بر حسب سرعت باد در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌گونه که گفته شد، میزان تغییرات در مقدار تبخیر- تعرق به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد در ابتدا زیاد است ولی با افزایش سرعت باد، میزان تغییرات به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد کمتر شده و به صفر میل می‌کند. میانگین میزان تغییرت در مقدار تبخیر- تعرق به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد از صفر تا یک متر



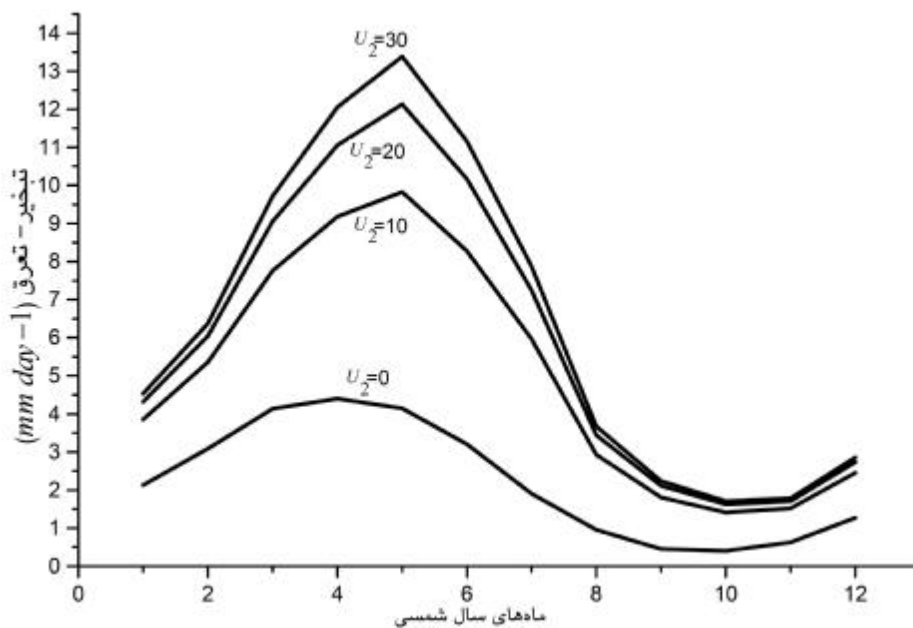
شکل 4- نحوه تغییرات تبخیر- تعرق برحسب سرعت باد بر اساس آمار ایستگاه سینوپتیک تبریز.



شکل 5- میزان تغییرات در مقدار تبخیر- تعرق بر حسب سرعت باد.



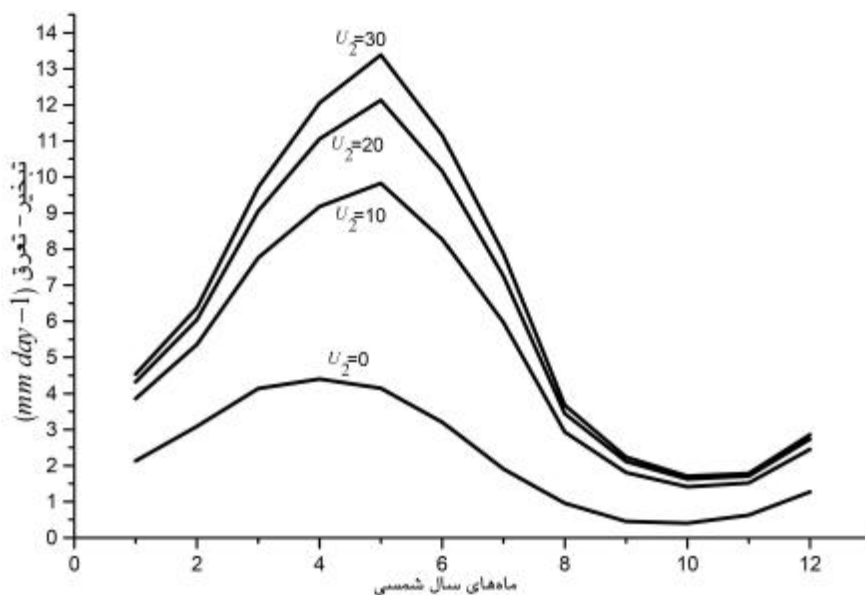
شکل 6- درصد تغییرات در میزان تبخیر- تعرق به ازای یک واحد تغییر در سرعت.



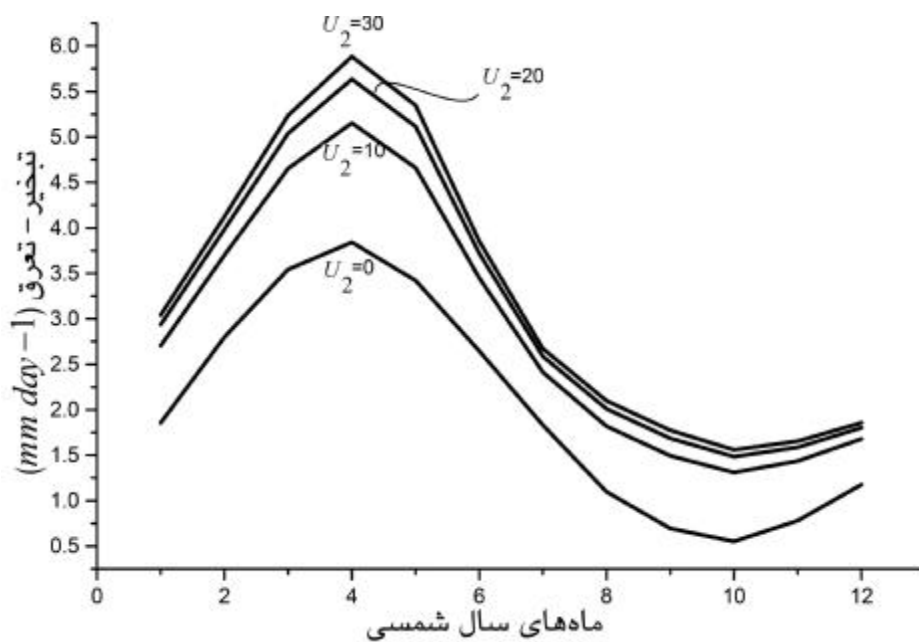
شکل 7- نحوه تغییرات تبخیر- تعرق به‌ازای چهار سرعت باد در تبریز.

برابر $0/036$ درصد هست. این بیان‌گر آن است که در این تحقیق، اثر تغییر به اندازه یک واحد در سرعت باد بر روی درصد تغییرات در میزان تبخیر- تعرق در سرعت‌های بالا، تا 36 برابر کمتر از اثر تغییر به اندازه یک واحد در سرعت باد بر روی درصد تغییرات در میزان تبخیر- تعرق در سرعت‌های پایین هست.

در شکل 6 درصد تغییرات در میزان تبخیر- تعرق به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد نشان داده شده است. میانگین میزان درصد تغییرت در مقدار تبخیر- تعرق به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد از صفر تا یک متر بر ثانیه به‌اندازه $1/29$ درصد و به‌ازای یک واحد تغییر در سرعت باد از 29 تا 30 متر بر ثانیه



شکل 8- نحوه تغییرات تبخیر- تعرق به‌ازای چهار سرعت باد در اصفهان.



شکل 9- نحوه تغییرات تبخیر- تعرق به‌ازای چهار سرعت باد در رشت.

مربوط به مردادماه و در اصفهان و رشت مربوط به تیرماه هست. بیشترین اختلاف میزان تبخیر- تعرق در تبریز نسبت به سرعت باد از صفر تا 10 متر بر ثانیه برابر $5/67$ میلی‌متر در روز، برای تغییر سرعت باد 10 تا 20 متر بر ثانیه برابر $2/31$ میلی‌متر در روز و برای تغییر سرعت باد 20 تا 30 متر بر ثانیه برابر $1/25$ میلی‌متر در روز به‌دست آمد. این مقدار تغییر در اصفهان به ترتیب برابر $7/27$ ، $3/10$ و $1/76$ و در رشت برابر $1/31$ ، $0/48$ و $0/25$ هست. درصد تغییر در تبخیر- تعرق در تبریز نسبت به افزایش سرعت باد از صفر به 10 متر بر ثانیه در مردادماه برابر $158/36$ درصد، برای افزایش سرعت باد از 10 به 20 متر بر ثانیه برابر $22/90$ درصد و برای افزایش سرعت باد از 20 به 30 متر بر ثانیه برابر $9/74$ درصد به‌دست آمد. این درصد تغییر تبخیر- تعرق در تیرماه برای اصفهان به‌ترتیب برابر $165/20$ درصد، $27/00$ درصد و $11/87$ درصد و برای رشت به‌ترتیب برابر $34/17$ درصد، $9/34$ درصد و $4/43$ درصد به‌دست آمد. همان‌گونه که دیده می‌شود، تأثیر باد بر روی تبخیر- تعرق در اصفهان بیشتر از

شکل‌های 7، 8 و 9 نحوه تغییرات تبخیر- تعرق به‌ازای چهار سرعت باد صفر، 10، 20 و 30 متر بر ثانیه برای هریک از مناطق تبریز، اصفهان و رشت است. طبق تحقیقات خام‌چین مقدم و رضائی پزند (1388) این نواحی به ترتیب معرف نواحی آب و هوایی نیمه‌خشک، خشک و مرطوب است. برای محاسبه میزان تبخیر- تعرق با استفاده از رابطه فائو- پنمن- مونتیث، از داده‌های میانگین آب و هوایی هر منطقه استفاده شد و به‌منظور بررسی تأثیر باد بر روی تبخیر- تعرق فقط سرعت باد تغییر داده شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود و انتظار می‌رفت، با افزایش سرعت باد، منحنی‌های تبخیر- تعرق به همدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. این اتفاق در هر سه ناحیه آب و هوایی اتفاق افتاده است که بیان‌گر کم شدن وابستگی تبخیر- تعرق به‌دست‌آمده از طریق رابطه فائو- پنمن- مونتیث به سرعت باد، با افزایش سرعت باد، در هر سه منطقه موردبررسی است. در مقایسه عددی سه ناحیه موردبررسی، برای تمامی سرعت‌های موردبررسی باد، بیشترین میزان تبخیر- تعرق در تبریز

تبخیر- تعرق هست. این مقدار تغییرات در تبخیر- تعرق حالت کلی بوده و ممکن است در مناطق مختلف مقداری تفاوت داشته باشد. این نتیجه تأییدکننده مطالب ارائه شده در بخش نگرش ریاضی است به این معنی که با افزایش سرعت باد از صفر، میزان تبخیر- تعرق افزایش می‌یابد تا به یک مقدار حدی برسد. از نظر فیزیولوژیکی نیز این کاهش اثر باد با افزایش سرعت آن، بر تبخیر- تعرق، به علت بسته شدن روزنه‌ها تحت تأثیر تنش ناشی از باد، در سرعت باد بالا قابل توجیه هست. حال آنکه در سرعت‌های کم باد و با شروع وزیدن آن، به علت کم شدن فشار بخار آب در هوای اطراف برگ بر اثر هم زدن لایه هوای چسبیده به سطح برگ، میزان تبخیر- تعرق به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد به خصوص این‌که در سرعت کم باد هنوز تنشی به گیاه وارد نشده است و روزنه‌ها باز می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، تأثیر سرعت باد بر روی میزان تبخیر- تعرق حاصل از رابطه فائو- پنمن- مونتیت، در مناطقی با رطوبت نسبی پایین بارزتر از تأثیر سرعت باد در مناطقی با رطوبت نسبی بالا هست.

سایر مناطق مورد بررسی است و به نظر می‌رسد علت آن کم بودن رطوبت نسبی در این شهر نسبت به سایر شهرهای مورد بررسی باشد (جدول شماره 1). از طرفی در میان مناطق مورد بررسی، شهر رشت کمتر از بقیه شهرها تحت تأثیر سرعت باد بود. به نظر می‌رسد علت این امر بالا بودن رطوبت در منطقه باشد. چراکه تأثیر عمده باد، ایجاد اختلاف پتانسیل رطوبت بین برگ و هوای چسبیده به برگ هست و در مناطق مرطوب، باد تأثیر کمتری در ایجاد این اختلاف پتانسیل ایفا می‌نماید.

نتیجه‌گیری کلی

در کل می‌توان نتیجه گرفت در رابطه فائو- پنمن- مونتیت، تغییرات در مقدار تبخیر- تعرق برای مقادیر مختلف سرعت باد در سرعت‌های کم باد، زیاد است و تبخیر- تعرق بیشتر تحت تأثیر سرعت باد قرار می‌گیرد و با افزایش سرعت باد، تأثیر این کمیت بر میزان تبخیر- تعرق کمتر می‌گردد. به طور عمومی میزان تغییرات در تبخیر- تعرق به ازای افزایش یک واحد در سرعت باد از صفر تا یک متر بر ثانیه، بر روی تبخیر- تعرق، تا بیست برابر بیشتر از اثر افزایش به اندازه یک واحد در سرعت باد از 29 تا 30 متر بر ثانیه، بر روی

منابع مورد استفاده

- اسلامی ا و قهرمان ب، 1392. آنالیز حساسیت و بررسی عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مدل‌های با ساختار ریاضی متفاوت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره 1، جلد 7، صفحه‌های 68 تا 79.
- طالبی ع، پورمحمدی س، رحیمیان م، 1389. بررسی عوامل مؤثر در تبخیر- تعرق مرجع، با استفاده از آنالیز حساسیت معادله فائو- پنمن- مونتیت، مطالعه موردی: ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست. نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، جلد 73، صفحه‌های 97 تا 110.
- خام‌چین مقدم ف و رضائی پزند ح، 1388. نقد روش اقلیم‌بندی دومارتن برای بارش حداکثر روزانه در ایران به کمک روش گشتاورهای خطی. مجله فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، دوره 2، شماره 2، صفحه‌های 93 تا 103.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
- Caldwell MM, 1970. Plant gas exchange at high wind speeds. Plant Physiology 46: 535- 537.
- Irmak S and Mutiibwa D, 2009. On the dynamics of stomata resistance: relationships between stomata behavior and micrometeorological variables and performance of Jarvis-type parameterization. Transactions of the ASABE 52(6): 1923-1939.
- Jensen ME, Burman RD and Allen RG, 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirement. ASCE Manual. USA 70, 332p.

- Sanchez I, Faci JM and Zapata N, 2011. The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. *Agricultural Water Management* 102: 13-24.
- Thomas GB and Finney RL, 1988. *Calculus and analytic geometry*, Seventh edition. Addition - Wesley.
- Williams LE, 2001. Irrigation of wine grapes in California. *Practical Winery & Vineyard* 23(1): 42-55.
- Yang H and Yang D, 2012. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. *Journal of Hydrology* 414-415: 184-193.