نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۱

ISSN 2251-7480

# بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب و عملکرد سیب‌زمینی با استفاده از تئوری آنالیز حاشیه‌ای

**پرویز فتحی[1*] و محمد سلطانی[2]**

۱*) استادیار گروه مهندسی آب؛ دانشگاه کردستان؛ ایران؛ نویسنده مسئول مکاتبات: p.fathi@uok.ac.ir

۲) کارشناس مهندسی آب؛ دانشگاه کردستان؛ کردستان؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۲۵

**چکیده**

بحران آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مسأله‌ای همه‌گیر است. در چنین شرایطی، ارزیابی واکنش گیاهان به تنش آبی و تخمین تابع تولید ضروری می‌نماید. ارتباط میان عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب محصول سیب‌زمینی در شرایط آبیاری قطره‌ای (زیرسطحی) با استفاده از آنالیز حاشیه‌ای تابع تولید مبتنی بر تبخیر و تعرق در این پژوهش بررسی شد. بدین منظور، این پژوهش در بهار ۸۸، در یکی از مزارع دشت دهگلان واقع در استان کردستان به اجرا درآمد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تیمار آب آبیاری (شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی) و در سه تکرار انجام شد. در خلال آزمایش مقادیر تبخیر و تعرق و عملکرد هر تیمار اندازه‌گیری شدند. تحلیل توابع تولید در دو حالت خطی و درجه دوم انجام گردید. نتایج نشان داد در حالتی‌که تابع، خطی و تبخیر و تعرق حداکثر است، شاخص الاستیسیته از نظر عددی معادل فاکتور واکنش عملکرد ($K_y$) می‌باشد و زمانی‌که تابع تولید درجه دوم است، مقدار تبخیر و تعرق مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر کارایی مصرف آب کم‌تر از تبخیر و تعرق لازم برای حصول عملکرد حداکثر می‌باشد. حداکثر عملکرد در تبخیر و تعرق ۳۴۵ میلی‌متر به دست آمد و حداکثر کارایی مصرف آب در تبخیر و تعرق ۲۲۲ میلی‌متر حاصل شد که ۵۵/۴ درصد از تبخیر و تعرق حداکثر کم‌تر است. درحالی که عملکرد حداکثر تنها ۲۷/۷ درصد بزرگ‌تر از مقدار عملکرد محصول در کارایی مصرف آب حداکثر بود. بررسی ارتباط میان تبخیر و تعرق، عملکرد و کارایی مصرف آب نشان داد که در صورت محدودیت منابع آبی، دستیابی به کارایی مصرف آب بیشینه استراتژی مناسبی در حفظ منابع آبی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آنالیز حاشیه‌ای؛ تابع تولید گیاه–آب؛ سیب‌زمینی؛ کارآیی مصرف آب

## مقدمه

با افزایش جمعیت، نیاز به استفاده از آب بیشتر شده و از آن‌جایی که بخش کشاورزی عمده‌ترین مصرف کننده آب به شمار می‌رود، هرگونه صرفه‌جویی در این بخش، کمک شایانی به صرفه‌جویی در منابع آب تلقی می‌شود. متوسط راندمان آبیاری در ایران حدود ۳۲ درصد و کارایی مصرف آب (WUE)[1] حدود ۰/۷ کیلوگرم بر متر مکعب است (قائمی و حسین‌آبادی، ۱۳۸۲). مقدار متوسط تولیدات محصولات کشاورزی سال ۱۳۸۲ حدود ۵۶ میلیون تن بوده و پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۰۰ به ۱۲۰ میلیون تن محصولات کشاورزی و ۱۵۰ میلیارد متر مکعب آب برای تولید همین مقدار محصول نیاز است. به عبارتی برای نیل به خودکفایی لازم است که WUE به حدود ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش یابد (قائمی و حسین‌آبادی، ۱۳۸۲).

[1] Water Use Efficiency

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L.*) از محصولات غده‌ای است که نقش مهمی در تغذیه انسان و دام دارد، در شرایط مختلف آب و هوایی کشت می‌شود و بعد از گندم، برنج و ذرت مقام چهارم تولید را به خود اختصاص داده و از نظر تعداد کشورهای تولیدکننده بعد از ذرت در مقام دوم قرار دارد (Ferreira and Goncalves, 2007). سطح زیر کشت سیب‌زمینی در جهان در سال ۲۰۰۵ میلادی در حدود ۱۹/۱ میلیون هکتار و تولید کل جهانی آن ۳۲۹ میلیون تن گزارش شده است. سطح زیر کشت سیب‌زمینی در ایران نیز در همان سال حدود ۱۸۰ هزار هکتار و تولید کل آن بالغ بر ۳۶۰۰۰۰۰ تن بوده است (FAO, 2005).

سیب‌زمینی در کنار گندم و یونجه از کشت‌های غالب در استان کردستان می‌باشد که بیش از ۹۵ درصد سطح زیر کشت آن در دشت‌های قروه و دهگلان قرار دارد. سطح زیر کشت سیب‌زمینی در استان در سال ۸۵ حدود ۹۷۰۰ هکتار تخمین زده شده است. استان کردستان با متوسط بارندگی ۵۱۷ میلی‌متر در سال و با پراکنش زمانی و مکانی نامناسب جزء مناطق نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. لذا تامین نیاز آبی سیب‌زمینی با روش‌های آبیاری قطره‌ای به دلایلی همچون حساسیت این محصول به تنش آبی، پایین بودن راندمان و یکنواختی پخش سایر روش‌های آبیاری و نیز کاهش نزولات آسمانی و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی موضوعی در خور اهمیت می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که با افزایش ۱۰ درصدی کارایی مصرف آب می توان حدود ۸/۵ میلیارد مترمکعب آب را در سطح کشور صرفه‌جویی نمود (فرشی، ۱۳۸۳).

فاکتور واکنش عملکرد گیاه نسبت به آب، کاربرد فراوانی در تحقیقات مرتبط با تابع تولید دارد. اما این فاکتور در توصیف روابط بین عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب، بویژه در توابع تولید درجه دوم کارایی خود را از دست می‌دهد. اساس تئوری آنالیز حاشیه‌ای توابع تولیدی که مبتنی بر تبخیر و تعرق هستند بر مبنای مقایسه تغییرات نسبی عملکرد به تغییرات نسبی تبخیر و تعرق در مقادیر آستانه‌ای صفر و یک می‌باشد. استفاده از این تئوری افزون بر نداشتن معایب استفاده از فاکتور واکنش عملکرد گیاه نسبت به آب، راهکاری مناسب در جهت شناخت جزئیات بیشتر روابط عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب و همچنین تعیین مقادیر بهینه اقتصادی و مدیریتی آب آبیاری در شرایط خشکسالی و محدودیت منابع آبی می‌باشد (Liu *et al*., 2002; Liu and Zhang, 2007; Mukherjee *et al*., 2012). تابع تولید گیاه- آب، رابطه ما بین سطوح مختلف آب مصرفی و مقدار محصول تولیدی را نشان می‌دهد که می‌تواند در ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. یکی از فرم‌های تابع تولید با استفاده از رابطه عملکرد و تبخیر و تعرق تجمعی فصل رشد محصول به دست می‌آید (Vaux and Pruitt,1983; Rao *et al*.,1988). بررسی تابع تولید محصولات مختلف نشان داده است که در اکثر آن‌ها عملکرد محصول تابعی خطی از تبخیر و تعرق می‌باشد (Sadras and Angus, 2006; Ferreira and Goncalves, 2007; Istanbulluoglu *et al*., 2009). نتایج پژوهش‌های محققان مختلف نشان داد در شرایطی که مقدار یا تعداد دفعات آبیاری افزایش یابد، عملکرد بعضی محصولات تابعی غیر خطی از تبخیر و تعرق خواهد بود (Lu *et al* 1995; Sandhu *et al*., 2002; Zwart and Bastiaanssen, 2004; Mukherjee *et al*., 2012). در این حالت نسبت هوا به آب در خاک کاهش یافته و به همین سبب از یک مقدار مشخص به بعد هر واحد افزایش در عملکرد با هر واحد افزایش در تبخیر و تعرق متناسب نمی‌باشد (Sarkar *et al*., 2008). در مطالعه‌هایی که بر روی محصولات پنبه، گندم و نیشکر انجام گردیده، گزارش شده که تابع درجه دوم بهترین توصیف از رابطه بین عملکرد و تبخیر و تعرق برای محصولات مورد مطالعه می‌باشد (Grimes *et al*.,1969; Gulati and Murty, 1979).

بررسی منابع و مقالات موجود و در دسترس نشان داد که در زمینه پروژه حاضر تحقیق مشابهی صورت نگرفته

است. هدف از این پژوهش بررسی رابطه بین عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب در گیاه سیب‌زمینی رقم مارفونا و تخمین تبخیر و تعرق لازم برای حصول مقادیر حداکثر از کارایی مصرف آب و عملکرد با استفاده از تئوری آنالیز حاشیه‌ای تابع تولید بر مبنای تبخیر و تعرق در دشت دهگلان بود.

**مبانی نظری**

مقدار محصول تولیدی علاوه بر مقدار آب آبیاری تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل نوع خاک و مقدار مواد مغذی آن، مشخصات گیاه و شرایط آب‌وهوایی می‌باشد. در این تحقیق با فرض ثابت بودن کلیه عوامل، عملکرد محصول به‌عنوان تابعی از تبخیر و تعرق فصلی محصول درنظر گرفته شده است. تئوری آنالیز حاشیه‌ای در واقع استفاده از مشتقات تابع تولید و استفاده از دو مفهوم کارایی مصرف آب حاشیه‌ای (MWUE)[۲] و شاخص الاستیسیته (EI)[۳] برای تشریح جزئیات بیشتر تابع تولید می‌باشد. از این تئوری می‌توان در شرایط کم‌آبیاری برای تعیین شرایط بهینه اقتصادی و مدیریتی محصولات آبی استفاده نمود (Liu *et al.*, 2002 ).

معادله ۱ کارایی مصرف آب در تولید را که بیانگر وزن ماده خشک تولید شده در ازاء مقدار آب مصرفی (تبخیر و تعرق) گیاه است نشان می‌دهد. معادله ۲ نیز بیانگر کارایی مصرف آب حاشیه‌ای که تغییر در میزان عملکرد را به ازاء هر واحد تغییر در مقدار تبخیر و تعرق نشان می‌دهد، است. این معادله ارائه دهنده روند دینامیک و متغیر کارایی مصرف آب در محدوده تغییرات تبخیر و تعرق می‌باشد (Hexem and Heady, 1978).

در مفاهیم اقتصادی درصد تغییرات متغیر وابسته به درصد تغییرات متغیر مستقل را شاخص الاستیسیته می‌نامند که در معادله ۳ بیان شده است (Liu *et al.*, 2002; Liu and Zhang, 2007).

$$WUE = \frac{Y}{ET} \qquad (۱)$$

$$MWUE = \frac{dY}{dET} \qquad (۲)$$

$$EI = \frac{dY/Y}{dET/ET} = \frac{MWUE}{WUE} \qquad (۳)$$

که در معادله‌های بالا، $Y$، عملکرد (وزن خشک) بر حسب کیلوگرم در هکتار و $ET$، میزان تبخیر و تعرق فصلی برحسب میلی‌متر می‌باشد.

۱. **تابع تولید خطی**: شکل کلی این تابع به صورت زیر می‌باشد:

$$Y = a_1 + b_1 ET \qquad (٤)$$

که در آن، $a_1 \prec 0$ (در برخی محصولات این مقدار صفر و یا مثبت است) و $b_1 \succ 0$: ضرایب رگرسیونی هستند که به ترتیب بر حسب کیلوگرم در هکتار و کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر می‌باشند.

فاکتور واکنش عملکرد گیاه نسبت به آب ($K_y$) با فرض خطی بودن تابع تولید با استفاده از معادله ۵ به دست می‌آید (Doorenbos and Kassam, 1979):

$$1 - \frac{Y}{Y_{max}} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{max}}\right) \qquad (۵)$$

که در آن، $Y_{max}$ عملکرد حداکثر (وزن خشک) بر حسب کیلوگرم در هکتار و $ET_{max}$، تبخیر و تعرق حداکثر بر حسب میلی‌متر می‌باشد. همچنین می‌توان $Y_{max}$ را بر پایه معادله ٦ محاسبه نمود.

$$Y_{max} = a_1 + b_1 ET_{max} \qquad (٦)$$

از ترکیب معادله‌های ۵ و ٦ معادله ۷ حاصل می‌گردد:

$$1 - \frac{Y}{Y_{max}} = \frac{b_1 ET_{max}}{a_1 + b_1 ET_{max}} \left(1 - \frac{ET}{ET_{max}}\right) \qquad (۷)$$

با مقایسه معادله ۷ با رابطه ۵ نمایان است که $\frac{b_1 ET_{max}}{a_1 + b_1 ET_{max}}$، فاکتور واکنش عملکرد گیاه را به دست می‌دهد. پس در تابع تولید خطی می‌توان فاکتور واکنش

[2] Marginal Water Use Efficiency
[3] Elasticity Index

عملکرد را مستقیما با استفاده از ضرایب رگرسیونی تابع به‌دست آورد.

۲. **تابع تولید درجه دوم**: شکل عمومی این تابع به صورت معادله ۸ می‌باشد.

$$Y = a_2 + b_2 ET + c_2 ET^2 \qquad (۸)$$

که در این معادله، $a_2$، $b_2$ و $c_2$ ضرایب رگرسیونی تابع می‌باشند. در معادله ۸ عملکرد حداکثر در $ET_{\max} = -\frac{b_2}{2c_2}$ به‌دست می‌آید. با استفاده از $ET_{\max}$ و نوشتن حالت نسبی معادله ۸ خواهیم داشت:

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = -c_2\left(\frac{ET_{\max}^2}{Y_{\max}}\right)\left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right)^2 \qquad (۹)$$

در این حالت فاکتور واکنش عملکرد برای تابع تولید درجه دوم ($K_{Yq}$) به شکل معادله ۱۰ خواهد بود:

$$K_{Yq} = -c_2\left(\frac{ET_{\max}^2}{Y_{\max}}\right) \qquad (۱۰)$$

بر خلاف تابع تولید درجه اول، کمبود عملکرد نسبی ($1 - Y/Y_{\max}$)، در فرم درجه دوم تابع تولید متناسب با توان دوم کمبود تبخیر و تعرق نسبی ($1 - ET/ET_{\max}$) بوده و دارای تغییرات غیرخطی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

به منظور استخراج تابع تولید و نیز بررسی تأثیر آب آبیاری بر عملکرد محصول سیب‌زمینی رقم مارفونا، آزمایش صحرایی در بهار سال ۱۳۸۸ در یکی از مزارع کشاورزی واقع در دشت دهگلان انجام شد. pH و $ET$ آب آبیاری به ترتیب ۷/۴۹ و ۰/۵۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. بافت خاک مزرعه مورد مطالعه رس سیلتی اندازه‌گیری گردید. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در جدول شماره ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام پژوهش

| عمق ($cm$) | هدایت الکتریکی ($ds/m$) | pH | درصد نیترات | درصد رس | درصد سیلت | درصد شن |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰-۲۰ | ۱/۱۰ | ۷/۹۹ | ۰/۰۸ | ٤٥ | ٤٤ | ۱۱ |
| ۲۰-٤۰ | ۱/۱۰ | ۸/۱۱ | ۰/۰۷ | ٤۷ | ٤٤ | ۹ |
| ٤۰-٦۰ | ۰/۹۲ | ۸/۱۸ | ۰/۰۷ | ٥۱ | ٤۲ | ۷ |

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد که شامل چهار تیمار آبی (٦۰ ، ۸۰ ، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی گیاه) با ۳ تکرار بود. ابعاد کرت‌های مورد استفاده به‌صورت ۱۰ متر طول و ۳ متر عرض بود که در داخل هر کرت ۳ خط کشت به فواصل ۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور حذف اثرات حاشیه‌ای فواصل مابین کرت‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. در این طرح برای آبیاری تیمارهای مختلف از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده گردید. برای این منظور از نوارهای آبیاری قطره‌ای به طول ۱۰ متر و قطر داخلی ۱٦ میلی‌متر با فاصله قطره‌چکان‌های ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد که به‌صورت دفنی و در عمق ۱۰ سانتی‌متری پشته جایگذاری گردید. اندازه‌گیری مقدار آب آبیاری توسط کنتور حجمی و کنترل آن توسط شیرهای پلی‌اتیلنی انجام گرفت. برای محاسبه نیاز آبی گیاه از داده‌های تشت تبخیر کلاس $A$ مستقر در مزرعه استفاده شد. دور آبیاری نیز ثابت و برابر دو روز انتخاب گردید. تمام عملیات زراعی مانند وجین، کوددهی و سم‌پاشی به‌طور یکسان و در هر واحد آزمایشی انجام

گرفت. قبل از کاشت، غده‌ها با قارچ‌کش سیستمیک مانکوزب (پودر وتابل ۸۰ درصد) آغشته شدند. مصرف کودهای لازم بر مبنای توصیه کودی حاصل از انجام آزمایش بر نمونه خاک محل مورد مطالعه صورت گرفت. نیمی از کود اوره توصیه شده در هنگام کاشت و مابقی با استفاده از تانک کود و تزریق آن به داخل سیستم نوارهای آبیاری قطره‌ای در زمان شروع غده‌دهی سیب‌زمینی در اختیار گیاه قرار داده شد. در انتهای فصل رشد مقادیر عملکرد غده تیمارهای مختلف اندازه‌گیری گردید و به منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، برداشت از ٦ متر وسط خط کشت میانی هر تیمار انجام شد. با استفاده از داده‌های عملکرد و مقادیر تبخیر و تعرق، تابع تولید گیاه سیب‌زمینی بر مبنای تبخیر و تعرق و در دو حالت خطی و درجه دوم استخراج گردید. همچنین با استفاده از توابع تولید به‌دست آمده، مقادیر کارایی مصرف آب، کارایی مصرف آب حاشیه‌ای، شاخص الاستیسیته و فاکتور واکنش عملکرد گیاه در مقادیر مختلف تبخیر و تعرق محاسبه گردید. در این تحقیق برای انجام محاسبات از صفحه گسترده *Excel* استفاده شد.

**نتایج و بحث**

مقادیر میانگین عملکرد و تبخیر و تعرق تیمارهای مختلف در جدول شماره ۲ نمایش داده شده است. این جدول نشان می‌هد که در تیمارهای ۳ و ۱ به ترتیب بیشترین و کم‌ترین عملکرد غده سیب‌زمینی به دست آمده است.

جدول ۲- مقادیر میانگین عملکرد و تبخیر و تعرق در تیمارهای مختلف

| تیمارهای آبیاری | تبخیر و تعرق (میلی‌متر) | عملکرد (کیلوگرم در هکتار) |
|---|---|---|
| ۱ | ۲۱۷ | ٥٩٠٦٦ |
| ۲ | ۲۸۸ | ٦٧٧٦٦ |
| ۳ | ۳٦٠ | ٨٢٤٠٠ |
| ٤ | ۳۹۰ | ٦٩٢٠٠ |

**الف) تابع تولید خطی**

شکل ۱ معادله تابع تولید خطی بر اساس تبخیر و تعرق می‌باشد که از برازش بهترین خط عبوری از میان داده‌های تبخیر و تعرق در مقابل عملکرد به دست آمد:

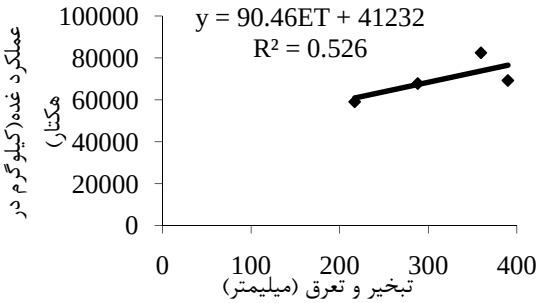
$$Y = ۴۱۲۳۲ + ۹۰/۴۶ET \qquad R^۲ = ۰/۵۲۶ \qquad (۱۱)$$

با توجه به رابطه ۷ و استفاده ازمعادله ۱۱، فاکتور واکنش عملکرد در این‌حالت $K_y = ۰/۴۴$ محاسبه گردید. مقادیر کارایی مصرف آب، کارایی مصرف آب حاشیه‌ای و شاخص الاستیسیته به ترتیب با استفاده از معادله‌های ۱۲ الی ١٤ محاسبه شدند و نمودار تغییرات آن-ها در مقابل تبخیر و تعرق به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

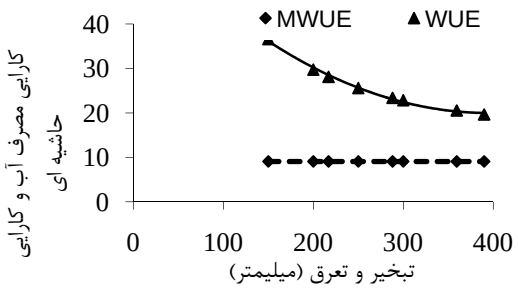
$$WUE = \frac{۴۱۲۳۲}{ET} + ۹۰/۴۶ \qquad (۱۲)$$

$$MWUE = ۹۰/۴۶ \qquad (۱۳)$$

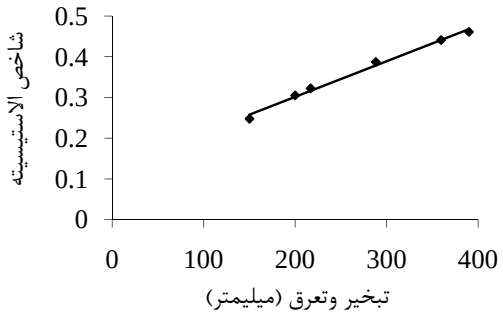
$$EI = \frac{۹۰/۴۶ET}{۴۱۲۳۲ + ۹۰/۴۶ET} \qquad (۱٤)$$




شکل ۱- نمودار تابع تولید خطی سیب‌زمینی




شکل ۲- نمودار تغییرات کارایی مصرف آب و کارایی مصرف آب حاشیه‌ای در مقابل تبخیر و تعرق




شکل- نمودار تغییرات شاخص الاستیسیته در مقابل تبخیر و تعرق

با توجه به شکل ۲ نمایان است که MWUE دارای مقداری ثابت و برابر با $b_1$ (ضریب ET در معادله ٤) می‌باشد که در صورتی که $a_1 \prec ۰$ (عرض از مبدأ معادله ٤) به‌شکل یک مجانب برای هذلولوی WUE عمل می‌نماید. در این‌حالت ($a_1 \prec ۰$) با افزایش ET، WUE نیز افزایش می‌یابد و اگر $a_1 \succ ۰$ باشد، آن‌گاه با افزایش ET، مقدار WUE کاهش می‌یابد. اگر $a_1 = ۰$ باشد آن‌گاه مقادیر WUE و MWUE با هم برابر می‌شوند. لذا در توابع خطی روند تغییرات مقادیر کارایی مصرف آب در دامنه تبخیر و تعرق کاملا تحت تأثیر عرض از مبدأ تابع می‌باشد و فاکتور واکنش عملکرد گیاه ($K_y$) در تبخیر و تعرق حداکثر از نظر عددی با شاخص الاستیسیته برابر می‌باشد.

**ب ) تابع تولید درجه دوم**

در برازش معادله درجه دوم بر مقادیر عملکرد غده و تبخیر و تعرق، تابع تولید بر مبنای تبخیر و تعرق به شکل زیر به‌دست آمد:

$$Y = -۱/۰۸۲ET^۲ + ۷۴۶/۷۸ET - ۵۳۲۵۹۸ \quad (۱۵)$$

$$R^۲ = ۰/۶۸۶$$

با استفاده از معادله ۱۰، مقدار فاکتور واکنش عملکرد محصول سیب‌زمینی $K_{Yq} = ۱/۷$ به‌دست آمد. شکل نسبی تابع تولید درجه دوم به صورت معادله ١٦ می‌باشد.

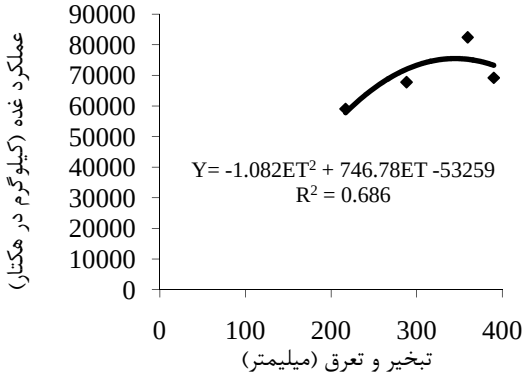
$$۱ - \frac{Y}{Y_{max}} = ۱/۷\left(۱ - \frac{ET}{ET_{max}}\right)^۲ \quad (۱۶)$$

بر مبنای معادله ۱۵، کارایی مصرف آب، کارایی مصرف آب حاشیه‌ای و شاخص الاستیسیته به شکل معادله‌های ۱۷ تا ۱۹ به‌دست آمده و نمودار تغییرات آن‌ها در مقابل تبخیر و تعرق در شکل‌های ٤ تا ٦ نمایش داده شده است.

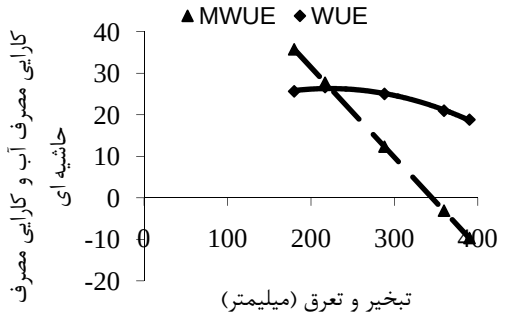
$$WUE = -\frac{۵۳۲۵۹}{ET} + ۷۴۶/۷۸ + (-۱/۰۸۲)ET \quad ۱۷$$

$$MWUE = 746/78 + (-2/164)ET \quad ۱۸$$

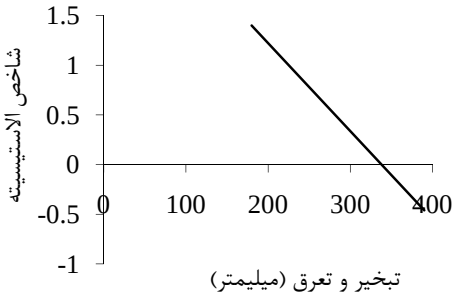
$$EI = \frac{۷۴۶/۷۸ET + (-۲/۱۶۴)ET^۲}{-۵۳۲۵۹ + ۷۴۶/۷۸ET + (-۱/۰۸۲)ET^۲} \quad ۱۹$$




شکل ٤- نمودار تابع تولید درجه دوم سیب‌زمینی




شکل ۵- نمودار تغییرات کارایی مصرف آب وکارایی مصرف آب حاشیه‌ای در مقابل تبخیر و تعرق




شکل ٦- نمودار تغییرات شاخص الاستیسیته در مقابل تبخیر و تعرق

فاکتور واکنش عملکرد در شرایط تابع تولید خطی ( $K_y$ ) کوچک‌تر از مقدار آن در حالت درجه دوم تابع تولید ( $K_{Yq}$ ) می‌باشد. مقدار فاکتور واکنش عملکرد در حالتی که تابع تولید به صورت درجه دوم انتخاب شد، ۱/۷ به‌دست آمد. این مسأله نشان می‌دهد که در این حالت حساسیت گیاه نسبت به میزان آب مصرفی بیشتر بوده و تابع تولید درجه دوم جزئیات بیشتری از روابط تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب و عملکرد را نشان می‌دهد. همچنین شکل درجه دوم تابع تولید دارای ضریب همبستگی بالاتری است لذا نتایج حاصل از تحلیل آن به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. گزارش‌های سایر پژوهشگران نیز در خصوص برخی گیاهان از قبیل گندم، جو و چغندرقند (Grimes *et al.*, 1969; Gulati and Murty, 1979)، جو (Liu *et al.*, 2002; Liu and Zhang, 2007)، گندم، برنج، پنبه و جو (Zwart and Bastiaanssen, 2004)، پیاز (Sarkar *et al.*, 2008) و گوجه‌فرنگی (Mukherjee *et al.*, 2012) بیانگر آن بود که تابع درجه دوم توصیف بهتری از روابط تبخیر و تعرق–عملکرد را به دست می‌دهد. بررسی مقادیر شاخص الاستیسیته در حدود آستانه‌ای صفر و یک نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت آبی، حداکثر کارایی مصرف آب برای سیب‌زمینی درحالت زیر به‌دست می‌آید:

$WUE_{\max} = 26/6 (kg/m^3)$ $\quad ET = ۲۲۲ (mm)$

$Y = ۵۹۲۰ (kg/ha)$ $\quad EI = 1$

و عملکرد حداکثر نیز در شرایط زیر به وقوع می‌پیوندد:

$Y_{\max} = ۷۵۵۹۳ (kg/ha)$ $\quad ET_{\max} = ۳۴۵ (mm)$

$WUE = ۲۱/۹ (kg/m^۳)$ $\quad EI = ۰$

در بررسی ارتباط میان شاخص‌های $ET$، $Y$، $WUE$ و $EI$ نمایان گردید که حداکثر کارایی مصرف آب در عملکرد ماکزیمم به دست نمی‌آید و تبخیر و تعرق حداکثر نیز از میزان تبخیر و تعرقی که حداکثر کارایی مصرف آب را به دنبال دارد، ۵۵/٤ درصد بیشتر می‌باشد، درحالی‌که میزان عملکرد در تبخیر و تعرق حداکثر نسبت به عملکرد در کارایی مصرف آب حداکثر، تنها ۲۷/۷ درصد افزایش نشان می‌دهد. در بررسی ارتباط میان شاخص‌های بالا برای گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از روش آنالیز حاشیه‌ای تابع تولید نتایج مشابهی حاصل شده است، به‌طوری‌که عملکرد در تبخیر و تعرق حداکثر فقط ۲۲ درصد بزرگ‌تر از عملکرد در نقطه کارایی مصرف آب ماکزیمم بود (Mukherjee *et al.*, 2012).

**نتیجه‌گیری**

تئوری آنالیز حاشیه‌ای تابع تولید ابزاری سودمند در تعیین رابطه دینامیک میان $ET$، $Y$ و $WUE$ می‌باشد. در صورتی‌که تابع تولید بر اساس تبخیر و تعرق، خطی باشد، می‌توان فاکتور واکنش عملکرد گیاه را –که برای گیاهان مختلف ارائه شده است (Doorenbos and Kassam, 1979)– با قرار دادن تبخیر وتعرق حداکثر در معادله شاخص الاستیسیته به دست آورد. در حالتی‌که تابع بر اساس تبخیر و تعرق، از نوع درجه دوم باشد نیز فاکتور واکنش عملکرد گیاه به شکل مستقیم قابل محاسبه می‌باشد، اما مقدار آن در بازه کمبود تبخیر و تعرق تغییر می‌نماید. در این‌حالت تبخیر و تعرق لازم برای دستیابی به کارایی مصرف آب حداکثر از تبخیر و تعرق لازم در نقطه عملکرد حداکثر کم‌تر می‌باشد. برای حفظ منابع آب و تولید اقتصادی در کشاورزی تحلیل روابط میان $ET$، $Y$ و $WUE$ برای یک گیاه مشخص، با استفاده از توابع تولید تبخیر و تعرق

اطلاعات بسیار کامل‌تری در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. در صورتی‌که آب عامل محدود کننده تولید باشد، آن‌گاه دستیابی به کارایی مصرف آب حداکثر مطلوب می‌باشد و در غیر این‌صورت رسیدن به عملکرد حداکثر مورد نظر می‌باشد.

**فهرست منابع**


رضایی،ع. م. و سلطانی، ا. ۱۳۷۵. زراعت سیب زمینی(ترجمه). انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۱۷۹ صفحه.

کشاورز، ع. و صادق زاده، ک .۱۳۷۹. مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

فرشی، ع.۱۳۸۳.مصرف بهینه آب کشاورزی. اولین همایش بررسی مشکلات شبکه های آبیاری، زهکشی و مصرف بهینه آب کشاورزی، گوهران کویر، صفحات ۳٤-۳٦.

وزارت جهاد کشاورزی.۱۳۸٦.اداره کل آمار و اطلاعات، معاونت برنامه ریزی و بودجه. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۸۵-۱۳۸٦.

Doorenbos, J., Kassam, A. H. 1980. Yield response to water. Irrigation and Drainage Bulletins 33.Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, 5-45.

Grimes, M.J., Yamada, H., Dickens, WL., 1969. Function for cotton production from irrigation and fertilizer variables. I. Yield and evapotranspiration. Agron. J. 61 (5), 769-773.

Gulati, H.S.,Murty, V. V.N., 1979. A model for optimal allocation of canal water based on crop production functions. Agric. Water Manage. 2 (1), 79-91.

FAO. 2005. Fao statistical databases. Available online at:http:/apps.fao.org.

Hexem, R. W., Heady, E.O. 1978. Water production functions for irrigated agriculture. Iowa State University Press, Ames, IA, 215 pp.

Liu, W. Z., Hunskar, Li, Y. S., Xie, X. Q. and Wall, G. W. 2002. Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency from marginal analysis of water production function. Agriculture Water management. 56(2): 143-151.

Liu, W. Z., Zhang, X. C. 2007. Optimization water and fertilizer input using an elasticity index: A case study with maize in the loess plateau of china. Field Crop Research. 100: 302-310.

Mukherjee, A., Sarkar, S., Chakraborty, P. K. 2012. Marginal analysis of water productivity function of tomato crop grown under different irrigation regimes and mulch managements. Agriculture Water Management. 104: 121-127.

Lu, D. Q., Liu, J., Li, Y. and Dige, w. J. 1995. The interaction between fertilizer and water and their coupled model. Acta Agriculture. Boreali – occidentalis Sin. 4(3):10-15.

Rao. N. H. and Sarma, P. B. S. 1988. A simple dated water production function for use in irrigated agriculture. Agriculture Water Management, 13-25.

Sadras, V. O., Angus, J. F. 2006. Benchmarking water use efficiency of rainfed wheat in dry environments. Australian Journal of Agriculture Research. 57: 847-856.

Sandhu, K. S., Arora, V. K. and Chand, R. 2002. Magnitude and economics of fertilizer inputs. Exp. Agriculture. 38(1): 65-78.

Vaux. J. R., Pruitt, W. O. 1983. Crop-water production functions. In: Hillel, D. (Ed), Advances in Irrigation , 2. Academic Press, New York, 61-67.

ISSN 2251-7480

# Optimization of water use efficiency and yield in potato using marginal analysis theory

**Parviz fathi[1*] and Mohammad soltani[2]**

1[*]) Assistant professor, Department of Water Engineering, University of Kurdistan
Corresponding author email: p.fathi@uok.ac.ir
2) B.Sc. of Water Engineering, Kurdistan, Iran

Received: 04-08-2012 Accepted: 16-12-2012

**Abstract**

Water scarcity is a widespread problem in arid and semi arid regions. In this condition, evaluating crop response to water stress and estimation of ET production function (ETPF) is essential. The objective of this study was to investigate the dynamic interrelations of yield, evapotranspiration and water use efficiency of potato (*Solanum Tuberosom L.*) under trickle irrigation condition. This study was conducted in Dehgolan region of Kurdistan province in spring season of 1388. The experiment was arranged based on completely randomized block with 3 replication of water supply (60%, 80%, 100%, 120% of crop water requierment). In this study, evapotranspiration values and total yield of treatments were measured. To reveal the interrelations of yield, evapotranspiration and water use efficiency, two types of water production function including: Linear and Quadratic were used. The results showed that when the ETPF is linear, the EI will be numerically equal to the yield response factor ($K_y$), when ET reaches maximum ET ($ET_m$). When ETPF was quadratic, the ET needed to maximize WUE is less than the ET for maximum yield ($Y_m$). The results were also revealed that maximum yield was achieved at 345 mm of evapotranspiration and maximum water use efficiency (26.6 kg/m$^3$) was achieved at 222 mm of evapotranspiration where 55.4 percent was less than the maximum evapotranspiration ($ET_m$). However, the maximum yield was only 27.7 percent more than the yield in maximum water use efficiency. The interrelation of Y, ET and WUE are demonstrated that if water supply is limiting, seeking maximum water use efficiency may be desirable.

**Keywords:** crop-water production function; marginal analysis; potato; water use efficiency