

Water and energy productivity in sprinkler irrigation systems under using groundwater

Productividad de agua y energía en sistemas de riego por
aspersión utilizando agua subterránea

Produção de água e energia em sistemas de irrigação
com água subterránea

Hamed Ebrahimian^{1*}, Zeynab Gholami² and Hamideh Noory³

¹Associate professor, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P.O. Box 4111, Karaj 31587-77871, Telefax: 00982632241119. Iran. E-mail: ebrahimian@ut.ac.ir. ²Graduate student of Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P.O. Box 4111, Karaj 31587-77871, Iran. Email: zgholami1369@ut.ac.ir. ³Assistant professor, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P.O. Box 4111, Karaj 31587-77871, Iran. E-mail: hnoory@ut.ac.ir. Funding source: This research was funded by Iran National Science Foundation (INSF) under the Project No. 92014136.

Abstract

Water and energy consumption to produce agricultural crops is increasing due to the growth of population and food demand. In this study, water and energy productivity of sprinkler irrigation systems were calculated and evaluated under two conditions, using groundwater as an only irrigation water resource and conjunctive use of surface and groundwater. Twenty two fields were studied in terms of irrigation water and energy productivity as well as economic water and energy productivity for four main crops in Qazvin plain of Iran. The mean value of irrigation water productivity was 1.30, 1.46, 0.87 and 0.86 kg·m⁻³ for wheat, barley, maize and alfalfa, respectively. These values for energy productivity were 4.48, 4.24, 3.06 and 1.91 kg·kWh⁻¹, respectively. Results indicated both wheat and barley had greater irrigation water productivity than maize and alfalfa. However, economic water productivity for maize and wheat were higher than

Recibido el 12-04-2016 • Aceptado el 15-19-2017

*Corresponding author. Email: ebrahimian@ut.ac.ir

for alfalfa and barley. Energy productivity for wheat was more than for three other crops. Various parameters affecting energy consumption resulted in broad range of energy productivity in the studied fields. Conjunctive use of canal and groundwater causes more energy productivity.

Key words: conjunctive use, well pumping, water productivity, energy, crop yield, economic productivity.

Resumen

El consumo de agua y energía para producir cultivos agrícolas está aumentando debido al crecimiento de la población y la demanda de alimentos. En este estudio, se calcularon y evaluaron la productividad del agua y energía de los sistemas de riego por aspersión bajo dos condiciones de uso del agua subterránea como un único recurso de riego y el uso combinado del agua superficial y subterránea. Se estudiaron 22 campos en términos de agua de riego y productividad de la energía, así como la productividad económica del agua y la energía de los cuatro principales cultivos en la planicie de Qazvin, Irán. Los valores promedios de la productividad del agua de riego fueron 1,30; 1,46; 0,87 and 0,86 kg·m⁻³ para trigo, cebada, maíz y alfalfa, respectivamente. Estos valores de productividad de energía fueron 4,48; 4,24; 3,06 and 1,91 kg·kWh⁻¹, respectivamente. Los resultados indicaron que el trigo y la cebada tuvieron mayor productividad del agua de riego que el maíz y la alfalfa. Sin embargo, la productividad económica del agua para el maíz y el trigo fue mayor que para la alfalfa y la cebada. La productividad de energía para el trigo fue mayor comparada con los otros tres cultivos. Diversos parámetros que afectaron el consumo de energía dieron lugar a la amplia gama de la productividad de la energía en los campos estudiados. El uso combinado del canal y las aguas subterráneas provocó mayor productividad de energía.

Palabras clave: uso conjunto, pozo de bombeo, productividad de agua, energía, rendimiento de la cosecha, productividad económica.

Resumo

O consumo de água e energia para produzir culturas agrícolas está aumentando devido ao crescimento populacional e à demanda de alimentos. Neste estudo, calculou-se e avaliou a produtividade de água e energia dos sistemas de irrigação por aspersão sob duas condições de uso de águas subterrâneas como recurso de irrigação único e o uso combinado de águas superficiais e subterrâneas. Vinte e dois campos foram estudados em termos de água de irrigação e produtividade de energia, bem como a produtividade econômica da água e energia das quatro principais culturas na planície Qazvin, no Irã. Os valores médios da produtividade da água de irrigação foram de 1,30; 1,46; 0,87 e 0,86 kg·m⁻³ para trigo, cevada, milho e alfafa, respectivamente. Esses valores de produtividade de energia foram 4,48; 4,24; 3,06 e 1,91 kg·kWh⁻¹, respectivamente. Os resultados indicaram que o

trigo e a cevada apresentaram maior produtividade de irrigação do que o milho e a alfafa. No entanto, a produtividade econômica da água para o milho e o trigo foi maior que a alfafa e a cevada. A produtividade da energia para o trigo foi maior em comparação com as outras três culturas. Vários parâmetros que afetaram o consumo de energia resultaram na ampla gama de produtividade de energia nos campos estudados. O uso combinado do canal e das águas subterrâneas resultou em maior produtividade de energia.

Palavras-chave: uso conjunto, bombeamento, produtividade da água, energia, produção de culturas, produtividade econômica.

Introduction

Energy consumption in agriculture is needed for supplying irrigation water, tillage and agronomic practices, crop harvest and transportation. Major energy consumptions are related to irrigation processes (including water supply from surface water or groundwater resources and water conveyance and distribution to field). In arid and semi-arid regions, water pumpage from wells and using pressurized irrigation systems are limited to have external energy (Robles *et al.*, 2017). Groundwater is a main resource to supply irrigation water in these areas (Kuper *et al.*, 2012). Over-harvesting of groundwater in some regions in Iran has reduced groundwater level and consequently increased energy requirement for pumping groundwater (Lashkaripour *et al.*, 2005; Motagh *et al.*, 2008, Voss *et al.*, 2013). Pressurized irrigation systems have been known as a method to reduce water losses (e.g. runoff and deep percolation) and increase water productivity (i.e. the ratio of crop yield to total applied water volume). However, these systems increase energy consumption. In fact, energy is

Introducción

El consumo de energía en la agricultura es necesario para el suministro de agua de riego, labranza y prácticas agronómicas, cosecha y transporte. Los principales consumos energéticos están relacionados con los procesos de irrigación (incluido el suministro de agua obtenido de aguas superficiales o recursos subterráneos y el transporte y distribución de agua al campo). En las regiones áridas y semiáridas, el bombeo de agua procedente de pozos y el uso de sistemas de irrigación a presión se limitan a la energía externa (Robles *et al.*, 2017). Las aguas subterráneas son un recurso principal para el suministro de agua de riego en estas áreas (Kuper *et al.*, 2012). La sobreexplotación de aguas subterráneas en algunas regiones de Irán ha reducido el nivel de agua subterránea, y en consecuencia, ha aumentado el requerimiento energético para bombear agua subterránea (Lashkaripour *et al.*, 2005; Motagh *et al.*, 2008, Voss *et al.*, 2013). Los sistemas de irrigación a presión son conocidos como métodos para reducir la pérdida de agua (por ejemplo: escurrimiento y percolación

necessary for agricultural productions in arid and semi-arid regions. However, cost of fossil/electrical energy is usually a limitation for farmers, particularly when using groundwater as a water source (Carrión *et al.*, 2016). Increasing energy productivity (i.e. the ratio of crop yield to total energy use) in agriculture sector not only decrease energy cost but also sustain the environment that are needed to sustainable agriculture. Determination of energy and water productivity in agricultural productions can be accommodating to manage and plan energy and water resources. A few researches have been carried out about energy productivity in irrigation systems. Abadia *et al.* (2010) analyzed energy consumption and cost in the Castilla-La Mancha, Valencia, and Murcia regions of Spain. Their results indicated that cost of energy per hectare ranged from 287.7 to 543.4 and 10.7 to 246.0 € in sprinkler and surface irrigation systems, respectively. In addition, energy consumption per hectare varied between 4,584.2 and 6,229.9 kWh in sprinkler irrigation and 92.3 and 1,618.6 kWh in surface irrigation. Jackson *et al.* (2010) investigated on energy consumption in pressurized irrigation systems in Australia. They reported energy consumption increased up to 168% resulting from changing surface irrigation to pressurized irrigation systems. Panahi and Kafi (2012) evaluated energy budget and productivity in potato farms of Dehgolan plain located in Kurdistan province, Iran. Energy productivity in the studied farms was

profunda) y aumentar la productividad del agua (es decir, entre el rendimiento del cultivo y el volume total de agua aplicada). Sin embargo, estos sistemas aumentan el consumo de energía. De hecho, se necesita la energía para las áreas agrícolas en regiones áridas y semi-áridas. Sin embargo, el costo de la energía fósil/eléctrica suele ser una limitación para los agricultores, particularmente al utilizar agua subterránea como fuente de agua (Carrión *et al.*, 2016). El aumento de la productividad energética (es decir, la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo total de energía) en el sector agrícola no solo detiene los costos energéticos sino que también sustentan el ambiente que se necesita para obtener una agricultura sostenible. La determinación de la productividad de la energía y el agua en las zonas agrícolas podría ayudar a gestionar y planificar los recursos energéticos e hídricos. Diferentes investigaciones se han llevado a cabo sobre la productividad energética en los sistemas de irrigación. Abadia *et al.* (2010) analizaron el consumo de energía y el costo en las regiones de Castilla-La Mancha, Valencia y Murcia, indicando que el costo de la energía por hectárea oscilaba entre 287,7 y 543,4 y 10,7 y € 246,0 en sistemas de riego por aspersión y superficie, respectivamente. Adicionalmente, el consumo de energía por hectárea varió entre 4.584,2 y 6.229,9 kWh en riego por aspersión y 92,3 y 1.618,6 kWh en riego superficial. Jackson *et al.* (2010) estudiaron el consumo de energía en los sistemas de irrigación presurizada en Australia e

1.4 kg·kW⁻¹·h⁻¹. Nabavi *et al.* (2013) reported that energy productivity for eggplants was 5.5 kg·kW⁻¹·h⁻¹ in the north part of Iran (Guilan). Martin-Gorriz *et al.* (2014) determined energy consumption for irrigation under semi-arid condition in southeast of Spain. Their results showed that energy productivity for lettuce, lemon and melon were 6.1, 7.0 and 5.6 kg·kW⁻¹·h⁻¹, respectively. Energy consumption per hectare for these crops was obtained 5,075; 5,936 and 6,574 kWh, respectively. Pradeleix *et al.* (2015) recently reported that energy has the highest environmental impacts on human health, the ecosystem and resource depletion for groundwater pumping.

Many investigations have been conducted about water productivity around the world. Zwart and Bastiaansen (2004) reviewed the measured values of water productivity for irrigated wheat, rice, cotton and maize. They found that the range of crop water productivity was very large (0.6-1.7 kg·m⁻³ for wheat; 0.6-1.6 kg·m⁻³ for rice; 0.41-0.95 kg·m⁻³ for cotton seed; 0.14-0.33 kg·m⁻³ for cotton lint and 1.1-2.7 kg·m⁻³ for maize). Singh *et al.* (2006) determined water productivity of wheat, rice and cotton in Sirsa District of India that was equal to 1.04, 0.84 and 0.21 kg·m⁻³, respectively. Liu *et al.* (2008) modeled the water productivity of maize in 124 countries. The results showed that the United States and China had the highest water productivity (more than 1.5 kg·m⁻³) and the lowest values of the water productivity were obtained in African countries

informaron que el consumo de energía aumentó hasta 168%, como resultado de un cambio de riego superficial a los sistemas de irrigación presurizados. Panahi y Kafi (2012) evaluaron el consumo energético y la productividad en las granjas de papa en las planicies de Dehgolan, ubicadas en la provincia de Kurdistán, Irán. La productividad energética en las granjas estudiadas fue 1,4 kg·kW⁻¹·h⁻². Nabavi *et al.* (2013) reportaron que la productividad energética en las berenjenas fue de 5,5 kg·kW⁻¹·h⁻¹ en el norte de Irán (Guilan). Martin-Gorriz *et al.* (2014) determinaron el consumo energético para el riego en condiciones semi-áridas en el suroeste de España, mostrando que la productividad energética para la lechuga, limón y melón fue 5.075; 5.936 y 6.574 kWh, respectivamente. Pradeleix *et al.* (2015) en una reciente investigación reportaron que la energía tiene los mayores impactos ambientales en la salud humana, el ecosistema y el agotamiento de los recursos para el bombeo de aguas subterráneas.

Muchas investigaciones se han llevado a cabo sobre la productividad del agua en todo el mundo. Zwart y Bastiaansen (2004) revisaron los valores de productividad del agua medidos en trigo, arroz, algodón y maíz irrigados y descubrieron que la gama de la productividad del agua del cultivo era muy extensa (0,6-1.7 kg·m⁻³ para trigo; 0,6-1.6 kg·m⁻³ para el arroz; 0,41-0.95 kg·m⁻³ para la semilla de algodón; 0.14-0.33 kg·m⁻³ para fibra de algodón y 1,1-2.7 kg·m⁻³ para maíz. Singh *et al.* (2006) determinaron la productividad del agua en trigo, arroz

(less than 1.0 kg m^{-3}). In the Qazvin plain of Iran, Kaviani *et al.* (2011) reported that the water productivity for various crops ranged from 0.12 to 1.3 kg m^{-3} and Mokari Ghahroodi *et al.* (2014) reported that economic productivity of maize in different sprinkler irrigation systems ranged from 2,486 to 9,652 Rials m^{-3} . Liu *et al.* (2013) investigated in the North China plain to evaluate crop yield and water productivity of winter wheat under sprinkler and surface irrigation systems. The crop yield and irrigation water productivity were greater in the sprinkler than in the surface irrigated field. Fan *et al.* (2014) reported that water productivity of wheat and maize ranged from 0.57 to 1.68 and 0.54 to 2.1 kg m^{-3} in arid northwest China. Moreover, economic productivity of wheat and maize was 0.19 and 0.23 $\text{\$ m}^{-3}$. Naroua *et al.* (2014) reported the economic productivity of wheat, barley, maize and alfalfa was 0.66, 0.68, 0.49 and 0.52 € m^{-3} , respectively, in the Spanish irrigation District "Río Adaja".

Groundwater is widely used as a water source for agriculture in arid and semiarid countries, with 45% of irrigated land using groundwater in the United States of America, 58 % in Iran, and 67 % in Algeria (Carrión *et al.*, 2016). In the recent years, cost of energy consumption in irrigation systems has become important due to increased energy tariff. Increased energy cost for irrigation regarding available depth for groundwater pumpage can highly affect on economic agricultural production and can even cause investment

and algodón en el Distrito de Sirsa, India, con valores de 1,04; 0,84 y 0,21 kg.m^{-3} , respectivamente. Liu *et al.* (2008) estudiaron la productividad del agua en el maíz en 124 países. Los resultados mostraron que los Estados Unidos y China tuvieron una mayor productividad del agua (más de $1,5 \text{ kg.m}^{-3}$) y los valores más bajos de la productividad del agua se obtuvieron en los países africanos (menos de $1,0 \text{ kg.m}^{-3}$). En la planicie de Qazvin, Irán, Kaviani *et al.* (2011) reportaron que la productividad del agua para varios cultivos osciló entre 0,12 y $1,3 \text{ kg.m}^{-3}$ y Mokari Ghahroodi *et al.* (2014) indicaron que la productividad económica del maíz en diferentes sistemas de riego por aspersión varió de 2.486 a 9.652 riales. m^{-3} . Liu *et al.* (2013) en la planicie al norte de China llevaron a cabo una investigación para evaluar el rendimiento de los cultivos y la productividad del agua en el trigo invernal en sistemas de riego por aspersión y superficie. El rendimiento del cultivo y la productividad del agua de riego fueron superiores en el aspersor en comparación con la superficie irrigada. Fan *et al.* (2014) informaron que la productividad del agua del trigo y del maíz osciló entre 0,57 y 1,68 y 0,54 a $2,1 \text{ kg.m}^{-3}$ en el noroeste árido de China. Además, la productividad económica del trigo y el maíz fue de $\text{\$ 0,19}$ y $\text{\$ 0,23.m}^{-3}$. Naroua *et al.* (2014) informaron que la productividad económica del trigo, cebada, maíz y alfalfa fue de € 0,66 ; € 0,68 ; € 0,49 y € 0,52.m^{-3} , respectivamente, en el distrito español de riego "Río Adaja".

loss. In addition, groundwater level in most of arid and semi-arid regions is being decreased every year. It means energy consumption for groundwater pumpage is being increased. Deepening groundwater in one hand and developing pressurized irrigation systems on other hand, energy demand for irrigation has been being increased. Although there are many researches studied either irrigation water productivity or energy productivity, the authors have not found references in the literature investigating both water and energy productivity of sprinkler irrigation systems in agricultural lands. Thus, new investigations are needed to determine energy and water productivity for different crops which are very useful to managers and policy makers to chose and prioritize crops cultivation. The objective of this study was to determine energy and water productivity of some main crops in Qazvin plain of Iran under using groundwater, as a main water resource, for sprinkler irrigation systems. In this study, effect of conjunctive use of groundwater and canal water on energy productivity and consumption were also investigated. Moreover, economic productivity of water and energy were calculated and evaluated.

Materials and methods

This study was conducted at the Qazvin plain, located at Qazvin province that is one of the most important agricultural regions in Iran. In this region, there are three kinds

Las aguas subterráneas son ampliamente utilizadas como fuente de agua para la agricultura en los países áridos y semiáridos, con 45% de las tierras irrigadas que utilizan el agua subterránea en los Estados Unidos de América, 58% en Irán y 67% en Argelia (Carrión *et al.*, 2016). En los últimos años, el costo del consumo de energía en los sistemas de irrigación se ha vuelto un tema importante debido al aumento de las tarifas de energía. El aumento del costo de la energía para la irrigación con respecto a la profundidad disponible para el bombeo de aguas subterráneas puede afectar significativamente a la economía de la producción agrícola e incluso puede causar pérdidas de inversión. Además, cada año está disminuyendo el nivel de las aguas subterráneas en la mayoría de las regiones áridas y semi-áridas, lo que significa que el consumo de energía para el bombeo de aguas subterráneas está incrementando. Las aguas subterráneas y el desarrollo de sistemas de riego presurizados han incrementado la demanda energética del riego. A pesar de que hay muchas investigaciones que han estudiado la productividad del agua de riego o la productividad de la energía, los autores no han encontrado información en la literatura que indique la productividad del agua y la energía de los sistemas de irrigación en la agricultura. Por lo tanto, se deben llevar a cabo nuevas investigaciones para determinar la productividad de la energía y el agua para los diferentes cultivos, información que servirá a los administradores y los responsables de la formulación de políticas para elegir

of water supply sources for irrigation: groundwater (i.e. wells), canal water and conjunctive use of groundwater and canal water. Main cultivated crops are wheat, barley, maize and alfalfa. Qazvin province consists of five districts including Qazvin, Takestan, Abyek, Buin Zahra and Alborz (figure 1). Twenty two fields located on these five districts were selected for this study (table 1). All the studied fields equipped with sprinkler irrigation systems. The required information of each selected field such as irrigation system (e.g. sprinkler pressure and discharge and irrigation interval and duration), water resource and crop yield were collected via survey questionnaire, the technical report of irrigation system design and Qazvin agriculture organization in 2014. Six studied fields (A2, A3, A4, A5, A6 and A7) are irrigated via conjunctive use of groundwater and canal water. Required energy for water supply

y priorizar el cultivo de cultivos. El objetivo de este estudio fue determinar la energía y el productividad de algunos de los cultivos principales en la planicie de Qazvin, Irán, usando aguas subterráneas como principal recurso hídrico para sistemas de riego por aspersión. En este estudio también se investigó el efecto del uso conjuntivo del agua subterránea y del canal sobre la productividad y el consumo energético. Además, se calcularon y evaluaron la productividad económica del agua y la energía.

Materiales y métodos

Este estudio se llevó a cabo en la planicie de Qazvin, ubicada en la provincia de Qazvin, una de las regiones agrícolas más importantes de Irán. En esta región, existen tres tipos de fuentes de abastecimiento de agua para irrigación: aguas subterráneas (pozos), agua del canal

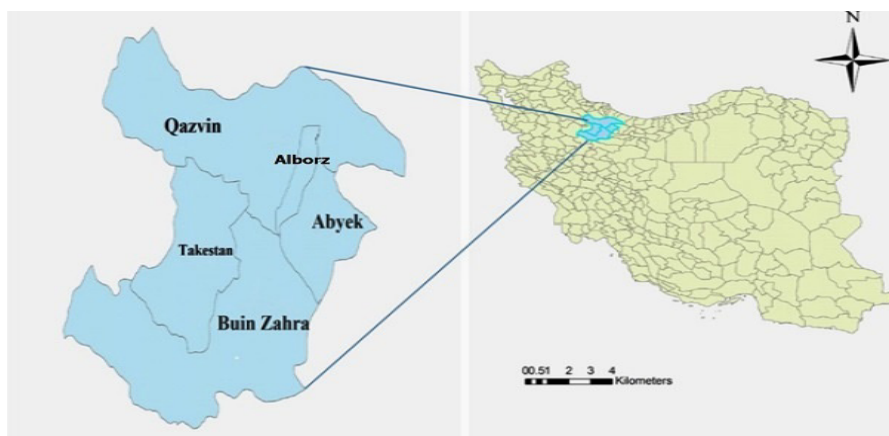


Figure 1. Position of the studied areas in the Qazvin province of Iran.

Figura 1. Ubicación de las áreas estudiadas en la provincia Qazvin, en Irán.

Table 1. Characteristics of sprinkler irrigation systems used in the studied fields.**Cuadro 1. Características de los sistemas de riego por aspersión utilizados en los campos estudiados.**

Field name	District	Irrigation system	Main source of irrigation	System discharge (L s ⁻¹)	System pressure (m)	Groundwater depth (m)	Pump efficiency (%)
A1	Abyek	Solid-set	Tube well	29	51.9	24.8	65
A2	Abyek	Linear	Conjunctive use	27	25	58	65
A3	Abyek	Center-pivot	Conjunctive use	55	20	58	65
A4	Abyek	Solid-set	Conjunctive use	55	50	58	65
A5	Abyek	Center-pivot	Conjunctive use	55	25	86	65
A6	Abyek	Center-pivot	Conjunctive use	46.7	25	86	65
A7	Abyek	Center-pivot	Conjunctive use	43	25	86	65
AL1	Alborz	Solid-set	Tube well	11	52.9	20.3	65
AL2	Alborz	Solid-set	Tube well	50	45.4	23	74
B1	Buin Zahra	Solid-set	Tube well	83	59.3	23.2	70
B2	Buin Zahra	Linear	Tube well	20	42.5	80	78
B3	Buin Zahra	Solid-set	Tube well	60	51.9	29.6	65
B4	Buin Zahra	Solid-set	Tube well	13.5	54.9	35	68
G1	Qazvin	Solid-set	Canal	5.5	53.2	-	75
G2	Qazvin	Solid-set	Canal	9	47.7	-	70
G3	Qazvin	Solid-set	Tube well	9.96	20	45	70
G4	Qazvin	Solid-set	Tube well	13	53.9	37.9	65
G5	Qazvin	Solid-set	Tube well	21	58.8	40	72
T1	Takestan	Solid-set	Tube well	5.3	56.8	90	68
T2	Takestan	Solid-set	Tube well	4.5	48.9	90	75
T3	Takestan	Solid-set	Tube well	5.3	52.9	80	.64
T4	Takestan	Solid-set	Tube well	20	58.5	40	75

was neglected when using from canal water. Canals had more role than wells to supply irrigation water under the conjunctive use, because farmers preferred canal water to minimize energy consumption and cost. Based on the survey results, about 60% of total irrigation volume during the growing season was supplied via canals. In fact, farmers used wells when canals did not have sufficient

and use conjunto del agua subterránea y de canal. Las principales cosechas son el trigo, la cebada, el maíz y la alfalfa. La provincia de Qazvin consta de cinco distritos incluyendo Qazvin, Takestan, Abyek, Buin Zahra y Alborz (figura 1). Se seleccionaron veintidos campos ubicados en estos cinco distritos (cuadro 1). Todos los campos estudiados estaban equipados con sistemas de riego por aspersión.

water for irrigating crops. In this condition, operation hours of well and canal for water supply were separately considered when calculating energy consumption. In this study, water and energy productivity for each crop in the selected fields were determined.

Irrigation water productivity was calculated as the ratio of the crop yield (dry biomass) to the total irrigation water volume:

$$WP = \frac{Y}{V} \quad (1)$$

where *IWP* is the water productivity (kg m^{-3}), *Y* is the dry biomass (kg) and *V* is the total irrigation water volume (m^3). Economic water productivity (*EWP*, Rials or USD m^{-3}) was also calculated as the ratio of the crop yield value (*I*, Rials or USD) to the irrigation water volume (*V*, m^3):

$$WP = \frac{Y}{V} \quad (2)$$

The selling price of each crop was obtained based on the statistical resources of the Iranian Ministry of Agriculture in 2011 (Unknown, 2014). The mean of selling price for wheat, barley, maize and alfalfa were 3,329.1; 3,244.7; 4,099.1 and 3,072.3 Rials $\cdot \text{kg}^{-1}$ (equivalent to 0.131, 0.128, 0.162 and 0.121 USD kg^{-1}), respectively. Irrigation water volume was calculated by multiplying discharge of irrigation system and irrigation time.

Energy productivity (*EP*, kg kWh^{-1}) was defined as the ratio between the crop yield (dry biomass) (*Y*, kg) and the total energy consumption (*E*, kWh):

$$EP = \frac{Y}{E} \quad (3)$$

La información requerida de cada campo seleccionado tal como sistema de riego (como por ejemplo, presión del aspersor, descarga e intervalo y duración del riego), la fuente de agua y el rendimiento de la cosecha fueron recolectados a través de una encuesta, el informe técnico del diseño del sistema de riego y la organización de la agricultura en Qazvin en 2014. Los seis campos estudiados (A2, A3, A4, A5, A6 y A7) se irrigaron usando agua subterránea y el agua del canal. Se omitió la energía requerida por utilizar agua del canal. Los canales tenían mayor uso que los pozos para abastecer el agua de riego, ya que los productores prefirieron usar el agua del canal para reducir al mínimo el consumo de energía y el costo. Basándose en los resultados de la encuesta, aproximadamente el 60% del volumen total de riego durante la temporada de crecimiento se proporcionó a través de canales. De hecho, los agricultores utilizaban los pozos cuando los canales no tenían suficiente agua para regar los cultivos. En esta condición, las horas de operación del pozo y del canal para el abastecimiento de agua fueron tomadas en cuenta por separado al momento de calcular el consumo de energía. En este estudio se determinó la productividad de agua y energía para cada cultivo en los campos seleccionados.

La productividad del agua de riego se calculó como la relación entre el rendimiento del cultivo (biomasa seca) y el volumen total de agua de riego:

$$PAR = \frac{Y}{V} \quad (1)$$

Economic energy productivity (*EEP*, Rials or USD kWh⁻¹) was also calculated as the ratio between the crop yield value (*I*, Rials or USD) and the total energy consumption (*E*, kWh):

$$EEP = \frac{I}{E} \quad (4)$$

The total energy consumption was calculated by multiplying pump power (*P*, kW) and operation hours (*T*, h). Pump power was determined with the following equation:

$$P = \frac{\gamma QH}{1000\mu} \quad (5)$$

where γ is the specific weight of water (equal to 9,810 N m⁻³), *Q* and *H* are the pump flow (m³ s⁻¹) and head (m), respectively, μ is electro-pump efficiency (in percent). *H* represents sum of irrigation system head and groundwater depth. All studied fields use electricity as an energy source for pumping groundwater and pressurized irrigation system since electricity is cost effective than diesel fuel.

The characteristics of irrigation system in the selected fields such as system type, discharge, pressure, water source, depth of groundwater and pump efficiency are presented in table 1. Discharge of irrigation systems varied between 4.5 and 83 L s⁻¹. Solid-set irrigation was the most common sprinkler irrigation systems. Only the fields G1 and G2 did not use ground water, their irrigation water source was canal. As previously mentioned, four productivity indices (i.e. *IWP*, *EWP*, *EP* and *EEP*) were determined for each field and crop.

Donde *IWP* es la productividad del agua (kg·m⁻³), *Y* es la biomasa seca (kg) y *V* es el volumen total de agua de riego (m³). La productividad económica del agua (*PEA*, Riales o USD·m⁻³) también se calculó como la proporción del valor de rendimiento del cultivo (*I*, Riales o USD) al volumen de agua de riego (*V*, m⁻³):

$$PEA = \frac{I}{V} \quad (2)$$

El precio de venta de cada cultivo se obtuvo basándose en los recursos estadísticos del Ministerio de Agricultura Iraní en 2011 (Unknown, 2014). El promedio del precio de venta para el trigo, la cebada, el maíz y la alfalfa fue 3,329.1; 3,244.7; 4,099.1 y 3,072.3 Riales kg⁻¹ (equivalente a 0,131; 0,128; 0,162 y 0,121 USD kg⁻¹), respectivamente. Se calculó el volumen del agua de riego multiplicando la descarga del sistema de riego y el tiempo de riego.

La productividad energética (*PE*, kg·kWh⁻¹) se definió como la relación entre el rendimiento del cultivo (biomasa seca) (*Y*, kg) y el consumo total de energía (*E*, kWh):

$$PE = \frac{Y}{E} \quad (3)$$

La productividad económica de la energía (*PEE*, riales o USD kWh⁻¹) también se calculó como la relación entre el valor del rendimiento del cultivo (*I*, Riales o USD) y el consumo total de energía (*E*, kWh):

$$PEE = \frac{I}{E} \quad (4)$$

El consumo total de energía se calculó multiplicando la potencia

Results and discussions

Irrigation water productivity

Irrigation water volume during the growing season and crop yield (dry biomass) for the studied fields are presented in table 2. Alfalfa and maize needed more irrigation water than wheat and barley because they were cultivated in the spring season; however, wheat and barley were cultivated in autumn (rainfall) season. Moreover, water requirements of alfalfa and maize are usually greater than wheat and barley (Allen *et al.*, 1998). Alfalfa and barley had the highest and lowest irrigation water volume, respectively. Average yield of wheat, barley, maize and alfalfa were 4.9, 4.4, 7.0 and 10.3 t ha⁻¹, respectively.

The values of irrigation water productivity (*IWP*) and economic irrigation water productivity (*EWP*) for various crops are given in figure 2. The minimum and maximum values of *IWP* in kg m⁻³ were 0.61 and 2.2 for wheat, 0.75 and 2.5 for barley, 0.31 and 2.78 for maize and 0.22 and 1.76 for alfalfa, respectively. In general, wheat and barley had more irrigation water productivity than maize and alfalfa. As previously stated, wheat and barley used more rainfall water than two other crops because their growing season placed in the rainfall season. Similar to the study of Liu *et al.* (2008), the values of *IWP* for maize ranged from the highest water productivity (more than 1.5 kg m⁻³) to the lowest values of the water productivity (less than 1.0 kg m⁻³) in the studied fields (figure 2). Zwart

de la bomba (*P*, kW) y las horas de operación (*T*, h). La energía de la bomba se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\gamma QH}{1000\mu} \quad (5)$$

donde γ es el peso específico del agua (igual a 9.810 N.m⁻³), Q y H son el caudal de la bomba (m³.s⁻¹) y la cabeza (m), respectivamente, μ es la eficiencia del electro bomba (en porcentaje). H representa la suma de la cabeza del sistema de riego y la profundidad del agua subterránea. Todos los campos estudiados utilizan la electricidad como fuente de energía para bombear agua subterránea y el sistema de riego presurizado, ya que la electricidad es más rentable que el diesel. Las características del sistema de riego en los campos seleccionados tales como el tipo de sistema, la descarga, la presión, la fuente de agua, la profundidad de las aguas subterráneas y la eficiencia de la bomba se presentan en la tabla 1. La descarga de los sistemas de irrigación varió entre 4,5 y 83 L.s⁻¹. Los sistemas de riego fijos fueron los sistemas más comunes de riego por aspersión. Solamente los campos G1 y G2 no utilizaron el agua subterránea, su fuente del agua de riego fue de canal. Como se mencionó anteriormente, se determinaron cuatro índices de productividad (por ejemplo, *IWP*, *EWP*, *EP* y *EEP*) para cada campo y cultivo.

Resultados y discusión

Productividad del agua de riego

El volumen del agua de riego durante la estación de

Table 2. The total irrigation water volume per hectare during the growing season and crop yield (dry matter) in the studied fields.**Cuadro 2. Volumen total de agua de riego por hectárea durante la temporada de cultivo y el rendimiento de los cultivos (materia seca) en los campos estudiados.**

Field name	Irrigation water volume (m ³ ha ⁻¹)				Crop yield (t ha ⁻¹)			
	Wheat	Barley	Maize	Alfalfa	Wheat	Barley	Maize	Alfalfa
A1	2,417	1,945	4,229	-	5.3	4.8	11.8	-
A2	-	-	7,000	10,000	-	-	3.5	13.5
A3	-	-	7,000	10,000	-	-	3.5	13.5
A4	-	-	7,000	10,000	-	-	3.5	13.5
A5	-	-	-	8,503	-	-	-	15
A6	9,904	-	9,904	-	6	-	3.1	-
A7	-	-	9,904	17,225	-	-	3.1	15
AL1	2,410	1,944	9,335	11,745	3	4	4	4.5
AL2	2,762	-	4,933	-	4.5	-	9.2	-
B1	2,645	2,133	10,009	12,007	3.6	2.9	8.3	12
B2	3,071	3,296	8,638	-	5	5	6.5	-
B3	2,868	2,312	10,225	13,336	3.6	2.9	8.3	12
B4	3,448	3,910	-	-	3.6	2.9	-	-
G1	3,163	3,721	9,427	11,627	5.5	4	5.5	4
G2	5,158	4,586	10,074	-	6	6	6	-
G3	-	-	-	10,552	-	-	-	9.9
G4	2,552	2,057	9,447	11,419	3.3	3.1	9.3	9.9
G5	4,104	4,706	9,707	17,514	6	5	10	10
T1	3,659	4,026	9,079	18,254	6	5	11.5	4
T2	3,283	3,841	9,645	12,875	7	7	10.5	10
T3	4,034	2,893	10,239	19,960	6	6	10.5	7
T4	3,939	3457	11,575	14,549	4	3	4.5	11.5

and Bastiaansen (2004) reported that water productivity ranged 0.6-1.7 kg m⁻³ for wheat and 1.1-2.7 kg m⁻³ for maize. Singh *et al.* (2006) found water productivity of wheat was equal to 1.04 kg m⁻³ in India. Kahlowan *et al.*

crecimiento y el rendimiento de los cultivos (biomasa seca) para los campos estudiados se presentan en el cuadro 2. La alfalfa y el maíz necesitaron más agua de riego que el trigo y la cebada porque se cultivaron

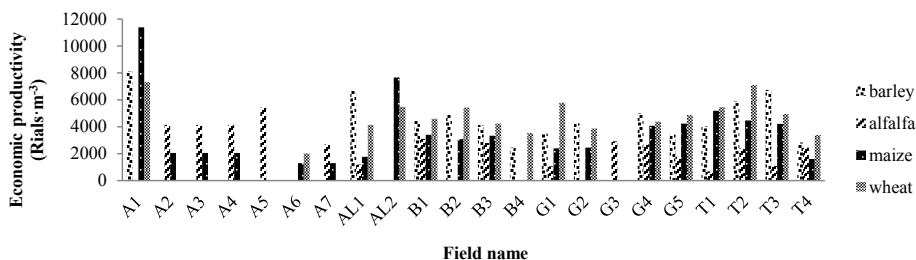
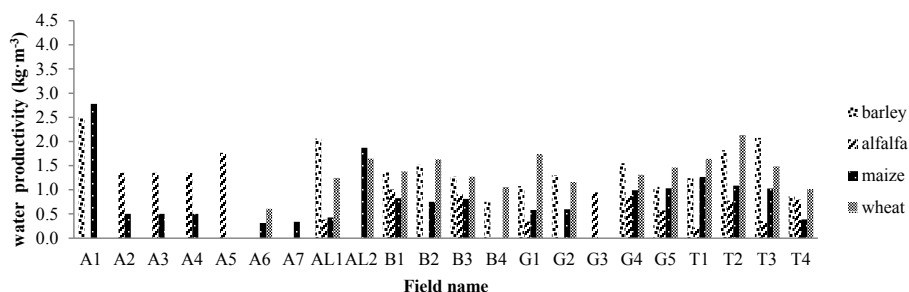


Figure 2. Irrigation water and economic water productivity in the studied fields for different crops.

Figura 2. Agua de riego y productividad económica del agua en los campos estudiados para los diferentes cultivos.

(2007) also reported that the water productivity of wheat in Pakistan was 3.95 kg m^{-3} in sprinkler irrigation and 1.34 kg m^{-3} in traditional basin irrigation. Fan *et al.* (2014) reported that water productivity varied between 0.57 and 1.68 kg m^{-3} for wheat and 0.54 and 2.1 kg m^{-3} for maize in China.

Maize and alfalfa were cultivated in most studied fields. In average,

en primavera; sin embargo, el trigo y la cebada se cultivaron en otoño (época de lluvia). Además, los requerimientos de agua en alfalfa y maíz fueron generalmente mayores que el trigo y la cebada (Allen *et al.*, 1998). La alfalfa y la cebada tuvieron los volúmenes más altos y más bajos del agua de irrigación, respectivamente. El rendimiento promedio del trigo, la cebada, el maíz y la alfalfa fue $4,9; 4,4;$

solid-set irrigation systems had higher water productivity of maize than continuous move sprinkler irrigation systems (i.e. center-pivot and linear). However, greater water productivity of alfalfa was obtained in the continuous move irrigation systems than in solid-set irrigation systems.

The minimum and maximum values of *EWP* in Rials m^{-3} were 2,016 and 7,319 for wheat, 2,442 and 8,126 for barley, 1,283 and 11,395 for maize and 673 and 5,419 for alfalfa, respectively. In most cases, economic water productivity for maize and wheat was greater than for barley and alfalfa. Economic water productivity of maize was measured in range of 2,486 to 9,652 Rials m^{-3} (0.098 to 0.380 USD kg^{-1}) by Mokari Ghahroodi *et al.* (2014) in the Qazvin plain. Naroua *et al.* (2014) found economic water productivity of wheat, barley, maize and alfalfa was 0.66, 0.68, 0.49 and 0.52 $\text{€} m^{-3}$, respectively, in Spain. These values were higher than the values of *EWP* obtained in this study (one euro almost equal to 32,000 Iranian Rials in 2015).

Energy productivity

Total energy consumption and operation hours of irrigation system during the growing season for each crop in the studied fields (except the fields under conjunctive use of well and canal) are given in table 3. Alfalfa and maize had greater operation hours of irrigation system during the growing season compared to wheat and barley due to different growing season and crop water requirement.

Figure 3 shows the values of energy productivity (EP) and

7,0 y 10,3 $t \cdot ha^{-1}$, respectivamente. Los valores de la productividad del agua de riego (PAR) y la productividad económica del agua de riego (PEA) en diferentes cultivos se presentan en la figura 2. Los valores mínimos y máximos de PAR en $kg \cdot m^{-3}$ fueron 0,61 y 2,2 para trigo, 0,75 y 2,5 para cebada, 0,31 y 2,78 para maíz y 0,22 y 1,76 para alfalfa, respectivamente. En general, el trigo y la cebada tuvieron mayor productividad del agua de riego que el maíz y la alfalfa. Como se indicó anteriormente, el trigo y la cebada utilizaron más agua de lluvia que otros dos cultivos porque el crecimiento correspondió a la temporada de lluvias. Similar al estudio de Liu *et al.* (2008), los valores de PAR para el maíz variaron desde los valores más altos de la productividad del agua (más de 1,5 $kg \cdot m^{-3}$) hacia los valores más bajos de la productividad del agua (menos de 1,0 $kg \cdot m^{-3}$) en los campos estudiados (figura 2). Zwart y Bastiaansen (2004) reportaron que la productividad del agua oscilaba entre 0,6 y 1,7 $kg \cdot m^{-3}$ para trigo y 1,1-2,7 $kg \cdot m^{-3}$ para el maíz. Singh *et al.* (2006) encontraron que la productividad del agua en el trigo fue igual a 1,04 $kg \cdot m^{-3}$ que la observada en India. Kahlowan *et al.* (2007) también informaron que la productividad del agua para trigo en Pakistán fue de 3,95 $kg \cdot m^{-3}$ con riego por aspersión y 1,34 $kg \cdot m^{-3}$ con el riego tradicional. Fan *et al.* (2014) informaron que la productividad del agua varió entre 0,57 y 1,68 $kg \cdot m^{-3}$ para trigo y 0,54 y 2,1 $kg \cdot m^{-3}$ para maíz en China.

El maíz y la alfalfa se cultivaron en la mayoría de los campos

Table 3. Energy consumption and operation hours of irrigation system per hectare during the growing season in the studied fields.**Cuadro 3. Consumo de energía y horas de operación del sistema de riego por hectárea durante la temporada de cultivo en los campos estudiados.**

Field name	Operation hours (h ha ⁻¹)				Total energy (kWh ha ⁻¹)			
	Wheat	Barley	Maize	Alfalfa	Wheat	Barley	Maize	Alfalfa
A1	23	19	41	-	777	626	1,360	-
AL1	60	48	231	290	740	597	2,866	3,605
AL2	15	-	27	-	696	-	1,242	-
B1	9	7	33	40	849	685	3,214	3,856
B2	32	34	90	-	1,315	1,411	3,698	-
B3	13	11	47	61	980	790	3,494	4,558
B4	71	80	-	-	1,242	1,409	-	-
G1	160	188	476	587	611	719	1,822	2,247
G2	159	142	311	-	958	852	1,871	-
G3	-	-	-	294	-	-	-	2,670
G4	53	42	194	235	982	792	3,636	4,395
G5	54	60	134	157	1,534	1,759	3,628	6,547
T1	190	209	472	950	2,152	2,368	5,339	10,735
T2	203	237	595	795	1,657	1,939	4,870	6,500
T3	210	151	533	1,038	2,284	1,638	5,797	11,301
T4	54	47	159	200	1,409	1,237	4,140	5,204

economic energy productivity (EEP) for different crops in the studied fields. The minimum and maximum values of EP in kg kWh⁻¹ were 2.62 and 9.00 for wheat, 2.09 and 7.79 for barley, 1.09 and 8.64 for maize and 0.37 and 3.74 for alfalfa. Similar to water productivity, the values of EP for wheat and barley were greater than for maize and alfalfa in most fields. Khan *et al.* (2010) reported the energy productivity of wheat and barley was 1.61 and 1.29 kg kWh⁻¹, respectively, in Australia. Shahan *et al.* (2008) also

estudiados. En promedio, los sistemas fijos de irrigación tuvieron mayor productividad del agua en el maíz que los sistemas de irrigación por aspersión de movimiento continuo (pivote central y lineal). Sin embargo, la mayor productividad del agua en la alfalfa se obtuvo en los sistemas de riego de movimiento continuo en contraste con los sistemas de riego fijos. Los valores mínimos y máximos de PEA en Riales.m⁻³ fueron 2.016 y 7.319 para trigo, 2.442 y 8.126 para cebada, 1.283 y 11.395 para

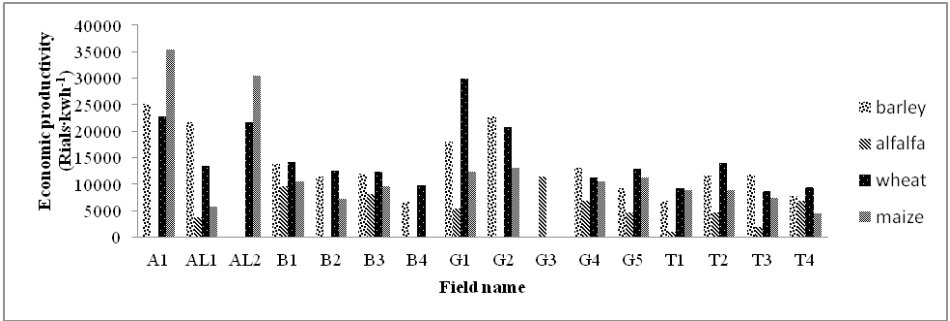
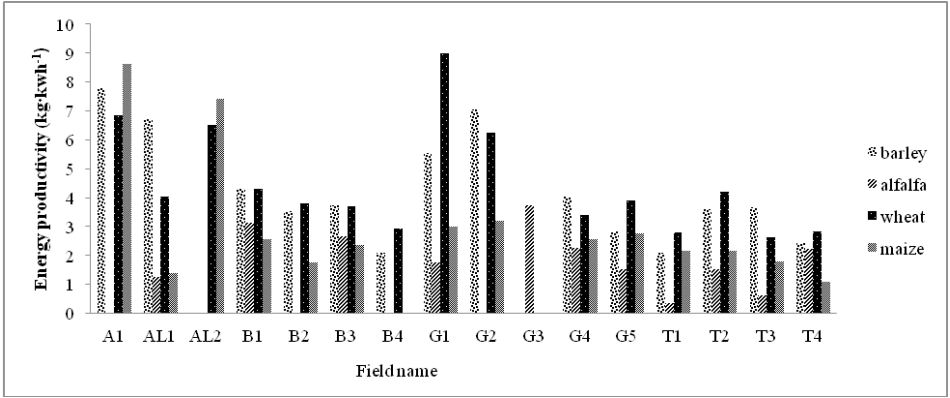


Figure 3. Energy and economic energy productivity in the studied fields for different crops.

Figura 3. Productividad energética y económica de los campos estudiados para los diferentes cultivos.

stated the energy productivity for wheat production was 0.35 kg-kWh⁻¹ in the Ardabil province of Iran. The values of energy productivity were higher than the corresponding values reported via Shahan *et al.* (2008) and Khan *et al.* (2010). Because they considered all required energy for crop production, while only energy required for pumping water and supplying

maíz y 673 y 5.419 para alfalfa, respectivamente. En la mayoría de los casos, la productividad económica del agua para el maíz y el trigo fue mayor que para la cebada y la alfalfa. La productividad económica del agua en el maíz se midió en el rango de 2.486 a 9.652 Riales.m⁻³ (0,098 a 0,380 USD.kg⁻¹), Mokari Ghahroodi *et al.* (2014) en la planicie de Qazvin.

pressure of irrigation system was considered in this study.

Ground water depth had a high impact on energy consumption and productivity. The ratio of groundwater depth to irrigation system pressure varied between 0.4 and 1.9 in the studied fields. More required energy was pertinent to irrigation system pressure where the fields had relatively low groundwater depth such as A1, AL1, AL2 and B1. However, the required energy in the fields having deep water table (such as B2, T1, T2 and T3) was highly related to groundwater depth than the pressure of irrigation system. The minimum and maximum values of EEP in Rials kWh^{-1} were 8,746 and 29,947 for wheat, 6,780 and 25,266 for barley, 4,455 and 35,429 for maize and 1,145 and 11,485 for alfalfa. In general, wheat and barley had more economic energy productivity than maize and alfalfa.

Operation hours of irrigation system when using canal and well was separately calculated in the fields A2 to A7 (table 4). Total consumed energy per hectare during the growing season under conjunctive use of wells and canals is also given in table 4. Alfalfa needed more energy to supply irrigation water compared with maize due to its high water requirement.

As expected, the values of both energy and economic energy productivity were higher under conjunctive use compared to using only groundwater because canal had more role to supply irrigation water than well. The values of EP and EEP for various crops under conjunctive use of irrigation canal and well are presented

Naroua *et al.* (2014) encontraron que la productividad económica del agua en trigo, cebada, maíz y alfalfa fue de € 0,66; € 0,68; € 0,49 y € 0,52. m^{-3} , respectivamente, en España. Estos valores fueron superiores a los valores de PEA obtenidos en este estudio (un euro equivalía a 32.000 riales iraníes en 2015).

Productividad energética

El consumo total energético y las horas de operación del sistema de irrigación durante la temporada de crecimiento de cada cultivo en los campos estudiados (excepto los campos bajo el uso conjunto del pozo y el canal) se presentan en el cuadro 3. La alfalfa y el maíz tuvieron más horas de operación del sistema de riego durante la temporada de crecimiento comparada con el trigo y la cebada debido a las diferentes temporadas de crecimiento y los requerimientos de agua en la cosecha.

La figura 3 muestra los valores de la productividad energética (PE) y la productividad económica de la energía (PEE) para diferentes cultivos en los campos estudiados. Los valores mínimos y máximos de PE en $\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ fueron 2,62 y 9,00 para trigo; 2,09 y 7,79 para cebada, 1,09 y 8,64 para maíz y 0,37 y 3,74 para alfalfa. De igual forma, los valores de PE para trigo y cebada fueron mayores que para maíz y alfalfa en la mayoría de los campos cultivados. Khan *et al.* (2010) informaron que la productividad energética del trigo y la cebada fue de 1,61 y 1,29 $\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$, respectivamente, en Australia. Shahan *et al.* (2008) indicaron que la productividad energética en trigo fue de 0,35

Table 4. Operation hours of irrigation system and total consumed energy per hectare during the growing season under conjunctive use of wells and canals.

Cuadro 4. Horas de operación del sistema de irrigación y energía total consumida por hectárea durante la temporada de crecimiento bajo el uso conjuntivo de pozos y canales.

Field name	Operation hours (h ha ⁻¹)						Total energy (kWh ha ⁻¹)		
	Wheat		Maize		Alfalfa		Wheat	Maize	Alfalfa
	Canal	Well	Canal	Well	Canal	Well			
A2	-	-	43.2	28.8	61.7	41.1	-	654	934
A3	-	-	21.2	14.1	30.3	20.2	-	690	986
A4	-	-	23.3	15.6	30.3	20.2	-	1,224	1,590
A5	-	-	-	-	27.9	15.1	-	-	861
A6	38.3	20.6	38.3	20.6	-	-	1,003	1,003	-
A7	-	-	38.3	20.6	72.3	38.9	-	924	1,745

in figure 4. The values of EP ranged from 2.86 and 5.35 kg·kWh⁻¹ for maize and 8.6 to 17.42 kg·kWh⁻¹ for alfalfa. The minimum and maximum values of EEP in Rials·kWh⁻¹ were 11,720 and 21,943 for maize and 26,090 and 53,506 for alfalfa. Interestingly, alfalfa had more energy productivity than maize in the fields under conjunctive use. The water productivity of alfalfa in these fields was also greater than in other fields that used only well as an irrigation source. However, water and energy productivity of alfalfa was less than maize in the fields using only groundwater for irrigation. This finding reflected the impact of farm management (including irrigation, fertilization, control of pest, weed and diseases and other agronomy practices) on energy and water productivity. For this reason, the broad range of water or energy productivity was obtained in the studied fields. However, the values

kg.kWh⁻¹ en la provincia de Ardabil, Irán. Los valores de la productividad energética fueron mayores que los valores correspondientes reportados por Shahan *et al.* (2008) y Khan *et al.* (2010), debido a que consideraron toda la energía requerida para la producción de cosechas, mientras que solamente se tomaron en cuenta en este estudio la energía requerida para bombear el agua y la presión de abastecimiento del sistema de riego.

La profundidad del agua subterránea tuvo un alto impacto en el consumo de la energía y la productividad. La relación entre la profundidad de las aguas subterráneas y la presión del sistema de riego varió entre 0,4 y 1,9 en los campos estudiados. Se requirió de más energía por la presión del sistema de riego donde los campos tenían una profundidad relativamente baja del agua subterránea tal como

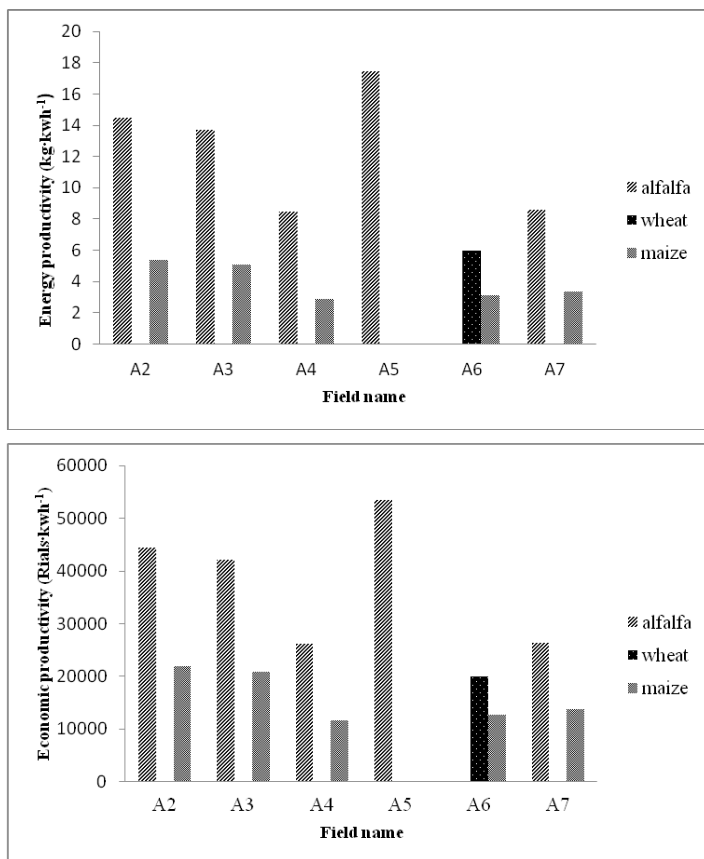


Figure 4. Energy and economic productivity for different crops under conjunctive use of wells and canals.

Figura 4. Productividad energética y económica de los diferentes cultivos bajo el uso conjuntivo de pozos y canales.

of water and energy productivity in sprinkler irrigation systems were determined under current situation in the study area.

Conclusions

In this study, water and energy productivity in sprinkler irrigation

A1, AL1, AL2 y B1. Sin embargo, la energía requerida en los campos con profundidad de agua (tales como B2, T1, T2 y T3) estaba altamente relacionada con la profundidad de las aguas subterráneas en comparación con la presión del sistema de riego. Los valores mínimos y máximos de PEE en Riales.kWh⁻¹ fueron 8.746

system was obtained for main crops in the Qazvin plain. In general, wheat and barley had the same water productivity. Alfalfa had less water productivity compared to three other crops. Moreover, wheat had higher energy productivity and alfalfa had less energy productivity compared to three other crops. Higher water productivity of maize and alfalfa, as high water-demand crops, was obtained in solid-set and continuous move sprinkler irrigation systems, respectively. The energy consumption in the fields having deep water table was highly related to groundwater depth than the pressure of irrigation system.

Conjunctive use of well and canal caused substantial reduction in energy consumption and consequently increase in energy productivity. This study also indicated that groundwater depth, required pressure of irrigation system, water source, crop type and farm management for crop production had high impact on energy consumption that resulted in the broad range energy productivity in the studied fields. Regarding the values of water and energy productivity, wheat and alfalfa had higher and less priority to be cultivated in the study area. Energy cost and productivity should be considered as a one of main factors to choose optimum cropping pattern.

Increased energy cost for irrigation due to reduced groundwater level in arid and semi-arid regions can highly affect on economic agricultural production. Cost of energy consumption for water supply may be not economic in regions having deep or semi-deep

and 29.947 para trigo, 6.780 y 25.266 para cebada, 4.455 y 35.429 para maíz y 1.145 y 11.485 para alfalfa. En general, el trigo y la cebada tuvieron una productividad energética más económica que el maíz y la alfalfa.

Las horas de operación del sistema de riego al usar el canal y el pozo se calcularon por separado en los campos desde el A2 al A7 (cuadro 4). La energía total consumida por hectárea durante la temporada de crecimiento con el uso conjunto de pozos y canales también se muestra en el cuadro 4. La alfalfa necesitó mayor energía para suministrar agua de riego en comparación con el maíz debido a su elevado requerimiento de agua. Como era de esperar, los valores de energía y productividad económica de la energía fueron más altos con el uso conjunto comparado con el uso exclusivo de las aguas subterráneas, debido a que el canal suministró más agua de riego que el pozo. Los valores de PE y PEE para diversos cultivos bajo uso conjunto del canal de riego y pozo se presentan en la figura 4. Los valores de PE oscilaron entre 2,86 y 5,35 $\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ para maíz y de 8,6 a 17,42 $\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ para la alfalfa. Los valores mínimos y máximos de PEE en Riales. kWh^{-1} fueron 11.720 y 21.943 para maíz y 26.090 y 53.506 para alfalfa. Curiosamente, la alfalfa presentó mayor productividad energética que el maíz en los campos bajo uso conjuntivo.

La productividad del agua en la alfalfa en estos campos también fue mayor que en otros campos en donde solo se utilizaban pozos como fuente de irrigación. Sin embargo, la productividad del agua y energía

groundwater. It is recommended that energy productivity would be assessed under deficit irrigation practices, particularly in regions where energy cost is high. Moreover, further researches are needed to assess and compare energy productivity in various irrigation systems.

As a consequence, energy saving is a requirement to sustainable and economic operation of pressurized irrigation systems (e.g. reducing irrigation water losses and using low pressure irrigation systems). Optimum design and management of the irrigation and pumping systems is important to minimize the cost of water abstraction and application and maximize net farming benefit.

Literature cited

- Abadia, R., M.C. Rocamora, J.I. Corcoles, A. Ruiz-Canales, A. Martínez-Romero and M.A. Moreno. 2010. Comparative analysis of energy efficiency in water users associations. *Span. J. Agric. Res.* 8(2):134-142.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements.* FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 300 p.
- Carrión, F., J. Sánchez-Vizcaíno, J.I. Corcoles, J.M. Tarjuelo and M.A. Moreno. 2016. Optimization of groundwater abstraction system and distribution pipe in pressurized irrigation systems for minimum cost. *Irrig. Sci.* 34(2):145-159.
- Fan, Y., C. Wang and Z. Nan. 2014. Comparative evaluation of crop water use efficiency, economic analysis and net household profit simulation in arid Northwest China. *Agric. Water Manage.* 146(12):335-345.
- Jackson, T.M., S. Khan and M. Hafeez. 2010. A comparative analysis of water application and energy consumption

de la alfalfa fueron menores que en el maíz al utilizar solamente aguas subterráneas para el riego. Este hallazgo reflejó el impacto de la gestión agrícola (incluyendo el riego, fertilización, control de plagas, malezas y enfermedades y otras prácticas agronómicas) sobre la productividad de la energía y el agua. Por esta razón, la amplia gama de la productividad del agua o de la energía se obtuvo en los campos estudiados. Sin embargo, los valores de la productividad del agua y de la energía en los sistemas de riego por aspersión se determinaron en la situación actual del área de estudio.

Conclusiones

En este estudio, se obtuvo la productividad del agua y la energía en el sistema de riego por aspersión en los principales cultivos en la planicie de Qazvin. En general, el trigo y la cebada tuvieron la misma productividad del agua. La alfalfa tuvo menor productividad del agua en comparación con los otros tres cultivos. Adicionalmente, el trigo tuvo mayor productividad energética y la alfalfa tuvo menor productividad energética en comparación con los otros tres cultivos. La mayor productividad del maíz y la alfalfa, como cultivos de alta demanda de agua, se obtuvo en sistemas de riego fijo y por aspersión con movimientos continuos, respectivamente. El consumo de energía en los campos con aguas subterráneas estuvo altamente relacionado con la profundidad de las aguas subterráneas en comparación con la presión del sistema de riego.

at the irrigated field level. *Agric. Water Manage.* 97(10):1477-1485.

Kahlowan, M., A. Raouf, M. Zubair and W. Doral Kemper. 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. *Agric. Water Manage.* 87(3):292-298.

Kaviani, A., T. Sohrabi and P. Arasteh. 2011. Evapotranspiration and water productivity estimation using SEBAL algorithm and comparison with lysimeter data. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 5(2):165-175.

Khan, S., M.A. Khan and N. Latif. 2010. Energy requirements and economic analysis of wheat, rice and barley production in Australia. *Soil Environ.* 29(1):61-68.

Kuper, M., A. Hammani, A. Chohin, P. Garin and M. Saaf. 2012. When groundwater takes over: linking 40 years of agricultural and groundwater dynamics in a large-scale irrigation scheme in Morocco. *Irrig. Drain.* 61(1):45-53.

Lashkaripour, G.R., A. Asghari-Moghaddam and M. Allaf-Najib. 2005. The effects of water table decline on the groundwater quality in Marand Plain, Northwest Iran. *Iranian International Journal of Science* 6(1):47-60.

Liu, H.J., Y. Kang, S.M. Yao, Z.Q. Sun, S.P. Liu and Q.G. Wang. 2013. Field evaluation on water productivity of winter wheat under sprinkler or surface irrigation in the North China plain. *Irrig. Drain.* 62(1):37-49.

Liu, J., A.J.B. Zehnder and H. Yang. 2008. Drops for crops: modelling crop water productivity on a global scale. *Global NEST Journal* 10(3):295-300.

Martin-Gorrioz, B., M. Soto-García and V. Martínez-Álvarez. 2014. Energy and greenhouse-gas emissions in irrigated agriculture of SE (southeast) Spain. Effects of alternative water supply scenarios. *Energy* 77(12):478-488.

Mokari Ghahroodi, E., H. Noory and A.M. Liaghat. 2015. Performance

El uso conjunto del pozo y el canal causaron una reducción significativa del consumo de energía, aumentando la productividad energética. Este estudio también indicó que la profundidad de las aguas subterráneas, la presión requerida del sistema de riego, la fuente de agua, el tipo de cultivo y el manejo agrícola para la producción de cultivos tuvieron un alto impacto en el consumo de energía, el cual resultó en una amplia productividad de la energía en los campos estudiados. En cuanto a los valores de la productividad del agua y la energía, el trigo y la alfalfa tuvieron mayor y menor ventaja para ser cultivados en el área de estudio. El costo energético y la productividad deben ser considerados como uno de los principales factores para elegir el patrón de cultivo más apropiado.

El aumento del costo de la energía para el riego debido al bajo nivel de agua subterránea en las regiones áridas y semiáridas puede afectar significativamente a la producción económica agrícola. El costo del consumo de energía para el suministro de agua puede ser alto en regiones que tengan aguas subterráneas profundas o semiprofundas. Se recomienda evaluar la productividad energética bajo las prácticas de riego no productivas, especialmente en regiones donde el costo de la energía es alto. Además, se necesitan llevar a cabo más investigaciones para evaluar y comparar la productividad energética en diferentes sistemas de riego.

El ahorro energético es un requisito para el funcionamiento sostenible y económico de los sistemas

evaluation study and hydrologic and productive analysis of irrigation systems at the Qazvin irrigation network (Iran). *Agric. Water Manage.* 148(1):189-195.

Motagh, M., T.R. Walter, M.A. Sharifi, E. Fielding, A. Schenk, J. Anderssohn and J. Zschau. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophys. Res. Lett.* 35(16):L16403.

Nabavi, A., A. Sadeghzadeh, M.H. Payman and H.G. Mobtaker. 2013. Energy flow modeling, economic and sensitivity analysis of eggplant production in Guilan province of Iran. *IJACS.* 5(24):3006-3015.

Naroua, I., L. Rodríguez and R.S. Calvo. 2014. Water use efficiency and water productivity in the Spanish irrigation district "Río Adaja". *IJAPR.* 2(12):484-491.

Panahi, F.H. and M. Kafi. 2012. Assessing the energy budget in farm production and productivity of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Kurdistan, case study: Dehlogan. *Journal of Agroecology* 4(2):159-169.

Pradeleix, L., P. Roux, S. Bouarfa, B. Jaouani, Z. Lili Chabaane and V. Bellon Maurel. 2015. Environmental impacts of contrasted groundwater pumping systems assessed by life cycle assessment methodology: Contribution to the water-energy nexus study. *Irrig. Drain.* 64(1):124-138.

Robles, O., E. Playán, J. Cavero and N. Zapata. 2017. Assessing low-pressure solid-set sprinkler irrigation in maize. *Agric. Water Manage.* 191:37-49.

Shahan, S., A. Jafari, H. Mobli, S. Rafiee and M. Karimi. 2008. Energy use and economical analysis of wheat production in Iran: a case study from Ardabil province. *Journal of Agricultural Technology* 4(1):77-88.

de riego a presión (como por ejemplo, la reducción de las pérdidas de agua de riego y el uso de sistemas de riego de baja presión). El diseño óptimo y el manejo de los sistemas de riego y de bombeo es importante para reducir al mínimo el costo de la abstracción y de la aplicación del agua y maximizar el beneficio neto de la agricultura.

Fin de versión Español

Singh, R., J.C. van Dam and R.A. Feddes. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa District, India. *Agric. Water Manage.* 82(3):253-278.

Unknown. 2014. Iranian Ministry of Jihad-e-Agriculture, Center of Statistics and Information Technology. Available in: <http://dbagri.maj.ir>. Date of consultation: October 2014.

Voss, K.A., J.S. Famiglietti, M. Lo, C. Linage, M. Rodell and S.C. Swenson. 2013. Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris Euphrates Western Iran region. *Water Resour. Res.* 49(2):904-914.

Zwart, S.J. and W.G.M. Bastiaansen. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agric. Water Manage.* 69(2):115-133.