

Evaluation and assessment of surface energy balance algorithm for land by Landsat 5 satellite imageries to determine water requirement and water productivity of sugar beet by lysimetric data

Ali Morshedi^{1*} , Niaz Ali Ebrahimipak² , Behrouz Hoseini Boroujeni³ 

¹ Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center of Chaharmahal and Bakhtiari Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrekord, Iran

² Associate Professor, Irrigation and Soil Physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

³ Expert, Farokhshahr Agricultural Meteorological Research Center, Shahrekord, Iran

Abstract

Introduction

In recent years, we have witnessed the unsustainable use of water resources, which has led to short-term and long-term water crises. The diversity of water and soil resources, along with climate change, has made the scientific management of agricultural water inevitable. In a such scenario, managing scarce water resources to meet ever-increasing needs is challenging. To make the best use of water resources, it is important to know the amount of water needed for economic production. Determining the water requirement of crops, especially the evapotranspiration potential, indirect ways and in different climates for agricultural and orchard plants is one of the basic strategies of each region. Evapotranspiration (ET) is a process that includes two parts: evaporation (evaporation of water from the surface of soil and vegetation and surface water) and transpiration (evaporation of water from plant organs due to plant physiological activities). The purpose of estimating evapotranspiration is to determine the crop's water requirement, and irrigation planning, and to evaluate the sensitivity of crops' performance to water deficiency in different stages of plant growth. Sugar beet is one of agricultural crops that is placed in the cultivation pattern and is cultivated in a wide area of the world due to the need for sugar consumption. Determining the evapotranspiration of this crop and planning its irrigation is of particular importance. Numerous studies showed that the water requirement of sugar beet, based on the variety and climate, differs. Various techniques have been proposed to measure ETc, and each method has advantages and limitations. Some of the widely used methods are lysimetric experiments, eddy covariance, Bowen ratio, energy balance method, and soil water balance method. In recent years, new technologies are also used to estimate evapotranspiration, among them, the Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) can be mentioned. This research aims to compare ET, water requirement, and water productivity of sugar beet in lysimetric data to SEBAL algorithm using Landsat 5 satellite images, from 1996 to 1998.

Materials and Methods

This experiment was carried out at the Chahar-Takhteh research station (Shahrekord, Iran) at latitude 50° 56' and longitude 31° 11', 2066 m above sea level. In the spring of 1996, 1997, and 1998, before planting the crop, the soil inside the lysimeter was irrigated to reach the saturation level. Two days after irrigation and at field capacity, monogram seeds of sugar beet, at the rate of 120,000 crops per hectare, were cropped. The row spacing in the field around the lysimeter was similar. Irrigation was based on the discharge of about 35 to 45 % of the moisture content at field capacity. The required amount of water was calculated by the neutron probe and added to the lysimeter. simultaneously, the surrounding area was also irrigated. Remote sensing data included Landsat 5 satellite images for the years of experiment, path 164, and row 38. The temporal resolution of the satellite was 16 days. Spatial resolution for visible, near, and mid-infrared bands was 30 and 120 m for thermal infrared. The 25 cloud-free images were downloaded (6, 9, and 10 images) for research years. These images were retrieved from the website (<https://earthexplorer.usgs.gov>) as geometrically and radiometrically corrected and processed in ERDAS Imagine 2022 software. To estimate actual evapotranspiration, the energy balance equation is used, $\lambda ET = R_n - G_0 - H$. In this equation, R_n is the net incoming radiation flux, H is the sensible heat flux, G_0 is the soil heat flux, and λET is the latent heat flux of evaporation (W/m^2). The statistical indicators include mean absolute error (MAE) which is unsigned, mean bias error (MBE), root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), and Coefficient of Determination (R^2).

Results and Discussion

Evapotranspiration of sugar beet in lysimeter and in SEBAL on the days of satellite passage in 1996 to 1998 (25 over-passes without clouds) showed that the difference of evapotranspiration in the two methods was -1.20 % and -0.13 mm d⁻¹, which showed high accuracy. The negative sign means that the SEBAL estimates were lower than the corresponding values in the lysimeter. The statistical indices values of RMSE, NRMSE, MAE, and MBE for 25 pairs of

evapotranspiration values were 0.7031 mm d⁻¹, 0.1102, 0.5552, and -0.1312, respectively. The RMSE, NRMSE, MAE and MBE statistical indices for 18 pairs of monthly evapotranspiration were 54.1155 mm month⁻¹, 0.3225, 40.9462, and -28.7955, respectively. The total values of evapotranspiration in lysimeter were equal to 1096.6, 1022.6, and 906.3 mm during the growth period (total mean equal to 1040.6 mm) from 1996 to 1998, respectively. The total values of evapotranspiration in the SEBAL were equal to 1004.6, 831.6, and 666.4 mm during the growth period, total mean of 834.2 mm. The mean difference was around 19.8%. The results of mean water productivity were 5.02 kg m⁻³ in lysimeter and 6.26 kg m⁻³ in SEBAL. Because of lower evapotranspiration values in SEBAL compared to the lysimeter, the water productivity values were higher.

Conclusion

Determining the water requirement of crops is the basis of planning for the sustainable use of water resources and irrigation of crops. The sugar beet has a great amount of evapotranspiration due to its large green cover. Accurate quantification of crop evapotranspiration (ET_c) at local and regional scales can help water policy and decision-making in water resources and their management. The results indicated that the SEBAL algorithm using Landsat 5 satellite images with a coefficient of determination (R²=0.9889) in the daily time period and a coefficient of determination (R²=0.9318) in the monthly time period had a good correlation with lysimetric data. In general, results showed that SEBAL has a special capability as one of the widely used remote sensing algorithms to estimate crop evapotranspiration.

Keywords: Evapotranspiration, Lysimeter, Landsat, SEBAL, Sugar beet

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: a.morshedi@areeo.ac.ir

Citation: Morshedi, A., Ebrahimipak, N.A., & Hoseini Boroujeni, B. (2023). Evaluation and assessment of surface energy balance algorithm for land by Landsat 5 satellite imageries to determine water requirement and water productivity of sugar beet by lysimetric data. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 251-268.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11861.1181

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.17.7

Received: 28 November 2022, Received in revised form: 16 December 2022, Accepted: 16 December 2022, Published online: 16 December 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 251-268

Publisher: University of Mohagheh Ardabili

© Author(s)





برآورد و ارزیابی الگوریتم توازن انرژی برای سطح از تصاویر ماهواره لندست ۵ در تعیین نیاز آبی و بهره‌وری آب محصول چغندر قند با استفاده از داده‌های لایسیمتر

علی مرشدی^{۱*}، نیازعلی ابراهیمی پاک^۲، بهروز حسینی بروجنی^۳

^۱ استادیار، گروه تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران
^۲ دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
^۳ کارشناس، مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی فرخ شهر، شهرکرد، ایران

چکیده

به منظور استفاده بهینه از منابع آب، دانستن مقدار آب لازم برای تولید اقتصادی محصول از اهمیت خاصی برخوردار است. تعیین نیاز آبی گیاهان مخصوصاً تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه به روش‌های مستقیم و در اقلیم‌های متفاوت برای گیاهان زراعی و باغی از راهبردهای اساسی هر منطقه بوده و مبنای برنامه‌ریزی برای استفاده از منابع آب و آبیاری گیاهان است. تبخیر و تعرق فرآیندی است شامل دو بخش تبخیر (بخارشدن آب از سطح خاک و پوشش گیاهی و آب‌های سطحی) و تعرق (بخارشدن آب از اندام گیاهان در اثر فعالیت‌های فیزیولوژی گیاه). هدف از برآورد تبخیر و تعرق، تعیین نیاز آبی گیاه، برنامه‌ریزی آبیاری و ارزیابی حساسیت عملکرد گیاهان نسبت به کمبود آب در مراحل مختلف رشد گیاه است که یکی از عوامل مهم در چرخه‌ی هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می‌باشد. اغلب روش‌های زمینی از اندازه‌گیری نقطه‌ای برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند. سنجش از دور این قابلیت را دارد تا مقدار تبخیر و تعرق را تخمین زده و توزیع مکانی آن را مورد بررسی قرار دهد. در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۵ برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه گیاه چغندر قند، در شهرکرد، واقع در استان چهارمحال و بختیاری، با استفاده از مدل سبال، در ۲۵ تاریخ گذر ماهواره لندست ۵ استفاده گردید. اعتبارسنجی کارایی مدل سبال با استفاده از تصاویر لندست ۵ نسبت به نتایج لایسیمتری انجام شد و نتایج حاکی از آن بود که الگوریتم سبال با ضریب تبیین $R^2=0.9889$ در بازه زمانی روزانه و ضریب تبیین $R^2=0.9318$ در بازه زمانی ماهانه بود و در مجموع همبستگی و تطابق خوب و مناسبی را با نتایج آزمایش لایسیمتری داشته و نتایجی مشابه این روش را تخمین زده است. بطور کلی، نتایج پژوهش نشان داد که الگوریتم توازن انرژی برای سطح یا سبال به عنوان یکی از الگوریتم‌های پر کاربرد سنجش از دور در برآورد تبخیر و تعرق گیاه، از قابلیت ویژه‌ای برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، چغندر قند، سبال، لایسیمتر، لندست

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.morshedi@areeo.ac.ir

استناد: مرشدی، علی، ابراهیمی پاک، نیازعلی، و حسینی بروجنی، بهروز (۱۴۰۲). برآورد و ارزیابی الگوریتم توازن انرژی برای سطح از تصاویر ماهواره لندست ۵ در تعیین نیاز آبی و بهره‌وری آب محصول چغندر قند با استفاده از داده‌های لایسیمتر. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۶۸-۲۵۱.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11861.1181
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.17.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۲۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۲۵۱ تا ۲۶۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده ناپایدار از منابع آبی منجر به بحران‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت آبی شده است. تنوع منابع آب و خاک، همراه با تغییرات اقلیمی، مدیریت علمی آب کشاورزی را اجتناب‌ناپذیر کرده است. در چنین سناریویی، مدیریت منابع کمیاب آب برای تءمین نیازهای روزافزون یک چالش است.

به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب، دانستن مقدار آب لازم برای تولید اقتصادی محصول از اهمیت خاصی برخوردار است. تعیین نیاز آبی گیاهان مخصوصاً تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه به روش‌های مستقیم و در اقلیم‌های متفاوت برای گیاهان زراعی و باغی از راهبردهای اساسی هر منطقه بوده و مبنای برنامه‌ریزی برای استفاده از منابع آب و آبیاری گیاهان است. تبخیر-تعرق (ET) یک فرآیند دو بخشی یعنی بخار شدن آب از سطح خاک و پوشش گیاهی و آب‌های سطحی (تبخیر) و بخار شدن آب از اندام گیاهان در اثر فعالیت‌های فیزیولوژی گیاه (تعرق) است. هدف از برآورد تبخیر-تعرق، تعیین نیاز آبی گیاه، برنامه‌ریزی آبیاری و ارزیابی حساسیت عملکرد گیاهان نسبت به کمبود آب در مراحل مختلف رشد گیاه است (Allen et al., 1998).

چغندر قند یکی از گیاهان زراعی است که هم در الگوی کشت قرار می‌گیرد و هم با توجه به نیاز مصرفی شکر در سطح وسیعی از دنیا کشت می‌شود. تعیین تبخیر-تعرق این گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری آن از اهمیت خاصی برخوردار است. پژوهش‌های زیادی نشان می‌دهد که نیاز آبی چغندر قند براساس وارسته و اقلیم متفاوت است (Scott, 2001). گیاه چغندر قند به دلیل پوشش زیاد سبزینه‌ای، تأثیر زیادی بر مقدار تبخیر-تعرق دارد. کمی‌سازی دقیق تبخیر-تعرق گیاه (ETc) در مقیاس محلی و منطقه‌ای می‌تواند به سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری مبتنی بر منابع آب و مدیریت آن کمک کند.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ETc همراه با هدف، مزایا و محدودیت‌های خاص خود ارائه شده است. برخی از روش‌های پرکاربرد عبارتند از: لایسیمتر (Evet et al., 2012)، کوواریانس گردابی (Moorhead et al., 2019)، تعادل انرژی نسبت بوون (Irmak, 2010)، رویکرد ضریب زراعی (Allen et al., 1998)، روش نظارت بر گیاه (جریان شیره) (Smith and Allen, 1996)، روش تعادل انرژی (Allen et al., 2007) و روش تعادل آب خاک (Gibson, 2002).

Yetik and Candoğan (2022) از لایسیمتر به‌عنوان یک روش مستقیم و دقیق برای به‌دست آوردن میزان تبخیر-تعرق

محصول چغندر قند در مناطق مختلف ایران استفاده کرده و بیان کردند که این مقدار از ۹۰۰ میلی‌متر تا ۱۲۰۰ میلی‌متر متغیر است. همچنین، Caliandro et al. (1990) در منطقه کالیفرنیا مقدار تبخیر-تعرق گیاه چغندر قند را با استفاده از یک لایسیمتر زهکش‌دار برابر با ۱۰۴۵ میلی‌متر به‌دست آوردند که حدود ۶۷ درصد تبخیر از تشت کلاس A بود. در ادامه، Legoupil (1972) در ناحیه Chelif مقدار تبخیر-تعرق چغندر قند حاصل از لایسیمتر را برابر ۱۶۱۱ میلی‌متر در طول سال و با استفاده از روش‌های تجربی مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل را بین ۱۱۶۵ تا ۱۳۷۵ میلی‌متر به‌دست آورد. در مطالعه Pruitt et al. (1970) در منطقه دیویس کالیفرنیا نیز میزان تبخیر-تعرق گیاه چغندر قند برای ارقام زود کاشت برابر با ۹۷۵/۴ میلی‌متر و برای ارقام دیرکاشت برابر با ۷۲۶/۴ میلی‌متر محاسبه شده است. در پژوهشی دیگر Roth and Gunther (1992) در آلمان با استفاده از یک لایسیمتر زهکش‌دار میزان تبخیر-تعرق گیاه چغندر قند، ۲۸۶ میلی‌متر در طول سال به‌دست آوردند. در پژوهش Roth et al. (1989) در کشور آلمان با استفاده از یک لایسیمتر وزنی، مقدار تبخیر-تعرق گیاه برابر با ۳۹۷ میلی‌متر در طول سال و به‌طور متوسط روزانه برابر با ۳/۵ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین، Barbier (1982) در ایتالیا نتیجه گرفت که برداشت دیر هنگام چغندر قند نیاز به ۶۵۰ میلی‌متر و برداشت زود هنگام نیاز به ۳۵۰ میلی‌متر آب دارد. در نهایت در مناطق نیمه‌خشک Nimah and Mukhayyish (1980) میزان تبخیر-تعرق چغندر قند را ۱۴۲۳/۳ میلی‌متر و در پنجاب هندوستان Bains and Narany (1988) ۴۹۴ میلی‌متر محاسبه کردند. در پژوهش‌های انجام شده در ایران، مقدار تبخیر-تعرق گیاه چغندر قند با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار در زرگان فارس ۲۳۰۱ میلی‌متر (Rahimian, 1997)، در کرمانشاه ۱۶۳۵ میلی‌متر (Taheri, 1982)، در طرق مشهد ۱۵۴۵ میلی‌متر، در ارومیه ۱۷۵۶ میلی‌متر (Razavi, 1995)، در منطقه روددشت اصفهان ۱۲۰۰ میلی‌متر و برای اصفهان ۹۷۰ میلی‌متر در تن در هکتر (Waziri, 1997) گزارش شده است.

در سال‌های اخیر از فن‌آوری‌های نوین برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌شود که در این باره می‌توان به الگوریتم سبال^۳ که اولین بار توسط Bastiaanssen et al. (1998) ارائه و توسط Allen et al. (2007) اصلاح شده، اشاره کرد. در سال‌های اخیر و در کشور ایران نیز، مطالعات متعددی به‌منظور صحت‌سنجی و ارزیابی کارایی الگوریتم سبال و یا به‌طور کلی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق بر پایه داده‌های سنجش از دور با استفاده از نتایج

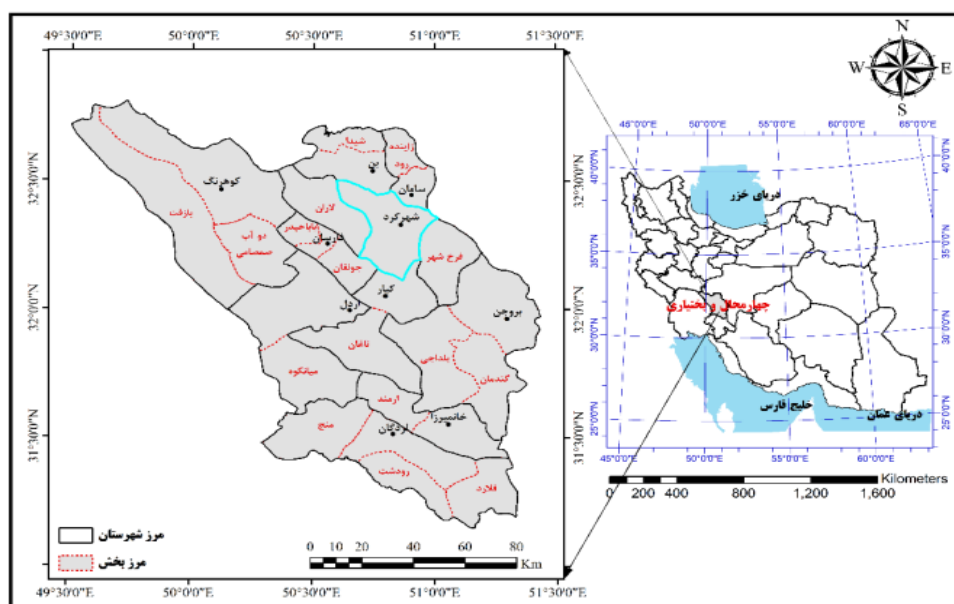
^۱Evapotranspiration (ET)^۲Evapotranspiration of Crop (ETc)^۳Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

۲-۱- موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه

این آزمایش در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته شهرکرد در عرض جغرافیایی $50^{\circ}56'$ و طول جغرافیایی $31^{\circ}11'$ و در ارتفاع ۲۰۶۶ متر از سطح دریا طی سه سال زراعی (۱۳۷۵ لغایت ۱۳۷۷) اجرا شد. میانگین دمای سالانه منطقه $12/02$ درجه سانتیگراد که میانگین آن در مناطق کوهستانی $7/2$ و در دشت $13/5$ درجه سانتیگراد گزارش شده است. متوسط بارندگی سالانه در کل حوضه آبریز ۴۰۰ میلی‌متر و اقلیم منطقه مطالعاتی بر اساس طبقه‌بندی کریمی، نیمه‌مرطوب معتدل سرد، بر اساس طبقه‌بندی کوپن، معتدل سرد با تابستان‌های گرم و خشک و بر اساس طبقه‌بندی دوماترن، نیمه‌خشک و سرد است (Mahdavi et al., 2010). در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و ایران ارائه شده است.

لایسیمتری انجام شده است. از جمله می‌توان به پژوهش Nouri Abbasnezhad Alchin et al. and Faramarzi (2017) و (2020) و Morshedi et al. (2022) که با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS و یا Landsat صورت گرفته، اشاره کرد. با توجه به این که پژوهش‌های کمی بر اساس داده‌های لایسیمتری در کشور انجام شده است بنابراین، هدف از این پژوهش، به‌روزرسانی و استفاده از داده‌های لایسیمتری در یک پژوهش در سال‌های ۱۳۷۷ - ۱۳۷۵ (۱۹۹۸ - ۱۹۹۶ میلادی) به‌منظور برآورد تخییر-تعرق واقعی و نیاز آبی چغندرقد توسط الگوریتم سیال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و مقایسه آن با داده‌های لایسیمتری موجود در آن پژوهش علمی که در طول سه سال زراعی در بخشی از دشت مرتفع شهرکرد انجام شده است، می‌باشد (Ebrahimipak and Ghalebi, 2014).

۲- مواد و روش‌ها



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و ایران
Figure 1- Location of Study Area in Chaharmahal and Bakhtiari Province and Iran

سانتی‌مترمکعب است. برخی ویژگی‌های شیمیایی در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر نیم‌رخ خاک مطابق جدول ۲ و ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده نیز (کلاس آب آبیاری C1S1) در جدول ۳ ارائه شده است (Thorne, 1954).

۲-۳- کاشت گیاه

در بهار سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۷۶ و ۱۳۷۷ قبل از کشت گیاه، خاک درون لایسیمتر به اندازه‌ای که با خروج آب از لوله خروجی به حد اشباع برسد، آبیاری شد. دو روز پس از آبیاری و حصول به حد ظرفیت زراعی، اقدام به کشت بذر منورزم رقم ۷۲۳۳ به میزان

۲-۲- وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

ویژگی‌های رطوبتی خاک محل آزمایش در شش عمق پروفیل خاک به شرح جدول ۱ شامل ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و وزن مخصوص ظاهری است. با توجه به جدول ۱، مشاهده می‌شود که رطوبت ظرفیت زراعی ناحیه آزمایش به‌طور متوسط معادل $21/08$ درصد وزنی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) به‌طور متوسط معادل $11/4$ درصد وزنی است. متوسط وزن مخصوص ظاهری خاک ناحیه آزمایش $1/6$ گرم بر

^۱Permanent Wilting Point (PWP)

۱۲۰۰۰۰ بوته در هکتار شد. فاصله ردیف در مزرعه اطراف لایسیمتر مشابه بود.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک محل انجام آزمایش

Table 1- Physical characteristics of different layers of the soil at the test site

عمق لایه‌های خاک (سانتی‌متر)	رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) (درصد)	رطوبت نقطه پژمردگی (درصد)	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
0-25	22.5	12.7	1.34
25-50	23	12.9	1.57
50-75	24	13.5	1.78
75-120	17.2	9.5	1.67
120-140	19.2	9.7	1.69
140-185	20.6	10.1	1.67

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی خاک محل اجرای آزمون

Table 2- Chemical analysis of the soil at the test site before the initial planting

عمق (سانتی‌متر)	رطوبت اشباع (درصد)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	واکنش گل اشباع pH	درصد مواد خنثی شونده (درصد)	کربن آبی (درصد)	نیتروژن کل (درصد)	فسفر قابل جذب (ppm)	پتاسیم قابل جذب (ppm)
0-30	45	0.35	8.07	40.4	0.55	7	8.15	384
30-60	52	0.32	8.08	38	0.48	7.2	7.7	293

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی آب آبیاری

Table 3- Chemical analysis of irrigation water

کلاس آب	مجموع کاتیون‌ها	سدیم	منیزیم	کلسیم	مجموع آنیون‌ها	سولفات	کلر	کربنات بی	کربنات	اسیدیتته pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)
CIS1	7.5	0.7	3.4	3.4	1.4	0.8	0.4	2.9	-	7.7	370

در این پژوهش از پارامترهای هواشناسی شامل دماهای کمینه و بیشینه، دمای مرطوب و خشک هوا در لحظه گذر، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی، فشار هوا، فشار بخار هوا، مقدار تبخیر-تعرق گیاه چغندرقد با استفاده از لایسیمتر از طریق رابطه (۱) به دست آمد. در این رابطه ET_c ؛ تبخیر-تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر)، I ؛ آب آبیاری (میلی‌متر)، P ؛ میزان بارش (میلی‌متر)، D ؛ آب زهکش (میلی‌متر)، P_{w1} ؛ رطوبت خاک زمان گذشته (میلی‌متر) (رطوبت خاک قبل از آبیاری) و P_{w2} ؛ رطوبت خاک حال حاضر (میلی‌متر) (رطوبت خاک بعد از آبیاری).

۲-۴- آبیاری

مقدار آب لازم از طریق نوترون متر محاسبه و سپس توسط کنتور به داخل لایسیمتر افزوده شد. هم‌زمان با آبیاری داخل لایسیمتر، اطراف آن نیز آبیاری شد. دور آبیاری در ۳۵ تا ۴۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه انجام و مقدار تبخیر-تعرق گیاه چغندرقد با استفاده از لایسیمتر از طریق رابطه (۱) به دست آمد. در این رابطه ET_c ؛ تبخیر-تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر)، I ؛ آب آبیاری (میلی‌متر)، P ؛ میزان بارش (میلی‌متر)، D ؛ آب زهکش (میلی‌متر)، P_{w1} ؛ رطوبت خاک زمان گذشته (میلی‌متر) (رطوبت خاک قبل از آبیاری) و P_{w2} ؛ رطوبت خاک حال حاضر (میلی‌متر) (رطوبت خاک بعد از آبیاری).

$$ET_c = I + P - D \pm \sum_{i=1}^n (P_{w1} - P_{w2}) \quad (1)$$

۲-۵- داشت و برداشت محصول

دوره رشد از ابتدای دهه سوم اردیبهشت ماه هر سال تا پایان دهه دوم آبان هر سال زراعی بود. از زمان کاشت محصول تا برداشت آن علاوه بر دقت در آبیاری، مزرعه یک‌بار تنک شد و سه‌بار با علف‌های هرز به صورت دستی مبارزه شد. علاوه بر آن، دوبار محلول پاشی بر (پنج در هزار) و مبارزه بر علیه آفات و بیماری‌ها به خصوص کک چغندرقد (سویین سه در هزار) و آفات دیگر انجام گرفت.

۲-۶- پارامترهای هواشناسی

۲-۷- تصاویر ماهواره‌ای

داده‌های سنجنش از دور شامل تصاویر ماهواره لندست ۵ برای سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۷۶ و ۱۳۷۷ بود. قدرت تفکیک زمانی ماهواره، ۱۶ روز است. قدرت تفکیک مکانی برای باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی، ۳۰ متر و برای باند مادون قرمز حرارتی، ۱۲۰ متر است. تعداد تصویر بدون ابر برای هر سال پژوهش شامل ۶، ۹ و ۱۰ و در کل ۲۵ تصویر بود. این تصاویر از وبسایت (<https://earthexplorer.usgs.gov>) به صورت تصحیح شده از نظر هندسی و رادیومتریک فراخوان و در نرم‌افزار ERDAS Imagine 2022 پردازش شدند.

۲-۷-۱- پرتو تابشی طیفی برای هر باند (L_{λ})

پرتو طیفی برای هر باند (L_{λ}) با استفاده از انرژی تابشی خارج شده از باند مورد نظر در بالاترین نقطه جو مشاهده شده توسط

۲-۸-۱- محاسبه شار تابش خالص سطح (R_n)

محاسبه شار تابش خالص سطح R_n با استفاده از رابطه (۱۰) انجام شد (Waters et al., 2002).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (10)$$

ضریب بازتاب سطح α ، تابش خورشیدی ورودی به سطح زمین در محدوده موج کوتاه (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش خورشیدی ورودی موج بلند (W/m^2) و $R_{L\uparrow}$ تابش خورشیدی خروجی موج بلند (W/m^2) است. $R_{S\downarrow}$ در شرایط آسمان صاف، برای زمان تصویربرداری به کمک رابطه (۱۱) محاسبه شد:

$$R_{S\downarrow} = G_{sc} * \cos\theta * d_r * \tau_{sw} \quad (11)$$

در این رابطه G_{sc} : عبارت است از ثابت خورشیدی برابر ۱۳۶۷ (W/m^2)، θ : زاویه تابش خورشیدی در زمان گذر ماهواره، d_r : عکس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید و τ_{sw} : ضریب عبور اتمسفر است. مقادیر $R_{S\downarrow}$ تابع زمان و موقعیت تصویر ماهواره است (Waters et al., 2002).

تابش خورشیدی موج بلند خروجی $R_{L\uparrow}$ با استفاده از رابطه (۱۲) (استفان-بولتزمن) محاسبه شد، که در آن ε_0 : تابندگی "باند پهن" سطح (بدون بعد)، σ : ثابت استفان-بولتزمن ($W/m^2/K$)^۸ و T_s : دمای سطح (K) است.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4 \quad (12)$$

تابش موج بلند ورودی ($R_{L\downarrow}$)، تابش خورشیدی رو به پایین از جو (W/m^2) است که با استفاده از رابطه استفان-بولتزمن به دست آمد. در این رابطه ε_a : تابندگی جو (بدون بعد)، ε_a : ثابت استفان-بولتزمن و T_a : دمای هوای نزدیک به سطح (k) است که از رابطه (۱۴) به دست آمد (Bastiaanssen et al., 2005).

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a * \sigma * T_a^4 \quad (13)$$

$$\varepsilon_a = 0.85(-\ln \tau_{sw})^{0.09} \quad (14)$$

τ_{sw} ضریب عبور جو بوده و در هوای صاف و بدون ابر و تا حدودی خشک که با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه شد. این پدیده برای تابش‌های ورودی و خروجی رخ می‌دهد. τ_{sw} در بردارنده قابلیت انتقال برای هر دو تابش مستقیم خورشیدی و پراکنده (متفرق) به سطح است. در رابطه زیر Z (متر) ارتفاع ایستگاه هواشناسی از سطح دریاست (Bastiaanssen et al., 2005)

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 * 10^{-5} * Z \quad (15)$$

ماهواره با واحد ($W/m^2/sr/\mu m$) و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه Gain و Bias از اطلاعات موجود در فایل همراه هر تصویر ماهواره‌ای به دست آمد.

$$L_\lambda = (Gain * DN) + Bias \quad (2)$$

۲-۷-۲- بازتاب پذیری هر باند (ρ_λ)

بازتاب‌پذیری هر باند (ρ_λ) یعنی نسبت شار تابشی بازتاب شده به شار تابشی ورودی تعریف و این پارامتر توسط رابطه (۳) محاسبه شد:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda}{ESUN_\lambda * \cos\theta * d_r} \quad (3)$$

در آن، $ESUN_\lambda$ متوسط تابش خورشیدی در خارج از جو برای هر باند ($W/m^2/\mu m$)، $\cos\theta$: کسینوس زاویه تابش خورشیدی (نسبت به حالت قائم) که با استفاده از داده‌های فایل سرآیند (Header File) و بر اساس زاویه ارتفاعی خورشید (β) محاسبه می‌شود (رابطه ۴)؛ d_r : عکس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید که در آن پارامتر s فاصله نسبی بین زمین تا خورشید در واحد نجومی است (رابطه ۵). مقادیر $ESUN_\lambda$ در جدول‌های مربوطه آمده است (Chander et al., 2009).

$$\theta = (90 - \beta) \quad (4)$$

$$d_r = 1/(d_{e-s})^2 \quad (5)$$

ضریب بازتاب بالاترین نقطه جو (α_{toa})، ضریب وزنی مربوط به هر باند (ω_λ) و ضریب بازتاب سطح که پس از تصحیح α_{toa} محاسبه می‌شود، به ترتیب از طریق رابطه‌های (۶) تا (۸) محاسبه شدند:

$$\alpha_{toa} = \sum(\omega_\lambda * \rho_\lambda) \quad (6)$$

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (8)$$

در رابطه (۸) $\alpha_{path_radiance}$ میانگین همه تابش‌های خورشیدی ورودی در تمامی باندها به سوی ماهواره و τ_{sw} ضریب عبور جو. مقادیر مربوط به $\alpha_{path_radiance}$ دامنه‌ای بین ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ داشته و برای الگوریتم سبال به میزان ۰/۰۳ پیشنهاد شده است (Bastiaanssen et al., 2000; Bastiaanssen et al., 2005; Allen et al., 2007).

۲-۸-۲- رابطه موازنه انرژی

برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G_0 - H \quad (9)$$

در آن λET : شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)؛ R_n : شار تابش ورودی خالص به سطح مورد نظر، G_0 : شار گرمای خاک و H : شار گرمای محسوس است (Waters et al., 2002).

^۸Soil Heat Flux (G_0)

^۹Sensible Heat Flux (H)

^{۱۰}Net Radiation (R_n)

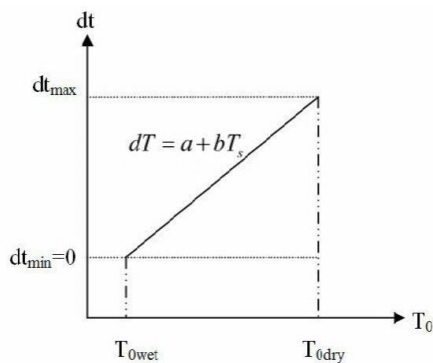
^{۱۱}Reflectance

پیکسل گرم این است که شار گرمای نهان منتشر نمی‌کند و به عبارتی مقدار تبخیر-تعرق آن نزدیک به صفر است. یکی از ضروریات الگوریتم سبال، برقراری رابطه خطی بین دمای سطح T_s و تفاوت دمای هوا - سطح (dT) برای هر پیکسل با استفاده از پیکسل‌های گرم (خشک) و سرد (تر) است (Waters et al., 2002). مقدار تفاوت دمای هوا- سطح (dT) را می‌توان از یک رابطه نسبتاً خطی با T_s تخمین زد؛ یعنی:

$$dT = aT_s + b \quad (19)$$

در آن a و b ضرایب تجربی بوده و از نقاط یا پیکسل‌های مرجع (نقاط خشک و تر) به دست می‌آیند. در پیکسل‌های (گرم) خشک، شار گرمای نهان صفر در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین مقدار dT برای هر پیکسل تصویر، الگوریتم سبال بر این فرض استوار است که یک رابطه خطی بین dT و دمای رادیومتریک سطح (T_s) وجود دارد به تعبیر بهتر $dT = aT_s + b$. در این رابطه dT از تفاوت دمای نزدیک به سطح، T_s دمای رادیومتریک سطح و a و b ضرایب تجربی که از پیکسل‌های معیار محاسبه شد. دمای سطح با استفاده از رادینانس حرارتی تصحیح شده برآورد شد (Waters et al., 2002).

به طور کلی پیکسل‌های معیار نماینده شرایط تبخیر در دو آستانه حدافل و حداکثر می‌باشند. در پیکسل سرد (تر) فرض بر این است که میزان تبخیر-تعرق برابر با تفاضل شار تابش خالص و شار گرمای خاک ($R_n - G_0$) است. در پیکسل سرد، شار گرمای محسوس (H) و دمای رادیومتریک سطح (T_s) صفر در نظر گرفته می‌شوند در نتیجه تفاوت دمای هوا- سطح (dT) برابر با صفر یا نزدیک به صفر خواهد بود. در پیکسل گرم (خشک) مقدار تبخیر-تعرق (ET)، برابر یا نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تماماً انرژی موجود در این پیکسل به گرمای محسوس تبدیل می‌شود (Waters et al., 2002). در نهایت با استفاده از مقادیر جفت مؤلفه‌های dT و T_s در پیکسل‌های سرد و گرم، ضرایب a و b به دست می‌آیند (شکل ۲).



شکل ۲- چگونگی برقراری رابطه خطی دمای سطح و تفاوت دمای هوا- سطح

Figure 2- How to establish the linear equation of surface temperature and air-surface temperature difference

با جای گذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۶) و استفاده از T_{cold} یا دمای پیکسل "سرد" به جای T_a که در آن مقادیر مربوط به $R_{L\downarrow}$ به عنوان تابعی از زمان و مکان برداشت تصویر است خواهیم داشت:

$$R_{L\downarrow} = 0.85 * (0.85(-\ln \tau_{sw})^{0.09} * \sigma * T_{cold}^4) \quad (16)$$

۲-۸-۲- محاسبه شار گرمای خاک (G_0)

شار گرمای خاک، نرخ گنجایش گرما در خاک و پوشش گیاهی ناشی از هدایت گرمایی است. نسبت G_0/R_n با استفاده از رابطه تجربی زیر برای نیمروز محاسبه شد (Bastiaanssen et al., 1998) که در آن T_s ؛ دمای سطح (درجه سانتی‌گراد)، α ؛ سپیدایی سطح و NDVI؛ شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی است.

$$\frac{G_0}{R_n} = T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (17)$$

۲-۸-۳- محاسبه شار گرمای محسوس (H)

H با استفاده از رابطه (۱۸) و تخمین پارامتر r_{ah} با استفاده از محاسبات چرخشی تا حصول یک مقدار ثابت برای H در نرم‌افزار اکسل حل شد (Waters et al., 2002). در این رابطه ρ ؛ وزن مخصوص هوا (kg/m^3)، C_p ؛ گرمای ویژه هوا (1004 j/kg/K)، dT ؛ برحسب (K) تفاوت دمای بین دو ارتفاع (Z_1, Z_2) و r_{ah} ؛ مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (s/m) است (Bastiaanssen et al., 2005). در نهایت،

$$H = \frac{\rho \cdot c_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (18)$$

۲-۹- انتخاب پیکسل‌های "گرم" و "سرد"

در اجرای الگوریتم سبال (اصلاح شده) دو پیکسل معیار (Anchor) مورد استفاده قرار می‌گیرد تا شرایط مرزی برای حل رابطه توازن انرژی پدید آید. این مرزها عبارتند از: پیکسل‌های "سرد (تر)" و "گرم (خشک)" که در منطقه مورد مطالعه تعیین می‌شوند. پیکسل اول یا پیکسل سرد در منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه یونجه که خوب آبیاری شده است، انتخاب می‌شود. دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هوا و تبخیر-تعرق آن معادل تبخیر-تعرق گیاه مرجع است. دارا بودن بیشترین شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)، آلبیدوی سطح حدود 0.23 و کم‌ترین دمای سطح از ویژگی‌های پیکسل سرد محسوب می‌شود (Bastiaanssen et al., 2005). پیکسل دوم یعنی پیکسل گرم در زمین‌های کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک انتخاب می‌شود. فرض به کار رفته در مورد

است. همه واحدها بر حسب میلی‌متر بر روز است. محاسبه ET فصلی با جمع کردن همه مقادیر ET_{period} در طول کل دوره رشد به دست می‌آید (رابطه ۲۶).

$$ET_{a_season} = \sum_{i=1}^n (ET_{a-Period})_i \quad (27)$$

۲-۱۲- تبخیر-تعرق مرجع (ET₀)

مبنای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع (ET₀) رابطه (۲۸) است:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - C_1) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{[\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)]} \quad (28)$$

در آن ET₀: تبخیر-تعرق مرجع استاندارد شده (میلی‌متر بر روز)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دمای هوا (کیلو پاسکال بر سانتی‌گراد)، R_n: تابش خالص محاسبه شده در سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T: میانگین دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲/۵-۱/۵ متر، U₂: میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s: فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a: فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، γ: ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال)، C_d و C_n ضرایب به ترتیب برابر با ۰/۳۸ و ۱۶۰۰ هستند که با تغییر گیاه مرجع و دوره زمانی تغییر می‌کنند (Doorenbos and Pruitt, 1977).

۲-۱۳- ارزیابی و صحت‌سنجی

در این پژوهش از شاخص‌های آماری شامل میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error, MAE) (بدون علامت)، میانگین خطای اریب (Mean Bias Error, MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE)، ضریب تبیین (Coefficient of Determination, R²) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (Root Mean Square Error, NRMSE Normalized) استفاده شدند (رابطه‌های (۲۹) تا (۳۹)). هرچه MAE، RMSE و MBE به صفر و مقادیر R² به یک نزدیک‌تر باشد، صحت برآورد الگوریتم سیال بهتر است (Bannayan and Hoogenboom, 2009). هم‌چنین، رابطه رگرسیون خطی (Y = aX) بین مقادیر برآورد شده تبخیر-تعرق از الگوریتم سیال به‌عنوان متغیر وابسته (Y) و داده‌های لایسیمتری به‌عنوان متغیر مستقل (X) برازش داده شد. پارامترهای a و b نیز ضرایب رگرسیون هستند. در رابطه‌های زیر O_i: مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر، Pi: مقدار برآورد شده توسط ماهواره، Ō: میانگین حسابی داده‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است (Bannayan and Hoogenboom, 2009).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (29)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (30)$$

در این پژوهش، مطابق پیش‌فرض‌های الگوریتم سیال، پیکسل سرد در یک مزرعه یونجه با شرایط استاندارد از نظر پوشش گیاهی و آبیاری کامل استفاده شد. پیکسل گرم نیز در اراضی کشاورزی بایر و خشک مجاور انتخاب شد (رابطه ۲۰).

$$ET_F = \frac{\lambda ET}{R_n - G_0} = \frac{R_n - G_0 - H}{R_n - G_0} \quad (20)$$

برای الگوریتم سیال، جزء تبخیر-تعرق (ET_F) طبق تعریف نسبت شار گرمای نهان تبخیر (λET) برای هر پیکسل به تفاضل شار تابش خالص (R_n) و شار گرمای خاک (G₀) است، ET_F مشابه با ضریب شناخته شده K_C یا ضریب گیاهی است. ET_F به‌منظور برون‌یابی ET در زمان برداشت تصویر برای دوره‌های زمانی ۲۴ ساعته و یا بیش‌تر است (رابطه ۲۱).

$$ET_F = \frac{\lambda ET}{R_n - G_0} = \frac{R_n - G_0 - H}{R_n - G_0} \quad (21)$$

مقدار لحظه‌ای ET به‌صورت رابطه (۲۲) محاسبه شد (Morse et al., 2000) که در آن، ET_{inst}: تبخیر-تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، عدد 3600 تبدیل ثانیه به ساعت و λ گرمای نهان تبخیر یا گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب (J/kg) است.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (22)$$

۲-۱۰- مقادیر روزانه تبخیر-تعرق (ET₂₄)

مقدار روزانه تبخیر-تعرق (ET₂₄) با استفاده از رابطه‌های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) محاسبه شد (Mkhwanazi et al., 2015).

$$ET_{pot-24} = \frac{R_{n-24}}{\lambda \cdot \rho_w} (86400 * 10^3) \quad (23)$$

$$R_{n-24} = (1 - \alpha)(R_{a-24} / \cos \theta_{slope}) * \tau_{day} - (110 * \tau_{day}) \quad (24)$$

$$ET_{24} = ET_{pot-24} * ET_F \quad (25)$$

در این رابطه‌های ET_{pot-24}: تبخیر-تعرق پتانسیل ۲۴ ساعته (mm/day)، R_{n-24}: تابش خالص ۲۴ ساعته (W/m²), α: سپیدایی سطح، R_{a-24}: تابش فرازمینی ۲۴ ساعته (W/m²), θ_{slope}: کسینوس شیب هر پیکسل، τ_{day}: ضریب عبور جوی روزانه و ET₂₄ مقدار تبخیر-تعرق واقعی (mm/day) است.

۲-۱۱- تبخیر-تعرق واقعی در بازه ماهانه و فصل رشد

تبخیر-تعرق واقعی در بازه‌های زمانی ماهانه و فصل رشد، با کمک داده‌های تبخیر-تعرق واقعی در بازه مورد نظر و تبخیر-تعرق گیاه مرجع در همان بازه به دست می‌آید (Mokhtari, 2005).

$$ET_{a-Period} = \frac{(ET_{F-Period})_i}{(ET_0)_i} * \sum_{i=1}^n (ET_0)_n \quad (26)$$

در این رابطه ET_{F-period}: نماینده ET_F در بازه زمانی مورد نظر است. ET₀: از تبخیر-تعرق مرجع استاندارد شده روزانه (رابطه ۲۷) بر مبنای پنمن-مانتیت-فائو و n تعداد روزهای هر دوره

نزدیک تر باشند، صحت برآورد، بیش تر است (Bannayan and Hoogenboom, 2009).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تبخیر و تعرق روزهای گذر ماهواره

مقادیر تبخیر-تعرق مربوط به گیاه مرجع بر اساس رابطه پنمن-مانتیت-فائو (رابطه ۲۷)، تبخیر-تعرق چغندر قند در لایسیمتر و تبخیر-تعرق چغندر قند بر اساس الگوریتم سبال در روزهای عبور ماهواره در سال های ۷۵ - ۱۳۷۵ در جدول ۴ و پهنه بندی برخی از روزهای گذر ماهواره در ایستگاه تحقیقاتی در شکل ۳ نشان داده شده است. بر پایه اطلاعات موجود در جدول ۴ در طول سه سال پژوهش، مجموع روزهای عبور ماهواره بر فراز منطقه مطالعاتی، ۲۵ گذر (بدون ابر) بود. مقدار تفاوت تبخیر-تعرق در دو روش لایسیمتری و سبال با منفی ۱/۲۰ درصد و منفی ۰/۱۳ میلی متر بر روز بود که دقت بالایی را نشان داد. علامت منفی یعنی برآوردهای سبال کم تر از مقادیر متناظر در لایسیمتر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (31)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\bar{O}}} \quad (32)$$

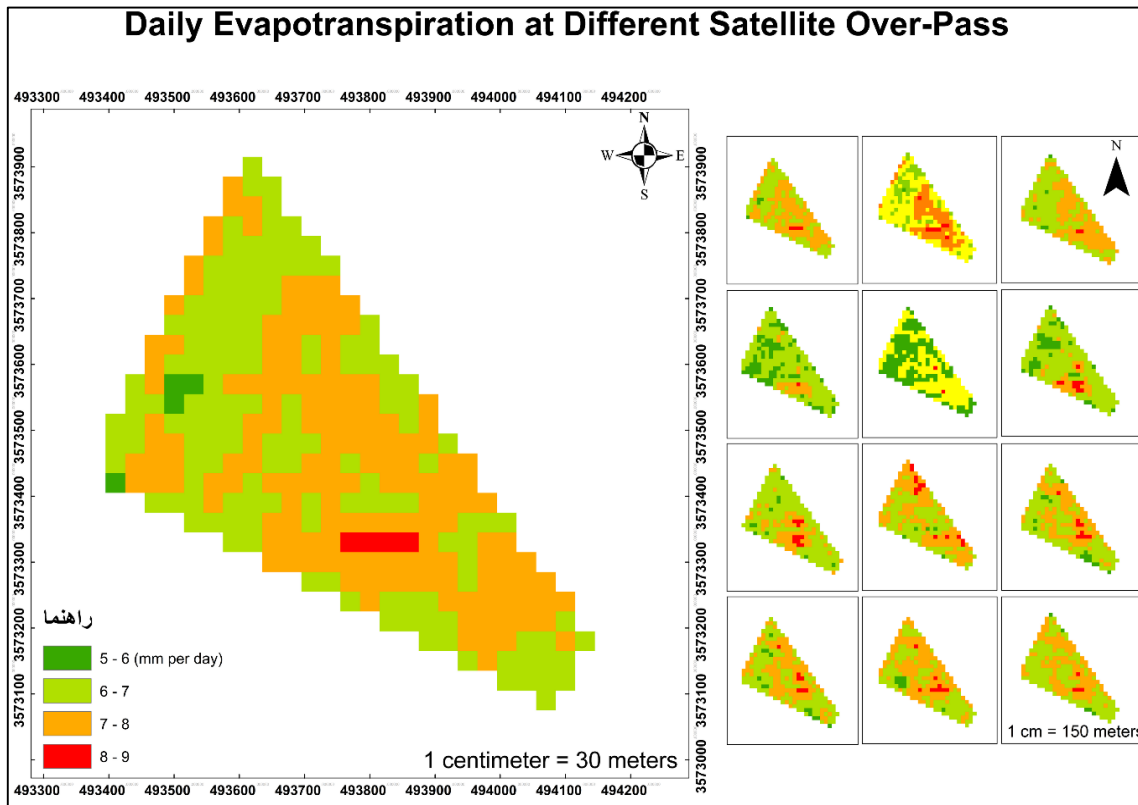
آماره MAE هرچه قدر به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده صحت بیش تر روش در برآورد است. مقدار این معیار همواره مثبت است. آماره MBE در حقیقت اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده ای و برآوردی است و بیان گر انحراف از میانگین است. این مقدار می تواند مثبت یا منفی باشد که نشان دهنده برآورد بیش تر (مثبت) و یا کم تر (منفی) از میانگین داده هاست. این معیار هرچه قدر به صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده اختلاف کم تر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده ای است. آماره RMSE بیان گر میزان خطای برآورد متغیرها نسبت به مقدار مشاهداتی است که بر اساس ریشه مربعات خطا مورد محاسبه قرار می گیرد. ضریب تبیین عددی است بین ۱- تا ۱+ که رابطه بین دو متغیر را نشان می دهد. آماره NRMSE بدون بعد بوده و به صورت نرمال شده از RMSE به دست می آید. هرچه قدر RMSE و NRMSE از نظر عددی کوچک تر و به صفر

جدول ۴- مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده و برآورد شده محصول چغندر قند در روزهای گذر ماهواره

Table 4- Calculated and estimated evapotranspiration values of sugar beet crop in satellite overpass-days

ستون 1	ستون 2	ستون 3	ستون 4	ستون 5	ستون 6
ردیف	تاریخ گذر ماهواره	تبخیر-تعرق لایسیمتر (میلی متر بر روز)	تبخیر-تعرق الگوریتم سبال (میلی متر بر روز)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی متر بر روز)	تفاوت (ستون 3 با 4) (درصد) (میلی متر بر روز)
1	1375/2/22		تاریخ کاشت	3.66	-
2	1375/03/08	6.26	6.58	6.45	0.32
3	1375/3/24	6.70	6.46	7.98	-0.24
4	1375/4/9	7.01	6.07	4.83	-0.94
5	1375/5/10	9.37	7.87	8.49	-1.50
6	1375/6/27	7.14	6.48	6.51	-0.66
7	1375/7/12	3.94	3.77	5.10	-0.17
8	1376/2/20		تاریخ کاشت	-	-
9	1376/3/10	6.17	6.54	6.34	0.37
10	1376/3/26	6.70	6.95	7.97	0.25
11	1376/4/11	6.37	7.27	9.09	0.90
12	1376/4/27	6.79	6.22	7.73	-0.57
13	1376/5/12	8.20	8.95	8.09	0.75
14	1376/5/28	8.46	8.67	7.63	0.21
15	1376/6/13	8.09	8.33	8.46	0.24
16	1376/6/29	6.04	6.16	6.14	0.12
17	1376/7/14	4.89	3.73	6.38	-1.16
18	1377/2/21		تاریخ کاشت	-	-
19	1377/2/28	4.86	5.40	3.29	0.54
20	1377/3/13	8.16	6.85	4.71	-1.31
21	1377/3/29	4.29	5.70	4.04	1.41
22	1377/4/14	5.31	5.44	5.30	0.13
23	1377/4/30	6.60	5.93	4.33	-0.67
24	1377/5/15	8.41	8.20	4.70	-0.21
25	1377/5/31	7.56	6.75	4.22	-0.81
26	1377/6/16	5.41	5.34	4.10	-0.07
27	1377/7/1	4.74	4.47	3.58	-0.27

0.06	3.02	3.98	2.05	1.99	1377/7/17	28
(میلی متر بر روز) -0.13		(درصد) -1.20		میانگین		



شکل ۳- پهنه‌بندی تبخیر-تعرق روزانه در ایستگاه پژوهشی در برخی روزهای عبور ماهواره

Figure 3- Mapping of daily evapotranspiration in a research station on some days of satellite overpass

نتایج مشابهی توسط Wang et al. (2021) برای الگوریتم سبال با ضریب تبیین برابر با ۰/۹۱ و در پژوهشی دیگر توسط Wagle et al. (2017) برای برآورد تبخیر-تعرق توسط داده‌های ماهواره‌ای با الگوریتم سبال مقدار R^2 بین ۰/۵۹ تا ۰/۸۲ به‌دست آمده است.

جدول ۵- شاخص‌های آماری بین دو زوج تبخیر-تعرق از الگوریتم سبال و داده‌های لایسیمتر

Table 5- Statistical indices between two pairs of evapotranspiration from SEBAL algorithm and lysimeter data

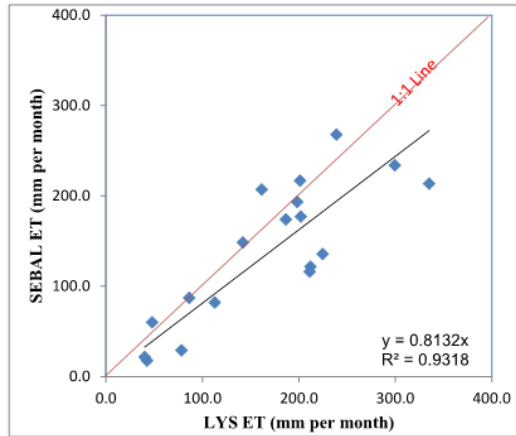
شاخص آماری	مقدار
R^2	0.9889
MAE	0.5552
MBE	-0.1312
RMSE	0.7031
NRMSE	0.1102

۳-۲- تبخیر-تعرق در بازه زمانی ماهانه

مقادیر شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $NRMSE$ ، MAE و MBE برای جفت زوج‌های تبخیر-تعرق در لایسیمتر و الگوریتم سبال در جدول ۶ ارائه شده است. بر این اساس بین ۱۸ جفت زوج داده، مقادیر شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $NRMSE$ ، MAE و MBE

مقادیر شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $NRMSE$ ، MAE و MBE برای جفت زوج‌های تبخیر-تعرق در لایسیمتر و الگوریتم سبال در جدول ۵ ارائه شده است. بر این اساس بین ۲۵ جفت زوج داده، مقادیر شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $NRMSE$ ، MAE و MBE به‌ترتیب برابر با ۰/۷۰۳۱، ۰/۱۱۰۲، ۰/۵۵۵۲ و ۰/۱۳۱۲ به‌دست آمد. ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) بیان‌کننده تفاوت میان مقدار برآورد شده توسط مدل و مقدار واقعی و مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ($NRMSE$) بیان‌کننده وضعیت مدل‌سازی است. مقدار کم‌تر از ۱۰ درصد وضعیت ایده‌آل، بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به‌ترتیب بیان‌گر وضعیت مناسب و متوسط مدل در برآورد و بیش‌تر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده عدم اطمینان به مدل است. در این پژوهش مقدار $NRMSE$ برابر با ۰/۱۱۰۲ به‌دست آمد که نشان از وضعیت ایده‌آل در مدل‌سازی است (Bannayan and Hoogenboom, 2009). در شکل ۴ نیز رابطه رگرسیونی بین اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و برآوردهای الگوریتم سبال در طول دوره پژوهش نشان می‌دهد که ضریب تبیین R^2 برابر با ۰/۹۸۸۹ به‌دست آمد که قابل توجه است و نشان از دقت الگوریتم سبال دارد.

است. به نظر می‌رسد در ماه‌هایی که شدت تبخیر-تعرق در لایسیمتر بالا بوده است، برآوردهای الگوریتم سبال به خوبی ماه‌های دیگر نبوده است.



شکل ۵- رابطه رگرسیون بین اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و برآوردهای الگوریتم سبال در بازه زمانی ماهانه

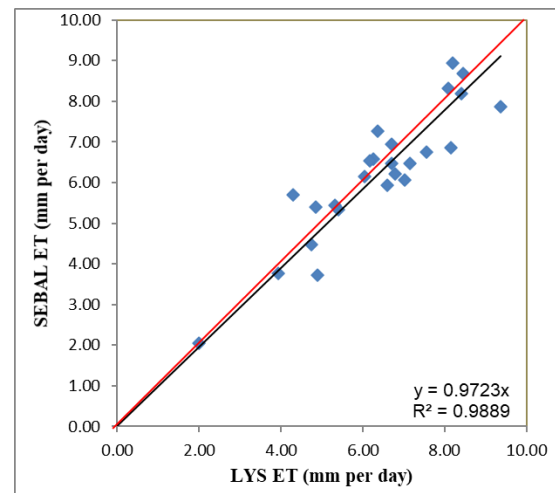
Figure 5- Regression relationship between lysimetric measurements and SEBAL algorithm estimates in a monthly period

۳-۳- تبخیر-تعرق در بازه زمانی سالانه

در شکل ۷-الف مجموع تبخیر-تعرق در لایسیمتر در بازه زمانی سالانه بر اساس پروژه انجام شده در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۷ در قیاس با مقادیر مجموع تبخیر-تعرق در الگوریتم سبال نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود در هر سه سال مجموع ET در لایسیمتر بیش‌تر از مقادیر متناظر بر اساس الگوریتم سبال بوده و لاجرم مقایسه بین میانگین مقادیر سه ساله هم‌گویی آن است. در شکل ۷-ب به روش دیگر مقایسه‌های فوق انجام گرفته و هم‌چنان نشان می‌دهد که در هر سال مقادیر مجموع تبخیر-تعرق سالانه در لایسیمتر بیش‌تر از مقادیر مربوط به الگوریتم سبال است. به عبارت بهتر مقادیر کل تبخیر-تعرق در لایسیمتر برابر با $۱۰۹۶/۶$ ، $۱۰۲۲/۶$ و $۹۰۶/۳$ میلی‌متر در طول دوره رشد (میانگین کل برابر با $۱۰۴۰/۶$ میلی‌متر) به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۷ به دست آمد. مقادیر کل تبخیر-تعرق در الگوریتم سبال برابر با $۱۰۰۴/۶$ ، $۸۳۱/۶$ و $۶۶۶/۴$ میلی‌متر در طول دوره رشد و با میانگین کل $۸۳۴/۲$ میلی‌متر به دست آمد. تفاوت میانگین‌ها حدود $۱۹/۸$ درصد اس عملکرد ریشه و درصد قند در این پژوهش در محدوده ارقام گزارش شده توسط Ucan and Gencoglan (2004) و Richter et al. (2006) و Fotoohi et al. (2008) است.

عملکرد ریشه و درصد قند در این پژوهش در محدوده ارقام گزارش شده توسط Ucan and Gencoglan (2004) و Richter et al. (2006) و Fotoohi et al. (2008) است. نتایج بررسی‌های Zare Abyaneh et al. (2012) نشان داد حجم آب

به ترتیب برابر با $۵۴/۱۱۵۵$ میلی‌متر بر ماه، $۰/۳۲۲۵$ ، $۴۰/۹۴۶۲$ و $۲۸/۷۹۵۵$ - به دست آمد.



شکل ۴- رابطه رگرسیون بین اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و برآوردهای الگوریتم سبال

Figure 4- Regression relationship between lysimetric measurements and SEBAL algorithm estimations

جدول ۶- شاخص‌های آماری بین دو زوج تبخیر-تعرق از الگوریتم سبال و داده‌های لایسیمتر برای محصول چغندر قند در بازه زمانی ماهانه

Table 6- Statistical indices between two pairs of evapotranspiration from the SEBAL algorithm and lysimeter data for sugar beet in a monthly period

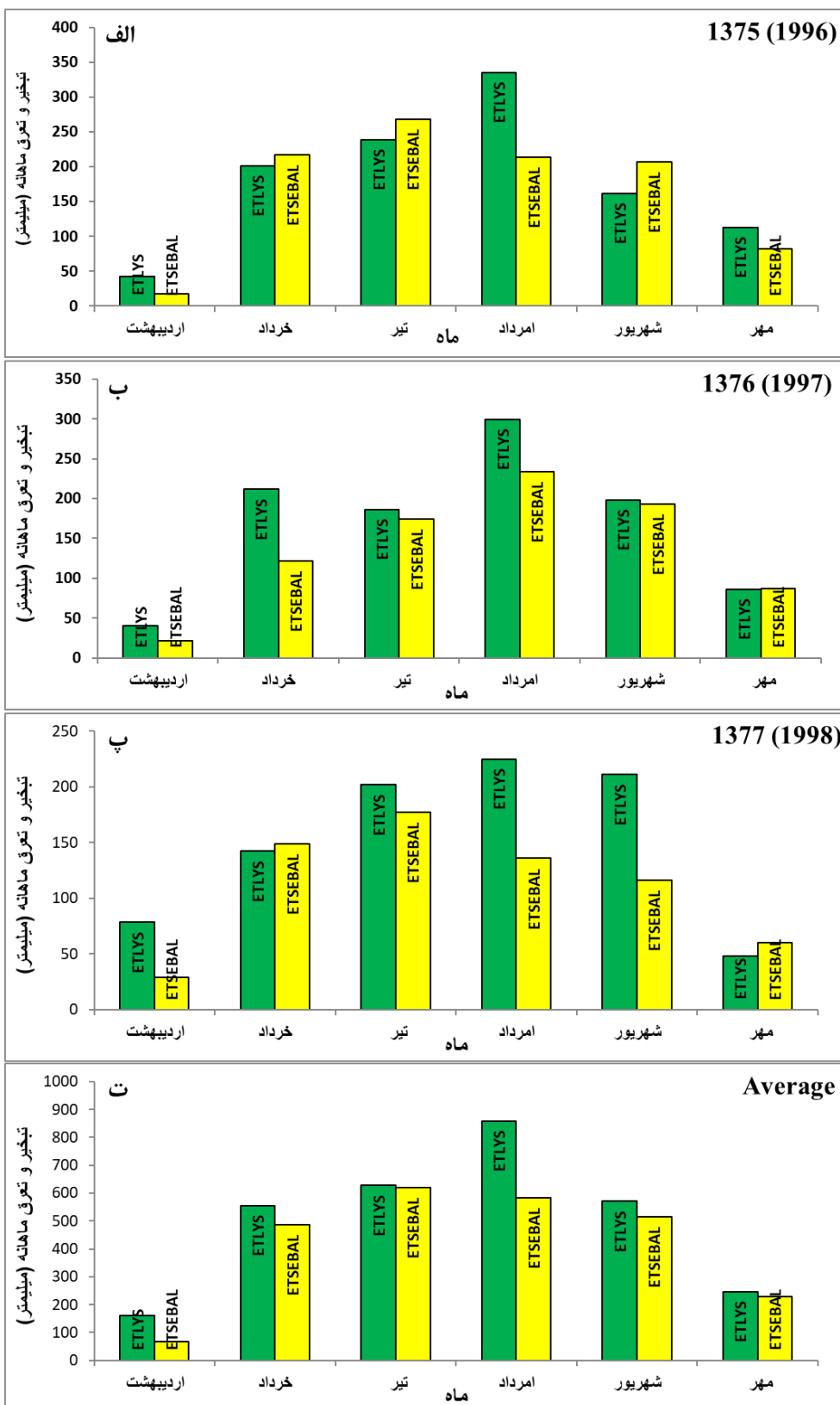
شاخص آماری	مقدار
R ²	0.9318
MAE	40.9462
MBE	-28.7955
RMSE	54.1155
NRMSE	0.3225

رابطه برازش بین مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق محصول چغندر قند در لایسیمتر و تبخیر-تعرق برآورد شده بر اساس الگوریتم سبال در بازه زمانی ماهانه نیز در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۷ در شکل ۵ نشان داده شده است. علامت منفی بدین مفهوم است که برآوردهای سبال کم‌تر از مقادیر متناظر در لایسیمتر بود. در بازه زمانی ماهانه همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بیان‌کننده وضعیت مدل‌سازی است. مقدار $۰/۳۲۲۵$ تا حدودی نشان‌دهنده وضعیت مناسب مدل است.

در شکل ۶ (الف تا پ) مقایسه بین اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و برآوردهای الگوریتم سبال در طول سه سال پژوهش نشان داده شده است. میانگین سه ساله نیز در شکل ۶-ت حاکی از آن است که برآوردهای الگوریتم سبال در همه ماه‌ها کمی کم‌تر از مقادیر متناظر در لایسیمتر بوده است. البته در مرداد ماه فاصله تبخیر-تعرق در لایسیمتر و الگوریتم سبال بیش‌تر

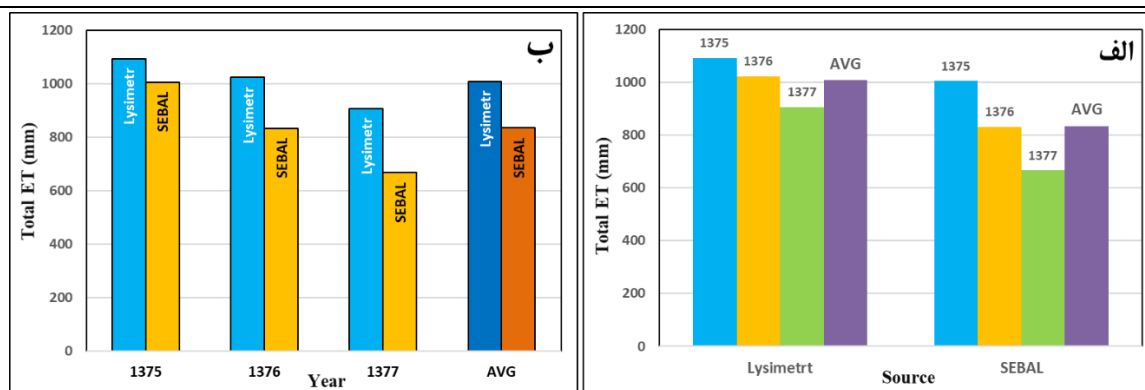
(2019) نیز نشان داده که روش سبال تخمین خوبی از میزان تبخیر-تعرق دارد. Ghaderi et al. (2020) نیز با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم سبال در دشت عین‌خوش بررسی و نتایج خوبی کسب کرد.

مصرفی چغندر قند طی چهار سال به ترتیب ۱۰۲۵۶، ۷۳۲۸، ۸۴۲۷ و ۹۰۲۶ مترمکعب در هکتار با میانگین ۸۷۵۹ مترمکعب در هکتار بود. بیش‌ترین عملکرد ریشه، قند و درصد قند با طول دوره رشد ۱۶۲ روزه، به ترتیب ۱۱۶/۸ و ۲۰/۳۶ تن در هکتار و ۱۷/۴۳ درصد به‌دست آمد. نتایج (2018) Grosso et al. و Elnmer et al.



شکل ۶- مقایسه تبخیر-تعرق در لایسیمتر و الگوریتم سیال در بازه زمانی ماهانه

Figure 6- Comparison of evapotranspiration in lysimeter and SEBAL algorithm in a monthly period



شکل ۷- مقایسه تبخیر-تعرق در لایسیمتر و الگوریتم سبال در بازه زمانی سالانه

Figure 7- Comparison of evapotranspiration in lysimeter and SEBAL algorithm in a yearly period

بهره‌وری مصرفی آب در الگوریتم سبال برابر با ۴/۹۱، ۶/۶۹ و ۷/۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی با میانگین سه ساله برابر با ۶/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب به‌دست آمد. به‌دلیل این‌که برآوردهای مقادیر تبخیر-تعرق در الگوریتم سبال کم‌تر از روش لایسیمتری بود بنابراین، مقادیر کارایی مصرفی آب از مقادیر بالاتری برخوردار شد (شکل ۸). در این راستا نتایج مطالعه Zare Abyaneh et al. (2012) نشان داد بیش‌ترین کارایی مصرفی آب برابر با ۱۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب آب و کم‌ترین مقدار معادل ۷/۱ کیلوگرم بر مترمکعب آب به‌دست آمد. همچنین، نتایج پژوهش Hassanli et al. (2010)، Topak et al. (2011) و Kiyamaz and Ertek (2015a,b) نیز از مشابهت برخوردار است.

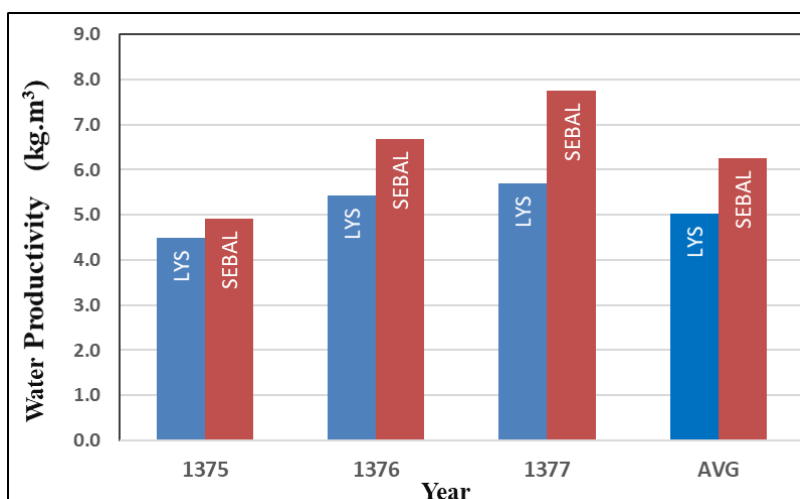
۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج سه ساله لایسیمتری و همین‌طور نتایج الگوریتم سبال بر اساس ۲۵ تصویر در روزهای گذر ماهواره‌های لندست پنج و همین‌طور استفاده از رابطه ریاضی پنمن-مانتیت-فائو اصلاح شده، تعیین شد که مقدار تبخیر-تعرق محصول چغندر قند در لایسیمتر به‌طور متوسط ۱۰۴۰/۶ میلی‌متر و برپایه الگوریتم سبال ۸۳۴/۲ میلی‌متر در طول دوره رشد به‌دست آمد. داده‌های لایسیمتری و مطالعات مزرعه‌ای، هزینه‌های زیادتری نسبت به روش‌های سنجش از دوری در بر خواهد داشت و لذا در این پژوهش توانایی الگوریتم سبال (به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های برتر سنجش از دوری) به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی و تعیین نیاز آبی محصول چغندر قند، به اثبات رسید و شایسته است در سایر مناطق جغرافیایی مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، نتایج آزمایش نشان داد که سبال به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد سنجش از دور در برآورد تبخیر-تعرق گیاه، از قابلیت ویژه‌ای برخوردار است.

پژوهش‌گران دیگری نیز با استفاده از الگوریتم سبال نتیجه گرفتند که میانگین تقاضا مطلق برابر با ۰/۷ میلی‌متر بر روز و ضریب همبستگی برابر با ۰/۸۳ است (Zamansani et al., 2018). Asadi et al. (2020) نیز میزان تبخیر-تعرق گیاه خود را به روش سبال مثبت ارزیابی کردند.

۳-۴- کارایی مصرفی آب

بر اساس نتایج، کارایی مصرفی آب چغندر قند در سال ۱۳۷۵ برابر با ۴/۵ کیلوگرم بر مترمکعب آب و کارایی مصرفی آب برای تولید شکر (قند) برابر با ۰/۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب آب بود (شکل ۸). به‌عبارت دیگر برای تولید یک کیلوگرم غده نیاز به ۲۲۲ لیتر آب آبیاری و برای تولید یک درصد قند نیاز به ۷۵۸ مترمکعب آب و برای تولید یک کیلوگرم شکر (قند) نیاز به ۱۵۳۹ لیتر آب مصرفی است. کارایی مصرفی آب ریشه چغندر قند در سال ۱۳۷۶ برابر با ۵/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی و کارایی مصرفی آب شکر (قند) برابر با ۰/۸۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب آب آبیاری است. به‌عبارت دیگر برای تولید یک کیلوگرم غده ۱۸۴ لیتر آب و برای تولید یک درصد قند ۶۸۱ مترمکعب و برای تولید یک کیلوگرم شکر (قند) ۱۲۲۶ لیتر آب مورد نیاز بود. کارایی مصرفی آب ریشه چغندر قند در سال ۱۳۷۷ برابر با ۵/۷ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی و کارایی مصرفی آب شکر (قند) برابر با ۰/۸۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود. به‌عبارت دیگر برای تولید یک کیلوگرم غده ۱۷۵ لیتر و برای تولید یک درصد قند ۶۲۵ مترمکعب و برای تولید یک کیلوگرم شکر (قند) ۱۲۰۸ لیتر آب مصرفی است. میانگین نتایج سه سال نشان داد که کارایی مصرفی آب ریشه چغندر قند برابر با ۵/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی و کارایی مصرفی آب شکر (قند) برابر با ۰/۷۴ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی است. به‌عبارت دیگر برای تولید یک کیلوگرم غده در میانگین نتایج سه سال ۱۹۹ لیتر آب آبیاری و برای تولید یک درصد قند ۷۱۲ مترمکعب آب و برای تولید یک کیلوگرم قند (شکر) ۱۳۶۰ لیتر آب آبیاری مورد نیاز است.



شکل ۸- مقایسه بهره‌وری مصرف آب چغندر قند در لایسیمتر و الگوریتم سبال

Figure 8- Comparing the water productivity of sugar beet in lysimeter to the SEBAL algorithm

حمایت‌های مالی و لجستیکی که در اجرای پروژه تحقیقاتی مشارکت قابل توجهی داشتند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

سپاسگزاری:

بدینوسیله از بخش تحقیقات آب و خاک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی چهارمحال و بختیاری، بابت

و کیفی محصول چغندر قند. چغندر قند، (۲)۲۷، ۱۵۳-

doi:10.22092/jsb.2012.705.۱۶۷

زمان ثانی، الناز، خورانی، اسدالله، صادقی لاری، عدنان، و سدیدی، جواد (۱۳۹۶). ارزیابی برآورد تبخیر-تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی: ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان حاجی‌آباد). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، (۴)۴۹، ۶۶۷-۶۸۱. doi:10.22059/jphgr.2018.227348.1007012

طاهری، ک. (۱۳۶۱). تعیین آب مصرفی گیاهان نظیر ذرت علوفه‌ای چغندر قند و آفتاب گردان در منطقه باختران با استفاده از لایسیمتر. نشریه فنی شماره ۱۶، مؤسسه خاک و آب.

عباس نژاد الجین، احمد، درویش صفت، علی اصغر، و بذرافشان، جواد (۱۳۹۹). تهیه و ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق براساس داده‌های ماهواره لندست ۸ و مدل SEBAL در جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل‌های پل سفید و کیاسر). جنگل و فرآورده‌های چوب، (۳)۷۳، ۲۵۹-

doi:10.22059/jfw.2020.284419.1007.۲۷۰

فتوحی، کیوان، احمدآلی، جمال، نورجو، امیر، پدram، عادل، و خورشید، عبدالمجید (۱۳۸۷). مدیریت آبیاری براساس تخلیه مجاز رطوبتی در مراحل مختلف رشد چغندر قند در منطقه میان‌دوآب. چغندر قند، (۱)۲۴، ۴۳-۶۰. doi:10.22092/jsb.2008.1036

مرشدی، علی، جعفری، حسین، و عنای میلانی، اژدر (۱۴۰۱). برآورد تبخیر-تعرق واقعی گندم با استفاده از الگوریتم سبال نسبت به نتایج لایسیمتری در شرایط استاندارد در ایستگاه‌های تحقیقاتی تبریز و کرج. پژوهش آب در کشاورزی، (۱)۳۶، ۲۱-۳۳. doi:10.22092/jwra.2022.356223.896

منابع

ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، و غالی، سعید (۱۳۹۳). تعیین تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی (kc) چغندر قند با استفاده از لایسیمتر و مقایسه آن با روش‌های تجربی در شهر کرد. چغندر قند، (۱)۳۰، ۴۱-۴۱. doi:10.22092/jsb.2014.5854.۵۸

اسدی، مهدی، و کرمی، مختار (۱۴۰۰). ارزیابی تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال (مطالعه موردی: شرق استان آذربایجان شرقی). کوهسدرولوژی، (۱)۸، ۱۷-۱۷. doi:10.22059/ije.2020.307323.1361.۲۷

اسدی، مهدی، ولیزاده کامران، خلیل، باعقیده، محمد، و ادب، حامد (۱۳۹۹). برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی بر پایه گیاه نخود (مطالعه موردی: نیمه شمالی استان اردبیل). هیدروژئومورفولوژی، (۲۲)۷، ۶۷-۶۷. doi:10.22034/hyd.2020.14583.۸۵

کوک، دی آ، و اسکات، ار کی، (۱۳۸۲). کشت چغندر قند (ترجمه کوچکی، ع. و سلطانی، ا.). انتشارات جهاد دانشگاهی واحد مشهد.

رحیمیان، م. (۱۳۷۶). تعیین نیاز آبی گیاه چغندر قند و ضریب گیاهی مربوط به روش لایسیمتری. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، تحقیقات خاک و آب خراسان.

رضوی، رقیه (۱۳۷۴). تعیین آب مصرفی پتانسیل چغندر قند با استفاده از لایسیمتر. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، شماره فنی ۷۴/۳۵۶، مرکز تحقیقات آذربایجان غربی، ۲۹ صفحه.

زارع ابیانه، حمید، فرخی، الهام، بیات ورکشی، مریم، و احمدی، محمود (۱۳۹۰). تعیین نیاز آبی و تأثیر تغییرات آن بر برخی صفات کمی

الگوریتم سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۸(۲)، ۳۹-۵۶. doi:10.22108/gep.2017.97932.0
وزیری، ژ. (۱۳۷۰). خلاصه تحقیقات آبیاری ۱۹۶۷ تا ۱۹۸۶. *مجله شماره ۲۳۳*.

مهدوی، عاطفه، نوری امامزاده‌یی، محمدرضا، مهدوی نجف‌آبادی، رسول، طباطبائی، سیدحسن (۱۳۹۰). مکانیابی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی به روش منطق فازی در حوضه آبریز دشت شهرکرد. *علوم آب و خاک*، ۱۱۵(۵۶)، ۶۳-۷۸.

نوری، حمید، و فرامرزی، محمد (۱۳۹۸). بررسی تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف اراضی مناطق کوهستانی با استفاده از

References

- Abbasnezhad Alchin, A., Darvish Sefat, A.A., & Bazrafshan, J. (2020). Preparation and estimating of evapotranspiration maps based on Landsat 8 satellite data and SEBAL model in Hyrcanian forests (Case study: Pol-Sefid and Kiasar forests). *Journal of Forest and Wood Products*, 73(3), 259-270. doi:10.22059/jfwp.2020.284419.1007 [In persian]
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage, paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56, 26-40.
- Allen, R., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395-406. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)
- Asadi, M., Valizadeh Kamran, K., Baaghdeh, M., & Adab, H. (2020). Estimation of actual evapotranspiration by mountain SEBAL algorithm based on pea plants (Case Study: Semi-Northern Half of Ardabil Province). *Hydrogeomorphology* 7(22), 67-85. doi:10.22034/hyd.2020.14583 [In persian]
- Bains, B.S., & Narany, R.S. (1988). Water use efficiency of sugar beet (*Beta vulgaris* L) under semi- arid and sub- tropical climate: Indian. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 33, 283-286.
- Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*, 111(3), 290-302. doi:10.1016/j.fcr.2009.01.007
- Barbieri, G. (1982). Effect of irrigation and harvesting dates on the yield of spring, sown sugar-beet. *Agricultural Water management*, 5(4), 354-357. doi:10.1016/0378-3774(82)90012-9
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A.A.M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212. doi:10.1016/S0022-1694(98)00253-4
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., & Makin, I.W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46(2), 137-155. doi:10.1016/S0378-3774(00)00080-9
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., & Allen, R.G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 85-93. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)
- Caliandro, A., Tarantion, E., & Rubino, P. (1990). Water consumption of sugar beet sown in the spring under the environmental conditions of southern Italy. *Rivista di Agronomia*, 14(3), 178-193.
- Chander, G., Markham, B.L., & Helder, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903. doi:10.1016/j.rse.2009.01.007
- Doorenbos, J., & Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 154 pages.
- Ebrahimipak N.A., & Ghalebi, S. (2014). Determination of evapotranspiration and crop coefficient (kc) of sugar beet using lysimeter and comparing it with experimental methods in Shahrekord. *Journal of Sugar Beet*, 30(1), 41-58. doi:10.22092/jsb.2014.5854 [In persian]
- Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., & Tawfik, A. (2019). Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management*, 213, 682-692. doi:10.1016/j.agwat.2018.11.009
- Evet, S.R., Schwartz, R.C., Howell, T.A., Louis Baumhardt, R., & Copeland, K.S. (2012). Can weighing lysimeter ET represent surrounding field ET well enough to test flux station measurements of daily and sub-daily ET?.

- Advances in Water Resources*, 50, 79-90. doi:10.1016/j.advwatres.2012.07.023
- Fotoohi, K., Ahmadauli, H., Nourjou, A., Pedram, A., & Khorshid, A. (2008). Irrigation management based on allowed water depletion at different growth stages of sugar beet in Miyandoab region. *Journal of sugar Beet*, 24(1), 43-60. doi:10.22092/jsb.2008.1036 [In persian]
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Shokri, M., & Abraham, J. (2020). Estimation of actual evapotranspiration using the remote sensing method and SEBAL algorithm: a case study in Ein Khosh Plain, Iran. *Hydrology*, 7(2), 36. doi:10.3390/hydrology7020036
- Gibson, J.J. (2002). Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow Arctic lakes using non-steady isotope mass balance. *Journal of Hydrology*, 264(4), 242-261. doi:10.1016/S0022-1694(02)00091-4
- Grosso, C., Manoli, G., Martello, M., Chemin, Y.H., Pons, D.H., Teatini, P., Piccoli, I., & Morari, F. (2018). Mapping maize evapotranspiration at field scale using SEBAL: a comparison with the FAO method and soil-plant model simulations. *Remote Sensing*, 10(9), 1452. doi:10.3390/rs10091452
- Hassanli, A.M., Ahmadi, S., & Beecham, S. (2010). Evaluation of the influence of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97(2), 357-362. doi:10.1016/j.agwat.2009.10.010
- Irmak, S. (2010). Nebraska water and energy flux measurement, modeling, and research network (NEBFLUX). *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1097-1115. doi:10.13031/2013.32600
- Kiyamaz, S., & Ertek, A. (2015a). Water use and yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drip irrigation at different water regimes. *Agricultural Water Management*, 158, 225-234. doi:10.1016/j.agwat.2015.05.005
- Kiyamaz, S., & Ertek, A. (2015b). Yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) at different water and nitrogen levels under the climatic conditions of Kirsehir, Turkey. *Agricultural Water Management*, 158, 156-165. doi:10.1016/j.agwat.2015.05.004
- Legoupil, J.C. (1972). Water requirement of crops in the upper chelif reign. semaine. *d' Etude des problems mediterraneensi*, 254-265.
- Mahdavi, A., Nouri Emamzadei, M.R., Mahdavi, R., & Tabatabaei, S.H. (2010). Identification of artificial recharge sites using fuzzy logic in Shahrekord Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 15(56), 63-78. [In persian]
- Mkhwanazi, M., Chávez, J., & Andales, A. (2015). SEBAL-a: a remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. part I: development and validation. *Remote Sensing*, 7(11), 15046-15067. doi:10.3390/rs71115046
- Mokhtari, M.H. (2005). Agricultural drought impact assessment using remote sensing: a case study Borkhar district-Iran. Thesis submitted to the International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, The Netherlands.
- Moorhead, J.E., Marek, G.W., Gowda, P.H., Lin, X., Colaizzi, P.D., Evett, S.R., & Kutikoff, S. (2019). Evaluation of evapotranspiration from eddy covariance using large weighing lysimeters. *Agronomy*, 9(2), 99. doi:10.3390/agronomy9020099
- Morse, A., Allen, R.G., Tasumi, M., Kramber, W.J., Trezza, R., & Wright, J.L. (2000). Application of the SEBAL meteorology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing. Final research report, Idaho Department of Water Resources, University of Idaho, Department of Biological and Agricultural.
- Morshedi, A., Jafari, H., & Onabi Milani, A. (2022). Estimation of actual evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm compared to lysimetric results under standard conditions in Tabriz and Karaj research stations. *Journal of Water Research in Agriculture*, 36(1), 21-33. doi:10.22092/jwra.2022.356223.896 [In persian]
- Nimah, M., & Mukhayyish, N. (1980). Estimating evapotranspiration and crop water use factor under semi- arid Conditions. *Agronomy Abstracts*. 72nd annual meeting American Society of Agronomy.
- Nouri, H., & Faramarzi, M. (2017). Investigating actual evapotranspiration in different land uses in mountainous areas using SEBAL algorithm and a combination of MODIS and Landsat8 satellite images. *Geography and Environmental Planning*, 28(2), 39-56. doi:10.22108/gep.2017.97932.0 [In persian]
- Pruitt, W.O., Lurence, F.G., & Von Oetting, S. (1970). *Water use by crops as effect by climate factors*.
- Rahimian, M.H. (1997). Determining the water requirement of the sugar beet plant and the plant coefficient related to the lysimetric method. Final research report, Department of Khorasan soil and water research [In persian]
- Razavi, R. (1995). Determination of the irrigation water potential of sugar beet using a lysimeter. Final research report, Technical Journal No. 74-356, Soil and Water Department of West Azerbaijan, 29 pages. [In persian]
- Richter, G.M., Qi, A., Semenow, M.A., & Jaggard, K.W. (2006). Modeling the variability of UK sugar beet yields under climate change and husbandry adaptations. *Soil Use and*

- Management*, 22(1), 39-47. doi: 10.1111/j.1475-2743.2006.00018.x
- Roth, D., & Gunther, R. (1992). Comparison of measured and estimated potential evapotranspiration. *Zeitschrift Fur Kulturtechnik und landen twickluy*, 33(1), 13-22.
- Roth, D., Gunther, R., & Breitsch, E. (1989). Investigations on water consumption of winter wheat bearylly sugar beet and Potatoes under field conditions on deef. *Boden Kultur*, 40, 305-319.
- Scott, D.A.K. (2001). *Sugar beet cultivation* (Translated: Soltani, A., & Kochaki, A.). Jihad of University, Mashhad Branch.
- Smith, D.M., & Allen, S.J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(305), 1833-1844. doi:10.1093/jxb/47.12.1833
- Taheri, K. (1982). Determining the water consumption of some plants such as forage corn, sugar beet and sunflower in Bakhtran region using lysimeter. Final research report, Technical Journal No. 16, Soil and Water Institute. [In persian]
- Thorne, D.W. (1954). Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils. *Agronomy Journal*, 46, 290-290.
- Topak, R., Süheri, S., & Acar, B. (2011). Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris L.*) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey. *Irrigation Science*, 29, 79-89. doi:10.1007/s00271-010-0219-3
- Ucan, K., & Gencoglan, C. (2004). The effect of water deficit on yield and yield components of sugar beet. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(3), 163-172.
- Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. H., & Kakani, V. G. (2017). Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 192-203. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022
- Wang, T., Melton, F.S., Pôças, I., Johnson, L.F., Thao, T., Post, K., & Cassel-Sharma, F. (2021). Evaluation of crop coefficient and evapotranspiration data for sugar beets from landsat surface reflectances using micrometeorological measurements and weighing lysimetry. *Agricultural Water Management*, 244, 106533. doi:10.1016/j.agwat.2020.106533
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, M., & W., B. (2002). Surface Energy Balance Algorithms for Land, Advanced Training and User's Manual. NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources.
- Waziri, J. (1997). Summary of Irrigation Research 1967 to 1986. *Journal No. 733*.
- Yetik, A.K., & Candoğan, B.N. (2022). Optimisation of irrigation strategy in sugar beet farming based on yield, quality and water productivity. *Plant Soil and Environment*, 68(8), 358-365. doi:10.17221/234/2022-PSE
- Zamansani, E., khorani, A., Sadeghi-e-lari, A., & Sadidi, J. (2018). Evaluation of evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm (Case study: Agricultural Research Station of Haji Abad). *Physical Geography Research Quarterly*, 49(4), 667-681. doi:10.22059/jphgr.2018.227348.1007012 [In persian]
- Zare Abyaneh, H., Farrokhi, E., Bayat Varkeshi, M., & Ahmadi, M. (2012). Determination of water requirement and the effect of the changes on some quantitative and qualitative characteristics of products of sugar beet. *Journal of Sugar Beet*, 27(2), 153-167. doi:10.22092/jsb.2012.705 [In persian]