



Assessing the Water Productivity Using Remote Sensing Data and WATPRO Model, Case Study of Wheat Fileds in Jiroft Plain

S.K. Afshari Pour¹, S. Hamzeh^{2*}, S.K. Alavipanah³
and E. Moghbeli Dameneh⁴

Abstract

In recent years, climate change and rising of global water demand as a result of population growth has caused water scarcity. In this regard, calculation of agricultural water productivity is essential in order to optimize the management of water resources and reduce the water consumption. One of the promising tools for this purpose is remote sensing. In this research, a functional and fully satellite-based model called WATPRO was used for direct calculation of agricultural water productivity and its evaluation in the Jiroft plain located in Kerman province. For this aim, Landsat 8 satellite imagery was acquired during the growing season of wheat on 2016-2017 and after necessary image preprocessing, the WATPRO model was implemented. The deployment peak, cultivation and harvesting time for six divided field, were determined by using the time series of Normalized Deference Vegetation Index (NDVI) extracted from satellite imagery. Wheat water productivity was then calculated and the results were evaluated with ground control points. The results showed that the highest and lowest water productivity for wheat in this area is 0.4 and 0.8 kg m⁻³, respectively and the average of water productivity in the study area was estimated about 0.5 kg-m⁻³. Also the correlation coefficient of 76.5% was found for correlation between average NDVI and water productivity in this area. Assessing the accuracy of the WATPRO model with the measured water productivity at field showed that this model perform well for estimation and mapping of water productivity with an RMSE and correlation coefficient of 0.16 kg-m⁻³ and 85%, respectively.

Keywords: Remote Sensing, Water Productivity, WATPRO Model, Wheat, Jiroft Plain.

Received: June 4, 2018

Accepted: September 13, 2018

ارزیابی میزان بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل WATPRO مطالعه موردی: اراضی تحت کشت گندم حوضه آبریز دشت جیرفت

سید کریم افشاری پور^۱، سعید حمزه^{۲*}، سید کاظم علوی پناه^۳ و
اسماعیل مقبلی دامنه^۴

چکیده

در سال‌های اخیر تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضای جهانی آب بدلیل رشد جمعیت، منابع آبی را با کمبود و مشکلات جدی مواجه ساخته است. در این میان محاسبه میزان بهره‌وری آب کشاورزی در راستای مدیریت بهینه منابع آب و کاهش مصرف بسیار ضروری می‌باشد، که در این راستا یکی از روش‌های پرکاربرد استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور می‌باشد. بنابراین در پژوهش حاضر اقدام به استفاده از مدل کاربردی و کاملاً مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای تحت عنوان WATPRO جهت محاسبه مستقیم میزان بهره‌وری آب کشاورزی و ارزیابی آن در حوضه آبریز دشت جیرفت استان کرمان گردید. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در دوره کشت تا برداشت گندم در سال زراعی (۱۳۹۵-۱۳۹۶) دریافت و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم اقدام به اجرای مدل WATPRO گردید. زمان استقرار، اوج توسعه و برداشت محصول از طریق سری زمانی NDVI در ۶ منطقه تقسیم‌بندی شده، مشخص شد و بهره‌وری آب گندم محاسبه و نتایج با نقاط کنترل زمینی ارزیابی گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین، کمترین و میانگین بهره‌وری به ترتیب 0.4 ، 0.8 و 0.5 kg m^{-3} بوده است. همچنین ضریب تعیین 76.5% درصد در بررسی رابطه بین میانگین NDVI و بهره‌وری آب بدست آمد. در ارزیابی دقت مدل، مقادیر RMSE و ضریب تعیین بین بهره‌وری محاسبه شده و مشاهدات زمینی، به ترتیب برابر با 0.16 kg m^{-3} و 85% درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی: سنجنش‌ازدور، بهره‌وری آب، WATPRO، گندم، دشت جیرفت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۳/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۶/۲۲

1- M.Sc. Student of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, Department of Remote Sensing and GIS, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: saeid.hamzeh@ut.ac.ir

3- Full Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- Researcher, Agricultural Engineering Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Jiroft, Iran.

*- Corresponding author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجنش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه سنجنش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۳- استاد گروه سنجنش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۴- پژوهشگر بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

میزان محصول یا سود خالص تعریف می‌گردد (Kadaja and Saue, 2016)؛ به عبارت دیگر بهره‌وری آب نتیجه اندازه‌گیری عملکرد آبیاری است که کارایی سیستم فیزیکی و تصمیمات عملیاتی که آب را از یک منبع فراهم می‌کنند را توصیف می‌کند (Irmak et al., 2011; Abolpour, 2018). بهره‌وری آب آبیاری نه تنها برای استفاده پایدار از منابع آب مهم است، بلکه به مسأله امنیت غذایی نیز مرتبط است بنابراین برآوردهای معقول و مدیریت علمی آب مورد استفاده در آبیاری نه تنها برای استفاده پایدار از منابع آب مهم است بلکه از منظر مسأله امنیت غذایی نیز اهمیت دارد (Yang et al., 2014). با این حال، مدیریت علمی آبیاری بستگی به تخمین دقیق بهره‌وری آب محصول و مصرف آب کشاورزی دارد (Bachour et al., 2014; Yan and Wu, 2014). بسیاری از محققان مطالعات برآورد بهره‌وری آب را در گندم زمستانه و بهاره انجام داده‌اند (Du et al., 2011; Li et al., 2008; Faramarzi et al., 2010; Timsina et al., 2008). نتایج آن‌ها نشان داد که بهبود عملکردهای آبیاری مزرعه می‌تواند بهره‌وری آب و میزان محصول را افزایش دهد، بنابراین مشکل کمبود آب در مناطق آبیاری کشاورزی کاهش می‌یابد. با این حال، برآورد بهره‌وری آب از طریق روش‌های سنتی به کنترل و اندازه‌گیری آب ورودی به مزرعه از طریق نصب کنتور و یا استفاده از سرریزها در کانال آبرسانی به مزرعه نیاز دارد، که خود نیازمند تخصص و اندازه‌گیری‌های دقیق توسط کارشناس می‌باشد. این موضوع باعث صرف هزینه و وقت زیاد در طول هر بار آبیاری می‌شود، همچنین نگهداری تجهیزات و اندازه‌گیری میزان محصول در پایان فصل رشد نیز به کار و نیروی انسانی نیازمند است. در نتیجه روش سنتی به دست آوردن بهره‌وری آب دشوار است و این دشواری زمانی تشدید پیدا می‌کند که منطقه در مقیاس حوضه آبریز یا زیر حوضه باشد. که خود لزوم استفاده از سنجش‌ازدور را در برآورد بهره‌وری آب دوچندان می‌سازد.

تکنیک سنجش‌ازدور در مطالعات منابع آب در سال‌های اخیر مورد توجه محققان واقع شده که استفاده از آن رو به گسترش است (Rahimpour et al., 2018; Majidi et al., 2017; Rahdari et al., 2016; Goshehgir et al., 2018). با توسعه سریع این تکنولوژی، می‌توان بهره‌وری آب را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به سرعت و با دقت بالا برآورد کرد (Jin et al., 2018). محققین بسیاری با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور بهره‌وری آب را در محصولات مختلف برآورد کردند (Yan and Wu, 2014; Zwart et al., 2010; Jin et al., 2018; Choudhury and Bhattacharya, 2018; Campos et al., 2018).

با افزایش رشد جمعیت و اقتصاد جهانی، تقاضای آب و میزان تنش آبی نیز افزایش یافته است. بنابراین چگونگی مدیریت بهتر منابع آب و دستیابی به توسعه پایدار مسأله‌ای مهمی است که دولت‌ها باید آن را در نظر بگیرند. در سال‌های اخیر، حدود 90 درصد از کل آب مصرف شده جهانی توسط آبیاری زمین‌های کشاورزی مصرف می‌شود و حدود 40 درصد از محصولات کشاورزی زیر کشت‌های آبی می‌باشند (Döll and Siebert, 2002). از طرفی در طول 50 سال اخیر، روند افزایشی خشک‌سالی‌های متوالی موجب کاهش میزان آب ورودی به سیستم هیدرولوژی و در نتیجه باعث بهم خوردن و نامنظم شدن چرخه آب شده است (Carr, 2013). به‌طور کلی حدود 60 تا 90 درصد آب‌های سطحی شیرین عمدتاً از طریق آبیاری مصرف می‌شود که به طور قابل توجهی باعث کاهش جریان رودخانه‌ها به اقیانوس‌ها می‌گردد (Falkenmark and Molden, 2008) که به موجب آن سطح آب زیرزمینی را نیز کاهش پیدا می‌کند (Siebert and Döll, 2010). همچنین گسترش زمین‌های زراعی جهت تولید محصول بیشتر نیز باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش تنوع زیستی می‌شود (Foley et al., 2011). با افزایش جمعیت و تأمین نیازهای آن؛ باعث افزایش تولیدات مواد غذایی می‌شود که با به همراه بودن تغییرات اقلیمی، افزایش خشک‌سالی در سال‌های اخیر، فشار بیش از حد بر منابع زیست‌محیطی را باعث می‌شود که منجر به تخریب بافت و ساختمان خاک، افزایش شوری خاک و آب می‌شود و به‌عنوان یک عامل، ثبات و پایداری کشاورزی منطقه را به خطر می‌اندازد

(Gao et al., 2017). یکی از استراتژی‌های اصلی برای تأمین نیازهای غذایی آینده، افزایش بهره‌وری آب و استفاده مؤثر از منابع طبیعی است (Foley et al., 2011). در 40 سال آینده، افزایش تولید مواد غذایی در کشورهای توسعه یافته حدود 60 درصد و در کشورهای در حال توسعه تا حدود 100 درصد پیش‌بینی شده است (Alexandratos and Bruinsma, 2012). ضرورت ارتقای بهره‌وری آب در بخش کشاورزی علاوه بر اهمیت تأمین غذای جمعیت رو به رشد کشور، از منظر اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور که در بسیاری مناطق تولید بدون آبیاری (کشت دیم) را غیرممکن و غیراقتصادی ساخته است، قابل بحث می‌باشد. از این‌رو با ارتقای بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، می‌توان نیاز سایر بخش‌های مصرف‌کننده آب، نظیر شرب و صنعت را به راحتی تعیین کرد (Keshavarz et al., 2005).

بهره‌وری آب تحت عنوان نسبت محصول یا سود خالص حاصل از کشت یک نوع محصول به میزان آب بکار رفته برای رسیدن به آن

کمک می‌کند تا در جهت افزایش بهره‌وری آب در منطقه جیرفت واقع در استان کرمان اقدامات مفید و زیربنایی را انجام دهند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

دشت جیرفت بخشی از حوضه غربی جازموریان است که بین طول‌های جغرافیایی ۵۸،۲۶ و ۵۷،۲ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۹،۲ و ۲۸،۲ درجه شمالی، در جنوب ایران و در استان کرمان قرار گرفته است (شکل ۱). ارتفاع آن از سطح دریا بین ۸۰۰ تا ۵۰۰ متر متغیر است. این منطقه از نظر آب و هوایی جزء مناطق نیمه‌خشک به شمار می‌آید و متوسط بارندگی سالانه آن در یک دوره درازمدت ۴۰ ساله ۱۷۰ میلی‌متر می‌باشد. در محدوده دشت جیرفت و بر اساس آماربرداری در سال ۱۳۸۴ حدود ۵۱۲۹ چاه (نیمه عمیق و عمیق)، ۱۰۹۰ چشمه و ۲۹۴ قنات وجود دارد که تخلیه‌ای بالغ بر ۱۸۴ میلیون مترمکعب در سال را از آبخوان دشت جیرفت اعمال می‌کنند. از این میزان تخلیه، بخش صنعت با مصرف ۲۶ درصد میزان کل تخلیه، کمترین مقدار و بخش کشاورزی با ۹۴ درصد بیشترین میزان بهره‌برداری را به خود اختصاص داده‌اند (Faryabi et al., 2010).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱- داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی

در این پژوهش از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی کل کشور به‌صورت روزانه و ساعتی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و مدل رقومی ارتفاعی^۶ سنجنده SRTM (شکل ۲) استفاده شده است. جدول ۱ تاریخ و اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. برخی از تصاویر در بازه زمانی دوره رشد به علت پوشش بالای ابر از وارد شدن به فرایند انجام پژوهش حذف شده‌اند.

همچنین به علت چند محصولی بودن منطقه و عدم وجود نقشه الگوی کشت، منطقه مورد مطالعه به ۶ قسمت تقسیم‌بندی شد. علت انجام این تقسیم‌بندی تنوع محصولات مختلف کشت شده در منطقه مورد مطالعه است، از آن جایی که ضرایب بکار رفته در مدل فقط برای محصول گندم صدق می‌کند سعی بر این شد که مناطق عمده کشت گندم در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده و تحت این ۶ منطقه نمایش داده شود. همچنین براساس مشاهدات میدانی بیشتر اراضی زراعی که در این مناطق انتخاب شده‌اند از نوع کشت گندم می‌باشند؛ که این مناطق در شکل ۳ نشان داده شده است.

(Immerzeel et al. 2008) با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس^۲ و یک مدل هیدرولوژیکی در حوضه آبریز جنوب هند، مقدار بهره‌وری آب را ارزیابی کردند، نتایج این پژوهش نشان داد که بهره‌وری آب محصول برآورد شده برای نیشکر، سورگوم و گندم زمستانه نسبتاً بالا بود که مقادیر ۲/۹، ۱/۳ و ۱/۳ کیلوگرم در متر مکعب بدست آمده است. (de Teixeira et al. 2013) از تصاویر سنجنده مادیس و داده‌های کشاورزی- هواشناسی برای برآورد بهره‌وری آب کشت‌های آبی در منطقه نیمه‌خشک برزیل استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین مقدار بهره‌وری آب در پترولینا^۳ بین ۱/۶ تا ۲/۲ کیلوگرم در مترمربع در حالی است که در جوزیرو^۴ این محدوده ۱ تا ۱/۶ کیلوگرم در متر مکعب بود. این تحقیقات نشان داد که سنجش‌ازدور و برخی از مدل‌ها می‌تواند برای برآورد یا تحلیل تغییرات بهره‌وری آب در محصولات مختلف استفاده شوند. (Bastiaanssen et al. 1999) پیشگام استفاده از داده سنجش‌ازدور برای مطالعه بهره‌وری آب با برآورد میزان محصول و تبخیر-تعرق در حوضه آبریز باخرا واقع در هند بودند. این روش در سال ۲۰۰۷ با استفاده از الگوریتم تعادل انرژی سطح زمین اصلاح شد (Zwart and Bastiaanssen, 2007). در پژوهشی دیگر Zhang et al. (2015) در دشت هبی در چین با استفاده از توسعه یک مدل سنجش‌ازدوری، بهره‌وری آب را برای گندم محاسبه کردند، نتایج این تحقیق میزان بهره‌وری را برای این رقم گندم ۰/۲۹ تا ۱/۶۷ کیلوگرم در هر متر مکعب آب نشان داد.

اکثر مناطق ایران با کمبود آب مواجه است. در سطح ملی، بهبود بهره‌وری آب برای محصول به عنوان راهی برای کاهش کمبود آب در ایران شناخته شده است (Council, 2005; Keshavarz et al., 2005). مدل WATPRO یکی از مدل‌های سنجش‌ازدوری است که توسط Zwart et al. (2010) برای برآورد بهره‌وری آب ارائه شده است که آن‌ها مدل خود را برای محصول گندم در ۳۹ منطقه در سراسر جهان بکار بردند. مزیت این روش برآورد مستقیم بهره‌وری آب از تصاویر ماهواره‌ای و حذف پارامترهایی از قبیل، تبخیر-تعرق و گذردهی اتمسفره می‌باشد که بدست آوردن آن‌ها از تصاویر ماهواره‌ای دشوار و همواره با خطا رو به رو است، می‌باشد (Bastiaanssen and Steduto, 2017). تاکنون پژوهشی در زمینه استفاده از این مدل در سطح حوضه آبریز کشور صورت نگرفته است، لذا هدف از انجام این پژوهش استفاده از مدل سنجش‌ازدور WATPRO جهت محاسبه بهره‌وری آب در اراضی کشاورزی و همچنین تعیین میزان بهره‌وری آب در دشت جیرفت واقع در حوضه آبریز جازموریان با استفاده از این مدل به کمک تصاویر ماهواره‌ای است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر برای برنامه‌ریزان محیطی، ناحیه‌ای، سازمان‌های مدیریت منابع آب و محققین علوم کشاورزی سودمند می‌باشد و به مسئولین و برنامه‌ریزان

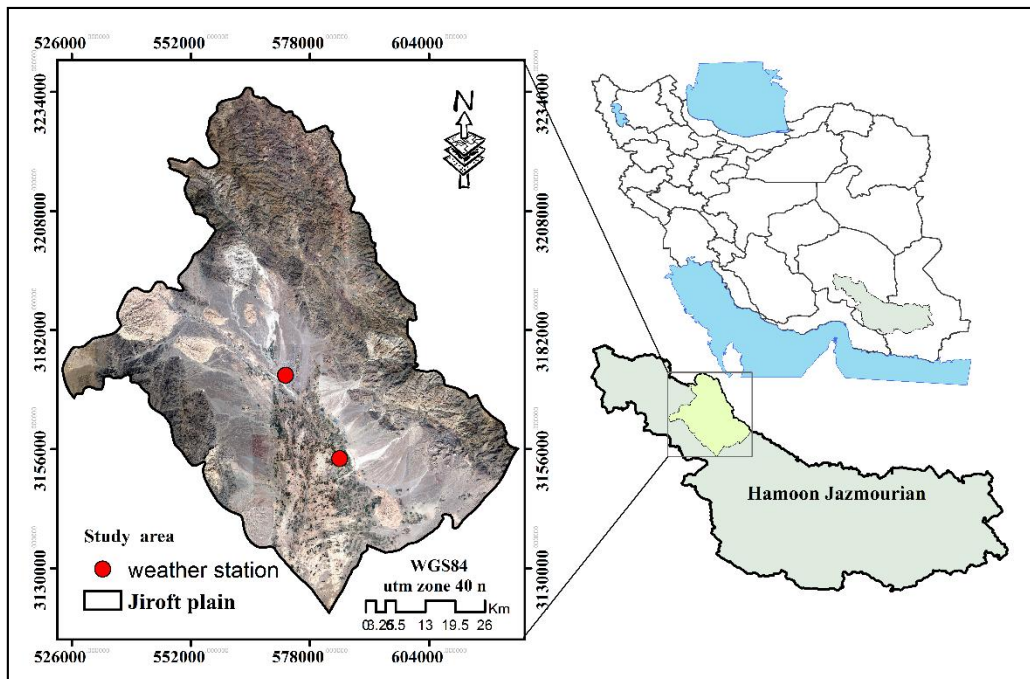


Fig. 1- Study area

شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

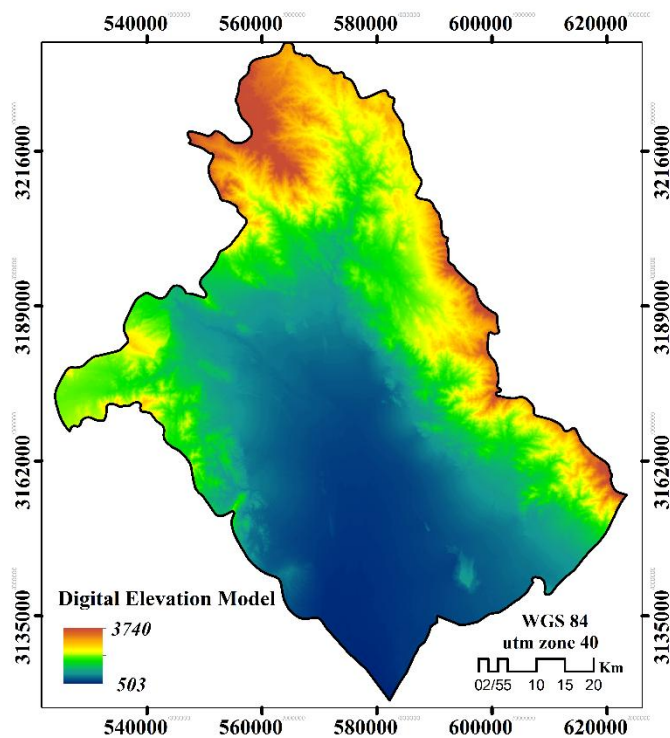


Fig. 2- Digital Elevation Model of the study area

شکل ۲- مدل رقومی ارتفاعی

Table 1- Satellite data used in the research
جدول ۱- داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش

Data type	Satellite (sensor)	Date(Shamsi)	Resolution / scale
Satellite image	Landsat 8	1395/10/06	30 meter
Satellite image	Landsat 8	1395/10/22	30 meter
Satellite image	Landsat 8	1395/12/10	30 meter
Satellite image	Landsat	1396/02/13	30 meter
Satellite image	SRTM	---	30 meter

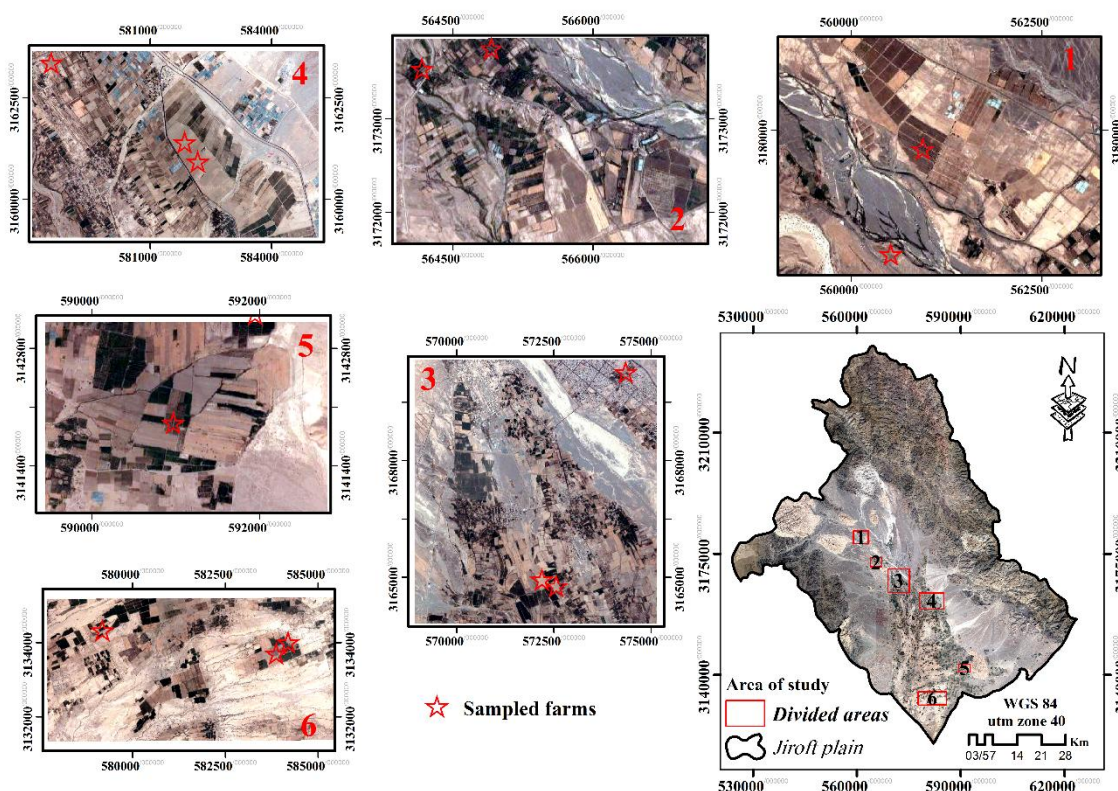


Fig. 3- Location of divided areas and sampled farms
شکل ۳- مناطق تقسیم‌شده و مزارع نمونه‌برداری شده

بررسی دقیق روش آبیاری، ساعات آبیاری و دور آبیاری، حجم آب مصرفی طی هر بار آبیاری و نهایتاً کل مصرف آب در طول فصل زراعی بدست آمد. میزان نیز با استفاده از پرسشنامه‌های طراحی شده و برخی اندازه‌گیری‌های محلی با استفاده از پلات اندازه‌گیری (یک متر در یک متر) در مزارع اندازه‌گیری شد. در نهایت با کاربرد روابط مربوطه بهره‌وری آب در هر محصول و نیز میانگین بهره‌وری مصرف آب در کل محصولات محاسبه گردید. اطلاعات مورد نیاز در این پژوهش شامل ۶ مزرعه در مناطق ۵ و ۳ می‌باشد (جدول ۲). در این مزارع میزان شوری آب و شوری اولیه خاک نیز اندازه‌گیری شد.

۲-۲-۲- داده‌های نمونه‌برداری شده

در این تحقیق برای محصول گندم میزان مصرف آب، میزان محصول و بهره‌وری مصرف آب در شرایط واقعی اندازه‌گیری گردید. تعداد ۶ مزرعه در مناطق ۶ گانه انتخاب گردید. سپس، با انجام بازدید و تهیه کاربرگ‌های مخصوص اطلاعات مورد نیاز شامل مشخصات کمی و کیفی منابع آب، مشخصات خاک (کیفیت و بافت خاک)، روش و نوع آبیاری، مشخصات گیاه و اطلاعات بهره‌بردار ثبت گردید. سپس با استفاده از اطلاعات تجهیزات آبیاری و کنتورهای حجمی نصب‌شده و

Table 2- Field measured data
جدول ۲- داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی

Area number - Farm number	Water source	Irrigation network type	Water salinity ds m ⁻¹	Primary soil salinity ds m ⁻¹
6-1	Well	Traditional	0.8	0.63
6-2	Well	Modern	0.59	3.85
3-1	Well	Traditional	0.59	0.61
6-3	Well	Modern	0.85	8.59
5-1	Well	Traditional	0.85	0.91
5-2	Well	Traditional	4.5	1.52

$$CWP = \frac{Y_{act}}{\sum_{t=h}^{t=e} ET_{act}} \quad (Kg \ m^{-3}) \quad (2)$$

که در آن ET_{act} تبخیر تعرق واقعی تجمعی مدت زمان فصل رشد (t) است که از کاشت محصول (t=e) تا برداشت (t=h) محاسبه می‌شود و Y_{act} میزان عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) در آخر دوره رشد است. جهت محاسبه میزان بهره‌وری محصول از طریق معادله (۲) لازم است که میزان تبخیر و تعرق واقعی محصول طی دوره رشد آن و همچنین میزان محصول در انتهای دوره رشد محاسبه گردد. روش‌های سنجش‌ازدور مختلفی جهت محاسبه این مقادیر ارائه شده است؛ که از بین آن‌ها معروف‌ترین روش برای محاسبه تبخیر و تعرق استفاده از مدل بیان انرژی سطح (سبال) و روش ترکیبی مبتنی بر کسر تبخیر و تابش فعال فتوسنتزی بر اساس ترکیب روش‌های سبال و استنفورد (Bastiaansen et al., 2014). اما هر دوی این روش‌ها نیازمند محاسبات پیچیده و زیاد است که در نهایت محاسبه میزان بهره‌وری را با مشکل مواجه می‌سازد. جهت رفع این مشکل (Zwart and Bastiaansen, 2010) استفاده از ترکیب دو روش فوق مدلی سنجش‌ازدوری ساده شده را برای برآورد بهره‌وری آب گندم (محصول غذایی اصلی در سطح جهان) توسعه دادند که ازین پس WATPRO نامیده می‌شود.

ویژگی اصلی مدل WATPRO (معادله ۳) استفاده از داده‌های ورودی کم و همچنین قابل اجرا بودن با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌باشد. یکی از تفاوت‌های اصلی مدل WATPRO با مدل اصلی برآورد بهره‌وری استخراج مستقیم میزان بهره‌وری از تصاویر ماهواره‌ای، حذف عامل گذردهی اتمسفر و عامل کسر تبخیر تعرق است که محاسبه دشواری دارد (Bastiaansen and Steduto, 2017).

$$CWP = \frac{0.0864 \times H \times \sum_{t=e}^{t=h} \{0.48 \times fPAR \times R_{\downarrow} \times \epsilon_{MAX} \times T_1 \times T_2\}}{(1 - \theta_{Crop}) \times \sum_{t=e}^{t=h} \{0.35 \times (1 - \alpha) \times R_{\downarrow} \times \epsilon_{MAX} \times T_1 \times T_2\}} \times 0.35 \quad (3)$$

۲-۳- پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

قبل از انجام هرگونه پردازش روی تصاویر ماهواره‌ای، انجام تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی الزامی است. در تصحیح اتمسفری، باید هندسه دید سنجنده، اثر اتمسفر، روشنایی خورشید و اثر توپوگرافی برای باندهای اپتیک اصلاح شود. برای این منظور از نرم‌افزار تصحیح اتمسفری ATCOR3 استفاده گردید. این نرم‌افزار از مدل انتقال تابش MODTRAN 5 استفاده می‌کند. همچنین، واسنجی رادیومتریکی شامل تبدیل مقادیر خام تصاویر ماهواره‌ای به مقادیر انرژی طیفی می‌باشد که بر اساس معادله (۱) انجام شده است:

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL \quad (1)$$

در معادله (۱)، $L\lambda$ انرژی طیفی ثبت‌شده در سنجنده، ML ضریب تبدیل ضربی، Q_{cal} مقدار رقومی پیکسل و AL ضریب تبدیل جمعی می‌باشد. مقادیر ضریب تبدیل جمعی و ضریب تابش در بالای اتمسفر برای باندهای مختلف سنجنده‌های OLI/TIRS از متادیتا^۱ (فایل متنی حاوی اطلاعات تصویر که هنگام دانلود دریافت می‌شود) فایل همراه با تصویر استخراج شد.

۳- روش تحقیق

پس انجام پیش‌پردازش‌ها، مقادیر خام تصاویر به بازتاب سطحی تبدیل و سپس جهت تعیین بازه زمانی اطلاعات هواشناسی و تعیین زمان اوج توسعه پوشش گیاهی، سری زمانی شاخص (NDVI)^۲ محاسبه گردید. در مرحله بعد پس از مشخص شدن بازه زمانی دوره رشد میزان آلبدو برای تصاویر در این بازه زمانی محاسبه شد. در نهایت میزان متوسط تابش ۲۴ ساعته خورشیدی فرازمینی در بازه زمانی انتخاب شده از اطلاعات هواشناسی و مدل رقومی ارتفاع بدست آمد. شکل ۴ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

بهره‌وری آب به‌عنوان نسبت میزان محصول به میزان آب بکار رفته توسط تبخیر-تعرق در طول فصل رشد تعریف می‌شود (معادله ۲):

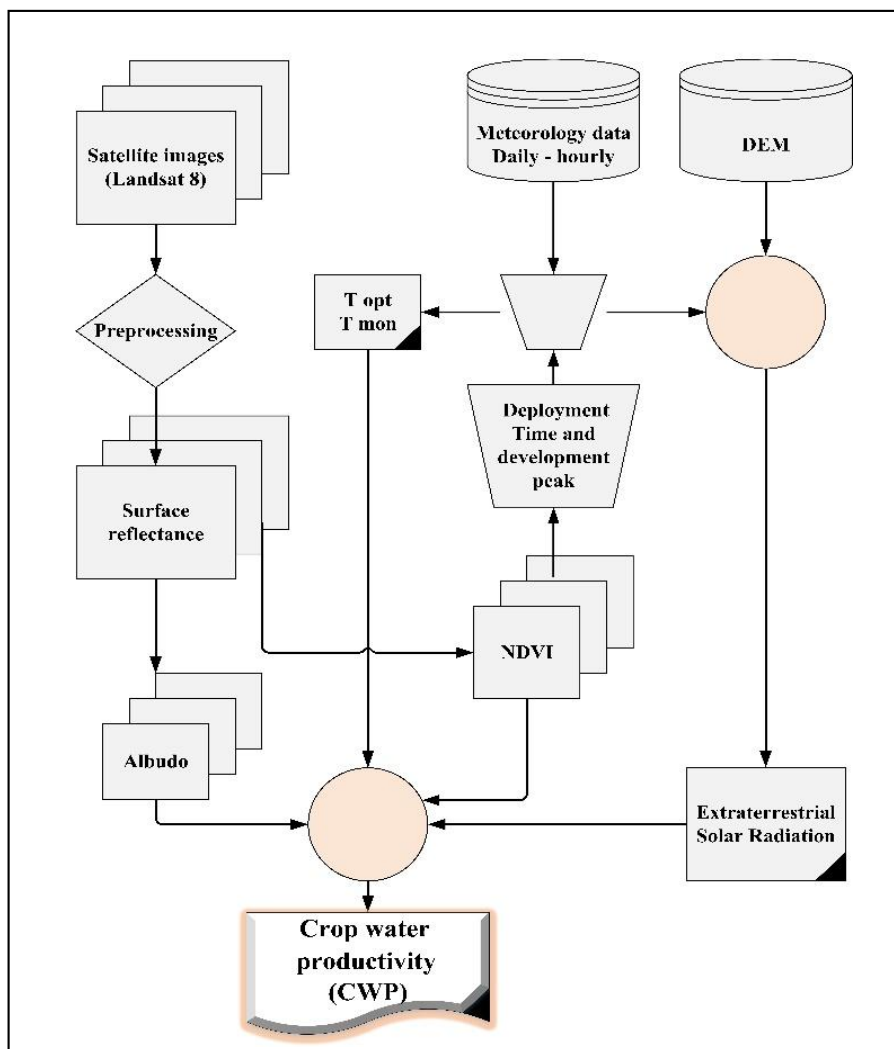


Fig. 4- Flowchart of Research steps

شکل ۴- طرح‌واره مراحل انجام پژوهش

این شاخص بین +۱ و -۱ است (Allen et al., 1974; Rouse et al., 2002). شاخص NDVI از بازتاب باندهای مرئی تصاویر ماهواره‌ای طبق معادله (۵) بدست می‌آید (Allen et al., 2002):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، ρ_{NIR} بازتاب در باند مادون قرمز و ρ_{RED} بازتاب در باند قرمز است. در معادله (۳)، α میزان آلبیدوی سطحی که به صورت نسبت تابش الکترومغناطیسی انعکاس یافته از سطح خاک و گیاه به تابش فرودی خورشید به سطح تعریف می‌شود که با استفاده از باندهای ماهواره لندست طبق راهنمای مدل سیال محاسبه می‌شود (Allen et al., 2005; Allen et al., 2002). و برای محاسبه $R\downarrow_{24}$ ($W m^{-2}$) متوسط تابش ۲۴ ساعته خورشیدی فرازمینی از داده‌های هواشناسی و مدل رقمی ارتفاعی طبق معادله (۶) استفاده می‌شود (Allen et al., 1998):

در رابطه (۳)، θ مقدار رطوبت محصول هنگام برداشت (جدول ۳)، h شاخص برداشت واقعی (جدول ۳)، $fPAR$ کسر از تابش فعال فتوسنتزی جذب شده ۲۴ ساعته، ε_{Max} ($gT MJ^{-1}$) حداکثر کارایی مصرف نور (جدول ۲)، و T_1 و T_2 ضرایبی که بر اساس دمای هوای محاسبه می‌شوند. در معادله (۳) برای محاسبه $fPAR$ از شاخص NDVI طبق رابطه (۴) استفاده می‌شود (Bastiaanssen et al., 1999):

$$fPAR = (0.48 \times R\downarrow_{exo}) \times (1.257 \times NDVI - 0.161) \quad (4)$$

که در آن NDVI یا شاخص نرمال شده پوشش گیاهی در تحلیل‌ها و اندازه‌گیری‌های سنجش‌ازدور و ارزیابی وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی یک منطقه کاربرد دارد. مطالعه رفتار زمانی پوشش گیاهی، طبقه‌بندی پوشش گیاهی در سطح جهانی و پایش محصولات کشاورزی از جمله کاربردهای NDVI به شمار می‌رود. دامنه تغییرات

$$T_1 = 0.8 + 0.02 \times T_{opt} - 0.0005 \times T_{opt}^2 \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0.2 \times T_{mon} + 10 - T_{mon})} \times \frac{1}{1 + \exp(-T_{opt} - 10 + T_{mon})} \quad (11)$$

۳-۱- ارزیابی دقت با استفاده از نقاط کنترل زمینی

پس از محاسبه میزان بهره‌وری آب در هر یک از مناطق، نتایج بدست آمده با نقاط کنترل که در ۶ مزرعه (مناطق ۳، ۵ و ۶) با استفاده از تجهیزات و کنتور و در ۴ مزرعه به صورت تقریبی، میزان آب مصرفی در دوره رشد گیاه محاسبه شد. همچنین، در ۶ مزرعه اول با استفاده از پلات و در ۴ مزرعه به صورت تجربی میزان محصول محاسبه گردید. در این پژوهش علاوه بر تعیین ضریب تعیین خطی خروجی مدل با داده‌های زمینی، از خطای جذر میانگین مربعات^۱، برای ارزیابی نتایج بدست آمده استفاده شد. خطای جذر میانگین مربعات، تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد. RMSE ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی توسط یک مجموعه داده است که طبق معادله (۱۲) محاسبه می‌شود (Hyndman and Koehler, 2006).

$$RMSE = \sqrt{E((\hat{\theta} - \theta)^2)} \quad (12)$$

که در این معادله $\hat{\theta}$ مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و θ مقدار واقعی پارامتر مورد نظر است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تعیین زمان استقرار و اوج پوشش گیاهی

شکل ۵ نشان‌دهنده میانگین NDVI در دوره رشد گیاه، در هر یک از مناطق تقسیم‌بندی شده است. مقادیر بالا نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی و وضعیت مناسب پوشش گیاهی در سطح منطقه است که با توجه به شکل ۵ بیشترین مقادیر در مزارع منطقه ۴ مشاهده شده است؛ و همچنین بالا بودن میزان این شاخص در مزرعه نشان‌دهنده سلامت گیاه و عدم وجود تنش‌های همچون تنش آبی است.

با توجه به شکل ۶ میزان NDVI در تصویر تاریخ ۸ نوامبر ۲۰۱۶ در تمامی مزارع شروع به صعود می‌کند و این روند تا تاریخ ۲۸ فوریه ۲۰۱۷ ادامه دارد، این دو نقطه عطف به عنوان تاریخ استقرار پوشش گیاهی و زمان اوج توسعه پوشش گیاهی با میزان NDVI، ۰/۳ و ۰/۸ به ترتیب، مشخص شد.

$$R_{\downarrow \text{exo}} = \frac{1440}{\pi} \times 0.082 \times d_r \times ((\omega_s \times \sin(\text{lat})) \times (\sin(\delta) + \cos(\text{lat}) \times \cos(\delta) \times \sin(\omega_s))) \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{635} \times J\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0.409 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times J - 1.39\right) \quad (8)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\text{lat}) \times \tan(\delta)) \quad (9)$$

که در معادله (۶)، lat عرض جغرافیایی ایستگاه هواشناسی به رادیان، d_r معکوس فاصله نسبی زمین تا خورشید (معادله ۷)، ω_s زاویه ساعتی خورشید (معادله ۸) و δ انحراف خورشیدی (معادله ۹) و همچنین روز سال میلادی (از اول ژانویه) است.

Table 3- Parameters required for calculating water productivity for wheat (Bastiaanssen and Steduto, 2017)

جدول ۳- پارامترهای ضروری محاسبه بهره‌وری آب برای گیاه گندم

Description	Symbol	Unit	Quantity for wheat plant
Product moisture content when harvested	θ_{Crop}	gr gr ⁻¹	0.15
Maximum efficiency of light consumption in the plant	ϵ_{MAX}	gr MJ ⁻¹	2.5
Harvest index	H	-	0.5

یکی از مراحل اصلی در انجام مدل WATPRO، تعیین زمان دقیق استقرار و زمان اوج توسعه پوشش گیاهی برای تعیین محدوده زمانی انتخاب تصاویر، داده‌های هواشناسی، برای ورود به مدل و همچنین تعیین دو پارامتر "T_{opt}، T_{mon}" است. از آن جایی که زمان کشت و برداشت محصولات در منطقه مورد مطالعه یکسان نیست، به همین دلیل به صورت تصادفی در هر یک از مناطق ۶ گانه (شکل ۳) در ۵ مزرعه مقدار NDVI از تصاویر در دوره بین حداقل تاریخ کشت و حداکثر تاریخ برداشت محصول استخراج شد و بر اساس تغییرات در نمودارهای هر یک از مزارع، یک تاریخ به عنوان شروع دوره رشد، زمان برداشت و زمان اوج توسعه پوشش گیاهی تعیین گردید، لازم به ذکر است در مزارعی که در آن‌ها نمونه‌برداری زمینی صورت گرفت برای اطمینان حاصل کردن از این روش مقادیر این شاخص با تقویم زراعی مزارع تطبیق داده شد و سپس برای محاسبه T₁ و T₂ در معادله اصلی (معادله ۳) از دمای متوسط ماهانه در دوره رشد گیاه (T_{mon}) و میانگین دمای هوا در ماهی که پوشش گیاهی بیشترین توسعه را دارد (T_{opt})، طبق معادله (۱۰ و ۱۱) استفاده شد (Bastiaanssen et al., 1999).

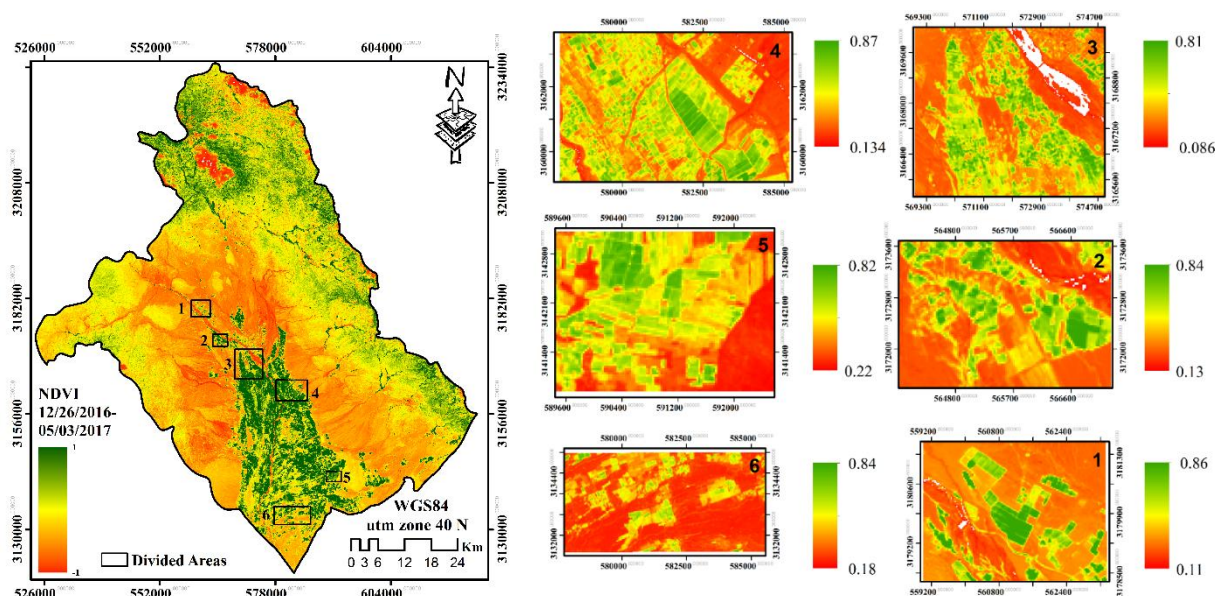


Fig. 5- Normalized Difference Vegetation Index for divided areas

شکل ۵- شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی مناطق تقسیم‌بندی شده

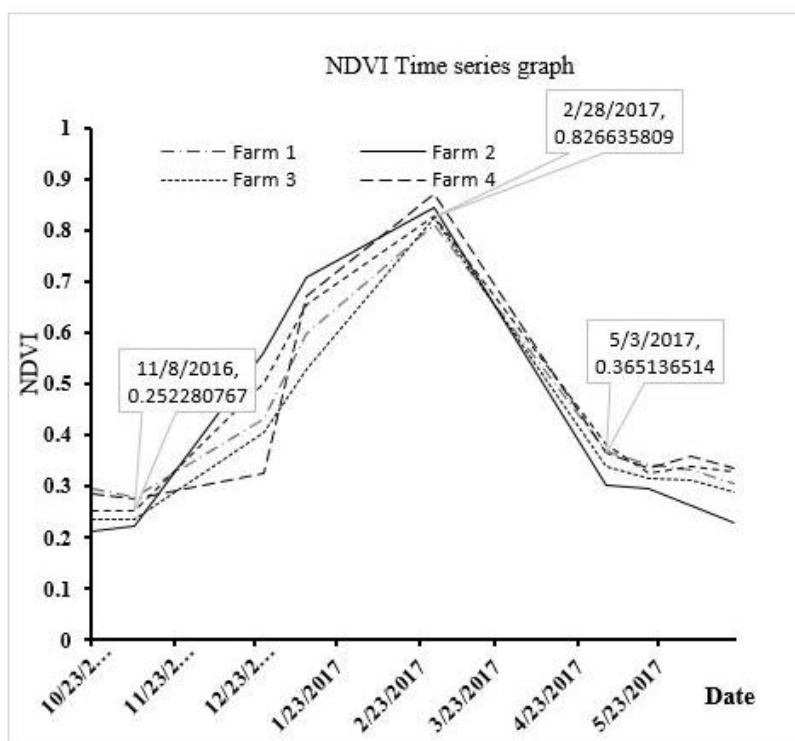


Fig. 6- NDVI time series graphs in different fields

شکل ۶- نمودار سری زمانی NDVI در مزارع مختلف

۴-۲- نقشه میزان بهره‌وری آب محصول گندم و ارزیابی دقت شکل ۷ بهره‌وری آب گیاه گندم را در دشت جیرفت نشان می‌دهد. در این پژوهش بهره‌وری آب برای محصول گندم در مزارع واقع در

همچنین در تاریخ ۳ مه ۲۰۱۷ میزان این شاخص به حداقل تقریبی خود در تمامی مزارع رسید که این تاریخ به‌عنوان زمان برداشت محصول گندم در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت که این نتایج با بررسی‌های میدانی نیز همخوانی دارد.

میزان بهره‌وری بالایی مشاهده شده است که این مزارع تحت پوشش اراضی شرکت کشت و صنعت نیستند و به‌صورت خصوصی اداره می‌شوند. یکی از دلایل بالا بودن میزان بهره‌وری در این‌گونه اراضی تأثیر مدیریت صحیح اراضی اطراف (در این جا اراضی شرکت کشت و صنعت جیرفت) بر کشاورزانی که اراضی خود را به‌صورت شخصی اداره می‌کنند.

در شکل ۸ رابطه بین میزان بهره‌وری آب برآورد شده با مقادیر میانگین NDVI نشان داده شده است. این معادله مربوط به دوره رشد تا برداشت محصول می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که این دو پارامتر دارای رابطه مثبت می‌باشند یعنی هر چه میانگین این شاخص در مزرعه بالاتر رود، میزان بهره‌وری نیز افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری که ضریب تعیین خطی بین بهره‌وری آب و NDVI میانگین ۷۶/۵۴ درصد بدست آمده است.

شکل ۹ نمودار تعیین بهره‌وری محاسبه شده با مشاهدات میدانی را نشان می‌دهد. در این نمودار میزان ضریب تعیین ۸۵ درصد بدست آمده است. R^2 بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآورد شده می‌باشد. دامنه این پارامتر بین ۰ تا ۱ است، هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده ارتباط قوی بین دو گروه می‌باشد.

قسمت‌های مختلف حوضه محاسبه شد. طبق مشاهدات میدانی منبع آب این اراضی از طریق چاه‌های عمیق، نیمه عمیق و در اراضی نزدیک رودخانه، از رودخانه تأمین می‌شود. نوع شبکه آبیاری این اراضی به‌صورت سنتی و مدرن است. در اراضی واقع در منطقه شماره ۴ شامل اراضی شرکت کشت و صنعت جیرفت است، سیستم آبیاری از نوع نوار تیپ می‌باشد و این اراضی طبق نظر کشاورزان بیشترین میزان عملکرد محصول را در بین اراضی کشاورزی این حوضه دارند. همچنین، نوع سیستم آبیاری در قسمت‌های شمالی حوضه شامل مناطق ۱ و ۲ بیشتر از نوع سنتی و منبع آب آن‌ها رودخانه است.

با توجه به شکل ۷ کمترین میزان بهره‌وری در اراضی منطقه ۵ مشاهده شده است که حداکثر میزان بهره‌وری در این اراضی $0/44 \text{ kg m}^{-3}$ است. در این اراضی سیستم آبیاری دارای ضعف بوده و مدیریت دقیق و درستی بر میزان استفاده از آب صورت نگرفته و در نتیجه میزان بهره‌وری پایین است. مناطق ۱ و ۲ میزان حداکثر بهره‌وری یکسانی دارند و همچنین منطقه ۳ و ۶ به ترتیب دارای حداکثر بهره‌وری $0/48 \text{ kg m}^{-3}$ و $0/48 \text{ kg m}^{-3}$ است. همان‌طور که گفته شد بخشی از منطقه ۳ شامل اراضی شرکت کشت و صنعت جیرفت است و همه این اراضی به‌صورت مدرن و با مدیریت یکسان آبیاری می‌شوند و در نتیجه تأثیر آبیاری و بهبود مدیریت باعث افزایش بهره‌وری تا میزان حداکثر $0/8 \text{ kg m}^{-3}$ شده است. البته در قسمت‌های شمال غربی این منطقه نیز

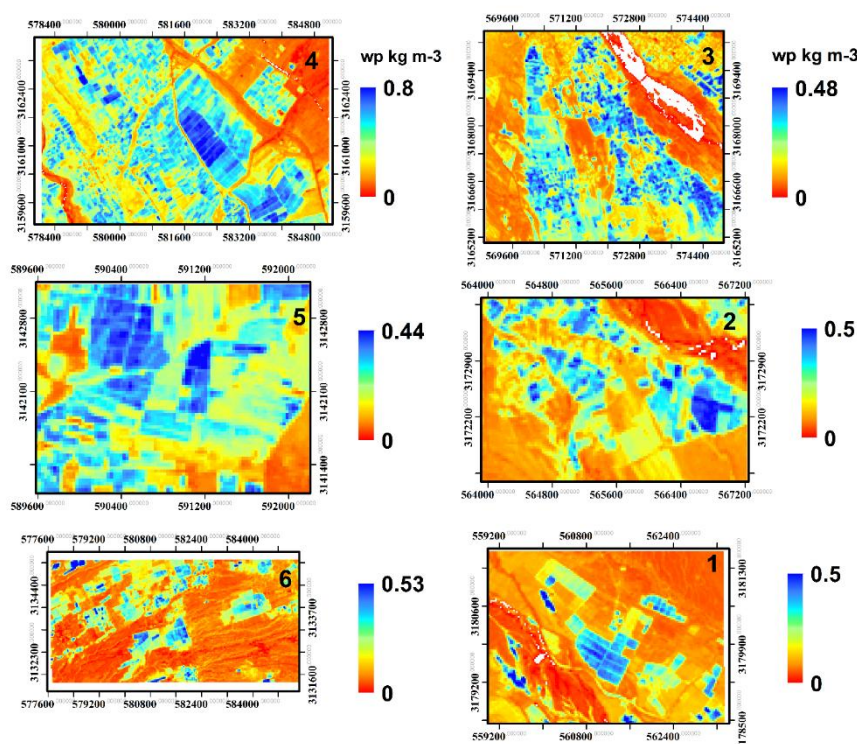


Fig. 7- Water productivity of wheat in selected farms in the study area
شکل ۷- بهره‌وری آب گندم در مزارع انتخاب شده

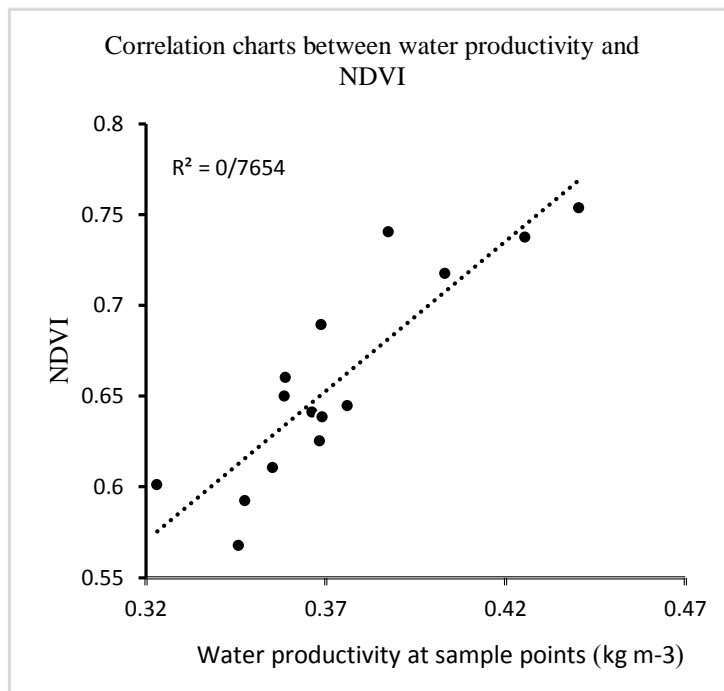


Fig. 8- Relationship between water productivity and average of NDVI during growth
 شکل ۸- رابطه بین میزان بهره‌وری آب و میانگین NDVI در دوره رشد در مزارع مختلف

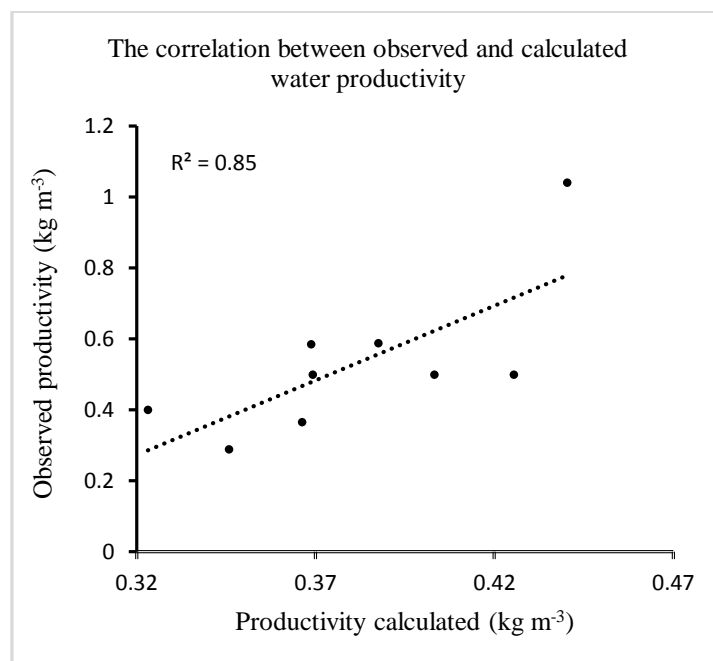


Fig. 9- Relationship between observed productivity and calculated productivity
 شکل ۹- نمودار تعیین بین بهره‌وری مشاهده شده و بهره‌وری محاسبه شده

می‌باشد. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده دقت بالای مدل و مقدار صفر نشان دهنده عدم وجود خطا در برآورد مدل است.

همچنین، در بررسی میزان تفاوت بهره‌وری برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی، مقدار عددی RMSE، 0.16 kg m^{-3} بدست آمد. مقادیر RMSE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری

۵- نتیجه گیری

نتایج این به پژوهش به خوبی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل WATPRO را در برآورد بهره‌وری آب در مزارع گندم در حوضه دشت جیرفت نشان داد. همچنین به علت عدم وجود تقویم زراعی ثابت در کل منطقه در این منطقه ماه فوریه به عنوان ماه اوج توسعه پوشش گیاهی از بررسی سری زمانی NDVI تعیین شد. در بررسی میزان بهره‌وری آب، بیشترین میزان بهره‌وری 0.8 kg m^{-3} و کمترین میزان بهره‌وری 0.44 kg m^{-3} مشاهده شد. از بررسی تأثیر میزان شوری آب، شوری اولیه خاک و سیستم آبیاری مشخص شد که هرچه میزان شوری آب بیشتر باشد میزان محصول نیز کمتر است و سیستم آبیاری مدرن مانند نوار تیپ یکی از مؤثرترین عوامل بر میزان بهره‌وری آب در مزارع است که حتی می‌تواند تأثیری بیشتر از شوری آب بر میزان بهره‌وری داشته باشد. در بررسی میزان شوری اولیه خاک با میزان بهره‌وری رابطه مستقیمی وجود ندارد و این عامل تأثیر عوامل پدیده و پنهانی دیگری را مشخص می‌کند. همچنین شاخص‌هایی همچون NDVI که از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شوند نیز می‌توانند تا حدودی در کنترل میزان بهره‌وری آب پیش از برداشت محصول در مزارع با کشت و شرایط یکسان در مراحل مختلف رشد مفید باشند، این گفته در بررسی رابطه بین این شاخص با میزان بهره‌وری آب در مزارع مختلف به خوبی نشان داده شد، ضریب تعیین بین این دو عامل $0.54/0.76$ درصد بدست آمد. در ارزیابی مدل با داده‌های نمونه برداری شده از چند مزرعه ضریب تعیین 0.85 درصد بدست آمد. به طور کلی سیستم و زمان آبیاری تأثیر بسیاری در میزان بهره‌وری و عملکرد محصول دارد این مسأله در منطقه ۴ به خوبی به اثبات رسید، اما با توجه به وضعیت کمبود آب در منطقه مورد مطالعه و مقایسه میزان بهره‌وری آب در گیاه گندم با سایر مناطق در جهان این مقدار می‌تواند تا $1/5 \text{ kg m}^{-3}$ و بیشتر هم افزایش یابد و در این زمینه سنجش‌ازدور می‌تواند ابزاری جهت افزایش بهره‌وری و کنترل هدر رفت سرمایه ملی و آب باشد.

۳-۴- تحلیل مقادیر بهره‌وری آب و تأثیر مدیریت‌های کشاورزی بر آن

همان‌طور که در قبل ذکر شد نوع سیستم آبیاری بر میزان بهره‌وری تأثیر زیادی دارد، در بررسی نتایج حاصل از بهره‌وری، نوع سیستم آبیاری و نوع شبکه آبیاری (جدول ۳ و ۴) سیستم‌های آبیاری نوار تیپ و شبکه آبیاری مدرن بیشترین مقادیر بهره‌وری آب را دارند و سیستم آبیاری غرقابی که در آن آب زیادی به گیاه داده می‌شود، میزان بهره‌وری پایینی دارند. اما عوامل زیادی بر میزان بهره‌وری تأثیرگذار می‌باشند، از جمله این عوامل، میزان شوری آب و خاک است. با توجه به میزان شوری آب و مقدار بهره‌وری آب تقریباً هرچه میزان شوری آب افزایش یابد، میزان بهره‌وری آب نیز کاهش پیدا می‌کند. در بین مزارع ۳ منطقه نمونه برداری شده، مزرعه واقع در منطقه ۳-۶ و ۱-۵ از نظر شوری آب مقادیر یکسانی را نشان می‌دهند؛ اما در میزان بهره‌وری آب مزرعه ۳-۶ با 0.44 kg m^{-3} بیشترین مقدار بهره‌وری و مزرعه ۱-۵ کمترین مقدار اندازه‌گیری شده را بین نمونه‌ها دارد، علت این تفاوت نوع سیستم آبیاری مزرعه ۳-۶ که سیستم آبیاری نوار تیپ و مزرعه ۱-۵ سیستم آبیاری غرقابی دارد است که همین امر ارجحیت سیستم آبیاری و تأثیر آن بر میزان بهره‌وری را نسبت به شوری آب نشان می‌دهد که این شرایط در مزارع ۲-۶ و ۱-۳ با شوری آب 0.59 ds m^{-1} نیز اتفاق افتاده است و کمترین میزان بهره‌وری در مزرعه‌ای با (مزرعه ۲-۵) بیشترین شوری آب (0.5 ds m^{-1}) و سیستم آبیاری غرقابی اتفاق افتاده است. همچنین در بررسی میزان شوری اولیه خاک در مزارع نمونه، مزرعه ۳-۶ با 0.59 ds m^{-1} بیشترین شوری اولیه و مزرعه ۱-۳ با 0.61 ds m^{-1} کمترین میزان شوری اولیه را دارد که با توجه به میزان بهره‌وری آب این مزارع نمی‌توان رابطه مستقیمی را بین این دو عامل در نظر گرفت و می‌توان گفت که عواملی مختلف در این زمینه، باعث ایجاد چنین شرایط شده‌اند. لازم به ذکر است منبع تأمین آب تمامی مزارع نمونه برداری شده چاه است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Crop Water Productivity
- 2- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 3- Petrolina
- 4- Juazeiro
- 5- Atmospheric Transmissivity
- 6- Digital Elevation Model
- 7- MetaData
- 8- Normalized Difference Vegetation Index
- 9- Root Mean Square Error

Table 4- Estimated values of water productivity in sampling farms

جدول ۴- مقادیر برآورد شده بهره‌وری آب در مزارع نمونه برداری

Water productivity (Estimated) (kg m-3)	Area number - Farm number
0.34	6-1
0.38	6-2
0.37	3-1
0.44	6-3
0.39	5-1
0.32	5-2

- 1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113(5):893-903, Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425709000169>
- Choudhury I and Bhattacharya B (2018) An assessment of satellite-based agricultural water productivity over the Indian region. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8):2294-2311
- Council NR (2005) Water conservation, reuse, and recycling. Proceedings of an Iranian-American Workshop. National Academies Press
- de C Teixeira AH, Scherer-Warren M, Hernandez FB, Andrade RG, Leivas JF (2013) Large-scale water productivity assessments with MODIS images in a changing semi-arid environment: a Brazilian case study. *Remote Sensing* 5(11):5783-5804
- Döll P and Siebert S (2002) Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research* 38(4)
- Du W, He X, Shamaila Z, Hu Z, Zeng A, Muller J (2011) Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 42(4):174-178
- Falkenmark MD Molden (2008) Wake up to realities of river basin closure. *International Journal of Water Resources Development* 24(2):201-215
- Faramarzi M, Yang H, Schulin K, Abbaspour C (2010) Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural Water Management* 97(11):1861-1875
- Faryabi M, Kalantari N, Negarestani A (2010) Evaluation of factors influencing groundwater chemical quality using statistical and hydrochemical methods in jiroft plain. *Geosciences* 20(77):115-120
- Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Mueller ND, Connell CO, Ray DK, West PC (2011) Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478(7369):337
- Gao J, Sheshukov AY, Yen H, Kastens JH, Peterson DL (2017) Impacts of incorporating dominant crop rotation patterns as primary land use change on hydrologic model performance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247:33-42
- Goshehghir AS, Golabi A M, Naseri A (2018) Comparison of actual evapotranspiration estimated using gram-schmidt method and SEBAL algorithm with lysimeteric data (Case study; Amir Kabir Sugarcane Argo-Industry). *Iran Water Resources Research* 14(1):125-139 (In Persian)
- Abolpour B (2018) Realistic evaluation of crop water productivity for sustainable farming of wheat in Kamin Region, Fars Province, Iran. *Agricultural Water Management* 195:94-103
- Alexandratos N & Bruinsma J (2012) World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03, Rome, FAO
- Allen R, Tasumi M, Trezza R, Bastiaanssen W (2002) SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual-Idaho Implementation, version, 1:97
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9):D05109
- Allen R G, Tasumi M, Morse A (2005) Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management. In: US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop, pp. 8-10
- Bachour R, Walker WR, Tielavilca AM, McKee M, Maslova I (2014) Estimation of spatially distributed evapotranspiration using remote sensing and a relevance vector machine. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 140(8):04014029
- Bastiaanssen W, Steduto GP (2017) The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. *Science of the Total Environment* 575:595-611
- Bastiaanssen WG, Thiruvengadachari S, Sakthivadivel R, Molden DJ (1999) Satellite remote sensing for estimating productivities of land and water. *International Journal of Water Resources Development* 15(1-2):181-194
- Campos I, Neale CM, Arkebauer TJ, Suyker AE, Gonçalves IZ (2018) Water productivity and crop yield: A simplified remote sensing driven operational approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 249:501-511
- Carr M (2013) Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. By P. Steduto, TC Hsiao, E. Fereres and D. Raes. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2012), pp. 500, US \$100.00. ISBN 978-92-5-107274-5. The whole report can be downloaded from: <http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e00.htm>. *Experimental Agriculture* 49(2):311-311
- Chander G, Markham BL, and Helder DL (2009) Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-

- reservoirs in Sistan). *Iran Water Resources Research* 12(3):130-14 (In Persian)
- Rahimpour M, Karimi N, Rouzbahanim R, Eftekhari M (2018) Validation and calibration of FAO WaPOR product (actual evapotranspiration) in Iran using in-situ measurements. *Iran Water Resources Research* 14(2):249-262 (In Persian)
- Rouse J, Haas R, Schell J, Deering D, Harlan J (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. 362 pp. Texas A & M Univ., Remote Sens. Cent., College Station, Tex
- Siebert S, Döll P (2010) Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. *Journal of Hydrology* 384(3-4):198-217
- Timsina J, Godwin D, Humphreys E, Kukal S, Smith D (2008) Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT-CSM-CERES-Wheat model. *Agricultural Water Management* 95(9):1099-1110
- Yan NB Wu (2014) Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin. *Agricultural Water Management* 133:24-33
- Yang G, Pu R, Zhao C, Xue X (2014) Estimating high spatiotemporal resolution evapotranspiration over a winter wheat field using an IKONOS image based complementary relationship and Lysimeter observations. *Agricultural Water Management* 133:34-43
- Zhang S, Zhao H, Lei H, Shao H, Liu T (2015) Winter wheat water productivity evaluated by the developed remote sensing evapotranspiration model in Hebei plain, China. *The Scientific World Journal*, 2015
- Zwart SJW, Bastiaanssen G (2007) SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural Water Management* 89(3):287-296
- Zwart SJ, Bastiaanssen WG, de Fraiture C, Molden DJ (2010) WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat. *Agricultural Water Management* 97(10):1628-1636
- Hyndman RJ and Koehler AB (2006) Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting* 22(4):679-688
- Immerzeel W, Gaur A, Zwart SJ (2008) Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural Water Management* 95(1):11-24
- Irmak S, Odhiambo LO, Kranz WL, Eisenhauer DE (2011) Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency. Publication EC732. University of Nebraska-Lincoln Extension
- Jin X, Yang G, Li Z, Xu X, Wang J, Lan Y (2018) Estimation of water productivity in winter wheat using the AquaCrop model with field hyperspectral data. *Precision Agriculture* 19(1):1-17
- Kadaja JT Saue (2016) Potential effects of different irrigation and drainage regimes on yield and water productivity of two potato varieties under Estonian temperate climate. *Agricultural Water Management* 165:61-71
- Keshavarz A, Ashrafi S, Hydari N, Pouran M, Farzaneh E (2005) Water allocation and pricing in agriculture of Iran. In: *Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop*, The National Academies Press: Washington, DC, pp. 153-172
- Li H, Zheng L, Lei Y, Li C, Liu Z, Zhang S (2008) Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management* 95(11):1271-1278
- Majidi Kh M, Alizadeh A, Farid A, Vazifedoust M (2017) Evaporation from lakes and reservoirs: developing a remote sensing algorithm of refrence and water surface energy balance. *Iran Water Resources Research* 13(2):154-169 (In Persian)
- Rahdari V, Maleki S, Rahdari M, Mahomoudi S, Pormollaei N, Alimoradi MR, Abtin E, Kadkhodae M, Pormanafi S (2016) Investigate the potential of multi spectral satellite data for water depth and lake neighbor area mapping (case study: Chah nimeh