

شبیه سازی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه برنج با استفاده از مدل SWAP و فناوری سنجش از دور به منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک

حسین پندی، صفورا اسدی کپورچال، مجید وظیفه دوست و مجتبی رضایی

دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صفحات ۳۸۷-۳۷۴

Vol. 6(4), Winter 2020, 374 – 387

DOI: 10.22034/jewe.2020.242119.1398

Simulation of Rice Yield and Its Components  
Using SWAP Model and Remote Sensing  
Technology for Optimal Use of Water and Soil  
Resources

Pandi H., Asadi Kapourchal S., Vazifedoust M.  
and Rezaei M.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

پندی ح، اسدی کپورچال ص، وظیفه دوست م، و رضائی م. (۱۳۹۹). شبیه سازی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه برنج با استفاده از مدل SWAP و فناوری سنجش از دور به منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۴، صفحات: ۳۸۷-۳۷۴.

**Citing this paper:** Pandi H., Asadi Kapourchal S., Vazifedoust M. and Rezaei M. (2020). Simulation of rice yield and its components using SWAP model and remote sensing technology for optimal use of water and soil resources. Environ. Water Eng., 6(4), 374–387. DOI: 10.22034/jewe.2020.242119.1398.

## شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه برنج با استفاده از مدل SWAP و فناوری سنجش از دور به منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک

حسین پندی<sup>۱</sup>، صفورا اسدی کپورچال<sup>۲\*</sup>، مجید وظیفه‌دوست<sup>۳</sup> و مجتبی رضایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۴</sup>استادیار، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

\*نویسنده مسئول: [safooraasadi@guilan.ac.ir](mailto:safooraasadi@guilan.ac.ir)

### مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۵/۱۴]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۰۶/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۶/۲۴]

### چکیده

با توجه به اهمیت منابع آب و خاک در توسعه کشاورزی پایدار، افزایش جمعیت جهان و نیاز روزافزون به تولیدات زراعی، پیش‌بینی عملکرد محصول با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی و فناوری سنجش از دور بسیار با اهمیت است. پژوهش حاضر با هدف برآورد عملکرد اجزای برنج شامل کاه، شلتوک و زیست‌توده رقم هاشمی طی مراحل مختلف رشد با مدل SWAP و ارائه معادلات رگرسیونی با استخراج شاخص‌های گیاهی NDVI و SAVI از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و لندست ۷ و ۸ در مؤسسه تحقیقات برنج کشور انجام شد. مقایسه متغیرهای آماری عملکرد گیاه برنج نشان داد که میانگین مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و شاخص کارایی مدل (EF) در برآورد عملکرد اجزای برنج در مراحل مختلف رشد با مدل SWAP به ترتیب بیش‌تر از ۰/۷ و ۰/۹ و دارای خطای ۱/۹۳ تا ۶/۵۴٪ معادل ۱۳۴/۲۱ الی ۴۷۰/۴۳ kg/ha بود. اختلاف اندک بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل SWAP عملکرد برنج در منطقه مورد مطالعه را با دقتی مناسب برآورد می‌کند. نتایج همچنین نشان داد که شاخص‌های NDVI و SAVI استخراج شده با دقتی بسیار خوب عملکرد اجزای برنج در مراحل مختلف رشد را برآورد می‌کنند. لیکن بیش‌ترین مقدار همبستگی مربوط به مرحله رشد زایشی بود. در نهایت،  $R^2$  برای شاخص NDVI در مراحل مختلف رشد و نیز در کل دوره رشد برای کاه، شلتوک و زیست‌توده نسبت به شاخص SAVI بیش‌تر بوده و شاخص NDVI از دقت بیش‌تری برخوردار بود.

**واژه‌های کلیدی:** برنج؛ تصاویر ماهواره‌ای؛ زیست‌توده؛ شاخص‌های گیاهی؛ مدل SWAP.

## ۱- مقدمه

مطالعات صحرایی به دلیل مشکلات اجرایی، مالی و زراعی تنها می‌تواند بخش کوچکی از الگوهای مدیریت مزرعه‌ای را در دسترس کشاورزان و محققین این عرصه قرار دهد. همچنین اعتبار آزمایش‌های صحرایی بسته به شرایط فیزیکی و منطقه‌ای محل انجام آزمایش، متفاوت است. با توجه به اینکه برخی موارد مانند پارامترهای ورودی موردنیاز پژوهش و نیز هزینه‌های بالای تحقیق سبب محدودیت انجام تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی می‌شود، بهره‌مندی از ابزارهای جدید برای تکمیل آزمایش‌های صحرایی و آنالیز نتایج در مکان و زمان‌های مختلف، امری اجتناب‌ناپذیر است. فناوری سنسجش از دور یکی دیگر از ابزارهایی است که امکان توزیع مکانی عامل‌های موردنیاز اثرگذار و تغییرات زمانی آن‌ها را با استفاده از تصویربرداری‌های متعدد فراهم می‌کند و روزبه‌روز بر اهمیت آن در راستای توسعه پایدار افزوده می‌شود (Raeni-Sarjaz and Rostami 2016). تولید گیاهان به‌طور مستقیم به فعل‌وانفعالات بین انرژی تابش خورشیدی و سطح پوشش گیاهان بستگی دارد و فن‌های سنسجش از دور می‌تواند با اندازه‌گیری این انرژی، میزان عملکرد گیاهان را برآورد نماید (Wei-guo et al. 2011). یکی از روش‌های کارآمد جهت پایش محصولات کشاورزی، استفاده از شاخص‌های طیفی است. اغلب مدل‌هایی که برای تخمین میزان عملکرد محصول و زیست‌توده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌کنند، عموماً بر پایه محاسبات شاخص‌های گیاهی استوار هستند و در ساختار خود از باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک استفاده می‌کنند (Son et al. 2014). ساختار گیاهی، ترکیب گونه‌ای، سلامتی و شادابی گیاه، ویژگی‌های برگ و تنش‌های گیاهی و ارتفاع گیاه از پارامترهای مؤثر بر این شاخص‌ها می‌باشند (Pettorelli et al. 2005). مدل‌های تجربی رگرسیونی بر اساس روابط همبستگی بین متغیر وابسته (عملکرد گیاهی) و متغیرهای مستقل (شاخص‌های پوشش گیاهی) شکل گرفته که نسبتاً ساده بوده و نیاز به داده‌های کمی دارد. با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و با فرض یک نوع تابع (خطی، لگاریتمی، نمایی)، پارامترهای تابع نیز محاسبه و میزان عملکرد تخمین

پیش‌بینی عملکرد محصول یکی از اهداف کشاورزی پایدار به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک به‌ویژه در شرایط خشکسالی و کمبود منابع آب است. مطالعه مراحل مختلف رشد گیاهان زراعی در شرایط مختلف، نقشی مهم در تولید محصولات زراعی و کاهش اثرات منفی تنش بر رشد دارد. برنج با نام علمی *Oryza Sativa L.* پس از گندم، مهم‌ترین و عمده‌ترین محصول زراعی جهان است و نزدیک به ۳۵ تا ۶۵٪ کالری مصرفی ۲/۷ میلیارد نفر در جهان را به‌خود اختصاص داده است (Sadooghi et al. 2016). در ایران، سطح زیر کشت گیاه برنج در حدود ۶۲۲۹۹۱ ha و تولید آن ۳۱۰۶۳۸۰ Ton بوده است. در استان گیلان نیز سطح زیر کشت برنج در حدود ۲۲۰۰۰۰ ha و تولید این محصول ۱۰۹۳۶۶۵ Ton بوده است (Anonymous 2019). در کل نواحی ساحلی دریای خزر به‌ویژه استان‌های گیلان و مازندران، بیش از ۷۰٪ سطح زیر کشت برنج را به خود اختصاص داده‌اند (Rezaei et al. 2016). بر اساس پژوهش Mousavi et al. (2019)، عملکرد شلتوک برنج در رقم‌های عنبروری قرمز، چمپا و دانیال به ترتیب برابر با ۴/۳، ۴/۶ و ۶/۹ ton/ha بوده است.

شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی، ابزاری مفید برای پیش‌بینی عملکرد گیاهان در تحقیقات علمی و مدیریت زراعی است. مدل SWAP یک مدل آگروهیدرولوژی است که با در نظر گرفتن داده‌های خاک، آب، اتمسفر و گیاه، شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول را با دقت مناسبی نسبت به اندازه‌گیری مزرعه‌ای و صحرایی انجام می‌دهد. Ma et al. (2011) از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد گندم استفاده کردند و نشان دادند که مقدار خطای RMSE برای عملکرد ۲/۴٪ بوده است. همچنین در تحقیقات Mousavi et al. (2019)، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدل SWAP نشان داد که بیش‌ترین، کم‌ترین و میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۲/۱، ۰/۱۶ و ۰/۶۷ ton/ha بوده و مدل با کارایی (EF) ۰/۹۹ و ضریب تبیین ۰/۷۱، ابزاری قدرتمند در برآورد عملکرد برنج بوده است.

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ انجام شد. با توجه به بررسی منابع تاکنون از تصاویر ماهواره‌های مختلف به‌ویژه لندست در برآورد عملکرد برنج استفاده شده است لیکن در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای برآورد عملکرد برنج در استان گیلان استفاده شد که از نقاط قوت این پژوهش است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در شالیزارهای مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در استان گیلان در حومه شهر رشت با مختصات جغرافیایی ۱۲° ۳۷' عرض شمالی، ۳۸' ۴۹° طول شرقی و ارتفاع تقریبی ۲۴ m از سطح دریا و در سال زراعی ۱۳۹۶ بر روی برنج رقم هاشمی اصلاح شده انجام شد. شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی شالیزارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به موقعیت اراضی تحت کشت برنج در منطقه مورد مطالعه، ابتدا چهار قطعه زمین مورد نظر جهت انجام پژوهش انتخاب و با روش‌های معمول آماده‌سازی زمین، شخم زده شدند.

### ۲-۲- روش کار

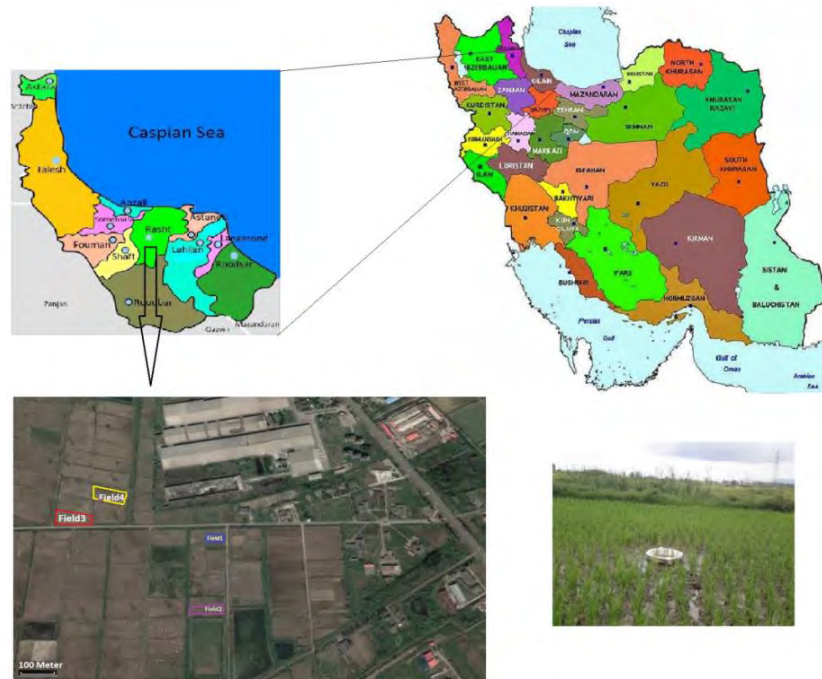
برای تعیین ویژگی‌های خاک محل آزمایش، از هر شالیزار ۳ نمونه و در مجموع ۱۲ نمونه خاک همگن به صورت تصادفی از شالیزارهای مورد مطالعه تا عمق نفوذ ریشه گیاه برنج (۳۰ cm) در سه لایه (۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰) تهیه شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder 1986)، جرم ویژه ظاهری خاک به روش کلوخه و پارافین (Grossman and Reinsch 2002)، درصد مواد آلی به روش Walkly and Black (1934)، pH و EC خاک به ترتیب با استفاده از دستگاه پ-هاش متر و هدایت سنج (Page et al. 1982) در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

زده می‌شود (Aliabadi et al. 2014). لازم به ذکر است که سادگی این روش به معنی دقت کم آن نمی‌باشد و حتی به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای با دقت مکانی کم نیز نسبت به روش اندازه‌گیری زمینی عملکرد بهتری دارد. تحقیقات انجام شده ارتباط بسیار بالا بین شاخص NDVI<sup>1</sup> و مقدار عملکرد گیاه برنج را نشان داده‌اند (Siyal et al. 2015). از آنجایی که NDVI شاخص بازتابش باند قرمز و مادون قرمز نزدیک بوده و بیشترین مقدار جذب کلروفیل در این دو باند اتفاق می‌افتد، ارتباط این شاخص با رشد گیاهان، پوشش گیاهی و زیست‌توده قابل توجه است (Kheirkhah Zarkesh et al. 2014).

در مطالعه انجام شده توسط Rezaei et al. (2014)، مقدار ضریب تبیین شاخص SAVI<sup>2</sup> برای زیست‌توده، عملکرد و کاه به ترتیب برابر ۰/۶۹، ۰/۵۸ و ۰/۶۳ و خطا ۱۰، ۱۰ و ۱۴٪ معادل ۸۷۰، ۳۷۵ و ۶۸۰ kg/ha به دست آمد. مطالعات انجام شده در چند دهه اخیر بیانگر آن است که داده‌های سنجش از دور می‌توانند برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل تحت شرایط خاص استفاده شوند (Xie and Zhang 2010; Kunnath Poovakka et al. 2016; Mohanty 2013; Zhou et al. 2013). استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی و فناوری سنجش از دور ضمن تخمین عملکرد پیش از برداشت محصول با دقت قابل قبول، محدودیت‌های موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای را به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌دهد. لیکن کاربرد این روش‌ها و درستی نتایج به دست آمده از آن‌ها باید با نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد (Yaghouti et al. 2018). با توجه به اهمیت کشت گیاه برنج در استان گیلان، پژوهش حاضر با هدف تعیین عملکرد برنج و اجزای آن طی مراحل چندگانه رشد (رویشی، زایشی و رسیدگی) و شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل SWAP و ارائه معادلات مناسب جهت برآورد عملکرد گیاه برنج با استفاده از شاخص‌های گیاهی استخراج شده از

<sup>2</sup> Soil Adjusted Vegetation Index

<sup>1</sup> Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزارع برنج مورد مطالعه  
Fig. 1 Geographical location of the study area

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شالیزارهای مورد مطالعه  
Table 1 Some chemical and physical properties of studied paddy field

Soil texture	Silt (%)	Sand (%)	Clay (%)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Organic carbon (%)	EC (dS/m)	pH	Depth (cm)
Clay	39	14	47	1.10	1.72	0.71	7.15	0-10
Clay	39	17	44	1.20	1.54	0.60	7.23	10-20
Silty Clay	44	9	47	1.32	1.25	0.56	7.26	20-30

### ۲-۳- مدل SWAP

داده‌های مورد نیاز در این مدل شبیه‌ساز شامل اطلاعات خاک، آبیاری، پارامترهای گیاهی و داده‌های هواشناسی است. در بخش اطلاعات خاکی افزون بر متغیرهای اندازه‌گیری شده که در بخش قبل بیان شد، هدایت هیدرولیکی و پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از نرم‌افزار RETC محاسبه شد. اطلاعات آبیاری مورد نیاز شامل تاریخ آبیاری، عمق آبیاری، شوری آب آبیاری و روش آبیاری بود. پارامترهای گیاهی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی به شمار می‌آیند. در مدل SWAP برای شبیه‌سازی رشد گیاه از مدل ساده‌شده WOFOST استفاده می‌شود که در آن رشد محصولات بر اساس فرایندهای اکوفیزیولوژیکی شبیه‌سازی و تخمین زده می‌شوند. در مدل SWAP زیر مدل گیاهی

روش آبیاری مزارع به صورت غرقاب دائم طی دوره رشد گیاه بوده و عمق آب (پیش و پس از آبیاری، میزان کاهش توسط تبخیر-تعرق و افزایش ارتفاع آب توسط باران و آبیاری) توسط خط‌کش به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. با کشت نشا برنج در زمین در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۱، دوره رویشی آغاز و تا ۱۳۹۶/۳/۲۷ ادامه یافت. مرحله بعدی رشد گیاه (دوره زایشی) از تاریخ ۱۳۹۶/۳/۲۸ با ظهور خوشه، شروع و با گل-دهی برنج در تاریخ ۱۳۹۶/۵/۱ به پایان رسید. مرحله آخر (دوره رسیدگی) از تاریخ ۱۳۹۶/۵/۲ شروع و با برداشت برنج در تاریخ ۱۳۹۶/۵/۲۵ به پایان رسید. نمونه‌برداری گیاهی طی دوره رشد برنج (۸۷ d) به صورت هفتگی انجام و مراحل توسعه‌یافتگی گیاه برنج بر اساس روزهای سپری‌شده از مرحله نشا تا زمان برداشت محصول تعیین شد.



روزانه و میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ m از ایستگاه سینوپتیک رشت که در مجاور مؤسسه تحقیقات برنج کشور قرار دارد، به‌عنوان نزدیک‌ترین و قابل اعتمادترین ایستگاه هواشناسی دریافت شد. میزان تابش روزانه نور خورشید با استفاده از مدل آنگستروم و داده‌های ساعات آفتابی محاسبه گردید. میانگین ماهانه اطلاعات مذکور برای دوره رشد برنج در سال زراعی مورد آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است.

شامل مدل ساده و پیشرفته است که در پژوهش حاضر با توجه به پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده که شامل تبخیر، تعرق گیاه مرجع، ارتفاع گیاه، عمق توسعه ریشه، شاخص سطح برگ و ضریب واکنش عملکرد طی دوره رشد بود از مدل ساده استفاده شد.

داده‌های هواشناسی منطقه نیز شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه، درصد رطوبت نسبی، میانگین فشار بخار، بارندگی

جدول ۲- میانگین داده‌های هواشناسی برای دوره رشد برنج در منطقه مورد مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۶

Table 2 Average meteorological data for rice growth period in the study area in seasonal year of 2017

ET <sub>0</sub>	Rain	Average Wind	RH Max	RH Min	T <sub>Max</sub>	T <sub>Min</sub>	Rs (radiation)	Month
mm	m/s	%			°C	KJ/m <sup>2</sup> /day		
3.44	18.6	2.30	93.03	56.97	28.28	18.79	19860.71	Khordad
3.51	13.8	2.00	93.74	53.87	31.16	20.67	19857.74	Tir
4.52	0.00	2.40	90.08	46.72	33.87	21.76	21358.36	Mordad

دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه با توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری می‌باشد. در این پژوهش تلاش شد تا از تصاویر با کم‌ترین پوشش ابر استفاده شود و در نتیجه برخی تصاویر دانلود شده در بازه زمانی مرحله رشد گیاه که دارای پوشش ابر بر روی مزارع تحقیقاتی بودند، حذف شده و پردازش بر روی تصاویر باقی مانده (جدول ۳) انجام شد.

## ۲-۴- استخراج شاخص‌های گیاهی از تصاویر

### ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر به منظور بررسی کاربرد داده‌های ماهواره‌ای در برآورد عملکرد اجزای برنج و نیز استخراج معادله‌های رگرسیونی، از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ و ماهواره لندست ۷ و ۸ استفاده شد. ماهواره سنتینل ۲ با دوره بازگشت ۵ روزه

جدول ۳- تاریخ نمونه برداری و تصاویر دانلود شده برای شالیزارهای مورد مطالعه

Table 3 Date of downloaded satellite images and plant sampling for studied paddy field

Plant growth stage	Sensor	Satellite	Date of satellite imagery	Plant sampling date
Vegetative			-	May 22, 2017
vegetative	ETM <sup>+</sup>	Landsat7	May 28, 2017	-
vegetative			-	June 3, 2017
reproductive			-	June 18, 2017
reproductive	MSI	Sentinel2A	June 25, 2017	June 25, 2017
reproductive	MSI	Sentinel2B	June 30, 2017	-
reproductive			-	July 2, 2017
reproductive			-	July 9, 2017
reproductive	MSI	Sentinel2A	July 15, 2017	-
reproductive			-	July 16, 2017
reproductive	OLI	Landsat8	July 23, 2017	July 23, 2017
Ripening			-	July 30, 2017
Ripening	MSI	Sentinel2A	August 4, 2017	-
Ripening			-	August 6, 2017
Ripening	OLI	Landsat8	August 8, 2017	-
Ripening			-	August 12, 2017

$$nRSME = \frac{100 \times (\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2)^{0.5}}{n \bar{O}} \quad (۴)$$

$$RSME = (\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n})^{0.5} \quad (۵)$$

$$EF = (\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}) \quad (۶)$$

که، در آنها  $p_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده،  $n$  تعداد نمونه‌ها و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

### ۳- یافته‌ها و بحث

#### ۳-۱- ارزیابی عملکرد اجزای برنج با استفاده از مدل

پژوهش حاضر به منظور تعیین عملکرد برنج و اجزای آن طی مراحل چندگانه رشد (رویشی، زایشی و رسیدگی) و شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل SWAP انجام شد. ارائه معادلات مناسب جهت برآورد عملکرد برنج با استفاده از شاخص‌های گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای و مقایسه کارایی این روش‌ها برای استفاده بهینه از منابع آب و خاک از اهداف دیگر پژوهش بود. عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده اندام‌های مختلف گیاه برنج شامل کاه، شلتوک و زیست‌توده در شالیزارهای مورد مطالعه به صورت مقایسه‌ای در شکل (۲) ارائه شده است. پس از استقرار نشا گیاه برنج در شالیزار و در مرحله رشد رویشی، با رشد گیاه، عملکرد ساقه و برگ گیاه (عملکرد کاه) افزایش یافته و سرعت این افزایش با پایان دوره زایشی (گلدهی) کاهش یافته است. نتایج پژوهش Machado et al. (2002) نیز بیانگر آن بود که پس از گل‌دهی برنج، پیر شدن کانوبی گیاه، کاهش اسیمیلاسیون (تجمع ماده خشک در واحد سطح برگ گیاه) و زرد شدن برگ‌ها سبب می‌شود تا طی پدیده انتقال مجدد، برگ و ساقه به عنوان مبدأ ثانویه عمل کرده و مواد ذخیره شده در اندام‌ها و بافت‌های خود را به اندام‌های ذخیره‌ای گیاه مانند

پیش‌پردازش تصاویر سنتینل ۲ در محیط نرم‌افزار QGIS 2.18.27 و اصلاحات مربوط به تصاویر لندست ۷ و ۸ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. شاخص‌های گیاهی NDVI و SAVI با استفاده از روابط (۱) و (۲) از تصاویر موجود استخراج و معادله‌های رگرسیونی به تفکیک هر دوره و در نهایت برای کل دوره رشد ارائه شد.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (۱)$$

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \times (1 + L) \quad (۲)$$

که،  $R$  و  $NIR$  به ترتیب مقادیر مربوط به باند قرمز و مادون‌قرمز نزدیک است.  $L$  ضریب فاکتور تصحیح اثرات زمینه خاک بوده که در این پژوهش از مقادیر واسنجی شده Rezaei (2015) (در مرحله رویشی برابر ۰/۲، در مرحله زایشی برابر ۰/۱ و در مرحله رسیدگی برابر ۰/۳) استفاده شد.

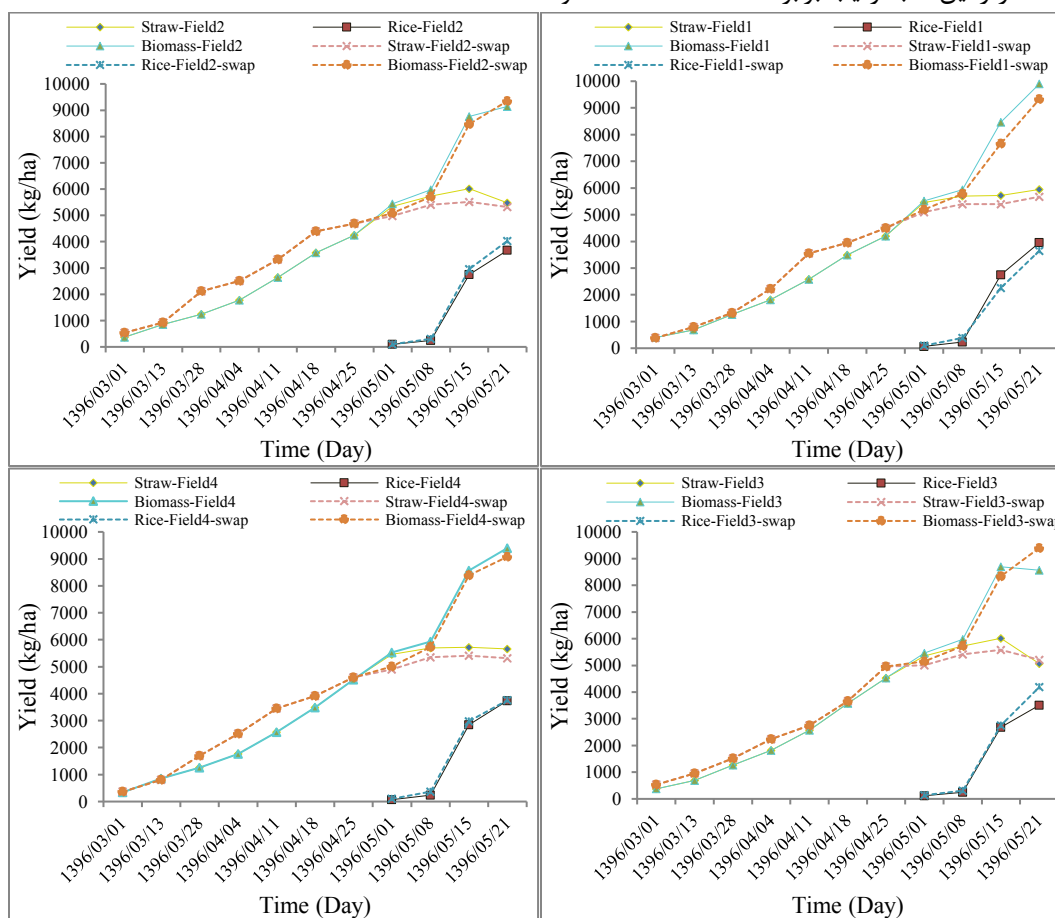
#### ۲-۵- ارزیابی مدل

به منظور واسنجی مدل SWAP از مدل غیرخطی تخمین پارامتر PEST استفاده شد که به مدل SWAP لینک شد. با استفاده از یک تخمین اولیه از پارامترهای حساس شامل شاخص سطح برگ در مرحله جوانه‌زنی، ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی، راندمان مصرف نور EFF و حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکسید کربن که مدل به آنها حساسیت نشان داده و نیز بر روی رشد گیاه تأثیر بسزایی دارد، مدل کالیبره شد و سپس با مشاهدات صحرائی پارامتر عملکرد محصول برنج مقایسه گردید. به منظور ارزیابی دقت مدل از آماره‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده یا درصد خطا (nRMSE)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و کارایی مدل (EF) استفاده شد. بیان ریاضی آماره‌های فوق به صورت روابط (۳) تا (۷) بیان می‌شوند (Asadi Kapourchal et al. 2013; Zare (Abyaneh et al. 2011).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \right]^2 \quad (۳)$$

شلتوک منتقل کنند. نتیجه این امر عدم افزایش عملکرد کاه در گیاه است. در انتهای دوره زایشی برنج (دوره گل‌دهی)، شلتوک در گیاه ظاهر می‌شود. روند افزایشی عملکرد شلتوک در ابتدای ظهور آن، به آرامی انجام می‌گیرد و در دوره انتهای رسیدگی و زمان برداشت محصول، به حداکثر میزان خود می‌رسد. هرچند تنها بخشی از زیست‌توده به‌عنوان محصول تولیدشده برداشت می‌شود، لیکن تمامی اجزا برای اختصاص ماده خشک جدید مهم هستند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در مرحله نهایی رشد، تنها وزن اندام ذخیره-ای (شلتوک)، با سرعت زیاد افزایش می‌یابد. عملکرد کاه، زیست‌توده و شلتوک نهایی در زمان برداشت محصول در زمین ۱ به ترتیب برابر ۵۹۴۷/۳۳، ۹۹۰۱/۸۷ و ۹۹۴۳/۶۷ kg/ha، در زمین ۲ به ترتیب برابر ۵۴۷۲/۳۳، ۸۱۷۵ و ۹۱۴۳/۶۷ kg/ha، در زمین ۳ به ترتیب برابر ۳۶۷۱/۰۹، ۴۱۵۱ و ۸۵۶۷/۷۳ kg/ha و در زمین ۴ به ترتیب برابر ۵۰۶۰/۳۳، ۴۰۲۴، ۵۶۶۰/۲۱ و ۹۴۰۲/۹۷ kg/ha اندازه‌گیری شدند. بر اساس مطالعات (Yaghouti et al. (2018) عملکرد شلتوک برنج رقم بومی، ۳۵۰۲ kg/ha و عملکرد رقم پرمحصول، ۴۶۴۹ kg/ha بوده است. همچنین عملکرد شلتوک برنج در ایران در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷، ۴۹۷۱ kg/ha و در استان گیلان در حدود ۴۹۷۱ kg/ha اندازه‌گیری شده است (Anonymous 2019). در مطالعه Ebrahimi rad et al. (2018) میزان میانگین عملکرد کاه، زیست‌توده و شلتوک، کاه و زیست‌توده برنج به میزان ۴۰۲۴، ۸۱۷۵ و ۴۱۵۱ kg/ha در زمان برداشت گزارش شد.

شلتوک منتقل کنند. نتیجه این امر عدم افزایش عملکرد کاه در گیاه است. در انتهای دوره زایشی برنج (دوره گل‌دهی)، شلتوک در گیاه ظاهر می‌شود. روند افزایشی عملکرد شلتوک در ابتدای ظهور آن، به آرامی انجام می‌گیرد و در دوره انتهای رسیدگی و زمان برداشت محصول، به حداکثر میزان خود می‌رسد. هرچند تنها بخشی از زیست‌توده به‌عنوان محصول تولیدشده برداشت می‌شود، لیکن تمامی اجزا برای اختصاص ماده خشک جدید مهم هستند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در مرحله نهایی رشد، تنها وزن اندام ذخیره-ای (شلتوک)، با سرعت زیاد افزایش می‌یابد. عملکرد کاه، زیست‌توده و شلتوک نهایی در زمان برداشت محصول در زمین ۱ به ترتیب برابر ۵۹۴۷/۳۳، ۹۹۰۱/۸۷ و ۹۹۴۳/۶۷ kg/ha، در زمین ۲ به ترتیب برابر ۵۴۷۲/۳۳، ۸۱۷۵ و ۹۱۴۳/۶۷



شکل ۲- عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شلتوک، کاه و زیست‌توده گیاه برنج  
 Fig. 2 Measured and simulated yield of paddy, straw and biomass of rice plant with



دوره خوشه‌زنی از تاریخ ۱ مرداد آغاز شده و مقادیر عملکرد کاه با زیست‌توده آن تا قبل از تاریخ ۱ مرداد با هم برابر بوده، مقدار زیست‌توده همان مقدار کاه در نظر گرفته می‌شود. نتایج ارزیابی متغیرهای آماری بیانگر ضریب همبستگی بالا ( $R^2 > 0.70$ )، درصد خطای کم ( $nRMSE < 10$ ) و کارایی بالا ( $EF > 0.90$ ) مقادیر عملکرد کاه، شلتوک و زیست‌توده شبیه‌سازی شده با مدل SWAP در مراحل مختلف رشد گیاه در شالیزارهای مورد مطالعه است. با توجه به اینکه دقت مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی به دقت داده‌های ورودی مدل مورد نظر بستگی دارد چنانچه داده‌های ورودی با دقت بالا اندازه‌گیری شود، نتایج شبیه‌سازی قابل اطمینان خواهد بود (Van Lier et al. 2015).

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) مدل SWAP روند رشد گیاه برنج را طی مراحل مختلف رشد به خوبی پیش‌بینی کرده است. عملکرد شبیه‌سازی شده کاه، زیست‌توده و شلتوک نهایی زمین ۱ به ترتیب برابر ۵۶۷۴، ۹۳۲۶ و ۴۰۳۲ kg/ha، زمین ۲ به ترتیب برابر ۵۳۱۹، ۹۳۵۱ و ۴۰۳۲ kg/ha، زمین ۳ به ترتیب برابر ۵۲۱۴، ۹۳۹۹ و ۴۱۸۵ kg/ha و زمین ۴ به ترتیب برابر ۵۳۲۱، ۹۰۸۰ و ۳۷۵۹ kg/ha به دست آمد.

### ۳-۲- دقت مدل

نتایج مقایسه متغیرهای آماری عملکرد کاه، شلتوک و زیست‌توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به اینکه

جدول ۴- مقایسه متغیرهای آماری عملکرد کاه، شلتوک و زیست‌توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP

Table 4 Comparison of statistical variables of measured straw, paddy and biomass yield with simulated values by SWAP model

R <sup>2</sup>	EF	nRMSE	RMSE	Equation	Grow Period	Yield
0.71	0.97	1.93	134.21	Straw = 0.959x + 115.8	Vegetative	
0.74	0.97	3.02	410.96	Straw = 0.818x + 919.97	Reproductive	Straw
0.72	0.93	2.13	385.98	Straw = 0.416x + 3032	Ripening	
0.82	0.99	2.16	471.21	Straw = 0.873x + 541.89	whole growth period	
0.78	0.9	2.75	111.25	Yld = 0.812x + 929.58	Reproductive	
0.83	0.97	3.05	307.44	Yld = 0.994x - 153.6	Ripening	Paddy
0.88	0.98	3.01	300.72	Yld = 0.924x + 449.27	whole growth period	
0.71	0.93	2.74	250.18	BM = 0.729x + 44.52	Reproductive	
0.76	0.87	6.54	470.43	BM = 1.001x + 87.43	Ripening	Biomass
0.79	0.96	4.55	425.37	BM = 1.017x + 36.05	whole growth period	

سبزینگی گیاه و در مرحله زایشی با مقادیر ۰/۷۴ و ۰/۶۵ به حداکثر مقدار خود رسیدند. در انتهای دوره زایشی (گلدهی گیاه) از مقدار شاخص‌های گیاهی کاسته شده است. با توجه به اینکه در دوره رسیدگی ظهور خوشه، کاهش سبزینگی و زرد شدن گیاه را به دنبال داشته و پس از کامل شدن مراحل خوشه‌دهی و در نهایت شکل‌گیری دانه‌ها که به سنگین شدن خوشه‌ها منجر می‌شود، گیاه حالت خوابیده به خود گرفته و دانه‌ها آب از دست می‌دهند. در این حالت ارتفاع و حجم گیاه کم شده و روند کاهش مقدار شاخص‌های گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای ادامه یافته است. روند نوسان‌های شاخص SAVI مانند شاخص NDVI بوده، با این

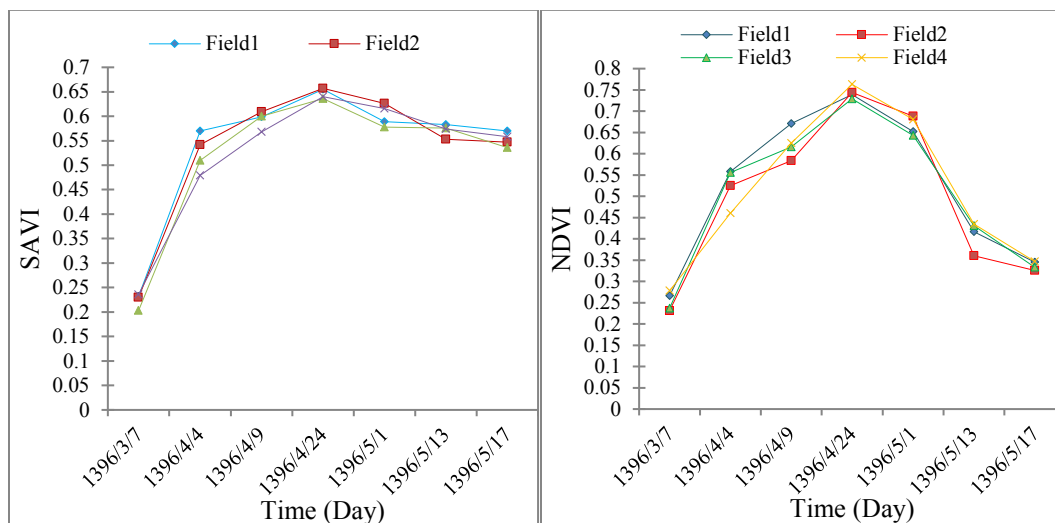
### ۳-۴- پیش‌بینی عملکرد اجزای برنج با استفاده از شاخص‌های گیاهی

مقادیر شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص تعدیل اثر خاک پوشش گیاهی (SAVI) استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای طی دوره رشد در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به اینکه در شروع دوره رشد، گیاه هنوز توسعه کامل نیافته و متابولیسم و تعداد پنجه و ارتفاع آن کم بوده و گیاه تمام سطح زمین را نپوشانده است، میانگین کمترین مقدار شاخص‌های گیاهی NDVI (۰/۲۵) و SAVI (۰/۲۳) طی دوره رشد در این مرحله از رشد اتفاق افتاده است. مقدار شاخص‌های NDVI و SAVI در مرحله‌ی رویشی با نمو و توسعه گیاه به سرعت افزایش یافته و در اوج

به‌طورمعمول بین ۰/۳ تا ۰/۶ و گاهی هم بیشتر است و هر چه به ۱+ نزدیک شود بر میزان پوشش گیاهی افزوده می‌شود. بر اساس مطالعات (Yaghouiti et al. (2018، در اوایل فصل رشد گیاه، مقدار بازتاب باند مادون قرمز و باند قرمز تا حدودی برابرند و با رشد گیاه مقدار بازتابش در باند مادون قرمز بیشتر از باند قرمز بوده و در منطقه با پوشش گیاهی، به تدریج با رشد گیاه، بر مقدار این شاخص در مراحل مختلف رشد افزوده شده و با خشک شدن گیاه مقدار آن کاهش یابد که نتایج پژوهش حاضر نیز با آن همخوانی دارد.

تفاوت که در دوره رسیدگی گیاه برنج، شاخص SAVI نسبت به شاخص NDVI کاهش کمتری داشته است.

ارزش عددی این شاخص‌ها بین اعداد ۱+ و ۱- متغیر است به‌طوری‌که مقدار ۰/۱ برای مناطق دارای پوشش تنک، مقدار ۰/۸ برای پوشش متراکم و ۰/۸ تا ۱ برای پوشش بسیار متراکم مانند جنگل متغیر است (Thenkabail et al. (2002. مطالعه (Serrano et al. (2000 بیانگر آن بود که شاخص پوشش گیاهی برای پوشش گیاهی متراکم



شکل ۳- مقادیر شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص تعدیل اثر خاک پوشش گیاهی (SAVI) شالیزارهای مورد مطالعه طی دوره رشد

Fig. 3 Normalized difference vegetation index (NDVI) and soil adjusted vegetation index (SAVI) values of the studied paddies during the grow period

Nuarsa و ۰/۵۱ Aliabadi et al. (2014) این مقدار را ۰/۹۲ et al. (2012) این ضریب را ۰/۹۲ به دست آوردند. (2018) Yaghouiti et al. اذعان داشتند که شاخص NDVI، در شرایطی که تنش آبی وجود نداشته باشد و تغییر پارامترهای اقلیمی از جمله دمای هوا و تابش خورشیدی زیاد نباشد، مناسب‌ترین شاخص برای برآورد عملکرد ارقام محلی و پرمحصول برنج در منطقه گیلان بوده و تفاوت معنی‌داری با عملکرد واقعی گیاه برنج ندارند. در مطالعه حاضر، با توجه به اینکه در دوره رویشی و زایشی، با افزایش عملکرد گیاه، شلتوک و زیست‌توده برنج، مقادیر شاخص‌های NDVI و SAVI نیز افزایش می‌یابند، استفاده از تصاویر دوره زایشی نتیجه بهتری در مقایسه با تصویر دوره رسیدگی برای برآورد

معدلات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای برای پیش‌بینی عملکرد شلتوک، کاه و زیست‌توده از شاخص‌های گیاهی NDVI و SAVI در جدول (۵) ارائه شده است. ضریب تبیین NDVI در مقایسه با SAVI در میزان عملکرد کاه، شلتوک و زیست‌توده در هر مرحله از رشد گیاه برنج، نشان‌دهنده همبستگی بهتر شاخص NDVI نسبت به SAVI بوده است. لیکن با این وجود، از هر دو شاخص استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان در شرایط عدم وجود داده‌های زمینی استفاده نمود. پژوهشگران زیادی، دقت برآورد عملکرد گیاه برنج را با تصاویر ماهواره‌ای بررسی نموده‌اند. Sarker and Nichol (2011) ضریب تبیین به دست آمده از شاخص NDVI به منظور تخمین بایومس پوشش گیاهی را ۰/۴۵

عملکرد اجزای برنج داشته است که با نتایج Chen and Bao et al. و Rezaei et al. (2014)، Yang (2005) (2009) همخوانی دارد.

جدول ۵- معادلات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای برای پیش‌بینی عملکرد شلتوک، کاه و زیست‌توده از شاخص‌های گیاهی  
Table 5 Extracted equations from satellite images for estimating yield of paddy, straw and biomass from vegetation indices

Yield	grow period	Vegetation indices			
		NDVI		SAVI	
		equation	R <sup>2</sup>	Equation	R <sup>2</sup>
Straw	vegetative	Straw = -24.172x + 576.88	0.52	Straw = 1707.9x + 186.05	0.52
	reproductive	Straw = 12553x - 4488	0.74	Straw = 18907x - 7654.2	0.68
	Ripening	Straw = 3216x + 4498.5	0.48	Straw = 13279x - 1762.6	0.42
	whole growth period	Straw = 2682.2x + 2370.2	0.67	Straw = 10193x - 1679.6	0.58
Paddy	reproductive	Yld = 3216x + 4498.5	0.81	Yld = -319.63x + 280.5	0.64
	Ripening	Yld = -9361.3x + 6739.7	0.65	Yld = -15324x + 11850	0.54
	whole growth period	Yld = -9361.3x + 6739.7	0.69	Yld = -47770x + 29678	0.62
Biomass	reproductive	BM = 12553x - 4488	0.76	BM = 18989x - 7680.4	0.68
	Ripening	BM = 3216x + 4498.5	0.51	BM = -2044.7x + 10088	0.49
	whole growth period	BM = -6145.3x + 11238	0.63	BM = 11850x - 1622.5	0.59

#### ۴- نتیجه‌گیری

۲- با وجود این‌که تعداد ورودی‌های مدل SWAP زیاد بوده و تأمین ورودی‌های لازم نیازمند اندازه‌گیری‌های میدانی است. لیکن با توجه به نتایج به‌دست‌آمده چنانچه پارامترهای ورودی مدل به نحو مطلوبی اندازه‌گیری شوند، نتایج حاصل از عملیات شبیه‌سازی، با دقت مطلوبی عملکرد را در سطح وسیع و به تفکیک مزرعه برآورد می‌کند.

۳- پیش‌بینی عملکرد اجزای گیاه برنج به‌وسیله معادلات استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای نیز از دقت بالایی برخوردار است به‌گونه‌ای که می‌توان از این معادلات در زمان‌هایی که داده‌های زمینی موجود نمی‌باشد، استفاده کرد.

۴- هرچند هر دو شاخص NDVI و SAVI به‌خوبی قادر به برآورد عملکرد اجزای برنج بودند لیکن شاخص NDVI از دقت بیشتری برخوردار بود.

پیش‌بینی عملکرد محصول یکی از اهداف کشاورزی پایدار در راستای استفاده بهینه از منابع آب و خاک است. پژوهش حاضر با هدف برآورد عملکرد برنج و اجزای آن طی مراحل چندگانه رشد با استفاده از مدل SWAP و نیز استفاده از شاخص‌های گیاهی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای انجام و نتایج زیر حاصل شد:

۱- مدل SWAP از قابلیت مناسبی در پیش‌بینی عملکرد اجزای گیاه برنج (عملکرد کاه، شلتوک و زیست‌توده) رقم هاشمی اصلاح‌شده برخوردار بوده و با توجه به اختلاف اندک بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده، می‌تواند عملکرد برنج را در منطقه مورد مطالعه با دقتی مناسب برآورد کند.

از نتایج این پژوهش می‌توان برای برآورد عملکرد محصول طی دوره رشد و پیش از برداشت محصول به‌ویژه در شرایط کمبود منابع آب استفاده کرد و پیشنهاد می‌شود از داده‌های ماهواره‌ای به‌منظور افزایش دقت مدل SWAP استفاده شود.

## References

- Aliabadi K., Entezari A. R. and Eskandari N. (2014). Estimation of physical parameters (biomass) of vegetation using remote sensing data. *J. Arid. Region. Geographic Studies.*, 4(15), 23-33 [In Persian].
- Anonymous. (2019). *Agricultural Statistics (Volume I – Crops)*. Ministry of Agriculture-Jahad. Available on: <https://www.maj.ir>. [In Persian].
- Asadi Kapourchal S., Homae M. and Pazira E. (2013). Modeling leaching requirement for desalinization of saline soils. *J. Water Soil Resour. Conserv.*, 2(2), 65-83 [In Persian].
- Bao Y., Gao, W. and Gao Z. (2009). Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolution. *Front Earth Sci.*, 3(1), 118-128.
- Chen R. K. and Yang C. M. (2005). Determining the optimal timing for using LAI and NDVI to predict rice yield. *J. Photogramm. Remot. Sens.*, 10(3), 239-254.
- Ebrahimi Rad H., Babazadeh H., Amiri E. and Sedghi H. (2018). Effect of irrigation management and planting density on yield and water productivity of rice (Hashemi Cultivar). *J. Wat. Res. Agr.*, 31(4), 625-636 [In Persian].
- Gee G. W. and Bauder J. W. (1986). Particle size analysis. In: Klute A (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, Agron, 2<sup>nd</sup> (ed.), Madison, WI, pp 404-408.
- Grossman R. and Reinsch B. T. G. (2002). Bulk Density. In: Dane J. H. and Topp G. C., *Methods of soil analysis. physical methods, soil science society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA, Part 4*.
- Kheirkhah Zarkesh M. M., Darvishi M., Abkar A. A. and Ahmadi G. R. (2014). Estimation of rice vegetation indices with multitemporal RADAR and optic images. *Physic. Geo. Res. Quart.*, 45(4), 85-96 [In Persian].
- Kunnath-Poovakka A., Ryu D., Renzullo L. J. and George B. (2016). The efficacy of calibrating hydrologic model using remotely sensed evapotranspiration and soil moisture for streamflow prediction. *J. Hydrol.*, 535, 509-524.
- Ma Y., Feng S., Huo Z. and Song X. (2011). Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Math. Comput. Model.*, 54(3-4), 1044-1052.
- Machado S. E. D., Bynum J., Archer T. L., Lascano R. J., Wilson L. T. Bordovsky J., Segarra E., Bronson K., Nesmith D. M. and Xu W. (2002). Spatial and temporal variability of corn growth and grain yield: Implication for sitespecific farming. *J. Crop Sci.*, 42, 1564-1576.
- Mohanty B. P. (2013). Soil hydraulic property estimation using remote sensing: a review. *Vadose Zone J.*, 12 (4), 1-9.
- Mousavi S. A. H., Egdernezhad A. and Gilani A. (2019). Yield and Water Use Efficiency Simulation of Different Rice Cultivars under Various Cultivation Methods Using AquaCrop and SWAP. *J. Wat. Manag. Agr.*, 6(1), 123-134 [In Persian].
- Nuarsa I. W., Nishio F. and Hongo C. (2012). Rice yield estimation using Landsat ETM+ data and field observation. *J. Agr. Sci.*, 4(3), 45-56.
- Page A. L., Miller R. H. and Keeney D. R. (1982): *Methods of soil analysis; 2. Chemical and microbiological properties, 2. Aufl. 1184 S., Am. Soc. Agronomy (Publ.), Madison, Wisconsin, USA*.

- Pettorelli N., Vik O., Mysterud A., Gaillard J. M., Tucker C. J. and Stenseth N. C. (2005). Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trend. Ecol Evol.*, 20(9), 503-510.
- Raeni-Sarjaz M. and Rostami A. (2016). Remotely sensed measurements of apple orchard actual evapotranspiration and plant coefficient using MODIS images and SEBAL algorithm (Case study: Ahar plain, Iran). *Scientific J. Agr. Meteorol.*, 4(1), 32-43 [In Persian].
- Rezaei M., Raeni Sarjaz ., Shahnazari A. and Vazifedoust M. (2014). Estimation of paddy field rice yield in the Sephidrud system using Landsat images (case study : Some Sara). *Iranian J. Irrig. Drain.*, 8(3), 591-601 [In Persian].
- Rezaei M. (2015). The effects of different irrigation applied water on water productivity at large scale using satellite data and DSSAT model assimilation. PhD dissertation, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. 168 pp. [In Persian].
- Rezaei M., Shahnazari A., Raeni sarjaz M. and Vazifedoust M. (2016). Improving agricultural management in a large-scale paddy field by using remotely sensing data in the CERES-Rice model. *Irrig. Drain.*, 65, 224-228.
- Sadooghi L., Homae M., Noroozi A. A. and Asadi Kapourchal S. (2016). Estimating rice yield using VSM model and satellite images in Guilan province. *Cereal Res.*, 6(3), 397- 410 [In Persian].
- Sarker R. L. and Nichol J. E. (2011). Improved Forest estimates using ALOS AVNIR- 2 Texture indices. *Remote Sens. Environ.*, 115(4), 968-977.
- Serrano L., Filella I. and Penuelas J. (2000). Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies. *Crop Sci.*, 40(3), 723-731.
- Siyal A. A., Dempewolf J. and Becker-Reshef I. (2015). Rice yield estimation using Landsat ETM+ Data. *J. Appl. Remot. Sens.*, 9, 1-16.
- Son N.T., Chen C.F., Chen C.R., Minh V.Q. and Trung N.H. (2014). A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agri. Forest Meteorol.*, 197, 52-64.
- Thenkabail P., Smith R. B. and Pauw E. D. (2002). Evaluation of narrow band and broad band vegetation indices for determining optimal hyperspectral wave bands for agricultural crop characterization. *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 68(6), 607-621.
- Van Lier Q. J., Wendroth O. and van Dam J. C. (2015). Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. *Agr. Wat. Manag.*, 154, 29-42.
- Walkly A. and Black J. A. (1934). An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Sci.*, 37, 29-38.
- Wei-guo L., Hua L. and Li-hua Z. (2011). Estimating Rice Yield by HJ-1A Satellite Images. *Rice Sci.*, 18(2), 142-147.
- Xie X. and Zhang D. (2010). Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter. *Adv. Water Resour.*, 33, 678-690.
- Yaghouti H., Pazira E., Amiri E. and Masihabadi M. H. (2018). Application of satellite imagery and remote sensing technology to estimate rice yield. *J. Water Soil Resour. Conserv.*, 7(3), 55-69 [In Persian].
- Zare Abyaneh H., Farokhi E., Vazifeh Doost M. and Azhdari K. (2011). Evaluation of the SWAP model to estimate the distribution pattern of soil moisture under

drip irrigation management. J. Water and Soil. 24(6), 1197-1209 [In Persian].

Zhou Y., Zhang Y., Vaze J., Lane P. and Xu S. (2013). Improving runoff estimates using remote sensing vegetation data for bushfire impacted catchments. Agr. Forest Meteorol., 182-183, 332-341.



# Simulation of Rice Yield and its Components Using SWAP Model and Remote Sensing Technology for Optimal Use of Water and Soil Resources

Hosein Pandi<sup>1</sup>, Safoora Asadi Kapourchal<sup>2\*</sup>, Majid Vazifedoust<sup>3</sup> and Mojtaba Rezaei<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M. Sc. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>2</sup>Assist. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>3</sup>Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>4</sup>Assist. Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran

\*Corresponding author: [safooraasadi@guilan.ac.ir](mailto:safooraasadi@guilan.ac.ir)

## Original Paper

Received: August 04, 2020

Revised: September 08, 2020

Accepted: September 14, 2020

## Abstract

Given the importance of soil and water resources in the development of sustainable agriculture, increasing world population and the growing need for crop production, predicting crop yields using plant simulation models and remote sensing technology is very crucial. The aim of this study was to estimate the yield of rice components including straw, paddy and biomass of Hashemi cultivar during different growth stages with SWAP model and to provide regression equations by extracting NDVI and SAVI plant indices from Sentinel-2 and Landsat-7 and 8 satellite images. It was done in the National Rice Research Institute. Comparison of statistical variables indicated that the mean values of coefficient of determination ( $R^2$ ) and model efficiency factor (EF) in estimating the yield of rice components in different stages of growth with SWAP model were more than 0.70 and 0.90, respectively, and with an error of 1.93 to 6.54% was equivalent to 134.21 to 470.43 kg/ha. The slight difference between the measured and simulated values showed that the SWAP model estimates the rice yield in the study area with appropriate accuracy. The results also showed that the extracted NDVI and SAVI indices with very good accuracy estimate the yield of rice components at different stages of growth. However, the highest amount of correlation was related to the reproductive development stage. Finally,  $R^2$  for NDVI at different growth stages as well as the entire growth period for straw, paddy, and biomass were higher than the SAVI index, revealing more accuracy of NDVI than SAVI.

**Keywords:** Biomass; Rice; Satellite Images; SWAP Model; Vegetation Indices.