

ارزیابی پتانسیل تولید و خلأ عملکرد برنج در ایران با استفاده از مدل SSM-iCrop2

صالح کرامت^{۱*}، بنیامین ترابی^۲، افشین سلطانی^۳ و ابراهیم زینلی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

چکیده

برنج در رژیم غذایی مردم ایران از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. برای تامین نیاز کشور لازم است تولید این محصول افزایش یابد که با توجه به محدودیت سطح زیر کشت، افزایش عملکرد در واحد سطح روش مناسب‌تری است. یکی از بهترین راه‌ها برای افزایش تولید، کاهش خلأ عملکرد می‌باشد. مطالعه حاضر با هدف برآورد خلأ عملکرد برنج در کشور در سال ۱۳۹۵ طراحی و اجرا شد. در این مطالعه، با استفاده از پروتکل اطلس جهانی خلأ عملکرد، مناطق اقلیمی و ایستگاه‌های هواشناسی مرجع تولید برنج در ایران تعیین شدند. ابتدا عملکرد واقعی برنج از آمارنامه کشاورزی کشور استخراج و سپس عملکرد پتانسیل در مناطق اصلی تولید این محصول با استفاده از مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop2 و داده‌های مربوط به آب و هوا، مدیریت و خاک برآورد شد. خلأ عملکرد از اختلاف بین عملکرد واقعی کشاورزان و عملکرد پتانسیل محاسبه شد. مقدار عملکرد واقعی برنج در مناطق اقلیمی اصلی تولید این محصول در کشور از ۳/۵ تا ۵/۲ تن در هکتار و عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده از ۶/۳ تا ۹/۵ تن در هکتار برآورد شد. بنابراین میزان خلأ عملکرد از ۲/۱ تا ۵/۱ تن در هکتار متغیر بود. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت کاهش خلأ عملکرد برنج، میزان تولید این محصول را می‌توان از ۲ میلیون و ۴۴۰ هزار تن به ۴ میلیون و ۱۰۳ هزار تن افزایش داد و بنابراین به خودکفایی در تامین برنج کشور دست یافت.

واژه‌های کلیدی: عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی، شبیه‌سازی

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳- استاد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

* نویسنده مسئول: saleh.keramat@gmail.com

مقدمه

دارد. Yp به‌عنوان عملکرد یک محصول سازگار با محیط که تحت مدیریت مطلوب آب و عناصر غذایی و بدون کاهش عملکرد در اثر تنش‌های زنده و غیرزنده رشد کند، تعریف می‌شود (Fischer, 2015). Yp را می‌توان به سه طریق محاسبه کرد: اولین روش از طریق شبیه‌سازی Yp به وسیله مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی است. روش دیگر اندازه‌گیری مستقیم عملکرد در مزارع آزمایشی کنترل شده و تحت نظارت متخصصین زراعت است و در این مزارع تقریباً هیچ‌گونه عوامل محدودکننده عملکرد وجود ندارد. در نهایت بیشترین عملکرد ثبت شده توسط کشاورزان هم می‌تواند به‌نحوه نشان‌دهنده Yp قابل حصول در منطقه باشد (Lobell *et al.*, 2009). در میان روش‌های تخمین Yp، مدل‌های شبیه‌سازی رشد، قوی‌ترین رویکرد را ارائه می‌دهند زیرا این مدل‌ها آثار متقابل ژنوتیپ، آب و هوا و مدیریت را بر عملکرد در مناطق زراعی و در سال‌های مختلف محاسبه می‌کنند (Van Ittersum *et al.*, 2013). بنابراین، با توجه به اهمیت تجزیه و تحلیل Yg در کشورهای در حال توسعه، پروژه بین‌المللی اطلس جهانی خلأ عملکرد (GYGA) با هدف ارزیابی و کاهش Yg و بررسی آثار تغییر اقلیم، کاربری اراضی و زیست‌محیطی کشاورزی مطرح شد.

از جمله روش‌های برآورد Yg روش مقایسه عملکرد کشاورزان نسبت به عملکردهای رکورد، آنالیز مقایسه کارکرد (CPA= Comparative Performance Analysis) و آنالیز خط مرزی (BLA= Boundary-Line Analysis) هستند. هر سه روش، برآورد دقیقی از Yg در سطح مزرعه، محلی و منطقه‌ای ارائه می‌دهند، اما نمی‌توان در سطوح وسیع‌تر (کشوری) از آن‌ها استفاده کرد. برای کاهش میزان خطا در تجزیه و تحلیل Yg در مقیاس بزرگ، می‌توان از پهنه‌بندی اگروکلیمایی برای پیش‌بینی Yp استفاده کرد. اخیراً برای تعیین Yg در مقیاس‌های وسیع از پروتکل گیگا (GYGA= Globe Yield Gap Atlas) استفاده می‌شود. در واقع، پروتکل گیگا برای پشتیبانی از مدل‌سازی محصول و تجزیه و تحلیل Yg در یک مکان خاص ارائه شده است (Grassini *et al.*, 2015). در پروتکل گیگا، اثرات آب و هوا، خاک، مدیریت زراعی از طریق مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی بر میزان تخمین Yg لحاظ می‌شود (Van Ittersum *et al.*, 2013). پروتکل گیگا بر اساس داده‌های محلی مشاهده شده و نتایج مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان

برنج یک محصول دانه‌ای مهم بعد از گندم است و بیشترین سطح زیرکشت غلات بعد از گندم را به خود اختصاص داده است. بیشترین سطح زیرکشت، متوسط عملکرد و تولید برنج در جهان در سال ۲۰۱۷ به دست آمد که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۱۶۷/۲ میلیون هکتار، ۴/۶ تن در هکتار و ۷۷۰ میلیون تن بود (FAO, 2019). این گیاه در محدوده وسیع جغرافیایی رشد می‌کند اما بیشترین تولید و مصرف آن به قاره آسیا اختصاص دارد (Chakravarthi and Naravaneni, 2006). در ایران، استان‌های گیلان و مازندران از مناطق مهم تولیدکننده برنج هستند و استان‌های خوزستان، گلستان و فارس در رده‌های بعدی قرار دارند. در سال ۲۰۱۵، سطح زیرکشت برنج در ایران ۵۹۶۰۳۵ هکتار و تولید آن ۲/۹ میلیون تن بود (Ministry of Jihad Agriculture, 2016). تأمین غذای کافی برای مردم یک چالش اساسی است، به‌ویژه اکنون که بهره‌برداری از منابع آب و زمین از مرزهای پایدار، فزاینده است (Soltani *et al.*, 2020). با توجه به کمبود مواد غذایی مردم جهان تا سال ۲۰۵۰، مسلماً بخش اعظم موضوع امنیت غذایی بر جنبه‌های تولید غذا متمرکز است. افزایش تولید همیشه یک استراتژی مهم برای کمک به کاهش ناامنی غذایی بوده است. افزایش تولید غذا با افزایش سطح زیرکشت و عملکرد امکان‌پذیر است (Grassini *et al.*, 2013). افزایش تولید با افزایش سطح زیرکشت ممکن است عواقب نامطلوبی برای محیط زیست داشته باشد، بنابراین افزایش عملکرد در واحد سطح گزینه مناسب‌تری است (Keating *et al.*, 2014). افزایش عملکرد در واحد سطح را می‌توان با افزایش خود عملکرد و یا با کاهش خلأ عملکرد (Yield gap) به دست آورد (Fischer *et al.*, 2014). تخمین خلأ عملکرد و عملکرد پتانسیل (Potential yield) برای برآورد پتانسیل تولید در زمین‌های زراعی موجود و شناسایی علل Yg و نهایتاً بستن Yg امری مهم است (Sadras *et al.*, 2015; Cui *et al.*, 2018; Agus, *et al.*, 2019).

برای یک مکان و سال خاص، Yg محصول به‌عنوان تفاوت بین Yp و متوسط عملکرد واقعی (Actual yield) تعیین می‌شود (Agus *et al.*, 2019). تجزیه و تحلیل Yg به شناسایی فرصت‌هایی برای بهبود عملکرد محصول و امنیت غذایی کمک می‌کند (Van Ittersum *et al.*, 2016). دقت پیش‌بینی Yg به خطای Yp و Ya بستگی

کشاورزی پایدار، اهداف مطالعه حاضر عبارت‌اند از: (۱) استفاده از مناطق اقلیمی (CZ=Climate Zone) و ایستگاه هواشناسی مرجع (RWS= Reference Weather Station) تولید برنج برای تخمین Y_g و Y_p در شرایط آبی، (۲) استفاده از پروتکل گیگا برای بزرگ مقیاس‌نمایی نتایج از محلی به منطقه‌ای، (۳) استفاده از داده‌های آب و هوایی ۱۵ ساله از جمله تشعشع خورشید، دما و بارش برای تجزیه و تحلیل Y_p در بین ایستگاه‌ها و (۴) شناسایی مناطق با بیشترین پتانسیل به‌منظور افزایش عملکرد برنج.

مواد و روش‌ها

برای برآورد Y_g ، از پروتکل توسعه یافته توسط گیگا پیروی شد که از یک چارچوب بزرگ مقیاس‌نمایی تخمین Y_g در سطوح بزرگ‌تر مانند CZ و مناطق و مقیاس‌های کشوری استفاده می‌کند (Grassini et al., 2015; Van Bussel et al., 2015).

اطلاعات مدیریت زراعی: اجرای مدل نیازمند

اطلاعات تیپیک مدیریت زراعی هر منطقه است. داده‌های مربوط به روش‌های مدیریت زراعی (به عنوان مثال تاریخ کاشت، ارقام و تراکم کاشت گیاه) برای سیستم‌های کشت در ایران موجود و یا در دسترس عموم نیست. از این رو، پرسش‌نامه‌ای در ارتباط با اطلاعات و شیوه‌های مدیریت محصول برای هر RWS برای تکمیل توسط منابع مختلف (مراکز تحقیقاتی استان‌ها، وزارت جهاد کشاورزی، کشاورزان با تجربه)، طراحی شد. اطلاعات مورد نیاز شامل تناوب‌های زراعی رایج، نوع خاک، تاریخ کاشت، نام رقم و طول دوره رشد آن، تراکم کاشت، عملکرد دانه، تاریخ برداشت، مدیریت کود دهی و آبیاری بود.

تعیین مناطق اقلیمی و ایستگاه‌های هواشناسی

مرجع: مناطق اقلیمی انتخابی (DCZ= Designated Climate Zone) بر اساس تفاوت واحدهای دمایی، جمعی، شاخص خشکی و دمای فصلی مشخص شدند. پروتکل GYGA بر اساس طرح پهنه‌بندی اقلیمی توسط ون‌وارت و همکاران (Van Wart et al., 2013) ساخته و به وسیله سه متغیر مشخص شده است: (۱) درجه روز رشد که تعیین کننده طول بالقوه فصل رشد محصول است، (۲) شاخص خشکی سالانه که تخمینی از تأمین آب است و به صورت نسبت بین بارندگی و تبخیر تفرق

زراعی، Y_g گیاهان زراعی در مقیاس محلی را برآورد و به مقیاس منطقه‌ای و ملی تعمیم می‌دهد. در این روش می‌توان حجم داده‌های مورد استفاده جهت تخمین Y_g را به حداقل رساند و همچنین از مناطق مناسبی که نماینده‌ای از کل کشور هستند، برای تخمین Y_g استفاده کرد (Van Wart et al., 2013). این پروتکل دارای انعطاف‌پذیری کافی است و طیف گسترده‌ای از داده‌های در دسترس و با کیفیت را برای تخمین Y_g مورد استفاده قرار می‌دهد (Grassini et al., 2015).

Y_g به‌طور گسترده در دهه گذشته و در سطوح مختلف تولید در جهان (Neuman et al., 2010; Boling et al., 2011; Laborte et al., 2012; Stuart Dadrasi et al., 2016; Deng et al., 2019) و ایران (et al., 2021; Nehbandani et al., 2021) مورد مطالعه قرار گرفته است. نیومن و همکاران، (Neuman et al., 2010) با بررسی Y_g جهانی گندم، برنج و ذرت، گزارش کردند که حداکثر Y_g جهانی این سه محصول به ترتیب برابر با ۰/۷۵، ۰/۴۴ و ۰/۸۴ تن در هکتار معادل ۴۳، ۴۷ و ۶۰ درصد است. در بررسی Y_g برنج با استفاده از پروتکل گیگا در چین میانگین Y_p و Y_a به ترتیب ۰/۸ و ۰/۸ تن در هکتار و در نتیجه Y_g سه تن در هکتار برآورد شد (Deng et al., 2019). نتایج برآورد Y_g برنج غرقابی در کشور چین نشان داد که عملکرد قابل حصول در شرایط بهینه مدیریتی ۵/۸ تن در هکتار و میزان Y_g شش تن در هکتار بود (Xu et al., 2016). سیلوا و همکاران (Silva et al., 2016) طی سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۲ در فیلیپین با استفاده از روش رگرسیون چندگانه به متوسط Y_g در حدود ۳/۲ تن در هکتار در فصل مرطوب و ۴/۸ تن در هکتار در فصل خشک در برنج، دست یافتند. در ایران با استفاده از مدل SSM-iCrop2 بر اساس پروتکل گیگا در استان گلستان، مقادیر Y_g و تولید سویا به ترتیب ۲/۴۴ تن در هکتار (۵۲ درصد) و ۱۱۸ هزار تن (۵۲ درصد) تخمین زده شد (Nehbandani et al., 2021). دادرسی و همکاران (Dadrasi et al., 2021) میزان Y_p و Y_g سیب‌زمینی در استان گلستان را با استفاده از مدل SSM-iCrop2 و پروتکل گیگا محاسبه و میانگین Y_p و Y_g را به ترتیب ۵۲ و ۳۳ تن در هکتار (معادل ۳۸ درصد) گزارش کردند.

بنابراین، با توجه به اهمیت بررسی Y_g گیاهان زراعی مهم در تأمین امنیت غذایی جامعه و نیل به اهداف

آبی) یا Yw (عملکرد پتانسیل در شرایط دیم) و تغییرپذیری آن‌ها مورد نیاز است (Grassini *et al.*, 2015). برای شرایط اقلیمی ایران، داده‌های هواشناسی شامل تابش خورشید، بارندگی و حداقل و حداکثر دما برای ایستگاه‌ها در CZ برای ۱۵ سال متوالی (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) به صورت روزانه و دارای کمتر از ۲۰ درصد داده از دست رفته برای هر متغیر از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد (جدول ۱). طبق پروتکل گیگا، در صورت عدم وجود داده‌های هواشناسی کافی در یک ایستگاه می‌توان از ایستگاه جایگزین (در همان اقلیم) که حاوی داده‌های هواشناسی طولانی مدت و صحیح است با عنوان ایستگاه فرضی (HYP) استفاده کرد.

داده‌های خاک: در ایران هیچ پایگاه داده محلی رقومی شده برای مدل‌سازی گیاهان زراعی وجود ندارد. بنابراین، اطلاعات خاک مورد استفاده برای اجرای مدل از موسسه بین‌المللی تحقیقات سیاست غذایی (IFPRI- Harvest Choice HC27) (Koo and Dimes, 2013) به‌دست آمد. اطلاعات مورد نیاز خاک شامل شاخص آلبیدوی خاک، ضریب زهکشی، حجم آب خاک در ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی و شرایط اشباع بود. پایگاه داده خاک HC27 که در مطالعه حاضر استفاده شد، دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتری است. اطلاعات مربوط به خاک‌های غالب در مناطق تولید کننده برنج در ایران در جدول ۲ ارائه شده است.

پتانسیل محاسبه می‌شود و (۳) دمای فصلی که بین اقلیم‌های معتدل و گرمسیری تمایز ایجاد می‌کند. انتخاب مناطق اقلیمی در دو مرحله و با هدف پوشش حداقل ۸۵ درصد از سطح زیر کشت برنج کشور انجام شد. ابتدا تمام مناطق اقلیمی با حداقل ۵ درصد سطح زیر کشت ملی انتخاب شدند. مناطقی که دارای کمتر از پنج درصد سطح زیر کشت ملی بودند نیز در صورت وجود ایستگاه هواشناسی مرجع، انتخاب می‌شدند. اگر پس از انتخاب در میان ایستگاه‌های هواشناسی درون DCZ هنوز پوشش کمتر از ۸۵ درصد باشد، در میان ایستگاه‌های هواشناسی واقع در سایر مناطق اقلیمی با کمتر از پنج و بیشتر از یک درصد از سطح زیر کشت محصول ملی انتخاب شد. در نهایت، ۱۴ منطقه اقلیمی با استفاده از این طرح پهنه‌بندی اقلیمی در ایران مشخص شد که شامل ۸۷ درصد از مناطق تولید برنج در ایران هستند. برای هر منطقه اقلیمی-زراعی، یک یا چند ایستگاه هواشناسی پس از مشورت با محققان برنج در هر استان برای اطمینان از نماینده بودن ایستگاه در مناطق تولید برنج انتخاب و از بین این ایستگاه‌ها، ۲۱ ایستگاه هواشناسی مرجع انتخاب شد. اطلاعات مربوط به مناطق اقلیمی و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های هواشناسی: با توجه به اینکه بسته به تأمین آب، داده‌های هواشناسی روزانه ۱۰ (در محیط‌های آبی یا دیمی پرآب) تا ۲۰ ساله (در محیط‌های دیمی کم آب) برای شبیه‌سازی‌های قابل اعتماد Yp (Yp) در شرایط

جدول ۱- مناطق اقلیمی انتخابی بر اساس پهنه‌بندی به روش گیگا. سطح زیر کشت ملی برنج ۵۵۹۶۳۲ هکتار است.

Table 1. Designated climate zones based on GYGA method. National rice crop area is 559632 ha.

Designated climate zone	Number of station	Station in designated climate zone	Area in climate zone (ha)	Ratio of rice lands from national rice lands
8003	2	Safiabad, Dezful, Ahvaz	50179	8
8002	1	Abadan	5948	1
6602	1	Rostamrood (HYP)	24691	4
6502	1	Gharakhil-Ghaemshahr	92306	16
6402	1	Sari	30835	6
6302	1	Pashakola	15122	3
6202	2	Gorgan office, Bandar-Amirabad	12226	2
6102	1	Hashemabad	24394	4
6002	2	Zatghan, Gonbad	22839	4
5902	1	Bandar-Anzali	22129	4
5802	2	Rasht, Talesh	126161	23
5702	1	Ramsar	14968	3
5003	1	Shahrekord	16935	3
5002	4	Takhte Jamshid, Polsefid, Droodzan, Minoodasht	32118	6
Sum	21	-	490850	87

جدول ۲- خاک‌های غالب در مناطق تولید برنج در ایران بر اساس انتخاب سطح برداشت IFPRI (Koo and Dimes, 2013)
 Table 2. Major soils in rice production areas of Iran based on IFPRI harvest choice (Koo and Dimes, 2013)

Soil code [†]	DEP	OC	ALB	CN	DRAINF	SAT	DUL	LL
Silty clay MF25	25	0.7-1.2	0.11	78	0.03	0.756	0.677	0.517
Silty loam MF25	25	0.7-1.2	0.12	79	0.03	0.361	0.261	0.110
HC12-Clay HF25	25	>1.2	0.05	85	0.035	0.458	0.405	0.233
HC15-Clay MF25	25	0.7-1.2	0.05	85	0.035	0.458	0.405	0.233
HC18-Clay LF25	25	0-0.7	0.5	85	0.038	0.458	0.405	0.233
HC24-Loam MF25	25	0.7-1.2	0.1	75	0.035	0.41	0.307	0.180
HC27-Loam LF25	25	0-0.7	0.1	75	0.035	0.41	0.307	0.180

[†]: 12=clay, HF=high fertility, 25 cm depth; 15=clay, medium fertility, 25 cm depth; 18= clay, low fertility, 25 cm depth; 24=loam, medium fertility, 25 cm depth; 27=loam, low fertility, 25 cm depth.
 DEP, sampling depth (cm); OC, organic carbon (%); ALB, albedo; CN, curve number; DRAINF, drainage factor; SAT, saturation (mm.mm⁻¹); DUL, drained upper limit (mm.mm⁻¹); LL, drained lower limit (mm.mm⁻¹).

نتایج واسنجی مدل با RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۵۶ گرم در متر مربع، ۲۱ درصد و ۰/۸۰ نشان‌دهنده درستی پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی Yp برنج و نتایج ارزیابی مدل با RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۴۳ گرم در متر مربع، ۱۴ درصد و ۰/۷۷ نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی Yp برنج بود. در این مطالعه از ساختار مدل‌سازی SSM استفاده شد. ساختار مدل و روش‌های مورد نیاز برای واسنجی و ارزیابی مدل بر اساس مطالعات سلطانی و سینکلر (Soltani and Sinclair, 2011, 2012) بوده است.

پروتکل بزرگ مقیاس نمایی: به منظور تعمیم نتایج Yp، Ya و Yg تخمین زده شده از مقیاس ایستگاه به سطح کشور بر اساس رویکرد پایین به بالای پروتکل گیگا از روش وزن‌دهی به مساحت اراضی تحت پوشش هر RWS به CZ و در انتها به کل کشور استفاده شد. جزئیات اطلاعات و دلایل مفصل آن‌ها به صورت جداگانه در رابطه با مناطق اقلیمی، بزرگ مقیاس‌نمایی از ایستگاه هواشناسی به منطقه اقلیمی با اقلیم مشابه و مقیاس کشور با استفاده از میانگین وزنی منطقه‌ای و ضوابط و معیارها برای انتخاب داده‌ها منتشر شده و در دسترس می‌باشند (Van Wart et al., 2013; Van Bussel et al., 2015). در این مطالعه، برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel و برای تهیه نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استفاده شد.

داده‌های عملکرد و تولید واقعی: داده‌های عملکرد

و تولید واقعی موجود در طول دوره مورد مطالعه (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) برای هر یک از شهرستان‌هایی که با RWS همپوشانی داشتند، از آمارنامه‌های کشاورزی (Ministry of Jihad Agriculture, 2016) استخراج شد.

استفاده از مدل SSM-iCrop2 و برآورد خلاء عملکرد و تولید: Yg

برنج در ایران عبارت از تفاوت بین Ya یا عملکردهای رایج کشاورزان و Yp یا عملکرد محصول تحت شرایط مدیریت بهینه بدون محدودیت رطوبت و عناصر غذایی و عدم حضور آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز (Yg=Yp-Ya) است. در این پژوهش شبیه‌سازی عملکرد و تولید پتانسیل برنج با استفاده از مدل شبیه‌سازی گیاه SSM-iCrop2 انجام شد که توانایی آن در برآورد عملکردهای اندازه‌گیری شده تحت شرایط مدیریت مطلوب در هر یک از مناطق به‌طور موفقیت‌آمیزی اعتبارسنجی شده بود. در این راستا، ابتدا پارامترهای مربوط به فنولوژی، سطح برگ، تولید ماده خشک، عملکرد و روابط آب برآورد شد و سپس مدل با استفاده از یک سری داده‌های مستقل، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشی (داده‌های مربوط به رشد و تولید برنج از مقالات و گزارشات در مناطق مهم تحت کشت برنج کشور) استفاده شد. در واسنجی و ارزیابی مدل، مقادیر عملکرد و روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده آنها مقایسه شد. آماره‌های مورد بررسی در واسنجی و ارزیابی مدل شامل مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV) بودند.

نتایج و بحث

مدل SSM-iCrop2

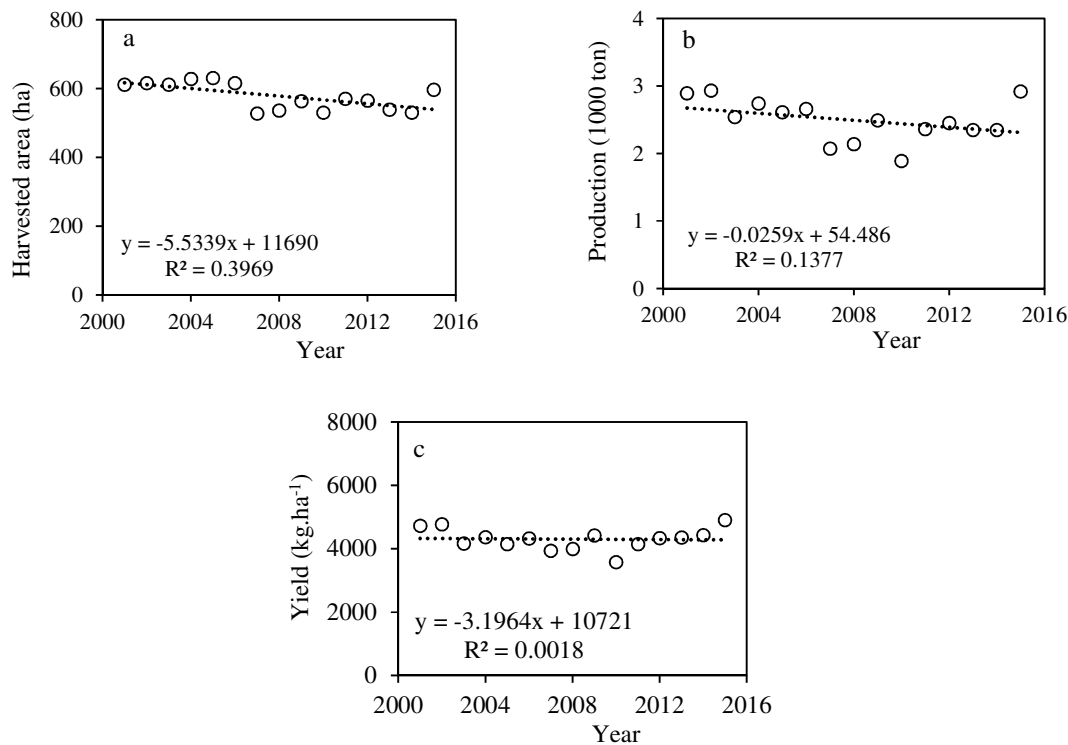
سطح زیر کشت، تولید و عملکرد واقعی

سطح زیر کشت، عملکرد و تولید واقعی برنج در ایران از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ روند ثابت و بدون تغییری را نشان می‌دهد. حداقل و حداکثر سطح زیر کشت سالانه، میانگین عملکرد و مجموع تولید واقعی برنج به ترتیب از ۵۲۷ تا ۶۳۱ هزار هکتار، ۳/۶ تا ۴/۹ تن در هکتار و ۱/۹ تا ۲/۹ میلیون تن متغیر است (شکل ۱). میانگین Ya تولید برنج در ایران در CZ برابر با ۴/۴ تن در هکتار و در دامنه ۶/۳ (منطقه اقلیمی ۸۰۰۲) تا ۹/۵ تن در هکتار (منطقه اقلیمی ۶۵۰۲) متغیر بود (شکل ۲). میانگین ۱۵ ساله Ya در RWS نیز ۴/۴ تن در هکتار و از ۳/۵ (در ایستگاه آبادان) تا ۵/۲ تن در هکتار (در ایستگاه قراخیل قائمشهر) متغیر بود (شکل ۳). تولید واقعی برنج در RWS از ۲۰/۸ (در ایستگاه آبادان) تا ۴۷۸/۹ هزار تن (در ایستگاه قراخیل قائمشهر) (جدول ۳) و در CZ از ۲۸/۱ (در منطقه اقلیمی ۸۰۰۲) تا ۴۷۹/۳ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۵۸۰۲) بود (جدول ۴). صرف نظر از تاثیر شرایط اقلیمی بر عملکرد،

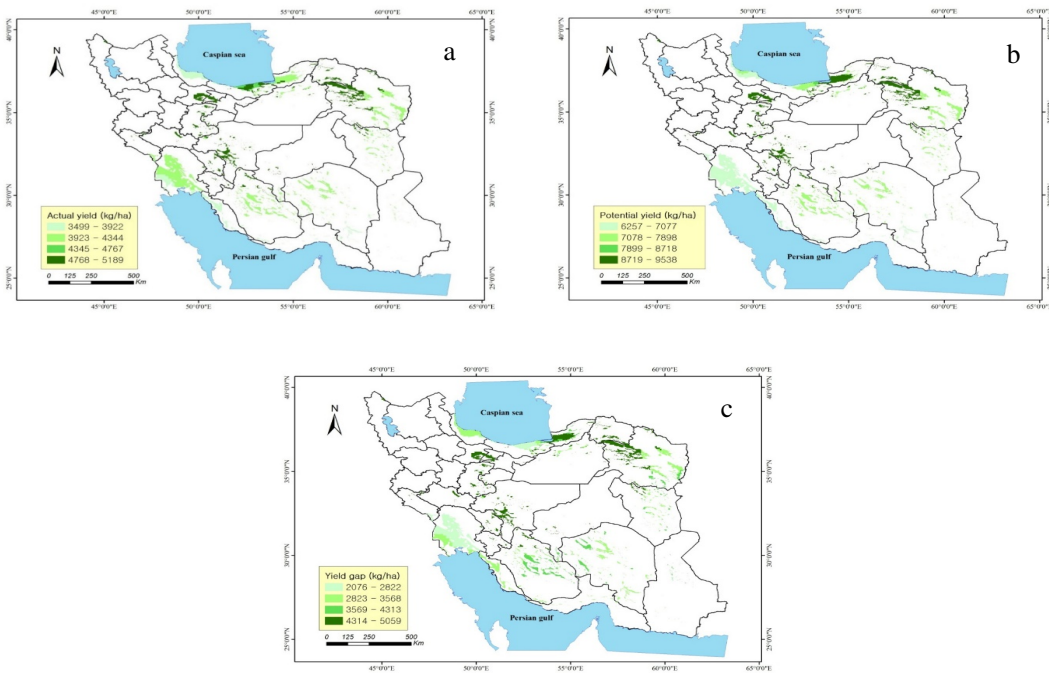
میزان Ya برنج در ایران به دلیل کشت ارقام محلی کم‌محصول، مدیریت ضعیف منابع، کاربرد روش‌های کشت سنتی و عدم کاربرد فناوری‌های نوین، به میزان قابل توجهی پایین است. نکته مهم این است که در ایران عمدتاً ارقام برنج ایرانی کم‌محصول کشت می‌شوند که عملکردهایی به مراتب کمتر از ارقام پرمحصول دارند اما به دلیل عطر، طعم و کیفیت پخت بالا، تقاضا و قیمت بالاتری دارند که از نظر اقتصادی برای کشاورزان مقرون به صرفه است.

تولید و عملکرد پتانسیل

نتایج شبیه‌سازی Yp نشان داد متوسط Yp برای کشور حدود ۷/۳ تن در هکتار است، این در حالی است که نوساناتی در مقدار آن بین ایستگاه‌های هواشناسی و نیز بین مناطق اقلیمی مختلف وجود دارد. Yp شبیه‌سازی شده در RWS، از ۶/۲ تن در هکتار در ایستگاه تالش تا ۹/۹ تن در هکتار در ایستگاه اداره گرگان متغیر بود (شکل ۳). مقدار این عملکرد برای CZ بین ۶/۳ تن در هکتار در منطقه اقلیمی ۵۷۰۲ تا ۹/۵ تن در هکتار در منطقه اقلیمی ۵۰۰۳ متغیر بود (شکل ۲).

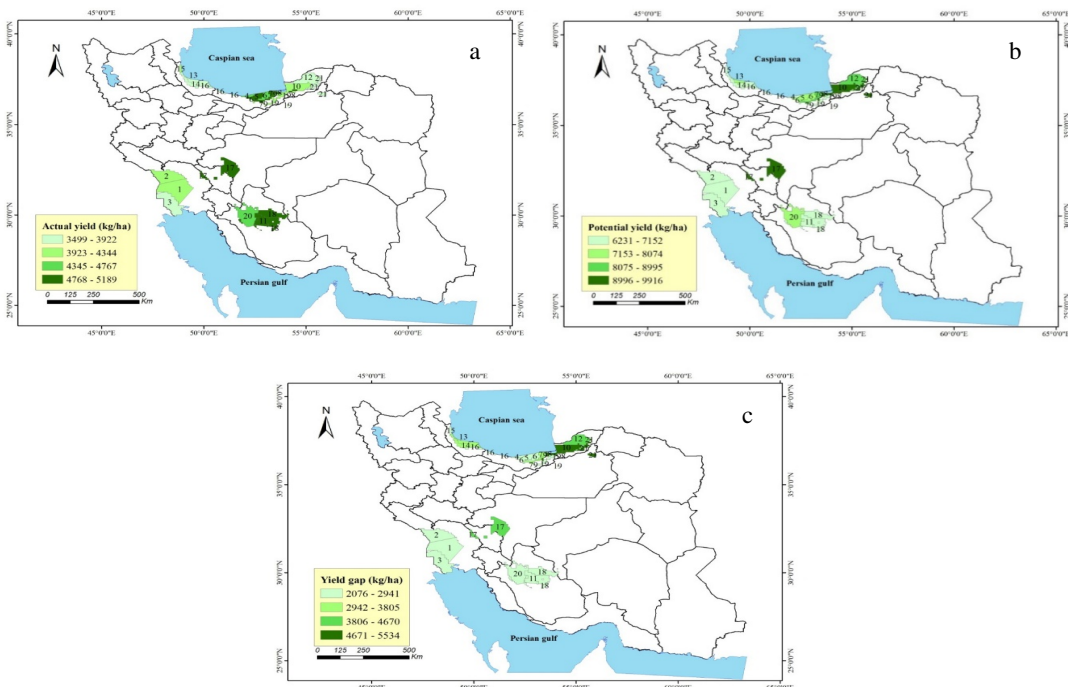


شکل ۱- سطح زیر کشت (a)، تولید (b) و عملکرد (c) برنج طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ (Ministry of Jihad Agriculture, 2016).
Figure 1. Harvested area (a), production (b) and yield (c) of rice in Iran during 2001-2015 (Ministry of Jihad Agriculture, 2016).



شکل ۲- (a) Ya، (b) Yp و (c) Yg (کیلوگرم در هکتار) در مناطق اقلیمی اصلی تولید کننده برنج در ایران. عملکرد واقعی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ از آمارنامه کشاورزی (Ministry of Jihad Agriculture, 2016) به‌دست آمد.

Figure 2. Ya (a), Yp (b) and Yg (c) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) of rice in main climatic zones in Iran. Actual yield during 2001-2015 was obtained from agricultural statistics (Ministry of Jihad Agriculture, 2016).



شکل ۳- (a) Ya، (b) Yp و (c) Yg (کیلوگرم در هکتار) در مناطق RWS اصلی تولید کننده برنج در ایران. عملکرد واقعی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ از آمارنامه کشاورزی (Ministry of Jihad Agriculture, 2016) به‌دست آمد.

Figure 3. Ya (a), Yp (b) and Yg (c) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) of rice in main RWS zones in Iran. Actual yield during 2001-2015 was obtained from agricultural statistics (Ministry of Jihad Agriculture, 2016).

جدول ۳- تولید واقعی (P_a)، تولید پتانسیل (P_p) و خلأ تولید (P_g) برنج در RWS در ایران. Y_p با ۱۴ درصد رطوبت به وسیله مدل SSM-iCrop2 شبیه‌سازی و Y_a طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ با استفاده از عملکرد ثبت شده در آمارنامه کشاورزی (Ministry of Jihad Agriculture, 2016) محاسبه شد.

Table 3. Actual production (P_a), potential production (P_p) and production gap (P_g) of rice in RWS in Iran. Y_p with 14% moisture content was simulated by SSM-iCrop2 and Y_a was calculated using recorded production in agricultural statistics (Ministry of Jihad Agriculture, 2016) during 2001-2015.

CZ	RWS	P_a (ton)	P_p (ton)	P_g (ton)
8003	Ahwaz	118526	188532	70006
8003	Dezful (Safiabad)	69679	115414	45735
8002	Abadan	20813	37607	16794
6602	Rostamrood (HYP)	112750	171051	58301
6502	Gharakhil, Ghaemshahr	478945	670613	191669
6402	Sari	145406	225134	79727
6302	Pashakola	77131	124573	47442
6202	Gorgan office	26693	51801	25109
6202	Bandar Amirabad	34617	60165	25548
6102	Hashemabad	97556	212267	114711
6002	Zarghan	42152	62133	19981
6002	Gonbad	45958	103908	57950
5902	Bandar Anzali	74758	145245	70487
5802	Rasht	442185	804402	362218
5802	Talesh	37068	57921	20853
5702	Ramsar	41885	69291	27406
5003	Shahrekord	27271	50196	22925
5002	Takhte Jamshid	34337	49374	15037
5002	Polsefid	22765	35223	12458
5002	Droodzan	32717	52315	19598
5002	Minoodasht	35206	87605	52399

جدول ۴- تولید واقعی (P_a)، تولید پتانسیل (P_p) و خلأ تولید (P_g) در مناطق اقلیمی اصلی تولید برنج در ایران. Y_p با ۱۴ درصد رطوبت به وسیله مدل SSM-iCrop2 شبیه‌سازی و Y_a با استفاده از آمارنامه کشاورزی (Ministry of Jihad Agriculture, 2016) طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ محاسبه شد.

Table 4. Actual production (P_a), potential production (P_p) and production gap (P_g) of rice in main production climatic zones in Iran. Y_p with 14% moisture content was simulated by SSM-iCrop2 and Y_a was calculated using recorded production in agricultural statistics during 2001-2015 (Ministry of Jihad Agriculture, 2016).

CZ	RWS	P_a (ton)	P_p (ton)	P_g (ton)
8003	Ahwaz, Dezful (Safiabad)	203693	330828	127135
8002	Abadan	28106	50783	22678
6602	Rostamrood (HYP)	112750	171051	58301
6502	Gharakhil, Ghaemshahr	478945	670613	191669
6402	Sari	145406	225134	79727
6302	Pashakola	77131	124573	47442
6202	Gorgan office, Bandar Amirabad	61310	111966	50656
6102	Hashemabad	104961	228380	123418
6002	Zarghan, Gonbad	93550	176292	82742
5902	Bandar Anzali	81687	158707	77020
5802	Rasht, Talesh	479252	862324	383071
5702	Ramsar	56609	93648	37039
5003	Shahrekord	87751	161518	73766
5002	Takhte Jamshid, Polsefid, Droodzan, Minoodasht	138063	247929	109866
National estimate/	-	2440017	4102706	1662690

ایستگاه‌های آبادان، اهواز و دزفول، به‌دلیل TMAX و TMIN بالا، کارایی استفاده از تشعشع پایین‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارند. با توجه به این که TMIN معمولاً در شب بروز می‌کند، TMIN بالا در طول شب باعث افزایش تنفس و کاهش زیست توده و عملکرد می‌شود. همچنین، بندر انزلی، تالش و رامسر TMAX کمتر از حد مطلوب دارند (شکل ۴). در این ایستگاه‌ها برنج با اندکی محدودیت دمایی مواجه است. دماهای پایین به‌ویژه در اواخر فصل رشد برنج باعث طولانی‌تر شدن طول دوره رشد محصول و افزایش احتمال برخورد با تنش‌های انتهایی فصل می‌شود. در چنین شرایطی لازم است از ارقام زودرس پرمحصول استفاده شود. این موضوع بهره‌مندی مناسب از تشعشع در طول فصل برای افزایش عملکرد را کاهش می‌دهد. در این مواقع، افزایش RUE (کارایی استفاده از تشعشع) ممکن است تنها راه دستیابی به افزایش قابل توجه عملکرد در ارقام زودرس برنج باشد (Huang *et al.*, 2019). دمای بالا در طول دوره رشد زایشی تاثیر بیشتری بر Yp نشان داد (شکل ۷b). باید توجه داشت که شرایط آب و هوایی در زمان گلدهی نیز بسیار مهم است (Kamran *et al.*, 2014). به‌طور کلی گیاهان زراعی در مرحله گلدهی به دما حساسیت بیشتری دارند. از آنجا که حصول عملکرد مطلوب تابع تجمع ماده خشک در طول فصل رشد و زمان کافی برای انتقال مواد به دانه می‌باشد، بنابراین افزایش دما باعث کوتاه‌تر شدن زمان لازم برای تجمع ماده خشک و انتقال مجدد طول دوره پر شدن دانه شده و عملکرد کاهش خواهد یافت (Challinor *et al.*, 2005). تاثیر تشعشع خورشیدی بر Yp برنج در دوره رشد رویشی بیشتر از دوره رشد زایشی بود (شکل ۷c و d).

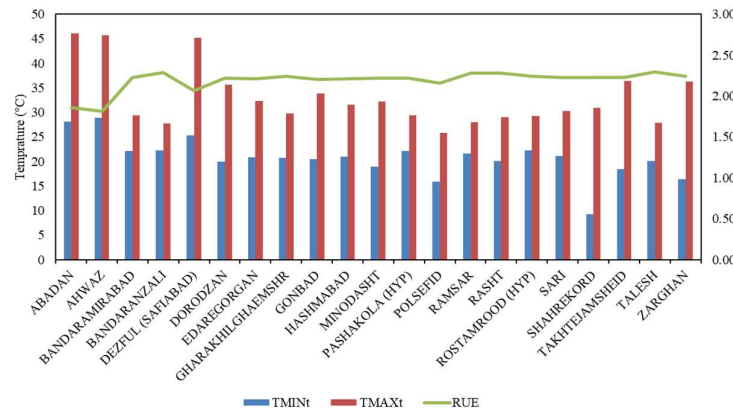
خلأ عملکرد و تولید پتانسیل

متوسط Yg در سطح کشور ۳/۰ تن در هکتار برآورد شد که این مقدار حدود ۴۱ درصد Yp بود. مقدار Yg بین RWS و نیز بین CZ متغیر بود. میزان Yg در RWS، از ۲/۱ تن در هکتار در ایستگاه هواشناسی قراخیل قائمشهر تا ۵/۵ تن در هکتار در ایستگاه هواشناسی مینودشت برآورد شد (شکل ۳c). این میزان در CZ گیاه برنج از ۲/۱ تا ۵/۱ تن در هکتار با کمترین مقدار در منطقه اقلیمی ۶۵۰۲ و بیشترین مقدار در منطقه اقلیمی ۶۱۰۲ متغیر بود (شکل ۳c). کمترین مقدار Yg در قراخیل قائمشهر به

نتایج نشان داد که مجموع تولید پتانسیل برنج در کشور حدود ۴ میلیون و ۷۷ هزار تن می‌باشد که مقدار آن بین RWS از ۳۵/۲ (در ایستگاه پل سفید) تا ۸۰۴/۴ هزار تن (در ایستگاه رشت) (جدول ۳) و در CZ تولید آن از ۵۰/۸ (در منطقه اقلیمی ۸۰۰۲) تا ۸۶۲/۳ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۵۸۰۲) متغیر بود (جدول ۴). برای هر مکان خاص Yp توسط سه عامل تشعشع خورشیدی، دما و تأمین آب تعیین می‌شود (Lobell *et al.*, 2009)، اما بر مبنای نتایج حاصل از تحقیق به‌نظر می‌رسد در ایران، نقش سایر عوامل مانند ارقام رایج نیز باید در نظر گرفته شود، بیشترین عامل تعیین کننده Yp، ارقام رایج در هر منطقه بود. رابطه بین Yp برنج با متوسط دماهای حداقل و حداکثر در طول فصل رشد معنی‌دار بود (شکل ۶a و b). بنابراین، پایین بودن Yp ایستگاه تالش در درجه اول به‌دلیل کشت رایج ارقام کم محصول با شاخص برداشت (HI) کم و بعد از آن، متوسط دمای پایین‌تر از دمای مطلوب برای رشد برنج یعنی ۳۰-۳۷ °C (Soltani and Sinclair, 2012) و تشعشع خورشیدی و تابع دمایی پایین می‌باشد. همچنین، پیش‌بینی Yp بالا برای ایستگاه اداره گرگان به‌دلیل کشت ارقام غالباً پرمحصول با شاخص برداشت بالا و TMAX در محدوده دمای مطلوب بود (شکل ۴ و جدول ۵). نقاط ابتدایی و انتهایی نمودارهای دما که خارج از محدوده مطلوب رشد هستند، عملکرد کمتری دارند (شکل ۶a و b). برنج محصولی است که در مناطق گرم و تشعشع زیاد رشد می‌کند اما در دماهای بیش از حد مطلوب، گیاه دچار تنش دمایی می‌شود و هزینه مقابله با تنش، مصرف انرژی اضافی و زیست توده است (Sharifi *et al.*, 2018). در حالی که، SRAD (تشعشع خورشیدی) بالا می‌تواند باعث افزایش سرعت رشد گیاه و Yp شود (Hubbart *et al.*, 2018; Nehbandani *et al.*, 2021). در مناطق اقلیمی تولید برنج در ایران، به علت تفاوت‌های نه چندان زیاد بین SRAD در ایستگاه‌های هواشناسی، این عامل اقلیمی اثر چندانی بر اختلاف Yp برنج در بین مناطق اقلیمی را نداشت (شکل ۶c). همچنین دمای بالا سبب کوتاه شدن طول دوره رشد محصول، عدم دریافت تشعشع کافی و نیز کاهش تولید ماده خشک و عملکرد می‌شود (Nehbandani *et al.*, 2021). این موضوع از طریق رابطه منفی و معنی‌دار بین دما و کارایی استفاده از تشعشع در شکل d۶ نشان داده شده است. بر این اساس،

شد که حدود ۴۲ درصد از پتانسیل تولید می‌باشد. در RWS میزان خلأ تولید پتانسیل از ۱۲/۵ (در ایستگاه پل سفید) تا ۳۶۲/۲ هزار تن (در ایستگاه رشت) (جدول ۳) و در CZ از ۲۲/۷ (در منطقه اقلیمی ۸۰۰۲) تا ۳۸۳/۱ هزار تن (در منطقه اقلیمی ۵۸۰۲) متغیر بود (جدول ۴).

Yp پایین (۷/۳ تن در هکتار) و Ya نسبتاً بالاتر (۵/۲ تن در هکتار) مرتبط بود. در مقابل، بیشترین مقدار Yg در مینودشت به دلیل Yp بالاتر (۹/۲ تن در هکتار) و Ya نسبتاً کم (۳/۷ تن در هکتار) به دست آمد (شکل ۵). خلأ تولید پتانسیل برنج در سطح کشور ۶۴/۶ هزار تن برآورد



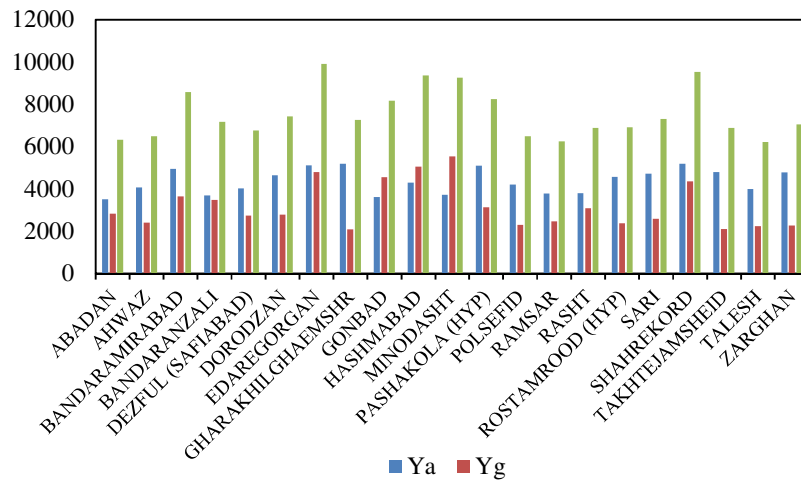
شکل ۴- حداکثر و حداقل دمای روزانه (TMAX و TMIN, °C) و کارایی استفاده از تشعشع (RUE, g.MJ⁻¹) در طول فصل رشد برنج مربوط به سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ در ایران

Figure 4. Maximum and minimum daily temperature (TMAX, TMIN, °C), and radiation use efficiency (RUE, g.MJ⁻¹) during rice growing season (2001-2015) for each reference weather station (RWS) in Iran

جدول ۵- خروجی شبیه‌سازی شده شاخص برداشت (HI)، تابع دمایی (Ft)، تشعشع خورشیدی (SRAD)، حداکثر شاخص سطح برگ (LAIMX) و درصد کشت ارقام رایج (L: کم محصول و H: پرمحصول) با استفاده از مدل SSM-iCrop2

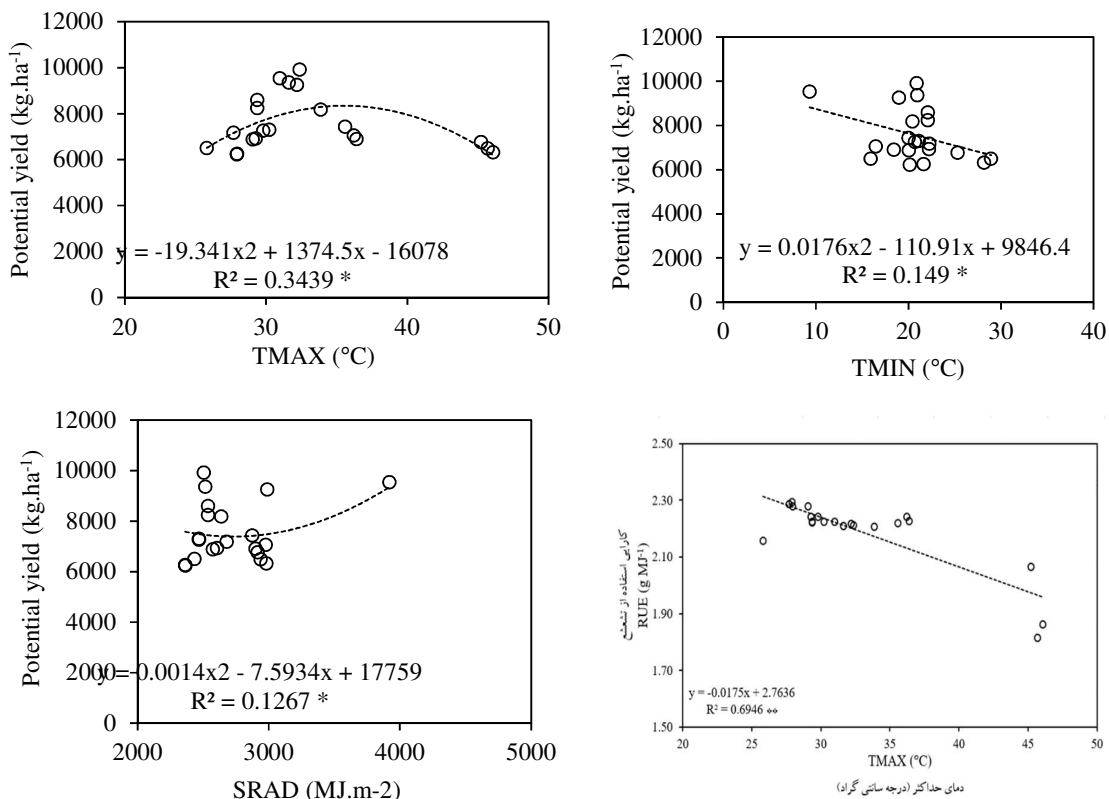
Table 5. Simulated output of harvest index (HI), temperature function (Ft), solar radiation (SRAD), maximum leaf area index (LAIMX) and planting percentage of common cultivars (L: low yield and H: high yield) using SSM-iCrop2 model

RWS	HI	Ft	SRAD	LAIMX	cultivation of common cultivars (%)	
					L	H
Gorgan office	0.36	0.44	2504	2.49	37	63
Shahrekord	0.30	0.51	3920	1.56	70	30
Hashemabad	0.34	0.43	2515	2.49	48	52
Minoodasht	0.29	0.47	2987	2.37	75	25
Bandar Amirabad	0.30	0.32	2536	2.38	71	29
Pashakola	0.36	0.33	2536	2.54	65	35
Gonbad	0.29	0.49	2637	2.35	75	25
Droodzan	0.27	0.56	2872	2.08	92	8
Sari	0.28	0.37	2468	2.32	82	18
Ggarakhil, Ghaemshahr	0.27	0.36	2468	2.34	85	15
Bandar Anzali	0.26	0.21	2679	2.25	97	3
Zarghan	0.25	0.60	2977	2.05	100	0
Rostamrood (HYP)	0.26	0.31	2605	2.24	97	3
Takhte Jamshid	0.25	0.58	2899	2.05	99	1
Rasht	0.25	0.33	2574	2.27	99	1
Dezful (Safiabad)	0.26	0.63	2914	2.02	95	5
Polsefid	0.28	0.31	2433	2.06	84	16
Ahwaz	0.27	0.57	2938	2.04	88	12
Abadan	0.26	0.59	2981	2.01	95	5
Ramsar	0.25	0.24	2363	2.27	99	1
Talesh	0.25	0.26	2364	2.27	100	0
Correlation coefficient	-	-	-	-	-0.9	0.9

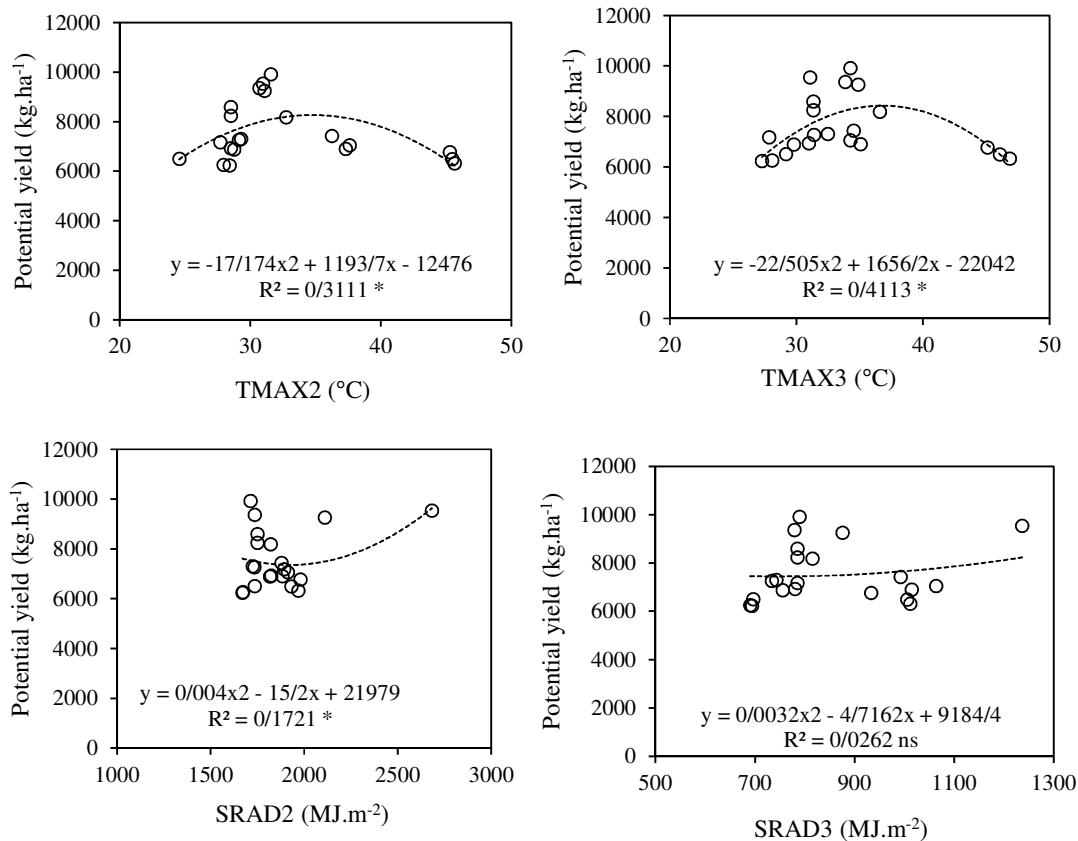


شکل ۵- متوسط Y_p , Y_g و Y_a برنج ($kg \cdot ha^{-1}$) از ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ در RWS در ایران

Figure 5. Rice average actual and potential yield and yield gap ($kg \cdot ha^{-1}$) during 2001-2015 for RWS in Iran



شکل ۶- رابطه بین حداکثر و حداقل دما ($TMAX$ و $TMIN$, $^{\circ}C$)، مجموع تشعشع خورشیدی ($SRAD$, $MJ \cdot m^{-2}$)، کارایی استفاده از تشعشع (RUE , $g \cdot MJ^{-1}$) و عملکرد پتانسیل ($kg \cdot ha^{-1}$)، طی فصل رشد برنج (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) مربوط به RWS در ایران
Figure 6. Relationship between maximum and minimum temperature ($TMAX$; $TMIN$, $^{\circ}C$), cumulative solar radiation ($SRAD$, $MJ \cdot m^{-2}$), radiation use efficiency (RUE , $g \cdot MJ^{-1}$) and potential yield ($g \cdot m^{-2}$), during the rice growing season (2001-2015) for each RWS in Iran



شکل ۷- رابطه بین عملکرد پتانسیل برنج (kg.ha^{-1}) با متوسط حداکثر دما (TMAX2 , $^{\circ}\text{C}$) و مجموع تشعشع خورشیدی از کاشت تا گلدهی و حداکثر دما (TMAX3 , $^{\circ}\text{C}$) و مجموع تشعشع خورشیدی (SRAD2 , MJ.m^{-2}) از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) مربوط به RWS در ایران

Figure 7. Relationship between rice potential yield (g.m^{-2}) and maximum temperature (TMAX2 , $^{\circ}\text{C}$) and cumulative solar radiation (SRAD2 , MJ.m^{-2}) from sowing to anthesis and average of maximum temperature (TMAX3 , $^{\circ}\text{C}$) and cumulative solar radiation (SRAD3 , MJ.m^{-2}) from anthesis to physiological maturity (2001-2015) for RWS in Iran

Y_g کاهش یابد، اگر هر چند خلأ بین متوسط عملکرد کشاورزان و Y_p اقلیمی را به دلیل عدم صرفه اقتصادی برای کشاورزان نمی‌توان به طور کامل کاهش داد (Laborte *et al.*, 2012). همچنین، Y_a هنگامی که به ۸۰ درصد از Y_p (به معنای سقف عملکرد قابل بهره‌برداری) می‌رسد، به دلیل کاهش بازده سرمایه‌گذاری و تلاش‌های اضافی برای تولید، رسیدن به سقف عملکرد، رضایت بخش نیست. از این رو، چشم انداز افزایش تولید برنج در هر مقیاس مکانی، به تفاوت Y_a با ۸۰ درصد Y_p پیش‌بینی شده در منطقه اقلیمی و مقیاس ملی متکی است (Deng *et al.*, 2019).

میزان Y_g در سیستم‌های تولید برنج کشورهای آسیایی، با استفاده از Y_p شبیه‌سازی شده به عنوان معیار، از ۹ تا ۷۱ درصد گزارش شده است (Stuart *et al.*, 2016). بنابراین، ایران در گروه کشورهای با Y_g بالای برنج قرار دارد که ضروری است اقدامات لازم در جهت کاهش این خلأ صورت پذیرد. در واقع، Y_g بالا به معنی اتلاف قابل توجه منابع و در تضاد با کشاورزی پایدار است، هرچند که از لحاظ اقتصادی در کوتاه مدت برای کشاورزان سود آور است. بسیاری از کشاورزان در کشورهای در حال توسعه هنوز برای امرار معاش، برنج کشت می‌کنند. بنابراین، برای افزایش تولید و اطمینان از دسترسی به غذا با قیمت‌های مقرون به صرفه، لازم است

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، از روش پروتکل GYGA همراه با مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی Yp برنج و Yg در ۲۱ RWS در شرایط آبی استفاده شد. به طور کلی میانگین Yp و Ya به ترتیب ۷/۳ و ۴/۴ تن در هکتار به دست آمد. بنابراین، میانگین Yg برنج در ایران، ۳/۰ تن در هکتار برآورد شد. سطح زیرکشت برنج در ایران حدود ۵۶۰ هزار هکتار است. منطقه اقلیمی ۵۸۰۲، با ۱۲۶ هزار هکتار، بیشترین سطح زیرکشت و منطقه ۸۰۰۲ با ۸ هزار هکتار، کمترین سطح زیرکشت برنج در ایران را داشتند. کشت برنج در مناطق شمالی کشور بیشتر از مناطق جنوبی بود و در بین استان‌های شمالی، استان مازندران بیشترین سطح زیرکشت را داشت. در مناطق شمالی کشور، بیشترین Yp در مازندران و بیشترین Yp در گلستان شبیه‌سازی شد. Yg برنج با استفاده از مدل SSM-iCrop2 در مناطق شمالی کشور بالاتر از مناطق جنوبی تخمین زده شد، که به دلیل بالا بودن Yp و در عین حال، پایین بودن Ya در این مناطق بود. در بین مناطق شمالی کشور، استان گلستان بیشترین Yg را نسبت به مازندران و گیلان داشت. میانگین حداکثر دما در مناطق جنوبی کشور (۴۲ درجه سانتی‌گراد) بالاتر از دمای مطلوب برای رشد بود و به همین دلیل، Ya و Yp در مناطق جنوبی کشور کمتر از مناطق شمالی بود. همچنین کشت ارقام کم‌محصول و زودرس در مناطق جنوبی کشور بیشتر از مناطق شمالی

بود. کشت ارقام کم‌محصول در برخی از مناطق کشور توجیه اقتصادی فراتر از تولید دارد. این ارقام به دلیل کیفیت دانه و قیمت بالا در بازار، کشت می‌شوند. بنابراین، ارزیابی ملی Yg می‌تواند به ما در بهبود تولید، امنیت غذایی و کاهش هزینه‌های غذا کمک کند.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسنده (گان) اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

- Agus, F., Andrade, J., Rattalino Edreira, J. I., Deng, N., Purwantomo, D. K. G., Agustiani, N., Aristya, V. E., Batubara, S. F., Herniwati, Hosang, E. Y., Krisnadi, L. Y., Makka, A., Samijan, Cenacchi, N., Wiebe, K. D. and Grassini, P. 2019. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia. *Field Crops Research* 237 (1): 12-22.
- Belder, P., Bouman, B. A. M., Cabangon, R., Lu, G., Quilang, E. J. P., Li, Y., Spiertz, J. H. J. and Tuong, T. P. 2004. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Management and Water Quality* 65 (3): 193-210.
- Boling, A. A., Bouman, B. A. M., Tuong, T. P., Konboon, Y. and Harnpichitvitay, D. 2011. Yield gap analysis and the effect of nitrogen and water on photoperiod-sensitive Jasmine rice in north-east Thailand. *NJAS -Wageningen Journal of Life Science* 58: 11-19.
- Bouman, B. A. M., Krop, M. J., Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., Ten Berge, H. F. M. and Van Laar, H. H. 2001. *Oryza 2000: Modelling lowland rice*. IRRI Books. International Rice Research Institute (IRRI), Wageningen University and Research Centre, Los Ban os, Philippines, Wageningen, Netherlands. 235 p. DOI: 10.22004/ag.econ.281825.
- Carracelas, G., Guilpart, N., Cassman, K., Grassini, P. and Zorrilla, G. 2016. Yield potential and yield gaps of irrigated rice in Uruguay and other rice producing countries. Available at: http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6559/1/Carracelas_Yield-potential-and-Yield-gaps-of-irrigated-rice-in-Uruguay-.pdf.

- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J. and Roel, A. 2019.** Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. **Agricultural Management and Water Quality** 222: 161-172.
- Chakravarthi, B. K. and Naravaneni, R. 2006.** SSR marker-based DNA fingerprinting and diversity study in rice (*Oryza sativa* L.). **African Journal of Mycology and Biotechnology** 5 (9): 684-688.
- Challinor, A. J., Wheeler, T. R. and Slingo, J. M. 2005.** Simulation of the impact of high temperature stress on the yield of an annual crop. **Agricultural and Forest Meteorology** 135: 180-189.
- Chen, Z., Li, P., Jiang, S., Chen, H., Wang, J. and Cao, C. 2021.** Evaluation of resource and energy utilization, environmental and economic benefits of rice water-saving irrigation technologies in a rice-wheat rotation system. **Science of the Total Environment** 757: 143748.
- Cui, Z., Zhang, H., Chen, X., Zhang, C., Ma, W., Huang, C., Zhang, W., Mi, G., Miao, Y., Li, X., Gao, Q., Yang, J., Wang, Z., Ye, Y., Guo, S., Lu, J., Huang, J., Lv, S., Sun, Y., Liu, Y., Peng, X., Ren, J., Li, S., Deng, X., Shi, X., Zhang, Q., Tang, L., Wei, C., Jia, L., Zhang, J., He, M., Tong, Y., Tang, Q., Zhong, X., Liu, Z., Cao, N., Kou, C., Ying, H., Yin, Y., Jiao, X., Zhang, Q., Fan, M., Jiang, R., Zhang, F. and Dou, Z. 2018.** Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. **Nature** 555: 363-366.
- Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A. and Zeinali, E. 2021.** Determination of potato (*Solanum tuberosum* L.) yield gap in Golestan province. **Agroecology** 12 (4): 613-633. (In Persian with English Abstract).
- Deng, N., Grassini, P., Yang, H., Huang, J., Cassman, K. G. and Peng, S. 2019.** Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. **Nature Communications** 10: 1725.
- Espe, M. B., Cassman, K. G., Cassman, H., Guilpart, N., Grassini, P., Van Wart, J., Anders, M., Beighley, D., Harrell, D., Linscombe, S., McKenzie, K., Mutters, R., Wilson, L. T. and Linqvist, B. A. 2016.** Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement Matthew. **Field Crops Research** 196: 276-283.
- FAO. 2019.** FAO statistics. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- Fischer, R. A. 2015.** Definitions and determination of crop yield gaps, and of rates of change. **Field Crops Research** 182: 9-18.
- Fischer, T., Byerlee, D. and Edmeades, G. O. 2014.** Crop yields and global food security: Will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia.
- Gorjizad, A., Soltani, A., Dastan, S. and Ajam Norouzi, H. 2019.** Evaluation of potential yield and yield gap associated with crop management in improved rice cultivars in Neka region. **Agroecology** 11 (1): 277-294. (In Persian with English Abstract).
- Grassini, P., Eskridge, K. M. and Cassman, K. G. 2013.** Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. **Nature Communications** 4: 2918.
- Grassini, P., van Bussel, L. G. J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M. K. and Gassman, K. G. 2015a.** How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research** 177: 49-63.
- Habib, E., Niknezhad, Y., Fallah, H., Dastan, S. and Barari Tari, D. 2019.** Estimation of yield gap of rice by comparative performance analysis (CPA) in Amol and Rasht regions. **Journal of Plant Productions** 42 (4): 551-562. (In Persian with English Abstract).
- Halalkhor, S., Dastan, S., Soltani, A. and Ajam Norouzi, H. 2018.** Documenting the process of rice production and gap yield associated with crop management in rice production. (Case study: Mazandaran province, Babol region). **Journal of Crops Improvement** 20 (2): 397-414. (In Persian with English Abstract).
- Harvest Choice. 2014.** Crop production: SPAM. International Food Policy Research Institute, Washington, DC., and University of Minnesota, St. Paul, M. N. Available online at: <http://harvestchoice.org/node/9716>.
- Huang, M., Fang, S., Shan, S. and Zou, Y. 2019.** Delayed transplanting reduced grain yield due to low temperature stress at anthesis in machine-transplanted late-season rice. **Experimental Agriculture** 55 (6): 843-848.

- Hubbart, S., Smillie, I. R., Heatley, M., Swarup, R., Foo, C. C., Zhao, L. and Murchie, E. H. 2018.** Enhanced thylakoid photoprotection can increase yield and canopy radiation use efficiency in rice. **Communicative and Integrative Biology** 1 (1): 1-12.
- Ishfaq, M., Akbar, N., Anjum, S. A. and Anwar-Ijl-Haq, M. 2020.** Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes. **Journal of Integrative Agriculture** 19 (11): 2656-2673.
- Ishikawa, S., Nakashima, T., Iizumi, T. and Hare, M. C. 2021.** Evaluating irrigated rice yields in Japan within the climate zonation scheme of the global yield gap atlas. **The Journal of Agricultural Science** 158 (8-9): 718-729.
- Kamran, A., Iqbal, M. and Spaner, D. 2014.** Flowering time in wheat (*Triticum aestivum* L.): A key factor for global adaptability. **Euphytica** 197: 1-26.
- Keating, B. A., Herrero, M., Carberry, P. S., Gardner, J. and Cole, M. B. 2014.** Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050. **Global Food Secur** 3: 125-132.
- Koo, J. and Dimes, J. 2013.** HC27 Generic Soil Profile Database. <http://hdl.handle.net/1902.1/20299>, Harvard Data Verse, V4.
- Laborte, A. G., de Bie, K., Smaling, E. M. A., Moya, P. F., Boling, A. A., van Ittersum, M. K. 2012.** Rice yields and yield gaps in southeast Asia: Past trends and future outlook. **European Journal of Agronomy** 36 (1): 9-20.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G. and Field, C. B. 2009.** Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environmental Resources** 34: 179-204.
- Ministry of Jihad Agriculture. 2016.** Agricultural statistics. Vol. 1: Crops. Statistics and Information Technology Office, Deputy of Planning and Economy, Ministry of Jihad Agriculture, Tehran, Iran. (In Persian).
- Momeni, R., Behbahani, M. R., Nazarifar, M. H. and Azadegan, B. 2011.** Evaluation of increasing water productivity scenarios for rainfed wheat by management analysis of cropsyst crop model in Karkheh Basin. **Water and Irrigation Management**. 1 (1): 29-40. (In Persian with English Abstract).
- Nehbandani, A., Soltani, A., Rahemi-Karizaki, A., Dadrasi, A. and Nourbakhsh, F. 2021.** Determination of soybean yield gap and potential production in Iran using modeling approach and GIS. **Journal of Integrative Agriculture** 20 (2): 395-407.
- Neumann, K., Verburg, P. H., Stehfest, E. and Müller, C. 2010.** The yield gap of global grain production: A spatial analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 103: 316-326.
- Pirdashti, H. and Aghaeipour, N. 2018.** Yield gap analysis of rice in relation to soil properties in Foumanat plain. **Crop Production** 10 (4): 159-172. (In Persian with English Abstract).
- Pirmoradian, N., Saadati, Z., Rezaei, M. and Khaledian, M. R. 2020.** Simulating water productivity of paddy rice under irrigation regimes using AquaCrop model in humid and semiarid regions of Iran. **Applied Water Science** 10 (7): 1-8.
- Rezvantab, N., Dastan, S. and Soltani, A. 2019.** Identification of production constraints and yield gap monitoring of local rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in mazandaran province. **Iranian Journal of Crop Sciences** 21 (2): 155-172. (In Persian with English Abstract).
- Ribas, G. Gh., Streck, N. A., Uguim, A. D. R., Carlos, F. S., Alberto, C. M., Souza, P. M. D., Bercellos, T., Puntel, S. and Zanon, A. J. 2021.** Assessing factors related to yield gaps in flooded rice in southern Brazil. **Agronomy Journal** 113 (4): 3341-3350.
- Sadras, V. O., Cassman, K. G., Grassini, P., AJ. H., Bastiaanssen, W. G. M., Laborte, A. G. AE, M. Sileshi, G. W. and Steduto, P. 2015.** Yield gap analysis of rainfed and irrigated crops: Methods and case studies. FAO, Rome, Italy.
- Sharifi, H., Hijmans, R. J., Hill, J. E. and Linquist, B. A. 2018.** Water and air temperature impacts on rice (*Oryza sativa*) phenology. **Paddy and Water Environment** 16 (3): 467-476.
- Silva, J. V., Reidsma, P., Laborte, A. G. and van Ittersum, M. K. 2016.** Explaining rice yields and yield gaps in central Luzon, Philippines: An application of stochastic frontier analysis and crop modelling. **European Journal of Agronomy** 82: 223-241.
- Simaie, E., Homaeae, M. and Norouzi, A. 2013.** Evaluating sebal model to estimate evapotranspiration using modis and tm sensor data. **Soil and Water Resources Conservation** 2 (4): 29-40. (In Persian with English Abstract).

- Soltani, A. and Sinclair, T. R. 2011.** A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research* 124: 252-260.
- Soltani, A. and Sinclair, T. R. 2012.** Modeling physiology of crop development, growth and yield. CAB. 322 p.
- Soltani, A., Alimagham, M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi S., Vadez V., Sinclair T. R. and van Ittersum M. K. 2020.** Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems* 183: 102859. DOI: 10.1016/j.agry.2020.102859.
- Stuart, A. M., Pame, A. R. P., Silva, J. V., Dikitanan, R. C., Rutsaert, P., Malabayabas, A. J. P., Lampayan, R. M., Radanielson, A. M. and Singleton, G. R. 2016.** Yield gaps in rice-based farming systems: Insights from local studies and prospects for future analysis. *Field Crops Research* 194: 43-56.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. and Befort, B. L. 2011.** Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences India* 108 (50): 20260-20264.
- van Bussel, L. G. J., Grassini, P., van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Gassman, K. G. and van Ittersum, M. K. 2015.** From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research* 177: 98-108.
- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P. and Hochman, Z. 2013.** Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research* 143: 4-17.
- van Ittersum M. K., van Bussel, G. J., Wolf, J., Grassini, P., van Wart, J., Guilpart, N., Claessens, L., Groot, H., Wiebe, K., Mason-D'Croz, D., Yang, H., Boogaard, H., van Oort, P. A. J., van Loon, M. P., Saito, K., Adimo, O., Adjei-Nsiah, S., Agali, A., Bala, A., Chikowo, Kaizzi, R. K., Kouressy, M., Makoi, J. H. J. R., Ouattara, K., Tesfaye, K. and Cassman, K. G. 2016.** Can Sub-Saharan Africa feed itself? *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 14964-14969.
- van Wart, J., van Bussel, L. G. J., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N. D., Claessens, L., van Ittersum, M. K. and Cassman, K. G. 2013.** Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research* 143: 44-55.
- Wang, J., Zhang, J., Bai, Y., Zhang, S., Yang, Sh. and Yao, F. 2020.** Integrating remote sensing-based process model with environmental zonation scheme to estimate rice yield gap in northeast China. *Field Crops Research* 246: 1-17.
- Xu, X., He, P., Zhao, S., Qiu, S., Johnstond, A. M. and Zhou, W. 2016.** Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China. *Field Crops Research* 186: 58-65.
- Yousefian, M., Soltani, A., Dastan, S. and Ajamnoroozi, H. 2019.** Documenting production process and the ranking factors causing yield gap in rice fields in Sari, Iran. *Iran Agricultural Research* 38 (1): 101-109.



Evaluation of rice production potential and yield gap in Iran using SSM-iCrop2 model

Saleh Keramat^{1*}, Benyamin Torabi², Afshin Soltani³ and Ebrahim Zeinali²

Received: June 29, 2021

Accepted: August 11, 2021

Abstract

Rice has a special role in the diet of Iranians. To meet the needs of the country, it is necessary to increase the production of this crop. Therefore, due to the limited cultivation area, increasing yield per unit area is a more appropriate method. One of the best methods to increase production is to reduce the yield gap. The present study was designed and conducted to estimate the rice yield gap in Iran in 2016. In this study, the climatic zones and reference weather stations of rice production in Iran were determined using the global yield gap atlas (GYGA) protocol. First, the actual yield of rice was extracted from the Iranian agricultural statistics. Then, potential yield in the main production areas of rice was estimated using the SSM-iCrop2 simulation model and management, soil and climatic data. Yield gap was calculated from the difference between the actual yield of farmers and potential yield. The actual yield of rice in the main climatic regions of this crop in Iran was estimated from 3.5 to 5.2 ton.ha⁻¹ and the simulated potential yield from 6.3 to 9.5 ton.ha⁻¹. Therefore, the yield gap varied from 2.1 to 5.1 ton.ha⁻¹. The results of this study showed that if the yield gap of rice is reduced, its production can be increased from 2,440,000 tons to 4,103,000 tons and achieve the self-sufficiency in rice supply in the country.

Keywords: Actual yield, Potential yield, Simulation

1. Ph. D. Student, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

2. Assoc. Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

3. Prof. Ph. D. Student, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

* Corresponding author: saleh.keramat@gmail.com