فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷

۱۸۷-۲۱۲

ارزیابی جریان انرژی، ذخیره کربن و پتانسیل گرمایش جهانی در سناریوهای تولید برنج

محمدحسین ترابی[۱]، افشین سلطانی[۲]، سلمان دستان[۳]* و حسین عجم نوروزی[۱]

[۱] گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان، گرگان، ایران

[۲] گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۳] گروه مهندس ژنتیک و ایمنی زیستی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹

ترابی، م.ح.، ا. سلطانی، س. دستان و ح. عجم نوروزی. ۱۳۹۷. ارزیابی جریان انرژی، ذخیره کربن و پتانسیل گرمایش جهانی در سناریوهای تولید برنج. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶(۴): ۲۱۲-۱۸۷.

سابقه و هدف: ارزیابی محیط‌زیستی چرخه زندگی گیاهان زراعی در سامانه‌های تولید یکی از روش‌های مورد قبول برای دستیابی به هدف‌های کشاورزی پایدار است. بخش کشاورزی نیز سهم بسزایی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی دارد. از این‌رو، بهبود عملیات کشاورزی بعنوان راه‌کار مناسب برای تخفیف اثرهای تغییر اقلیم مطرح است. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی محیط‌زیستی سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح شده برنج اجرا شد.

مواد و روش‌ها: پس از ارزیابی اولیه و مشورت با متخصصان برنج، ۱۰۰ مزرعه در روش کاشت نیمه‌مکانیزه و ۱۰۰ مزرعه در روش سنتی در منطقه ساری در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ انتخاب شدند. پس از ثبت اطلاعات، هر روش کاشت بر اساس شیوه مدیریت زراعی و مصرف نهاده‌ها به چهار نظام کاشت تبدیل شده که در مجموع هشت سناریو را تشکیل دادند. چهار سناریوی روش نیمه‌مکانیزه شامل چهار نظام کم‌نهاده (SL)[1]، حفاظتی (SC_I)[2]، رایج منطقه (SC_{II})[3] و پرنهاده (SH)[4] و چهار سناریوی روش سنتی نیز به‌ترتیب نظام‌های کم‌نهاده (TL)[5]، حفاظتی (TC_I)[6]، رایج منطقه (TC_{II})[7] و پرنهاده (TH)[8] بودند.

نتایج و بحث: یافته‌ها نشان داد میانگین عملکرد شلتوک در هشت سناریو برابر ۶۴۱۸ کیلوگرم در هکتار و میانگین انرژی ورودی در هشت سناریو برابر ۲۸۱۳۸/۹۳ مگاژول در هکتار بود که ۴۵/۴۴ درصد انرژی تجدیدپذیر و ۵۴/۵۶ درصد انرژی تجدیدناپذیر را شامل می‌شد. بیشترین انرژی ورودی در سناریوی SH و TH مشاهده شد که مربوط به نظام کاشت پرنهاده در هر دو روش کاشت است. میانگین انرژی خروجی در هشت سناریو برابر ۱۹۷۰۷۶ مگاژول در هکتار و بیشترین انرژی خروجی در سناریوهای SC_{II}، SH، TC_{II} و TH به‌دست آمد. میانگین بهره‌وری انرژی در هشت سناریو برابر ۰/۲۳ کیلوگرم بر مگاژول بود که کمترین میزان آن در هر دو روش کاشت در نظام پرنهاده حاصل شد و دیگر سناریوها در یک سطح قرار گرفتند. میانگین انتشار دی‌اکسید کربن در هشت سناریو برابر ۱۱۲۰/۳۷ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود که بذر، سوخت و ادوات و ماشین‌آلات بالاترین سهم را داشتند. از نظر پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح سناریوی

* Corresponding Author. *E-mail Address*: dastan@abrii.ac.ir

TH در رتبه اول و سناریوی SH در رتبه دوم قرار گرفت. بالاترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد وزن شلتوک و انرژی ورودی در سناریوی SL و TL به‌دست آمد. بیشترین انتشار فلزهای سنگین در آب و خاک در هر دو روش کاشت در نظام کاشت پرنهاده مشاهده شد و نظام کاشت رایج در رتبه دوم قرار گرفت. بیشترین بهره‌وری خالص اولیه (NPP)[9] در سناریوهای تولید مربوط به نظام‌های کاشت رایج و پرنهاده بود که میزان آن در روش کاشت نیمه‌مکانیزه بالاتر از روش سنتی به‌دست آمد. در هر دو روش کاشت، بیشترین ورودی کربن نسبی (Ri) در سناریوهای تولید مربوط به نظام کاشت کم‌نهاده (SL و TL) حاصل شد. با توجه به کربن ورودی – خروجی و کربن خالص در هشت سناریو، میانگین شاخص پایداری نیز برابر ۴/۶۶ به‌دست آمد. بالاترین شاخص پایداری در سناریوی SC_I (۵/۰۵) مشاهده شد که مربوط به نظام کاشت حفاظتی بود. سناریوهای TL، SL، SC_{II} و TC_I از نظر شاخص پایداری در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در واقع، شیوه صحیح مدیریت مزرعه در نظام تولید حفاظتی به کاهش انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی منجر شد.

نتیجه‌گیری: طبق یافته‌ها، نظام‌های کاشت کم‌نهاده و حفاظتی در هر دو روش کاشت به شاخص‌های توسعه پایدار نزدیکتر بودند. همچنین، کشاورزان منطقه در نظام‌های تولید پرنهاده و رایج بیشتر، بهره‌وری اقتصادی در تولید برنج را در نظر گرفته و کمتر به پایداری محیط‌زیستی و بهره‌وری انرژی توجه داشتند. از این‌رو، استفاده از یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای افزایش پایداری بوم‌نظام‌ها و همچنین کاهش اثرهای سوء محیط‌زیستی ناشی از مصرف نهاده‌های شیمیایی و دستیابی به هدف‌های کشاورزی پایدار بسیار تأثیرگذار باشد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده محیط‌زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، برنج، تغییر اقلیم، نظام کاشت.

مقدمه

پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی یکی از نگرانی‌های عمده جهانی بشمار می‌رود که بخشی از آن ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است (IPCC, 2007). بخش کشاورزی نیز سهم بسزایی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی دارد (Robertson *et al.*, 2000)، که سهم بخش کشاورزی حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد و سهم زمین‌های شالیزاری برابر ۰/۱۱ درصد تخمین زده شد (Smith *et al.*, 2007). از این‌رو، بهبود عملیات زراعی بعنوان راه‌کار مناسبی برای تخفیف تأثیرهای تغییر اقلیم مطرح است (Dastan *et al.*, 2017a). کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی در نظام‌های کشاورزی می‌تواند مصرف منبع‌های محدود انرژی را کاهش دهد و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود (Dalgaard *et al.*, 2001). در همین رابطه، برخی محققان گزارش کردند بخش قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از بخش کشاورزی، می‌تواند از طریق بهبود روش‌های زراعی کاهش یابد (Malmuti *et al.*, 2009)، و افزایش عملکرد، از باقی‌مانده کربن می‌تواند به افزایش ذخیره کربن خاک منجر شود (Gan *et al.*, 2011; Lal, 2004). افزون بر این، پایداری در تولید نیز تا حد زیادی به ردپای کربن و عملکرد بستگی دارد (Dubey and Lal, 2009)، از این‌رو بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها به افزایش بهره‌وری و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود.

دستان و همکاران (Dastan *et al.*, 2015b) با هدف تخمین انتشار دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی ناشی از مصرف انرژی در سه نظام کاشت حفاظتی، بهبودیافته و رایج برنج در منطقه نکا دریافتند که میانگین انرژی ورودی در نظام‌های تولید برابر ۲۲۷۹۳/۰۲ مگاژول در هکتار بود که کمترین میزان انرژی ورودی در نظام کاشت حفاظتی حاصل شد. میزان پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)[10] در واحد انرژی ورودی نیز در نظام کاشت حفاظتی کمترین و در نظام کاشت رایج بیشترین بود. همچنین، نظام کاشت حفاظتی کمترین GWP را در واحد انرژی خروجی دارا بود و نظام‌های کاشت بهبودیافته و رایج در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بطور کلی، میزان GWP ارتباط مستقیمی با شیوه مدیریت مزرعه و مصرف نهاده‌ها داشته و بر این اساس کمترین میزان این شاخص‌ها در نظام کاشت حفاظتی به‌دست آمد (Dastan *et al.*, 2016c). همچنین، در پژوهشی دیگر Dastan *et al.* (2015a) با تجزیه و تحلیل شاخص‌های انرژی در

نظام‌های تولید برنج گزارش کردند میانگین انرژی ورودی در نظام‌های مورد مطالعه شامل انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر برابر ۲۴۲۶۲/۲۹ مگاژول در هکتار بود. کل انرژی خروجی در نظام‌های تولید نیز برابر ۱۹۱۳۴۰ مگاژول در هکتار بود. درصد انرژی مستقیم و تجدیدپذیر مصرفی در نظام کاشت فشرده (SRI)[11] بیشتر از نظام‌های بهبودیافته و رایج منطقه بود، اما درصد انرژی غیرمستقیم و تجدیدناپذیر مصرفی در SRI کمتر از نظام‌های بهبودیافته و رایج منطقه به‌دست آمد. بالاترین میزان کارایی و بهره‌وری انرژی و انرژی خالص در SRI مشاهده شد. ولی، انرژی ویژه برای SRI کمتر از دو نظام دیگر بود (Dastan *et al.*, 2015a). در پژوهشی با ارزیابی بیلان انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در مزرعه‌ها تولید گندم گزارش شد که میانگین کل انرژی ورودی در چهار روش کاشت برابر ۱۱۸۱۱/۶۱ مگاژول در هکتار بود. میانگین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد وزن دانه در چهار روش کاشت برابر ۱۸۴/۲ کیلوگرم معادل CO_2 در هر تن دانه بود. میانگین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی ورودی و خروجی در روش‌های کاشت نیز به‌ترتیب برابر ۶۶/۷۵ و ۴/۹۴ کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول بود (Pazooki *et al.*, 2017a,b). Alizadeh *et al.* (2017) با ارزیابی بیلان کربن و انتشار دی‌اکسید کربن از سطح خاک در نظام‌های زراعی بدون خاک‌ورزی در مشهد گزارش کردند انتشار کربن با افزایش بقایای گیاهی در سطح خاک افزایش یافت. همچنین، با افزایش میزان بقایای گیاهی به‌دلیل بالا رفتن میزان کربن ورودی به خاک بیلان، کربن خاک مثبت‌تر شد. افزون بر این، شرایط اقلیمی، دما و نور نقش مستقیمی بر بیلان کربن در بوم‌نظام‌ها می‌گذارد (Alizadeh *et al.*, 2013). در سال‌های اخیر نظام‌های زراعی بویژه زراعت برنج به‌دلیل کاربرد مکانیزاسیون، کودهای شیمیایی، بذرهای پرمحصول و حشره‌کش‌ها دست‌خوش تغییر و تحول‌های عمده‌ای شده‌اند. رخداد این تحول‌ها سبب تغییر جریان انرژی در بخش کشاورزی و وابستگی شدید آن بطور مستقیم و غیرمستقیم به سوخت‌های فسیلی و دیگر انرژی‌ها شده است. بنابراین، لازم است وضعیت مصرف نهاده‌ها و انرژی برای نظام‌های کاشت از نظر بهینه‌بودن مصرف مورد مقایسه قرار گیرد. بنابراین، این مطالعه با هدف ارزیابی محیطزیستی سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح شده برنج در منطقه ساری انجام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و اقلیم منطقه

این آزمایش در منطقه ساری واقع در بخش مرکزی استان مازندران در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ انجام شد. شهرستان ساری در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵ دقیقه شرقی قرار دارد. مساحت زمین‌های شالیزاری در شهرستان ساری حدود ۲۳ هزار هکتار بوده که معادل ۱۰ درصد از کل زمین‌های شالیزاری در سطح استان مازندران است. تمامی مزرعه‌های مورد مطالعه متعلق به ارقام اصلاح شده یا پرمحصول بود. کشت غالب ارقام اصلاح‌شده و پرمحصول برنج در منطقه ساری شامل ارقام شیرودی، ندا و فجر است.

سناریوهای مختلف تولید برنج

پس از ارزیابی ابتدایی و مشورت با متخصصان و کارشناسان برنج، ۲۰۰ مزرعه در دو روش کاشت نیمه‌مکانیزه و سنتی پس از پایش، انتخاب شدند. سپس، بر اساس مصرف نهاده‌ها و شیوه مدیریت مزرعه در هر روش کاشت، چهار نظام کاشت تعیین شد که هشت سناریو را تشکیل دادند. چهار سناریوی مربوط به روش کاشت نیمه‌مکانیزه شامل چهار نظام تولید کم‌نهاده (SL)، حفاظتی (SC_I)، رایج منطقه (SC_{II}) و پرنهاده (SH) و چهار سناریوی روش کاشت سنتی نیز به‌ترتیب نظام‌های تولید کم‌نهاده (TL)، حفاظتی (TS_I)، رایج منطقه (TS_{II})

و پرنهاده (TH) بودند. اطلاعات تکمیلی سناریوهای تولید برنج در جدول ۱ نشان داده شده است. در روش کاشت نیمه‌مکانیزه عملیات داشت بصورت سنتی (تهیه زمین، روش آبیاری، تغذیه گیاه، کنترل علف‌های هرز و حفاظت گیاه)، ولی عملیات کاشت و برداشت بصورت مکانیزه (استفاده از جعبه نشا، نشاکاری مکانیزه و برداشت از طریق کمباین و دروگر) انجام شد. در این روش کاشت، علاوه بر تیلر و خرمنکوب از ماشین‌های نشاکار و دروگر استفاده می‌شود (Peyman *et al.*, 2005).

مزرعه‌های مورد مطالعه بر اساس روش کوکران شناسایی و انتخاب شدند که سعی شد همه روش‌های عمده تولید در منطقه را پوشش دهد. سپس، ویژگی‌های مزرعه‌ها و اطلاعات تکمیلی مربوط به آن‌ها در بازدیدهای میدانی طی عملیات پایش ثبت شد.

برای جمع‌آوری اطلاعات، ابتدا عملیات زراعی به هفت بخش تهیه زمین، کاشت، کوددهی، حفاظت گیاه، کنترل علف‌های هرز، آبیاری و برداشت تفکیک شد. سم-های شیمیایی مصرفی برای کنترل علف‌های هرز، آفت‌ها و بیماری‌ها متنوع بودند. سپس، با شروع هر عملیات، با توجه به نوسان‌های دمایی، تنوع روش‌های تولید و میزان مختلف کاربرد نهاده‌ها (ورودی‌ها) توسط کشاورزان ثبت شد. بمنظور تهیه اطلاعات جامعتر، اطلاعات کامل عملیات زراعی از قبیل تاریخ شروع هر عملیات و میزان ورودی‌ها در هر مرحله (کاشت تا برداشت) در مزرعه‌ها از طریق مصاحبه رودررو با کشاورز با نظارت ناظرین جمع‌آوری و ثبت شد.

جدول ۱- تشریح سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح‌شده برنج در منطقه ساری

Table 1. Description of rice production scenarios of improved cultivars in Sari region

بخش Item	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH
روش کاشت Planting method	نیمه‌مکانیزه Semi-mechanized	نیمه‌مکانیزه Semi-mechanized	نیمه‌مکانیزه Semi-mechanized	نیمه‌مکانیزه Semi-mechanized	سنتی Traditional	سنتی Traditional	سنتی Traditional	سنتی Traditional
نظام کاشت Planting system	کم‌نهاده Low input	حفاظتی Conservation	رایج Conventional	پرنهاده High input	کم‌نهاده Low input	حفاظتی Conservation	رایج Conventional	پرنهاده High input
درصد سطح زیر کشت Total cultivation area (%)	10	9.5	21.5	9	6	8.5	24	11.5
میزان بذر مصرفی Seed usage	کم Low	نرمال Normal	بیش از نرمال >Normal	زیاد High	کم Low	نرمال Normal	بیش از نرمال >Normal	زیاد High
مقدار کود شیمیایی Nitrogen usage ($kg\ N.ha^{-1}$)	کم Low	نرمال Normal	بیش از نرمال >Normal	زیاد High	کم Low	نرمال Normal	بیش از نرمال >Normal	زیاد High
مقدار سموم شیمیایی Amount of chemical*	کم Low	نرمال Normal	بیش از نرمال >Normal	زیاد High	کم Low	نرمال Normal	بیش از نرمال >Normal	زیاد High
کود دامی Farmyard manure	0	نرمال Normal	0	کم Low	کم Low	بیش از نرمال >Normal	0	کم Low
رژیم آبیاری Irrigation regime	Flooding + periodic	Flooding + drainage	Flooding + periodic	Flooding + two step periodic	Flooding + Periodic	Flooding + drainage	Flooding + periodic	Flooding + two step periodic

*: تفکیک میزان کود و سم‌های شیمیایی با میانگین مصرف آن در تولید برنج در منطقه مقایسه شده است.

* Amount of fertilizer and chemicals were compared with average of consumption in the region rice production farms.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ارزیابی شاخص‌های انرژی

برای برآورد انرژی، میزان ورودی‌ها و خروجی‌ها تعیین شد. برای محاسبه انرژی ورودی (مصرفی)، همه ورودی‌ها در زمان اجرای عملیات زراعی با استفاده از ضرایب تبدیل معادل‌سازی شد (جدول ۲). سپس، میزان انرژی ورودی بر اساس مقدار نهاده مصرفی و عملیات زراعی محاسبه گردید. انرژی استفاده از ماشین‌ها شامل ساخت و نگهداری و انتقال آن‌ها به مزرعه‌ها است.

جدول ۲- معادل‌های انرژی برای ورودی‌ها و خروجی‌ها در سناریوهای تولید برنج

Table 2. The energy equivalent of inputs and outputs for rice production scenarios

ورودی‌ها / خروجی‌ها Inputs / Outputs		واحد مصرف Unit	معادل انرژی (مگاژول در واحد) Energy equivalent (MJ.unit-1)	منبع Reference
Human labor	نیروی انسانی	h	1.96	Ozkan *et al.*, 2007
Rice seed	بذر برنج	kg	25	Hatirli *et al.*, 2006
Machinery a	ادوات و ماشین‌آلات	kg	142.7	Kaltsas *et al*, 2007
Diesel fuel	سوخت دیزل	l	38	Iran's Ministry of Oil, 2008
Irrigation	آبیاری	m3	1.02	Acaroglu *et al.*, 2005
Electricity	نیروی برق	kWh	12.1	Kaltsas *et al.*, 2007
N fertilizer	نیتروژن	kg N	60.6	Akcaoz *et al.*, 2009
P fertilizer	فسفر	kg P2O5	11.1	Akcaoz *et al.*, 2009
K fertilizer	پتاسیم	Kg K2O	6.7	Akcaoz *et al.*, 2009
Zn fertilizer	روی	kg Zn	8.4	Argiro, 2006
S fertilizer	گوگرد	kg S	1.12	Esengun *et al.*, 2007
Farmyard manure	کود دامی	kg	0.3	Demircan *et al.*, 2006
Herbicide	علف‌کش	kg a.i.b	288	Tzilivakis *et al.*, 2005
Insecticide	حشره‌کش	kg a.i.	237	Tzilivakis *et al.*, 2005
Fungicide	قارچ‌کش	kg a.i.	196	Deike *et al.*, 2008
Paddy rice	شلتوک	kg	14.7	Ozkan *et al.*, 2004
Straw	کاه و کلش	kg	12.5	Ozkan *et al.*, 2004

a: این انرژی شامل ساخت، تعمیرات، نگهداری و حمل و نقل است.

*: Includes energy required for manufacture, repair, maintenance and transportation of machines.

b: a.i. نشان‌دهنده میزان ماده مؤثره است b a. i. represents active ingredient

برای محاسبه انرژی ورودی از معادله‌های ۱ و ۲ استفاده شد (Rajabi *et al.*, 2012):

$$TE = UEH * t \quad (1)$$

$$UEH = (UEW * W) / ULT \quad (2)$$

در معادله‌های ۱ و ۲، TE: انرژی حاصل از استفاده از ماشین (مگاژول در هکتار)؛ UEH: انرژی مصرفی ادوات و ماشین‌ها برای انجام عملیات زراعی بر حسب (مگاژول در ساعت)؛ t: مدت زمان کاربرد ماشین (ساعت در هکتار)؛ UEW: انرژی مورد نیاز برای ساخت، تعمیر و نگهداری و حمل و نقل ماشین بر حسب مگاژول بر کیلوگرم؛ W: وزن ماشین بر حسب کیلوگرم؛ ULT: عمر مفید ماشین‌ها بر حسب ساعت است.

برای تعیین انرژی خروجی (تولیدی) به‌دست آمده از شلتوک نیز با استفاده از معادل‌های انرژی (ضرایب تبدیل) استخراج شده مربوط به دانه برنج معادل‌سازی گردید (جدول ۲). سپس، میزان کل انرژی ورودی و خروجی آن‌ها بطور جداگانه محاسبه شد (Soltani *et al.*, 2013). با برآورد کل انرژی‌های ورودی و خروجی، شکل‌های مختلف انرژی مصرفی مشخص شدند که انرژی مستقیم شامل سوخت و نیروی کار و انرژی غیرمستقیم

شامل بذر، کود، سم‌ها و ماشین‌آلات بود. همچنین، نیروی کار و بذر بعنوان انرژی تجدیدپذیر و سوخت، کود و سم-های شیمیایی و ماشین‌آلات بعنوان انرژی تجدیدناپذیر در نظر گرفته شدند (Hatirli *et al.*, 2006).

شاخص‌های انرژی از قبیل نسبت یا کارایی انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه، عملکرد خالص انرژی، نسبت انرژی نهاده‌های شیمیایی، شدت انرژی ورودی (مصرف شده)، شدت انرژی خروجی (تولید شده) برای هر سناریو محاسبه شده‌اند (Soltani *et al.*, 2013; Yousefi *et al.*, 2014). معادلات شاخص‌های انرژی به شرح زیر است:

$$ER = EO / EI \quad (۳)$$

که در آن ER: نسبت یا کارایی انرژی بوده و عددی بودن واحد است. EO: مجموع انرژی‌های خروجی از مزرعه (مگاژول در هکتار) و EI: مجموع انرژی‌های ورودی به مزرعه است.

$$EP = PY / EY \quad (۴)$$

که در آن EP: بهره‌وری انرژی (کیلوگرم بر مگاژول)، PY: عملکرد شلتوک (کیلوگرم در هکتار) و EI: مجموع انرژی‌های ورودی به مزرعه (مگاژول در هکتار) است.

$$SE = EI / PY \quad (۵)$$

که در آن SE: انرژی ویژه (مگاژول بر کیلوگرم)، EI: مجموع انرژی‌های ورودی به مزرعه (مگاژول در هکتار) و PY: عملکرد شلتوک (کیلوگرم در هکتار) است.

$$NEY = EO - EI \quad (۶)$$

که در آن NEY: عملکرد انرژی خالص (مگاژول در هکتار)، EO: مجموع انرژی‌های خروجی از مزرعه (مگاژول در هکتار) و EI: مجموع انرژی‌های ورودی به مزرعه (مگاژول در هکتار) است.

$$AER = ACEI - EI \quad (۷)$$

که در آن NEY: نسبت انرژی نهاده‌های شیمیایی (مگاژول در هکتار)، ACEI: انرژی‌های ورودی مربوط به نهاده‌های شیمیایی (مگاژول در هکتار) و EI: مجموع انرژی‌های ورودی به مزرعه (مگاژول در هکتار) است.

انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی

برای محاسبه پتانسیل گرمایش جهانی، ابتدا میزان سوخت مصرفی در کارخانه و انرژی مصرفی مربوط به تولید و حمل و نقل نهاده‌ها شامل: کود و سم‌های شیمیایی، ادوات و ماشین‌آلات و مصرف سوخت برای عملیات زراعی تعیین و (IPCC, 2007; Tzilivakis *et al.*, 2005). سپس، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به هر بخش، از طریق ضرایب تبدیل مربوطه محاسبه شد (جدول ۳).

جدول ۳- عامل‌های تبدیل مربوط به انتشار دی‌اکسید کربن در سناریوهای تولید برنج

Table 3. Greenhouse gas (GHG) emission coefficients of inputs for rice production scenarios

بخش Item		واحد Unit	عامل تبدیل Coefficient ($kg\ CO_2\ eq.unit^{-1}$)	منبع Reference
Seed	بذر	kg	7.63	SimaPro, 2011
Machinery	ادوات و ماشین‌آلات	GJ	71	Dyer and Desjardins, 2006
Diesel fuel	سوخت دیزل	L	2.76	Dyer and Desjardins, 2003
Electricity	نیروی برق	kWh	1.19	SimaPro, 2011
N fertilizer	نیتروژن	kg N	1.3	Lal, 2004; Pathak and Wassmann, 2007
P fertilizer	فسفر	kg P_2O_5	0.2	Lal, 2004; Pathak and Wassmann, 2007
K fertilizer	پتاسیم	kg K_2O	0.2	Lal, 2004; Pathak and Wassmann, 2007
Zn fertilizer	روی	kg Zn	0.11	SimaPro, 2011
S fertilizer	گوگرد	kg S	0.11	Williams *et al.*, 2006
Herbicide	علف‌کش	kg a.i.	6.3	Lal, 2004; Pathak and Wassmann, 2007
Insecticide	حشره‌کش	kg a.i.	5.1	Lal, 2004; Pathak and Wassmann, 2007
Fungicide	قارچ‌کش	kg a.i.	3.9	Lal, 2004; Pathak and Wassmann, 2007

در پایان، انتشار کل گازهای گلخانه‌ای بنابر رابطه زیر محاسبه شد (Heijungas *et al.*, 1992).

$$\text{Greenhouse effect} = \Sigma GWPi \times mi \quad (۸)$$

که در آن m_i: جرم (در کیلوگرم) در گازهای گلخانه‌ای است. نمره و معیار از نظر کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن بیان شد.

پس از محاسبه GWP کل، انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحد سطح (معادل کیلوگرم CO_2 در هکتار)، در واحد وزن (کیلوگرم معادل CO_2 در تن شلتوک)، در واحد انرژی ورودی (معادل کیلوگرم CO_2 در گیگاژول) و در واحد انرژی خروجی (معادل کیلوگرم CO_2 در گیگاژول) نیز محاسبه شد (Soltani *et al.*, 2013).

انتشار فلزهای سنگین

برآورد انتشار فلزهای سنگین در هشت سناریو، به روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)[12] بر مبنای مدل Ecopoints 97 در نرم‌افزار SimaPro نسخه ۸/۲ انجام شد (SimaPro, 2011).

کربن ورودی و خروجی ($kg\ C.ha^{-1}$)، تخصیص کربن، بهره‌وری خالص اولیه (NPP) و پایداری سناریوها

برای محاسبه کربن خروجی مربوط به محتوای دانه (C_P)، کاه و کلش (C_S)، ریشه (C_R)، و همچنین ریشه‌های خارج شده در محیط رایزوسفر یا محیط ریشه (C_E) از رابطه‌های ۹ الی ۱۲ استفاده شد (Bolinder *et al.*, 2007). همچنین، میزان NPP نیز از رابطه ۱۳ به‌دست آمد (Bolinder *et al.*, 2007). برای محاسبه تخصیص کربن در اندام‌های مختلف محصول‌های زراعی دانه‌ای از قبیل غلات، غلظت کربن موجود در تمام اندام‌های گیاه برابر ۰/۴۵ گرم بر گرم در نظر گرفته شد (Bolinder *et al.*, 2007).

$$CP = YP \times 0.45 \quad (۹)$$

$$CS = YP\,(1 - HI) / HI \times 0.45 \quad (۱۰)$$

$$CR = YP / (S{:}R \times HI) \times 0.45 \quad (۱۱)$$

$$CE = CR \times YE \quad (۱۲)$$

که در آن Y_P: عملکرد ماده خشک اندام‌های هوایی، HI: شاخص برداشت، S:R: نسبت ساقه به ریشه و YE: کربن ریشه‌های خارج شده (کربن انباشت شده در محیط رایزوسفر) است که بعنوان یک فاکتور نسبی برای ریشه‌های قابل احیا در نظر گرفته شد (Bolinder *et al.*, 2007).

$$NPP = CP + CS + CR + CE \quad (۱۳)$$

که در آن NPP: بهره‌وری خالص اولیه (کیلوگرم در هکتار) است. همچنین، کربن دانه (C_P)، کربن کاه و کلش (C_S)، کربن ریشه (C_R)، و کربن محیط رایزوسفر ریشه (CE) بوده که واحد آن کیلوگرم در هکتار است. تخصیص کربن در اندام‌های مختلف گیاه بصورت تخصیص نسبی کربن نیز از نسبت کربن ذخیره شده در هر اندام گیاهی به بهره‌وری خالص اولیه تعیین شد که مجموع ضراب مربوط باید برابر یک باشد (Bolinder et al., 2007). افزون بر این، ورودی نسبی کربن نیز از نسبت کربن ورودی به خاک به بهره‌وری خالص اولیه برآورد شد که کربن ورودی به خاک با استفاده از رابطه ۱۴ به‌دست آمد.

$$Ci = [CP \times SP] + [CS \times SS] + [CR \times SR] + [CE \times SE] \quad (۱۴)$$

که در آن C_i: ورودی کربن سالانه به خاک است. در این معادله S نشان دهنده نسبت کسر کربن برگشت شده به خاک است که S_P برابر صفر و S_S، S_R و S_E برابر یک در نظر گرفته شد (Bolinder *et al.*, 2007).

در بخش نهایی نیز بر اساس ارزیابی جریان انرژی، ذخیره کربن و پتانسیل گرمایش جهانی شاخص پایداری (I_S) هر یک از سناریوهای تولید محاسبه شد. از آنجا که روش‌های مختلفی برای ارزیابی پایداری نظام‌های تولید وجود دارد بنابراین متخصصان خاک از شاخص کیفیت خاک، اقتصادانان از شاخص بهره‌وری، مهندسان از کارایی مصرف انرژی و متخصصان بوم‌شناسی از شاخص ضرایب انرژی مصرفی استفاده می‌کنند. در این پژوهش نیز برای

محاسبه شاخص پایداری از معادله ۱۵ استفاده شد (Lal, 2004).

$$Is = [CO - CI] / [CI] \quad (۱۵)$$

که در آن I_S: شاخص پایداری، C_O: مجموع کربن خروجی، C_I: مجموع کربن ورودی است. میزان کربن ورودی بر اساس معادل CO_2 مربوط به نهاده‌های شیمیایی در ۰/۲۷ محاسبه شد. این میزان همان نسبت وزن مولکولی کربن به دی‌اکسید کربن است (Bolinder *et al.*, 2007).

نتایج و بحث

مستندسازی فرآیند تولید

بنابر یافته‌های جدول ۴، سطح زیر کشت سناریوهای مختلف تولید در ۲۰۰ مزرعه مورد بررسی به تفکیک تشریح شد. سناریوهای تولید مربوط به نظام کاشت رایج در هر دو روش کاشت بالاترین سطح زیر کشت را در منطقه دارا بودند. سناریوی SC_{II} و TC_{II} به‌ترتیب ۲۱/۵ و ۲۴ درصد از کل مزرعه‌ها (۴۳ و ۴۸ درصد از ۱۰۰ مزرعه مورد بررسی در هر روش کاشت) مورد بررسی را به خود اختصاص دادند. سناریوی TH و سناریوی SL به‌ترتیب ۱۱/۵ و ۱۰ درصد از کل مزرعه‌های مورد بررسی را شامل شدند. کمترین سطح زیر کشت را سناریوهای TL و TC_I به‌ترتیب با ۶ و ۸/۵ درصد از کل مزرعه‌های مورد بررسی به خود اختصاص دادند (جدول ۴). بر اساس یافته‌ها می‌توان بیان کرد کشاورزان منطقه بیشتر، بهره‌وری اقتصادی را در تولید برنج در نظر گرفته و کمتر به پایداری محیط‌زیستی و بهره‌وری انرژی توجه دارند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد میانگین کل سوخت مصرفی و کاربرد ادوات و ماشین‌آلات در هشت سناریوی برابر ۱۰۱/۶ لیتر و ۴۰/۲۵ ساعت در هکتار بود که دارای دامنه تغییرات ۸۷/۷۳ الی ۱۱۲/۶ لیتر و ۳۱/۱۸ الی ۵۰/۲۶ ساعت در هکتار بود (جدول ۴). بیشترین سوخت مصرفی و کاربرد ادوات و ماشین‌آلات در سناریوهای SL، SC_I، SC_{II} و SH و کمترین سوخت مصرفی و کاربرد ادوات و ماشین‌آلات در سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH گزارش شد. بر خلاف سوخت مصرفی و کاربرد ماشین‌آلات، بذر مصرفی با میانگین ۵۴/۶۸ کیلوگرم در هکتار و نیروی انسانی با میانگین ۴۱۳/۶۸ ساعت در هکتار در نظام‌های تولید مربوط به روش سنتی بالاتر از روش کاشت نیمه‌مکانیزه بودند. مصرف آب آبیاری با میانگین ۱۰۳۴۲ مترمکعب در هکتار در روش کاشت سنتی بالاتر از روش نیمه‌مکانیزه گزارش شد که دامنه تغییرات آب مصرفی بین ۸۴۲۰ الی ۱۲۵۳۰ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد. ولی، نیروی برق مصرفی در هر چهار نظام کاشت با میانگین ۶۱/۲ کیلو وات ساعت در روش کاشت سنتی بالاتر از روش کاشت نیمه‌مکانیزه بود (جدول ۴).

میانگین مصرف نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی و گوگرد خالص در هشت سناریوی تولید به‌ترتیب برابر ۸۱/۴۶، ۴۴/۶۸، ۴۶/۲۵، ۴/۰۲ و ۵/۰۶ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). نظام‌های کاشت پرنهاده در هر دو روش کاشت (سناریوی SH و TH) بالاترین میزان مصرف کودهای شیمیایی را به خود اختصاص داد و نظام کاشت رایج (سناریوی SC_I و TC_{II}) در رتبه دوم قرار گرفت. همچنین، در هر دو روش کاشت نظام کاشت کم‌نهاده (سناریوی SL و TL) از نظر مصرف کودهای شیمیایی کمترین میزان را به خود اختصاص داد و نظام کاشت حفاظتی در رتبه قبلی آن قرار گرفت. از نظر مصرف کودهای شیمیایی در چهار نظام کاشت مشاهده شد که روش کاشت سنتی میزان بالاتری را در مقایسه با روش کاشت نیمه‌مکانیزه به خود اختصاص داد که ناشی از نبود مدیریت مصرف منبع‌ها و مکانیزه نبودن زراعت برنج است. میانگین مصرف کود دامی در هشت سناریو برابر ۱۹۷/۴۷ کیلوگرم در هکتار بود. در روش کاشت نیمه‌مکانیزه تنها در نظام کاشت حفاظتی و پرنهاده (سناریوی SC_I و SH) مصرف کود دامی گزارش شد که به‌ترتیب برابر ۸۲۵/۳۶ و ۳۵ کیلوگرم در هکتار بود. در روش کاشت سنتی نیز

مصرف کود دامی در نظام‌های کاشت کم‌نهاده، حفاظتی و پرنهاده (سناریوهای TL، TC_I و TH) گزارش شد (جدول ۴). از نظر مصرف سم‌های شیمیایی برای حفاظت گیاه نیز نظام‌های تولید مربوط به روش کاشت سنتی میزان بالاتر را در مقایسه با روش کاشت نیمه‌مکانیزه به خود اختصاص دادند. میانگین مصرف علف‌کش، قارچ‌کش و حشره‌کش در هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۳/۶۹، ۱/۰۶ و ۴/۹۶ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار بود. در هر دو روش کاشت، بیشترین مصرف علف‌کش، قارچ‌کش و حشره‌کش در نظام تولید پرنهاده (سناریوی SH و TH) بوده و نظام رایج در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۴).

جدول ۴- میزان نهاده‌های ورودی در سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح‌شده برنج در منطقه ساری

Table 4. Input quantity in different production scenarios for improved rice cultivars in Sari region

بخش Item	واحد Unit	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH	میانگین Mean	اشتباه معیار RMSE	ضریب تغییرات CV (%)
ورودی‌ها Inputs												
سوخت Fuel	l	109.25	112.63	112.60	111.78	87.73	92.94	92.92	92.91	101.60	3.83	10.67
ادوات و ماشین‌آلا Machinery	kg	49.85	50.26	48.56	47.22	31.18	31.82	32.02	31.09	40.25	3.31	23.29
بذر Seed	kg	43	45	45.47	44.72	63.18	64.41	65.55	66.09	54.68	3.85	19.91
نیروی انسانی Labor	h	336.25	328.42	313.02	335	492.73	488.53	497.24	518.26	413.68	32.56	22.26
آبیاری Irrigation	m^3	8420	8958	9978	10628	9818	10912	11488	12530	10342	472.92	12.93
نیروی برق Electricity	kWh	84.50	52.89	57.44	53.33	46.82	82.06	67.35	45.22	61.20	5.38	24.88
نیتروژن N fertilizer	kg N	43	62.23	88.41	128.22	43.16	63.73	90.17	132.78	81.46	12.37	42.96
فسفر P fertilizer	kg P_2O_5	25.50	43.68	51.12	55	31.82	33.24	47.76	69.35	44.68	5.06	32.00
پتاسیم K fertilizer	kg K_2O	22.35	37.26	45.84	53.44	19.09	29.41	52.86	109.78	46.25	10.18	62.26
روی Zn fertilizer	kg Zn	2.75	1.47	5.02	4.44	1.36	5.94	5.67	5.48	4.02	0.67	46.93
گوگرد S fertilizer	kg S	3.50	6.32	4.63	4.11	3.64	7.06	4.73	6.52	5.06	0.49	27.29
کود دامی Farmyard manure	kg	0	825.36	0	35	22.73	544.12	0	152.61	197.47	111.02	159.02
علف‌کش Herbicide	kg a.i.	2.76	3.54	3.69	3.96	4.03	3.61	3.94	4.01	3.69	0.15	11.41
حشره‌کش Insecticide	kg a.i.	0.91	0.99	1.05	1.39	1	1.05	1.01	1.07	1.06	0.05	13.65
قارچ‌کش Fungicide	kg a.i.	4.07	3.95	5.27	5.19	5.18	5.11	5.52	5.42	4.96	0.21	12.18
خروجی‌ها Outputs												
عملکرد شلتوک Paddy yield	$kg.ha^{-1}$	5601	6457	6836	6850	5764	6206	6826	6807	6418	180.36	7.95
عملکرد کاه و کلش Straw yield	$kg.ha^{-1}$	8558	8408	8717	8467	7618	7876	8101	8000	8218	133.65	4.60
عملکرد بیولوژیک Biological yield	$kg.ha^{-1}$	14158	14866	15553	15317	13382	14082	14927	14807	14637	252.80	4.89
شاخص برداشت Harvest index	%	39.59	43.41	43.87	44.59	43.17	44.05	45.67	45.90	43.78	0.69	4.47

بنابر یافته‌ها، میانگین عملکرد شلتوک، عملکرد کاه و کلش و عملکرد زیستی در هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۶۴۱۸، ۸۲۱۸ و ۱۴۶۳۷ کیلوگرم در هکتار بود که شاخص برداشت محاسبه شده از نسبت عملکرد شلتوک به عملکرد زیستی نیز برابر ۴۳/۷۸ درصد بود (جدول ۴). بیشترین عملکرد شلتوک در هر دو روش کاشت در نظام‌های کاشت رایج و پرنهاده (سناریوهای SC_{II}، SH، TC_{II} و TH) به‌دست آمد. کمترین عملکرد شلتوک در هر دو روش کاشت در نظام کم‌نهاده تولید شد که به‌ترتیب برابر ۵۶۰۱ و ۵۷۶۴ کیلوگرم در هکتار بود. دامنه تغییرات عملکرد کاه و کلش و عملکرد زیستی در هشت سناریو به‌ترتیب بین ۷۶۱۸ الی ۸۷۱۷ کیلوگرم در هکتار و ۱۳۳۸۲ الی ۱۵۵۵۳ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین، شاخص برداشت نیز در دامنه بین ۳۹/۵۹ الی ۴۵/۹ درصد برآورد شد (جدول ۴).

تجزیه و تحلیل شاخص‌های انرژی

تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد میانگین کل انرژی ورودی در هشت سناریو برابر ۲۸۱۳۸/۹۳ مگاژول در هکتار بود (جدول ۵).

جدول ۵- شاخص‌های انرژی در سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح شده برنج در منطقه ساری

Table 5. Energy indices in different production scenarios for improved rice cultivars in Sari region

شاخص‌های انرژی Energy indices	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH	میانگین Mean	اشتباه معیار RMSE	ضریب تغییرات CV (%)
انرژی ورودی Total energy ($MJ.ha^{-1}$)	23624.26	25900.94	28744.08	31902.27	24118.17	27320.66	29725.96	33775.08	28138.93	1275.04	12.82
انرژی خروجی Total energy ($MJ.ha^{-1}$)	189300	200022	209454	206528	179953	189682	201601	200069	197076	3507.71	5.03
مستقیم Direct ($MJ.ha^{-1}$)	4810.55	4923.71	4892.50	4904.16	4299.38	4489.28	4505.50	4546.49	4671.45	84.60	5.12
غیرمستقیم Indirect ($MJ.ha^{-1}$)	18813.71	20977.24	23851.58	26998.12	19818.79	22831.37	25220.46	29228.60	23467.48	1270.92	15.32
انرژی تجدیدپذیر (زیستی) Renewable energy (Biologic)	10322.45	11153.34	11928.09	12625.49	12566.65	13861.05	14330.89	15494.79	12785.34	603.92	13.36
انرژی تجدیدناپذیر (صنعتی) Non-renewable energy (Industrial)	13301.81	14995.19	16815.98	19287.28	11558.33	13622.84	15395.08	18326.07	15412.82	927.36	17.02
شدت انرژی مصرف شده Consumed energy intensity ($MJ.ha^{-1}$)	2.36	2.59	2.87	3.19	2.41	2.73	2.97	3.38	2.81	0.13	12.82
شدت انرژی تولید شده Produced energy intensity ($MJ.ha^{-1}$)	18.93	20	20.95	20.65	18.00	18.97	20.16	20.01	19.71	0.35	5.03
کارایی مصرف انرژی Energy use efficiency	8.01	7.72	7.29	6.47	7.46	6.94	6.78	5.92	7.08	0.68	9.68
بهره‌وری انرژی Energy productivity ($MJ.ha^{-1}$)	0.24	0.25	0.24	0.21	0.24	0.23	0.23	0.20	0.23	0.01	6.62
انرژی ویژه Specific energy ($kg.MJ^{-1}$)	4.22	4.01	4.20	4.66	4.18	4.40	4.35	4.96	4.37	0.11	6.95
عملکرد انرژی خالص Net energy ($MJ.kg^{-1}$)	165676	174121	180710	174626	155835	162362	171875	166294	168937	2800	4.69
نسبت انرژی شیمیایی Agrochemical energy ratio (%)	0.21	0.26	0.31	0.36	0.24	0.25	0.30	0.36	0.29	0.06	19.42

بیشترین انرژی ورودی در سناریوی SH و TH مشاهده شد که مربوط به نظام پرنهاده در هر دو روش کاشت است. سناریوهای SC_{II} و TC_{II} از نظر انرژی ورودی در رتبه‌های سوم و چهارم قرار گرفتند. کمترین میزان انرژی ورودی در سناریوی SL و TL مشاهده شد که مربوط به نظام کاشت کم‌نهاده در هر دو روش کاشت است. این نتایج نشان می‌دهد در هر دو روش کاشت بالاترین میزان مصرف انرژی در نظام کاشت پرنهاده و رایج منطقه مشاهده شد و نظام‌های کاشت حفاظتی و کم‌نهاده در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بنابر یافته‌ها می‌توان بیان کرد که کمترین انرژی ورودی در هر دو روش کاشت در نظام کاشت کم‌نهاده مصرف شد که در سناریوهای روش کاشت نیمه‌مکانیزه (SL، SC_I، SC_{II} و SH) انرژی ورودی کمتر از سناریوهای روش کاشت سنتی (TL، TC_I، TC_{II} و TH) بود (جدول ۵). دیگر محققان گزارش کردند کشاورزان در روش رایج برای تقویت مزرعه از میزان بسیار زیاد کودهای شیمیایی و به شیوه‌ای نادرست استفاده می‌کنند و به مواد آلی و منبع‌های زیستی توجه ندارند (Dastan *et al.*, 2017b).

میانگین کل انرژی خروجی در هشت سناریو برابر ۱۹۷۰۷۶ مگاژول در هکتار بود که ۴۷/۸۷ درصد از آن مربوط به تولید شلتوک و ۵۲/۱۳ درصد از آن مربوط به کاه و کلش بود (جدول ۵). بیشترین انرژی خروجی در سناریوهای SC_{II}، SH، TC_{II} و TH حاصل شد. سناریوهای SC_I و TC_I در رتبه‌های بعدی و سناریوهای SL و SH در رتبه آخر قرار گرفتند. از نظر انرژی خروجی مربوط به شلتوک نیز سناریوهای تولید مربوط به نظام کاشت پرنهاده و رایج منطقه در هر دو روش بالاترین میزان را به خود اختصاص دادند که سهمی معادل ۴۷/۹۸ الی ۵۲/۰۵ درصد را داشتند. کمترین انرژی تولیدی شلتوک نیز در سناریوهای SL، SC_I، TL و TC_I است (جدول ۵). دلیل اصلی اختلاف مشاهده شده در میزان انرژی ورودی و خروجی، تفاوت در اعمال مدیریت و میزان مصرف نهاده‌ها بود.

در رابطه با شکل‌های مختلف، انرژی یافته‌های جدول ۵ نشان می‌دهد میانگین کل انرژی ورودی مستقیم و غیرمستقیم در هشت سناریو به‌ترتیب معادل ۱۶/۶ و ۸۳/۴ درصد از کل و بیشترین میزان انرژی مستقیم و غیرمستقیم مصرفی مربوط SL، SC_I، SC_{II} و SH بود (جدول ۵). میانگین انرژی ورودی تجدیدپذیر (انرژی زیستی) و تجدیدناپذیر (انرژی صنعتی) در هشت سناریو به‌ترتیب معادل ۴۵/۴۴ و ۵۴/۵۶ درصد از کل بود. در مقایسه سناریوها از نظر مصرف انرژی تجدیدپذیر مشاهده شد که ورودی این منبع‌ها در سناریوهای SL، SC_I، SC_{II} و SH بیشتر از سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH بود (جدول ۵). بیشترین میزان انرژی تجدیدناپذیر در سناریوهای SH و TH (به‌ترتیب معادل ۵۶/۹۴ و ۵۴/۱۲ درصد از کل) مصرف شد. کمترین انرژی تجدیدناپذیر مصرفی در سناریوهای SL و TL (۵۶/۳۱ و ۴۹/۲۷ درصد از کل انرژی ورودی) مشاهده شد و سناریوهای SC_I و TC_I در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. از نظر شدت انرژی مصرفی نیز سناریوهای SL و TL) کمترین میزان و سناریوهای SH و TH بیشترین میزان را نشان دادند. از نظر شدت انرژی تولید شده نیز کمترین مقدار در هر دو روش کاشت مربوط به نظام کاشت کم‌نهاده و بیشترین میزان مربوط به نظام‌های کاشت رایج و پرنهاده بود. میانگین شدت انرژی مصرفی و تولیدی در هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۲/۸۱ و ۱۹/۷۱ مگاژول در هکتار به‌دست آمد (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر در نظام تولید حفاظتی در هر دو روش کاشت (سناریوهای SC_I و TC_I) در مقایسه با دیگر سناریوهای تولید پایینتر بود. این مسأله از نظر بوم‌شناختی اهمیت قابل‌توجهی دارد، زیرا منبع انرژی‌های تجدیدناپذیر که بطور عمده سوخت‌های فسیلی بوده و تکیه بر این منبع‌ها در آینده همراه با بحران‌های زیادی است.

دیگر محققان با تجزیه و تحلیل شاخص‌های انرژی در نظام‌های تولید برنج در منطقه نکا دریافتند پایین بودن کارایی انرژی در نظام کاشت رایج منطقه را می‌توان به

وابستگی زیاد آن‌ها به نهاده‌های ورودی و مصرف بیشتر انرژی برای تولید نسبت داد که این نهاده‌ها بدون توجه به مسئله‌های محیط‌زیستی مصرف می‌شوند (Dastan *et al.*, 2015a). دلیل بالا و یا پایینتر بودن سهم انرژی تجدیدناپذیر در سناریوهای مختلف، مربوط به متفاوت بودن میزان مصرف سوخت، کود شیمیایی و کارکرد ماشین‌آلات بود که دیگر محققان نیز گزارش مشابهی را در این زمینه اعلام کردند (Dastan *et al.*, 2015a; Pazouki *et al.*, 2017a,b). همچنین، در گزارش دیگر در سناریوهای تولید گندم سهم انرژی ورودی غیرمستقیم و تجدیدناپذیر بالاتر از انرژی ورودی مستقیم و تجدیدپذیر بود (Pazouki *et al.*, 2017). بررسی‌ها نشان داد کشاورزی در ایران به‌میزان زیادی به انرژی‌های تجدیدناپذیر وابسته است (Beheshti Tabar *et al.*, 2010; Soltani *et al.*, 2013; Pazouki *et al.*, 2017). مصرف بالای انرژی‌های تجدیدناپذیر سبب کاهش کارایی مصرف انرژی نظام‌های تولید خواهد شد، زیرا تولید مواد شیمیایی و استفاده از ماشین‌آلات بعنوان شاخص اصلی نظام‌های رایج، نیازمند مصرف میزان زیادی از انرژی است (Dastan, 2015a).

در این پژوهش نسبت انرژی غیرمستقیم بیشتر از انرژی مستقیم و نسبت انرژی تجدیدناپذیر بالاتر از انرژی‌های تجدیدپذیر بود که در دیگر تحقیق‌ها نیز نتایج مشابهی گزارش شد (Dastan *et al.*, 2015a; Pazouki *et al.*, 2017a,b). برای دستیابی به یک نظام پایدار، باید میزان کارایی انرژی و سهم انرژی تجدیدپذیر را در بوم‌نظام‌ها افزایش داد. البته در زمان حاضر تأمین غذای جمعیت رو به رشد دنیا بدون استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر امری دشوار و شاید غیرممکن باشد. بنابراین، با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی استفاده از مواد شیمیایی و سوخت‌های فسیلی، متخصصان کشاورزی چاره‌ای جز اندیشیدن به افزایش پایداری در کشاورزی و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در نظام‌های تولید نخواهند داشت (Dastan *et al.*, 2015a).

همان‌طور که در جدول ۵ نمایان است میانگین کارایی انرژی در هشت سناریوی تولید برابر ۷/۰۸ بود. بالاترین میزان کارایی انرژی ۸/۰۱ مربوط به سناریوی SL بود و سناریوهای SC_I و TL در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین کارایی مصرف انرژی در سناریوهای SH و TH حاصل شد. دلیل پایین بودن کارایی انرژی را می‌توان به وابستگی زیاد آن‌ها به نهاده‌های ورودی و مصرف بیشتر انرژی برای تولید نسبت داد که این نهاده‌ها بدون توجه به مسئله‌های محیط‌زیستی مصرف می‌شوند. از نظر بهره‌وری انرژی در هر دو روش کاشت سه نظام کاشت کم‌نهاده، حفاظتی و رایج بیشترین میزان را نشان دادند. نظام کاشت پرنهاده در هر دو روش کاشت (سناریوهای SH و TH) کمترین بهره‌وری انرژی را نشان دادند. میانگین بهره‌وری انرژی در هشت سناریو برابر ۰/۲۳ کیلوگرم بر مگاژول بود. انرژی ویژه در هشت سناریو برابر ۴/۳۷ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد که بیشترین میزان آن در سناریوی SH و TH (به‌ترتیب ۴/۶۶ و ۴/۹۶ مگاژول بر کیلوگرم) مشاهده شد (جدول ۵). کمترین انرژی ویژه برابر ۴/۰۱ مگاژول بر کیلوگرم در سناریوی SC_I به‌دست آمد، که در مقایسه با نتایج Khan *et al.* (2010) در استرالیا کمتر بود. این موضوع به احتمال زیاد ناشی از بالا بودن انرژی ورودی در نظام‌های تولید ایران و منطقه است.

در رابطه با شاخص عملکرد انرژی خالص یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد میانگین این شاخص در هشت سناریو برابر ۱۶۸۹۳۷ مگاژول در هکتار بود (جدول ۵). بالاترین میزان عملکرد انرژی خالص در سناریوی SC_{II} (روش کاشت نیمه‌مکانیزه برای نظام کاشت رایج) به‌دست آمد. در واقع، شیوه صحیح مدیریت مزرعه در نظام کاشت حفاظتی و ورودی بالاتر نهاده‌ها در دیگر نظام‌های تولید منجر به چنین نتیجه‌ای شد. سناریوهای SC_I، SH و TC_{II} نیز به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین

عملکرد انرژی خالص در سناریوی TL (روش کاشت سنتی در نظام کاشت کم‌نهاده) حاصل شد. بنابر یافته‌ها می‌توان بیان کرد در روش کاشت نیمه‌مکانیزه، شاخص‌های بهره‌وری انرژی و عملکرد انرژی خالص در سناریوهای SL، SC_I، SC_{II} و SH بالاتر از سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH بود که این نتیجه نشان می‌دهد کاشت نیمه‌مکانیزه برنج از نظر شاخص‌های بیلان انرژی در بوم‌نظام شالیزار دارای اثر مطلوبتری است (جدول ۵). انرژی ویژه عکس بهره‌وری انرژی و میزان کمتر آن نشان می‌دهد که انرژی کمتری به ازای تولید هر واحد عملکرد مصرف شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان با کاهش مصرف سوخت و کاربرد ماشین‌آلات، بهره‌وری انرژی را بهبود بخشید. همچنین، استفاده از منبع‌های انرژی بصورت کارآمدتر با بهینه‌سازی مصرف انواع نهاده‌های به‌کار رفته از طریق انتخاب صحیح نوع، میزان، روش و زمان مصرف نهاده‌هایی مانند کودها و سم‌های شیمیایی نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی دارد (Dastan *et al.*, 2015a,b). در پژوهش‌های دیگری نیز کارایی انرژی در نظام‌های کاشت برنج در استرالیا و هند، میزان مشابهی را نشان داد (Iqbal, 2007; Khan *et al.*, 2010). بنابراین، با تجزیه و تحلیل انرژی ورودی در نظام‌های کاشت، می‌توان به میزان استفاده از تمام شکل‌های انرژی پی برد و از منبع‌های محدود نظیر زمین، آب و منبع‌های زیستی برای نسل‌های آینده حفاظت کرد (Dastan *et al.*, 2015a,b).

انتشار دی‌اکسید کربن و پتانسیل گرمایش جهانی

با توجه به نتایج جدول ۶، میانگین انتشار دی‌اکسید کربن در هشت سناریو برابر ۱۱۲۰/۳۷ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود که بذر، سوخت و ادوات و ماشین‌آلات (به‌ترتیب با ۳۷/۲۴، ۲۵/۰۳ و ۱۵/۹۹ درصد) بالاترین سهم را نشان دادند. نیتروژن و نیروی برق با ۸/۸۳ و ۶/۵ درصد در رتبه‌های چهارم و پنجم قرار گرفتند. میانگین انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به مصرف فسفر و پتاسیم نیز در هشت سناریو معادل ۰/۸ و ۰/۸۲ درصد بود. مصرف حشره‌کش و علف‌کش نیز سهمی معادل ۲/۰۷ و ۲/۲۶ درصدی از کل انتشار دی‌اکسید کربن در هشت سناریوی تولید را به خود اختصاص دادند. دیگر ورودی‌ها دارای سهم ناچیز در انتشار دی‌اکسید کربن بودند (جدول ۶).

بنابر یافته‌های جدول ۶، مشاهده می‌شود از نظر انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به سوخت مصرفی و ماشین‌آلات چهار سناریوی مربوط به روش کاشت نیمه‌مکانیزه (SL، SC_I، SC_{II} و SH) میزان بالاتری از سناریوهای روش کاشت سنتی (TL، TC_I، TC_{II} و TH) را به خود اختصاص دادند که میزان آن در نظام کاشت کم‌نهاده پایینتر از دیگر نظام‌های تولید بود. دامنه انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به سوخت مصرفی و ادوات و ماشین‌آلات در هشت سناریو به‌ترتیب بین ۲۴۲/۱۳ الی ۳۱۰/۸۶ و ۱۳۸/۸۱ الی ۲۲۳/۷۶ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود. ولی از نظر انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به بذر مصرفی چهار سناریوی مربوط به روش کاشت سنتی (سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH) با دامنه انتشار ۴۸۲/۰۸ الی ۵۰۴/۲۴ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار میزان بالاتری را در مقایسه با چهار سناریو در روش کاشت نیمه‌مکانیزه (سناریوهای SL، SC_I، SC_{II} و SH) با دامنه انتشار ۳۲۸/۰۹ الی ۳۴۶۵۰۴/۹ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار را نشان دادند که میزان آن در نظام تولید کم‌نهاده و حفاظتی پایینتر از نظام‌های کاشت رایج و پرنهاده بود. میزان انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به نیروی برق مصرفی در سناریوهای سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH بین ۶۲/۹۵ الی ۱۰۰/۵۶ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و در سناریوهای سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH بین ۵۳/۸۱ الی ۹۷/۶۵ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود که بیشترین میزان آن در هر دو روش کاشت در نظام تولید کم‌نهاده مشاهده شد (جدول ۶).

انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی و گوگرد نیز در سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH با اختلاف جزیی بالاتر از سناریوهای SL، SC_I، SC_{II} و SH بود که بیشترین میزان آن به‌ترتیب در نظام‌های تولید پرنهاده و رایج مشاهده شد و دو نظام کاشت حفاظتی و کم‌نهاده در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۶).

جدول ۶- انتشاری دی‌اکسید کربن (کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار) در سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح شده برنج در منطقه ساری
Table 6. CO2 emission (kg eq-CO_2 ha-1) in different production scenarios for improved rice cultivars in Sari region

انتشار دی‌اکسید کربن CO_2 emission	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH	میانگین Mean	اشتباه معیار RMSE	ضریب تغییرات CV (%)
سوخت Fuel	301.53 (28.45%)	310.86 (28.65%)	310.79 (27.46%)	308.51 (26.38%)	242.13 (23.42%)	256.52 (22.78%)	256.45 (22.12%)	256.44 (21.42%)	280.40 (25.03%)	10.58	10.67
ادوات و ماشین‌آلات Machinery	221.92 (20.94%)	223.76 (20.62%)	216.17 (19.10%)	210.22 (17.97%)	138.81 (13.42%)	141.67 (12.58%)	142.55 (12.30%)	138.39 (11.56%)	179.18 (15.99%)	14.75	23.29
بذر Seed	328.09 (30.95%)	343.35 (31.64%)	346.90 (30.65%)	341.23 (29.18%)	482.08 (46.63%)	491.46 (43.64%)	500.15 (43.14%)	504.24 (42.12%)	417.19 (37.24%)	29.40	19.91
نیروی برق Electricity	100.56 (9.49%)	62.95 (5.80%)	68.36 (6.04%)	63.47 (5.43%)	55.71 (5.39%)	97.65 (8.67%)	80.14 (6.91%)	53.81 (4.49%)	72.83 (6.50%)	6.41	24.88
نیتروژن N	55.90 (5.27%)	80.90 (7.45%)	114.93 (10.15%)	166.69 (14.25%)	48.77 (4.72%)	72.01 (6.39%)	101.90 (8.79%)	150.04 (12.53%)	98.89 (8.83%)	15.17	43.38
فسفر P_2O_5	5.10 (0.48%)	8.74 (0.81%)	10.22 (0.90%)	11.00 (0.94%)	6.36 (0.61%)	6.65 (0.59%)	9.55 (0.82%)	13.87 (1.16%)	8.94 (0.80%)	1.01	32
پتاسیم K_2O	4.47 (0.42%)	7.45 (0.69%)	9.17 (0.81%)	10.69 (0.91%)	3.82 (0.37%)	5.88 (0.52%)	10.57 (0.91%)	21.96 (1.83%)	9.25 (0.82%)	2.04	62.26
روی Zn	0.30 (0.03%)	0.16 (0.01%)	0.55 (0.05%)	0.49 (0.04%)	0.15 (0.01%)	0.65 (0.06%)	0.62 (0.05%)	0.60 (0.05%)	0.44 (0.04%)	0.07	46.93
گوگرد S	0.39 (0.04%)	0.70 (0.06%)	0.51 (0.04%)	0.45 (0.04%)	0.40 (0.04%)	0.78 (0.07%)	0.52 (0.04%)	0.72 (0.06%)	0.56 (0.05%)	0.05	27.29
علف‌کش Herbicide	17.39 (1.64%)	22.32 (2.06%)	23.25 (2.05%)	24.92 (2.13%)	25.37 (2.45%)	22.72 (2.02%)	24.81 (2.14%)	25.26 (2.11%)	23.25 (2.07%)	0.94	11.41
حشره‌کش Insecticide	3.55 (0.33%)	3.86 (0.35%)	4.10 (0.36%)	5.44 (0.46%)	3.90 (0.38%)	4.08 (0.36%)	3.92 (0.34%)	4.17 (0.35%)	4.13 (0.37%)	0.20	13.65
قارچ‌کش Fungicide	20.73 (1.96%)	20.16 (1.86%)	26.88 (2.37%)	26.46 (2.26%)	26.43 (2.56%)	26.04 (2.31%)	28.15 (2.43%)	27.63 (2.31%)	25.31 (2.26%)	1.09	12.18
پتانسیل گرمایش جهانی GWP	1059.93 (100%)	1085.21 (100%)	1131.83 (100%)	1169.57 (100%)	1033.93 (100%)	1126.11 (100%)	1159.33 (100%)	1197.13 (100%)	1120.37 (100%)	52.87	4.72

دامنه انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف نیتروژن در چهار سناریوی SL، SC_I، SC_{II} و SH در دامنه ۵۵/۹ الی ۱۶۶/۶۹ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و در سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH در دامنه ۴۸/۷۷ الی ۱۵۰/۰۴ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود. دامنه انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به مصرف فسفر و پتاسیم نیز در هشت سناریو در دامنه بین ۵/۱ الی ۱۳/۸۷ و ۴/۴۷ الی ۲۱/۹۶ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار به‌دست آمد. انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف روی و گوگرد ناچیز بود (جدول ۶).

انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف علف‌کش، قارچ‌کش و حشره‌کش در هشت سناریو میزان‌های مختلفی را نشان داد. دامنه انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف علف‌کش و قارچ‌کش در هشت سناریو بین ۱۷/۳۹ الی ۲۵/۲۶ و ۳/۵۵ الی ۴/۱۷ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود. انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف حشره‌کش در چهار سناریوی مربوط به روش کاشت

نیمه‌مکانیزه (SL، SC_I، SC_{II} و SH) در دامنه ۲۰/۱۶ الی ۲۶/۸۸ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و در سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH بین ۲۶/۰۴ الی ۲۸/۱۵ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار به‌دست آمد (جدول ۶).

پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح در هشت سناریوی تولید با میانگین ۱۱۲۰/۳۷ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار برآورد شد که سناریوی TH در رتبه اول و سناریوی SH در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۶). سناریوهای TC_{II} و SC_{II} در رتبه‌های سوم و چهارم قرار گرفتند. سناریوهای تولید مربوط به نظام کاشت حفاظتی در دو روش کاشت سنتی و نیمه‌مکانیزه دارای پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح به میزان ۱۱۲۶/۱۱ و ۱۰۸۵/۲۱ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بودند. کمترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح در سناریوهای SL و TL برآورد شد که مربوط به نظام کاشت کم‌نهاده در دو روش کاشت نیمه‌مکانیزه و سنتی بودند (جدول ۶).

میانگین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد وزن در هشت سناریو برابر ۱۷۵/۰۲ کیلوگرم معادل CO_2 در هر تن شلتوک حاصل شد. بالاترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد وزن شلتوک در سناریوی SL و TL به‌دست آمد. سناریوهای SC_I و TC_I در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که مربوط به نظام کاشت حفاظتی در دو روش کاشت بودند. کمترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد وزن شلتوک در سناریوهای تولید SH و TH مشاهده شد که مربوط به نظام کاشت پرنهاده در دو روش کاشت هستند (جدول ۶). پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی ورودی نیز با میانگین ۴۰/۱۷ کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول در هشت سناریو بود که در سناریوهای SH و TH کمترین و در سناریوهای تولید SL و TL بیشترین میزان را به خود اختصاص دادند (جدول ۷). میانگین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی خروجی برابر ۵/۶۹ کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول در هشت سناریو بود. از نظر پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی خروجی با واحد کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول تفاوت قابل توجهی بین سناریوهای مختلف مشاهده نشد که دامنه آن بین ۵/۴۳ الی ۵/۹۸ کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول بود (جدول ۷).

پایینتر بودن پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح و وزن در نظام کاشت کم‌نهاده و حفاظتی در مقایسه با دو نظام کاشت رایج و پرنهاده را می‌توان به مصرف کمتر انرژی‌های ورودی بویژه کود نیتروژن، سوخت و همچنین بالاتر بودن میزان تولید در این نظام کاشت نسبت داد. در همین رابطه Soltani *et al.* (2013) بیان کردند بیشترین و کمترین میزان پتانسیل گرمایش جهانی در واحد وزن به‌ترتیب برابر ۲۷۱/۵ و ۱۰۳/۸ کیلوگرم معادل CO_2 در هر تن محصول گندم، در واحد انرژی ورودی به‌ترتیب برابر ۴۴/۶ و ۳۴/۸ کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول و در واحد انرژی خروجی به‌ترتیب برابر ۱۱/۷ و ۴/۵ کیلوگرم معادل CO_2 در گیگاژول بود. افزون بر این، گسترش نظام‌های کشاورزی با کمترین انرژی ورودی می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی کمک شایانی کند (Dastan *et al.*, 2015b). Pazouki *et al.* (2017a,b) گزارش کردند در بین فعالیت‌های مختلف تولید گندم، انرژی ورودی نیتروژن در چهار سناریوی تولید با میانگین ۳۲۷/۰۴ کیلوگرم CO_2 در هکتار معادل با ۴۱/۴۲ درصد، بیشترین میزان را از نظر انتشار دی‌اکسیدکربن و گرمایش جهانی به خود اختصاص داد که در مقایسه با دیگر ورودی‌ها اختلاف قابل توجهی را نشان داد. بعد از کود نیتروژن، سوخت مصرفی بیشترین انتشار گاز گلخانه‌ای را نشان داد که میانگین آن در چهار سناریوی تولید برابر ۲۵۴/۰۳ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار با ۳۲/۱۷ درصد بود. همچنین، در گزارش آن‌ها بذر با میانگین ۸۷/۸۳ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار برابر ۱۱/۱۲ درصد از کل انتشار دی‌اکسیدکربن را در چهار سناریو به خود اختصاص دادند. ادوات و ماشین‌آلات با میانگین ۶۳/۹۸ کیلوگرم CO_2 در هکتار و ۸/۱ درصد در رتبه چهارم قرار گرفتند (Pazouki *et al.*, 2017a,b).

صورت‌برداری انتشار فلزهای سنگین در آب و خاک

نتایج صورت‌برداری در مورد انتشار فلزهای سنگین به تفکیک در آب و خاک (کادمیوم، مس، روی، سرب، نیکل، کروم و جیوه) در جدول ۸ نشان داده شده است. بنابر یافته‌ها میانگین انتشار کادمیوم در آب برابر ۲۳/۴ میلی‌گرم در هکتار بود که سناریوهای SL، TL و TC_I به‌ترتیب کمترین میزان انتشار را به خود اختصاص دادند و در دیگر سناریوهای تولید، تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد که دامنه آن بین ۲۳/۳ الی ۲۳/۹ میلی‌گرم در هکتار بود. میانگین انتشار مس و روی در آب برای هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۱۴۹۱/۴ و ۷۸۲۴/۷ میلی‌گرم در هکتار بود (جدول ۸).

جدول ۷- پتانسیل گرمایش جهانی بصورت کیلوگرم معادل CO_2 در واحد سطح، وزن، انرژی ورودی و انرژی خروجی در سناریوهای تولید برنج در منطقه ساری

Table 7. Global warming potential equal to kg CO_2 emission per unit area, per unit weight, per unit input and output energy for each rice production

پتانسیل گرمایش جهانی GWP	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH	میانگین Mean	اشتباه معیار RMSE	ضریب تغییرات CV (%)
در واحد سطح Per unit area (kg CO_2 ha^{-1})	1059.93	1085.21	1131.83	1169.57	1033.93	1126.11	1159.33	1197.13	1120.37	19.98	5.04
در واحد وزن Energy footprint (kg CO_2 t^{-1})	189.25	168.06	165.57	170.74	179.39	181.46	169.85	175.86	175.02	2.82	4.56
در واحد انرژی ورودی Per unit energy input (kg CO_2 GJ^{-1})	44.87	41.90	39.38	36.66	42.87	41.22	39.00	35.44	40.17	1.12	7.88
در واحد انرژی خروجی Per unit energy output (kg CO_2 GJ^{-1})	5.60	5.43	5.40	5.66	5.75	5.94	5.75	5.98	5.69	0.07	3.73

جدول ۸- میزان انتشار فلزهای سنگین در سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح شده برنج در منطقه ساری

Table 8. Heavy metal emission in different production scenarios for improved rice cultivars in Sari region

انتشار Emission		واحد Unit	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH	میانگین Mean	اشتباه معیار RMSE
In water	در آب											
Cd	کادمیوم	$Mg.ha^{-1}$	22.30	23.30	23.60	23.70	22.80	22.90	23.50	23.90	23.40	0.19
Cu	مس	$Mg.ha^{-1}$	1318.60	1471.80	1519.00	1549.20	1381.40	1415.20	1511.10	1591.80	1491.40	32.45
Zn	روی	$Mg.ha^{-1}$	5568.60	7501.30	8284.30	8856.90	6222.50	6705.30	8179.60	9805.10	7824.70	501.21
Pb	سرب	$Mg.ha^{-1}$	13.90	21.90	26.70	31.20	14.80	18.40	27.40	43.40	25.00	3.45
Cr	کروم	$Mg.ha^{-1}$	9433.10	9884.50	9984.10	10027.90	9640.20	9682.90	9945.10	10141.60	9902.30	83.47
In soil	در خاک											
Cd	کادمیوم	$Mg.ha^{-1}$	847.30	2757.16	3486.41	3966.60	1674.74	1743.47	3235.36	5664.99	2910.00	539.64
Cu	مس	$Mg.ha^{-1}$	-26891.80	-30432.60	-32222.60	-31594.10	-26314.20	-28281.60	-30904.30	-29785.30	-30007.30	769.22
Zn	روی	$Mg.ha^{-1}$	-46466.30	-64366.60	-73017.20	-73591.10	-48425.80	-55722.30	-69572.50	-70617.30	-64647	3904.49
Pb	سرب	$Mg.ha^{-1}$	163.29	272.06	323.29	411.81	201.55	244.42	369.19	684.53	330.44	58.07
Ni	نیکل	$Mg.ha^{-1}$	-418.26	571.98	990.54	1503.97	157.09	161.53	1018.60	2902.23	781.88	361.70
Cr	کروم	$Mg.ha^{-1}$	3076	9302.47	13143.03	15597.25	3665.52	4252.72	11783.39	24014.99	10604.42	2533.60
Hg	جیوه	$Mg.ha^{-1}$	-0.52	-0.69	-0.77	-0.76	-0.79	-0.92	-1.09	-1.09	-0.83	0.07

در مورد انتشار مس و روی در آب نیز کمترین میزان مربوط به سناریوی SL بود و سناریوی TL در رتبه بعدی قرار گرفت. بیشترین انتشار مس و روی نیز در سناریوی SH و TH مشاهده شد و سناریوی SC_{II} و TC_{II} در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. میانگین انتشار سرب و کروم در آب برای هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۲۵ و ۹۹۰۲/۳ میلی‌گرم در هکتار بود (جدول ۸). در بین سناریوهای تولید، بیشترین انتشار سرب در سناریوی TH حاصل شد و سناریوی SH با انتشار ۳۱/۲ میلی‌گرم در هکتار در رتبه دوم قرار گرفت. کمترین انتشار سرب در سناریوهای SL و TL حاصل شد. بیشترین انتشار سرب در سناریوهای SH و TH به‌دست آمد. سناریوهای مربوط به نظام کاشت رایج در هر دو روش کاشت (SC_{II} و TC_{II}) از این نظر در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین انتشار کروم در آب مربوط به سناریوی SL بود و سناریوهای TL و TC_{I} در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۸). با مقایسه روش‌های کاشت مشاهده می‌شود در هر دو روش بالاترین میزان انتشار فلزهای سنگین در آب مربوط به نظام کاشت پرنهاده (سناریوهای SH و TH) بود و نظام کاشت رایج و حفاظتی در رتبه‌های بعدی قرار گرفت. کمترین انتشار فلزهای سنگین موجود در آب نیز در هر دو روش کاشت مربوط به نظام کاشت کم‌نهاده (سناریوهای SL و TL) بود (جدول ۸).

در رابطه با انتشار فلزهای سنگین در خاک (کادمیوم، مس، روی، سرب، نیکل، کروم و جیوه) نیز یافته‌های جدول ۸ نشان می‌دهد از نظر انتشار مس، روی و جیوه هشت سناریو مقادیر منفی را نشان دادند که نشان‌دهنده جذب این عنصرها توسط گیاه است. میانگین انتشار مس، روی و جیوه در هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۳۰۰۰۷/۳-، ۶۴۶۴۷- و ۰/۸۳- میلی‌گرم در هکتار بود. ولی، انتشار نیکل تنها در سناریوی SL منفی بود و در دیگر سناریوها میزان مثبت را نشان داد که میانگین انتشار آن در هشت سناریو برابر ۷۸۱/۸۸ میلی‌گرم در هکتار به‌دست آمد. بیشترین انتشار نیکل مربوط به سناریوی TH بوده و سناریوی SH بود. سناریوهای تولید مربوط به نظام کاشت رایج و حفاظتی در هر دو روش به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که از این نظر روش کاشت سنتی میزان بالاتر را در مقایسه با روش نیمه‌مکانیزه به خود اختصاص داد (جدول ۸).

از نظر انتشار کادمیوم در خاک نیز سناریوها میزان مختلفی را نشان دادند میانگین آن در هشت سناریو برابر ۲۹۱۰ میلی‌گرم در هکتار بود. بیشترین انتشار کادمیوم در خاک مربوط به سناریوی TH بود و سناریوی IV در رتبه دوم قرار گرفت. سناریوهای SC_{II} و TC_{II} در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین انتشار کادمیوم (۸۴۷/۳ میلی‌گرم در هکتار) در سناریوی SL مشاهده شد و سناریوی TL در رتبه بعدی قرار گرفت (جدول ۸).

انتشار سرب در خاک با میانگین ۳۳۰/۴۴ میلی‌گرم در هکتار دارای تفاوت قابل ملاحظه بین سناریوهای تولید بود. بیشترین انتشار سرب در خاک مربوط به سناریوی TH بود و سناریوی SH در رتبه دوم قرار گرفت. کمترین انتشار سرب در سناریوی SL حاصل شد و سناریوی TL در رتبه قبل از آن قرار گرفت. سناریوهای تولید مربوط به نظام‌های کاشت رایج و حفاظتی در دو روش کاشت از نظر انتشار سرب در بین سناریوهای دیگر قرار گرفتند. همچنین، میانگین انتشار کروم در هشت سناریو برابر ۱۰۶۰۴/۴۲ میلی‌گرم در هکتار بود که کمترین میزان آن در سناریوی SL و TL به‌ترتیب برابر ۳۰۷۶ و ۳۶۶۵/۵۲ میلی‌گرم در هکتار بود. بیشترین انتشار کادمیوم در خاک در سناریوی TH مشاهده شد و سناریوی SH با انتشار ۱۵۵۹۷/۲۵ میلی‌گرم در هکتار کادمیوم در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۸).

یافته‌های این تحقیق در مورد انتشار فلزهای سنگین در خاک نشان می‌دهد نظام‌های حفاظتی و کم‌نهاده در هر دو روش کاشت، برتری زیادی در انتشار پایینتر فلزهای سنگین در خاک دارند که میزان آن در روش کاشت نیمه‌مکانیزه کمتر بود. Dastan *et al.* (2016b) با ارزیابی محیط‌زیستی به روش چرخه حیات در نظام‌های تولید حفاظتی، رایج و بهبودیافته برنج در منطقه نکا گزارش کردند از بین آلاینده‌های منتشر شده در هوا تنها تولید دی‌اکسید کربن میزان بالایی را به خود اختصاص داد و اکسید دی‌نیتروژن بعد از آن در رتبه دوم قرار گرفت. همچنین، نظام تولید رایج و فشرده از نظر مواد منتشر شده در

آب (کادمیوم، مس، روی، سرب و کروم) مقادیر یکسان را نشان دادند. ولی، انتشار همه این عنصرها در آب برای نظام تولید حفاظتی در مقایسه با دو نظام دیگر بسیار کمتر گزارش شد (Dastan *et al.*, 2016b). در نظام تولید حفاظتی انتشار همه فلزهای سنگین در خاک (کادمیوم، مس، روی، نیکل، کروم و جیوه) به غیر از سرب میزان منفی را نشان داد. در نظام تولید رایج و فشرده تنها انتشار مس، روی و جیوه در خاک منفی بود (Dastan *et al.*, 2016b). دیگر محققان با مقایسه گروهی بین ارقام برنج تاریخته و غیرتاریخته بیان کردند از نظر انتشار فلزهای سنگین در آب این دو گروه دارای ارقام کمابیش برابر بودند و دلیل اصلی آن را به ورودی‌های برابر در این بخش نسبت دادند. همچنین، میزان انتشار فلزهای سنگین به آب و خاک بر اساس برآورد سالانه رسوب این عنصرها و نیز مقدار ورود آن‌ها به خاک از محل کود، سم‌ها، بذر و رسوب و خروج آن‌ها از خاک توسط برداشت محصول، آبشویی و فرسایش محاسبه شد. برای مس، روی و جیوه میزان خروج از خاک بیش از ورود آن‌ها بود (Dastan *et al.*, 2016a).

بیلان کربن و شاخص پایداری

بنابر یافته‌ها، میانگین محتوای کربن دانه، کاه و کلش و ریشه در هشت سناریو به‌ترتیب برابر ۲۸۸۸/۲۴، ۳۷۰۳/۲۹ و ۱۳۱۸/۳۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۹). بیشترین محتوای کربن در هر سه اندام گیاهی برای هر دو روش کاشت در نظام کاشت پرنهاده و رایج به‌دست آمد و نظام کاشت حفاظتی در رتبه بعدی قرار گرفتند. کمترین میزان کربن دانه، کاه و کلش و ریشه در هر دو روش کاشت در نظام تولید کم‌نهاده (سناریوهای SL و TL) حاصل شد (جدول ۹).

جدول ۹- محتوای کربن اندام‌های گیاه برنج و شاخص پایداری در سناریوهای مختلف تولید ارقام اصلاح شده برنج در منطقه ساری

Table 9. The carbon content of rice organs and index of sustainability in different production scenarios for improved rice cultivars in Sari region

آیتم Item	واحد Unit	سناریو SL Scenario SL	سناریو SC_I Scenario SC_I	سناریو SC_{II} Scenario SC_{II}	سناریو SH Scenario SH	سناریو TL Scenario TL	سناریو TC_I Scenario TC_I	سناریو TC_{II} Scenario TC_{II}	سناریو TH Scenario TH	میانگین Mean	انحراف معیار RMSE	ضریب تغییرات CV (%)
محتوای کربن دانه Grain carbon content (C_P)	kg.ha^{-1}	2520.34	2905.82	3076.12	3082.50	2593.64	2792.65	3071.57	3063.33	2888.24	81.16	7.95
محتوای کربن ساقه Straw carbon content (C_S)	kg.ha^{-1}	3845.84	3787.54	3935.66	3830.54	3413.98	3546.82	3654.82	3611.14	3703.29	62.20	4.75
محتوای کربن ریشه Root carbon content (C_R)	kg.ha^{-1}	1273.24	1338.67	1402.36	1382.61	1201.52	1267.89	1345.28	1334.89	1318.31	23.46	5.03
کربن ریشه‌های خارج شده Extra root carbon (C_E)	kg.ha^{-1}	827.60	870.14	911.53	898.70	780.99	824.13	874.43	867.68	856.90	15.25	5.03
بهره‌وری خالص اولیه (کربن) Net Primary Production (NPP)	kg.ha^{-1}	8467	8902	9326	9194	7990	8432	8946	8877	8767	156.02	5.03
R_P	-	0.298	0.326	0.330	0.335	0.325	0.331	0.343	0.345	0.329	0.005	4.47
R_S	-	0.454	0.426	0.422	0.417	0.427	0.421	0.409	0.407	0.423	0.005	3.48
R_R	-	0.1504	0.1504	0.1504	0.1504	0.1504	0.1504	0.1504	0.1504	0.1504	0.00002	9.87
R_E	-	0.0977	0.0977	0.0977	0.0977	0.0977	0.0977	0.0977	0.0977	0.0977	0.00016	2.94
Ri	-	0.70	0.67	0.67	0.66	0.68	0.67	0.66	0.65	0.67	0.005	2.20
کل کربن ورودی Total input carbon	kg.ha^{-1}	1433.02	1470.81	1584.87	1697.48	1333.56	1537.11	1625.64	1763.58	1555.76	50.18	9.12
کل کربن خروجی Output carbon	kg.ha^{-1}	8467.02	8902.16	9325.66	9194.34	7990.13	8431.50	8946.09	8877.04	8766.74	156.02	5.03
کربن خالص Net carbon	kg.ha^{-1}	7034.00	7431.35	7740.79	7496.86	6656.57	6894.38	7320.45	7113.47	7210.98	124.74	4.89
شاخص پایداری Index of sustainability (Is)	-	4.91	5.05	4.88	4.42	4.99	4.86	4.50	4.03	4.66	0.13	7.62

ضرایب تخصیص نسبی کربن گیاه: RP = CP/NPP, RS = CS/NPP, RR = CR/NPP, RE = CE/NPP

*: Relative plant C allocation coefficients: RP = CP/NPP, RS = CS/NPP, RR = CR/NPP, RE = CE/NPP.

میانگین محتوای کربن دانه در چهار نظام کاشت برای روش کاشت سنتی (سناریوهای TL، TC_I، TC_{II} و TH) بالاتر از روش کاشت نیمه‌مکانیزه (SL، SC_I، SC_{II} و SH) بود، ولی محتوای کربن کاه و کلش و ریشه در نظام کاشت نیمه‌مکانیزه بالاتر از روش سنتی به‌دست آمد (جدول ۹). دامنه تغییرات میزان کربن دانه در هشت سناریو بین ۲۵۲۰/۳۴ الی ۳۰۸۲/۵ کیلوگرم در هکتار و میزان کربن کاه و کلش بین ۳۴۱۳/۹۸ الی ۳۹۳۵/۶۶ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. دامنه تغییرات کربن ریشه نیز در هشت سناریو بین ۱۲۰۱/۵۲ الی ۱۴۰۲/۳۶ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (جدول ۹). همچنین، میانگین محتوای کربن مربوط به ریشه‌های خارج شده از خاک برابر ۸۵۶/۹ کیلوگرم در هکتار بود که بیشترین میزان آن سناریوهای تولید SC_{II} و SH به‌دست آمد. کمترین میزان کربن ریشه‌های خارج شده در سناریوی TL مشاهده شد. دامنه تغییرات محتوای کربن ریشه‌های خارج شده بین ۷۸۰/۹۹ الی ۹۱۱/۵۳ کیلوگرم در هکتار بود. بنابر یافته‌ها، بیشترین سهم کربن ورودی در هشت سناریو مربوط به به کاه و کلش و دانه بود (جدول ۹).

میانگین بهره‌وری خالص اولیه کربن (NPP) در هشت سناریو برابر ۸۷۶۷ کیلوگرم در هکتار بود که دامنه تغییرات آن بین ۷۹۹۰ الی ۹۱۹۴ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (جدول ۹). بیشترین NPP در سناریوهای تولید مربوط به نظام‌های کاشت رایج و پرنهاده بود که میزان آن در روش کاشت نیمه‌مکانیزه بالاتر از روش سنتی بود. کمترین NPP در سناریوهای مربوط به نظام تولید کم‌نهاده بود که میزان آن در روش کاشت سنتی کمتر از روش نیمه‌مکانیزه برآورد شد (جدول ۹). بر اساس یافته‌ها، میانگین ورودی کربن نسبی (*Ri*) در هشت سناریوی تولید برابر ۰/۶۷ برآورد شد که دامنه تغییرات آن بین ۰/۶۵ الی ۰/۷ حاصل شد (جدول ۹). بر اساس یافته‌ها، در هر دو روش کاشت بیشترین ورودی کربن نسبی در سناریوهای تولید مربوط به نظام کاشت کم‌نهاده (SL و TL) و کمترین میزان آن در سناریوهای مربوط به نظام کاشت رایج (SC_{II} و TC_{II}) و پرنهاده (SH و TH) حاصل شد (جدول ۹). همچنین، میانگین کربن ورودی کل ناشی از مصرف نهاده‌های شیمیایی بود در هشت سناریو برابر ۱۵۵۵/۷۶ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. بیشترین کربن ورودی کل در سناریو TH و کمترین کربن ورودی کل در سناریوی TL حاصل شد. سناریوهای تولید SH و TC_{II} در رتبه‌های دوم و سوم از نظر کربن ورودی کل قرار گرفتند (جدول ۹).

میانگین نظر کربن خروجی در هشت سناریو نیز برابر ۸۷۶۶/۷۴ کیلوگرم در هکتار بود که دامنه تغییرات آن ۷۹۹۰/۱۳ الی ۹۱۹۴/۳۴ کیلوگرم در هکتار بود. سناریوهای تولید SC_{II}، SH، TC_{II} و SC_I در رتبه‌های اول تا چهارم از نظر کربن خروجی قرار گرفتند و سناریوی TL با ۷۹۹۰/۱۳ کیلوگرم کربن خروجی در رتبه آخر قرار گرفت (جدول ۹). بنابراین، میانگین کربن خالص که می‌تواند بعنوان پتانسیل ترسیب کربن نیز در نظر گرفته شود در هشت سناریو برابر ۷۲۱۰/۹۸ کیلوگرم در هکتار بود که بیشترین میزان آن در سناریوی SC_{II} برآورد شد. سناریوهای SH، SC_I و SC_{II} از نظر کربن خالص در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین کربن خالص در سناریوهای TL و TC_I به‌دست آمد (جدول ۹). از این‌رو، با توجه به کربن ورودی – خروجی و کربن خالص در هشت سناریو، میانگین شاخص پایداری نیز برابر ۴/۶۶ به‌دست آمد. بالاترین شاخص پایداری در سناریوی SC_I (۵/۰۵) مشاهده شد که مربوط به نظام کاشت حفاظتی بود. سناریوهای TL، SL، SC_{II} و TC_I از نظر شاخص پایداری در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین شاخص پایداری برابر ۴/۰۳ بود که در سناریوی TH مشاهده شد که مربوط به نظام کاشت پرنهاده بود (جدول ۹).

میزان شاخص پایداری در بوم‌نظام ذرت در آمریکا برابر ۵/۳ (Lal, 2004)، و در بوم‌نظام ذرت در ایران برابر ۲/۰۵ (Yousefi *et al.*, 2014) گزارش شد. بنابر یافته‌ها،

مصرف بالای نهاده‌های شیمیایی از قبیل سوخت فسیلی و کود در نظام کاشت پرنهاده و رایج منجر به کاهش شاخص پایداری در مقایسه با نظام‌های کاشت کم‌نهاده و حفاظتی شد. بنابراین، برای افزایش شاخص پایداری بوم‌نظام‌ها و همچنین کاهش تأثیرهای سوء محیط‌زیستی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، اصلاح الگوی مصرف نهاده‌های شیمیایی و کاهش مصرف منبع‌های انرژی تجدیدناپذیر ضروری است که نظام کاشت حفاظتی بدلیل بیشترین پایداری و کمترین انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی به هدف‌های کشاورزی پایداری نزدیکتر بود. Alizadeh *et al.* (2017) با ارزیابی بیلان کربن و انتشار دی‌اکسید کربن از سطح خاک در نظام‌های زراعی بدون خاک‌ورزی در مشهد گزارش کردند که انتشار کربن با افزایش بقایای گیاهی در سطح خاک افزایش یافت. همچنین، با افزایش میزان بقایای گیاهی به‌دلیل بالا رفتن میزان کربن ورودی به خاک بیلان کربن خاک مثبت‌تر شد. افزون بر این، شرایط اقلیمی، دما و نور دارای نقش مستقیم بر بیلان کربن در بوم‌نظام‌ها می‌گذارد (Alizadeh *et al.*, 2013). به‌طور کلی هر عاملی که فتوسنتز و تنفس را تحت تأثیر قرار دهد بر بیلان کربن مؤثر است، از سوی دیگر مدیریت مزرعه نیز بر بیلان کربن خاک مؤثر است. در گزارش‌های دیگر محققان بیان کردند که در آزمایش سه ساله میزان کربن آلی خاک در نظام‌های کم خاک‌ورزی نسبت به نظام‌های شخم رایج افزایش یافت و این امر به‌دلیل مثبت بودن بیلان کربن خاک در نتیجه حفظ بیشتر بقایای گیاهی بود (Alluvione *et al.*, 2013; Alvarez *et al.*, 1995).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش جریان انرژی، انتشار فلزهای سنگین و گازهای گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی و بیلان کربن در چهار نظام تولید برنج در دو روش کاشت نیمه‌مکانیزه و سنتی ارزیابی شد که هر یک از آن‌ها بعنوان یک سناریوی تولید در نظر گرفته شدند. تاکنون گزارشی در این زمینه برای سناریوهای مختلف تولید برنج در ایران گزارش نشد. از این‌رو، یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای افزایش پایداری بوم‌نظام‌ها و همچنین کاهش تأثیرهای سوء محیط‌زیستی ناشی از مصرف نهاده‌های شیمیایی و دستیابی به هدف‌های کشاورزی پایدار بسیار مؤثر باشد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد سهم انواع انرژی ورودی و خروجی در بین سناریوهای تولید برنج متفاوت است. دلیل اصلی تفاوت مشاهده شده در میزان انرژی ورودی و خروجی، تنوع در مدیریت و میزان مصرف نهاده‌ها بود. بنابر یافته‌ها، سهم مصرف انرژی تجدیدپذیر در منطقه پایین بود که با لحاظ کردن رویکردهای نظام کاشت حفاظتی می‌توان سهم مصرف انرژی تجدیدپذیر را افزایش داد. این مسأله از دیدگاه بوم‌شناختی اهمیت قابل توجهی دارد، زیرا منبع انرژی‌های تجدیدناپذیر بطور عمده سوخت‌های فسیلی هستند که تکیه بر این منبع‌ها در آینده همراه با بحران‌های زیادی است.

بطور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد برای زراعت برنج در منطقه بیشترین نهاده مصرفی و انرژی ورودی آن مربوط به کود شیمیایی نیتروژن، سوخت و بذر مصرفی است که دلیل عمده آن نیز سنتی بودن شیوه تولید برنج توسط کشاورزان در منطقه است. طبق یافته‌ها، کشاورزان در نظام کاشت پرنهاده و رایج منطقه برای تقویت مزرعه از میزان بسیار زیاد کودهای شیمیایی و به شیوه‌ای نادرست استفاده کردند و به مواد آلی و منبع‌های زیستی توجه نداشتند که به افزایش مصرف انرژی تجدیدناپذیر، انتشار بالاتر گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه کاهش شاخص پایداری منجر شد. از این‌رو، مدیریت صحیح مصرف کود شیمیایی نیتروژن و دیگر نهاده‌های انرژی‌بر در کاهش مصرف انرژی تأثیر زیادی دارد که به جهت کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و پتانسیل گرمایش جهانی مؤثر خواهد بود. همچنین، با مصرف کودهای آلی، حفاظت گیاه و کنترل زیستی، می‌توان سهم انرژی تجدیدناپذیر مصرفی

را کاهش داد که می‌تواند برای پایداری بوم‌نظام‌های تولید برنج در منطقه مطلوب باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان با کاهش مصرف نیتروژن و سوخت و همچنین مکانیزه کردن زراعت برنج، بهره‌وری را بهبود بخشید.

بر اساس یافته‌ها می‌توان بیان کرد کشاورزان منطقه بهره‌وری اقتصادی در تولید برنج را در نظر گرفته و کمتر به پایداری محیط‌زیستی توجه دارند. از این‌رو، نظام‌های کاشت کم‌نهاده و حفاظتی دارای سطح زیر کشت پایینتر در مزرعه‌های مورد بررسی بودند و به همین نسبت کل سطح زیر کشت منطقه از الگوی انتخاب شده تبعیت می‌کند. به‌نظر می‌رسد با کاهش یارانه دولتی مربوط به نهاده‌های شیمیایی و ترویج و فرهنگ‌سازی نظام‌های کاشت حفاظتی بتوان خلاء ایجاد شده را جبران کرد تا بهره‌وری اقتصادی و محیط‌زیستی در زراعت برنج کشاورزان در منطقه افزایش یابد.

پی‌نوشت‌ها

1 Semi-mechanized Low input
2 Semi-mechanized Conservation
3 Semi-mechanized Conventional
4 Semi-mechanized High input
5 Traditional Low input
6 Traditional Conservation
7 Traditional Conventional
8 Traditional High input
9 Net primary production
10 Global warming potential
11 System of rice intensification
12 Life cycle assessment

منابع

Acaroglu, M. and Aksoy, A.S., 2005. The cultivation and energy balance of Miscanthus_giganteus production in Turkey. Biomass Bioenergy. 29, 42–48.

Akcaoz, H., Ozcatalbas, O. and Kizilay, H., 2009. Analysis of energy use for pomegranate production in Turkey. Journal of Food Agriculture and Environment. 7, 475-480.

Alizadeh, Y., Kocheki, A. and Nasiri Mahallati, M., 2013. Assessment of greenhouse gases emission, carbon budgets, net primary production (NPP) and Net ecosystem production (NEP) in agroecosystems of Khorasan province. Ph.D. Thesis. University of Ferdowsi, Mashhad, Iran.

Alizadeh, Y., Koocheki A. and Nasiri Mahallati, M., 2017. Study of carbon budget and CO_2 emissions rate from soil surface in no tillage systems. Journal of Agroecology. 7 (2), 107-118.

Alluvione, F., Fiorentino, N., Bertora, C., Zavattaro, L., Fagnano, M., Quaglietta Chiarandà, F. and Grignani, C., 2013. Short-term crop and soil response to C-friendly strategies in two contrasting environments. European Journal of Agronomy. 45, 114–123.

Alvarez, R., Santanatoglia, O.J. and Garcia, R., 1995. Soil respiration and carbon inputs from crops in a wheat-soybean rotation under different tillage systems. Soil Use Managment. 11, 45-50.

Argiro, V., Strapatsa, A., George, D., Nanos, A. and Tsatsarelis Constantinos, A., 2006. Energy flow for integrated apple production in Greece. Agriculture, Ecosystem and Environment. 116, 176–80.

Beheshti Tabar, I., Keyhani, A. and Rafiee, S., 2010. Energy balance in Iran's Agronomy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14, 849-855.

Bolinder, M.A., Janzen, H.H., Gregorich, E.G., Angers, D.A. and Vanden Bygaart, A.J., 2007. An approach for estimating net primary productivity

and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. Agriculture, Ecosystem and Environment. 118, 29–42.

Dalgaard, T., Halberg, N. and Porter, J.R., 2001. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. Agriculture, Ecosystems and Environment. 87, 51-65.

Dastan, S., Ghareyazie, B., Mortazavi, E. and Abdollahi, S., 2016a. The Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Transgenic and Non-transgenic Rice Cultivars. In Proceedings 2nd International and 14th National Iranian Crop Science Congress.. 30th Aug – 1st Sep, Rasht, Iran.

Dastan, S., Ghareyazie, B., Mortazavi, E., Mohsenpour, M. and Abdollahi, S., 2017a. The Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Transgenic and Non-transgenic Rice Cultivars. In Proceedings 2nd International and 10th National Biotechnology Congress of Islamic Republic of Iran. 29th- 31th Aug, Karaj, Iran.

Dastan, S., Ghareyazie, B., Soltani, A. and Omidi, M., 2016b. The Life Cycle Assessment (LCA) of Rice in Conventional, Intensive and Conservation systems. In Proceedings 2nd International and 14th National Iranian Crop Science Congress. Aug. 30th- 1st Sep, Rasht, Iran.

Dastan, S., Noormohamadi, G., Madani, H. and Soltani, A., 2015a. Analysis of energy indices in rice production systems in the Neka region. Journal of Environmental Sciences. 13(1), 53-66. (In Persian with English abstract).

Dastan, S., Soltani, A. and Alimagham, M., 2017b. Documenting the process of local rice cultivars production in two conventional and semi-mechanized planting methods in Mazandaran province. Cereal Research. 7(4), 485-502. (In Persian with English abstract).

Dastan, S., Soltani, A., Noormohamadi, G. and Madani, H., 2015b. CO2 emission and global warming potential (GWP) of energy consumption in paddy field production systems. Journal of Agroecology 6(4), 823-835. (In Persian with English abstract).

Dastan, S., Soltani, A., Noormohamadi, G., Madani, H. and Yadi, R., 2016c. Estimation of the carbon footprint and global warming potential in rice production systems. Journal of Environmental Sciences. 14(1), 19-22. (In Persian with English abstract).

Deike, S., Pallutt, B. and Christen, O., 2008. Investigation on the energy efficiency of organic and integrated farming with specific emphasis on pesticide use intensity. European Journal of Agronomy. 28, 461-470.

Demircan, V., Ekinci, K., Keener, H.M., Akbolat, D. and Ekinci, C., 2006. Energy and economic analysis of sweet cherry production in Turkey- a case study from Isparta province. Energy Conversion and Management. 47, 1761-1769.

Dubey, A. and Lal, R., 2009. Carbon footprint and sustainability of agriculture production systems in Panjab, India, and Ohio, USA. Journal of Crop Improvement. 23, 332-350.

Dyer, J.A. and Desjardins, R.L., 2003. Simulated farm fieldwork, energy consumption and related greenhouse gas emissions in Canada. Biosystems Engineering. 85 (4), 503-513.

Dyer, J.A., Desjardins, R.L., 2006. Carbon dioxide emissions associated with the manufacturing of tractors and farm machinery in Canada. Biosystem Engineering. 93 (1), 107-118.

Esengun, K., Gunduz, O. and Erdal, G., 2007. Input-output energy analysis in dry apricot production of Turkey. Energy Conversation and

Management. 48, 592-598.

Gan, Y., Liang, C., Hamel, C., Cutforth, H. and Wang, H., 2011. Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas. A review. Agronomy for Sustainable Development. 31(4), 643-656.

Hatirli, S.A., Ozkan, B. and Fert, C., 2006. Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. Renewable Energy Journal. 31, 427-438.

Heijungs, R., Guinee, A.J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A. and Wegener Sleeswijk. A., 1992. Milieugerichte Leven Cycles aAnalyses van Production Prt 1 and 2. Leiden University Netherlands: Centre for Environmental Science (CML), [in Dutch].

IPCC., 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK 996 pp.

Iqbal, T., 2007. Energy input and output for production of Boron rice in Bangladesh. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. 7, 2717-2722.

Iran's Ministry of Oil., 2008. Hydrocarbon balance of Iran in 2007. Tehran, Iran: Institute of International Energy Studies. Tehran, Iran 549 pp. (In Persian with English abstract).

Kaltsas, A.M., Mamolos, A.P., Tsatsarelis, C.A., Nanos, G.D. and Kalburtji, K.L., 2007. Energy budget in organic and conventional olive groves. Agriculture, Ecosystems and Environment. 122(2), 243-251.

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

Lal, R., 2004. Carbon emissions from farm operations. Environment International. 30, 981-990.

Malmuti, M., West, J.S., Watts, J., Gladders, P. and Fitt, B.D.L., 2009. Controlling crop disease contributes to both food security and climate change mitigation. International Journal of Agricultural Sustainability. 7(3),189-202.

Ozkan, B., Akcaoz, H. and Fert, C., 2004. Energy input–output analysis in Turkish agriculture. Renew. Energy. 29, 39-51.

Ozkan, B., Fert, C. and Karadeniz, C.F., 2007. Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production. Energy. 32, 1500-1504.

Pathak, H. and Wassmann, R., 2007. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture: I. Generation of technical coefficients. Agricultural Systems. 94, 807-825.

Pazouki, T.M., Ajam Noroui, H., Ghanbari Malidareh, A., Dadashi, M.R. and Dastan, S., 2017a. Energy and CO_2 emission assessment of wheat (Triticum aestivum L.) production scenarios in central areas of Mazandaran province, Iran. Applied Ecology and Environmental Research. 15(4), 143-161.

Pazouki, T.M., Ajam Noroui, H., Ghanbari Malidareh, A., Dadashi, M.R. and Dastan, S., 2017b. Evaluation of Energy Balance and CO_2 Emissions of Wheat Production in Central Areas of Mazandaran Province. Journal of Agroecology. 9(4), DOI: 10.22067/jag.v9i4.54771. (In Persian with English abstract).

Peyman, M.H., Rouhi, R. and Alizadeh, M.R.,

2005. Determine of energy use in two semi-mechanized and conventional methods for rice production (case study in Guilan province). Journal of Agricultural and Engineering Research. 6(22), 67-80. (In Persian with English abstract).

Rajabi, M.H., Soltani, A., Zeinali, E. and Soltani, E., 2012. Evaluation of energy use in wheat production in Gorgan. Journal of Plant Production. 19(3), 143-171. (In Persian with English abstract).

Robertson, G.P., Paul, E.A. and Harwood, R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. Science. 289, 1922-1925.

SimaPro., 2011. Software and Database Manual. Pré Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., Mccarl, B., Ogle, S., O'Mar, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U. and Towprayoon, S., 2007. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. Agriculture, Ecosystems and Environment. 118, 6-28.

Soltani, A., Rajabi, M.H., Zeinali, E. and Soltani, E., 2013. Energy inputs and greenhouse gases emissions in wheat production in Gorgan, Iran. Energy. 50, 54-61.

Tzilivakis, J., Warner, D.J., May, M., Lewis, K.A. and Jaggard, K., 2005. An assessment of the energy inputs and greenhouse gas emission in sugar beet (Beta vulgaris) production in the UK. Agricultural Systems. 85, 101-119.

Williams, A.G., Audsley, E. and Sandars, D.L., 2006. Determining the Environmental Burdens and Resource Use in the Production of Agricultural and Horticultural Commodities. Defra Project Report IS0205. Cranfield University, DEFRA, Bedford, UK.

Yousefi, M., Mahdavi Damghani, A.M. and Khoramivafa, M. 2014. Energy consumption, greenhouse gas emissions and assessment of sustainability index in corn agroecosystems of Iran. Science of the Total Environment. 493, 330–335.

Environmental Sciences Vol.16 / No.4 / Winter 2019

187-212

Assessment of energy flow, carbon saving, and greenhouse gas emission in rice production scenarios

Mohammad Hosein Torabi[1], Afshin Soltani[2], Salman Dastan[3*] and Hosein Ajam Norouzi[1]

[1] Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Gorgan Branch, Gorgan, Iran

[2] Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[3] Department of Genetic Engineering and Biodafety, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Karaj, Iran

Received: 2018.02.08 Accepted: 2018.12.10

Torabi, M.H., Soltani, A., Dastan, S. and Ajam Norouzi, H., 2019. Assessment of energy flow, carbon saving, and greenhouse gas emission in rice production scenarios. Environmental Sciences. 16(4): 187-212.

Introduction: Environmental assessment of the life cycle of crops in production systems is an accepted method for achieving agricultural sustainability. Moreover, the agricultural sector has a significant contribution to greenhouse gas emissions and global warming. Hence, improving agricultural operations is an appropriate way to mitigate the effects of climate change. Therefore, the aim of this research was the environmental assessment of different scenarios of the production of improved rice cultivars.

Material and methods: After preliminary evaluation and consultation with rice specialists, 100 paddy fields were selected for semi-mechanized planting method and 100 paddy fields for traditional planting method in Sari region from 2015 to 2016. After recording the data, each planting method was converted into four planting systems based on agronomic management and input consumption, which formed a total of eight scenarios. Four scenarios of the semi-mechanized method were systems of low-input (SL), conservation (SC_I), conventional (SC_{II}) and high-input (SH). Four scenarios of the traditional method were systems of low-input (TL), conservation (TC_I), conventional (TC_{II}) and high-input (TH).

Results and discussion: The results indicated that the average paddy yield in eight scenarios was 6418 $kg.ha^{-1}$. The average input energy in eight scenarios was 28138.93 $MJ.ha^{-1}$, which contained 45.44% renewable (biologic) energy and 54.56% non-renewable (industrial) energy. The highest input energy was observed in scenarios IV and VIII, which was related to the SH in both planting methods. The average output energy in eight scenarios was equal to 197076 $MJ.ha^{-1}$. The highest output energy was obtained in scenarios III, IV, VII and VIII. The average energy productivity in the eight scenarios was equal to 0.23 $kg.MJ^{-1}$ that the least amount was obtained in both planting methods and the other scenarios were on the same level. The average CO_2

* Corresponding Author. *E-mail Address*: dastan@abrii.ac.ir

emissions in all eight scenarios were 1120.37 kg CO_2.eq ha^{-1}, which had the highest share related to seed, fuel, and machinery. In terms of global warming potential per unit area, scenario VIII was ranked first and scenario IV ranked second. The highest global warming potential per grain weight and GWP per input energy were achieved in scenarios I and V. The highest heavy metal emission into water and soil was observed in the SH and SCII, respectively. The highest net primary productivity (NPP) in production scenarios was related to SC_{II} and SH, which was higher in the semi-mechanized method than the traditional method. In both planting methods, the most relative carbon inputs (Ri) were obtained in scenarios of the SH (I and V). With regard to input-output carbon and net carbon in eight scenarios, the average sustainability index was 4.66. The highest sustainability index was observed in scenario II (5.05), which was related to the conservation system. The scenarios V, I, III and VI were next ranked in terms of the sustainability index. In fact, the correct management of the paddy field in the SC_I has led to a reduction in emissions of environmental pollutants.

Conclusion: According to the findings, SL and SC_I were closer to sustainable development indicators in both methods. Furthermore, the economic efficiency of rice production was more important to farmers than environmental sustainability and energy efficiency. Hence, using the findings of this research can be very effective in increasing environmental sustainability and reducing the environmental impacts of chemical inputs and achieving agricultural sustainability.

Keywords: Climate change, Environmental pollutant, Greenhouse gas emissions, Planting system, Rice.