



تخمین ردپای کربن و پتانسیل گرمایش جهانی در نظام‌های تولید برنج

سلمان داستان^{۱*}، افشین سلطانی^۲، قربان نورمحمدی^۳، حمید مدنی^۴ و رضا یدی^۵

^۱ پژوهشگر پسادکتری، بخش کشت بافت و انتقال ژن، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، کرج
^۲ استاد گروه زراعت، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان
^۳ استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران
^۴ دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرقدس، اراک
^۵ مربی گروه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور اراک، اراک

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۲۲

Estimation of the Carbon Footprint and Global Warming Potential in Rice Production Systems

Salman Dastan^{1*}, Afshin Soltani², Ghorban Noormohamadi³, Hamid Madani⁴ & Reza Yadi⁵

¹ Postdoctoral Research Scholar, Department of Tissue Culture and Gene Transition, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Karaj

² Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan

³ Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran

⁴ Associated Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, ShahreQods Branch, Islamic Azad University, Arak

⁵ Instructor, Department of Agricultural Science, Faculty of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Arak

Abstract

Optimal management approaches can be adopted in order to increase crop productivity and lower the carbon footprint of grain products. The objective of this study was to estimate the carbon (C) footprint and global warming potential of rice production systems. In this experiment, rice production systems (including SRI, improved and conventional) were studied. All activities, field operations and data in production methods and at different input rates were monitored and recorded during 2012. Results showed that average GWP across production systems was equal to 2803.25 kg CO₂-eq ha⁻¹. The highest and least GWP were observed in the SRI and conventional systems, respectively. GWP per unit energy input was the least and most in SRI and conventional systems, respectively. Also, the SRI and conventional systems had the maximum and minimum GWP per unit energy output, respectively. SRI and conventional system had the greatest and least GWP per unit energy output, respectively. Therefore, the optimal management approach found in SRI resulted in a reduction in GHGs, GWP and the carbon footprint.

Keywords: Carbon Footprint, Climate Change, Environment, Greenhouse Gas (GHG), Rice.

چکیده

مدیریت صحیح می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری و کاهش ردپای کربن شود. هدف از این پژوهش، تخمین ردپای کربن و گرمایش جهانی در نظام‌های تولید برنج است. در این آزمایش نظام‌های کاشت فشرده (SRI)، بهبودیافته و رایج منطقه (سنتی) در مزرعه واقع در شهرستان نکا بررسی شدند. تمامی عملیات زراعی و اطلاعات مربوط به روش‌های تولیدی و مقادیر مختلف مصرف نهاده‌ها (ورودی‌ها) در سال ۱۳۹۱ ثبت و بررسی شدند. نتایج نشان داد که متوسط پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) در سه نظام کاشت برابر ۲۸۰۳/۲۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بود. بیشترین و کمترین GWP در نظام‌های کاشت فشرده و رایج منطقه مشاهده شد. GWP در واحد انرژی ورودی در نظام کاشت فشرده حداقل و در نظام کاشت رایج منطقه حداکثر بود. نظام‌های کاشت رایج منطقه و فشرده به ترتیب بیشترین و کمترین GWP در واحد انرژی خروجی را داشتند. کمترین و بیشترین ردپای کربن در واحد وزن نیز در نظام‌های کاشت فشرده و رایج منطقه به دست آمد. بنابراین، شیوه صحیح مدیریت مزرعه در نظام تولید فشرده به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی و ردپای کربن منجر شد.

کلمات کلیدی: برنج، تغییر اقلیم، ردپای کربن، گازهای گلخانه‌ای، محیط زیست.

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

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسأله‌هایی که امروزه توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده پدیده تغییر اقلیم^۱ و گرم شدن جهان^۲ در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای^۳ است که جهان را در آستانه یک فاجعه بزرگ انسانی و زیست‌محیطی قرار داده است [۱]. از دیدگاه بوم‌شناختی، ردپای کربن^۴ عبارت است از نسبت مقدار کل گازهای گلخانه‌ای تولیدشده (کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) به مقدار محصول تولیدشده (کیلوگرم در هکتار) که به صورت کیلوگرم معادل CO₂ بر کیلوگرم محصول بیان می‌شود [۲، ۳ و ۴].

عملیات کشاورزی با احتراق سوخت‌های فسیلی تأثیر عمده‌ای بر کربن جهانی و چرخه نیتروژن دارد [۱ و ۵]. کشاورزان با اتخاذ مدیریت مناسب می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهند که نتیجه آن کاهش ردپای کربن تولیدات کشاورزی در مزرعه است [۲]. سهم فعالیت‌های کشاورزی در تولید محصول برای ردپای کربن توسط برخی محققان محاسبه شده است [۲، ۶، ۷ و ۸]. نتایج نشان داد که بخش قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشاورزی می‌تواند از طریق بهبود شیوه‌های زراعی کاهش یابد [۸]، و افزایش عملکرد از باقی‌مانده کربن می‌تواند به افزایش ذخیره کربن خاک منجر شود [۲ و ۵]. پایداری در تولید تا حد زیادی به ردپای کربن و عملکرد بستگی دارد [۹]. این نشان می‌دهد که حدود ۷۵ درصد از کل ردپای کربن در تولید محصول به ورودی کود نیتروژن بستگی دارد [۶]. به عبارت دیگر، نیتروژن ورودی برای پایداری در عملکرد ضروری است. این نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها به افزایش بهره‌وری و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. CH₄ و N₂O از گازهای گلخانه‌ای کلیدی با پتانسیل گرمایش جهانی بالا محسوب می‌شوند [۱]. کشت برنج هر دو گاز CH₄ و N₂O را تولید می‌کند. انتشار سالانه جهانی CH₄ در شالیزار حدود ۳۱ تا ۱۱۲ تترagram در سال تخمین زده شد که تقریباً ۱۵ تا ۱۹ درصد از انتشار جهانی CH₄ است [۱]. دیگر محققان میزان انتشار CH₄ در اراضی شالیزاری را حدود ۲۰ تا ۴۰ تترagram در سال تخمین زدند [۱۰ و ۱۱]، که حدود ۱۱ درصد از کل انتشار سالانه CH₄ است [۱۲]. CH₄ نخستین گاز گلخانه‌ای در نظام غرقابی کاشت برنج محسوب می‌شود. بنابراین، آگاه بودن از چگونگی تولید CH₄ برای محاسبه گازهای گلخانه‌ای

در شالیزارها مهم است. انتشار کل CH₄ در اراضی شالیزاری از طریق تولید، اکسیداسیون و انتقال CH₄ تعیین می‌شود [۱۳]. روش‌های زیادی برای کنترل و کاهش انتشار CH₄ پیشنهاد شده است، از جمله می‌توان به تنوع در کاربرد کود، مدیریت رژیم آبیاری و اصلاح خاک به وسیله مواد آلی اشاره کرد [۱۴]. از این رو، یک‌بار زه‌کشی و خروج آب از مزارع برنج می‌تواند انتشار CH₄ را حدود ۴۰ درصد کاهش دهد [۱۵]. آبیاری تناوبی به میزان قابل توجهی میزان انتشار گاز گلخانه‌ای CH₄ در اراضی شالیزاری را کاهش می‌دهد [۱۶]. انتشار CH₄ در یک آزمایش در طول فصل مرطوب در سه نظام کاشت سنتی، SRI و دوگانه در مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات کشاورزی دهلی‌نو هند برآورد شد. نتایج نشان داد که در نظام کاشت سنتی بیشترین میزان انتشار CH₄ برابر ۳۲/۳۳ کیلوگرم در هکتار بود و میزان انتشار CH₄ در SRI و کشت دوگانه به ترتیب برابر ۱۹/۹۳ و ۲۹/۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد [۱۷]. بیشترین مقدار GWP در نظام کاشت سنتی ۸۰۴/۴ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار و کمترین مقدار GWP برابر ۴۹۸/۲۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار در نظام کاشت SRI بود [۱۷]. در حالی که انتشار N₂O بیشتر در زمین‌های بدون آبیاری است، با این حال تحقیقات متعددی نشان می‌دهد که N₂O در زمین‌های نیمه‌مرطوب زه‌کشی شده و قسمت‌های خشک و مرطوب شالیزار نیز انتشار می‌یابد [۱۸]. در حالی که منابع زیادی برای ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش‌های مختلف کاشت و تأثیر آن بر تغییر جهانی اقلیم وجود دارد، ولی بررسی‌های اندکی در مورد اثر متقابل روش‌های کاشت با بهره‌وری محصول و ردپای کربن وجود دارد. بنابراین، هدف از اجرای این تحقیق تخمین ردپای کربن و گرمایش جهانی در نظام‌های کاشت برنج بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان نکا به فاصله ۲۵ کیلومتری ایستگاه تحقیقات زراعی بایع کلا در سال ۱۳۹۱ اجرا شد. شهرستان نکا در قسمت شمالی رشته‌کوه‌های البرز و جنوب دریای خزر واقع در شمال ایران قرار دارد. محل اجرای آزمایش در امتداد ساحل دریای خزر

هکتار) و سولفات پتاسیم (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) استفاده شد. کاربرد ۵۰ درصد اوره و پتاسیم و تمامی کود فسفر به صورت پایه انجام شد. ۵۰ درصد پتاسیم و ۲۵ درصد اوره به صورت سرک در مرحله ۳۰ روز بعد از نشاکاری به کار برده شد. ۲۵ درصد اوره باقی مانده در مرحله ظهور خوشه مصرف شد. برای کنترل علف‌های هرز یک بار از علف‌کش پیش‌رویشی بوتاکلر به مقدار ۴/۲ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار و دوبار وجین دستی در ۲۸ و ۴۵ روز بعد از نشاکاری استفاده شد. مبارزه با آفات نیز به وسیله حشره کش دیازینون (گرانول ۵ درصد به مقدار ۶ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار) و کنترل بلاست توسط قارچ‌کش بیم (تری‌سیکلازول) به مقدار ۰/۷۵ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار در مرحله ۳۰ درصد خوشه‌دهی انجام شد.

(۳) نظام کاشت فشرد (SRI): در طراحی این نظام کاشت سعی شد بهترین شیوه مدیریت عملیات زراعی با توجه به شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های خاک و فرهنگ کشاورزان منطقه اجرا شود. برای این منظور، در شیوه خزانه‌گیری تغییر ایجاد شد و از خزانه نشای جعبه‌ای پلاستیکی استاندارد مخصوص ماشین نشاکار استفاده شد. از نشاهای جوان ۲۰ روزه (۳-۴ برگی) و تعداد دو نشا در هر کپه با آرایش کاشت مربعی با فواصل ۲۰×۲۰ سانتی‌متر به صورت مکانیزه و به وسیله ماشین نشاکار استفاده شد. در این روش از زمان نشاکاری تا دو هفته بعد از آن، مزرعه به حالت غرقاب نگه داشته شد. سپس تا دو هفته قبل از برداشت اقدام به آبیاری تناوبی شد، به نحوی که خاک مزرعه همیشه مرطوب بود. کود شیمیایی نیتروژن از منبع اوره (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و کود دامی به میزان ۱۰ تن در هکتار به صورت پایه قبل از نشاکاری مصرف شد (جدول ۱). ۵۰ درصد اوره به صورت پایه و ۵۰ درصد باقی مانده در مرحله ظهور خوشه آغازین استفاده شد. کودهای شیمیایی فسفر و پتاسیم در این نظام کاشت مصرف نشد. برای کنترل علف‌های هرز از روتاری یا وجین کن سه مرتبه با فاصله ۷ روز استفاده شد. مبارزه با آفات به وسیله حشره کش دیازینون (گرانول ۵ درصد به مقدار ۲ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار) و کنترل بلاست به کمک قارچ‌کش بیم (تری‌سیکلازول) به مقدار ۰/۳۸ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار در مرحله ۳۰ درصد خوشه‌دهی انجام شد.

با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی واقع شده است که ارتفاع آن از سطح دریا صفر است. در این آزمایش مزرعه‌ای، نظام‌های کاشت رایج منطقه (سنتی)، بهبودیافته و فشرد (SRI) بررسی شدند:

۲-۲- تیمارهای آزمایشی

(۱) نظام کاشت رایج منطقه (سنتی): روش تهیه نشا کرتی بود. از نشاهای بالغ (۳۵ روزه) و تعداد بیش از سه نشا در هر کپه با آرایش کاشت متغیر، تصادفی و نامنظم استفاده شد. غرقابی دائم شالیزار و حفظ سطح آب ایستابی در تمامی مراحل رشد و نمو در نظر گرفته شد. بعد از نشاکاری تا دو هفته قبل از برداشت، مزرعه به حالت غرقاب بود و از زه‌کشی و کاهش سطح آب ایستابی جلوگیری شد. کودهای شیمیایی NPK از منابع اوره (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، سوپرفسفات تریپل (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و سولفات پتاسیم (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) به کار برده شد. تمامی فسفر و پتاسیم به صورت پایه و ۷۵ درصد کود نیتروژن به صورت پایه و ۲۵ درصد باقی مانده به صورت سرک در مرحله ۳۰ روز بعد از نشاکاری مصرف شد. برای کنترل علف‌های هرز یک بار از علف‌کش پیش‌رویشی بوتاکلر به مقدار ۳ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار و دوبار وجین دستی در ۲۸ و ۴۵ روز بعد از نشاکاری استفاده شد. مبارزه با آفات به وسیله حشره کش دیازینون (گرانول ۵ درصد به مقدار ۶ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار) و کنترل بلاست به کمک قارچ‌کش بیم (تری‌سیکلازول) به مقدار ۱/۱۳ کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار در مرحله ۳۰ درصد خوشه‌دهی انجام شد.

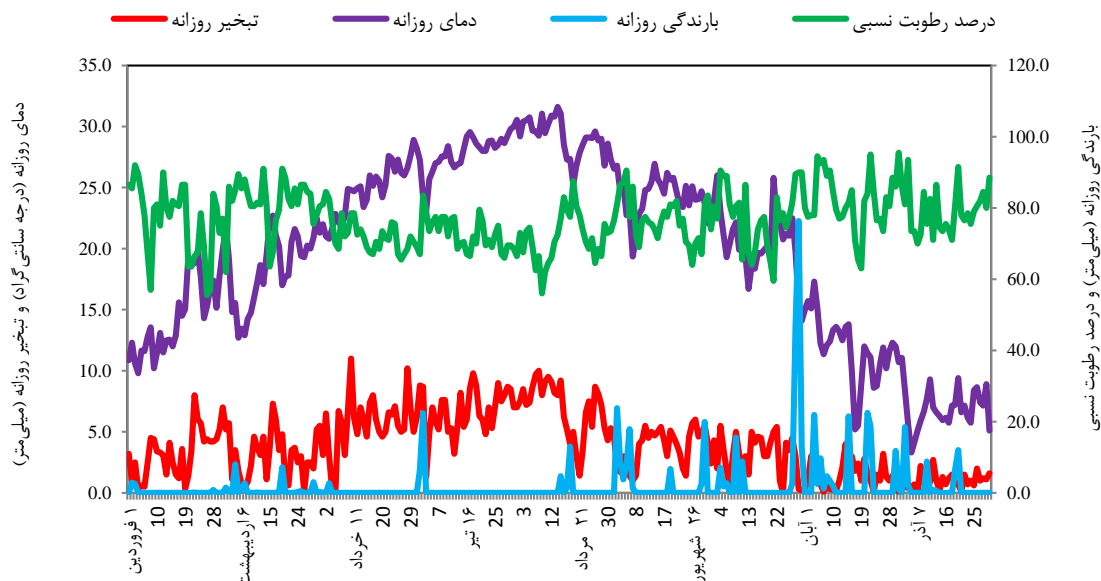
(۲) نظام کاشت بهبودیافته (اصلاح شده): روش تهیه نشا کرتی بود و از نشاهای ۲۵ روزه به تعداد سه نشا در هر کپه با آرایش کاشت مربعی به فواصل ۲۵×۲۵ سانتی‌متر استفاده شد. غرقابی دائم شالیزار و یک مرتبه خروج آب میان فصل انجام شد. برای این منظور، بعد از نشاکاری اقدام به ایجاد غرقابی و حفظ آب شده و فقط در مرحله حداکثر پنجه‌زنی، خروج کامل آب انجام شد تا ترک‌هایی در کرت مشاهده شود؛ سپس اقدام به آبیاری شد و تا دو هفته قبل از برداشت به حالت غرقاب باقی ماند. کودهای شیمیایی NPK از منابع اوره (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، سوپرفسفات تریپل (۱۰۰ کیلوگرم در

جدول ۱- تجزیه کود دامی مورد استفاده در نظام کاشت فشرده

| نسبت کربن به نیتروژن | پتاسیم (%) | فسفر (%) | نیتروژن (%) | کربن آلی (%) | هدایت الکتریکی (dS/m) | اسیدیته |
|----------------------|-------------|----------|-------------|--------------|-----------------------|-----------|
| ۱۲/۰۳ | ۱/۶۱ | ۱/۶۷ | ۲/۲۴ | ۲۷/۴۲ | ۱/۲۹ | ۷/۴۲ |
| مولیبیدن (ppm) | منگنز (ppm) | مس (ppm) | روی (ppm) | گوگرد (%) | منیزیم (%) | کلسیم (%) |
| ۱۱/۱۲ | ۲۳۲/۶۶ | ۲۱۶/۸۸ | ۲۴۱/۴۷ | ۳/۶۴ | ۰/۳۶ | ۰/۲۴ |

جدول ۲- مقایسه نظام‌های کاشت فشرده، بهبودیافته و رایج منطقه

| نحوه مدیریت | فشرده | بهبودیافته | رایج منطقه |
|-------------------|--|---|---|
| روش تهیه نشا | جعبه نشای پلاستیکی | کرتی | کرتی |
| سن نشا | ۲۰ روزه (۳-۴ برگه) | ۲۵ روزه | ۳۵ روزه |
| آرایش کاشت | ۲۰×۲۰ سانتی‌متر مربع | ۲۵×۲۵ سانتی‌متر مربع | متغیر، تصادفی و نامنظم |
| تعداد نشا | تعداد ۲ نشا در هر کپه | تعداد ۳ نشا در هر کپه | تعداد ۳-۵ نشا در هر کپه به صورت تصادفی |
| میزان مصرف کود | ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۱۰ تن کود دامی در هکتار | ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم | ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم |
| شیوه مصرف کود | مصرف ۵۰ درصد اوره و کود دامی به صورت پایه و ۵۰ درصد باقی‌مانده در مرحله ظهور خوشه آغازین | مصرف ۵۰ درصد اوره و پتاسیم و تمامی کود فسفر به صورت پایه، ۵۰ درصد پتاسیم و ۲۵ درصد اوره به صورت سرک در مرحله ۳۰ روز بعد از نشاکاری و مصرف ۲۵ درصد اوره در مرحله ظهور خوشه | مصرف تمامی فسفر و پتاسیم و ۷۵ درصد کود نیتروژن به صورت پایه، ۲۵ درصد نیتروژن به صورت سرک در مرحله ۳۰ روز بعد از نشاکاری |
| مدیریت آبیاری | غرقاب تا دو هفته بعد از نشاکاری و سپس انجام آبیاری تناوبی | غرقاب دائم به همراه یکبار خزوج آب در مرحله حداکثر پنجه‌زنی و سپس غرقاب دائم | غرقاب دائم |
| کنترل علف‌های هرز | کنترل علف‌های هرز به وسیله وجین‌کن سه مرتبه با فاصله ۷ روز | یکبار علف‌کش پیش‌رویشی بوتاکلر و دوبار وجین دستی در ۲۸ و ۴۵ روز بعد از نشاکاری | یکبار علف‌کش پیش‌رویشی بوتاکلر و دوبار وجین دستی در ۲۸ و ۴۵ روز بعد از نشاکاری |



شکل ۱- متوسط مؤلفه‌های آب‌وهوایی محل اجرای آزمایش طی دوره رشد گیاه برنج در سال ۱۳۹۱

۲-۳- جمع‌آوری اطلاعات

اندازه‌گیری عامل انتشار N_2O طی فصل رشد با توجه به میزان بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه تعیین شده است. تبخیر و تعرق پتانسیل طی فصل رشد از طریق روش بلانی-کریدل تخمین زده شد. همچنین، نیتروژن قابل‌نشست و آب‌شویی با توجه به میزان بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل در طی فصل رشد محاسبه شد [۱۹]. برای تخمین انتشار N_2O ناشی از کاربرد نیتروژن شیمیایی از روش توسعه یافته IPCC استفاده شده است [۲۰]. انتشار CO_2 ناشی از کاربرد کود شیمیایی اوره نیز محاسبه شده است [۴]. برای تخمین میزان انتشار کربن ناشی از تولید، حمل‌ونقل، ذخیره و حمل به مزرعه کود و سموم شیمیایی از روش Lal (2004) استفاده شد [۵]. سپس برای تبدیل C به CO_2 از نسبت بین آنها استفاده شده است [۴ و ۲۰]. انتشار CH_4 طی فصل رشد نیز با استفاده از روش Neue & Sass (1998) تخمین زده شد [۲۱]. سپس، میزان انتشار

CH_4 با استفاده از عامل مقیاس‌گذاری تعیین شد [۲۲]. با توجه به توان متفاوت گازهای CH_4 و N_2O در ایجاد گرمایش جهانی، کل گازهای گلخانه‌ای تولیدی به‌صورت معادل CO_2 محاسبه شدند. هر کیلوگرم N_2O و CH_4 به ترتیب معادل ۳۱۰ و ۲۵ کیلوگرم CO_2 اثر گلخانه‌ای دارند [۲۳]. 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 [۲۴].

۲-۴- تجزیه‌های آماری

داده‌های به‌دست آمده با نرم‌افزار آماری SAS تجزیه و تحلیل شد. رسم جداول و شکل‌ها نیز با نرم‌افزار Excel انجام شده است.

جدول ۳- مقادیر پتانسیل گرمایش جهانی (بر حسب کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار) ناشی از فعالیت‌های مختلف در نظام‌های کاشت برنج در سال ۱۳۹۱

| درصد از کل | اشتباه معیار (SE) | میانگین | نظام‌های کاشت | | | | | | |
|------------|-------------------|---------|---------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|--|
| | | | رایج منطقه | | بهبودیافته | | فشرده | | |
| | | | درصد از کل | کل انتشار | درصد از کل | کل انتشار | درصد از کل | کل انتشار | |
| ۲۵/۲۶ | ۱۰۷/۴۴ | ۷۰۷/۹۸ | ۲۲/۷۶ | ۸۳۹/۵۶ | ۲۸/۶۶ | ۸۳۹/۵۶ | ۲۴/۸۱ | ۴۴۴/۸۱ | انتشار N_2O ناشی از کاربرد کود شیمیایی نیتروژن |
| ۴/۳۲ | ۱۹/۷۶ | ۱۲۰/۹۹ | ۳/۹۴ | ۱۴۵/۱۹ | ۴/۹۶ | ۱۴۵/۱۹ | ۴/۰۵ | ۷۲/۵۹ | انتشار CO_2 ناشی از کاربرد کود شیمیایی اوره تولید و حمل‌ونقل کودهای شیمیایی |
| ۱۳/۰۵ | ۵۹/۸۲ | ۳۶۵/۷۰ | ۱۱/۹۰ | ۴۳۸/۸۴ | ۱۴/۹۸ | ۴۳۸/۸۴ | ۱۲/۲۴ | ۲۱۹/۴۲ | نیتروژن |
| ۰/۸۳ | ۹/۵۴ | ۲۳/۳۶ | ۰/۹۵ | ۳۵/۰۴ | ۱/۲۰ | ۳۵/۰۴ | ۰ | ۰ | فسفر |
| ۰/۶۵ | ۷/۴۹ | ۱۸/۳۳ | ۰/۷۵ | ۲۷/۵۰ | ۰/۹۴ | ۲۷/۵۰ | ۰ | ۰ | پتاسیم |
| ۱/۹۸ | ۲۳/۵۶ | ۵۵/۴۴ | ۱/۸۸ | ۶۹/۳۰ | ۳/۳۱ | ۹۷/۰۲ | ۰ | ۰ | تولید و حمل‌ونقل سموم شیمیایی |
| ۰/۲۲ | ۱/۴۴ | ۶/۱۶ | ۰/۲۱ | ۷/۹۲ | ۰/۲۷ | ۷/۹۲ | ۰/۱۵ | ۲/۶۴ | علف‌کش |
| ۰/۳۸ | ۲/۵۳ | ۱۰/۷۷ | ۰/۴۴ | ۱۶/۱۶ | ۰/۳۷ | ۱۰/۷۳ | ۰/۳۰ | ۵/۴۳ | حشره‌کش |
| ۸/۹۵ | ۳۸/۶۱ | ۲۵۱ | ۵/۷۴ | ۲۱۱/۷۸ | ۶/۶۹ | ۱۹۶/۰۹ | ۱۹/۲۵ | ۳۴۵/۱۳ | قارچ‌کش |
| ۹/۸۵ | ۱۹/۷۴ | ۲۷۶/۱۲ | ۶/۸۳ | ۲۵۱/۹۴ | ۸/۶۰ | ۲۵۱/۹۴ | ۱۸/۱۰ | ۳۲۴/۴۸ | ادوات و ماشین‌آلات |
| ۱/۵۸ | ۱۲/۹۸ | ۴۴/۱۸ | ۱/۸۸ | ۶۹/۲۵ | ۱/۶۶ | ۴۸/۶۰ | ۰/۸۲ | ۱۴/۷ | سوخت |
| ۳۲/۹۳ | ۲۸۸/۰۴ | ۹۲۳/۲۱ | ۴۲/۷۲ | ۱۵۷۵/۲۵ | ۲۸/۳۶ | ۸۳۰/۶۳ | ۲۰/۲۸ | ۳۶۳/۷۵ | بذر |
| ۱۰۰ | ۴۴۹/۵۵ | ۲۸۰۳/۲۵ | ۱۰۰ | ۳۶۸۷/۷۳ | ۱۰۰ | ۲۹۲۹/۰۶ | ۱۰۰ | ۱۷۹۲/۹۵ | انتشار متان طی فصل رشد |
| | | | | | | | | | پتانسیل گرمایش جهانی کل |

۳- نتایج و بحث

نتایج نشان داد که میانگین پتانسیل گرمایش جهانی کل ناشی از فعالیت‌های مختلف در نظام‌های کاشت برابر $28.03/25$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود. کمترین مقدار پتانسیل گرمایش جهانی ($1792/95$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار) مربوط به نظام کاشت فشرده و بیشترین مقدار آن برابر $3687/73$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار در نظام کاشت رایج منطقه حاصل شد. مقدار پتانسیل گرمایش جهانی کل در نظام کاشت بهبودیافته برابر $2929/06$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود (جدول ۳). همان‌طور که از جدول ۳ استنباط می‌شود انتشار متان طی فصل رشد در گیاه برنج با میانگین $923/21$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $32/93$ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای تولیدی است. کمترین مقدار متان انتشاریافته طی فصل رشد برابر $363/75$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $20/28$ درصد از کل در نظام کاشت فشرده بود. دلیل اصلی آن را می‌توان استفاده از نشاهای جوان که به کاهش طول دوره رشد منجر شد و همچنین آبیاری تناوبی در این نظام تولید عنوان کرد. بیشترین مقدار متان انتشار یافته برابر $1575/25$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $42/72$ درصد از کل مربوط به نظام کاشت رایج منطقه بود. دلیل آن را می‌توان طول دوره رشد بیشتر و استفاده از رژیم آبیاری غرقابی بیان کرد. همچنین میزان متان انتشاریافته طی فصل رشد در نظام تولید بهبودیافته نیز برابر $830/63$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $28/36$ درصد از کل بود (جدول ۳).

انتشار N_2O ناشی از کاربرد کود شیمیایی نیتروژن طی دوره رشد نیز بخش قابل توجهی در پتانسیل گرمایش جهانی شالیزارها دارد و بعد از انتشار متان طی فصل رشد با میانگین $707/98$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $25/26$ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای تولیدی در جایگاه بعدی قرار گرفت. کمترین مقدار انتشار N_2O ناشی از کاربرد نیتروژن برابر $444/81$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $24/81$ درصد از کل به نظام کاشت فشرده اختصاص یافت. بیشترین میزان آن برابر $839/56$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار در دو نظام تولید بهبودیافته و رایج منطقه تولید شد که به ترتیب برابر $28/66$ و $22/76$ درصد از کل بود (جدول ۳). انتشار CO_2 ناشی از کاربرد کود اوره با میانگین $120/99$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار برابر $4/32$ درصد از کل بود. همچنین انتشار CO_2 ناشی از کاربرد کود اوره در نظام‌های کاشت فشرده، بهبودیافته و رایج منطقه به ترتیب برابر

$72/59$ ، $145/19$ و $145/19$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود که معادل $4/05$ ، $4/96$ و $3/94$ درصد از کل گرمایش جهانی را به خود اختصاص داد (جدول ۳).

در بین فعالیت‌های مختلف زراعی تولید و حمل‌ونقل کود نیتروژن با میانگین $365/7$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $13/05$ درصد از کل در رتبه سوم انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظام‌های تولید قرار گرفت و بعد از آن سوخت با میانگین $246/12$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $9/85$ درصد از کل و ادوات و ماشین‌آلات برابر 251 کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $8/95$ درصد در جایگاه بعدی قرار گرفتند. سهم سایر فعالیت‌های ناشی از تولید و حمل‌ونقل نهاده‌های زراعی قابل توجه نبود (جدول ۳). نظام کاشت فشرده با $219/42$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار کم‌ترین مقدار پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از تولید و حمل‌ونقل نیتروژن را داشت که معادل $12/24$ درصد از کل گرمایش جهانی در این نظام بود. بیشترین مقدار پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از تولید و حمل‌ونقل کود نیتروژن با $438/84$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار به دو نظام تولید بهبودیافته و رایج منطقه اختصاص داشت که به ترتیب معادل $14/98$ و $11/90$ درصد از کل گرمایش جهانی این دو نظام تولید بوده است. در نظام فشرده کودهای شیمیایی فسفر و پتاسیم به کار نرفت که به همین دلیل پتانسیل گرمایش جهانی آن صفر در نظر گرفته شد. گرمایش جهانی ناشی از کاربرد فسفر در دو نظام تولید بهبودیافته و فشرده برابر $35/04$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و گرمایش جهانی ناشی از کاربرد پتاسیم برابر $27/5$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود (جدول ۳). در رابطه با مصرف سوخت نظام کاشت فشرده به دلیل کاشت مکانیزه با $324/48$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بیشتر از دو نظام تولید بهبودیافته و رایج منطقه برابر $251/94$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار بود که به ترتیب برابر $8/6$ و $6/83$ درصد از کل گرمایش جهانی در این دو نظام بود. همچنین، انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی ناشی از ادوات و ماشین‌آلات نیز در نظام کاشت فشرده با $345/13$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار و $19/25$ درصد در مقایسه با دو نظام کاشت بهبودیافته ($196/09$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار) و رایج منطقه ($211/78$ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار) بیشتر بود که سهم گرمایش جهانی ناشی از ادوات و ماشین‌آلات در این دو نظام تولید به ترتیب برابر $6/69$ و $5/74$ درصد بود (جدول ۳). با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که سهم سایر فعالیت‌ها در انتشار

آمده از آن در محصولات مختلف، نظری مشابه با یافته‌های این پژوهش داشتند [۵، ۲۶ و ۲۷]. بیشترین و کمترین مقدار پتانسیل گرمایش جهانی به ترتیب برابر ۹۲۳ و ۲۶۸ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار در مزارع گندم بود که نشان می‌دهد مقادیر پتانسیل گرمایش جهانی ارتباط مستقیمی با مصرف نهاده‌های زراعی (انرژی‌های ورودی) داشته است. کودهای شیمیایی نیتروژن و سوخت‌های فسیلی بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی داشتند [۲۴].

جدول ۴، مقادیر پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح، وزن، انرژی ورودی و انرژی خروجی را نشان می‌دهد. میانگین پتانسیل گرمایش جهانی نظام‌های کاشت در واحد سطح برابر ۲۸۰۳/۲۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بود که در نظام کاشت فشرده حداقل (۱۷۹۲/۹۵) کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) و در نظام کاشت رایج منطقه حداکثر (۳۶۸۷/۷۳) کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار) بوده است. همچنین، میزان آن در نظام کاشت بهبودیافته نیز برابر ۲۹۲۹/۰۶ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار به دست آمد (جدول ۴). در همین رابطه مقدار کل پتانسیل گرمایش جهانی در واحد سطح برای محصولات سیب‌زمینی، گندم، کلزای روغنی، جو و نخود به ترتیب برابر ۳، ۱/۷، ۱/۲، ۰/۷ و ۰/۷ تن معادل CO₂ در هکتار برآورد شد [۲۷].

پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی ورودی نیز با میانگین ۱۱۸/۶۳ کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول در نظام کاشت فشرده حداقل (۸۸/۹۴) کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول) و در نظام کاشت رایج منطقه حداکثر (۱۵۱/۹۹) کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول) بود. مقدار پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی ورودی در نظام کاشت بهبودیافته برابر ۱۱۴/۹۷ کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول بود. در نهایت مشخص شد که میانگین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی خروجی برابر ۱۴/۶۴ کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول بود. نظام کاشت فشرده با ۹/۲۷ کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول کم‌ترین پتانسیل گرمایش جهانی را در واحد انرژی خروجی دارا بوده و نظام کاشت بهبودیافته با ۱۵/۳۹ کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول در رتبه دوم قرار گرفت. نظام کاشت رایج منطقه با ۱۹/۲۷ کیلوگرم معادل CO₂ در گیگاژول بیشترین پتانسیل گرمایش جهانی در واحد انرژی ورودی را به خود اختصاص داد (جدول ۴). کم‌ترین ردپای کربن در واحد وزن در نظام کاشت فشرده

گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی ناچیز بوده است. میانگین پتانسیل گرمایش جهانی علف‌کش‌ها در نظام‌های تولید برابر ۵۵/۴۴ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بود که سهم نظام بهبودیافته و رایج منطقه به ترتیب برابر ۹۷/۰۲ و ۶۹/۳ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بود که معادل ۳/۳۱ و ۱/۸۸ درصد از گرمایش جهانی بود. در نظام کاشت فشرده علف‌کش به کار برده نشد که به همین دلیل پتانسیل گرمایش جهانی آن صفر در نظر گرفته شد. پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از بوجاری و حمل‌ونقل بذر در نظام‌های کاشت فشرده، بهبودیافته و رایج منطقه به ترتیب برابر ۱۴/۷، ۴۸/۶ و ۶۹/۲۵ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار در نظر گرفته شد که سهم آن در نظام‌های کاشت به ترتیب برابر ۰/۸۲، ۱/۶۶ و ۱/۸۸ درصد بود. کاربرد حشره‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها سهم ناچیزی نسبت به سایر فعالیت‌ها در پتانسیل گرمایش جهانی داشتند که از این میان سهم حشره‌کش در نظام‌های فشرده، بهبودیافته و رایج منطقه به ترتیب برابر ۲/۶۴، ۷/۹۲ و ۷/۹۲ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بود. همچنین سهم قارچ‌کش‌ها در پتانسیل گرمایش جهانی نظام‌های تولید فشرده، بهبودیافته و رایج منطقه به ترتیب برابر ۵/۴۳، ۱۰/۷۳ و ۱۶/۱۶ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار بود (جدول ۳).

نتایج مقایسه بین انرژی‌های ورودی و پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از آن در این پژوهش نشان داد که بین انرژی‌های ورودی و پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از آن ارتباط مستقیمی وجود دارد. در همین راستا دیگر محققان بیان داشتند که گازهای گلخانه‌ای در هنگام فعالیت‌های متنوع کشاورزی یا به‌طور مستقیم از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی طی اجرای عملیات زراعی (کاشت تا برداشت) یا به‌طور غیرمستقیم در زمان تولید و حمل‌ونقل ورودی‌های مورد نیاز مزرعه (علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی) انتشار می‌یابند [۲۵]. در پژوهشی نیز معلوم شد که عملیات زراعی و غیرزراعی (تولید و حمل‌ونقل کودها و آفت‌کش‌ها) در تولید برنج به ترتیب ۹۸-۸۰ و ۱۶/۹۱ کیلوگرم معادل CO₂ در هکتار پتانسیل گرمایش جهانی دارند [۲۶]. علاوه بر این، نتایج پژوهش‌های مشابه در سایر محصولات زراعی نیز نشان داد که مصرف کودهای شیمیایی (به‌ویژه کود نیتروژن) و سوخت‌های فسیلی بیشترین اثر را در انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی داشته است [۵ و ۲۷]. سایر محققان نیز با ارزیابی انرژی ورودی و پتانسیل گرمایش جهانی به دست

نظام کاشت دیگر، مصرف حداقل انرژی‌های ورودی به‌ویژه کود نیتروژن و همچنین کاهش تولید متان در طی فصل رشد به‌دلیل آبیاری تناوبی و کاهش طول دوره رشد کم‌تر نسبت داد (جدول ۴). باید توجه داشت که امروزه، به‌دلیل حفظ منابع طبیعی [۲۸]، و همچنین به‌دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر [۲۳]، استفاده از انرژی سوخت‌های فسیلی در کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است. علاوه‌براین، توسعه نظام‌های کشاورزی با انرژی ورودی حداقل همانند کشاورزی ارگانیک می‌تواند در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی تأثیر بسیاری داشته باشد [۲۹].

مشاهده شد که برابر ۰/۲۸ کیلوگرم معادل CO₂ در کیلوگرم شلتوک و ۲۷۹/۶۲ کیلوگرم معادل CO₂ در تن شلتوک بود. بیشترین ردپای کربن در واحد وزن را نظام تولید رایج منطقه به خود اختصاص داد که برابر ۰/۶۵ کیلوگرم معادل CO₂ در کیلوگرم شلتوک و ۶۴۷/۸۸ کیلوگرم معادل CO₂ در تن شلتوک بود. همچنین ردپای کربن در واحد وزن برای نظام کاشت بهبودیافته برابر ۰/۴۸ کیلوگرم معادل CO₂ در کیلوگرم شلتوک و ۴۸۱/۶۷ کیلوگرم معادل CO₂ در تن شلتوک به‌دست آمد (جدول ۴).

با توجه به نتایج می‌توان علت کاهش ردپای کربن در واحد سطح و وزن در نظام کاشت فشرده را نسبت به دو

جدول ۴- پتانسیل گرمایش جهانی به‌صورت کیلوگرم معادل CO₂ در واحد سطح، وزن، انرژی ورودی و انرژی خروجی در نظام‌های کاشت

| اشتباه معیار (SE) | میانگین | نظام‌های کاشت | | | شاخص‌ها |
|----------------------|---------|---------------|------------|---------|--|
| | | رایج منطقه | بهبودیافته | فشرده | |
| پتانسیل گرمایش جهانی | | | | | |
| ۴۴۹/۵۵ | ۲۸۰۳/۲۵ | ۳۶۸۷/۷۳ | ۲۹۲۹/۰۶ | ۱۷۹۲/۹۵ | در واحد سطح (کیلوگرم معادل CO ₂ در هکتار) |
| ۱۴/۹۴ | ۱۱۸/۶۳ | ۱۵۱/۹۹ | ۱۱۴/۹۷ | ۸۸/۹۴ | در واحد انرژی ورودی (کیلوگرم معادل CO ₂ در گیگاژول) |
| ۲/۳۸ | ۱۴/۶۴ | ۱۹/۲۷ | ۱۵/۳۹ | ۹/۲۷ | در واحد انرژی خروجی (کیلوگرم معادل CO ₂ در گیگاژول) |
| ردپای کربن | | | | | |
| ۰/۰۹ | ۰/۴۷ | ۰/۶۵ | ۰/۴۸ | ۰/۲۸ | در واحد وزن (کیلوگرم معادل CO ₂ در کیلوگرم شلتوک) |
| ۸۶/۹۴ | ۴۶۹/۷۲ | ۶۴۷/۸۸ | ۴۸۱/۶۷ | ۲۷۹/۶۲ | در واحد وزن (کیلوگرم معادل CO ₂ در تن شلتوک) |

منابع

- [1] IPCC. 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; 2007. p. 987.
- [2] Gan Y, Liang C, Hamel C, Cutforth H, Wang H. Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas. A review. *Agronomy for Sustainable Development*; 2011;31(4):643-656.
- [3] Gan Y, Liang Ch, Huang G, Malhi S S, Brandt S A, Katepa-Mupondwa F. Carbon footprint of canola and mustard is a function of the rate of N fertilizer. *International Journal of Life Cycle Assessment*; 2012;17:58-68.
- [4] Ma B L, Liang B C, Biswas D K, Morrison M J, McLaughlin N B. The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*; 2012;94:15-31.

۴- نتیجه‌گیری

در نظام کاشت فشرده با مدیریت صحیح مزرعه و همچنین با به حداقل رساندن مصرف نهاده‌های شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی و ردپای کربن در مقایسه با دو نظام کاشت بهبودیافته و رایج منطقه به‌میزان قابل توجهی کاهش یافت. با توجه به موارد مذکور می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که غرقابی دائم و مصرف بیش از حد نهاده‌های شیمیایی به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ردپای کربن در نظام کاشت بهبودیافته و رایج منطقه منجر شده که در صورت بی‌توجهی در بلند مدت، بوم‌نظام منطقه به‌طور جدی با مشکل مواجه خواهد شد.

پی‌نوشت‌ها

- ¹Climate change
- ²Global warming
- ³Greenhouse gas emissions
- ⁴Carbon footprint
- ⁵System of Rice Intensification

- [17] Suryavanshi P, Singh Y V, Prasanna R, Bhatia A, Shivay Y S. Pattern of methane emission and water productivity under different methods of rice crop establishment. *Paddy & Water Environment*; **2013**;11(1/4):321-329.
- [18] Akiyama H, Yagi K, Yan X. Direct N₂O emissions from rice paddy fields: summary of available data. *Global Biogeochemical Cycles*; **2005**;19:10 p. GB1005.
- [19] Rochette P, Worth D E, Lemke R L, McConkey B G, Pennock D J, Wagner-Riddle C, Desjardins R L. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada: I. Development of a country-specific methodology. *Canadian Journal of Soil Science*; **2008**;88:641-654.
- [20] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, volume 4: agriculture, forestry and other land use. Intergovernmental Panel on Climate Change. Paris, France. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.htm>; **2006**. p. 850.
- [21] Neue H U, Sass R L. The budget of methane from rice fields. *IGACTivities Newsletter*; **1998**;12:3-11.
- [22] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook, Chapter 4.3, Agriculture: Rice Cultivation. OECD, Paris, France; **1997**. p. 287.
- [23] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge University Press, UK. **1996**. p. 468.
- [24] Soltani A, Rajabi M H, Zeinali E, Soltani E. Energy inputs and greenhouse gases emissions in wheat production in Gorgan, Iran. *Energy*; **2013**;50:54-61.
- [25] Wood S, Cowie A. A review of greenhouse gas emission factors for fertilizer production. Research and Development Division, State Forests of New South Wales. Cooperative Research Center for greenhouse Accounting; **2004**.
- [26] Pathak H, Wassman, R. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture: I. Generation of technical coefficients. *Agricultural Systems*; **2007**;94:807-825.
- [27] Tzilivakis J, Jaggard K, Lewis K A, May M, Warner D J. Environmental impact and economic assessment for UK sugar beet
- [5] Lal R. Carbon emissions from farm operations. *Environment International*; **2004**;30:981-990.
- [6] Hillier J, Hawes C, Squire G, Hilton A, Wale S. The carbon footprint of food crop production. *International Journal of Life Cycle Assessment*; **2009**;7:107-118.
- [7] Linquist B, Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C, van Kessel C. An agronomic assessment of greenhouse gas emission from major cereal crops. *Global Change Biology*; **2012**;18(1):194-209.
- [8] Malmuti M, West J S, Watts J, Gladders P, Fitt B D L. Controlling crop disease contributes to both food security and climate change mitigation. *International Journal of Agricultural Sustainability*; **2009**;7(3):189-202.
- [9] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agriculture production systems in Panjab, India, and Ohio, USA. *Journal of Crop Improvement*; **2009**;23:332-350.
- [10] Sass R L, Ding A, Huang Y. Exchange of methane from rice fields: national, regional, and global budgets. *Journal of Geophysical Research*; **1999**;104(21):26943-26952.
- [11] Yan X, Akiyama H, Yagi K. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochem Cycles*; **2009**;23:GB2002.
- [12] USEPA. Global anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990–2002. Office of Atmospheric Programs, USEPA, Washington, DC Available at: http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/pdfs/global_emissions.pdf. **2006**. p. 82.
- [13] Frenzel P, Bosse U, Janssen P H. Rice roots and methanogenesis in a paddy soil: ferric iron as an alternative electron acceptor in the rooted soil. *Soil Biology & Biochemistry*; **1999**;31:421-430.
- [14] Hardy A G. Greenhouse gas emissions from rice. RGTW Working Paper; **2013**;3.
- [15] Yan X, Yagi K, Akiyama H, Akimoto H. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology*; **2005**;11:1131-1141.
- [16] Ma K, Qiu Q F, Lu Y H. Microbial mechanism for rice variety control on methane emission from rice field soil. *Global Change Biology*; **2010**;16:3085-3095.

production systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*; **2005**;107:341-358.

[28] Brown L R, Flavin C F, French H. *State of the world: A world watch Institute report on progress toward a sustainable society*. New York: Norton; **1998**;72 p.

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

