ارزیابی مزرعه‌ای برنج تراریخته و غیرتراریخته از جنبه تأثیر بر سلامتی انسان و محیط‌زیست با استفاده از مدل‌های ارزیابی چرخه حیات (LCA)

سلمان دستان[۱]، بهزاد قره‌یاضی[۲]، سیدالیاس مرتضوی[۳] و شاپور عبدالهی[۴]
۱- پژوهشگر پسادکتری، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، کرج
۲- استاد، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، کرج
۳- استادیار، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، کرج
۴- رئیس بخش کشت بافت و انتقال ژن، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، منطقه شمال کشور.
dastan@abrii.ac.ir

چکیده

انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی یکی از نگرانی‌های عمده جهانی به شمار می‌رود که بخشی از آن ناشی از مصرف نهاده‌های شیمیایی است. از این‌رو، کاشت گیاهان تراریخته راه‌کاری برای کاهش اثرات سوء بر سلامتی انسان و محیط زیست محسوب می‌شود. لذا، در این پژوهش با استفاده از ارزیابی چرخه حیات به اثرات ارقام برنج تراریخته و غیرتراریخته بر سلامتی انسان و محیط زیست پرداخته شد. در این مطالعه ۸ لاین تراریخته منتج از تلاقی برگشتی نعمت و خزر با لاین تراریخته طارم مولایی به‌همراه ارقام والد غیرتراریخته تحت استاندارد پروتکل ایمنی زیستی در سه منطقه ایزوله شده در شمال کشور ایران در سال ۱۳۹۵ کشت شدند. برای ارزیابی چرخه حیات، ابتدا نتایج هر منطقه جداگانه آنالیز شد که به‌علت عدم اختلاف فاحش گروه‌های تأثیر و شاخص‌ها در مناطق مختلف، میانگین نتایج سه منطقه ارائه شد. نتایج نشان داد که کاهش مصرف حشره‌کش‌ها در ارقام تراریخته به استفاده کمتر از نیروی انسانی، ادوات و ماشین‌آلات و سوخت منجر شد که نتیجه آن نیز کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساخت و حمل و نهاده‌ها و کاربرد در طی عملیات زراعی بود. علاوه بر این، تمامی گروه‌های تأثیر دارای اثر سوء بر سلامتی انسان و محیط زیست در تولید ارقام تراریخته کمتر از ارقام غیرتراریخته بودند که مهم‌ترین گروه‌های شامل: Non-renewable energy، Global warming، Aquatic eutrophication، Aquatic acidification، Terrestrial acid/nutri، Land occupation، Terrestrial ecotoxicity، Aquatic ecotoxicity، Ozone layer depletion، Ionizing radiation، Respiratory inorganics، Respiratory organics، Cumulative Energy Demand، Ecological footprint، Greenhouse Gas Protocol، Water footprint، Non-carcinogens و Carcinogens بودند. بنابراین، طبق یافته‌های این پژوهش مشاهده شد که میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ارتباط مستقیم با مصرف نهاده‌ها و شیوه مدیریت مزرعه دارد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده زیست‌محیطی، برنج تراریخته، فلزات سنگین، گرمایش جهانی

مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز فزاینده به منابع غذایی کافی، توجه هرچه بیشتر به کشاورزی را به‌عنوان امری بسیار مهم و اجتناب‌ناپذیر درآورده است. برای نیل به این هدف لازم است علاوه بر روش‌های سنتی کشاورزی از روش‌ها و تکنیک‌های دیگری نیز استفاده گردد. در این راستا یکی از مؤثرترین موارد کاربرد روش‌های جدید استفاده از فن‌آوری‌های زیستی و پژوهشی در مورد گیاهان تراریخته می‌باشد. بر اساس بررسی‌های به‌عمل آمده تاکنون مهم‌ترین روش مبارزه با کرم ساقه‌خوار برنج در ایران و

نیز اغلب مناطق جهان، روش شیمیایی بوده که در این رابطه هر ساله هزاران تن انواع سموم شیمیایی در مزارع برنج به‌کار می‌رود (تقریباً نیمی از سموم مصرفی در مزارع برنج علیه بال‌پولک‌داران می‌باشد). با توجه به نقش کرم ساقه‌خوار در کاهش معنی‌دار عملکرد، کنترل شیمیایی آن از مرحله خزانه آغاز می‌شود و همین امر باعث آلودگی‌های شدید زیست‌محیطی و آسیب شدید به سلامتی انسان می‌شود (Ghareyazie, 2004). در واقع، تخریب محیط‌زیست با شیوه رایج کاشت گیاهان زراعی صورت می‌گیرد که دلیل آن استفاده بیش از حد سموم دفع آفات نباتی است که یکی از اصلی‌ترین آلاینده‌های آب نیز محسوب می‌شوند (FAO, 2011). بنابراین، امروزه ایجاد ارقام تراریخته برنج با ژن *cry*1Ab باکتری Bt یک روش معمول برای ایجاد مقاومت گیاهان در برابر هجوم حشرات آفت و کاهش خسارت سوء زیست‌محیطی ناشی از سموم شیمیایی است (Ghareyazie, 2004). ارزیابی چرخه حیات (LCA) یک روش مناسب برای مطالعه و بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید یک محصول در کل چرخه حیاتی آن در سامانه‌های تولید است (Iriarte *et al.*, 2010). مطالعات بر اساس LCA به‌منظور مقایسه نظام‌های تولید چغندرقند (*Tzilivakis et al., 2005*)، تولید برنج (Roy *et al.*, 2005) و مقایسه واریته‌های تراریخته چغندرقند با واریته‌های طبیعی (Bennett *et al.*, 2004) انجام شد. نتایج این تحقیقات نشان داد که با انجام LCA می‌توان اطلاعات بسیار مفیدی را در مورد اثرات زیست‌محیطی انواع ورودی‌ها در تولید محصولات و مقایسه آنها با یکدیگر به‌دست آورد. تاکنون از روش LCA برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید گیاهان تراریخته در ایران استفاده نشده است و این مطالعه اولین از نوع خود در ایران است. بنابراین، هدف از این تحقیق بررسی جنبه‌های زیست‌محیطی تولید برنج تراریخته و غیرتراریخته به روش ارزیابی چرخه حیات بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش شامل هشت لاین تراریخته منتج از تلاقی برگشتی ارقام نعمت و خزر حاوی ژن *cry*1Ab از باکتری *B. thuringiensis* با لاین تراریخته طارم مولایی (واجد ژن مقاومت به کرم ساقه‌خوار نواری و به‌عنوان والد غیربرگداننده) به همراه ارقام شاهد غیرتراریخته بود. آزمایش در مزارع ایزوله شده مؤسسه تحقیقات برنج کشور در سه منطقه (ایستگاه‌های تحقیقات زراعی دشت‌ناز ساری، گاودشت بابل و گیله‌پرده‌سر در رشت) در سال ۱۳۹۵ اجرا شد. شرایط ایزولاسیون بر اساس اصول ایمنی زیستی انجام شد که شامل کشت با فاصله از مزارع کشاورزان، استفاده از حاشیه مناسب به دور مزرعه، برداشت حاشیه به‌صورت جداگانه و حذف باقی‌مانده‌های گیاهی پس از آزمایش بود. فاصله زمانی و مکانی اجرای آزمایش نیز براساس اصول ایمنی زیستی در نظر گرفته شد. مراقبت‌های زراعی از جمله آبیاری، وجین و کوددهی در قطعه زمین آزمایشی ایزوله شده و تحت کنترل انجام شد. ولی، در طول فصل رشد هیچ‌گونه سم‌پاشی انجام نشد تا امکان مقاومت این لاین‌های تراریخته به‌طور دقیق فراهم شود. سایر عملیات زراعی و مدیریت مزرعه بر اساس استاندارد اصول ایمنی زیستی انجام شد.

ارزیابی چرخه زندگی (LCA) تاثیرات زیست‌محیطی

در عصر حاضر سامانه‌های تولید کشاورزی بر پایه استفاده از منابع محدودی مثل سوخت‌های فسیلی، منابع آب و دیگر نهاده‌های تجدیدناپذیر است که نگرانی‌های زیست‌محیطی را به همراه دارد. در این میان ارزیابی چرخه حیات به عنوان روشی قابل استناد و کاربردی برای بررسی اثرات زیست‌محیطی در فرآیند تولید محصولات کشاورزی معرفی شده است که به جنبه‌های عملی و بالقوه زیست‌محیطی در سراسر چرخه حیات یک محصول می‌پردازد. بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰، ارزیابی چرخه حیات شامل چهار بخش: بیان هدف، تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیر نتایج است (Iriarte *et al.*, 2010)، که جزئیات مربوط به هر بخش از دیگر مطالعات استخراج شد (Brentrup *et al.*, 2004). در این پژوهش، برای ارزیابی چرخه حیات، ابتدا نتایج هر منطقه جداگانه آنالیز شد که به‌علت عدم اختلاف فاحش گروه‌های تأثیر و شاخص‌ها در مناطق مختلف، میانگین نتایج سه منطقه در نظر گرفته و ارائه شد.

در روش ارزیابی چرخه حیات ابتدا هدف و واحد کارکردی مشخص می‌شود. هدف از LCA در این پژوهش بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید برنج تراریخته و غیرتراریخته به روش ارزیابی چرخه حیات بود. واحد کارکردی در این مطالعه بر مبنای تولید یک تن شلتوک در نظر گرفته شد که کلیه ورودی‌ها و خروجی‌ها و اثرات زیست‌محیطی نسبت به آن سنجیده شدند. با توجه به اینکه مزرعه دارای دو خروجی، یکی محصول شلتوک و دیگری کاه و کلش بود، توزیع (تخصیص) اثرات زیست‌محیطی مطابق ارزش اقتصادی آن‌ها محاسبه شد (Rebitzer *et al.*, 2004). در مرحله صورت‌برداری منابع (ورودی‌ها) و نهاده‌هایی که برای تولید برنج تراریخته و غیرتراریخته مورد نیاز بود و همچنین تمامی مقادیر آلاینده‌های انتشار یافته به محیط‌زیست در اثر استفاده از انواع مختلف نهاده‌ها در هر منطقه جداگانه تعیین و فهرست‌برداری شدند (Roy *et al.*, 2009). با توجه به اهمیت مباحث زیست‌محیطی در تولید برنج تراریخته، تمامی شاخص‌های مهم و تأثیرگذار با مدل‌های مختلف LCA در نرم‌افزار SimaPro برآورد شدند. پس از بررسی‌های انجام شده روی مدل‌های مختلف ارزیابی چرخه زندگی و مقایسه کلی نتایج بر مبنای مدل Impact 2002+ در نرم‌افزار SimaPro8.2.3 استفاده شد و شاخص کلی انتشار آلاینده‌ها محاسبه شدند. به‌منظور ارزیابی دقیق و کامل چرخه زندگی اثرات زیست‌محیطی در مرحله بعد با استفاده از سایر مدل‌ها (Impact 2002+، Ecopoints 97، Cumulative Energy Demand، Ecological footprint، Ecosystem Damage Potential، Greenhouse Gas Protocol، Water footprint، EPS 2000، LCI result، ReCiPe و TRACI) تمامی شاخص‌های انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی محاسبه و ارزیابی چرخه زندگی به طور کامل انجام شد و سپس نتایج به‌دست آمده از هر مدل با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شدند.

در مرحله ارزیابی تأثیر، ابتدا تعیین شد که هر یک از مواد انتشاریافته به محیط که مقدار آنها در مرحله قبل مشخص شده است دارای کدام تأثیرات است و باید در کدام طبقه یا طبقه‌بندی‌های تأثیر قرار گیرد. سپس این انتشارات به یک واحد معادل برای طبقه تأثیر تبدیل شدند (Brentrup *et al.*, 2004). برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیر دقیق ورودی‌ها و خروجی‌ها سه مرحله طبقه‌بندی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی داده‌ها انجام شد. سپس، نتایج حاصل جهت مقایسه اثرات زیست‌محیطی تولید برنج تراریخته و غیرتراریخته در سه منطقه مطابق استانداردهای موجود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

ارزیابی خسارت

از آنجا که شاخص‌های رده‌اثر زیادی وجود دارد، تفسیر نتایج تحقیق مشکل است. به‌منظور ساده کردن تفسیر این نتایج، یک فرآیند گروه‌بندی در بعضی روش‌های استفاده شده در ارزیابی چرخه زندگی مانند Impact 2002+، EPS 2000، Ecoindicator و ... قابل استفاده است. در این روش‌ها، شاخص‌های رده‌اثر نزدیک به یکی از سه گروه نقطه نهایی (سلامتی بشر، کیفیت اکوسیستم، تغییرات آب و هوایی، منابع و تنوع زیستی) برای رسیدن به رابطه زیست‌محیطی بهینه تعریف شدند. گروه‌های اثر متعلق به گروه نهایی همگی دارای واحدهای یکسان هستند. بنابراین به آسانی با هم جمع می‌شوند و عدد نهایی مقدار گروه اثر نهایی را مشخص می‌کند.

شاخص زیست‌محیطی

در آخرین مرحله نوعی شاخص محیطی تحت عنوان شاخص بوم‌شناخت (Eco-index) که معیار نهایی LCA می‌باشد به‌صورت زیر محاسبه شد (Brentrup *et al.*, 2004):

$$EcoX = \sum Ni \times W_i$$

که در آن EcoX شاخص محیطی بوم‌شناخت به ازای واحد کارکردی، Ni مقدار نرمال شده مربوط به هر گروه تأثیر، Wi وزن مربوط به هر یک از مقادیر Ni می‌باشد. هرچه شاخص زیست‌محیطی بزرگتر باشد، نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر در آسیب به محیط‌زیست است.

نتایج

مدل Impact 2002+

مقادیر شاخص‌های ارزیابی زیست‌محیطی مربوط به مدل Impact 2002+ در جدول ۱ ارایه شده است. در بین ارقام مختلف بیشترین میزان تولید مواد Carcinogenes و Non-carcinogens به ازای یک تن شلتوک در رقم خزر (به‌ترتیب برابر ۲۳/۱۲ و ۲۰/۷۸ kg C_2H_3Cl eq) و طارم مولایی (۲۲/۸۸ و ۲۱/۰۸ kg C_2H_3Cl eq) مشاهده شد. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه سوم و چهارم از نظر انتشار مواد Carcinogenes و Non-carcinogens قرار گرفتند. تمامی لاین‌های تراریخته از نظر Carcinogenes و Non-carcinogens با مقدار تقریباً یکسان در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. مقدار دو گروه تأثیر Respiratory inorganics و Respiratory organics در رقم غیرتراریخته نعمت و خزر بیشتر از لاین‌های تراریخته آنها بود. رقم طارم مولایی بیشتر از رقم طارم هاشمی دارای اثرات Respiratory inorganics و Respiratory organics بود (جدول ۱).

بیشترین میزان Ionizing radiation مربوط به رقم خزر و طارم مولایی (به‌ترتیب ۹۶۱۷ و ۹۳۳۲ Bq C-14 eq) بود. رقم طارم هاشمی و نعمت با تولید ۷۸۲۴ و ۷۵۹۸ Bq C-14 eq پرتوهای یونیزان در رتبه سوم و چهارم قرار گرفتند. در هشت لاین تراریخته میزان انتشار پرتوهای یونیزان کمتر از ارقام غیرتراریخته بود که تمامی لاین‌های تراریخته در یک دامنه قرار گرفتند. از نظر Ionizing radiation رقم خزر بیشترین تأثیر را نشان داد و رقم طارم هاشمی و نعمت نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱- ارزیابی طبقه تأثیر بر اساس شاخص طبقه‌بندی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش Impact 2002+

Impact category	Unit	Nemat	Khazar	Hashemi	Molaei	NMT_1	NMT_2	NMT_3	NMT_4	NMT_5	KHT_2	KHT_3	KHT_4
Carcinogens	kg C_2H_3Cl eq	17.78	23.12	18.85	22.88	16.09	15.90	16.55	16.44	16.42	16.37	16.42	16.38
Non-carcinogens	kg C_2H_3Cl eq	15.95	20.78	17.17	21.08	14.61	14.44	15.03	14.93	14.91	14.91	14.95	14.92
Respiratory organics	kg C_2H_4 eq	0.3183	0.4090	0.3322	0.3991	0.2854	0.2821	0.2937	0.2917	0.2913	0.2868	0.2876	0.2870
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	1.09	1.40	1.14	1.38	0.9906	0.9792	1.02	1.01	1.01	0.9884	0.9910	0.9889
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	7598	9617	7824	9332	6758	6680	6954	6906	6898	6680	6697	6683
Ozone layer depletion	g CFC-11 eq	0.1452	0.1836	0.1433	0.1080	0.0810	0.0800	0.0833	0.0827	0.0826	0.0773	0.0775	0.0774
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	51985	66783	56854	67094	45515	44993	46835	46513	46456	45681	45802	45704
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	24163	31322	25632	31757	22367	22110	23016	22858	22829	22703	22763	22714
Terrestrial acid/nutri	kg SO_2 eq	12.45	15.54	12.66	15.17	11.13	11.00	11.45	11.38	11.36	10.85	10.87	10.85
Land occupation	m^2org.arable	37.12	50.77	49.22	61.57	34.61	34.22	35.62	35.37	35.33	37.10	37.20	37.12
Aquatic acidification	kg SO_2 eq	4.04	5.05	4.12	4.86	3.56	3.52	3.66	3.64	3.63	3.47	3.47	3.47
Aquatic eutrophication	kg PO_4 P-lim	0.2944	0.3841	0.3415	0.3946	0.2499	0.2471	0.2572	0.2554	0.2551	0.2549	0.2556	0.2551
Global warming	kg CO_2 eq	591.36	743.64	601.89	727.06	533.62	527.49	549.10	545.32	544.65	524.27	525.66	524.53
Non-renewable energy	MJ primary	10913	13666	11038	13280	9808	9695	10092	10023	10010	9591	9616	9595
Mineral extraction	MJ surplus	69.90	90.14	74.98	91.28	63.56	62.83	65.40	64.95	64.87	64.13	64.30	64.16

لاین‌های تراریخته KHT_2، KHT_3 و KHT_4 کمترین Ionizing radiation را دارا بودند و لاین‌های تراریخته NMT_1 الی NMT_5 در رتبه قبل از آنها قرار گرفتند. از نظر گروه تأثیر Ozone layer depletion رقم خزر (۰/۱۸۳۶ g CFC-11 eq) بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد و دو رقم نعمت و طارم هاشمی در رتبه دوم قرار گرفتند. رقم طارم مولایی با ۱۰۸۰ g CFC-11 eq در رتبه بعدی قرار گرفت. ۸ لاین تراریخته کمترین میزان Ozone layer depletion را به خود اختصاص دادند که همگی در یک سطح قرار گرفتند (جدول ۱).

طبق یافته‌های جدول ۱ رقم خزر و طارم مولایی از نظر دو گروه تأثیر Aquatic ecotoxicity و Terrestrial ecotoxicity بیشترین مقدار را نشان دادند. دو رقم غیرتراریخته نعمت و طارم هاشمی از نظر این دو شاخص در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین Aquatic ecotoxicity (۴۴۹۹۳ kg TEG water) و Terrestrial ecotoxicity (۲۲۱۱۰ kg TEG soil) مربوط به NMT_2 بود و سایر لاین‌های تراریخته در یک دامنه قرار گرفتند که در قیاس با ارقام غیرتراریخته مقدار کمتری را نشان دادند. از نظر Terrestrial acid/nutri نیز لاین‌های تراریخته مقدار کمتری را نشان دادند که در بین ۸ لاین تراریخته نیز لاین‌های منتج از رقم خزر کمترین مقدار را دارا بودند.

از نظر گروه تأثیر Land occupation رقم طارم مولایی در رتبه اول و رقم خزر و طارم هاشمی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. لاین‌های تراریخته نعمت و خزر در مقایسه با والد غیرتراریخته خود حدود ۴/۸ و ۲۶/۷ درصد Land occupation کمتری را نشان دادند. بیشترین Aquatic acidification برای ارقام خزر و طارم مولایی (به‌ترتیب ۵/۰۵ و ۴/۸۶ kg SO_2 eq) تولید شد و دو رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه سوم و چهارم قرار گرفتند. کمترین Aquatic acidification مربوط به لاین‌های تراریخته منتج از خزر (۳/۴۷ kg SO_2 eq) و لاین‌های تراریخته نعمت (۳/۵۲ الی ۳/۶۶ kg SO_2 eq) حاصل شد. گروه تأثیر Aquatic eutrophication نیز در لاین‌های تراریخته کمتر از ارقام غیرتراریخته بود. بیشترین Aquatic eutrophication مربوط به دو رقم خزر و طارم مولایی (۰/۳۸۴۱ و ۰/۳۹۴۶ kg PO_4 P-lim) بود (جدول ۱). سهم NH_3 در پتانسیل اسیدی شدن با اختلاف زیادی بیشتر از NO_2 و SO_2 بود. منبع انتشار NH_3 کود اوره است. تصعید آمونیاک اثر مهمی در ایجاد اثرهای زیست‌محیطی یوتریفیکاسیون و اسیدی شدن دارد. انتشار NH_3 به‌صورت تصعید از اوره یک فرآیند فیزیکی و شیمیایی است و بیشتر از N_2O به مدیریت مصرف کود حساس است. انتشار NH_3 از کود اوره بیشتر از سایر کودها است و متاسفانه در ایران نیز کود اوره به میزان زیادی استفاده می‌شود و استفاده از سایر منابع کودی نیتروژن کم است.

بیشترین Global warming برای دو رقم خزر و طارم مولایی (به‌ترتیب ۷۴۳/۶۴ و ۷۲۷/۰۶ kg CO_2 eq) و کمترین Global warming برای هشت لاین تراریخته به‌دست آمد. لاین‌های تراریخته منتج از خزر و نعمت در مقایسه با والد غیرتراریخته خودشان تقریباً ۲۹/۵ و ۱۰ درصد Global warming کمتری را نشان دادند. از نظر گروه تأثیر Non-renewable energy نیز نتایج مشابه گروه تأثیر Global warming بود که بیشترین مقدار آن برای دو رقم خزر و طارم مولایی (به‌ترتیب برابر ۱۳۶۶۶ و ۱۳۲۸۰ MJ primary) حاصل شد. لاین‌های تراریخته خزر و نعمت در قیاس با والد غیرتراریخته خود حدود ۲۹ و ۱۰ درصد Mineral extraction کمتری را به خود اختصاص دادند (جدول ۱). دلیل پایین بودن بالا بودن مصرف انرژی و گرمایش جهانی در ارقام غیرتراریخته را می‌توان به وابستگی زیاد آن‌ها به نهاده‌های ورودی و مصرف بیش‌تر انرژی برای تولید نسبت داد که این نهاده‌ها بدون توجه به مسایل زیست‌محیطی مصرف می‌شوند. نتایج مقایسه بین انرژی‌های ورودی و پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از آن‌ها نشان داد که بین انرژی‌های ورودی و پتانسل گرمایش جهانی ناشی از آن ارتباط مستقیمی وجود دارد.

مدل Ecopoints 97

یافته‌های جدول ۲ خروجی روش Ecopoints 97 با گروه‌های تأثیر انتشار فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های زیست‌محیطی به تفکیک در هوا، آب و خاک نشان داد که فلزات سنگین منتشر شده در هوا (Pb، Cd، Zn و Hg) در لاین‌های تراریخته کمتر از ارقام

غیرتراریخته بود (جدول ۲). همچنین فلزات سنگین انتشار یافته در آب (Cr، Zn، Cu، Cd، Hg، Pb و Ni) نیز در ارقام تراریخته در مقایسه با ارقام شاهد غیرتراریخته کمتر بود. گروه تأثیر AOx برای ارقام نعمت، خزر و طارم هاشمی به‌ترتیب برابر ۱۰/۵۴، ۱۴/۰۲ و ۱۰/۷۲ g Cl- و در رقم طارم مولایی برابر ۳/۵۲ g Cl- بود. AOx انتشار یافته در لاین‌های تراریخته منتج از رقم خزر ۲/۳ g Cl- و لاین‌های تراریخته منتج از رقم نعمت بین ۲/۲۱ الی ۲/۳۰ g Cl- بود. علاوه بر این، آلاینده‌های منتشر شده در خاک (Nitrate، Metals و Pesticide) در لاین‌های تراریخته کمتر از ارقام غیرتراریخته بود (جدول ۲).

جدول ۲- ارزیابی طبقه تأثیر بر اساس شاخص طبقه‌بندی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش Ecopoints 97

Impact category	Unit	Nemat	Khazar	Hashemi	Molaei	NMT_1	NMT_2	NMT_3	NMT_4	NMT_5	KHT_2	KHT_3	KHT_4
NOx	g	1322	1709	1410	1691	1181	1167	1215	1207	1205	1194	1197	1195
SOx	g SO_2 eq	2803	3501	2860	3343	2443	2415	2514	2496	2493	2377	2383	2378
NMVOC	g	584.34	747.07	604.62	716.25	516.46	510.53	531.44	527.78	527.13	515.84	517.21	516.10
NH_3	g	163.85	183.08	142.63	175.62	151.38	149.64	155.77	154.67	154.56	131.92	132.27	131.98
Dust PM_{10}	g	965	1243	1020	1257	888	878	914	908	906	895	897	896
Pb (air)	g	0.7613	0.9570	0.7882	0.9567	0.6904	0.6825	0.7104	0.7055	0.7046	0.6782	0.6800	0.6786
Cd (air)	g	0.1038	0.1204	0.0942	0.1150	0.0951	0.0940	0.0979	0.0972	0.0971	0.0860	0.0863	0.0861
Zn (air)	g	1.28	1.65	1.40	1.70	1.16	1.15	1.19	1.18	1.18	1.17	1.17	1.17
Hg (air)	g	0.0268	0.0350	0.0286	0.0335	0.0233	0.0230	0.0240	0.0238	0.0238	0.02375	0.0238	0.0237
COD	g	2849	3427	2700	2905	2303	2277	2370	2354	2351	2132	2138	2133
P	g	33.91	45.33	42.17	45.22	25.83	25.54	26.58	26.40	26.37	27.08	27.15	27.09
N	g	63.58	80.11	61.30	37.10	28.10	28.66	29.84	29.63	29.60	26.92	26.99	26.93
Cr (water)	g	4.64	6.07	5.07	6.23	4.25	4.20	4.37	4.34	4.33	4.35	4.37	4.36
Zn (water)	g	52.10	66.70	56.03	66.66	46.10	45.58	47.44	47.11	47.06	46.11	46.24	46.14
Cu (water)	g	60.22	78.18	64.52	78.92	54.93	54.30	56.52	56.13	56.06	55.82	55.97	55.85
Cd (water)	g	0.8025	1.02	0.8777	1.06	0.7200	0.7119	0.7404	0.7353	0.7344	0.7179	0.7198	0.7183
Hg (water)	g	0.1156	0.1525	0.1385	0.1713	0.1065	0.1053	0.1096	0.1089	0.1087	0.1101	0.1104	0.1101
Pb (water)	g	1.67	2.14	1.85	2.23	1.50	1.49	1.55	1.54	1.53	1.51	1.51	1.51
Ni (water)	g	25.25	32.84	27.14	32.81	22.75	22.49	23.41	23.25	23.22	23.15	23.22	23.17
AOX (water)	g Cl-	10.54	14.02	10.72	3.52	2.24	2.21	2.30	2.29	2.28	2.33	2.34	2.33
Nitrate (soil)	g	429.19	619.05	694.04	875.47	404.53	399.88	416.26	413.40	412.89	457.25	458.46	457.48
Metals (soil)	g Cd eq	0.0178	0.0239	0.0209	0.0262	0.0166	0.0164	0.0171	0.0169	0.0169	0.0175	0.0175	0.0176
Pesticide soil	g act.subst.	0.8438	1.19	1.27	1.59	0.7855	0.7765	0.8083	0.8027	0.8017	0.8704	0.8728	0.8709
Waste	g	121450	159957	146377	181626	112296	111008	115553	114759	114618	115847	116155	115905
Waste (soil)	g	11.89	15.40	12.57	14.84	10.45	10.33	10.75	10.68	10.67	10.59	10.61	10.59
LMRAD	cm^3	15.92	19.12	15.25	18.56	14.51	14.34	14.93	14.83	14.81	13.60	13.64	13.61
HRAD	cm^3	0.6904	0.8973	0.7339	0.8742	0.6120	0.6050	0.6298	0.6255	0.6247	0.6222	0.6239	0.6225

انتشار نیترات در خاک برای رقم خزر غیرتراریخته معادل ۳۵/۳ درصد بیشتر از لاین‌های تراریخته منتج از خزر بود. همچنین انتشار نیترات رقم غیرتراریخته نعمت ۳/۱۱ الی ۷/۳۳ درصد بالاتر از لاین‌های تراریخته آن بود. انتشار نیترات برای رقم طارم مولایی و

طارم هاشمی به‌ترتیب ۸۷۵/۴۷ و ۶۹۴/۰۴ گرم بود. بیشترین انتشار آفت‌کش نیز مربوط به رقم طارم مولایی (۱/۵۹ .g act.subst) بود و دو رقم طارم هاشمی و خزر در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند. رقم غیرتراریخته نعمت و هشت لاین تراریخته از نظر انتشار آفت‌کش در یک دامنه قرار گرفتند.

مطابق یافته‌های جدول ۲ در لاین‌های تراریخته منتج از خزر انتشار NOx به میزان ۳۰ درصد در مقایسه با رقم خزر کاهش نشان داد. در لاین‌های تراریخته مربوط به رقم نعمت نیز انتشار NOx در مقایسه با رقم نعمت ۸/۸ الی ۱۱/۷۲ درصد کاهش یافت. انتشار NOx در رقم طارم مولایی و طارم هاشمی برابر ۱۶۹۱ و ۱۴۱۰ گرم بود (جدول ۲). بیشترین میزان انتشار SOx برای رقم خزر و طارم مولایی (به‌ترتیب ۳۵۰۱ و ۳۳۴۳ g SO_2 eq) حاصل شد. رقم هاشمی و نعمت در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین میزان انتشار SOx مربوط به لاین‌های KHT_2، KHT_3 و KHT_4 (به‌ترتیب برابر ۲۳۷۷، ۲۳۸۳ و ۲۳۷۸g SO_2 eq) بود. کمترین انتشار NH_3 برای لاین‌های KHT_2، KHT_3 و KHT_4 (به‌ترتیب برابر ۱۳۱/۹۲، ۱۳۲/۲۷ و ۱۳۱/۹۸ گرم) مشاهده شد. بیشترین میزان انتشار NH_3 نیز برای رقم خزر (۱۸۳/۰۸ گرم) مشاهده شد. علاوه بر این، بیشترین انتشار NMVOC، Dust PM_{10} و COD در ارقام خزر و طارم مولایی و کمترین مقدار آن برای لاین‌های تراریخته خزر حاصل شد. انتشار فسفر و نیتروژن ارقام تراریخته بسیار کمتر از ارقام غیرتراریخته بود. علاوه بر این انتشار Waste، Waste (special)، LMRAD و HRAD نیز در ارقام تراریخته کمتر از ارقام غیرتراریخته به‌دست آمد (جدول ۲). با مقایسه گروهی بین ارقام تراریخته و غیرتراریخته مشاهده شد که ارقام تراریخته انتشار فلزات سنگین به آب، هوا و خاک کمتری را دارا بودند که دلیل اصلی آن مربوط به ورودی‌های کمتر بود. در واقع، میزان عناصر سنگین به آب و خاک بر اساس برآورد سالانه رسوب این عناصر و نیز مقدار ورود آنها به خاک از محل کود، سموم، بذر و رسوب و خروج آنها از خاک توسط برداشت محصول، آبشویی و فرسایش محاسبه شد.

مدل EPS 2000

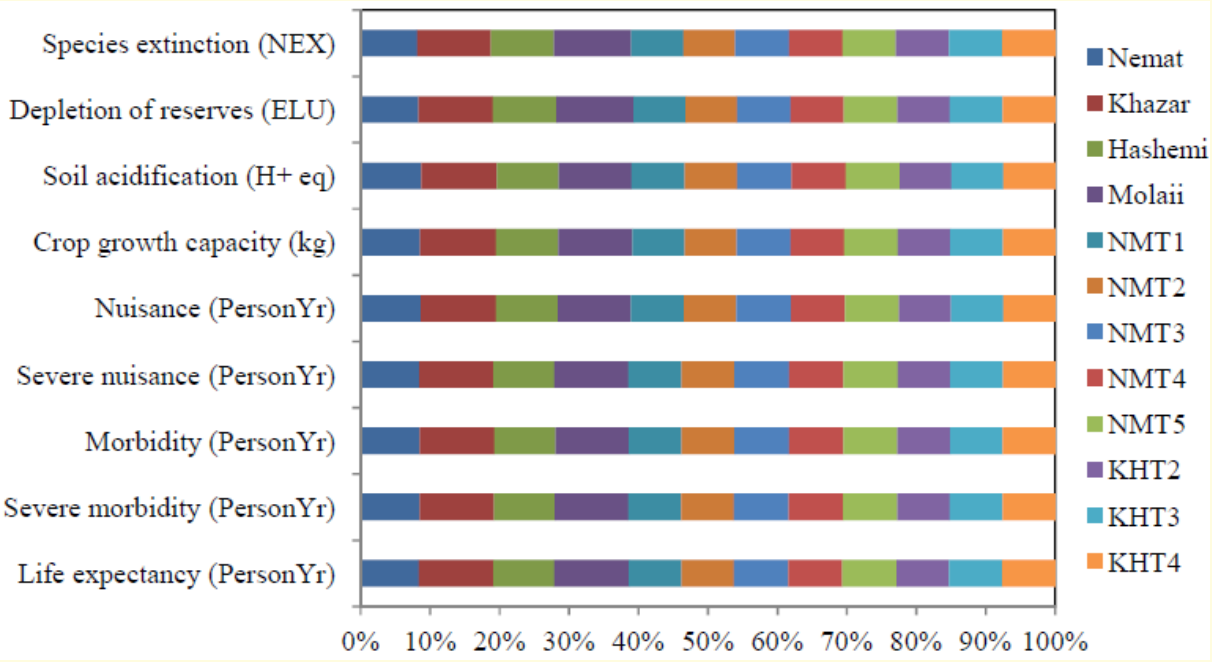
در شکل ۱ مشاهده می‌شود که از نظر گروه تأثیر Crop growth capacity رقم خزر و طارم مولایی در رتبه اول و دوم قرار گرفتند. رقم نعمت نیز بالاتر از لاین‌های تراریخته منتج از خود قرار گرفت. این شاخص برای رقم طارم هاشمی نیز برابر ۱/۶۸ کیلوگرم بود. از نظر گروه تأثیر Soil acidification نیز خزر و طارم مولایی بالاترین مقدار را دارا بودند. رقم نعمت در مقایسه با لاین‌های تراریخته مربوط به خود ۱۰/۷ الی ۱۵/۳۱ درصد Soil acidification بالاتری را نشان داد. کمترین Soil acidification مربوط به لاین‌های تراریخته رقم خزر بود. از نظر گروه تأثیر Depletion of reserves و Species extinction نیز رقم خزر و طارم مولایی بالاترین میزان را دارا بودند. رقم طارم هاشمی و نعمت نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین Depletion of reserves و Species extinction مربوط به NMT_2 بود (هر چند اختلاف فاحشی بین ۸ لاین تراریخته مشاهده نشد). سایر گروه‌های تأثیر (Life expectancy، Severe morbidity، Morbidity، Severe nuisance و Nuisance) نیز برای رقم خزر و طارم مولایی بالاتر از سایر ارقام بود و ۸ لاین تراریخته کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند (شکل ۱).

مدل LCI result

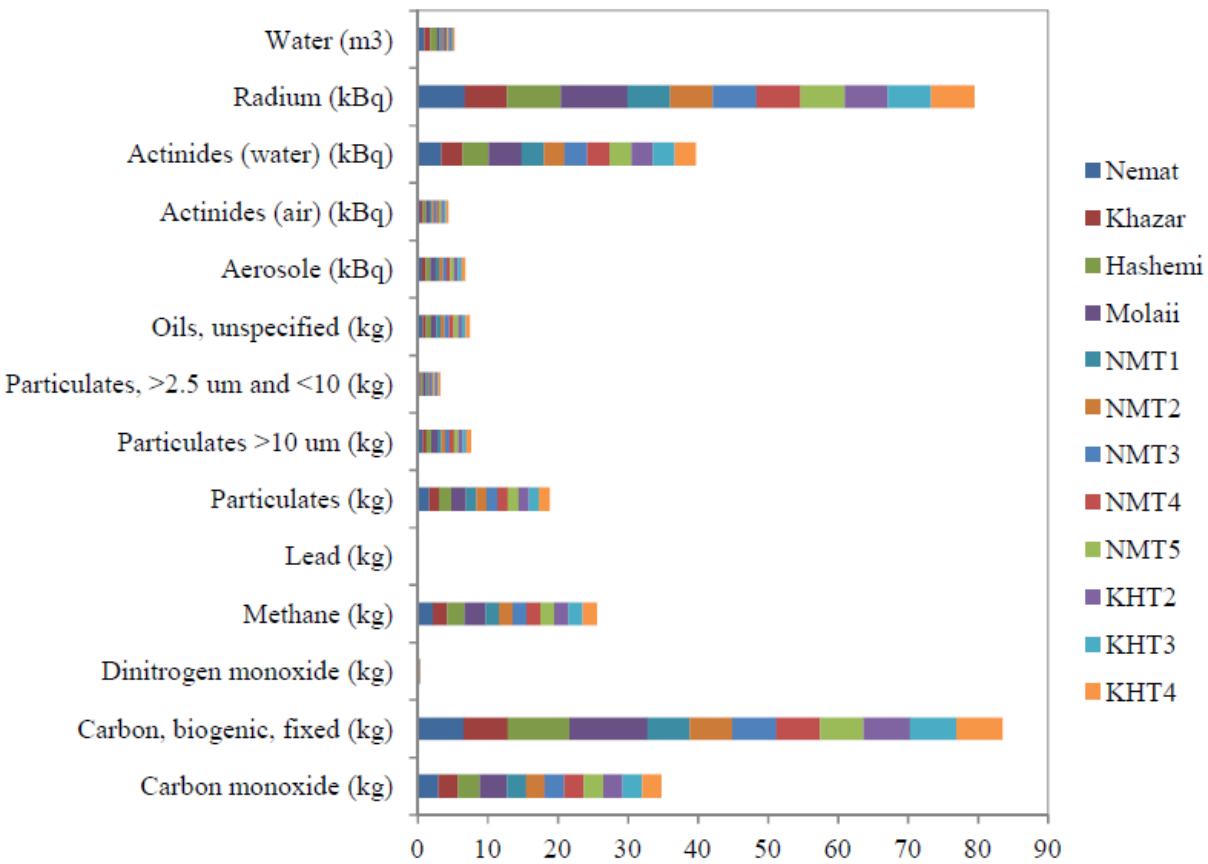
در این روش گروه‌های تأثیر متفاوتی ارزیابی می‌شوند. از نظر انتشار Carbon monoxide، Carbon, biogenic, fixed و Dinitrogen monoxide رقم طارم مولایی (به‌ترتیب برابر ۳/۸۶، ۱۱/۰۹ و ۰/۰۳۵۳ کیلوگرم) بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد (شکل ۲). رقم طارم هاشمی از نظر این سه گروه تأثیر در رتبه دوم قرار گرفت. رقم خزر و نعمت با مقدار تقریباً برابر در رتبه بعدی قرار گرفتند. ۸ لاین تراریخته از نظر انتشار Carbon monoxide، Carbon, biogenic, fixed و Dinitrogen monoxide کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند که در بین آنها NMT_2 در رتبه آخر قرار گرفت (شکل ۲).

از نظر انتشار Methane رقم طارم مولایی (۳/۰۲ کیلوگرم) و طارم هاشمی (۲/۴۹ کیلوگرم) در رتبه اول و دوم قرار گرفتند. انتشار متان در لاین‌های تراریخته مربوط به رقم نعمت ۷/۴ الی ۱۱/۱۱ درصد کمتر از رقم نعمت بود. انتشار متان در رقم خزر و لاین‌های

تراریخته مربوط به آن برابر بود. انتشار Lead نیز در رقم طارم مولایی و هاشمی بالاتر از سایر ارقام بود. انتشار Lead در رقم خزر و لاین‌های تراریخته آن کمتر از رقم نعمت و لاین‌های تراریخته نعمت به‌دست آمد. انتشار سایر منابع قابل مشاهده در شکل ۳ برای رقم طارم مولایی بالاتر از سایر ارقام بود. همچنین هشت لاین تراریخته کمترین میزان انتشار این منابع را در بین تمامی ارقام نشان دادند (شکل ۲).



شکل ۱- ارزیابی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش EPS 2000

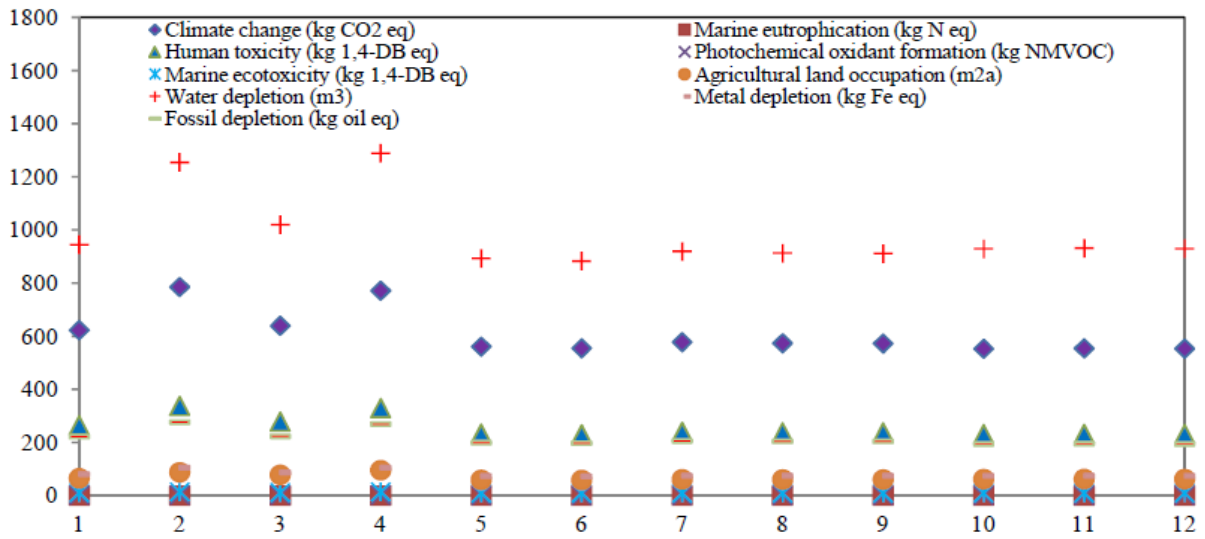


شکل ۲- ارزیابی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش LCI result

مدل ReCiPe

در این روش نه گروه تأثیر بررسی شدند. از نظر Climate change رقم خزر (۷۸۶ kg CO_2 eq) در رتبه اول قرار گرفت (شکل ۳). رقم طارم مولایی با ۷۷۲ kg CO_2 eq در رتبه دوم قرار گرفت. رقم نعمت در مقایسه با پنج لاین تراریخته مربوط به خود میزان ۷/۹۹ الی ۱۲/۲۷ درصد Climate change بالاتر را نشان داد. سه لاین تراریخته مربوط به رقم خزر در مقایسه با والد غیرتراریخته خزر حدود ۲۹/۵ درصد Climate change کمتری را دارا بودند. از نظر دو گروه تأثیر Marine eutrophication و Marine ecotoxicity رقم خزر و طارم مولایی بالاترین مقدار را به خود اختصاص دادند. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. هشت لاین تراریخته کمترین میزان Marine eutrophication و Marine ecotoxicity را دارا بودند که تفاوت بین آن‌ها معنی‌دار نبود. از نظر Human toxicity رقم نعمت ۱۰/۴۷ الی ۱۴/۹۹ درصد تأثیر بالاتر نسبت به ۵ لاین تراریخته مربوط به خود نشان داد. همچنین، رقم غیرتراریخته خزر ۴۴/۵۳ درصد Human toxicity بالاتر از سه لاین تراریخته خود نشان داد. شاخص Human toxicity در دو رقم طارم مولایی و طارم هاشمی برابر ۳۳۰ و ۲۷۹ kg 1,4-DB eq بود. علاوه بر این، رقم خزر و طارم مولایی بالاترین مقدار Photochemical oxidant formation را نشان دادند. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه بعدی قرار گرفتند. هشت لاین تراریخته کمترین میزان Photochemical oxidant formation را دارا بودند. از نظر گروه تأثیر Agricultural land occupation و Water depletion نیز رقم طارم مولایی (۹۶/۲۱ m^2a و ۱۲۸۹ m^3) و خزر (۸۸/۲۲ m^2a و ۱۲۵۵ m^3) بیشترین میزان را به خود اختصاص دادند. دو رقم غیرتراریخته طارم هاشمی و نعمت در رتبه‌های بعدی از نظر این دو گروه تأثیر قرار گرفتند. هشت لاین تراریخته

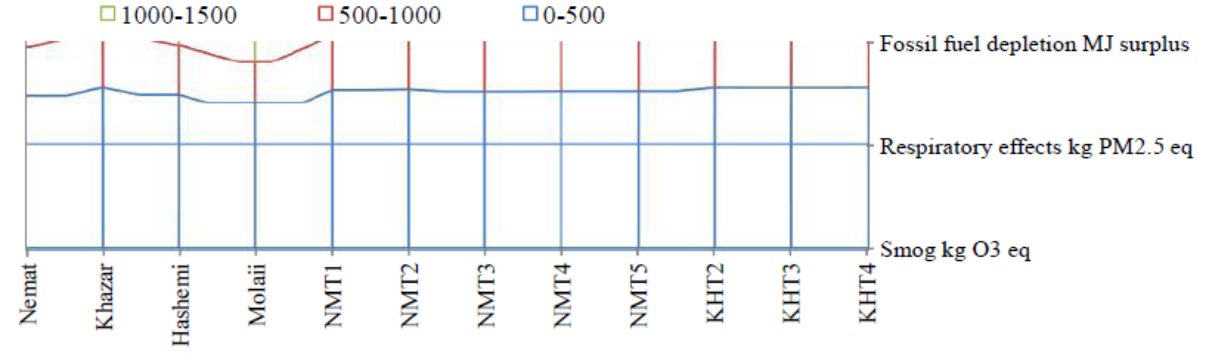
کمترین میزان Agricultural land occupation و Water depletion را نشان دادند که از بین آنها پنج لاین تراریخته منتج از رقم نعمت با اختلاف جزئی در رتبه پائین‌تری قرار گرفتند. از نظر گروه تأثیر Metal depletion نیز دو رقم طارم مولایی و خزر بیشترین مقدار Metal depletion را به خود اختصاص دادند. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه سوم و چهارم قرار گرفتند. هشت لاین تراریخته کمترین Metal depletion را دارا بودند که لاین NMT_2 (۷۲/۵ kg Fe eq) در بین آنها کمترین Metal depletion را نشان داد. از نظر گروه تأثیر Fossil depletion رقم غیرتراریخته خزر در مقایسه با سه لاین تراریخته حدود ۴۲/۳۱ درصد تخلیه بیشتر را نشان داد. همچنین، برای رقم نعمت Fossil depletion در مقایسه با ۵ لاین تراریخته آن Fossil depletion ۷/۷۸ الی ۱۲/۲۵ درصد بالاتر بود (شکل ۳).



شکل ۳- ارزیابی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش ReCiPe

مدل TRACI

در روش TRACI سه گروه تاثیر Smog، Respiratory effects و Fossil fuel depletion ارزیابی شدند. بیشترین انتشار Smog مربوط به رقم طارم مولایی (۴۲/۲۷ kg O_3 eq) بود و رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند (شکل ۴). رقم خزر و سه لاین تراریخته منتج از آن دارای انتشار Smog برابر بودند. کمترین انتشار Smog مربوط به هشت لاین تراریخته بود. از نظر Respiratory effects نیز رقم طارم مولایی (۱/۲ kg $PM_{2.5}$ eq) در رتبه اول و رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند. رقم خزر و هشت لاین تراریخته کمترین مقدار Respiratory effects را به خود اختصاص دادند که اختلاف بین آنها معنی‌دار نبود. همچنین، گروه تأثیر Fossil fuel depletion رقم نعمت به میزان ۷/۸۲ الی ۱۲/۲۳ درصد بالاتر از پنج لاین تراریخته مربوط به آن بود. Fossil fuel depletion در رقم خزر و سه لاین تراریخته آن از نظر آماری یکسان بود. در رقم طارم مولایی و طارم هاشمی Fossil fuel depletion به‌ترتیب برابر ۱۲۶۸/۷۷ و ۱۰۵۲/۸۵ MJ surplus بود (شکل ۴).



شکل ۴- ارزیابی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش TRACI

مدل Cumulative Energy Demand

طبق یافته‌های جدول ۳ از نظر انتشار Non reneable, fossil رقم طارم مولایی (۱۲۰۰۹ مگاژول) در رتبه اول قرار گرفت. رقم هاشمی و نعمت با ۹۹۶۰ و ۹۸۹۶ مگاژول در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین میزان انتشار Non reneable, fossil مربوط به رقم خزر، لاین‌های تراریخته خزر بود. بیشترین انتشار Non reneable, nuclear مربوط به رقم طارم مولایی (۱۲۷۰ مگاژول) و کمترین میزان انتشار Non reneable, nuclear مربوط به NMT_2 بود. حداکثر انتشار Non-renewable, biomass، Renewable, biomass و Renewable, wind, solar, geothe در ارقام مولایی و هاشمی مشاهده شد و سایر ارقام در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که اختلاف چندانی بین آنها مشاهده نشد. از نظر Renewable, water نیز رقم طارم مولایی (۴۰۰ مگاژول) در رتبه اول و ارقام هاشمی و نعمت در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. هشت لاین تراریخته کمترین را دارا بودند که NMT_1 و NMT_2 (۲۷۵ و ۲۷۸ مگاژول) کمترین Renewable, water را دارا بودند. با مقایسه گروهی بین ارقام از نظر شاخص‌های انرژی دریافت شد که ارقام تراریخته دارای شرایط مطلوب‌تری بودند. این نتایج نشان می‌دهد که سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر در ارقام تراریخته در مقایسه با ارقام غیرتراریخته پایین‌تر می‌باشد. این مسأله از لحاظ بوم‌شناختی قابل توجه است، زیرا منبع انرژی‌های تجدیدناپذیر عمدتاً سوخت‌های فسیلی می‌باشند و تکیه بر این منابع در آینده همراه با مخاطرات زیادی می‌باشد.

مدل Ecological footprint

در این روش سه گروه تأثیر Carbon dioxide، Nuclear و Land occupation بر اساس m^2a ارزیابی شدند. رقم طارم مولایی از نظر این سه گروه تأثیر بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد و رقم طارم هاشمی در رتبه دوم قرار گرفت. رقم خزر و نعمت نیز با اختلاف غیر معنی‌دار در مقایسه با هشت لاین تراریخته در رتبه سوم و چهارم قرار گرفتند (جدول ۳).

مدل Ecosystem Damage Potential

دو گروه تأثیر linear, land occupation و linear, land transformation در این روش ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که از نظر هر دو شاخص در هشت لاین تراریخته و رقم خزر و نعمت اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. ولی این دو گروه تأثیر در رقم طارم مولایی و هاشمی بالاتر از سایر ارقام بود (جدول ۳).

مدل Greenhouse Gas Protocol

مطابق یافته‌های جدول ۳ رقم نعمت در قیاس با لاین‌های تراریخته NMT_1 الی NMT_5 ۷/۹ الی ۱۲/۲۵ درصد انتشار Fossil CO_2 eq بالاتری را نشان داد. انتشار Fossil CO_2 eq در رقم خزر و لاین‌های تراریخته مربوط به آن برابر بود. انتشار Fossil CO_2 eq در رقم طارم مولایی و طارم هاشمی به ترتیب برابر ۷۵۴ و ۶۲۵ kg CO_2 eq به‌دست آمد. از نظر انتشار Biogenic CO_2 eq و CO_2 eq from land transformation نیز رقم طارم مولایی و طارم هاشمی بالاتر از سایر ارقام قرار گرفتند.

جدول ۳- ارزیابی طبقه تأثیر بر اساس شاخص طبقه‌بندی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به روش‌های مختلف

Method	Unit	Nemat	Khazar	Hashemi	Molaei	NMT 1	NMT 2	NMT 3	NMT 4	NMT 5	KHT_2	KHT_3	KHT_4
Cumulative Energy Demand													
Non renewable, fossil	MJ	9896	8667	9960	12009	8915	8813	9174	9111	9099	8686	8709	8691
Non-renewable, nuclear	MJ	1017	925	1077	1270	892	882	917	911	910	904	906	904
Non-renewable, biomass	MJ	1.52	1.41	1.87	2.30	1.39	1.38	1.43	1.42	1.42	1.44	1.45	1.44
Renewable, biomass	MJ	483	458	604	740	439	434	452	449	448	465	466	465
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	59.53	54.20	63.20	74.82	52.45	51.85	53.97	53.60	53.54	53.20	53.34	53.23
Renewable, water	MJ	310.08	284	332	400	278	275	287	285	284	284	285	285
Ecological footprint													
Carbon dioxide	m^2a	1496	1317	1515	1832	1352	1336	1391	1382	1380	1325	1329	1326
Nuclear	m^2a	199.22	181.25	211.04	248.95	174.76	172.76	179.83	178.59	178.37	177.09	177.56	177.18
Land occupation	m^2a	122.79	113.43	137.34	168.42	112.17	110.88	115.42	114.63	114.49	115.61	115.91	115.66
Ecosystem Damage Potential													
linear, land occupation	points	46.89	43.26	52.20	63.78	42.66	42.17	43.90	43.60	43.55	43.91	44.03	43.93
linear, land transformation	points	2.61	2.44	3.37	4.22	2.44	2.41	2.51	2.49	2.49	2.55	2.55	2.55
Greenhouse Gas Protocol													
Fossil CO_2 eq	kg CO_2 eq	614	542	625	754	553	547	569	565	564	544	545	544
Biogenic CO_2 eq	kg CO_2 eq	27.12	25.73	34.48	41.76	24.25	23.97	24.95	24.78	24.75	25.70	25.77	25.71
CO_2 eq from land transformation	kg CO_2 eq	1.03	0.95	1.17	1.42	0.93	0.92	0.96	0.96	0.95	0.96	0.96	0.96
CO_2 uptake	kg CO_2 eq	42.73	40.51	53.50	65.54	38.82	38.37	39.94	39.67	39.62	41.09	41.20	41.11
Water footprint													
Human Health	DALY	0.0007	0.0007	0.0008	0.0010	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
Ecosystem Quality	species*year	8.84	8.25	9.55	1.21	8.36	8.26	8.60	8.54	8.53	8.70	8.73	8.71
Resources	$ surplus	177.84	166.01	192.35	243.06	168.14	166.21	173.01	171.83	171.61	175.17	175.64	175.26

جدول ۴- ارزیابی شاخص نرمال‌سازی، وزن‌دهی و Eco-index ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج به دو روش +Impact 2002 و EPS 2000

Impact category	Unit	Nemat	Khazar	Hashemi	Molaei	NMT_1	NMT_2	NMT_3	NMT_4	NMT_5	KHT_2	KHT_3	KHT_4
Normalization													
Human health	-	0.000122	0.000155	0.000127	0.000154	0.00011	0.000109	0.000113	0.000113	0.000112	0.00011	0.00011	0.000110
Ecosystem quality	-	0.000018	0.000024	0.000020	0.000025	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017
Climate change	-	0.000060	0.000075	0.000061	0.000073	0.000054	0.000053	0.000056	0.000055	0.000055	0.000053	0.000053	0.000053
Resources	-	0.000072	0.000091	0.000073	0.000088	0.000065	0.000064	0.000067	0.000066	0.000066	0.000064	0.000064	0.000064
Weighting													
Human health	µPt	121.56	155.44	127.10	154.37	110.19	108.92	113.38	112.60	112.46	110.14	110.49	110.25
Ecosystem quality	µPt	18.04	23.55	19.89	24.63	16.68	16.49	17.17	17.05	17.03	17.03	17.10	17.06
Climate change	µPt	59.73	75.11	60.79	73.43	53.90	53.28	55.46	55.08	55.01	52.95	53.09	52.98
Resources	µPt	72.27	90.51	73.12	87.99	64.95	64.21	66.84	66.38	66.30	63.53	63.70	63.56
Total	µPt	271.59	344.61	280.90	340.43	245.71	242.90	252.84	251.10	250.80	243.65	244.38	243.85
Eco-index indices													
Human health	µPt	14.78	24.16	16.15	23.83	12.14	11.86	12.86	12.68	12.65	12.14	12.21	12.16
Ecosystem quality	µPt	0.33	0.55	0.40	0.61	0.28	0.27	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Climate change	µPt	3.57	5.64	3.70	5.39	2.91	2.84	3.08	3.03	3.03	2.80	2.82	2.81
Resources	µPt	5.22	8.19	5.35	7.74	4.22	4.12	4.47	4.41	4.40	4.04	4.06	4.04
Final Eco-index	µPt	23.89	38.55	25.59	37.57	19.54	19.10	20.69	20.41	20.36	19.27	19.38	19.29

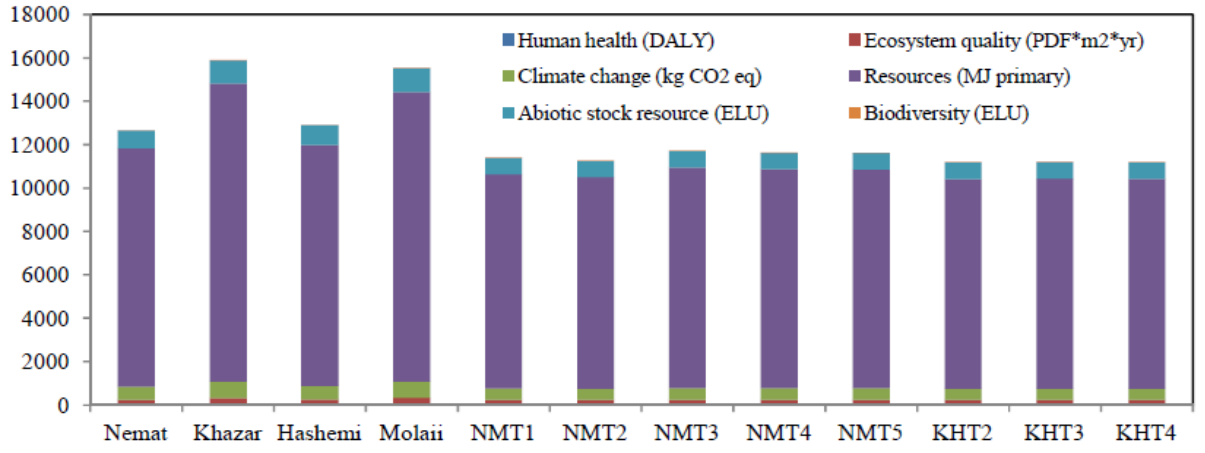
بین رقم خزر و لاین‌های مربوط به آن اختلافی از نظر انتشار Biogenic CO_2 eq و CO_2 eq from land transformation مشاهده نشد. رقم نعمت در مقایسه با لاین‌های منتج از خود به میزان ۸/۷ الی ۱۳/۱۴ درصد انتشار Biogenic CO_2 eq بالاتری را نشان داد. انتشار CO_2 eq from land transformation نیز در رقم نعمت به میزان ۷/۲۹ الی ۱۱/۹۶ درصد بیشتر از لاین‌های تراریخته NMT_1 الی NMT_5 بود. از نظر CO_2 uptake نیز رقم طارم مولایی (۶۵/۵۴ kg CO_2 eq) در رتبه اول و رقم طارم هاشمی (۵۳/۵ kg CO_2 eq) در رتبه دوم قرار گرفت. از نظر CO_2 uptake بین رقم خزر، نعمت و هشت لاین تراریخته اختلاف قابل‌توجهی مشاهده نشد (جدول ۳).

مدل Water footprint

در این روش سه گروه تأثیر Human Health، Ecosystem Quality و Resources ارزیابی شدند. از نظر شاخص Human Health بر اساس DALY اختلافی بین ارقام مشاهده نشد. از نظر Ecosystem Quality رقم طارم مولایی کمترین مقدار (۱/۲۱ species*year) را به خود اختصاص داد. رقم طارم هاشمی بالاترین Ecosystem Quality مقدار (۹/۵۵ species*year) را نشان داد. از نظر Ecosystem Quality لاین‌های تراریخته KHT_2، KHT_3 و KHT_4 نیز بالاتر از رقم خزر قرار گرفتند. ولی رقم نعمت بالاتر از لاین‌های تراریخته منتج از خود قرار گرفت. از نظر شاخص Resources رقم طارم مولایی (۲۴۳/۰۶ surplus $) با اختلاف قابل توجهی بالاتر از سایر ارقام قرار گرفت. رقم طارم هاشمی (۱۹۲/۳۵ surplus $) در رتبه دوم قرار گرفت. ۸ لاین تراریخته و دو رقم خزر و نعمت اختلاف قابل‌توجهی از نظر Resources دارا نبودند (جدول ۳).

ارزیابی خسارت

طبق یافته‌های شکل ۵ مشاهده می‌شود که از نظر Human health رقم طارم مولایی و خزر بیشترین مقدار را دارا بودند. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه سوم و چهارم از نظر Human health قرار گرفتند. هشت رقم تراریخته کمترین میزان Human health را به خود اختصاص دادند (شکل ۵). از نظر Ecosystem quality نیز دو رقم طارم مولایی و خزر (به‌ترتیب ۳۳۷/۵ و ۳۲۲/۶ PDF*m^2*yr) بالاترین مقدار را نشان داد. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه‌های بعدی از نظر Ecosystem quality قرار گرفتند. ۸ رقم تراریخته کمترین Ecosystem quality را نشان دادند که در بین آنها NMT_1 و NMT_2 کمترین تأثیر را داشتند. از نظر Climate change، Resources و Abiotic stock resource نیز رقم طارم مولایی و خزر بیشترین مقدار را به خود اختصاص دادند. کمترین مقدار این سه گروه تأثیر به هشت لاین تراریخته تعلق یافت. بالاترین میزان گروه تأثیر Biodiversity نیز به دو رقم طارم مولایی و خزر تعلق داشت. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه بعدی قرار گرفتند. کمترین مقدار گروه تأثیر Biodiversity به هشت لاین تراریخته تعلق یافت (شکل ۵).



شکل ۵- ارزیابی ارقام تراریخته و غیرتراریخته برنج از نظر Damage assessement

نرمال‌سازی

به‌منظور مقایسهٔ شاخص‌های گوناگون زیست‌محیطی لازم است تمام این شاخص‌ها با واحد یکسانی برآورد گردند. برای این منظور از ضرایب نرمال‌سازی استفاده می‌شود و شاخص‌های نرمال شده بدون واحد برآورد می‌شود. نرمال‌سازی محاسبه اهمیت نتایج شاخص‌ها در ارتباط با برخی اطلاعات مرجع است. توجه به نرمال‌سازی برای درک بهتر میزان ارتباط با نتایج شاخص سیستم تحت مطالعه است. به‌عبارت دیگر در این بخش اهمیت یا بزرگی شاخص‌های محاسبه شده با توجه به اطلاعات مرجع محاسبه می‌شود. نرمال‌سازی نتیجه شاخص را با تقسیم آن بر یک مقدار مرجع انتخاب شده تغییر می‌دهد. انتخاب سیستم مرجع بایستی با در نظر رفتن سازگاری مقیاس‌های مکانی و زمانی مکانیسم زیست‌محیطی و مقادیر مرجع انجام شود. در مدل Impact 2002+ و EPS2000 برای تبدیل مقادیر واقعی (Charactristics) تأثیرات زیست‌محیطی به مقادیر نرمال‌شده (Normalized) مربوط به شاخص‌های زیست‌محیطی از ضرایب خاصی استفاده می‌شود که این ضرایب از نرم‌افزار SimaPro استخراج شد. در جدول ۴ مقدار شاخص‌های زیست‌محیطی به صورت نرمال ارائه شده است. این شاخص‌ها برای گروه‌های اثر نهایی است که شامل سلامت بشر، کیفیت اکوسیستم، تغییر آب و هوا، و منابع هستند.

وزن‌دهی

برای اینکه بتوان شاخص‌های زیست‌محیطی را با واحدهای مربوط با یکدیگر جمع کرد و شاخص کلی برآورد کرد لازم است ضرایب وزنی برای این شاخص‌ها وجود داشته باشد. در مرحله انتهایی ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی این مرحله به‌منظور بی‌بعد کردن شاخص‌ها فراهم کردن امکان مقایسه آن‌ها و درک بهتر نتایج حاصل عمل وزن‌دهی انجام می‌شود. در این مرحله شاخص نرمال‌شده با مؤلفه‌های وزن‌دهی بی‌بعد می‌شوند. در مدل Impact 2002+ برای تبدیل مقادیر واقعی (Charactristics) تأثیرات زیست‌محیطی به مقادیر وزن‌دار شده (Weighted) مربوط به شاخص‌های زیست‌محیطی از فاکتورهای وزنی استفاده می‌شود که شاخص‌های وزن‌دار شده با واحد µPt برآورد می‌شود. این فاکتورها از نرم‌افزار SimaPro استخراج شد. در جدول ۴ مقدار شاخص‌های زیست‌محیطی به صورت وزنی ارائه شد. این شاخص‌ها برای گروه‌های اثر نهایی است.

شاخص زیست‌محیطی Eco-index

این شاخص زیست‌محیطی از نظر چهار گروه تأثیر Human health، Ecosystem quality، Climate change و Resources مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از ارزیابی نهایی این چهار گروه تأثیر مشخص شد که رقم خزر و طارم مولایی بالاترین مقدار Eco-index را دارا بودند. رقم طارم هاشمی و نعمت در رتبه سوم و چهارم قرار گرفتند. هشت لاین تراریخته از نظر Eco-index کمترین مقدار را نشان دادند که اختلاف معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد (جدول ۴).

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی اثرات گیاهان تراریخته و غیرتراریخته بر سلامتی انسان و محیط‌زیست موضوع بحث‌برانگیز و قابل توجه است که در این تحقیق به این موضوع پرداخته شد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ارقام برنج غیرتراریخته در بسیاری از طبقات تأثیر مورد ارزیابی (به‌ویژه مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف نهاده‌ها و سایر عملیات زراعی) تقریباً دو برابر ارقام تراریخته دارای اثر سوء زیست‌محیطی بودند. با توجه به مصرف سوخت‌های فسیلی در تولید سموم شیمیایی و آفت‌کش‌ها این مسأله بسیار قابل توجه و دارای اهمیت است. در واقع، دلیل اصلی اختلاف انرژی ورودی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیست‌محیطی در بین ارقام تراریخته و غیرتراریخته عدم مصرف سموم شیمیایی برای مبارزه با کرم ساقه‌خوار در ارقام تراریخته بوده که به کاهش مصرف نهاده‌ها و انرژی بخش‌های آفت‌کش‌ها، نیروی انسانی در عملیات زراعی، ادوات و ماشین‌آلات و سوخت منجر شد. در واقع، در تولید ارقام غیرتراریخته این نهاده‌ها بدون توجه به مسایل زیست‌محیطی مصرف می‌شوند. در همین رابطه دیگر محققان بیان داشتند که انتشار گازهای گلخانه‌ای در هنگام فعالیت‌های متنوع کشاورزی یا به‌طور مستقیم از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی در طی اجرای عملیات زراعی (کاشت تا برداشت) و یا به‌طور غیرمستقیم در زمان تولید و حمل و نقل ورودی‌های مورد نیاز مزرعه (علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی) به‌دست می‌آیند (Wood and Cowie, 2004). در مطالعه‌ای دیگر نیز اعلام شد که عملیات زراعی و غیر زراعی (تولید و حمل و نقل کودها و آفت‌کش‌ها) در تولید برنج هر کدام به‌ترتیب ۹۸-۸۰ و ۹۱-۱۶ کیلوگرم معادل CO_2 در هکتار پتانسیل گرمایش جهانی نقش دارند (Pathak and Wassmann, 2007). در دیگر تحقیقات شاخص طبقه‌بندی گروه تأثیر در بخش زراعی تولید گندم ۱۱۹/۵ kg CO_2 eq (Wang *et al.*, 2007)، چغندرقند در مرودشت ایران برابر ۲۲/۹ kg CO_2 eq (Mirhaji *et al.*, 2012)، گندم در مرودشت ایران ۲۶۲/۰۹ kg CO_2 eq (Mirhaji *et al.*, 2013) و گندم در سوئیس ۳۸۱ kg CO_2 eq گزارش شد (Charles *et al.*, 2006). مقدار تقاضای انرژی غیرقابل تجدید برای تولید یک تن گندم در گرگان ۶۶۴۱ مگاژول گزارش شده است (Soltani *et al.*, 2010).

دلیل بالاتر بودن اثر ecotoxicity در آب و خاک برای تولید ارقام برنج غیرتراریخته نسبت به ارقام تراریخته را می‌توان به تأثیر اسپری کردن و کاربرد ماده مؤثره ناشی از آفت‌کش‌ها در طی مراحل رشد و نمو گیاه نسبت داد. علاوه بر این، مصرف سوخت و ادوات و

ماشین‌آلات و تولید و حمل و نقل این مواد نیز اثر سمیت وجود دارد. مهم‌ترین مواد دارای پتانسیل اسیدی شدن در اکوسیستم‌ها، دی‌اکسیدسولفور و اکسیدهای نیتروژن هستند که در جریان تولید در کشاورزی عمدتاً از مصرف سوخت‌های فسیلی ناشی می‌شوند، اگرچه آمونیاک حاصل از مصرف کودهای شیمیایی در مزرعه نیز از عوامل مهم اسیدی شدن است (Engstrom *et al.*, 2009). این انتشارات به‌وسیله مجموعه فرآیندهای پیچیده انتقال اتمسفری و شیمیایی سبب اسیدی‌سازی شده و این به نوبه خود ایجاد اثرات زیان‌باری بر اکوسیستم‌ها، جمعیت‌های گیاهی و جانوری می‌نماید (Bare *et al.*, 2003). در دیگر تحقیقات شاخص طبقه‌بندی گروه تأثیر اسیدیته ۴ kg SO_2 eq (Wang *et al.*, 2007) حاصل شد. در تحقیقی دیگر در شیلی شاخص طبقه‌بندی گروه تاثیر اسیدیته برای تولید کلزا و آفتابگردان به‌ترتیب ۱۹ و ۲۳ kg SO_2 eq محاسبه شد (Iriarte *et al.*, 2010). اعتقاد بر آن است که انتشاراتی مانند کلروفلوروکربن‌ها و گازهای هالوژنه سبب تخریب لایه ازن در استراتوسفر می‌شوند (Bare *et al.*, 2003). تخریب لایه ازن می‌تواند باعث اثراتی مثل سرطان پوست، ورود خسارت‌های مولکولی به مواد، صدمه به گیاهان و حیوانات گردد که به‌علت افزایش عبور ماوراءبنفش رخ می‌دهند (Bare *et al.*, 2003). سرعت تشکیل ازن در لایه تروپوسفر به‌وسیله واکنش‌های پیچیده شیمیایی تعیین می‌شود که تحت تأثیر غلظت NOx، ترکیبات آلی فرار و همچنین دما، نور خورشید و جریان‌های همرفت قرار دارد. یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که منواکسیدکربن و متان نیز در تشکیل ازن مؤثرند (Bare *et al.*, 2003).

یوتریفیکاسیون عموماً وابسته به اثرات زیست‌محیطی رهاسازی مقادیر بیش از اندازه مواد مغذی است که سبب تغییر در ترکیب گونه‌ای اکوسیستم‌ها شده و میزان تولید زیست‌توده را افزایش می‌دهد. این خود سبب زنجیرهای از پیامدهای زیان‌بار شامل کاهش تنوع زیستی و تولید ترکیبات شیمیایی سمی برای انسان، دام و سایر پستانداران می‌شود (Bare *et al.*, 2003). دیگر محققان شاخص طبقه‌بندی یوتریفیکاسیون برای تولید کلزا و آفتابگردان در سیلی را به ترتیب ۷/۲ و ۹ kg PO_4 eq گزارش کردند (Iriarte et al., 2010). در شیلی شاخص طبقه‌بندی گروه تاثیر اسیدیته برای تولید کلزا و آفتابگردان به‌ترتیب ۱۹ و ۲۳ kg SO_2 eq محاسبه شد (Iriarte *et al.*, 2010). باران اسیدی در برخی نقاط جهان باعث مسمومیت و صدمه به گیاهان، درختان، آبزیان و افزایش اسیدیته خاک می‌شود (Hoveidi *et al.*, 2010). از منابع عمده این اثر در کشاورزی استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژنه و در نتیجه انتشار NOx و NH_3 به اتمسفر است. از آنجا که در تولید محصولات کشاورزی نهاده‌های زیادی مصرف می‌شود در نتیجه سامانه تولید کشاورزی اثرات زیست‌محیطی گسترده‌ای را ایجاد می‌کند (Brentrup *et al.*, 2004). در مطالعه‌ای روی محصول برنج در چین مشخص شد که برای تخلیه منابع فسیلی، میزان مصرف سوخت فسیلی ۱۰۶ مگاژول بر تن بوده و شاخص نهایی زیست‌محیطی آن ۰/۰۰۸ به دست آمد (Wang *et al.*, 2010).

در این پژوهش ارزیابی چرخه حیات ارقام برنج تراریخته و غیرتراریخته برای تخمین اثرات بر سلامتی انسان و محیط‌زیست در فرآیند تولید انجام شد. تمامی شاخص‌های انتشار آلاینده با استفاده از روش‌های مختلف در نرم‌افزار SimaPro بررسی شدند. نتایج نشان داد که کاهش مصرف حشره‌کش‌ها در ارقام تراریخته به استفاده کمتر از نیروی انسانی، ادوات و ماشین‌آلات و سوخت منجر شد که نتیجه آن نیز کاهش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی بود. علاوه بر این، تمامی گروه‌های تأثیر مورد ارزیابی برای ارقام برنج تراریخته کمتر از ارقام برنج غیرتراریخته به‌دست آمد. با توجه به یافته‌های این تحقیق می‌توان ادعا نمود که ارقام برنج تراریخته به‌دلیل عدم مصرف آفت‌کش‌ها دارای اثرات سوء کمتری بر سلامتی انسان و محیط زیست بودند و این مسأله از نظر بوم‌شناختی بسیار مهم است و به فلسفه کشاورزی ارگانیک و توسعه پایدار نزدیک‌تر است. اگرچه محققان در این پژوهش براساس استانداردهای علمی مصرف آفت‌کش‌ها را برای ارقام غیرتراریخته در نظر گرفتند ولی کشاورزان سنتی در منطقه کاربرد دو تا چند برابری آفت‌کش‌ها را برای تولید برنج در نظر می‌گیرند. بنابراین، طبق یافته‌های این پژوهش نتیجه‌گیری می‌شود که میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ارتباط مستقیم با مصرف نهاده‌ها و شیوه مدیریت مزرعه دارد که بر این اساس کم‌ترین مقدار این شاخص‌های زیست‌محیطی در تولید ارقام تراریخته به‌دست آمد.

سپاسگزاری

بخشی از اعتبار این پژوهش از محل پژوهانه طرح پسادکتری ۹۳۰۳۲۱۷۴ با عنوان "تجزیه زیست‌محیطی – مولکولی و شبیه‌سازی ارقام برنج تراریخته حاوی ژن *cry*1Ab مقاوم به کرم ساقه‌خوار" تفاهم‌نامه شماره ۴۳۷۲۲/ص/۹۴ مصوب ۱۳۹۴/۱۰/۲۸ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور تأمین شده است که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Bare, J.C., Norris, G.A., Pennington, D.W., and McKone. T. 2003. TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. J. Ind. Ecol., 6: 49-78.
2. Bennett, R., R. Phipps, A. Strange, and P. Grey. 2004. Environmental and human health impacts of growing genetically modified herbicide-tolerant sugar beet: a life cycle assessment. Plant Biotechnology Journal, 2 (4): 272-278.
3. Brentrup, F., J. Küsters, H. Kuhlmann, and J. Lammel. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. European Journal of Agronomy, 20(3): 247-264.
4. Charles, R., Jolliet, O., Gaillard, G., and Pellet, D. 2006. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. Agriculture, Ecosystems and Environment 113(1–4): 216-225.
5. Engström, R., Wadeskog, A., and Finnveden, G. 2009. Environmental assessment of Swedish agriculture, Ecol. Eco. 60: 550–563.
6. FAO. 2011. Food and Agriculture Oranization of the United Nations and Consumer Protection. Towards integrated commodity and pest management in grain storage, http://www.fao.org
7. Ghareyazie, B. 2004. Safety assessment of Cry1Ab protein. 1st National Biosafety Congress in Iran. 17 - 18 Feb 2004. Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran. Karaj, Iran.
8. Hoveidi. H, mahdlooei. S, olia. E. 2010. Acid rain and its impact on environmental pollution. Fourth Specialized Conference of environment. Tehran.
9. Iriarte, A., J. Rieradevall, and H. Gabarrell. 2010. Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions. Journal of Cleaner Production, 18: 336-345.
10. Mirhaji, H., Khojastehpour, M., Abaspour-fard, M.H., and Mahdavi Shahri, S.M. 2012. Environmental impact study of sugar beet production using life cycle assessment in Khorasan province. Agroecology 4: 112-120.
11. Mirhaji, H., Khojastehpour, M., and Abaspour-fard, M.H. 2013. Environmental effects of wheat production in Marvdasht region. Journal of Natural Environment 66(2): 223-232.
12. Pathak, H., and R. Wassmann. 2007. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture: I. Generation of technical coefficients. Agricultural Systems, 94: 807-825.
13. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W., Suh, S., Weidema, B.P., and Pennington, D.W. 2004. Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environ. Int., 30: 701–720.
14. Roy, P., D. Nei, T. Orikasa, Q. Xu, H. Okadome, N. Nakamura, and T. Shiina. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. J. Food. Engin, 90: 1-10.
15. Roy, P., N. Shimizu, and T. Kimura. 2005. Life cycle inventory analysis of rice produced by local processes. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 67(1): 61-67.
16. Soltani, A., Rajabi, M.H., Zeinali, E., and Soltani, E. 2010. Evaluation of environmental impact of crop production using LCA: wheat in Gorgan. Electronic Journal of Crop Production 3(3): 201-218.

17. Tzilivakis, J., D.J., Warner, M. May, K.A. Lewis, and K. Jaggard. 2005. An assessment of the energy inputs and greenhouse gas emissions in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) production in the UK. Agricultural Systems, 85: 101-119.
18. Wang, M., Wu, W., Liu, W., and Bao, Y. 2007. Life cycle assessment of the winter wheat-summer maize production system on the North China Plain. International Journal of Sustainable Development and World Ecology 14(4): 400-407.
19. Wang, M., X. Xia, Q. Zhang, and J. Liu. 2010. Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 17: 2, 157-161.
20. Wood, S., and A. Cowie. 2004. 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.