DOR: 20.1001.1.24234931.1401.9.1.2.3

سال نهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱، ص ص ۲۱- ۲۸

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۶/۰۹

بررسی تأثیر تغییر کاربری زمین برای تولید بیوانرژی با توجّه به هزینهٔ ارزش افزوده و کیفیّت آب در شرایط تصادفی

مهدی یوسفی‌نژاد عطاری[1*]، طاهر یزدان پناه[2]، زهره خلیل پور[2]

۱- استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

* بناب، صندوق پستی: ۵۵۵۱۸۵۷۷۷۷، mahdi_108108@yahoo.com

چکیده

این مطالعه به بررسی تأثیر تغییر کاربری زمین برای تولید بیوانرژی با در نظر گرفتن هزینهٔ ارزش افزوده و کیفیّت آب در شرایط تصادفی با استفاده از ضایعات و پسماندهای گندم که اقدام به تولید بیوسوخت نموده، پرداخته است. از این رو مدل خطی برای تغییر کاربری زمین با هدف کاهش مجموع هزینه‌ها و افزایش راندمان تولید ارائه گردید. در شرایط تصادفی با استفاده از نرم‌افزار گمز به حل مدل پرداخته شد و نتایج محاسباتی و مقایسه‌ها بیانگر عملکرد مطلوب تأثیر تغییر کاربری زمین برای تولید بیوسوخت مبتنی بر هزینهٔ ارزش افزوده و کیفیّت آب را در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. با انتخاب شهرستان عجب‌شیر به عنوان منطقه مورد مطالعه و انتخاب ۹ محصول مختلف و بررسی محصولات از جنبه هزینه‌ها و ارزش افزودهٔ هر کدام از محصولات این نتیجه حاصل شد که اقدام به کاشت و تولید گندم برای تولید بیوسوخت هم از نظر سودآوری و هم از نظر هزینه مقرون به صرفه بوده و تأثیر کمتری بر آلودگی آب دارد. به علّت نیاز به کوددهی کمتر که منجر به پایین بودن مقدار نیترات موجود در خاک می‌شود که آن نیز باعث می‌شود درصد آلودگی آب در حین تولید بیوسوخت کمتر شده، آسیب کمتری به محیط زیست وارد شود و هم از لحاظ اقتصادی برای اهالی شهرستان عجب‌شیر مقرون بصرفه باشد.

کلیدواژگان: سوخت زیستی، گندم، کاربری اراضی کشاورزی، ردّپای آب خاکستری، اهداف چند منظوره

Investigating the impact of land use change for bioenergy production with respect to value added cost and water quality in random conditions

Mahdi Yousefi Nezhad Attari[1*], Taher Yazdan Panah[2], Zohreh Khalilpour[2]

1- Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

2- MSc, Department of Industrial Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

* P.O.B. 5551857777 Bonab, Iran, mahdi_108108@yahoo.com

Received: 27 October 2020 Accepted: 31 August 2021

Abstract

This study investigates the effect of land use change for bioenergy production by considering the cost of value added and water quality in random conditions using waste and wheat residues that have produced biofuels. Therefore, a linear model for land use change was presented with the aim of reducing total costs and increasing production efficiency. In random conditions, the model was solved using GAMS software and the computational results and comparisons show the optimal performance of the effect of land use change for biofuel production based on value added cost and water quality in different scenarios. By selecting Ajabshir city as a study area and selecting 9 different products and examining the products in terms of costs and added value of each product, we came to the conclusion that planting and producing wheat for biofuel production It is both cost-effective and cost-effective and has less of an impact on water pollution. Due to the need for less fertilizer, which leads to a lower amount of nitrate in the soil, which also reduces the percentage of water pollution during biofuel production, less damage to the environment and be economically affordable for the residents of Ajabshir city.

Keywords: biofuels, wheat, agricultural land use, gray water footprint, multi-purpose purposes

۱- مقدمه

در دنیای واقعی از سوخت‌های زیستی خیلی کم استفاده می‌شود. تولید سوخت تجدیدپذیر از محصولاتی هم چون گندم و علف به عنوان پتانسیلی برای تولید مزایای زیست محیطی محسوب می‌شود که استفاده از گندم و علف جایگزین مزایای بسیاری برای تولید سوخت زیستی از جمله عملکرد بالای بیوماس[1] سازگاری آب و هوا و خاک و نیازهای کم کوددهی با افزایش مصرف مواد غذایی است و قابلیت اطمینانی دارد که با جایگزینی زمین‌های زراعی با تولید گندم و علف برای سوخت زیستی می‌تواند عملکرد اکوسیستم‌های محلّی را با کاهش تقاضای آب و آلودگی از طریق کودهی از جمله کاهش بار نیترات در آب‌های زیرزمینی و کاهش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی را بهبود دهد. به همین خاطر برای تولید بیوانرژی که از تبدیل محصولات زمین‌های زراعی به گندم و سایر محصولات بدست میاد و بخاطر دوام و پایداری و سهم کم در انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقویت اقتصاد مردم و همچنین به علّت کاهش نیترات در خاک که باعث آلودگی کمتر زمین و در نتیجه آب می‌شود از اهمیّت و محبوبیت زیادی میان مردم برخوردار می‌باشد [۱]. به همین دلیل با توجّه به هزینه‌های ارزش افزوده و کیفیت آب در تولید بیوانرژی مورد بررسی قرار گرفته به طوریکه هزینه‌های ارزش افزوده هزینه‌های مختلفی را شامل می‌شود است که با حداقل کردن هزینهٔ کل که از مجموع هزینه‌های (۱) هزینهٔ فرصت و شانس زمین به مقدار سود حاصل از زمین‌های زراعی تا قبل از تبدیل گندم (۲) هزینهٔ تولید و نگهداری گندم (۳) هزینهٔ برداشت (۴) هزینهٔ حمل و نقل محصول تولید شده به مراکز تبدیلی (۵) هزینهٔ ساخت مراکز تأسیسات تبدیل که محصول تولید شده رو به سوخت بیوانرژی تبدیل می‌کند و (۶) هزینهٔ عملکرد مرکز تأسیسات تبدیل که برای تولید بیوسوخت را شامل می‌شود را با استفاده از میانگین هزینه‌ای که باعث کاهش هزینهٔ کل می‌شود را در کنار کیفیت آب که از طریق رد پای آب خاکستری از طریق اندازگیری مقدار نیترات موجود در خاک و اثر گذاری در آب بدست میاد مورد بررسی قرار خواهد گرفت که با کاهش میانگین هزینه‌ای باید ردپای آب خاکستری نیز در طول تولید بیوانرژی کاهش یابد.

در این مسأله متغیرهای تصمیم عبارتند از: هکتار گندم برداشتی ماهانه از نوع کاربری زمین تبدیلی و تعداد ماشین آلات و ساعات کاری ماشین آلات و ذخیرهٔ گندم ماهانه و سرانجام تعداد تجهیزات استفاده شده در طول برداشت که در نهایت با بدست آوردن مقدار هزینه‌های ارزش افزوده و اندازگیری مقدار نیترات موجود در خاک و استفاده از مدل‌سازی ریاضی همزمان با تولید بیوانرژی که به مقایسهٔ بین هزینه‌های ارزش افزوده و کیفیت آب در شرایط تصادفی پرداخته می‌شود. با انتخاب پنج منطقه از شهرستان عجب شیر به عنوان منطقهٔ مورد مطالعه با در نظر گرفتن ۹ محصول مختلف در ۵ محل زمین‌های کشاورزی به بررسی هر کدام از محصولات اعم از هزینه‌ها و سودآوری پرداخته شده و در نهایت محصولی که هم از لحاظ هزینه و هم سودآوری و هم میزان تأثیرگذاری کمتر بر آلودگی آب و محیط زیست را دارد برای تولید بیوسوخت انتخاب می‌شود. از آنجایی که منابع آبی موضوع مهمی برای آیندهٔ سیستم‌های بیوسوخت شناسایی شده‌اند به همین خاطر استفاده از سوخت‌های زیستی از منابع قابل تجدیدپذیر باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و تقویت اقتصادهای روستایی و ایجاد مزایای زیست محیطی می‌شود و همچنین چون بخاطر استفادهٔ مردم از کودهای تجاری در اراضی کشاورزی باعث افزایش نیترات در خاک شده که باعث بروز بیماری‌های آبی مانند سندرم آبی نوزاد می‌شوند لذا از محصولات جایگزین استفاده می‌شود که مزایای بسیاری برای تولید سوخت زیستی از جمله سازگاری آب، هوا، خاک و نیاز به کوددهی کم دارد که باعث کاهش نیترات خاک و در نهایت باعث کاهش رد پای خاکستری آب و میزان آلودگی آب می شود که دارای قابلیت اطمینان بالایی است.

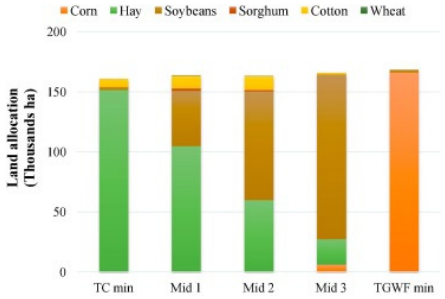
۲- پیشینهٔ تحقیق

سیاست‌های طراحی شده برای کاهش تأثیرات زیست محیطی مصرف مواد، می‌توانند در مراحل مختلف در تمام طول عمر محصول مداخله کنند. از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل ورودی خروجی برای بررسی تعامل بین اثرات انرژی، آب و مواد غذایی در نقاط مختلف زنجیره‌های تأمین، از استخراج مواد و سوختن انرژی تا نقطهٔ مصرف نهایی استفاده شده است. ۲۰ مورد از مهم‌ترین محصولات نهایی شناسایی شده‌اند که می‌توان با آن تأثیرات انرژی، آب و مواد غذایی را با استراتژی‌های مختلف تقاضا، مانند کاهش ضایعات مواد غذایی و یا تغییرات غذایی را به دست آورد. پس از تجزیه و تحلیل مسیر ساختاری برای محاسبهٔ ۲۰ مورد از مهم‌ترین زنجیره‌های تأمین می‌توان تأثیر آن‌ها را توسط سیاست‌های منابع مدیریت که در نقطهٔ استخراج و در طول فرایند تولید عمل می‌کنند، مدیریت کرد [۲].

در پژوهشی از داده‌های فضایی با وضوح بالا برای غرب تنسی تا اندازگیری فاکتورهای تولید علف جایگزین برای اتانول سلولز بر حوضهٔ ردپای آب خاکستری [2] یا مقدار آب شیرین مورد نیاز برای رقیق کردن شیرین کنندهٔ نیترات به سطح ایمنی نسبت به تولید محصولات کشاورزی موجود استفاده شد. هزینهٔ برآورد شده و ردّپای آب خاکستری در مدل بهینه‌سازی چندهدفهٔ یکپارچه باعث شده تا حاشیهٔ مناسب زنجیرهٔ تأمین مواد اولیه و تعیین زنجیرهٔ عرضه که کاهش حداکثر ردّپای آب خاکستری را با کمترین هزینه به دست می‌آورد، با هم ادغام شوند. ایالت تنسی یکی از چند ایالت ایالات متحده است که به طور فعّال توسعه صنایع بیولوژیکی محلّی را ترویج می‌دهد و برنامهٔ پشتیبانی دولتی برای رشد بخش زیست انرژی مبنی بر علف جایگزین است. بنابراین، تنسی محل مناسب برای این تجزیه و تحلیل است. غرب تنسی، منطقهٔ مورد مطالعه انتخاب شده است که: (۱) حاوی بیشترین محصول کشور است و دارای پتانسیل بالایی برای ایجاد استقرار علف جایگزین با توجّه به خاک‌های تولیدی و شرایط آب و هوایی مطلوب می‌باشد؛ (۲) دارای تقاضای بالا برای حمل سوخت و دومین منطقهٔ پرجمعیت شهری در ایالت است و (۳) به آبخوان‌های آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب خانگی نزدیک به ۹۶٪ ساکنان بستگی دارد. نتایج حاکی از این است که غلظت نیتروژن در محیط آب و انواع زمین‌های کشاورزی به تولید زراعی با افزایش میزان ردّپای آب خاکستری تبدیل شده است. متوسط ردّپا سوپراگرس در منطقّ مورد مطالعه بین ۱۳۱.۸ L L-1 ردّپای آب خاکستری و ۱۴۵.۹ L L-1 اتانول است که در محدودهٔ ردّپای آب خاکستری برآورد شده از سایر مواد زیست توده لیگنوسلولزی [3] در مقالات قرار دارد همچنین متوسط هزینهٔ کاهش ردّپای آب خاکستری از زنجیرهٔ تأمین مواد اولیهٔ تعیین شده، در منطقه ۰/۹۴ میلی‌متر برآورد شده است. تجارت بین هزینه‌های تولید سوخت زیستی و کاهش بارگذاری نیترات در آب‌های زیرزمینی، به دلیل اختلافات موجود در زمین‌های کشاورزی تبدیل شده به تولیدات مواد اولیه، هدایت می‌شوند. منابع آبی به عنوان موضوعی مهم برای آیندهٔ سیستم‌های بیوسوخت شناسایی شده‌اند. این تحقیق، برآورد واقعی تولید چمن برای صنعت بیوسوخت در منطقهٔ غرب تنسی را ارائه نموده است. ردّپای آب خاکستری برآورده شده چمن در این تحقیق قابل مقایسه با ردّپای آب

1. Biomass
2. Grey water footprint
3. Lingo cellulosic

خاکستری برآورد شده برای سایر علوفه‌جات زیست تودهٔ لیگنو سلولزی می‌باشد [۱]. همچنین بررسی ۶ محصول مختلف در ۳ منطقه برحسب هزینهٔ کل و ردّپای آب خاکستری کل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ تخصیص مساحت زمین کشاورزی [۱]

نتایج نشان می‌دهد که در غرب تنسی، نوع زمین تغیر کاربری یافته به تولید چمن برای قرارگیری زنجیره‌های تأمین چمن که اهداف به حداقل‌رسانی هزینه و ردّپای آب خاکستری خالص تأثیرگذار است. زمین‌های مراتعی/چراگاهی، از جمله منابع ترجیحی زمین کشاورزی برای تبدیل به تولید چمن هستند. وقتی ملاحظات هزینه‌ای از اهمیت برخوردار است که به علت هزینه‌های فرصت نسبتاً پایین در رابطه با این زمین‌ها باشد. بالعکس، تبدیل یک منطقهٔ زراعی به تولید چمن باعث کاهش تولید نیترات به آب زیرزمینی می‌شود و در نتیجه کاهش بیشتری در ردّپای آب خاکستری حاصل می‌شود. اما هزینهٔ بالای علوفه و افزایش آشفتگی در رابطه با تولید محصولات غذایی منجر به کاهش بیشتر ردّپای آب خاکستری می‌شود. رابطهٔ بین هزینهٔ اختصاصی، کیفیت آب و کاربری زمین زراعی، رابطهٔ نزدیک بین تولید انرژی، مصرف آب و تأمین غذا در منطقه را بیان می‌کند، همچنین اهمیت حفظ تعادل در میان این منابع را از طریق مدیریت زمین ارائه می‌دهد [۳].

در پژوهشی به ایجاد درک اینکه چگونه کارآمدی و بهره‌وری کاربر ورودی و بازده برنج هوازی را می‌توان بهبود بخشید و نحوه تسطیح اراضی و عملکرد محصول را می‌توان به طور مؤثر در استفاده از آب با استفاده از روش‌های دقیق‌تر حفاظت مدیریت زراعت تغییر داد، پرداخته شده است. آزمایش‌های مشارکتی کشاورزان در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ برای تعیین مزیت‌های جایگزین تسطیح اراضی (تسطیح دقیق اراضی)، استقرار محصول (روش کاشت برنج هوازی) به تنهایی یا در ترکیب (حفاظت دقیق) و قابلیت زیست پذیری روی از نظر عملکرد محصول، صرفه جویی در مصرف آب و استفاده از مواد مغذی تولید برنج هوازی در غرب انجام گرفته است. قابلیت زیست پذیری روی، تابعی از فاکتورهای خاک و گیاهی است که می‌تواند توسط مدیریت آب، به ویژه در رابطه با شرایط ریزوسفر تغییر کند. استراتژی استحکام زیستی زراعی به نظر می‌رسد در حفظ مقدار کافی روی در محلول خاک و حفظ کافی انتقال روی به دانه در مرحلهٔ تولیدمثل ضروری باشد. استحکام زیستی بزرگتر از روی دانهٔ حاصل از کاربردهای برگ مانند نسبت به خاک است. حفاظت زیست محیطی زراعی می‌تواند راه‌حل بسیار جذاب و مفید برای حل مسائل مربوط به کمبود روی به طور مؤثر باشد. افزایش کودهای روی به خاک یا کاربرد برگ مانند، افزایش غلظت روی را در دانه نشان می‌دهد. تسطیح دقیق اراضی توسط تولیدکنندگان در سراسر منطقهٔ تولیدی غرب به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است، زیرا این عمل تولیدکنندگان، روش‌های کارآمدتری را برای مدیریت آب آبیاری ایجاد می‌کند. تسطیح دقیق اراضی مزایای غیر از صرفه‌جویی در آب را ارائه می‌دهد. کاهش کشت و افزایش بهره‌وری برداشت می‌تواند به دست آید زیرا تسطیح دقیق اراضی سطح زمین را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، به دلیل اینکه سیل در زمینه‌های دقیق با مقیاس یکنواخت‌تر و به موقع‌تر است. غلظت روی در بافت گیاهی با قابلیت زیست‌پذیری روی در خاک و جذب گیاه تعیین می‌شود. لقاح متعادل محصول نیاز به تأمین مواد مغذی اصلی و متوسط دارد. گیاهان دارای نیازهای غذایی خاصی هستند که براساس گونه‌های گیاهی و ارقام تحت شرایط خاصی از خاک قرار می‌گیرند. بنابراین ترکیب بهتر مواد مغذی با تقاضای محصول غالباً به عنوان مبنایی برای بهبود و پایداری عملکرد در سیستم‌های آبی و همچنین سیستم‌های بارانی استفاده می‌شود. امروزه ریزمغذی‌های موجود در کشاورزی نقش مهمی در افزایش بهره‌وری کشاورزی دارند. کمبود مواد مغذی در حال تبدیل شدن به یک مسئلهٔ جدی است. زیرا نیاز به مواد مغذی افزایش یافته از کشاورزی فشرده شده و بهره‌برداری فشرده، همراه با استفاده از کودهای تک مواد مغذی و مقدار کم کود آلی را دارد [۴]. روی نقش مهمی را هم در تعیین سلامت انسان و هم در بهره‌وری محصول، ایفا می‌کند. استحکام زیستی روی در محصولات غذایی اصلی مانند برنج را می‌توان از طریق استفاده از روش‌های زراعی به دست آورد و به صورت رویکرد امیدوار کننده و مقرون به صرفه برای مبارزه با سوء تغذیه در نظر گرفت. اثربخشی این روش توسط تحقیقات اخیر در بنگلادش پشتیبانی و حمایت شد که در آنجا زنگ-زدگی زیستی در برنج موجب کاهش کمبود روی در بدن انسان شد. در بسیاری از مناطق کشاورزی در جایی که منابع آب شیرین کم است، سیستم سنّتی سواحل زمین با سیستم غرقابی، جایگزین سیستم‌های هوازی می‌شود [۵].

عدل (۱۳۹۳) در پژوهشی به توسعه انرژی خورشیدی در کشور چین پرداخته است. با توجه به رشد روز افزون نیاز به انرژی برای توسعه صنعتی و بهبود سطح زندگی، چین وابستگی شدیدی به منابع انرژی دارد و از چند دههٔ پیش گام‌های بلندی در در بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین انرژی خورشیدی برداشته است. در مناطق بسیار سردسیر چین، معماری در ترکیب با انرژی خورشیدی و بیوانرژی به کمک ساختمان‌های مسکونی آمده تا فضا را برای ساکنین آن‌ها دلنشین‌تر کند [۶]. تقاضای انرژی به دلیل رشد جمعیت جهانی و گسترش شهرنشینی، رو به افزایش است و این امر موجب نیاز روزافزون به منبعی برای تأمین انرژی است [۷] که در حال حاضر انرژی زیستی، گسترده‌ترین نوع از انرژی‌های تجدیدپذیر است [۸].

محمدی و یوسفی (۱۳۹۹) در پژوهشی ردپای آب انرژی زیستی حاصل از محصول گندم در ایران را بررسی کرده‌اند. تمام سناریوهای انرژی نشان می‌دهند که رویکرد تأمین انرژی، به‌سوی انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی حاصل از زیست‌توده در حال تغییر هستند. از سوی دیگر، بحث آب که به عنوان یک عامل محدودکننده در بحث محصولات کشاورزی مطرح است به چشم می‌خورد. در این پژوهش با استفاده از شاخص ردپای آب، مقدار آب مصرفی برای تولید هر واحد انرژی از زیست‌توده گندم را محاسبه کردند که در این راستا ۶ استان کشور که دارای بیش‌ترین مقدار تولید گندم بودند انتخاب شدند. هدف از این پژوهش تعیین مطلوب‌ترین استان برای تولید انرژی زیستی حاصل از زیست‌تودهٔ گندم از منظر شاخص ردپای آب بوده است. از منظر شاخص ردپای آب، بهره‌وری تولید انرژی- زیستی در استان گلستان در مقایسه با سایر استان‌ها، بیش‌تر است. بنابراین این وضعیت سبب ایجاد مزیتی برای استفاده از زیست‌توده گندم در این استان می‌باشد [۹]. منابع باقیمانده در کشاورزی مواد اولیه برای تولید بیوانرژی را فراهم می‌کند که بهینه‌سازی آن می‌تواند اقتصاد کشاورزی را در حالی که عوارض جانبی محیط زیست را کاهش می‌دهد، ارتقاء

دهد. منابع غذایی، انرژی، آب و زمین در سیستم‌های کشاورزی با هم آمیخته شده‌اند. مدیریت مؤثر تولید بیوانرژی با توجه به ارتباط این منابع برای توسعه پایدار کشاورزی مورد نیاز است که به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در آن چالش برانگیز است.

لی و همکاران[1] (۲۰۲۰) در پژوهشی بهینه‌سازی تولید بیوانرژی پایدار را با توجه به ارتباط انرژی، غذا، آب و زمین و کود دامی در شرایط عدم قطعیت را بررسی کردند. این مطالعه یک رویکرد بهینه سازی- ارزیابی (رابطه ورودی/ خروجی) را برای تولید بیوانرژی پایدار در سیستم‌های کشاورزی پیشنهاد می‌کند. این رویکرد قادر است (۱) با توجه به مبادله بین اثرات اقتصادی و زیست محیطی برای تولید بیوانرژی به تصمیم‌گیرندگان این امکان را بدهد که گزینه‌های بهینه سیاست را در بین آب، زمین، انرژی و دام تعیین کنند (۲) کمک به تصمیم‌گیرندگان برای شناسایی سطح پایداری سیستم‌های کشاورزی و اینکه در کجا باید برای مناطق مختلف تلاش کرد و (۳) برخورد با عدم قطعیت در ارائه جایگزین‌های تصمیم‌گیری. رویکرد پیشنهادی برای مطالعه موردی در زمینه خاص شمال شرقی چین، که عمدتاً یک منطقه کشاورزی با پتانسیل بیوانرژی بالا است، اعمال می‌شود. با توجه به پیچیدگی ناشی از عدم قطعیت، رویکرد پیشنهادی می‌تواند به مدیریت پایدار تولید بیوانرژی در سیستم‌های کشاورزی کمک کند و برای مناطق مشابه کشاورزی محور قابل اجرا خواهد بود [۱۰]. گازرسانی بیوماس، به ویژه توزیع در تولید برق، به عنوان راهی امیدوارکننده برای مقابله با چالش های انرژی و محیط زیست جهانی در نظر گرفته شده است.

لی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به چرخه زندگی یکپارچه و ارزیابی ردپای آب‌های غیرغذایی براساس تولید بیوانرژی پرداختند. بدین منظور از یک مدل ارزیابی چرخه زندگی[2] برای تجزیه و تحلیل عملکرد واقعی همراه با روش‌های ارزیابی ردپای آب[3] استفاده کردند. مبادلات ناگسستنی بین سه فناوری نماینده تولید انرژی براساس سه دسته محصولات غیرغذایی (ذرت، سورگوم[4] و پنیستوم ترکیبی[5]) کشت شده در زمین‌های زراعی حاشیه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ردپای آب نشان می‌دهد که سیستم پنیستوم ترکیبی بیشترین تأثیر را بر منابع آب دارد در حالی که دو گزینه فناوری دیگر ویژگی‌های پایداری محیطی را نشان می‌دهند [۱۱]. بسیاری از کشورهایی که انرژی خود را از منابع سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند به منابع تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست روی آورده‌اند تا نگرانی‌های فزاینده در مورد گرمایش زمین و مسائل زیست محیطی را کاهش دهند. فناوری بیوانرژی یکی از جایگزین‌های بالقوه برای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است.

عبدل باسط و همکاران[6] (۲۰۲۱) در پژوهشی فناوری‌های تولید بیوانرژی پایدار را از طریق مطالعه موردی در مصر مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج مطالعه موردی نشان داد که تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز مناسب ترین فناوری زیست انرژی پایدار با وزن ۰/۹۹۶ و به دنبال آن محصولات نفتی به فناوری بیودیزل با وزن ۰/۵۳۹ است [۱۲].

۳- تعریف مسأله

هدف از مدلسازی به حداقل رساندن هزینهٔ کل گندم برای زنجیرهٔ تأمین بیوسوخت شامل مؤلفه‌های جریان بالادستی یا بخش ورودی (زمین) و جریان میان دستی (امکانات تغییر) است. همچنین این احتمال در نظر گرفته شده که ترکیب هزینه‌های خصوصی و مزایای زیست محیطی، به صورت کاهش بار نیترات در آب‌های زیرزمینی در طراحی زنجیره‌های تأمین گندم می‌تواند منجر به طرح‌های اجتماعی و فزاینده شوند.

در ادامه در جدول ۱ اندیس‌ها و تعاریف هر کدام، در جدول ۲ پارامترها و تعاریف هر کدام، در جدول ۳ متغیرها و تعاریف هر کدام و در جدول ۴ فهرست علائم ارائه شده است.

جدول ۱ اندیس‌های به کار رفته در مدل

اندیس‌ها	تعاریف
I	موقعیت زمین تولید محصولات برحسب واحد فضایی
J	موقعیت مراکز تسهیلات تبدیل
M	ماه
P	محصولات زراعی (کلزا، ذرت، گندم، پیاز، جو، سیب‌زمینی، یونجه، نخود بزرگ و بادرشبو)
K	نوع ماشین آلات (تراکتور، علف چین)
cap	مقیاس ظرفیت

جدول ۲ پارامترهای به کار رفته در مدل

پارامترها	واحد	تعاریف
$Price_{ip}$	$ unit^{-1}	قیمت محصولات متداول
Yieldip	Mg area^{-1}	درآمد حاصل محصولات متداول
PC_{ip}	$ ha^{-1}	هزینهٔ تولید محصولات متداول
$Yield_{ip}^{whe}$	Mg ha^{-1}	در آمد حاصل گندم درهر واحد فضایی
LR_{ip}	$ha^{-1}	کرایهٔ زمین محصولات متداول
Est	$ha^{-1}	هزینهٔ تاسیس در اولین سال
AM	$ha^{-1}	هزینهٔ نگهداری سالانه
σ_i	$ha^{-1}	هزینهٔ برداشت گندم
γ_i	$ha^{-1}	هزینهٔ ذخیره هرواحد گندم
θ_i	$ha^{-1}	هزینهٔ حمل هر واحد گندم
ω_{cap}	$ unit^{-1}	هزینهٔ استهلاک سرمایه مرکزتسهیلاتی تبدیل
A	$ kL^{-1}	هزینهٔ عملیاتی هر kl تولید بیو سوخت
DML_{trans}	%	اتلاف مواد خشک درطول حمل
Aa_{ip}	ha	زمین زراعی در دسترس در هر واحد فضایی برای هر محصول
$Avehour_m$		میانگین ساعات کار ماشین آلات در هر ماه
DML_m^{stor}	%	اتلاف مواد خشک در طول ذخیره
$MTBi^k$	hour ha^{-1}	زمان کار دستگاه در هر هکتار برای هر دستگاه
$\tilde{\lambda}$	L Mg−1	نرخ متداول اتانول- گندم
Q_m	L month^{-1}	تقاضای ماهانهٔ اتانول
Loadwt	Mg در هر کامیون	تونژ گندم تحویل شده به هر کامیون
Nload	Mg ha^{-1}	بارگزاری نیترات در زمان شستن خاک نیتروژن غیرآلی
C	mg L^{-1}	نوع کاربری زمین در هر واحد فضایی

1. Li etal
1. Life cycle assessment (LCA)
2. Water Footprint (WF)

3. sorghum
4. hybrid pennisetum
5. Abdel-Basset etal

جدول ۳ متغیرهای به کار رفته در مدل

متغیرها	واحد	تعاریف
AH_{mip}	ha	هکتار محصول برداشتی ماهانه از نوع کاربری زمین تبدیلی در هر واحد فضایی
XTN_{mij}	Mg	گندمی که مستقیماً به مراکز تسهیلاتی تبدیلی حمل می‌شود.
NXS_{mi}	Mg	ذخیرهٔ گندم در طول فصل برداشت
XS_{mi}	Mg	ذخیرهٔ گندم ماهانه
XTO_{mijp}	Mg	محصولات منتقل شده از انبار به مراکز تسهیلاتی تبدیلی
$Numb_m^k$	واحد	تعداد تجهیزات استفاده شده در طول برداشت
$CBB_{cap,i}$	واحد	شاخص دودویی انتخاب تسهیلات تبدیلی
U		کران بالا مقدار هدف
L		کران پایین مقدار هدف
R		دامنهٔ مقدار هدف

جدول ۴ فهرست علائم

فهرست علائم	تعاریف
$C_{opportunity}$	هزینهٔ فرصت
$C_{production}$	هزینهٔ ایجاد و نگهداری گندم چند ساله
$C_{harvest}$	هزینهٔ برداشت
$C_{storage}$	هزینهٔ ذخیره‌سازی گندم چندساله
$C_{transportation}$	هزینهٔ حمل و نقل گندم چندساله از مزرعه به مرکز تأسیساتی
$C_{investment}$	هزینهٔ ساخت مرکز تأسیسات تبدیل
$C_{operation}$	هزینهٔ عملیات مرکز تأسیسات برای تولید بیو سوخت

مدل ارائه شده در این پژوهش بصورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min TC} = C_{opportunity} + C_{production} + C_{harvest} + C_{storage} + C_{transportation} + C_{investment} + C_{operation} \quad (۱)$$

$$C_{opportunity} = \max \begin{cases} \sum_{ipm}[(Price_{ip} \times Yield_{ip} - PC_{ip}) \times AH_{mip}] \\ \sum_{ipm}[(LR_{ip} \times AH_{mip})] \end{cases} \quad (۲)$$

$$C_{production} = \sum_{mip}((Est + AM) \times AH_{mip}) \quad (۳)$$

$$C_{harvest} = \sum_{ipm}(\sigma \times AH_{mip}) \quad (۴)$$

$$C_{storage} = \sum_{mi}(\gamma_i \times NXS_{mi}) \quad (۵)$$

$$C_{transportation} = \sum_{i}(\theta_i \times (\sum_{mipj} XTN_{mij} + \sum_{m} XTO_{mijp})/(1-DML^{trans}) \quad (۶)$$

$$C_{investment} = \sum_{I,cap}(\omega_{cap} \times CBB_{CAP,I}) \quad (۷)$$

$$C_{operation} = \sum_{cap,i}(\alpha \times Q_{cap} \times CBB_{cap,i}) \quad (۸)$$

$$\sum_{m} AH_{mip} \le Aa_{ip} \quad ,\forall i,p \quad Nov \le m \le Feb \quad (۹)$$

$$Numb_m^k \times Avehour_m - \sum_i(Mtb_i^k \times AH_{mip}) \ge 0, \forall k,m \quad (۱۰)$$

$$\sum_p AH_{mip} \times Yield_i^{whe} = XTN_{mij}/(1 - DML^{trans}) + NXS_{mi}, \forall m,i \quad (۱۱)$$

$$XS_{(m+1)i} = (1 - DML_m^{stor}) \times XS_{mi} + NXS_{(m+1)I}, \forall m,i \quad Nov \le m \le Feb \quad (۱۲)$$

$$XS_{(m+1)i} = (1 - DML_m^{stor}) \times XS_{mi} - XTO_{(m+1)ijp}/1 - DML^{trans}), \quad \forall m,i \quad March \le m \le Oct \quad (۱۳)$$

$$\lambda(\sum_i XTN_{mij} + \sum_i XTO_{mijp}) - Q_m = 0, \ \forall m \quad (۱۴)$$

$$AH_{mip}, XTN_{mij}, NXS_{mi}, XS_{mi}, XTO_{mijp}, Numb_m^k \ge 0 \quad (۱۵)$$

در معادلهٔ ۱ هدف به حداقل رساندن هزینهٔ کل گندم است.

در معادلهٔ ۲ هزینهٔ فرصت، به عنوان سود حاصل از محصولات یونجه یا فعالیت‌های تولید چراگاهی تعریف می‌شود که قبل از تبدیل زمین به تولید گندم چند ساله رخ می‌دهد. بازده زیست توده، هزینه تولید و وسعت زمین در دسترس برای تغییردهی کاربری زمین کشاورزی (ذرّت، پنبه، ذرّت خوشه‌ای، سویا، گندم و یونجه/ مراتع گیاهی) و گندم چندساله در امتداد واحدهای فضایی تغییر می‌کند. بنابراین، هزینه فرصت به صورت درآمد خالص حاصل از کاربری اولیهٔ زمین یا کرایهٔ زمین تعریف می‌شود.

در معادلهٔ ۳ هزینهٔ تولید گندم چندساله، شامل ایجاد گندم چندساله بر روی هر نوع زمین زراعی و هزینه‌های نگهداری سالانه است.

در معادلهٔ ۴ هزینهٔ برداشت، برداشت گندم چند ساله با استفاده از سیستم گونی‌زنی بزرگ مستطیلی است.

در معادلهٔ ۵ هزینهٔ انبارسازی گندم‌ها شامل هزینهٔ مواد، تجهیزات و نیروی کار برای عملیات‌های بسته‌بندی وذخیره‌سازی با گونی است.

در معادلهٔ ۶ هزینهٔ حمل و نقل، استفاده از کامیون‌های نیمه تریلری و تریلرها برای حمل گندم ها از انبار به مراکز تأسیساتی است.

در معادلهٔ ۷ هزینهٔ سرمایه‌گذاری سالانه مراکز تبدیل بر ظرفیت در تعداد مراکز تغییر آن ظرفیت ضرب می‌شود.

در معادلهٔ ۸ هزینهٔ عملیاتی زیست توده در حال تولید در هر مرکز تغیری براساس ظرفیت آن مرکز محاسبه می‌شود.

در معادلهٔ ۹ مجموعه محدودیت‌هایی که اعمال می‌شود، الزامات و قوانین عملیاتی عملی تعادل جرمی را ارائه می‌دهد.

در معادلهٔ ۱۰ مساحت کاربری در دسترس براساس بازده‌های گندم برای تولید علوفه زیست توده لیگنو سلولزی در هر واحد منبع کاربری و هر ماه، محدود می‌شود.

در معادلهٔ ۱۱ ساعات کار ماشین در هر ماه براساس روزهای برداشت را به علت آب و هوا در طول فصل کشت را نشان می‌دهد.

در معادلات ۱۳و۱۲ نیاز به گندمی دارد که باید در طول فصل برداشت، مهیا شود و برابر با مجموع تحویل مستقیم بعد از تنظیم حمل و نقل پسماندهای خشک و حمل غیرمستقیم به انبار است.

در معادلهٔ ۱۴ تعادل انبار انباشتی گندم بعد از ملاحظه پسماند مواد خشک را محقّق می‌سازد. در نهایت، تحویل‌های مواد خام به مراکز تبدیل طی هر ماه که برای رفع تقاضای تولید زیست توده نیاز هست را نشان می‌دهد.

در معادلهٔ ۱۵ کلیهٔ پارامترها و متغیرهای موجود در مدل، محدود به غیر منفی بودن است.

۴- آزمایش‌های مدل

برای تولید سوخت تجدید پذیر از منابع قابل تجدید شهرستان عجب شیر به عنوان منطقهٔ مورد مطالعه انتخاب شده است. که مناطق انتخاب شده از این شهر به ترتیب عبارتنداز: روستای شیراز، روستای شیشوان، روستای رازیان، روستای نبرین و روستای خضرلوکه صدوبیست زمین کشاورزی از این روستاها

همگی به وسعت دو هکتار با ۹ محصول مختلف: ۱ -ذرت[1] ۲- کلزا[2] ۳- گندم[3] ۴- پیاز[4] ۵- جو[5] ۶- سیب زمینی[6] ۷- یونجه[7] ۸- نخودبزرگ[8] ۹- بادرشبو[9] که برای ۱۲ ماه انتخاب شدند که با در دسترس بودن دو مرکز موقعیت مراکز تسهیلاتی تبدیل در شهر عجب‌شیر اقدام به تولید بیوسوخت پرداخته شد.

با بررسی محصولات سال‌های قبلی زمین‌های کشاورزی اعم از آلودگی آب و تأثیرگذاریش بر محیط زیست و با تمامی هزینه‌ها اقدام به کاشت گندم در همهٔ زمین‌های کشاورزی صورت گرفت. بدلیل اینکه گندم نیاز کمتر به کوددهی، سم پاشی و سایر مواد شیمیایی دارد باعث می‌شود میزان نیترات موجود در خاک پایین باشد که پایین بودن مقدار نیترات موجود در خاک منجر به آلودگی کمتر آب و محیط زیست شده به همین دلیل از ضایعات گندم در سیلوها و درمان موقع حمل ونقل که رخ می‌دهد در کنار کاخ گندم اقدام به تولید بیوسوخت (اتانول) می‌شود.

در شکل ۲ تعداد روستاهای انتخاب شده برای بررسی محولات قابل کشت و همچنین دو مرکز تسهیلاتی تبدیل برای تولید سوخت تجدیدپذیر نمایش داده شده است.

شکل ۲ نشان دهندهٔ مناطق انتخاب شده از شهرستان عجب‌شیر

با انتخاب جزء تابع هدف (وزن توابع) برای هفت هزینهٔ مختلف، نتایج بدست آمده از نرم‌افزار گمز در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ جزء توابع هدف برای هفت تابع هدف

جزء اول	جزء دوم	جزء سوم	جزء چهارم	جزء پنجم	جزء ششم	جزء هفتم
۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۴	۰.۱	۰.۱	۰.۱

انتخاب محل نهم با شاخص دودویی یک با توجه به مقیاس ظرفیت در جدول ۶، گندم‌هایی که در طی ماه‌های مختلف از زمین محل نهم به دو مرکز تسهیلاتی تبدیل برحسب میلی گرم حمل شده‌اند در جدول ۷ و محصول برداشتی ماهانه در طی ماه‌های مختلف از نوع زمین کاربری تبدیلی برحسب هکتار در جدول ۸ نشان شده است.

جدول ۶ شاخص دودویی انتخاب تسهیلات تبدیلی

مقیاس ظرفیت	محل نهم
اوّل	۱
دوّم	۱

جدول ۷ گندم حمل شده مستقیم به مرکز تسهیلاتی تبدیل برحسب میلی‌گرم

ماه	موقعیت زمین تولید محصولات	موقعیت مراکز تسهلات تبدیل	
		۱	۲
۲	۹	۰.۸۲۵	۰.۸۲۵
۳	۹	۰.۴۷۵	۰.۴۷۵
٤	۹	۰.۶۰۰	۰.۶۰۰
٥	۹	۰.۶۲۵	۰.۶۲۵
٦	۹	۰.۷۵۰	۰.۷۵۰
۷	۹	۰.۶۷۵	۰.۶۷۵
۸	۹	۰.۶۵۰	۰.۶۵۰
۹	۹	۰.۵۷۵	۰.۵۷۵
۱۰	۹	۰.۶۲۵	۰.۶۲۵
۱۱	۹	۰.۶۵۰	۰.۶۵۰
۱۲	۹	۰.۶۷۵	۰.۶۷۵

1. corn
2. rapeseed
3. wheat
4. An onion
5. joe
6. patato
7. alfalfa
8. Big chicken
9. Ln thy sky

جدول ۸ محصول برداشتی ماهانه از نوع زمین کاربری تبدیلی برحسب هکتار

ماه	موقعیت زمین تولید محصول	محصول هفتم
۲	۹	۰.۰۱۴
۳	۹	۰.۰۰۸
۴	۹	۰.۰۱۱
۵	۹	۰.۰۱۱
۶	۹	۰.۰۱۳
۷	۹	۰.۰۱۲
۸	۹	۰.۰۱۱
۹	۹	۰.۰۱۰
۱۰	۹	۰.۰۱۱
۱۱	۹	۰.۰۱۱
۱۲	۹	۰.۰۱۲

در جدول ۹ مقادیر هر یک از توابع هدف برحسب دلار و در جدول ۱۰ نیز هزینهٔ کل برحسب دلار نشان داده شده است که داده‌های جداول برگرفته از خروجی نرم‌افزار گمز است.

جدول ۹ مقادیر هر یک از هزینه ها برحسب دلار

توابع	مقادیر
هزینهٔ فرصت زمین	2.4668E+5
هزینهٔ تولید	5.5725E+6
هزینهٔ برداشت	2.3125E+5
هزینهٔ ذخیره‌سازی	0
هزینهٔ حمل ونقل	1.6493E+5
هزینهٔ مراکز تسهیلاتی تبدیل	5.6230E+8
هزینهٔ عملیاتی مراکز تسهیلاتی تبدیل	3.4550E+9

جدول ۱۰ هزینهٔ کل برحسب دلار

تابع	مقدار
مقدار tc	4.0348E+8

نتایج نشان می‌دهد ذخیره‌سازی هزینهٔ بالایی داشته که در تابع هدف مقرون به صرفه نیست و مقدار صفر حاصل شده است. همچنین هزینهٔ تولید و تبدیل مراکز دارای بیشترین هزینه در تابع هدف اول مدل دارا هستند که این موضوع ناشی از فرآیند متفاوتی است که نسبت به سایر روش‌های تولید انرژی وجود دارد ناشی می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

تولید سوخت تجدیدپذیر از محصولات انرژی اختصاصی به عنوان پتانسیلی برای تولید مزایای زیست محیطی محسوب می‌شود بنابراین جایگزینی استفاده از سوخت‌های فسیلی با سوخت زیستی از منابع قابل تجدید باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای تقویت اقتصادهای روستایی و ایجاد مزایای زیست محیطی می‌شود. در این پژوهش ۹ محصول مختلف برای تولید سوخت زیستی از همهٔ جهات بررسی شد. چون کشاورزان برای کشت و برداشت بعضی از محصولات بخاطر بازدهی بیشتر از سموم و کودهای تجاری استفاده می‌کنند که آسیب‌های زیادی هم برای خاک و آب دارد. از جمله کاربردهای کود برای مصرف کم نیتروژن بیش از حد موجب رواناب در آب‌های سطحی شده یا در خاک حفظ می‌شود و یا در آب های زیر زمینی فرو می‌رود و اهالی آن روستاها از طریق استفاده از این آب‌ها چه بصورت مستقیم و چه غیرمستقیم با خطر بیماری سندرم آبی نوزاد همراه با افزایش غلظت نیتروژن مواجه می‌شوند. نحوهٔ انتخاب ۹ محصول مختلف بدین صورت است که در مناطق کشاورزی شهر عجب شیر برای کشاورزی بیشتر از این محصولات برای کشت و برداشت استفاده می‌کنند. استفاده از گندم برای تولید سوخت زیستی مزایای بسیاری دارد از جمله: (۱) عملکرد بالای بیوماس، (۲) سازگاری با آب، هوا و خاک و (۳) نیازهای کم کوددهی، افزایش مصرف مواد غذایی و قابلیت اطمینان بالا. بنابراین جایگزینی زمین‌های زراعی با تولید گندم برای تولید سوخت زیستی می‌تواند عملکرد اکوسیستم‌های محلّی را با کاهش تقاضای آب و فشار آلودگی از طریق کوددهی از جمله کاهش بار نیترات در آب‌های زیرزمینی وکاهش خطر آلودگی آب‌های زیر زمینی بهبود دهد. در این پژوهش به بررسی محصولات مختلف و اثرات آن در رابطه با زیست محیطی پرداخته شد و چون گندم نیاز به آبیاری کمتر در برههٔ کمبود آب و نیاز به کوددهی کمتر و سموم است که هر دو مورد باعث جلوگیری از کمبود آب و آلودگی آب می‌شود لذا از گندم برای تولید سوخت زیستی استفاده شد.

می‌توان برای پژوهش‌های آتی از محصولات بیشتر و با شرایط جدیدی استفاده کرد و همچنین می‌توان میزان آلودگی را از جنبهٔ پتاسیم آب نیز بررسی نمود.

۶- منابع

[1] U. S. B.-T. Update, Biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry, *Perlack, RD, Stokes, BJ, Leads*, pp. 227, 2011.

[2] A. Owen, K. Scott, and J. Barrett, Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus, *Applied Energy*, Vol. 210, pp. 632–642, 2018.

[3] J. Zhong, T. E. Yu, C. D. Clark, B. C. English, J. A. Larson, and C.-L. Cheng, Effect of land use change for bioenergy production on feedstock cost and water quality, *Applied Energy*, Vol. 210, pp. 580–590, 2018.

[4] S. Kumar, A. Dwivedi, V. Kumar, M. Q. Ansari, and R. K. Naresh, Effect of precision land levelling and Zinc bioavailability: Water use, productivity and input use efficiency in transition from flooded to aerobic rice (Oryza sativa), *International Journal of Chemical Studies*, Vol. 5, No. 4, pp. 110–118, 2017.

[5] R. I. Ali, T. H. Awan, M. Ahmad, M. U. Saleem, M. Akhtar, and

others, Diversification of rice-based cropping systems to improve soil fertility, sustainable productivity and economics, *Journal of Animal and plant sciences*, Vol. 22, No. 1, pp. 108–112, 2012.
[6] M. Adl., Development of solar energy in China, *Bimonthly Journal of Renewable and New Energy*., Vol. 1, No. 2, pp. 29–36, 2014. (in Persian)
[7] A. E. Atabani *et al.*, Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 18, pp. 211–245, 2013.
[8] P. W. Gerbens-Leenes, Green, blue and grey bioenergy water footprints, a comparison of feedstocks for bioenergy supply in 2040, *Environmental Processes*, Vol. 5, No. 1, pp. 167–180, 2018.
[9] A. Mohammadi, H. Yousefi, Water bio-energy footprint from wheat crop in Iran, *Bimonthly Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 7, No. 2, pp. 68–72, 2020. (in Persian)
[10] M. Li, Q. Fu, V. P. Singh, D. Liu, and J. Li, Optimization of sustainable bioenergy production considering energy-food-water-land nexus and livestock manure under uncertainty, *Agricultural Systems*, Vol. 184, pp. 102900, 2020.
[11] J. Li, F. Xiong, and Z. Chen, An integrated life cycle and water footprint assessment of nonfood crops based bioenergy production, *Scientific reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–14, 2021.
[12] M. Abdel-Basset, A. Gamal, R. K. Chakrabortty, and M. Ryan, Development of a hybrid multi-criteria decision-making approach for sustainability evaluation of bioenergy production technologies: A case study. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 290, pp. 125805, 2021.