



Research Article

Vol. 40, No. 3, Fall 2026, p. 237-252

Evaluating the Welfare and Environmental Impacts of Using Cellulosic Biomass Energy in Iran

A. Mehrjo¹, H. Amirnejad^{1*}, K. Ataie Solout¹, H. Azadi²

1- Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(*- Corresponding Author Email: hamidamirnejad@yahoo.com)

2- Department of Geography, Ghent University, 9000 Ghent, Belgium

Received: 15 May 2025
Revised: 17 February 2026
Accepted: 19 April 2026
Available Online: 19 April 2026

How to cite this article:

Mehrjo, A., Amirnejad, H., Ataie Solout, K., & Azadi, H. (2026). Evaluating the welfare and environmental impacts of using cellulosic biomass energy in Iran. *Journal of Agricultural Economics & Development*, 40(3), 237-252. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/jead.2026.93528.1353>

Introduction

Energy production from agricultural residue is an important research area with significant potential for sustainable energy production. In Iran, the use of agricultural waste for energy production, due to its favorable geographical characteristics, has the potential to address energy security, reduce greenhouse gas (GHG) emissions, and create economic opportunities for rural communities. Rice and wheat are major crops in Iran, which produce residue in the form of rice husk and wheat straw, respectively, which can be converted into energy sources. Biomass energy production from agricultural residue is currently being carried out worldwide. Although biomass energy is believed to be an effective option in terms of domestic renewable energy production, its ability to improve social welfare is controversial. Therefore, this study aims to examine the extent to which increases in biomass prices affect social welfare. It also investigates the potential for reducing greenhouse gas emissions through electricity generation using biomass derived from two major agricultural crops, wheat and rice.

Materials and Methods

This study evaluates the welfare and environmental impacts of using biomass derived from two major crops, wheat and rice. To achieve this objective, a partial equilibrium model was employed to maximize the total surplus of biomass producers and consumers, subject to resource availability constraints, thereby assessing the economic implications of biomass utilization. In addition, the potential for carbon dioxide emission reduction was estimated through a life cycle assessment of biomass-based electricity generation and by comparing its emissions with those associated with electricity generated from fossil fuels.

Results and Discussion

The results of the model simulation show that the welfare of biomass consumers decreases and that of biomass producers increases; so that the maximum social welfare is achieved at a price of 28.63 million Tomans per ton for wheat biomass and 27.59 million Tomans per ton for rice biomass. The results also showed that an increase in the price of biomass leads to an increase in biomass production, and by using this biomass produced from the two crops wheat and rice in electricity generation, greenhouse gas emissions can be reduced by 8.2 percent in the country.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jead.2026.93528.1353>

Conclusion

Wheat straw and rice straw are among the agricultural residues that are used to produce electrical energy. Increasing the price of electrical energy produced from crop residue will increase the supply of biomass from wheat and rice crops, because straw and stubble can be a source of income for farmers in addition to the main wheat and rice crops, and on the other hand, by collecting straw and stubble, their burning in the fields is prevented. Given the increasing demand for electrical energy in the country, this study can be a basis for the government and policymakers to think of a solution for generating electricity from agricultural waste on a large scale that can produce clean energy and manage agricultural land residue. Therefore, according to the results of this study, it is suggested that by setting an appropriate price for wheat and rice straw and stubble, it is possible to collect them and not burn them in the fields, and to invest in biomass energy plants to produce clean energy. In this study, agricultural producers and power plants are considered as biomass consumers, and potential electricity market effects are ignored. To inform the sustainable use of biomass resources, the proposed model can be extended to the electricity sector consumed by the government and households. In addition, further research is needed to examine environmental impacts, such as biodiversity and water consumption, in a broader manner. The authors leave these explorations to future work.

Keywords: Agricultural residues, Biomass, Consumer and producer surplus, Partial equilibrium model, Rice, Wheat

مقاله پژوهشی

جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۲۵۲-۲۳۷

ارزیابی اثرات رفاهی و زیست‌محیطی استفاده از انرژی زیست‌توده سلولزی در ایران

امیر مهرجو^۱ - حمید امیرنژاد^{۱*} - کمال عطایی سلوط^۱ - حسین آزادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

چکیده

تولید انرژی از بقایای کشاورزی یک حوزه مهم تحقیقاتی با پتانسیل قابل توجهی برای تولید انرژی پایدار است. در ایران، استفاده از بقایای کشاورزی برای تولید انرژی، به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی مطلوب، پتانسیل مقابله با ناامنی انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد فرصت‌های اقتصادی برای جوامع روستایی را دارد؛ بنابراین، هدف این مطالعه ارزیابی اثرات رفاهی و زیست‌محیطی استفاده از انرژی زیست‌توده سلولزی در ایران، با تمرکز ویژه بر استفاده از یک مدل تعادل جزئی با به حداکثر رساندن مجموع مازاد مصرف‌کنندگان زیست‌توده و تولیدکنندگان زیست‌توده، مشروط به محدودیت‌های در دسترس بودن منابع برای تحلیل پیامدهای اقتصادی است. در این مطالعه جهت ارزیابی اثرات رفاهی و زیست‌محیطی از زیست‌توده دو محصول گندم و برنج استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که رفاه مصرف‌کنندگان زیست‌توده کاهش و تولیدکنندگان زیست‌توده افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در قیمت ۲۸۶/۳ میلیون ریال در هر تن برای زیست‌توده گندم و ۲۷۵/۹ میلیون ریال در هر تن برای زیست‌توده برنج حداکثر رفاه اجتماعی حاصل می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش قیمت زیست‌توده منجر به افزایش تولید زیست‌توده می‌شود و با بکارگیری این زیست‌توده تولید شده از دو محصول گندم و برنج در تولید برق می‌توان میزان انتشار گاز گلخانه‌ای را تا ۸/۲ درصد در کشور را کاهش داد؛ بنابراین با توجه به نتایج، قیمت‌گذاری مناسب زیست‌توده و ایجاد انگیزه برای جمع‌آوری پسماند محصولات کشاورزی و سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های تولید برق از زیست‌توده می‌تواند به‌عنوان سیاست‌های افزایش رفاه اجتماعی و بهبود کیفیت محیط‌زیست انتخاب شود. در نهایت نتایج این تحقیق می‌تواند به سیاست‌گذاری برای توسعه استراتژی‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور با منابع فراوان زیست‌توده کمک کند.

واژه‌های کلیدی: بقایای کشاورزی، برنج، زیست‌توده، گندم، مازاد مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان، مدل تعادل جزئی

مقدمه

اروگوئه، برزیل) استفاده می‌شود و به نظر می‌رسد انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، بادی، برق آبی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده منبع اصلی انرژی برای جهان در آینده باشد (Abdullah-Al-Mahbub & Islam, 2023).

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، زیست‌توده به‌طور گسترده به‌عنوان یک انرژی تجدیدپذیر برای کاهش انتشار دی اکسید کربن و آلودگی محیط‌زیست توصیه شده است (Popp et al., 2021). در حال حاضر زیست‌توده چهارمین منبع اصلی انرژی در جهان پس از زغال‌سنگ،

تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی یکی از عوامل مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات آب و هوایی است. برای کنترل این اثرات، روش‌های زیادی از جمله بهینه‌سازی مصرف انرژی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر توسط دانشمندان و محققان پیشنهاد شده است (Fadai, 2007; Taufiq et al., 2007). این روش‌ها در حال حاضر توسط برخی کشورها (مانند چین، ایالات متحده آمریکا، آلمان، هند،

۱- گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: hamidamimejad@yahoo.com

۲- گروه جغرافیا، دانشگاه گنت، بلژیک

نفت و گاز طبیعی است. این منبع تقریباً ۱۴ درصد از انرژی اولیه جهانی را تأمین می‌کند و در حال حاضر بیش از ۱۱/۵ درصد از انرژی اولیه جهانی از طریق منابع زیست‌توده تأمین می‌شود (Bahrami & Abbaszadeh, 2013). زیست‌توده یک منبع تجدیدپذیر از محصولات زراعی، بقایای گیاهی، منابع جنگلی، زباله‌های شهری و فضولات دام است که در سراسر جهان یافت می‌شود (Makul et al., 2021). به تمام گیاهان طبیعی مانند درختان، محصولات کشاورزی، بوته‌ها و علف‌ها که دارای سلولز^۱، همی‌سلولز^۲ و لیگنین^۳ هستند زیست‌توده لیگنوسلولزی یا زیست‌توده سلولزی گفته می‌شود (Chowdhury et al., 2025). پس از برداشت محصولات کشاورزی، برخی از بقایای گیاهی به‌عنوان کود به خاک برگردانده می‌شوند، در حالی که مقادیر زیادی بلااستفاده می‌مانند و در نهایت در مزرعه سوزانده می‌شوند یا رها می‌شوند تا پوسیده شوند. این بقایای گیاهی، زیست‌توده سلولزی پس از برداشت محصولات کشاورزی هستند و بزرگ‌ترین نوع زیست‌توده تولید شده از نظر وزنی هستند (Quartey & Chýlková, 2012).

فناوری‌های تبدیل انرژی زیست‌توده، استفاده از محصولاتی مانند گندم، برنج، ذرت، دانه‌های روغنی و نیشکر را گسترش داده است و کشاورزان را قادر می‌سازد محصولات خود را فراتر از مواد غذایی و خوراک دام به بازار عرضه کنند (Revilla et al., 2022). استفاده از بقایای محصولات کشاورزی برای تولید انرژی، درآمد کشاورزان را افزایش می‌دهد و باعث ایجاد اشتغال در کشاورزی و سایر بخش‌های مرتبط می‌شود که از دیدگاه تولیدکننده، تغییری خوشایند نسبت گذشته است. با این حال، این تغییر به سمت تولید انرژی زیست‌توده مبتنی بر محصولات زراعی همراه با افزایش همزمان هزینه‌های تولید کشاورزی در نتیجه افزایش قیمت انرژی و سایر فشارها بر بخش کشاورزی باعث نگرانی گسترده در کشورها می‌شود (Baye et al., 2019). اوینگ و سانگی (Ewing & Msangi, 2009) استدلال کردند که فشار بیش‌ازحد بر بازارهای محصولات کشاورزی باعث افزایش قیمت بین‌المللی مواد غذایی شده و بر رفاه اجتماعی تأثیر می‌گذارد. تأثیر سیاست‌های مختلف بر بازارهای کشاورزی در چندین مطالعه مدل‌سازی شده است و افزایش مداوم قیمت‌های کالاهای اساسی را در دهه‌های آینده نشان می‌دهد (Von Lampe, 2006; Elobeid & Hart, 2007; Banse & Grethe, 2008; Rosegrant, 2008; Schmidhuber, 2008).

در حالی که کشور ایران از منابع طبیعی فراوان برخوردار است، با چالش‌های چندوجهی ناشی از اتکای شدید به سوخت‌های فسیلی نظیر انتشار بالای دی‌اکسید کربن، ناامنی غذایی، حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار مواجه است (Naderi et al., 2021). طی سال‌های ۱۹۹۰

تا ۲۰۲۰، حدود ۹۹/۱ درصد از کل انرژی مصرفی در ایران از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین شده است. این مقدار حدود ۱۸/۷ درصد بیشتر از میانگین جهانی در مدت مشابه است، بنابراین سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از کل مصرف تنها حدود ۰/۹ درصد بوده است (Solaymani, 2021). این امر باعث شده است که ایران جز منتشرکننده‌های بزرگ دی‌اکسید کربن سرانه در دنیا باشد (رتبه ۷). با توجه به تنوع اقلیم در مناطق مختلف و کشت انواع محصولات زراعی، ایران پتانسیل قابل‌توجهی برای تنوع بخشیدن به ترکیب انرژی به‌ویژه انرژی زیست‌توده دارد؛ اما یارانه‌های سنگین روی انرژی (۱۲۷ میلیون دلار در سال ۲۰۲۲)، باعث شده انرژی‌های تجدیدپذیر مانند زیست‌توده سلولزی از نظر اقتصادی کمتر رقابت‌پذیر باشند (IEA, 2024). در چنین شرایطی، انگیزه اقتصادی تولید انرژی زیست‌توده کاهش می‌یابد، اما پرداختن به بحث رفاهی و زیست‌محیطی نظیر کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و رفع ناترازی انرژی به‌ویژه برق، در بلندمدت کاملاً ضروری است و می‌تواند به تحقق اهداف برنامه هفتم توسعه کشور کمک زیادی کند.

ایران یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان محصولات کشاورزی در جهان است. تا دهه ۱۹۹۰ منبع اصلی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران زیست‌توده کشاورزی بود که قبل از استخراج نفت مورد استفاده قرار می‌گرفت (Alavijeh & Yaghmaei, 2016). ایران در ۱۰ سال گذشته به‌طور متوسط حدود ۱۰/۹ میلیون هکتار زمین کشاورزی برای تولید محصولات زراعی داشته است. در ایران، کشاورزی حدود ۱۱ درصد به تولید ناخالص داخلی کمک می‌کند و شغل بیش از ۱۷/۵ درصد از کل جمعیت است (Statistical Center of Iran, 2023). کشت برنج و گندم یک فعالیت اساسی کشاورزی در ایران است که نقش مهمی در امنیت غذایی دارد. این دو محصول ضایعاتی به‌صورت پوسته و کاه برنج و کاه گندم تولید می‌کنند. بیشتر باقیمانده این محصولات در مزارع سوزانده می‌شوند و تنها درصد کمی برای تولید انرژی استفاده می‌شود.

تولید انرژی زیست‌توده از بقایای کشاورزی در حال حاضر در سراسر جهان انجام می‌شود. به‌عنوان مثال کشورهای ایالات متحده آمریکا، چین، برزیل و ژاپن به‌ترتیب با ظرفیت‌های نصب شده تقریباً ۸۱۴۰ مگاوات، ۴۷۸۸ مگاوات، ۴۰۲۴ مگاوات و ۳۷۸۵ مگاوات (IEA, 2024). مقادیر تولید شده بقایای کشاورزی همراه با در دسترس بودن فصلی بقایای کشاورزی عامل اصلی تأثیرگذار بر استفاده از زیست‌توده به‌عنوان سوخت در یک نیروگاه است. این امر مستلزم توسعه یک استراتژی مؤثر توسط دولت برای استفاده از بقایای محصول به‌عنوان سوخت است (Gosens, 2015) که می‌تواند جایگزین سوخت‌های

Hamzeh et al., 2011; Hosseini et al., 2013; Okello et al., 2013; Gabisa & Gheewala, 2018; Tolessa, 2023; Sebastian et al., 2025). به‌عنوان مثال، اوزدیل و کالیسکان (Ozdil & Caliskan, 2022) پتانسیل زیست‌توده تولید شده از محصولات کشاورزی و تولید برق با استفاده از زیست‌توده برای مناطق ترکیه را بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۸ محاسبه کردند. مجموع زیست‌توده حاصل شده از محصولات زراعی ۷۷۱۳۵۴ کیلوتن محاسبه شد که ۵۹۹۱۶۶ کیلوتن از این مقدار ناشی از محصولات زراعی و ۱۷۲۱۸۸ کیلوتن مربوط به محصولات باغی بوده است. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از وزارت انرژی ترکیه، برق مصرفی در دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۸ برای ترکیه ۲۷۲۶×۱۰۹ کیلووات ساعت است در حالی که پتانسیل برق به‌دست آمده از محصولات در همان سال‌ها حدود ۹۹۴×۱۰۹ کیلووات ساعت است؛ یعنی ۳۶ درصد انرژی مورد نیاز را می‌توان از پتانسیل زیست‌توده محصولات کشاورزی تأمین کرد.

حسن و آممبرگ (Hasan & Ammenberg, 2019) تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر را به‌عنوان راهی پایدار برای کاهش انتشار CO₂ در نظر گرفتند؛ بنابراین، آن‌ها به پتانسیل تولید بیوگاز از زباله‌های شهری و بقایای کشاورزی در قلمرو شهری داکا به نام هزاری باغ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که پتانسیل خوبی برای تولید بیوگاز و تولید برق از زباله‌های شهری و بقایای کشاورزی هزاری باغ وجود دارد.

یوزیر و همکاران (Uzair et al., 2020) استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در پاکستان را بهترین راه برای جبران نیازهای انرژی و کاهش مصرف سوخت فسیلی دانستند. آن‌ها نشان دادند که سالانه مقدار زیادی بقایای کشاورزی تولید می‌شود که می‌تواند به‌عنوان یک نهاده ارزان برای تولید برق استفاده شود. نتایج آن‌ها نشان داد که در مجموع می‌توان حدود ۱۷۰۰ مگاوات برق از بقایای کشاورزی چهار محصول اصلی (به‌عنوان مثال، ذرت، پنبه، گندم و برنج) تولید کرد.

ترکیب انرژی در ایران از چهار منبع اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: نفت خام (ایران چهارمین تولیدکننده بزرگ نفت در جهان است)، گاز طبیعی (ایران اولین در خاورمیانه و دومین در جهان است)، زغال‌سنگ (فقط ۰/۲۱ درصد از ترکیب انرژی در ایران را سهم دارد) و انرژی‌های تجدیدپذیر (کمتر از ۱٪). از آنجایی که ایران ششمین تولیدکننده سرانه گازهای گلخانه‌ای در جهان است (۲/۱۴ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان) و با توجه به پتانسیل استفاده از منابع انرژی زیست‌توده، ایران باید به استفاده از انرژی زیست‌توده توجه بیشتری داشته باشد (Mohammadnejad et al., 2011). بررسی ادبیات تحقیق نشان داد مطالعات زیادی برای ترویج استفاده از انرژی زیست‌توده انجام شده است؛ اما اثرات رفاهی و زیست‌محیطی استفاده از انرژی زیست‌توده سلولزی در ایران هنوز بررسی نشده است؛ بنابراین در این مطالعه به دنبال بررسی این موضوع هستیم که افزایش قیمت زیست‌توده تا چه حد می‌تواند رفاه اجتماعی را تغییر دهد. همچنین در

فسیلی شود و بر تولید انرژی و رفاه اجتماعی تأثیر بگذارد (Egbendewe-Mondzozo et al., 2011; Maung & McCarl, 2013). بررسی‌ها نشان داد که مطالعات در مورد تأثیر استفاده از انرژی زیست‌توده سلولزی بر رفاه اجتماعی و محیط‌زیست بسیار کم است، اما مطالعات روی انرژی زیست‌توده نسبتاً زیاد است. اگرچه اعتقاد بر این است که انرژی زیست‌توده یک گزینه مؤثر از نظر تولید انرژی تجدیدپذیر داخلی است، اما توانایی آن برای بهبود رفاه اجتماعی بحث‌برانگیز است (Kumar et al., 2023). بررسی جامع مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اکثر مطالعاتی که اثرات بازار یک سوخت زیستی را بررسی می‌کنند، بر رقابت برای زمین تمرکز می‌کنند (Thompson et al., 2010; Havlík et al., 2011). برخی از این مطالعات نشان می‌دهند که انرژی زیست‌توده درآمد جایگزین از طریق اشتغال ایجاد می‌کند، رشد اقتصادی را افزایش می‌دهد و در نتیجه امنیت غذایی و رفاه را بهبود می‌بخشد (Sulle et al., 2009; Arndt et al., 2011; Hung et al., 2012; Kgathi et al., 2012; Headey & Martin, 2016). برخی از دیگر مطالعات نشان می‌دهند که گسترش انرژی زیست‌توده باعث کاهش در دسترس بودن غذا و افزایش قیمت غذا و در نتیجه کاهش امنیت غذایی و کاهش رفاه می‌شود (Mitchell, 2008; Godfray et al., 2010; Zilberman et al., 2013; Renzaho et al., 2017; Brinkman et al., 2020).

برخی دیگر از محققان بیشتر بر تجزیه و تحلیل قیمت، هزینه، منابع زیست‌توده و آلودگی سوخت‌های فسیلی که جایگزین انرژی زیست‌توده می‌شوند تمرکز کرده‌اند (Tofigh & Abedian, 2016; Paolini et al., 2018; Jekayinfa & Scholz, 2009. Xin et al., 2018; Welfle et al., 2020; Zheng & Qiu, 2020). به‌عنوان مثال، لاندالف (Landälv, 2017) به این نتیجه رسید که مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده تولید انرژی زیست‌توده، قیمت مواد اولیه است. بن ایوو و همکاران (Ben-Iwo et al., 2016) منابع زیست‌توده (شامل بقایای کشاورزی، جنگلی، شهری و دیگر) موجود در نیجریه را برای تولید انرژی زیست‌توده ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که ۸۰ درصد از کل انرژی مصرفی در نیجریه را زیست‌توده جامد و زباله‌ها تشکیل می‌دهند. لائوری و همکاران (Lauri et al., 2017) پیامدهای بازار استفاده از زیست‌توده جنگلی برای رسیدن به کاهش میانگین ۲ درجه سانتی‌گراد دمای جهانی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که برای رسیدن به این هدف باید بیش از پیش از زیست‌توده استفاده کرد. کانگاس و همکاران (Kangas et al., 2011) تأثیر ابزارهای سیاستی حمایت از انرژی زیست‌توده را بر روی سرمایه‌گذاری در پالایشگاه تولید انرژی از زیست‌توده بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که یارانه کارآمدترین اقدام سیاستی جهت بکارگیری انرژی زیست‌توده در کارخانه‌های خمیر و کاغذ فلاند است.

برخی از محققان ظرفیت سالانه تولید زیست‌توده را در کشورهای مختلف بررسی کردند (Najafi et al., 2009; Singh & Gu, 2010).

تاکایاما و جادج (Takayama & Judge, 1964) و با استناد به مطالعه ونگ (Wang, 2023) مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه‌یافته غیرخطی به شرح زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \text{Max } W &= \left[\left(\sum_i [\beta_0 + \beta_1 S_i] - \sum_i C_i \text{Land}_i \right) \right. \\ &+ \left(\sum_i [(pwx_{(i)} \cdot (1 - tx_{(i)}) \text{Exchange} + \text{Cost}X_{(i)})X_i] \right. \\ &- \left. \sum_i [(pwm_{(i)} \cdot (1 + tm_{(i)}) + \text{Cost}M_{(i)})M_i] \right) \\ &+ \left. \sum_i [(Biomass_{(i)} \cdot PBiomass_i - \text{Cost}Biomass_{(i)})\text{Land}] \right] \quad (1) \\ &+ \left[\sum_i [P_{electricity} \times Q_{electricity}] \right. \\ &- \left. \sum_i [TVC + TFC + TC_{emission}] \right] \end{aligned}$$

Subject to:

$$S_i + M_i \geq X_i + D_i \quad (2)$$

$$P_i \leq \beta_{0(i)} + \beta_{1(i)} S_i \quad (3)$$

$$(pwm_{(i)} \cdot (1 + tm_{(i)}) + \text{Cost}M_{(i)}) \leq P_i \quad (4)$$

$$(pwx_{(i)} \cdot (1 - tx_{(i)}) \text{Exchange} + \text{Cost}X_{(i)}) \geq P_i \quad (5)$$

$$\sum_i TEPI = \sum_i Biomass_i \times RPR_i \times A_i \times HV_i \quad (6)$$

$$Emission_{CO_2} = \gamma \times Q_{electricity} \quad (7)$$

$$\sum_i L_i \leq \text{Total land} \quad (8)$$

در معادله (۱)، β_0 عرض از مبدأ تابع تولید محصول β_1 کشش متغیرهای مستقل تابع تولید محصول λ_i مقدار تولید محصول $pwx_{(i)}$ قیمت صادراتی محصول λ_i ، $tx_{(i)}$ تعرفه صادرات محصول λ_i ، $Exchange$ نرخ ارز، $\text{Cost}X_i$ هزینه صادرات محصول λ_i ، X_i مقدار صادرات محصول λ_i ، $pwm_{(i)}$ قیمت وارداتی محصول λ_i ، $\text{Cost}M_{(i)}$ هزینه واردات محصول λ_i ، M_i مقدار واردات محصول λ_i ، $Biomass_{(i)}$ مقدار زیست‌توده محصول λ_i ، $PBiomass_i$ قیمت زیست‌توده محصول λ_i ، $\text{Cost}Biomass_{(i)}$ هزینه جمع‌آوری زیست‌توده محصول λ_i ، $\text{Land}_{(i)}$ مقدار زمین تخصیص یافته به محصول λ_i ، $P_{electricity}$ قیمت برق تولیدی توسط نیروگاه زیست‌توده، $Q_{electricity}$ مقدار برق تولیدی توسط نیروگاه زیست‌توده، TVC هزینه‌های متغیر نیروگاه زیست‌توده، TFC هزینه‌های ثابت نیروگاه زیست‌توده و $TC_{emission}$ مالیات انتشار کربن نیروگاه زیست‌توده می‌باشد. در واقع معادله (۱) از مجموع دو قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول مربوط به مازاد تولیدکننده می‌باشد. در واقع این کمیت معیاری است که افزایش منفعت کشاورزان را در هر سطح تولیدی از محصولات که سود کشاورزان حداکثر می‌شود را نشان

این مطالعه پتانسیل کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای با بکارگیری زیست‌توده تولید شده از دو محصول گندم و برنج در تولید برق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش‌شناسی برای ارزیابی رفاه اجتماعی

روش‌های مختلفی برای مطالعه تولید انرژی زیست‌توده استفاده شده است (Lobell & Burke, 2010; Chen et al., 2016)، اما چانگ و همکاران (Chang et al., 2012) به این نتیجه رسیدند که تحلیل‌های کل بخش مانند مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی بر مدل‌های آماری ارجحیت دارند، زیرا آن‌ها به‌طور مناسب تغییرات رفاه اجتماعی را تحت واکنش‌های مختلف بازار به تصویر می‌کشند. بر همین اساس این مطالعه یک چارچوب برنامه‌ریزی ریاضی را پیشنهاد می‌کند تا تغییر قیمت انرژی زیست‌توده سلولزی را بر رفاه اجتماعی بررسی کند.

نظریه تعادل جزئی ابتدا توسط مارشال در سال ۱۹۲۰ مطرح شد (Canova, 1994). تعادل جزئی به وضعیتی اشاره دارد که در آن رابطه عرضه و تقاضای یک بازار واحد می‌تواند قیمت کالاها را تعیین کند و سایر بازارها ثابت فرض شوند. در تحلیل تعادل جزئی حوزه تحلیل به یک بخش خاص اقتصاد داخلی و بین‌المللی محدود می‌شود و سایر موارد حداقل به‌طور نظری ثابت فرض می‌شوند. اگرچه در چنین تحلیلی رابطه بین بازارهای مختلف مورد توجه قرار نمی‌گیرد اما درک آثار ناشی از سیاست‌ها در تحلیل تعادل جزئی بسیار آسان است؛ بنابراین، استفاده از مدل‌های تعادل جزئی می‌تواند برای تحلیل آثار اعمال سیاست‌های مختلف بسیار مفید باشد. در ایجاد این مدل‌ها، به اطلاعات بسیار محدودتری نسبت به مدل‌های تعادل عمومی نیاز است که با واقعیت محدودیت اطلاعات در کشورهای جهان سوم، انطباق بیشتری دارد (Sacchelli et al., 2014).

چارچوب مدل در مطالعه حاضر، از پژوهش ساموئلسون (Samuelson, 1952) و چندین مطالعه دیگر (Adams et al., 1990; Kung et al., 2013) گرفته شده است. تاکایاما و جادج (Takayama & Judge, 1964) رویکرد ساموئلسون را به مسائل تعادل مکانی و زمانی گسترش دادند و نشان دادند که با به حداکثر رساندن مجموع مازاد مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان، مشروط به محدودیت‌های در دسترس بودن منابع، می‌توان تعادل اقتصادی چند بازاری را حل کرد. در این دسته از مدل‌ها، قیمت‌ها به‌صورت برون‌زا اعمال نمی‌شوند؛ بلکه به‌صورت درون‌زا به‌عنوان قیمت‌های سایه‌ای مرتبط با محدودیت‌های تسویه بازار تعیین می‌شوند. این روش در مطالعات تجربی متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (McCarl & Spreen, 1980; Chang et al., 1992; Lambert et al., 1995; McCarl & Schneider, 2000; Guieysse et al., 2013; Kung & Zhang, 2015). این مدل، بازارهای کالاهای کشاورزی و انواع مختلفی از بقایای محصول را در نظر می‌گیرد. در این تحقیق از رویکرد

می‌دهد. به عبارت دیگر مازاد رفاه تولیدکننده عبارت است از اختلاف میان درآمد کل و هزینه‌های تولید برای یک کشاورز است (Gregory Mankiw, 2006). قسمت دوم مربوط به مازاد مصرف‌کننده است. در واقع نیروگاه‌های تولید برق از زیست‌توده به‌طور عادی برای کالای مورد نظر خود (انرژی الکتریکی) مقدار کمتری از آنچه که برای از دست ندادن کالا حاضر به پرداخت هستند، می‌پردازند. بنابراین مقدار کمی فوق عبارت است از اختلاف حداکثر قیمتی که مصرف‌کننده مایل است در هر مقدار برای انرژی الکتریکی بپردازد با قیمتی که در بازار می‌پردازد. لذا مازاد مصرف‌کننده جهت بهینه‌سازی رفتار طرف تقاضا در مدل در نظر گرفته شده است که شامل رفاه مصرف‌کننده از محل تقاضای انرژی الکتریسته است. در واقع این قسمت از تابع هدف با در نظر گرفتن هزینه‌های نیروگاه دارای متغیر تصمیم سطح فعالیت تولید برق در جهت تأمین تقاضای آن می‌باشد (Gregory Mankiw, 2006).

معادلات (۲-۸) از دیدگاه‌های مختلف بیانگر تعادل در بازار است. معادله (۲) تعادل کمی در بازار محصولات کشاورزی را نشان می‌دهد که در آن مقدار کل محصولات کشاورزی تولید شده و وارداتی باید پاسخگوی نیازهای داخلی و صادرات باشد. معادله (۳) رفتار تولیدکننده را نشان می‌دهد؛ جایی که عرضه بهینه زمانی رخ می‌دهد که هزینه تولید نهایی بیشتر یا برابر با درآمد نهایی تولید باشد. معادلات ۴ و ۵ بیانگر امکان واردات و صادرات محصولات کشاورزی در مدل است. در این معادلات P_i بیانگر قیمت محصول نام می‌باشد.

در معادله (۴)، $(pwm_{(i)} \cdot (1 + tm_{(i)}) + CostM_{(i)})$ قیمت محصول وارداتی را نشان می‌دهد؛ بنابراین تا زمانی که قیمت محصول وارداتی کمتر یا برابر قیمت داخلی آن محصول باشد، واردات در سطح بهینه خواهد بود. همچنین، زمانی صادرات در سطح بهینه خواهد بود که قیمت محصول صادراتی بیشتر یا برابر با قیمت داخلی آن محصول باشد، یعنی $(-tx_{(i)})Exchange + CostX_{(i)}$ (معادله ۵). در معادله (۶) TBP_i بیانگر پتانسیل نظری زیست‌توده^۱ است و کل تولید سالانه زیست‌توده به‌دست آمده از بقایای کشاورزی را نشان می‌دهد. ارزش TBP_i بسته به مقدار تولید سالانه محصولات و نسبت تولید به بقایا^۲ (RPR) متفاوت است. به‌عنوان مثال $RPR=2$ نشان می‌دهد که به ازای هر تن تولید محصول، دو تن بقایا تولید می‌شود (Singh, 2015). در این معادله A_i نرخ جمع‌آوری بقایا است که به‌صورت درصد بیان می‌شود. HV_i نیز نشان‌دهنده ارزش گرمایشی نیروگاه است که واحد آن MJ/kg می‌باشد (Ozturk & Bascetincelik, 2006; Iye).

محاسبه مقدار کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای با بکارگیری زیست‌توده برای تولید برق

با استفاده از معادله (۹) میزان انتشار گاز گلخانه‌ای در حالتی که نیروگاه‌ها تنها از سوخت فسیلی^۳ برای تولید برق استفاده کنند، محاسبه می‌شود:

$$GHG_{fossil} = Q_{fossil} \times EF_{fossil} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، Q_{fossil} بیانگر کل مقدار برق تولیدی مبتنی بر سوخت فسیلی گاز طبیعی برحسب کیلووات ساعت است که مقدار آن حدود ۲۴ هزار و ۳۹۲ مگاوات ساعت در کشور است (Ministry of Energy, 2023). EF_f ضریب انتشار گاز گلخانه‌ای از نیروگاه سوخت فسیلی است که مقدار آن ۸۵۶ گرم دی اکسید کربن به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق است (Wang, 2023).

کل انتشار گاز گلخانه‌ای از نیروگاه زیست‌توده با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$GHG_{bio} = GHG_{harvest} + GHG_{preprocessing} + GHG_{transportation} + GHG_{burn} \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، GHG_{bio} چرخه حیات^۴ انتشار گاز گلخانه‌ای ناشی از استفاده از زیست‌توده برای تولید برق است. $GHG_{harvest}$ انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزرعه به‌دلیل عملیات کاشت، داشت و برداشت محصولات و بقایای محصولات کشاورزی است. $GHG_{preprocessing}$ انتشار گازهای گلخانه‌ای با پیش‌پردازش زیست‌توده شامل خرد کردن، عدل‌بندی، حمل، ذخیره‌سازی و غیره است (Phanphanich & Mani, 2011; Masum et al., 2020). $GHG_{transportation}$ انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از انتقال زیست‌توده از مکان جمع‌آوری به نیروگاه‌ها است؛ GHG_{burn} نشان‌دهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوزاندن زیست‌توده برای تولید برق است. با استناد به مطالعه وانگ (Wang, 2023) مقدار GHG_{bio} ۲۳۵ تا ۳۲۵ گرم دی اکسید کربن برای تولید هر کیلووات ساعت برق به ازای هر تن زیست‌توده است.^۵ در نهایت کاهش در انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از جایگزینی سوخت فسیلی با زیست‌توده با استفاده از معادله (۱۱) برآورد می‌شود:

$$GHG_{savig} = GHG_{fossil} - GHG'_{fossil} - GHG_{bio} \quad (11)$$

4- Life Cycle

۵- با توجه به شدت انرژی چرخه سوخت، مشخصات سوخت زیستی، فناوری مورد استفاده و راندمان تبدیل حرارتی در تولید برق این رقم متفاوت است.

1- Theoretical Biomass Potential

2- Residue Production Ratio

۳- در این تحقیق فرض شده است که نیروگاه سوخت فسیلی از سوخت پایه گاز برای تولید برق استفاده می‌کند؛ چرا که بیش از ۸۰ درصد نیروگاه‌ها از سوخت گاز برای تولید برق در کشور استفاده می‌کنند.

جدول ۱- منابع داده‌های مورد استفاده در مدل

Table 1- Data sources used in the model

متغیرهای تصمیم	تعریف	منبع	متغیرهای تصمیم	تعریف	منبع
Decision variables	Definition	Source	Decision variables	Definition	Source
S_i	مقدار تولید محصولات Production quantity of crops	بانک مرکزی Central bank	$Q_{electricity}$	مقدار برق تولیدی توسط نیروگاه زیست‌توده Amount of electricity produced by the biomass power plant	سازمان انرژی‌های نو New energy organization
M_i	مقدار واردات Import quantity	فائو FAO	L_i	زمین‌های تحت کشت گندم و برنج Land under wheat and rice (cultivation (hectares	مرکز آمار ایران Statistical center of Iran
X_i	مقدار صادرات Export quantity	فائو FAO	P_i	قیمت‌های داخلی محصولات Domestic prices of crops	مرکز آمار ایران Statistical center of Iran
			$Biomass_{(i)}$	مقدار زیست‌توده Amount of biomass	یافته‌های تحقیق Research findings
پارامترها	تعریف	منبع	پارامترها	تعریف	منبع
Parameters	Definition	Source	Parameters	Definition	Source
$Exchange$	نرخ ارز Exchange rate	بانک جهانی World bank	TVC	هزینه‌های متغیر نیروگاه Variable costs of power plant	آژانس بین‌المللی انرژی EIA
$CostX_{(i)}$	هزینه صادرات Export cost	گمرک Customs	TEP_i	پتانسیل نظری زیست‌توده Theoretical biomass potential	یافته‌های تحقیق Research findings
β_1 و β_0	ضرایب تابع عرضه Supply function coefficients	یافته‌های تحقیق Research findings	$P_{electricity}$	قیمت هر kwh برق نیروگاه زیست‌توده Price per kwh of electricity from biomass power plant	گزارش‌های وزارت نیرو Ministry of Energy reports
$tx_{(i)}$	تعرفه صادرات Export tariff	گمرک Customs	RPR_i	نرخ تولید بقایا Residue production rate	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122662
$pwm_{(i)}$	قیمت واردات محصولات Import price of crops	Trading economics	A_i	ضریب دسترسی بقایا residue accessibility factor	https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.053
$CostM_{(i)}$	هزینه واردات Import costs	گمرک Customs	HV_i	ارزش حرارتی بقایا Residue heating value	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122662
$TC_{emission}$	هزینه انتشار دی اکسید کربن از نیروگاه The cost of carbon dioxide emissions from a power plant	آژانس بین‌المللی انرژی EIA	$Emission_{CO_2}$	انتشار دی اکسید کربن از نیروگاه زیست‌توده Carbon dioxide emissions from biomass power plants	سازمان انرژی‌های نو New Energy Organization
$pwx_{(i)}$	قیمت صادرات محصولات Export price of crops	Trading economics	γ	مقدار انتشار به ازای هر kwh Emissions per kwh	doi.org/10.3390/en16062725
$PBiomass_i$	قیمت زیست‌توده Biomass price	سامانه تأمین دام و طیور Livestock and poultry supply system	TFC	هزینه ثابت نیروگاه Fixed cost of power plant	آژانس بین‌المللی انرژی EIA
$CostBiomass_{(i)}$	هزینه جمع‌آوری زیست‌توده Cost of biomass collection	پرسشنامه جهاد کشاورزی Agricultural Jihad Questionnaire	$Land$	کل مساحت زمین‌های کشاورزی Total area of agricultural land	بانک جهانی World Bank
			$tm_{(i)}$	تعرفه واردات Import tariff	گمرک Customs

در معادله (۱۱)، GHG_{saving} کاهش در انتشار گازهای گلخانه‌ای بر حسب گرم دی‌اکسید کربن است به ازای هر کیلووات ساعت است.

با نتیجه مطالعه (Chen, 2016) می‌باشد. در این مطالعه نویسنده به این نتیجه رسید که برای ترغیب کشاورزان برای جمع‌آوری کاه برنج و کاه ذرت نیاز به افزایش قیمت زیست‌توده می‌باشد.

همچنین بر اساس تغییرات قیمت زیست‌توده نتایج مدل رفاه اجتماعی برای محصول گندم در سناریو سوم به بالاترین مقدار خود رسیده است بنابراین برای تشویق کشاورزان به جمع‌آوری زیست‌توده با حداکثر رفاه اجتماعی، افزایش قیمت زیست‌توده تا ۷۵ درصد نسبت به ارزش شبیه‌سازی شده ضروری است. این نتیجه همسو با نتایج گروهی از محققان (Miguel et al., 2003; Lescaroux & Mignon, 2008; Hamilton, 2018) است که نشان دادند افزایش قیمت انرژی در درازمدت اثرات منفی بر فعالیت‌های اقتصادی و رفاه اجتماعی دارد. توجه: مقدار شبیه‌سازی شده وضعیت فعلی را در نظر می‌گیرد. سناریوی (۱) فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۲۵٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. سناریوی ۲ فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۵۰٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. سناریوی ۳ فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۷۵ درصد بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. سناریوی ۴ فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۱۰۰٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است.

مقادیر داخل پراتر درصد تغییرات هر سناریو نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی مدل برای محصول برنج در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود در سناریو یک، سناریو دو، سناریو سه و سناریو چهار قیمت زیست‌توده برنج به ترتیب ۱۵۲۳۰، ۲۷۵۹۰، ۳۲۱۰۰، ۳۷۷۲۰ ریال به ازای هر کیلوگرم است. تولید برنج از ۲۷۷۶/۲۴ هزار تن در سناریو پایه به ۲۸۸۱/۳ هزار تن در سناریو چهارم افزایش می‌یابد. قیمت زیست‌توده نیز از ۸۰۳۰ ریال به ازای هر کیلوگرم در سناریو پایه به ۳۷۷۲۰ ریال به ازای هر کیلوگرم در سناریو چهارم افزایش می‌یابد.

با افزایش قیمت زیست‌توده، رفاه اجتماعی از ۴۵۵/۵ میلیون ریال در هر هکتار در سناریو پایه به ۴۸۴ میلیون ریال در هر هکتار در سناریو (۲) افزایش می‌یابد، در حالی که رفاه اجتماعی در سناریو سوم و چهارم کاهش می‌یابد؛ بنابراین، قیمت زیست‌توده ۲۷۵۹۰ ریال به ازای هر کیلوگرم برای ایجاد انگیزه در کشاورزان برای جمع‌آوری بقایای محصول برنج برای به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی مورد نیاز است. این نتایج همسو با مطالعه (Ahn et al., 2021) می‌باشد. این محققین در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که افزایش ۱۰ درصد سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی در ایالات متحده، رفاه اجتماعی را در درازمدت به میزان ۰/۷۵۳ درصد کاهش خواهد داد.

همچنین GHG'_{fossil} میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای تولید برق با استفاده از سوخت فسیلی با قیمت زیست‌توده غیر صفر است. $GHG_{fossil} - GHG'_{fossil}$ نشان‌دهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای است که با جایگزینی زیست‌توده به جای سوخت فسیلی در نیروگاه کاهش می‌یابد.

منابع داده‌ها

در این تحقیق بقایای دو محصول مهم و استراتژیک کاه گندم و کاه برنج را در نظر گرفته شده است. چرا که این دو محصول بالاترین میزان تولید بقایا در کشور را دارند. داده‌های مورد نیاز برای کالیبراسیون مدل شبیه‌ساز ریاضی از منابع مختلف استخراج شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای تابع عرضه با برآورد انواع توابع تولید به صورت مقطعی برای سال ۱۴۰۲ برای دو محصول گندم و برنج و انتخاب بهترین نوع تابع برآورد گردید و در مدل جای گذاری شد. در نهایت مدل شبیه‌ساز ریاضی در محیط نرم‌افزار GAMS اجرا و با استفاده از الگوریتم CONOPT3 حل شد.

نتایج و بحث

با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی با سناریوهای طراحی شده افزایش قیمت زیست‌توده، تغییرات تولید محصولات، مقدار زیست‌توده، مازاد مصرف‌کننده، مازاد تولیدکننده و در نهایت تغییرات رفاه جامعه بررسی شده است. در این تحقیق قیمت زیست‌توده در چهار سناریوی افزایش ۲۵ درصد نسبت به قیمت پایه، افزایش ۵۰ درصد نسبت به قیمت پایه، افزایش ۷۵ درصد نسبت به قیمت پایه و افزایش ۱۰۰ درصد نسبت به قیمت پایه در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ نشان می‌دهد که با توجه به سناریوها، افزایش قیمت زیست‌توده برای ترغیب کشاورزان به جمع‌آوری بقایای محصول گندم مورد نیاز است. تولید کل محصول و تولید کل زیست‌توده همزمان با افزایش قیمت زیست‌توده افزایش می‌یابد. در سناریوی یکم، برای محصول گندم، انتظار می‌رود تولید بقایای گیاهی با قیمت زیست‌توده ۱۵۳۷۵ ریال به ازای هر کیلوگرم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. در سناریوی دوم، با فرض اینکه قیمت زیست‌توده ۵۰٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده باشد، قیمت زیست‌توده ۲۶۱۵۴ ریال به ازای هر کیلوگرم برای شروع جمع‌آوری بقایای گیاهی مورد نیاز است. در سناریوی سوم قیمت زیست‌توده ۲۸۶۳۰ ریال به ازای هر کیلوگرم برای شروع جمع‌آوری بقایای گیاهی مورد نیاز است. در سناریوی چهارم، قیمت زیست‌توده ۳۱۵۲۴ ریال به ازای هر کیلوگرم برای جمع‌آوری بقایای محصول از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. این نتایج همسو

۱- در صورت لزوم جدول محاسبه میزان تولید بقایای محصولات کشاورزی مختلف در اختیار خوانندگان قرار خواهد گرفت.

جدول ۲- نتایج مدل شبیه‌ساز ریاضی تحت قیمت‌های مختلف انرژی زیست‌توده گندم

Table 2- Results of the mathematical simulator model under different wheat biomass energy prices

	گندم Wheat				
	مقدار شبیه‌سازی شده Simulated value	سناریو ۱ Scenario 1	سناریو ۲ Scenario 2	سناریو ۳ Scenario 3	سناریو ۴ Scenario 4
تولید Production (thousand tons)	11676.44 (0)	12694.41 (8.7)	14786.76 (26.6)	15721.5 (34.6)	16002.21 (37)
زیست‌توده Biomass (thousand tons)	13152.59 (0)	13427.99 (2)	13994 (6.3)	14264.64 (8.4)	14323 (8.8)
قیمت Price (thousand rials)	6125 (0)	15375 (151)	26154 (327)	28630 (367)	31524 (414)
مازاد مصرف‌کننده Consumer surplus (thousand rials)	19988530 (0)	18361150 (-8.1)	17523400 (-12.3)	15207060 (-23.9)	13164600 (-34.1)
مازاد تولیدکننده Producer surplus (thousand rials)	27271000 (0)	29529800 (8.2)	30171500 (10.6)	36590050 (34.1)	37521060 (37.5)
رفاه Welfare (thousand rials)	47259530 (0)	47890950 (1.3)	47694900 (0.9)	51797110 (9.6)	50685660 (7.2)

منبع: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

جدول ۳- نتایج مدل شبیه‌ساز ریاضی تحت قیمت‌های مختلف انرژی زیست‌توده برنج

Table 3- Results of the mathematical simulator model under different rice biomass energy prices

	برنج Rice				
	مقدار شبیه‌سازی شده Simulated value	سناریو ۱ Scenario 1	سناریو ۲ Scenario 2	سناریو ۳ Scenario 3	سناریو ۴ Scenario 4
تولید Production (thousand tons)	2776.24 (0)	2794.41 (0.6)	2865.76 (3.2)	2878.5 (3.6)	2881.3 (3.7)
زیست‌توده Biomass (thousand tons)	3249.59 (0)	3354.99 (3.2)	3373.75 (3.8)	3377.195 (3.9)	3478.251 (7)
قیمت Price (thousand rials)	8030 (0)	15230 (89.6)	27590 (243.5)	32100 (299.7)	37720 (369.7)
مازاد مصرف‌کننده Consumer surplus (thousand rials)	16573523 (0)	16327137 (-1.2)	16224969 (-1.6)	15735719 (-1.8)	15335711 (-7.6)
مازاد تولیدکننده Producer surplus (thousand rials)	28936170 (0)	29802505 (3)	30178716 (4.3)	36592400 (26.5)	37206201 (30)
رفاه Welfare (thousand rials)	45509693 (0)	46129642 (1.3)	48403685 (6.3)	48328119 (6.1)	48041912 (5.5)

منبع: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

انرژی زیست‌توده ۱۰۰٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. مقادیر داخل پرانتز درصد تغییرات هر سناریو نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در جدول ۴ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای هر کیلووات ساعت برق در دو نیروگاه سوخت فسیلی با زیست‌توده نشان شده است. ستون دوم جدول ۴ بیانگر مقدار کل زیست‌توده تولید شده دو محصول

توجه: مقدار شبیه‌سازی شده وضعیت فعلی را در نظر می‌گیرد. سناریوی ۱ فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۲۵٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. سناریوی ۲ فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۵۰٪ بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. سناریوی ۳ فرض می‌کند که قیمت انرژی زیست‌توده ۷۵ درصد بیشتر از مقدار پایه شبیه‌سازی شده است. سناریوی ۴ فرض می‌کند که قیمت

کاهش انتشار دی اکسید کربن طی سناریوهای مختلف برآورد می‌گردد. نتایج درصد کاهش انتشار GHG در هر سناریو نسبت به سناریوی پایه نشان می‌دهد که با بکارگیری زیست‌توده به‌جای سوخت فسیلی در تولید برق می‌توان تا ۸/۲ درصد از انتشار گاز گلخانه‌ای جلوگیری کرد. این نتیجه همسو با نتیجه مطالعه (Inglesi-Lotz, 2016) می‌باشد. این محقق نشان داد که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد و رشد اقتصادی را افزایش می‌دهد.

برنج و گندم طی سناریوهای مختلف قیمتی را نشان می‌دهد. ستون سوم جدول ۴ نشان‌دهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای است که با جایگزینی زیست‌توده به‌جای سوخت فسیلی در نیروگاه کاهش می‌یابد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش جایگزینی، مقدار بیشتری انتشار دی اکسید کربن به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق کاهش می‌یابد. ستون چهارم جدول ۴ نیز نشان‌دهنده میزان انتشار دی اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق توسط زیست‌توده طی سناریوهای مختلف است. با کسر کردن ستون ۳ از ستون ۴ خالص

جدول ۴- انتشار گازهای گلخانه‌ای و درصد کاهش خالص در انتشار گازهای گلخانه‌ای با جایگزین کردن سوخت زیست‌توده به‌جای سوخت فسیلی در سناریوهای مختلف

Table 4- Greenhouse gas emissions and net percentage reduction in greenhouse gas emissions by replacing fossil fuels with biomass in different scenarios

سناریوها Scenarios	مقدار کل زیست‌توده Total biomass amount (1000 tons)	GHG_{fossil} - GHG'_{fossil} (gCO ₂ /kwh)	GHG_{bio} (gCO ₂ /kwh)	GHG_{savg} = GHG_{fossil} - GHG'_{fossil} - GHG_{bio} (gCO ₂ /kwh)	در هر GHG درصد کاهش انتشار سناریو نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده Percentage reduction in GHG emissions in each scenario compared to the Simulated value
مقدار شبیه‌سازی شده Simulated value	16402.18	14942471356	4592610400	10349860956	0
سناریو ۱ Scenario 1	16782.95	15195639846	4699226000	10496413846	1.415989
سناریو ۲ Scenario 2	17367.75	15587052790	4862970000	10724082790	3.615718
سناریو ۳ Scenario 3	17641.835	15912095529	4939713800	10972381729	6.014774
سناریو ۴ Scenario 4	17801.251	16189093098	4984350280	11204742818	8.259839

منبع: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی اثرات رفاهی و زیست‌محیطی از دو محصول گندم و برنج که بالاترین میزان پتانسیل نظری انرژی را در ایران ایجاد می‌کنند، استفاده شده است. یکی از یافته‌های اصلی این مقاله این است که برای تولید انرژی زیست‌توده بهتر است روی مناطقی که گندم و برنج به‌وفور کشت می‌شود، تمرکز شود. سرمایه‌گذاری در نیروگاه زیست‌توده گزینه خوبی است، برق ارزان و پایدار را می‌توان با استفاده از بقایای مختلف کشاورزی تولید کرد اما راه‌حل کاملی برای حل بحران آب و هوایی کنونی در ایران نیست. دولت باید نقش خود را در توسعه تعرفه اولیه یارانه‌ای برای جذب و تسهیل سرمایه‌گذاران بالقوه برای پیگیری سریع توسعه پروژه‌های مربوط به تولید انرژی از زیست‌توده ایفا کند. در حال حاضر، هیچ یارانه‌ای از سوی دولت برای

ایران کشوری در حال توسعه با پتانسیل غنی زیست‌توده است. در این تحقیق تجزیه و تحلیل رفاه اجتماعی نشان می‌دهد که بکارگیری زیست‌توده برای تولید برق منجر به افزایش مازاد تولیدکنندگان و کاهش مازاد مصرف‌کنندگان و در نهایت افزایش رفاه جامعه می‌شود. سیاست‌هایی که توسعه انرژی از زیست‌توده را ترویج می‌کنند می‌توانند به افزایش درآمد کشاورزان، توسعه مناطق روستایی و کاهش فقر کمک کنند. همچنین برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل نظری زیست‌توده انتظار می‌رود که در فناوری‌های استحصال انرژی زیست‌توده سرمایه‌گذاری شود. برای این هدف، هماهنگ‌سازی سیاست‌های کشاورزی و زیست‌محیطی تأثیر مثبتی بر تولید انرژی زیست‌توده دارد.

زیست‌توده بر امنیت غذایی در مطالعات آتی می‌تواند به این مسئله کمک کند.

در این مطالعه، تولیدکنندگان بخش کشاورزی و نیروگاه‌های تولید برق به‌عنوان مصرف‌کنندگان زیست‌توده مورد بررسی قرار گرفته است و اثرات بالقوه بازار برق نادیده گرفته شده است. برای اطلاع‌رسانی در مورد استفاده پایدار از منابع زیست‌توده، مدل پیشنهادی می‌تواند به بخش برق مصرفی توسط دولت و خانوارها نیز تعمیم داده شود. علاوه بر این، تحقیقات بیشتری برای بررسی اثرات زیست‌محیطی مانند تنوع زیستی و مصرف آب، به شیوه‌ای گسترده‌تر ضروری است. نویسندگان این کاوش‌ها را به کارهای آینده واگذار می‌کنند.

تشویق کشاورزان به حفظ پسماندهای محصول ارائه داده نمی‌شود. یک طرح یارانه‌ای خوب می‌تواند کشاورزان را تشویق کند تا مقدار معقولی از پسماندها را بدون آسیب رساندن به مواد مغذی خاک به نیروگاه‌ها عرضه کنند.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای تشویق کشاورزان به جمع‌آوری پسماندهای محصولات کشاورزی و عرضه آن‌ها برای اهداف زیست‌انرژی، قیمت زیست‌توده باید افزایش یابد؛ اما دولت معمولاً به دلیل عرضه ناپایدار زیست‌توده و مسائل ناشی از تغییر کاربری زمین که ممکن است امنیت غذایی را تهدید کند، از ادامه ترویج زیست‌توده در مقیاس بزرگ دریغ می‌کند؛ بنابراین بررسی اثر تولید انرژی از

References

1. Abdullah-Al-Mahbub, M., & Islam, A.R.M.T. (2023). Current status of running renewable energy in Bangladesh and future prospect: A global comparison. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14308>
2. Adams, R.M., Rosenzweig, C., Peart, R.M., Ritchie, J.T., McCarl, B.A., Glyer, J.D., Curry, R.B., Jones, J.W., Boote, K.J., & Allen Jr, L.H. (1990). Global climate change and US agriculture. *Nature*, 345(6272), 219-224. <https://doi.org/10.1038/345219a0>
3. Ahn, K., Chu, Z., & Lee, D. (2021). Effects of renewable energy use in the energy mix on social welfare. *Energy Economics*, 96, 105174. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105174>
4. Alavijeh, M.K., & Yaghmaei, S. (2016). Biochemical production of bioenergy from agricultural crops and residue in Iran. *Waste management*, 52, 375-394. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.025>
5. Arndt, C., Msangi, S., & Thurlow, J. (2011). Are biofuels good for African development? An analytical framework with evidence from Mozambique and Tanzania. *Biofuels*, 2(2), 221-234. <https://doi.org/10.4155/bfs.11.1>
6. Bahrami, M., & Abbaszadeh, P. (2013). An overview of renewable energies in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.043>
7. Banse, M., & Grethe, H. (2008). Effects of a potential new biofuel directive on EU land use and agricultural markets. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.6331>
8. Baye, K., Hirvonen, K., Dereje, M., & Remans, R. (2019). Energy and nutrient production in Ethiopia, 2011-2015: Implications to supporting healthy diets and food systems. *PloS One*, 14(3), e0213182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213182>
9. Ben-Iwo, J., Manovic, V., & Longhurst, P. (2016). Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 172-192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.050>
10. Brinkman, M., Levin-Koopman, J., Wicke, B., Shutes, L., Kuiper, M., Faaij, A., & van der Hilst, F. (2020). The distribution of food security impacts of biofuels, a Ghana case study. *Biomass and Bioenergy*, 141, 105695. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105695>
11. Canova, F. (1994). Statistical inference in calibrated models. *Journal of Applied Econometrics*, 9(S1), 123-144. <https://doi.org/10.1002/jae.3950090508>
12. Chang, C.C., Chen, C.C., & McCarl, B. (2012). Evaluating the economic impacts of crop yield change and sea level rise induced by climate change on Taiwan's agricultural sector. *Agricultural Economics*, 43(2), 205-214. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2011.00577.x>
13. Chang, C.C., McCarl, B.A., Mjelde, J.W., & Richardson, J.W. (1992). Sectoral implications of farm program modifications. *American Journal of Agricultural Economics*, 74(1), 38-49. <https://doi.org/10.2307/1242988>
14. Chen, S., Chen, X., & Xu, J. (2016). Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76, 105-124. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.01.005>
15. Chen, X. (2016). Economic potential of biomass supply from crop residues in China. *Applied Energy*, 166, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.034>
16. Chowdhury, P., Mahi, N.A., Yeassin, R., Chowdhury, N.U.R., & Farrok, O. (2025). Biomass to biofuel:

- Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges. *Energy Conversion and Management*: X, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100889>
17. Egbendewe-Mondzozo, A., Swinton, S.M., Izaurralde, C.R., Manowitz, D.H., & Zhang, X. (2011). Biomass supply from alternative cellulosic crops and crop residues: a spatially explicit bioeconomic modeling approach. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4636-4647. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.010>
 18. Elobeid, A., & Hart, C. (2007). Ethanol expansion in the food versus fuel debate: how will developing countries fare?. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, 5(2). <https://doi.org/10.2202/1542-0485.1201>
 19. Ewing, M., & Msangi, S. (2009). Biofuels production in developing countries: assessing tradeoffs in welfare and food security. *Environmental Science & Policy*, 12(4), 520-528. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.10.002>
 20. Fadaei, D. (2007). Utilization of renewable energy sources for power generation in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1), 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.011>
 21. Gabisa, E.W., & Gheewala, S.H. (2018). Potential of bio-energy production in Ethiopia based on available biomass residues. *Biomass and Bioenergy*, 111, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.009>
 22. Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
 23. Gosens, J. (2015). Biopower from direct firing of crop and forestry residues in China: a review of developments and investment outlook. *Biomass and Bioenergy*, 73, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.014>
 24. Gregory Mankiw, N. (2006). Fundamentals of economics, translated by Manouchehr Askari, Tehran: Kohsar.
 25. Guieysse, B., Béchet, Q., & Shilton, A. (2013). Variability and uncertainty in water demand and water footprint assessments of fresh algae cultivation based on case studies from five climatic regions. *Bioresource Technology*, 128, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.096>
 26. Hamilton, J.D. (2018). Oil and the Macroeconomy. In *The new Palgrave dictionary of economics* (pp. 9753-9759). Palgrave Macmillan, London. https://doi.org/10.1057/978-1-349-95189-5_2119
 27. Hamzeh, Y., Ashori, A., Mirzaei, B., Abdulkhani, A., & Molaei, M. (2011). Current and potential capabilities of biomass for green energy in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4934-4938. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.060>
 28. Hasan, A.M., & Ammenberg, J. (2019). Biogas potential from municipal and agricultural residual biomass for power generation in Hazaribagh, Bangladesh—A strategy to improve the energy system. *Renewable Energy Focus*, 29, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.02.001>
 29. Havlík, P., Schneider, U.A., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalský, R., Aoki, K., De Cara, S., Kindermann, G., Kraxner, F., & Leduc, S. (2011). Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*, 39(10), 5690-5702. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.030>
 30. Headey, D.D., & Martin, W.J. (2016). The impact of food prices on poverty and food security. *Annual Review of Resource Economics*, 8(1), 329-351. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100815-095303>
 31. Hosseini, S.E., Andwari, A.M., Wahid, M.A., & Bagheri, G. (2013). A review on green energy potentials in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 533-545. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.015>
 32. Hung, J., Yang, J., Msangi, S., Rosegrant, M., Rozelle, S., & Weersink, A. (2012). Biofuels, Food Security and the Poor: Global Impact Pathways of Biofuels on Agricultural Markets. *Food Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.04.004>
 33. IEA. (2024). <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
 34. Inglesi-Lotz, R. (2016). The impact of renewable energy consumption to economic growth: A panel data application. *Energy Economics*, 53, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.01.003>
 35. Iye, E.L., & Bilsborrow, P.E. (2013). Assessment of the availability of agricultural residues on a zonal basis for medium-to large-scale bioenergy production in Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 48, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.11.015>
 36. Jekayinfa, S.O., & Scholz, V. (2009). Potential availability of energetically usable crop residues in Nigeria, Energy Sources, Part A. *Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(8), 687-697. <https://doi.org/10.1080/15567030701750549>
 37. Kangas, H.L., Lintunen, J., Pohjola, J., Hetemäki, L., & Uusivuori, J. (2011). Investments into forest biorefineries under different price and policy structures. *Energy Economics*, 33(6), 1165-1176. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.04.008>
 38. Kgathi, D.L., Mfundisi, K.B., Mmopelwa, G., & Mosepele, K. (2012). Potential impacts of biofuel development on food security in Botswana: A contribution to energy policy. *Energy Policy*, 43, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.027>
 39. Kumar, V., Vangnai, A.S., Sharma, N., Kaur, K., Chakraborty, P., Umesh, M., Singhal, B., Utreja, D., Carrasco, E.U., Andler, R., & Awasthi, M.K. (2023). Bioengineering of biowaste to recover bioproducts and bioenergy: A circular economy approach towards sustainable zero-waste environment. *Chemosphere*, 319, 138005. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138005>

40. Kung, C.C., & Zhang, N. (2015). Renewable energy from pyrolysis using crops and agricultural residuals: An economic and environmental evaluation. *Energy*, 90, 1532-1544. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.114>
41. Kung, C.C., McCarl, B., Cao, X., & Xie, H. (2013). Bioenergy prospects in Taiwan using set-aside land—an economic evaluation. *China Agricultural Economic Review*, 5(4), 489-511. <https://doi.org/10.1108/CAER-01-2012-0002>
42. Lambert, D.K., McCarl, B.A., He, Q., Kaylen, M.S., Rosenthal, W., Chang, C.C., & Nayda, W.I. (1995). Uncertain yields in sectoral welfare analysis: an application to global warming. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 27(2), 423-436. <https://doi.org/10.1017/S1074070800028479>
43. Landälv, I. (2017). Methanol as a renewable fuel—a knowledge synthesis. The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels. Sweden, p.6.
44. Lauri, P., Forsell, N., Korosuo, A., Havlík, P., Obersteiner, M., & Nordin, A. (2017). Impact of the 2 C target on global woody biomass use. *Forest Policy and Economics*, 83, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.07.005>
45. Lescaroux, F., & Mignon, V. (2008). On the influence of oil prices on economic activity and other macroeconomic and financial variables. *OPEC Energy Review*, 32(4), 343-380. <https://doi.org/10.1111/j.1753-0237.2009.00157.x>
46. Lobell, D.B., & Burke, M.B. (2010). On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1443-1452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>
47. Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Al-Akwaa, M.S., Pralat, K., Nemova, D., Petropavlovskii, K., Novichenkova, T., Petropavlovskaya, V., & Sulman, M. (2021). Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy. *Materials*, 14(21), 6482. <https://doi.org/10.3390/ma14216482>
48. Masum, M.F.H., Dwivedi, P., & Anderson, W.F. (2020). Estimating unit production cost, carbon intensity, and carbon abatement cost of electricity generation from bioenergy feedstocks in Georgia, United States. *Renew Sustain. Energy Rev*, 117, 109514. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109514>
49. Maung, T.A., & McCarl, B.A. (2013). Economic factors influencing potential use of cellulosic crop residues for electricity generation. *Energy*, 56, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.064>
50. McCarl, B.A., & Schneider, U.A. (2000). US agriculture's role in a greenhouse gas emission mitigation world: An economic perspective. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 22(1), 134-159. <https://doi.org/10.1111/1058-7195.t01-1-00011>
51. McCarl, B.A., & Spreen, T.H. (1980). Price endogenous mathematical programming as a tool for sector analysis, *American Journal of Agricultural Economics*, 62(1), 87-102. <https://doi.org/10.2307/1239475>
52. Miguel, C.D., Manzano, B., & Martm-Moreno, J.M. (2003). Oil price shocks and aggregate fluctuations. *The Energy Journal*, 24(2), 47-61. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol24-No2-2>
53. Milhau, A., & Fallot, A. (2013). Assessing the potentials of agricultural residues for energy: What the CDM experience of India tells us about their availability. *Energy Policy*, 58, 391-402. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.041>
54. Ministry of Energy. (2023). <https://www.moe.gov.ir/>
55. Mitchell, D. (2008). A note on rising food prices, World Bank policy research working paper, (4682).
56. Mohammadnejad, M., Ghazvini, M., Mahlia, T.M.I., & Andriyana, A. (2011). A review on energy scenario and sustainable energy in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4652-4658. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.087>
57. Naderi, M.M., Mirchi, A., Bavani, A.R.M., Goharian, E., & Madani, K. (2021). System dynamics simulation of regional water supply and demand using a food-energy-water nexus approach: Application to Qazvin Plain, Iran. *Journal of Environmental Management*, 280, 111843. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111843>
58. Najafi, G., Ghobadian, B., Tavakoli, T., & Yusaf, T. (2009). Potential of bioethanol production from agricultural wastes in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1418-1427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.010>
59. Okello, C., Pindozi, S., Faugno, S., & Boccia, L. (2013). Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda. *Biomass and Bioenergy*, 56, 515-525. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.06.003>
60. Ozdil, N.T., & Caliskan, M. (2022). Energy potential from biomass from agricultural crops: Development prospects of the Turkish bioeconomy. *Energy*, 249, 123770. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123770>
61. Ozturk, H.H., & Bascetincelik, A. (2006). Energy exploitation of agricultural biomass potential in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 24(4), 313-330. <https://doi.org/10.1260/014459806779398802>
62. Paolini, V., Petracchini, F., Segreto, M., Tomassetti, L., Naja, N., & Cecinato, A. (2018). Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(10), 899-906. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076>
63. Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresours Technology*, 102, 1246-1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
64. Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., & Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy

- supply and demand. *New Biotechnology*, 60, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>
65. Quartey, E.T., & Chýlková, J.A.R.O.M.Í.R.A. (2012). Challenges and opportunities in managing agricultural waste in Ghana, *Advances in Environment. Biotechnology and Biomedicine*, 235-239.
66. Renzaho, A.M., Kamara, J.K., & Toole, M. (2017). Biofuel production and its impact on food security in low and middle income countries: Implications for the post-2015 sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 503-516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.072>
67. Revilla, P., Alves, M.L., Andelković, V., Balconi, C., Dinis, I., Mendes-Moreira, P., Redaelli, R., Ruiz de Galarreta, J.I., Vaz Pato, M.C., Žilić, S., & Malvar, R.A. (2022). Traditional foods from maize (*Zea mays* L.) in Europe. *Frontiers in Nutrition*, 8, 683399. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.683399>
68. Riva, G., Foppapedretti, E., & Caralis, C. (2014). Handbook on Renewable Energy Sources-Biomass. *Ener Supply*, 157. <https://doi.org/10.56845/rebs.v2i2.22>
69. Rosegrant, M.W. (2008). Biofuels and grain prices: impacts and policy responses (pp. 1-4), Washington, DC: *International Food Policy Research Institute*. <https://hdl.handle.net/10568/160345>
70. Sacchelli, S., Bernetti, I., De Meo, I., Fiori, L., Paletto, A., Zambelli, P., & Ciolli, M. (2014). Matching socio-economic and environmental efficiency of wood-residues energy chain: a partial equilibrium model for a case study in Alpine area. *Journal of Cleaner Production*, 66, 431-442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.059>
71. Samuelson, P.A. (1952). Spatial price equilibrium and linear programming. *The American Economic Review*, 42(3), 283-303.
72. Schmidhuber, J. (2008). Impact of an increased biomass use on agricultural markets, prices and food security: A longer-term perspective, In *ENERGY SECURITY IN EUROPE* Proceedings from the conference "Energy Security in Europe" (p. 133).
73. Sebastian, R.M., Billal, M.M., & Kumar, A. (2025). The development of a framework to assess waste and biomass availability: A case study for Canada, *Resources. Conservation and Recycling*, 215, 108170. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108170>
74. Singh, J., & Gu, S. (2010). Biomass conversion to energy in India- A critique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5), 1367-1378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.013>
75. Singh, J. (2015). Overview of electric power potential of surplus agricultural biomass from economic, social, environmental and technical perspective- A case study of Punjab. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 286-297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.015>
76. Solaymani, S. (2021). A review on energy and renewable energy policies in Iran. *Sustainability*, 13(13), 7328. <https://doi.org/10.3390/su13137328>
77. Statistical Center of Iran. (2023). www.amar.org.ir
78. Sulle, E., Fauveaud, S., & Vermeulen, S. (2009). Biofuels in Africa: growing small-scale opportunities.
79. Takayama, T., & Judge, G.G. (1964). Equilibrium among spatially separated markets: A reformulation, *Econometrica. Journal of the Econometric Society*, 510-524. <https://doi.org/10.2307/1910175>
80. Taufiq, B.N., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I., Saidur, R., Faizul, M.S., & Mohamad, E.N. (2007). Second law analysis for optimal thermal design of radial fin geometry by convection. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1363-1370. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.10.024>
81. Thompson, W., Meyer, S., & Green, T. (2010). The US biodiesel use mandate and biodiesel feedstock markets. *Biomass and Bioenergy*, 34(6), 883-889. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.033>
82. Tofigh, A.A., & Abedian, M. (2016). Analysis of energy status in Iran for designing sustainable energy roadmap. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1296-1306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.209>
83. Tolessa, A. (2023). Bioenergy potential from crop residue biomass resources in Ethiopia. *Heliyon*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13572>
84. Uzair, M., Sohail, S.S., Shaikh, N.U., & Shan, A. (2020). Agricultural residue as an alternate energy source: A case study of Punjab province, Pakistan. *Renewable Energy*, 162, 2066-2074. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.041>
85. Von Lampe, M. (2006). Agricultural market impacts of future growth in the production of biofuels, Organization for Economic Co-operation and Development (www.oecd.org). https://doi.org/10.1787/oecd_papers-v6-art1-en
86. Wang, W. (2023). Integrated assessment of economic supply and environmental effects of biomass co-firing in coal power plants: A case study of Jiangsu, China. *Energies*, 16, 2725. <https://doi.org/10.3390/en16062725>
87. Welfle, A., Chingaira, S., & Kassenov, A. (2020). Decarbonising Kenya's domestic & industry Sectors through bioenergy: An assessment of biomass resource potential & GHG performances. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105757. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105757>
88. Xin, L., Guo, Z., Xiao, X., Xu, W., Geng, R., & Wang, W. (2018). Feasibility of anaerobic digestion for contaminated rice straw inoculated with waste activated sludge. *Bioresource Technology*, 266, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.048>
89. Zheng, Y., & Qiu, F. (2020). Bioenergy in the Canadian Prairies: Assessment of accessible biomass from agricultural crop residues and identification of potential biorefinery sites. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105669.

- <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105669>
90. Zilberman, D., Hochman, G., Rajagopal, D., Sexton, S., & Timilsina, G. (2013). The impact of biofuels on commodity food prices: Assessment of findings. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(2), 275-281. <https://doi.org/10.1093/ajae/aas037>