

Applications of Renewable Energy in Agricultural Greenhouses

Mehdi Karami
Moghadam 

Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi
Agricultural and Natural Resources Research and Education
Center, Agricultural Research, Education and Extension
Organization (AREEO), Mashhad, Iran

Abstract

Introduction

The integration of renewable energy in agriculture has gained paramount importance as the global community grapples with climate change and the imperative to conserve natural resources. As a foundational sector for economic stability and food security, agriculture plays a dual role: it is both vulnerable to environmental shifts and a critical arena for mitigation. Transitioning to renewable energy technologies within agricultural systems not only optimizes productivity and crop yields but also substantially mitigates the ecological footprint associated with conventional farming practices.

Objective

Maintaining precise thermal regulation through heating and cooling is a prerequisite for greenhouse production, yet heating costs can constitute up to 70% of total operational expenditures during winter. This study explores the potential of hybrid solar-wind systems as a strategic alternative to conventional energy, which has been shown to yield significant consumption reductions. Specifically, the research evaluates the cost-effectiveness of passive solar greenhouses for extending growing seasons, particularly in cold or high-cloud-cover regions where supplementary renewable or conventional heating is necessary to ensure crop protection.

* Corresponding Author: m.karami.mo@areeo.ac.ir

How to Cite: Karami Moghadam, M. (2025). Applications of Renewable Energy in Agricultural Greenhouses. *Journal of Environmental and Natural Resource Economics*, 5(13), pp. 94-116. DOI: 10.22054/eenr.2026.91282.226

Original Research

Accept: 03 May 2026

Revise: 02 May 2026

Receive: 02 February 2026

ISSN: 2538-4791

eISSN: 2538-483X

Research Method

Adopting a systematic literature review approach, this research synthesizes global evidence on the application of renewable energy in agriculture. The study first evaluates electrical energy utilization in greenhouses before conducting a comparative analysis of solar and wind energy applications across diverse international contexts. It further investigates the multi-dimensional factors determining the viability of integrating these systems into protected agriculture and concludes by identifying the systemic challenges hindering widespread adoption.

Results and Discussion

Findings indicate that despite the clear advantages of renewable energy, its adoption, and particularly in developing economies is constrained by complex institutional, political, legal, and socio-cultural barriers. In rural settings, community-based project success hinges on enhancing local awareness regarding the detrimental impacts of fossil fuels. Furthermore, the analysis reveals that adoption rates are significantly influenced by psychological and behavioral determinants, including perceived vulnerability, intrinsic rewards, self-efficacy, and the perceived cost-benefit ratio of the technological transition.

Conclusion

While various technologies including hydropower and biomass, are available, solar and wind energy remain the most critical for innovative agricultural design. The future of the sector lies in the advancement of high-efficiency, low-cost solutions such as multi-junction solar cells and thin-film technologies. Strategic policy intervention and technological maturation are essential to transitioning from fossil-dependent agriculture to sustainable, green-energy-driven systems.

Keywords: Renewable Energy; Agricultural Greenhouses; Environmental Protection; Sustainable Agriculture; Climate Change Mitigation.

JEL Classification: O13, P28 Q01



کاربردهای انرژی پاک در گلخانه‌های کشاورزی

بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، مشهد، ایران

مهدی کریمی مقدم *

چکیده

در حال حاضر، کشاورزی به سمت مدرن‌سازی و افزایش بهره‌وری در حرکت است تا بتواند در بازار جهانی رقابتی باقی بماند و یکی از مسائل مهم در این راستا، افزایش هزینه‌های انرژی است. کشت گلخانه‌ای به عنوان یک صنعت در حال رشد در بسیاری از کشورها مطرح است. این روش، با وجود آن که راهکاری جایگزین و مکمل برای تأمین تقاضای جهانی غذا فراهم می‌کند، به دلیل افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی با کاهش رقابت‌پذیری مواجه است. افزایش روزافزون تقاضا برای غذا و نوسانات قیمت سوخت‌های فسیلی منجر به جست‌وجوی منابع انرژی سازگار با محیط‌زیست شده است. انرژی، یکی از بزرگ‌ترین هزینه‌های سربار در تولید محصولات گلخانه‌ای به منظور کنترل اقلیم مناسب به شمار می‌رود. استفاده از سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر بادی-خورشیدی برای کنترل شرایط محیطی گلخانه‌ها، مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و پایداری تولید گلخانه‌ای را بهبود می‌بخشد. این مرور با هدف معرفی دو نوع انرژی‌های تجدیدپذیر، مزایای استفاده از آن‌ها در کشاورزی و گلخانه‌ها، چالش‌های پیش‌روی استفاده از این نوع انرژی و ارائه نمونه‌های عملی از کاربردهای موفق در دنیا، به تشویق استفاده گسترده از این منابع ارزشمند در کشاورزی می‌پردازد.

کلیدواژه‌ها: انرژی فسیلی، گلخانه‌های کشاورزی، حفاظت از محیط زیست، انرژی سبز و تغییرات اقلیمی.

طبقه‌بندی JEL: O13, P28 Q01

□ مقاله حاضر برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان تدوین سند توسعه پایدار انرژی‌های خورشیدی در بخش چاه‌های کشاورزی استان خراسان رضوی با حمایت موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی است.

* نویسنده مسئول: m.karami.mo@areeo.ac.ir

۱. مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشاورزی اهمیت بسیار زیادی در جهان امروزی دارد. در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و نیاز به حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های انسانی تبدیل شده‌اند. کشاورزی، به عنوان یکی از بخش‌های اساسی اقتصاد و تأمین غذا، نقش مهمی در این چالش‌ها ایفا می‌کند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشاورزی، نه تنها به بهبود بهره‌وری و افزایش تولید محصولات کمک می‌کند؛ بلکه تأثیرات منفی زیست‌محیطی کشاورزی را کاهش می‌دهد. از انواع انرژی‌های پاک، انرژی خورشیدی بیش‌ترین استفاده در بخش کشاورزی استان خراسان رضوی دارد. خورشید اصلی‌ترین منبع انرژی مورد استفاده بشر در زمین است. انرژی خورشیدی به صورت مستقیم از تابش خورشید قابل بهره‌برداری است. انرژی‌های تجدیدپذیر گاهی با نام‌هایی نظیر انرژی سبز، انرژی پایدار، یا انرژی جایگزین نیز شناخته می‌شوند. برای مقایسه، در حالی که یک نیروگاه هسته‌ای می‌تواند در یک سال با مصرف تنها ۰/۱۳ کیلوگرم سوخت هسته‌ای، ۱۰۰۰ مگاوات برق تولید کند، سطح خورشید در هر ثانیه تقریباً ۴ میلیون تن سوخت خورشیدی را به انرژی تبدیل می‌کند. میانگین انرژی تابشی دریافتی توسط هر مترمربع از سطح زمین حدود ۱۳۶۶ وات است (لندسی^۱، ۲۰۹)، هرچند این مقدار بر اساس عرض جغرافیایی می‌تواند متفاوت باشد (کوکز^۲، ۲۰۰۹). در میان منابع تجدیدپذیر مختلف، انرژی خورشیدی جایگاه ویژه‌ای دارد؛ چراکه در سراسر جهان به وفور در دسترس است. فعالیت‌های فعلی کشاورزی خود نیز یکی از منابع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای (GHG) هستند. بهره‌گیری از انرژی خورشیدی می‌تواند موجب کاهش انتشار این گازها شود و بنابراین کشورهای در حال توسعه نیز به استفاده از این منبع علاقه‌مند شده‌اند.

در حال حاضر، کشاورزی به سمت مدرن‌سازی و افزایش بهره‌وری در حرکت است تا بتواند در بازار جهانی رقابتی باقی بماند و یکی از مسائل مهم در این راستا، افزایش

^۱ Lindsey

^۲ Cocks

هزینه‌های انرژی است. کشت گلخانه‌ای به عنوان یک صنعت در حال رشد در بسیاری از کشورها مطرح است. این روش، با وجود آن که راهکاری جایگزین و مکمل برای تأمین تقاضای جهانی غذا فراهم می‌کند، به دلیل افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی با کاهش رقابت‌پذیری مواجه است (حسنین^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). بخش عمده‌ای از نیازهای انرژی در تولیدات گلخانه‌ای مربوط به فرایندهای گرمایش و سرمایش است. گرمایش معمولاً با سوزاندن سوخت‌های فسیلی نظیر زغال‌سنگ، گازوئیل، نفت کوره، چوب، گاز مایع تأمین می‌شود که منجر به افزایش انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) می‌گردد. همچنین، بخاری‌های برقی که انرژی اولیه بیشتری مصرف می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند (چای و همکاران، ۲۰۱۲). فرایند سرمایش نیز؛ به‌ویژه در کشورهای آمریکای لاتین از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است، جایی که روش‌های سرمایش سنتی قادر به تأمین شرایط مطلوب رشد گیاهان در تابستان نیستند؛ بنابراین، یافتن فناوری‌های نوین گرمایش و سرمایش که ضمن کاهش مصرف انرژی، امکان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را فراهم آورند، دارای اهمیت بسیار است. چالش اصلی در گلخانه‌های کشاورزی، افزایش کارایی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه CO_2 است (بنلی^۳، ۲۰۱۱). انرژی خورشیدی و بادی به عنوان دو منبع مهم و قابل اتکای انرژی تجدیدپذیر در جهان شناخته می‌شوند که به دلیل در دسترس بودن و مزایای توپوگرافی برای تولید انرژی محلی در مناطق دورافتاده و ایزوله، از مزایای ویژه‌ای برخوردارند؛ هرچند توسعه آن‌ها تا حدی با چالش‌هایی مانند تعرفه‌های خرید تضمینی برق مواجه است (کاتور و کانن^۴، ۲۰۱۰). با این حال، این موانع را می‌توان از طریق ترکیب دو یا چند منبع انرژی مختلف (سامانه‌های هیبریدی) همراه با ذخیره‌سازهای مناسب انرژی، برطرف نمود. مزیت اصلی سامانه خورشیدی- بادی، در قابلیت اطمینان بالاتر آن نهفته است. همچنین، ظرفیت مورد نیاز بانک باتری ذخیره‌ساز انرژی در این سامانه‌ها نسبت به سامانه‌های تک‌منبعی کمتر خواهد

1 Hassanien

2 Chai et al.

3 Benli

4 Couture and Gagnon

بود (بنتوبا و برویوس^۱، ۲۰۱۶). در تولید گلخانه‌ای، وجود سامانه‌های گرمایش و سرمایش الزامی است. به گونه‌ای که گرمایش گلخانه‌ها در فصل زمستان حدود ۷۰ درصد از کل هزینه‌های تولید را به خود اختصاص می‌دهد؛ اما با استفاده از انرژی تجدیدپذیر در قالب سامانه‌های خورشیدی-بادی، کاهش چشمگیری در مصرف انرژی متداول گزارش شده است (محمودی^۲ و همکاران، ۲۰۰۸). در اقلیم‌های سردتر یا مناطق ابری، ممکن است نیاز باشد که گرمایش خورشیدی با منبع تجدیدپذیر دیگری یا سامانه گرمایش سنتی ترکیب شود تا از گیاهان در برابر سرما محافظت گردد (چیکایر و همکاران^۳، ۲۰۱۰).

لذا این مقاله با هدف معرفی دو نوع انرژی تجدیدپذیر، مزایای استفاده از آن‌ها در کشاورزی و گلخانه‌ها، چالش‌های پیش‌روی استفاده از این نوع انرژی و ارائه نمونه‌های عملی از کاربردهای موفق در دنیا، به تشویق استفاده گسترده از این منابع ارزشمند در کشاورزی می‌پردازد. لذا در این تحقیق ابتدا به استفاده از انرژی الکتریکی در گلخانه‌ها پرداخته می‌شود. سپس دو منبع انرژی تجدیدپذیر یعنی انرژی خورشیدی و بادی معرفی و استفاده آن‌ها در بخش گلخانه و کشاورزی در کشورهای مختلف بررسی می‌شود.

۲. روش

گردآوری اطلاعات این تحقیق به صورت کتابخانه‌ای انجام شده است. در این مطالعه سعی شده است با مرور منابع مختلف، تجربه‌های موفق در استفاده از انرژی تجدیدپذیر بررسی شود. در این تحقیق ابتدا به استفاده از انرژی الکتریکی در گلخانه‌ها پرداخته می‌شود. سپس دو منبع انرژی تجدیدپذیر یعنی انرژی خورشیدی و بادی معرفی و استفاده آن‌ها در بخش گلخانه و کشاورزی در کشورهای مختلف بررسی می‌شود. امکان‌پذیری ادغام سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر در کشاورزی محافظت‌شده به عوامل بستگی دارد که این عوامل موردبررسی قرار می‌گیرند. در انتها به چالش‌های پیش‌رو در استفاده از انرژی تجدیدپذیر پرداخته می‌شود.

1 Bentouba and Bourouis

2 Mahmoudi

3Chikaire et al.

۳. یافته‌ها

الف) استفاده از انرژی الکتریکی در گلخانه‌ها

ترکیب افزایش مستمر جمعیت جهانی و صنعتی شدن کشورهای در حال توسعه، موجب رشد شدید تقاضای جهانی برای انرژی شده است. در این راستا، محققان بسیاری تمرکز خود را بر ارائه فناوری‌های جایگزین مبتنی بر منابع انرژی متفاوت به منظور تأمین غذای کافی قرار داده‌اند. از سوی دیگر، منابع محدود آب و توزیع نامناسب آن همراه با اثرات تغییر اقلیم، نشان داده‌اند که کشت محافظت‌شده در گلخانه‌ها، بهترین مسیر برای توسعه بخش کشاورزی به شمار می‌آید. گلخانه‌ها می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که از شرایط اقلیمی مناسب (دما، رطوبت نسبی و نور) بهره ببرند و در نتیجه، تولید را با هزینه کمتری محقق کنند (بیهان و همکاران^۱، ۲۰۱۳؛ بوت و همکاران، ۲۰۰۵). (تانگ و همکاران، ۲۰۱۳)^۳ در ژاپن با انجام آزمایشی گزارش کردند که مصرف ساعتی انرژی برای گرمایش در بازه زمانی ژانویه تا مارس در گلخانه دارای پمپ حرارتی، در بازه ۰/۲۲ تا ۰/۵۶ مگاژول بر مترمربع بود، در حالی که این مقدار برای گرمایش با بخاری نفتی در محدوده ۰/۴۲ تا ۰/۷۶ مگاژول بر مترمربع قرار داشت. هم‌زمان، میزان انتشار CO₂ در گلخانه با پمپ حرارتی بین ۹/۵ تا ۲۴ گرم بر مترمربع و در گلخانه با بخاری نفتی بین ۳۱ تا ۵۵ گرم بر مترمربع گزارش شد. انرژی به عنوان ستون فقرات رشد اقتصادی دنیای مدرن شناخته می‌شود و انرژی خورشیدی منشأ اصلی بسیاری از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده در بخش کشاورزی و صنعت است. در نتیجه، نگرانی‌ها درباره امنیت انرژی، استفاده از منابع انرژی سبز مانند انرژی خورشیدی را به منظور کاهش انتشار CO₂ و هزینه‌های گرمایش ضروری ساخته است. برای مثال، چندین پژوهش‌گر استفاده از سامانه‌های پمپ حرارتی متصل به زمین (GCHPS) در ترکیب با کلکتورهای خورشیدی را پیشنهاد داده‌اند. پمپ حرارتی زمین گرمایی با پشتیبانی خورشیدی، عملکرد سامانه را در سطح پایداری حفظ می‌کند (نام

^۱ Beyhan et al.^۲ Bot et al.^۳ Tong et al.

و همکاران، ۲۰۱۵)^۱. ازسوی دیگر، توجه به امنیت غذایی، محیط‌زیست و پایداری انرژی بیش از هر زمان دیگری برای تولید پایدار محصولات گلخانه‌ای اهمیت یافته است. در چند دهه اخیر، انرژی خورشیدی به واسطه پیشرفت‌های فناوریانه و سیاست‌های حمایتی دولت‌ها در توسعه و بهره‌برداری از انرژی تجدیدپذیر، به‌طور چشمگیری رشد یافته است (تیمیلسینا^۲ و همکاران، ۲۰۱۲؛ نوربرتو و همکاران^۳، ۲۰۱۶). در حال حاضر، مصرف توان در سطح جهان حدود ۱۸ تریلیون وات برآورد می‌شود (رودز^۴، ۲۰۱۰). مصرف انرژی در بخش کشاورزی نیز با معرفی ارقام پرمحصول و روش‌های مکانیزه تولید افزایش یافته است. پس از هزینه‌های نیروی کار، انرژی معمولاً بزرگ‌ترین هزینه سربار در تولید محصولات گلخانه‌ای حتی در اقلیم‌های معتدل محسوب می‌شود. از کل انرژی موردنیاز، حدود ۷۵٪ صرف گرمایش، ۱۵٪ برای برق‌رسانی و ۱۰٪ به حمل‌ونقل اختصاص می‌یابد (بلانچارد و رانکل^۵، ۲۰۱۷). برای ایجاد شرایط بهینه رشد گیاهان، تنظیم روشنایی، دما، رطوبت و ترکیب یا غلظت گازها در گلخانه از طریق برق‌رسانی ضروری است.

ب) انرژی خورشیدی

خورشید فراوان‌ترین منبع انرژی برای زمین محسوب می‌شود. انرژی خورشیدی به‌صورت طبیعی با نرخ ۱۲۰ پتاوات بر سطح زمین می‌تابد؛ به این معنا که میزان انرژی دریافتی از خورشید تنها در یک روز، می‌تواند نیاز انرژی کل جهان را برای بیش از ۲۰ سال تأمین کند (چو^۶، ۲۰۱۱). انرژی خورشیدی پاک‌ترین و درعین حال فراوان‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌رود و در دسترس‌ترین آن‌ها نیز هست. گلخانه‌ها به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که نور خورشید لازم برای فتوسنتز گیاهان را عبور داده و درعین حال دمای محیط را در سطح مناسب حفظ نمایند. این انرژی خورشیدی می‌تواند از طریق تجهیزات فتوولتائیک (PV) به

¹ Nam et al.

² Timilsina et al.

³ Norberto et al.

Norberto et al.

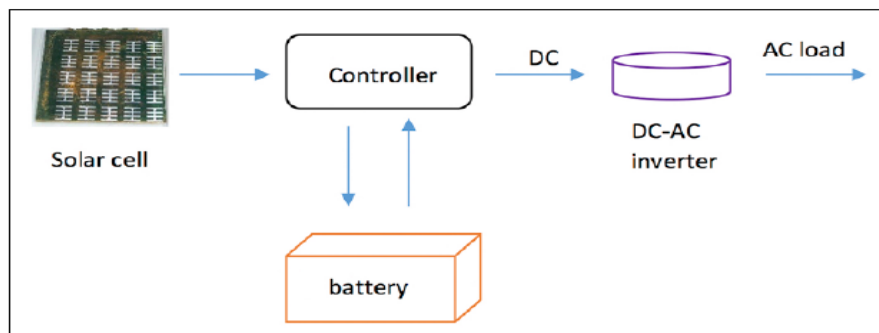
⁴ Rhodes

⁵ Blanchard and Runkle

⁶ Chu

انرژی الکتریکی تبدیل شود. انرژی الکتریکی تولیدشده می تواند در گلخانه برای تأمین توان تجهیزات کنترل اقلیم مورد استفاده قرار گیرد (جنوسی و همکاران^۱، ۲۰۰۸). شکل ۱ تصویر برد سلول خورشیدی سامانه واحد انرژی تجدیدپذیر را نشان می دهد. جدول ۱، ۱۰ کشور برتر که بیش ترین استفاده از انرژی خورشیدی در سال ۲۰۱۵ و در مجموع تا سال ۲۰۱۵ را داشته اند نشان می دهد. همان طور که مشخص است کشورهای چین، آلمان، ژاپن و آمریکا رتبه های یک تا چهار استفاده از انرژی خورشیدی تا سال ۲۰۱۵ را داشته اند.

شکل ۱. تصویر برد سلول خورشیدی سامانه واحد انرژی تجدیدپذیر.



جدول ۱. ۱۰ کشور برتر در استفاده از انرژی خورشیدی

۱۰ کشور برتر در استفاده از انرژی خورشیدی در مجموع تا سال ۲۰۱۵			۱۰ کشور برتر در استفاده از انرژی خورشیدی در سال ۲۰۱۵		
۴۳/۵ GW	چین	۱	۱۵/۲ GW	چین	۱
۳۹/۷ GW	آلمان	۲	۱۱ GW	ژاپن	۲
۳۴/۴ GW	ژاپن	۳	۷/۳ GW	آمریکا	۳
۲۵/۶ GW	آمریکا	۴	۳/۵ GW	انگلستان	۴
۱۸/۹ GW	ایتالیا	۵	۲ GW	هند	۵
۸/۸ GW	انگلستان	۶	۱/۵ GW	آلمان	۶
۶/۶ GW	فرانسه	۷	۱ GW	کره	۷
۵/۴ GW	اسپانیا	۸	۰/۹ GW	استرالیا	۸
۵/۱ GW	استرالیا	۹	۰/۹ GW	فرانسه	۹
۵ GW	هند	۱۰	۰/۹ GW	کانادا	۱۰

مأخذ: آکوستا-سیلوا و همکاران^۲، ۲۰۱۹

^۱ Genovese et al.

^۲ Acosta-Silva et al

پ) انرژی بادی

انرژی بادی به حرکت توده‌های هوا از نواحی با فشار اتمسفری بالا به مناطق مجاور با فشار پایین مرتبط است که سرعت این جریان متناسب با گرادیان فشار (اختلاف فشار) است. در طول روز، توده‌های هوای بالایی اقیانوس‌ها، دریاها و دریاچه‌ها نسبت به توده‌های هوایی مجاور در خشکی‌ها، خنک‌تر باقی می‌مانند. در حال حاضر، توان بادی به عنوان یک فناوری قابل اتکا و اثبات‌شده مطرح است که می‌تواند با هزینه‌ای رقابتی با منابعی مانند زغال‌سنگ و حتی انرژی هسته‌ای، برق تولید کند. این فناوری تقریباً از سال ۲۰۰۵ به صورت گسترده نصب و بهره‌برداری شده است (وایزر و بولینگر^۱، ۲۰۰۶). اگرچه سهم اقتصادی انرژی بادی در بسیاری از مناطق جهان همچنان ناچیز است، اما بشر از دیرباز از این انرژی برای کاربردهای مختلف بهره برده است. آسیاب‌های بادی در کشور هلند نمونه‌ای شناخته‌شده از بهره‌برداری وسیع از انرژی باد به شمار می‌روند. در مطالعه‌ای توسط دی آروجو لیما و بزرا فیلو^۲ (۲۰۱۰) ارزیابی و شبیه‌سازی مزارع بادی در شهر Triunfo ایالت Pernambuco واقع در شمال شرقی برزیل انجام شد. داده‌های باد از ایستگاه هواشناسی پروژه SONDA (سامانه سازمان‌دهی ملی داده‌های زیست‌محیطی) شامل سرعت باد، جهت باد و دما، در ارتفاع ۵۰ متری و طی بازه ۳۰ ماهه جمع‌آوری شد. مدل اقتصادی مورد استفاده، بازگشت سرمایه را در مدت سه سال نشان داد. (اوامی و همکاران^۳، ۲۰۱۰) نیز به بررسی تغییرات ماهانه و فصلی ویژگی‌های باد در منطقه لیگوریا واقع در شمال ایتالیا پرداختند. داده‌های سرعت باد از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ در چهار ایستگاه هواشناسی: Capo Fontana Fresca، Casoni، Vado و Settepani Monte گردآوری شد. نتایج نشان داد که Capo Vado بهترین سایت برای بهره‌برداری از انرژی بادی بوده و میانگین ماهانه سرعت باد در آن بین ۲/۸۰ تا ۹/۹۸ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۱۰ متری) و چگالی توان بادی ماهانه بین ۹۰/۷۱ تا ۱۱۷۷/۹۷ وات بر مترمربع بوده است. بیش‌ترین تولید انرژی در ماه دسامبر با

1 Wiser and Bolinger

2 de Araujo Lima, L., & Bezerra Filho, C. R.

3 Ouammi et al.

مقدار ۳۸۰۰ مگاوات ساعت ثبت شده است. چالش‌های کنونی برای افزایش سهم انرژی بادی شامل: ادغام در شبکه برق، پیش‌بینی‌پذیری منابع باد، نگرش عمومی و واکنش به تأثیرات بصری توربین‌های بادی است. انرژی بادی فراساحلی معمولاً هزینه بیشتری داشته و یکی از چالش‌های اصلی در توسعه آن، کاهش هزینه‌هاست. همچنین، ماهیت متغیر باد موجب می‌شود که تولید برق از این منبع نتواند به‌طور کامل جایگزین دیگر منابع تولید برق شود (یوکسل^۱، ۲۰۱۳). در سطح جهانی، از سال ۲۰۰۹، سهم انرژی بادی در بازار برق روندی افزایشی داشته است. با این حال، در سال گذشته میلادی، کاهش ۵/۸ درصدی این انرژی که عمدتاً ناشی از افت بازارهای آمریکای شمالی و اروپا بود. با وجود این کاهش، تقاضا برای نصب سامانه‌های انرژی بادی همچنان رو به رشد است و تا پایان سال ۲۰۱۰، مجموع ظرفیت نصب‌شده انرژی بادی در جهان به ۱۹۴/۵ گیگاوات رسید. بزرگ‌ترین سهم تولید در این حوزه متعلق به اروپا با ۴۴/۳ درصد از کل بازار جهانی است. در این میان، آلمان (با ۲۷۲۱۴ مگاوات) و اسپانیا (با ۲۰۶۷۶ مگاوات) بزرگ‌ترین تولیدکنندگان محسوب می‌شوند.

ج) انرژی‌های تجدیدپذیر در کشاورزی

کشاورزی صنعتی است که می‌تواند از مزایای مالی و زیست‌محیطی قابل توجهی که با به‌کارگیری فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر حاصل می‌شود، بهره‌مند گردد (ون-کمپن و همکاران^۲، ۲۰۰۰). با این حال، موانع قابل توجهی در مسیر پذیرش فناوری‌های جدید برای بهره‌برداری از منابع انرژی غیرمرسوم وجود دارد (فوشر و باستین^۳، ۲۰۱۷). استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان فناوری در کشاورزی، موضوع جدیدی نیست. داوسکین^۴ (۱۹۸۸) کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و انرژی زمین‌گرمایی در کشاورزی را مطالعه کرد. نتایج او نشان‌داد که به‌دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا و

^۱ Yuksel

^۲ Van-Campen et al.

^۳ Faucher and Bastien

^۴ Dvoskin

ریسک مالی زیاد، این موضوع یکی از موانع اصلی در توسعه و کاربرد گسترده این منابع انرژی، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا و ریسک مالی زیاد است. امروزه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر از مواد مختلفی استفاده می‌کنند که موجب افزایش بازده و کاهش هزینه‌ها شده است. همچنین، مطالعات متعددی در مورد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشاورزی گلخانه‌ای انجام شده است. به عنوان نمونه، می و همکاران^۱ (۲۰۰۸) سیاست‌هایی را برای طراحی سامانه پمپاژ آب خورشیدی (PV) به عنوان یک فناوری مناسب برای مناطق دورافتاده در کشورهای در حال توسعه بررسی کرده‌اند؛ جایی که هزینه پایین و قابلیت اطمینان انرژی خورشیدی، آن را گزینه‌ای مطلوب برای پمپاژ آب از فواصل دور کرده است. هانادا و همکاران^۲ (۲۰۰۵) نیز امکان استفاده از انرژی باد در مناطق کشاورزی ژاپن را بررسی کردند. این پژوهش که با حمایت وزارت آموزش عالی ژاپن انجام شد، بر کاربرد باد با سرعت کم (در مناطق اطراف توکیو) تمرکز داشت و به کاربردهای خاص انرژی باد در تکثیر ماهی‌ها و پمپاژ آب نیز اشاره شده است. سانز و همکاران^۳ (۲۰۰۲) به بررسی بهینه‌سازی ادغام انرژی بادی و آبی در یک ایستگاه پمپاژ برای آبیاری پرداختند. اندازه و انرژی ایستگاه پمپاژ به گونه‌ای طراحی شد که با نیاز آبی محصولات زراعی سنتی و محصولی مانند خارمریم تطابق داشته باشد. یانو و همکاران^۴ (۲۰۰۷) کنترل‌کننده‌ای برای باز و بسته شدن دریچه‌های جانبی گلخانه طراحی کردند که با صفحات خورشیدی (PV) تغذیه می‌شد. این سامانه تهویه دما را در محدوده ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کرد. سامانه شامل یک ماژول PV نوع a-Si به مساحت ۰/۷۸ مترمربع با توان ماکزیمم ۳۲ وات و یک باتری ۲۸ آمپر ساعت بود. نتایج نشان داد که سامانه‌های خورشیدی می‌توانند برای کنترل اقلیم گلخانه‌ای به کار روند. ویلدا و همکاران^۵ (۲۰۰۴) نیز سامانه آبیاری خورشیدی برای تاکستان‌ها را شبیه‌سازی کردند؛ این سامانه‌ها تأمین آب برای جوامع روستایی در

¹ Meah et al.

² Hanada et al.

³ Sanz et al.

⁴ Yano et al.

⁵ Vilela et al.

مناطق دورافتاده را تسهیل کرده‌اند. استفاده از آب تأمین شده توسط سامانه‌های PV برای تولید میوه، می‌تواند یک گزینه اقتصادی مؤثر برای توسعه فعالیت‌های محلی باشد. البته امکان‌سنجی اقتصادی چنین طرح‌هایی به ارزش بازاری محصول وابسته است. باد و خورشید همچنین می‌توانند به تأمین آب شیرین در گلخانه‌ها بدون وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کنند (برمودز-کونتراس و همکاران^۱، ۲۰۰۸). در حال حاضر، بیشتر فرایندهای شیرین‌سازی آب متکی به سوخت‌های فسیلی هستند و بنابراین گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهند. آندرید و همکاران^۲ (۲۰۱۱) در ناحیه آمازون برزیل، با تأکید بر حفاظت از محیط زیست، تأمین برق پایدار را بخشی از برنامه توسعه ثروت و اشتغال برای ساکنین منطقه می‌دانند. راه‌حل‌های پیشنهادی باید هم‌زمان با مدیریت منابع تجدیدپذیر و مشارکت جوامع محلی توسعه یابند. مدل‌های مختلفی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای (GHG) ناشی از کشاورزی ارائه شده است (کولشرشتا و همکاران^۳، ۲۰۰۰; نویفلد و شفر^۴، ۲۰۰۸). اسمیت و همکاران^۵ (۲۰۰۷) شرح داده‌اند که برخی کشورها سیاست‌های آب‌وهوایی و غیر آب‌وهوایی را آغاز کرده‌اند که اثر مستقیم یا هم‌افزایانه‌ای بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش کشاورزی دارند. منابع انرژی تجدیدپذیر، پتانسیل عظیمی برای صنعت کشاورزی دارند. کشاورزان باید از طریق یارانه‌ها به استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر ترغیب شوند. مفهوم کشاورزی پایدار بر پایه ایجاد تعادل میان افزایش بهره‌وری محصول، پایداری اقتصادی، مصرف بهینه منابع طبیعی و کاهش تخریب زیست‌محیطی استوار است. لازم است استفاده از سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر مانند پمپ‌های آب خورشیدی، سامانه‌های برق خورشیدی، گلخانه‌های انرژی‌بر و آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی در کشاورزی ترویج یابد. در زمین‌های کشاورزی دورافتاده، پمپ‌های آب زیرسطحی خورشیدی (PV) نسبت به موتورهای دیزلی، گزینه‌ای

¹Bermudez-Contreras et al.

²Andrade et al.

³Kulshreshtha et al.

⁴Neufeldt and Schäfer

⁵Smith et al.

مقرون به صرفه تر و دوستدار محیط زیست محسوب می‌شوند. همچنین، استفاده از انرژی تجدیدپذیر در گلخانه‌ها در حفظ شرایط دمایی مطلوب برای رشد گیاهان و سبزیجات بسیار حائز اهمیت است (چل و کوشیک^۱، ۲۰۱۱).

چ) امکان‌سنجی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشاورزی حفاظت‌شده سامانه‌های کشاورزی در بیشتر مناطق جهان در معرض طیف گسترده‌ای از ریسک‌ها و عدم قطعیت‌ها قرار دارند. ریسک‌های اقلیمی از گذشته تاکنون عامل بروز خشک‌سالی‌ها، سیلاب‌ها، مهاجرت، قحطی و فقر بوده‌اند. با توجه به اینکه پیش‌بینی می‌شود این ریسک‌ها در آینده افزایش یابند (داونینگ^۲، ۱۹۹۳)، ادغام سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر در کشاورزی حفاظت‌شده^۳ می‌تواند یک فرصت مهم و راهبردی باشد. با این حال، امکان‌پذیری چنین ادغامی به عوامل متعددی بستگی دارد، از جمله:

- هزینه انرژی،
 - هزینه نصب و دسترسی به شبکه برق مناسب،
 - مشوق‌ها و یارانه‌های دولتی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر.
- اما باید توجه داشت که ماهیت ناپایدار و متناوب برخی از منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند باد و خورشید) می‌تواند بر قابلیت اطمینان، عملکرد عملیاتی و قیمت‌های بازار تأثیر بگذارد و در نتیجه، تمام بازیگران بازار انرژی را تحت تأثیر قرار دهد. تحقق اهداف توسعه انرژی تجدیدپذیر نیازمند هماهنگی میان چندین بازیگر بازار است (زارنیکاو^۴، ۲۰۱۱). لئو و همکاران^۵ (۲۰۱۱) در پژوهشی نشان دادند کشورهایی که سیاست‌های بیشتری در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر اتخاذ می‌کنند، تمایل دارند محصولات بیشتری در این حوزه تولید نمایند. در میان ابزارهای سیاست‌گذاری، یارانه‌ها و مشوق‌های تولید، نقش تعیین‌کننده‌ای در رواج یافتن محصولات انرژی تجدیدپذیر ایفا می‌کنند. در حال حاضر، هدف اصلی

¹Chel and Kaushik

² Downing

³ Protected Agriculture

⁴ Zarnikau

⁵ Liao et al.

بسیاری از دولت‌ها در حوزه سیاست انرژی تجدیدپذیر، حذف موانع توسعه این منابع و ترویج استفاده از آن‌ها است. با این حال، بازار انرژی باید گسترش یابد تا محصولات انرژی تجدیدپذیر در دسترس همگان قرار گیرند و بتوانند با سوخت‌های فسیلی رقابت کنند. پرتی و همکاران^۱ (۲۰۱۳) سه راهکار اساسی برای اقدام مثبت کشاورزان در راستای کاهش اثرات زیست‌محیطی معرفی کردند:

۱. افزایش مخازن کربن در ماده آلی خاک و زیست‌توده‌های سطحی (بالای زمین)،
 ۲. جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند CO₂) از طریق کاهش مصرف مستقیم و غیرمستقیم انرژی در مزرعه،
 ۳. افزایش تولید انرژی تجدیدپذیر از زیست‌توده که یا جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌شود یا به جای سوزاندن ناکارآمد چوب یا بقایای کشاورزی، استفاده می‌شود و در نتیجه انتشار کربن را کاهش می‌دهد.
- رودز^۲ (۲۰۱۷) نیز وضعیت فعلی کشاورزی را با تأکید بر موضوعات مهمی همچون فرسایش خاک و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی تحلیل کرده است؛ به‌ویژه با توجه به چالش تأمین امنیت غذایی برای جمعیت جهانی رو به رشد. او خاک را به‌درستی به‌عنوان پوست زنده و شکننده زمین توصیف می‌کند، اما متأسفانه زندگی و شکنندگی خاک اغلب در روند گسترش کشاورزی در سطح جهان نادیده گرفته شده است.

ح) چالش‌های پیش‌رو در استفاده از انرژی تجدیدپذیر

علیرغم مزایای زیاد انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از آن‌ها مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه با چالش‌های زیادی همراه است. برخی محققین مسائل و موانع استفاده از این نوع انرژی را مورد بررسی قرار داده‌اند. استریمیکین و همکاران^۳ (۲۰۲۱) نشان دادند در مناطق روستایی، بعد نهادی، شرایط سیاسی، قانونی، اقتصادی و اجتماعی - فرهنگی برای موفقیت طرح‌های انرژی‌های تجدیدپذیر جامعه بسیار مهم است. افزایش آگاهی در مورد

¹ Pretty et al.

² Rhodes

³ Streimikiene et al.

مضرات استفاده از انرژی فسیلی در میان روستاییان، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر پذیرش انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. همچنین متغیرهای آسیب‌پذیری، پاداش درونی، خودکارآمدی، کارآمدی پاسخ و هزینه پاسخ درک شده، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر پذیرش و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارد (بدسر و کرمی^۱، ۲۰۲۱). قوچانی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) سناریوهای ممکن را برای وضعیت آینده انرژی تجدیدپذیر در ایران ارائه دادند. سناریوها شامل برنامه بلندمدت برای استفاده از فناوری، سیاست پایدار و جذب سرمایه‌های خارجی است. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده است برنامه‌ها و پیاده‌سازی سیاست‌ها در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر به میزان تطابق آن‌ها با اهداف ملی، توانایی‌های فنی و اقتصاد کشور بستگی دارد. رحمان و همکاران^۳ (۲۰۲۲) در تحقیقی به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش کشاورزی را در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده برخلاف کشورهای توسعه‌یافته، به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش کشاورزی در کشورهای در حال توسعه با چالش‌های فنی و اقتصادی زیادی روبروست. در کشور اکوادور نبود یک سیاست در زمینه انرژی، قوانین کمبود تأمین مالی، یارانه سوخت‌های فسیلی و ریسک بالای سرمایه‌گذاری از مهم‌ترین عوامل کلی بر سر راه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر است (برآگان-اسکاندون و همکاران^۴، ۲۰۲۲). کبیر و اکیسی^۵ (۲۰۲۴) به نقش کشاورزان در تأمین انرژی پایدار پرداختند و بیان کردند که با توجه به نیاز روزافزون انرژی در بخش کشاورزی، کشاورزان به سیاست‌هایی نیاز دارند که از تاب‌آوری کشاورزی حمایت کند. اسکورداتو و گولبراندسن^۶ (۲۰۲۴) نیز اشاره کردند تاب‌آوری با استفاده از انرژی پایدار، حوزه‌ای نوظهور و همچنان جوان و در حال تکامل است. هان و همکاران^۷ (۲۰۲۵) در یک مطالعه موردی در سوئد، طی مصاحبه با کشاورزان

¹ Badsar and Karami

² Ghouhani et al.

³ Rahman et al.

⁴ Barragan-Escandom et al.

⁵ Kabir, M., & Ekici, S.

⁶ Scordato, L., & Gulbrandsen, M.

⁷ Hahn et al.

دریافتند تأمین مالی و جنبه‌های اقتصادی سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر امری حیاتی است. درعین حال، حمایت‌های نهادی برای کشاورزان دشوار و پیچیده تلقی می‌شود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در حال حاضر فناوری‌های متعددی برای تولید انرژی تجدیدپذیر وجود دارد، از جمله باد، خورشید، انرژی آبی و زیست توده (بیومس)؛ بااین حال، انرژی خورشیدی و بادی به‌طور ویژه‌ای در فرایندهای تحلیل، طراحی و ساخت محصولات نوآورانه، در حال کسب اهمیت روزافزون هستند. روندهای آینده در انرژی‌های تجدیدپذیر به شرح ذیل است:

الف) پیشرفت‌های سلول‌های خورشیدی چند-پیوندی

به کارگیری سلول‌های فتوولتائیک چند پیوندی امکان دستیابی به بهره‌دهی تبدیل بالاتر را فراهم کرده است، زیرا این نوع سلول‌ها از کاهش تلفات ترمودینامیکی ناشی از جذب فوتون‌هایی با انرژی بیش از گاف انرژی لایه فعال بهره‌مند می‌شوند. به‌طور نظری، سلول‌های سه پیوندی می‌توانند به بهره‌دهی حدود ۵۰ درصد دست یابند و تاکنون سلول‌هایی با استفاده از مواد گروه III-V ساخته شده‌اند که بهره‌دهی بیش از ۴۰ درصد را به ثبت رسانده‌اند. بااینکه این بهره‌دهی بالا می‌تواند به کاهش هزینه نهایی تولید انرژی خورشیدی منجر شود، اما هزینه بالای ساخت این فناوری که عمدتاً به دلیل نیاز به تکنیک‌های خلأ بالا برای رشد بلورهای نیمه‌رسانای بسیار خالص است می‌تواند مانعی برای توسعه بازار آن باشد.

ب) فناوری لایه‌نازک، راهکاری برای کاهش هزینه

افزودن فناوری لایه‌نازک به فرایند تولید سلول‌های چند-پیوندی، به‌طور قابل توجهی هزینه تولید را کاهش می‌دهد. بااین حال، از منظر زیست‌محیطی، استفاده از عناصر سمی در ساختار این سلول‌ها یک محدودیت مهم محسوب می‌شود. در این راستا، تلاش‌هایی برای توسعه مواد PV مناسب برای استفاده در لایه جاذب با سطح وسیع و مبتنی بر فناوری

لایه‌نازک صورت گرفته است. هدف، تولید مواد نسل دوم و سوم سلول‌های خورشیدی با استفاده از تکنیک‌های ارزان‌قیمت مانند اسپری پیرولیز است.

ج) توسعه سلول‌های ارزان ولی با بهره‌دهی بالا

هدف دیگر، آزمون عملی مفهوم چند پیوندی با تمرکز بر تولید سلول‌های فتوولتائیک چند-پیوندی کم‌هزینه و با بهره‌دهی بالا است. کاربرد فناوری‌های نوین رسوب‌دهی لایه‌نازک در این زمینه می‌تواند سلول‌هایی با هزینه مشابه یا کمتر از نمونه‌های تک پیوندی، اما با بهره‌دهی بسیار بالاتر تولید کند. یکی از چالش‌های مهم، هزینه بالا و کمیابی بسیاری از عناصر مورد استفاده در تولید مواد نیمه‌رسانا با گاف انرژی بهینه برای جذب مؤثر تابش خورشیدی است؛ از این رو، ضروری است که ترکیبات جدیدی از مواد ارزان، در دسترس و قابل استفاده در پنل‌های خورشیدی با سطح بزرگ توسعه یابند.

سپاسگزاری

از حمایت معنوی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی سپاسگزاری می‌شود.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

ORCID

Mehdi Karami Moghadam



<http://orcid.org/0000-0002-3890-7148>

References

- Acosta-Silva, Y. D. J., Torres-Pacheco, I., Matsumoto, Y., Toledano-Ayala, M., Soto-Zarazúa, G. M., Zelaya-Ángel, O., & Méndez-López, A. (2019). Applications of solar and wind renewable energy in agriculture: A review. *Science Progress*, 102(2), 127-140.
- Andrade, C. S., Rosa, L. P., & Da Silva, N. F. (2011). Generation of electric energy in isolated rural communities in the Amazon Region a proposal for the autonomy and sustainability of the local populations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 493-503.
- Badsar, M., & Karami, R. (2021). Understanding farmers' response to renewable energy: an application of Protection Motivation Theory. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(5), 987-1000.
- Barragán-Escandón, A., Jara-Nieves, D., Romero-Fajardo, I., Zalamea-Leon, E. F., & Serrano-Guerrero, X. (2022). Barriers to renewable energy expansion: Ecuador as a case study. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100903.
- Benli, H. (2011). Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating. *Energy conversion and management*, 52(1), 581-589.
- Bentouba, S., & Bourouis, M. (2016). Feasibility study of a wind–photovoltaic hybrid power generation system for a remote area in the extreme south of Algeria. *Applied Thermal Engineering*, 99, 713-719.
- Bermudez-Contreras, A., Thomson, M., & Infield, D. G. (2008). Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination*, 220(1-3), 431-440.
- Beyhan, B., Paksoy, H., & Daşgan, Y. (2013). Root zone temperature control with thermal energy storage in phase change materials for soilless greenhouse applications. *Energy Conversion and Management*, 74, 446-453.
- Blanchard, M., & Runkle, E. (2017). Michigan State Univ. (2017), <http://www.flor.hrt.msu.edu/energy/>
- Bot, G., Van De Braak, N., Challa, H., Hemming, S., Rieswijk, T. H., Van Straten, G., & Verlodt, I. (2005). The solar greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply. *Acta Horticulturae*, 691(2), 501.

- Chai, L., Ma, C., & Ni, J. Q. (2012). Performance evaluation of ground source heat pump system for greenhouse heating in northern China. *Biosystems Engineering*, 111(1), 107-117.
- Chel, A., & Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. *Agronomy for sustainable development*, 31(1), 91-118.
- Chikaire, J., Nnadi, F. N., Nwakwasi, R. N., Anyoha, N. O., Aja, O. O., Onoh, P. A., & Nwachukwu, C. A. (2010). Solar energy applications for agriculture. *Journal of Agricultural and Veterinary Sciences*, 2, 58-62.
- Chu, J., Guo, W., & Yan, S. W. (2011). Geosynthetic tubes and geosynthetic mats: Analyses and applications. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42(1), 56-65.
- Cocks, F. (2009). Geothermal Energy: Energy From the Earth Itself, Energy Demand and Climate Change. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim, Germany*, pp. 105–112.
- Couture, T., & Gagnon, Y. (2010). An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment. *Energy policy*, 38(2), 955-965.
- de Araujo Lima, L., & Bezerra Filho, C. R. (2010). Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo-Pernambuco, Brazil. *Renewable Energy*, 35(12), 2705-2713.
- Downing, T. E. (1993). The effects of climate change on agriculture and food security. *Renewable Energy*, 3(4-5), 491-497.
- Dvoskin, D. (1988). Economic realities of utilizing renewable energy in agriculture. *Energy in agriculture*, 6(4), 283-293.
- Faucher, C., & Bastien, J. (2007). Applications of solar and wind renewable energy in agriculture. *IEEE EIC Clim Chang Technol Conf EICCCC 2007*; 1–6.
- Genovese, A., Alonzo, G., Catanese, V., Incrocci, L., Bibbiani, C., Campiotti, C., & Dondi, F. (2008, October). Photovoltaic as sustainable energy for greenhouse and closed plant production system. In *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions* 797 (pp. 373-378).
- Ghouchani, M., Taji, M., Cheheltani, A. S., & Chehr, M. S. (2021). Developing a perspective on the use of renewable energy in Iran. *Technological Forecasting and Social Change*, 172, 121049.
- Hahn, C., Lindkvist, E., Magnusson, D., & Johansson, M. (2025). The role of agriculture in a sustainable energy system–The farmers’

- perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213, 115437.
- Hanada, K., Litifu, Z., & Nagasaka, K. (2005). Applications of solar and wind renewable energy in agriculture. *IEEE PES Gen Meet 2005*; 2005: 209–216.
- Hassanien, R. H. E., Li, M., & Lin, W. D. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989-1001.
- Kabir, M., & Ekici, S. (2024). Energy-agriculture nexus: Exploring the future of artificial intelligence applications. *Energy Nexus*, 13, 100263.
- Kulshreshtha, S. N., Junkins, B., & Desjardins, R. (2000). Prioritizing greenhouse gas emission mitigation measures for agriculture. *Agricultural Systems*, 66(3), 145-166.
- Liao, C. H., Ou, H. H., Lo, S. L., Chiueh, P. T., & Yu, Y. H. (2011). A challenging approach for renewable energy market development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 787-793.
- Lindsey, R. (2009). Climate and earth's energy budget. In: NASA Earth Observatory, p. 680.
- Mahmoudi, H., Abdul-Wahab, S. A., Goosen, M. F. A., Sablani, S. S., Perret, J., Ouagued, A., & Spahis, N. (2008). Weather data and analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries. *Desalination*, 222(1-3), 119-127.
- Meah, K., Ula, S., & Barrett, S. (2008). Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1162-1175.
- Nam, Y. J., Gao, X. Y., Yoon, S. H., & Lee, K. H. (2015). Study on the performance of a ground source heat pump system assisted by solar thermal storage. *Energies*, 8(12), 13378-13394.
- Neufeldt, H., & Schäfer, M. (2008). Mitigation strategies for greenhouse gas emissions from agriculture using a regional economic-ecosystem model. *Agriculture, ecosystems & environment*, 123(4), 305-316.
- Norberto, C., Gonzalez-Brambila, C. N., & Matsumoto, Y. (2016). Systematic analysis of factors affecting solar PV deployment. *Journal of Energy Storage*, 6, 163-172.
- Ouammi, A., Dagdougui, H., Sacile, R., & Mimet, A. (2010). Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored

- locations in Liguria region (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1959-1968.
- Pretty, J. N., Ball, A. S., Xiaoyun, L., & Ravindranath, N. H. (2013). The role of sustainable agriculture and renewable-resource management in reducing greenhouse-gas emissions and increasing sinks in China and India. In *Capturing Carbon and Conserving Biodiversity* (pp. 195-217). Routledge.
- Rahman, M. M., Khan, I., Field, D. L., Techato, K., & Alameh, K. (2022). Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications. *Renewable Energy*, 188, 731-749.
- Rhodes, C. J. (2010). Solar energy: principles and possibilities. *Science progress*, 93(1), 37-112.
- Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Science progress*, 100(1), 80-129.
- Sanz, M., Sanz, JF., & Botero, D. (2002). Applications of solar and wind renewable energy in agriculture: A review. IECON Proc (Industrial Electron) Conf 2002; 4: 3332–3337.
- Scordato, L., & Gulbrandsen, M. (2024). Resilience perspectives in sustainability transitions research: A systematic literature review. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 52, 100887.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... & Towprayoon, S. (2007). Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, ecosystems & environment*, 118(1-4), 6-28.
- Streimikiene, D., Baležentis, T., Volkov, A., Morkūnas, M., Žičkienė, A., & Streimikis, J. (2021). Barriers and drivers of renewable energy penetration in rural areas. *Energies*, 14(20), 6452.
- Timilsina, G. R., Kurdgelashvili, L., & Narbel, P. A. (2012). Solar energy: Markets, economics and policies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(1), 449-465.
- Tong, Y., Kozai, T., & Ohyama, K. (2013). Performance of household heat pumps for nighttime cooling of a tomato greenhouse during the summer. *Applied engineering in agriculture*, 29(3), 415-422.
- Van Campen, B., Guidi, D., & Best, G. (2000). *Solar photovoltaics for sustainable agriculture and rural development*; FAO.
- Vilela, O. C., Bione, J., & Fraidenraich, N. (2004). Simulation of grape culture irrigation with photovoltaic V-trough pumping systems. *Renewable energy*, 29(10), 1697-1705.

- Wiser, R., & Bolinger, M. (2006). Balancing cost and risk: The treatment of renewable energy in western utility resource plans. *The Electricity Journal*, 19(1), 48-59.
- Yano, A., Tsuchiya, K., Nishi, K., Moriyama, T., & Ide, O. (2007). Development of a greenhouse side-ventilation controller driven by photovoltaic energy. *Biosystems Engineering*, 96(4), 633-641.
- Yuksel, I. (2013). Renewable energy status of electricity generation and future prospect hydropower in Turkey. *Renewable Energy*, 50, 1037-1043.
- Zarnikau, J. (2011). Successful renewable energy development in a competitive electricity market: A Texas case study. *Energy Policy*, 39(7), 3906-3913.

