



The University of Tehran Press

Introducing agrivoltaic systems and examining their conditions

Pedram Negarandeh^{1*} | Mohsen Salimi² | Majid Amidpour³

1. Corresponding Author, Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: ped.negarandeh@gmail.com

2. Renewable Energy Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. Email: msalimi@nri.ac.ir

3. Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: amidpour@kntu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 22 September 2025

Published Online: 15 January 2025

Keywords:

Agrivoltaic system,
Energy,
Agriculture,
Solar panel.

ABSTRACT

Energy supply has been one of the most basic needs of mankind throughout history. The way of obtaining energy is closely related to the civilization and technological progress of society. Currently, considering factors such as population growth and limited land for agriculture, along with energy security and cost considerations, a solution has been proposed as agrivoltaic systems; this system is a strategy for the co-location of renewable energies, agricultural products and livestock. For a product to enter global markets, superiority in technological development and efficiency are decisive factors; therefore, in agrivoltaic systems, in addition to focusing on energy management, special attention is also paid to crop management (crop and water). A systematic irrigation system is also needed to prevent damage to the solar panel structure. In summary, agrivoltaic systems aim to increase the efficiency of solar and crop farms by reducing the effects of global warming and meeting food-energy-water security. Pricing, efficiency, and domestic production of solar panels are among the key challenges and future research directions that require further investigation. This study discusses the general aspects of agrivoltaic systems.

Cite this article: Negarandeh, P.; Salimi, M. & Amidpour, M. (2026). Introducing agrivoltaic systems and examining their conditions. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 121-141. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394287.1140>



© Pedram Negarandeh, Mohsen Salimi, Majid Amidpour
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394287.1140>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

The study refers to renewable energy growth worldwide in addressing energy demands and replacing fossil fuels. Agrivoltaic systems (AVS), which integrate photovoltaic solar panels with crop cultivation, are emphasized as a promising solution. These systems provide decentralized energy access in rural agricultural areas while enhancing economic benefits for farming activities. Despite their advantages, agrivoltaic systems require thorough investigation of their feasibility and impact on crop production. They are particularly beneficial in densely populated and developing nations, where renewable energy development is crucial but preserving profitable farmland remains a priority. The section underscores the importance of careful planning and advancements in AVS technology to reduce reliance on nonrenewable resources, mitigate global warming, and ensure food-energy-water security initiatives are met.

Research Method

The optimal design for agrivoltaic systems (AVS) is important considering their dual purpose of protecting crops and generating solar power. This study emphasizes the importance of solar radiation, both for photosynthesis in crops and electricity production using photovoltaic panels. Strategies like

integrating advanced solar tracking systems and semi-transparent or bifacial PV modules to maximize efficiency for both energy and crop yields are important.

The role of systematic irrigation systems to prevent damage to PV structures and ensure sustainable water use is important. The importance of balancing sunlight exposure between crops and panels to optimize both agricultural and energy outputs is underscored. There are various AVS approaches (e.g., energy-focused, agriculture-focused, and integrated models) tailored to different land use scenarios, aiming to diversify farmers' income, promote rural sustainability, and mitigate the impact of climate change.

Results

Our analysis showcases how agrivoltaic systems (AVS) improve land-use efficiency by combining photovoltaic solar panels with agricultural production. This integration enhances energy generation while simultaneously benefiting agricultural activities. The study emphasizes the importance of AVS in supporting energy transition goals and promoting rural sustainability, particularly in regions like the European Union where policy alignment aids their implementation.

It identifies technical challenges that need addressing, such as optimizing electricity production without compromising biodiversity or crop yields. Estimates reveal that utilizing just 1% of EU farmland for AVS could achieve substantial photovoltaic capacity, accelerating carbon neutrality goals. The need for strategic planning, research, and financial support to ensure successful deployment and overcome barriers like land-use conflicts, regulatory hurdles, and acceptance among farmers is important.

Discussion and Conclusion

There are multiple benefits of agrivoltaic systems (AVS), including improved land-use efficiency, enhanced crop protection, reduced wind and temperature fluctuations, and optimized water use. These systems provide a sustainable, dual-use solution for agriculture and energy production, addressing climate change and supporting farmers' livelihoods. Innovative technologies like concentrated photovoltaic systems (CPVs) are explored, which show potential for high-efficiency energy and crop production through advanced light management strategies. However, challenges such as technical barriers, regulatory uncertainties, and farmer acceptance require further research, strategic planning, and policy support.

This study underscores the increasing global demand for food and energy, driven by population growth, urbanization, and climate change challenges. Agrivoltaic systems (AVS) are presented as a vital solution to address these issues by effectively combining renewable energy production with agriculture. These systems can reduce dependence on fossil fuels, enhance food security, and support the sustainable development of energy-water-food systems.

The study emphasizes that AVS is a win-win strategy for meeting these interconnected needs, providing economic, environmental, and social benefits. However, successful implementation requires overcoming obstacles such as regulatory barriers, technological limitations, and farmer acceptance. To achieve large-scale deployment, further research, innovation, and investments are essential, along with supportive policies and incentives. It advocates for embracing AVS as a sustainable pathway to balance energy and food production while preserving natural resources and promoting resilience against climate change impacts.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

معرفی سیستم‌های انرژی و لتائیک و بررسی شرایط آن

پدرام نگارنده^{۱*} | محسن سلیمی^۲ | مجید عمیدپور^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: ped.negarandeh@gmail.com
۲. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران. رایانامه: msalimi@nri.ac.ir
۳. گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: amidpour@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

سیستم انرژی و لتائیک،

انرژی،

کشاورزی،

پنل خورشیدی.

تأمین انرژی طی تاریخ یکی از نیازهای اساسی بشر بوده است. نحوه حصول انرژی به نوعی با تمدن و پیشرفت تکنولوژیکی جامعه رابطه تنگاتنگی دارد. در حال حاضر، با توجه به عواملی همچون افزایش جمعیت و محدودیت اراضی برای کشاورزی در کنار امنیت انرژی و ملاحظات هزینه، راهکاری به عنوان سیستم‌های انرژی و لتائیک ارائه شده است؛ این سیستم یک استراتژی برای هم‌مکانی انرژی‌های تجدیدپذیر، محصولات کشاورزی و دامداری است. برای ورود یک محصول به بازارهای جهانی، برتری در توسعه تکنولوژی و میزان بازدهی عوامل تعیین‌کننده‌ای هستند؛ به این علت در سیستم‌های انرژی و لتائیک علاوه بر تمرکز به مدیریت انرژی، بر مدیریت زراعی (محصول و آب) نیز توجه ویژه‌ای می‌شود. همچنین، به سیستم آبیاری سیستماتیک برای جلوگیری از آسیب به ساختار پنل خورشیدی مورد نیاز است. به طور خلاصه، در سیستم‌های انرژی و لتائیک افزایش بازده در ترکیب مزارع خورشیدی و گیاهی با کاهش اثرات گرمایش جهانی و برآورده کردن امنیت غذا - انرژی - آب مد نظر است. مسائل مربوط به قیمت‌گذاری، راندمان، و تولید داخلی پنل‌های خورشیدی از جمله چالش‌ها و مسیرهای تحقیقاتی آینده هستند که نیاز به بررسی بیشتر دارند. در این پژوهش در خصوص کلیات انرژی و لتائیک بحث می‌شود.

استناد: نگارنده، پدرام؛ سلیمی، محسن و عمیدپور، مجید (۱۴۰۴). معرفی سیستم‌های انرژی و لتائیک و بررسی شرایط آن. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۱) ۱۲۱-۱۴۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394287.1140>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© پدرام نگارنده، محسن سلیمی، مجید عمیدپور

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394287.1140>



مقدمه

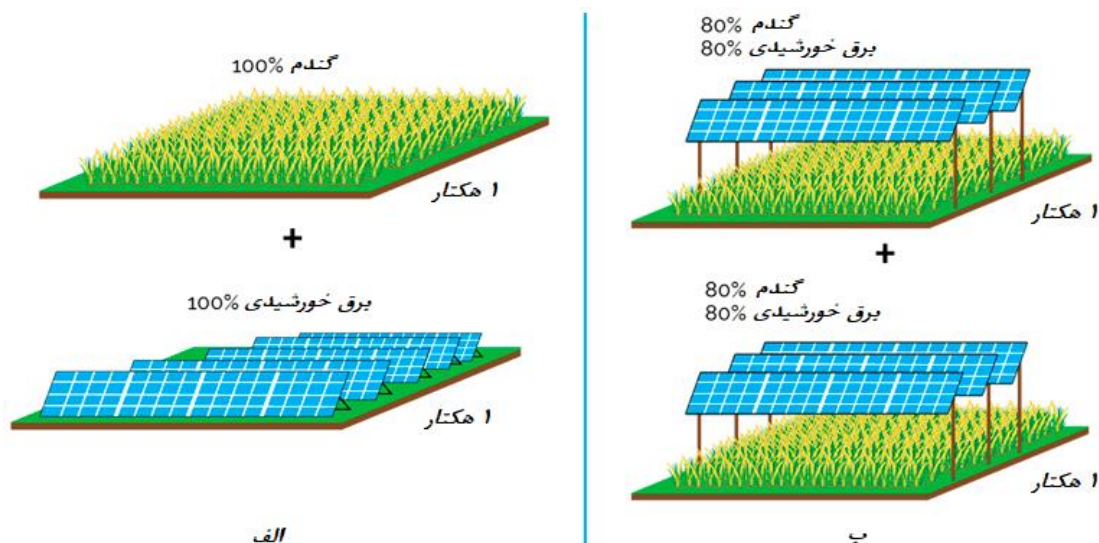
رشد جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر با هدف قرار دادن نیازهای جهانی انرژی و جایگزینی سوخت‌های فسیلی اهمیت داده شده است. تحلیل ردپای کربن و آب در انرژی‌های تجدیدپذیر، یکی از موضوعات مهم در مطالعات پایداری است. با توجه به رشد جهانی استفاده از منابع انرژی پاک، بررسی تأثیرات زیست‌محیطی این فناوری‌ها از جمله مصرف آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای، اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱]. همچنین، منابع آب شیرین محدود بوده و در بسیاری از مناطق به دلیل فعالیت‌های انسانی آلوده شده‌اند. یکی از راهکارهای مؤثر در تأمین آب، نمک‌زدایی آب دریا است که با استفاده از روش‌های تقطیر، فیلتراسیون غشایی و سایر فناوری‌های پیشرفته امکان جداسازی نمک‌ها و ناخالصی‌ها را فراهم می‌کند که در ایران احداث واحدهای نمک‌زدایی مبتنی بر نیروگاه خورشیدی متمرکز در استان هرمزگان مد نظر است [۲]. درضمن، با توجه به نگرانی جمعیت رو به رشد و تهدیدهای امنیت غذایی، سیستم‌های اگری‌ولتائیک (AVS) که ترکیبی هم‌افزایی از فتوولتائیک و کشت محصولات است، مورد حمایت قرار می‌گیرد. اگری‌ولتائیک می‌تواند به برق‌رسانی غیرمتمرکز خارج از شبکه مناطق کشاورزی روستایی همراه با ایجاد منافع اقتصادی برای فعالیت‌های کشاورزی منجر شود. با این حال، ترکیب اگری‌ولتائیک در ارتباط با قابلیت عملی بودن آن و همچنین، تأثیر آن بر تولید محصول باید به طور کامل بررسی شود. اگری‌ولتائیک می‌تواند یک جایگزین سودمند برای دستیابی به مواد غذایی با انرژی پایدارتر و در عین حال گامی به منظور حفظ منابع زمین باشد.

این امر به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه و توسعه‌یافته پرجمعیت، که توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، اهمیت دارد. با این حال، زمین‌های کشاورزی سودآور باید حفظ شود. همان‌طور که در پیوند غذا - انرژی - آب (FEW^۲) تأکید شده است. بنابراین، به طور انتقادی عوامل مهمی را که بر تصمیم مدیریت انرژی (معماری PV^۳ خورشیدی) و مدیریت زراعی در سیستم‌های AV تأثیر می‌گذارند، مرور می‌شود. نتایج نشان می‌دهد معماری PV خورشیدی و پیشرفت‌های مدیریت زراعی به (۱) کیفیت تابش خورشیدی از نظر شدت نور و تشعشعات فعال فتوسنتزی (PAR^۴)، (۲) دسته‌های AVS مانند انرژی‌محور، کشاورزی‌محور و کشاورزی - انرژی‌محور و (۳) دیدگاه سهامداران (به‌ویژه کشاورزان) وابسته است. در مرحله بعد، به دلیل محدودیت نور، شرایط میکرو اقلیم زیرساختار خورشیدی و محدودیت‌های ساختار خورشیدی، چندین تنظیم برای انتخاب و مدیریت محصول مورد نیاز است. مهم‌تر از آن، یک سیستم آبیاری سیستماتیک برای جلوگیری از آسیب به ساختار پنل خورشیدی مورد نیاز است. به طور خلاصه، پیشرفت‌های AVS باید به‌دقت برنامه‌ریزی شود تا از اهداف کاهش اتکا به منابع تجدیدناپذیر، کاهش اثرات گرمایش جهانی و برآورده کردن ابتکارات FEW اطمینان حاصل شود.

مفهوم ادغام فتوولتائیک خورشیدی با محصولات کشاورزی، معروف به سیستم اگری‌ولتائیک، ابتدا توسط [۳] در سال ۱۹۸۲ ارائه شد. با این حال، این مفهوم به‌ندرت تا آغاز هزاره جدید مورد بحث قرار گرفت. این رویکرد از روش کشت مخلوط به‌کاررفته در بخش کشاورزی برای افزایش نسبت معادل زمین و درآمد کل به دست آمده است [۴]. فناوری AVS به دلیل قابلیت اطمینان آن در کاربردهای مقیاس متغیر محبوبیت پیدا کرده است. توسعه امکانات تجاری و تحقیقاتی در سراسر جهان پتانسیل این فناوری را نشان می‌دهد [۵]. مفهوم سیستم از تولید انرژی الکتریکی و تولید محصولات کشاورزی در همان منطقه تولید استفاده می‌کند [۶]. به بیان دیگر، تعامل سودمند یا همزیستی بین این دو تولید در یک منطقه از این طریق ایجاد می‌شود [۷]. اگر کمتر از ۱ درصد از زمین‌های زراعی به سیستم اگری‌ولتائیک تبدیل شود، تولید خورشیدی می‌تواند تقاضای انرژی جهانی را جبران کند [۸]. ادغام هر دو تولید در یک منطقه ممکن است بازده تولید انرژی خورشیدی، تولید کشاورزی یا هر دو تولید را کاهش دهد؛ با این حال، کل درآمد افزایش می‌یابد [۹].

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. علاوه بر این، تولید محصول کمتر از ۱ درصد از کل انرژی تولیدشده توسط AVS را مصرف می‌کند [۱۰]. درضمن، ارتفاع مناسب پانل‌ها و حفظ فاصله زیاد بین ردیف‌ها برای جلوگیری از سایه‌های شدید روی محصولات رشدیافته زیر پانل‌های PV از ملزومات اساسی اگری‌ولتائیک است.

1. Agrivoltaic System
2. Feed-Energy-Water
3. Photovoltaics
4. Photosynthetic Active Radiation



شکل ۱. مقایسه کارایی کشاورزی سنتی در مقابل AVS در زمین زراعی ۲ هکتاری: الف) کاربری مجزا؛ ب) کاربری ترکیبی که سبب افزایش بیش از ۶۰ درصدی راندمان می‌شود [۱۱]

۱. انگیزه توسعه سیستم اگری‌ولتائیک

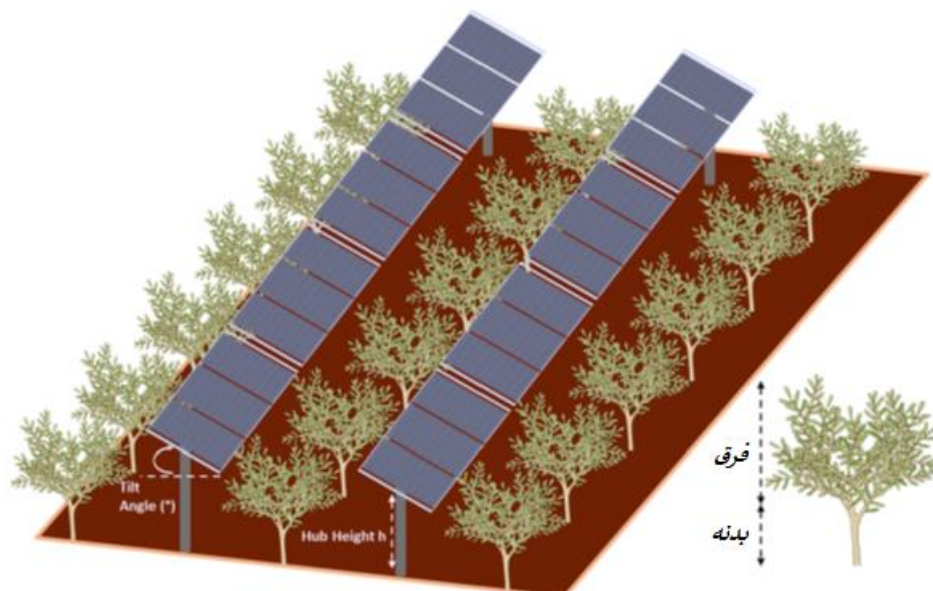
علی‌رغم تحولات عمیق در صنعت انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر همچنان نقش مهمی در همه شرایط ایفا می‌کنند و انرژی خورشیدی در مرکز توجه قرار دارد [۱۲]. توسعه سریع مزارع خورشیدی تهدید جدیدی را در زمینه استفاده از زمین برای تولید برق، به علت برآورده کردن تقاضای فزاینده مواد غذایی، ایجاد می‌کند. مقدار زمین مورد نیاز برای ایجاد مزارع خورشیدی در مقیاس بزرگ به یک منبع نگرانی تبدیل شده است [۱۳].

مطالعات کنونی همچنین نشان می‌دهد عوامل محیطی که ممکن است بر کارایی پانل‌های فتوولتائیک (PV) تأثیر بگذارند، گاهی نادیده گرفته می‌شوند [۱۴]. با این حال، برای AVS، این عوامل بسیار مهم هستند [۱۵]. به عنوان مثال، زیر شنی برای سایت‌های PV خورشیدی ممکن است به یک اثر جزیره گرمایی کمک کند که دمای محیط را در زیر ساختار PV افزایش می‌دهد. این وضعیت به طور بالقوه کارایی و طول عمر پنل خورشیدی را کاهش می‌دهد [۱۶]. به طور هم‌زمان، زمین‌های کشاورزی به دلیل استفاده مجدد از زمین برای تولید صنایع جدید، خانه‌ها و مناطق شهری در حال کوچک شدن هستند [۱۰]. در گزارش خلاصه Agriculture: Towards 2015/2030 World [۱۷] منتشر شده، آمده است که تقاضای جهانی برای یک محصول کشاورزی هر سال افزایش خواهد یافت. کشورهای توسعه‌یافته از وابستگی شدید به واردات محصولات کشاورزی رنج خواهند برد و ناامنی غذایی در کشورهای در حال توسعه بدون افزایش قابل توجه تولید داخلی ادامه خواهد داشت. این درگیری‌ها با این واقعیت تشدید می‌شود که میزان سرانه زمین قابل کشت در دسترس بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۶ به میزان ۴۸ درصد کاهش یافته که به دلیل افزایش جمعیت جهانی است [۱۸]. بنابراین، اعتقاد بر این است که راه‌حل فناوری‌های AVS امکان حل و فصل منافع رقابتی بین نیازمندی‌های دو بخش را در حالی که تقاضا را برآورده می‌کند، امکان‌پذیر می‌سازد [۱۹].

۲. مزایای سیستم اگری‌ولتائیک

انواع جزئیات شگفت‌انگیز در مورد فناوری AVS وجود دارد که از گذشته به دست آمده است. مطالعاتی مانند: (۱) افزایش درآمد کل [۲۱]؛ (۲) محصولات کشت‌شده زیرساختار خورشیدی به کاهش دمای هوای محیط با ایجاد یک خرد اقلیم خنک‌تر کمک می‌کند [۲۲]؛ از این‌رو، به طور غیرمستقیم دمای پنل خورشیدی را ۱-۲ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد و راندمان PV خورشیدی را افزایش می‌دهد [۲۳]؛ (۳) پانل‌های PV خورشیدی باید به طور منظم برای حفظ بازده تابش خورشیدی خود شسته شوند. آب مورد استفاده برای تمیز کردن آن‌ها می‌تواند برای آبیاری کشاورزی زیر پنل خورشیدی دوباره استفاده و در نتیجه، باعث افزایش بهره‌وری آب شود [۲۴]؛ (۴) انتشارات ناشی از CO₂ نیز توسط محصولات جذب می‌شود، در حالی که CO₂ توسط

انرژی خورشیدی در مقایسه با تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی کمتر تولید می‌شود [۴]: (۵) PV خورشیدی یک اثر سایه خوب روی برخی از گیاهانی که نور آفتاب مستقیم را دوست ندارند ایجاد می‌کند [۲۴]: (۶) ایجاد مشاغل جدید [۲۵]: (۷) گسترش انرژی‌های پاک‌تر و تجدیدپذیر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و گرمایش جهانی ضروری است [۲۶]. علاوه بر این، تلاش برای کاهش انتشار CO_2 و ترویج انرژی پایدار همیشه از حمایت بین‌المللی برخوردار است [۲۷]. بنابراین، این ابتکارات AVS بسیار مطابق با پیوند غذا - انرژی - آب (FEW) [۲۸] و اهداف توسعه پایدار (SDGs) است [۲۹].



شکل ۲. شماتیک پرورش درخت زیتون با پانل‌های خورشیدی PV [۲۰]

۳. نسبت معادل زمین

نسبت معادل زمین (LER^2) روشی است که برای اندازه‌گیری کارایی بهره‌برداری از زمین برای تولید هم‌زمان محصولات زراعی و برق استفاده می‌شود [۳۰]. LER را می‌توان به گونه‌ای گسترش داد که شامل اختلاط هر دو (یا بیشتر) سیستم تولید در یک منطقه باشد. مطالعات متعدد قبلی نیز از این روش برای شناسایی امکان ادغام تولید کشاورزی با مزرعه خورشیدی استفاده کرده‌اند. به طور کلی، LER نسبت مساحت نصب AVS به کل مناطق مورد نیاز برای برآورده کردن تولیدات کشاورزی و برق تأسیسات AVS است [۳۱].

مقادیر LER بزرگ‌تر از یک را نشان می‌دهد ترکیب کشاورزی و PV خورشیدی کارآمدتر از انجام جداگانه این دو کار است [۳۲]. درخور یادآوری است، کارایی فناوری AVS به‌شدت به معماری PV خورشیدی و مدیریت زراعی [۶] وابسته است. روش‌های متعددی به طور مداوم برای بهبود اثربخشی این فناوری در حال توسعه است. با این حال، برنامه‌های AVS هنوز در مراحل اولیه خود هستند، بنابراین فضای زیادی برای پیشرفت‌های تکنولوژیکی و زمینه‌ای کاربردی گسترش یافته وجود دارد [۲۹].

روش کار (مواد و روش‌ها)

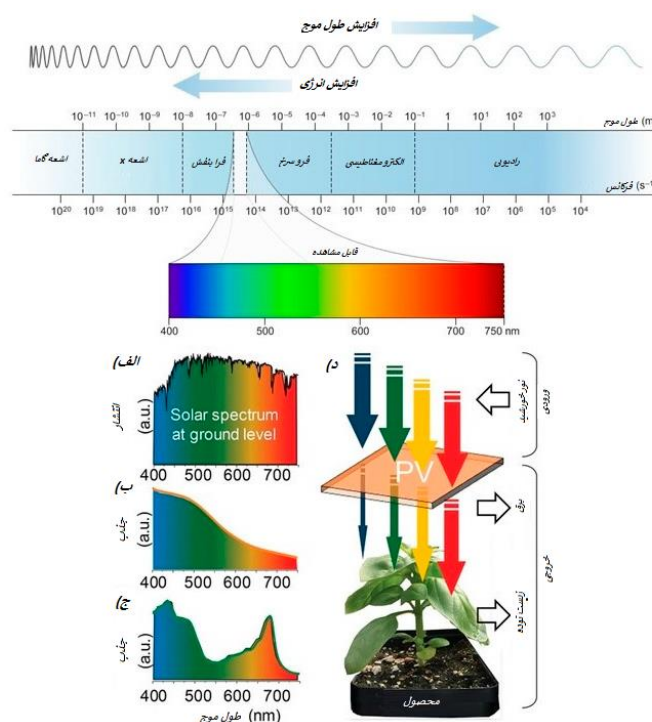
در بررسی طراحی اگری‌ولتائیک با در نظر گرفتن نحوه عملکرد بهینه، به علت نقش دوگانه AVS که از محصولات کشاورزی محافظت می‌کند و در عین حال برق خورشیدی تولید می‌کند [۳۳]، انتظار می‌رود این فناوری توسعه را تسریع کند و به افزایش عملکرد کشاورزان و همچنین پایداری زیست‌محیطی منجر شود [۴]. حال اجرای طرح‌های حمایت مالی برای حفظ زمین‌های زراعی، متنوع کردن منابع درآمد کشاورزان و مقابله با مهاجرت روستایی در برخی کشورها، هدف سیاسی محرک در پس معرفی

مقررات انتشار AVS بود [۳۴] که با اجرای مناسب، تولید اقتصادی در هر متر مربع را افزایش می‌دهد و مقاومت کشاورزان را در برابر اثرات گرمایش زمین با تأمین و متنوع کردن منابع درآمد آن‌ها تقویت می‌کند [۳۵].

۱. اهمیت تابش خورشیدی برای تولید انرژی و کشت محصول

تابش خورشیدی یک عامل مهم در فتوسنتز است، فرایندی که در آن گیاهان انرژی نور خورشید را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند که می‌تواند برای سنتز کربوهیدرات‌ها استفاده شود. در عین حال، تابش خورشیدی نیز می‌تواند با استفاده از سیستم‌های انرژی خورشیدی به برق تبدیل شود. سیستم‌های خورشیدی به دو نوع طبقه‌بندی می‌شوند: سیستم‌های فتوولتائیک (PV) که مستقیم نور خورشید را با استفاده از مواد نیمه‌هادی به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و سیستم‌های متمرکز انرژی خورشیدی (CSP) که برای استفاده از گرما قبل از تولید برق، نور خورشید را به گرما تبدیل می‌کنند. با وجود این واقعیت که هر دو فرایند برای رخ دادن به تابش خورشیدی نیاز دارند، فرایند فتوسنتز بیشتر به محدوده تابش فعال فتوسنتز (PAR) مربوط می‌شود؛ در حالی که تولید انرژی الکتریکی به تابش خورشیدی یا شدت نور وابسته است [۳۶].

فتوسنتز یک فرایند وابسته به نور است که در طیف نور مرئی به بهترین وجه انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نور مرئی دارای محدوده طول موج ۴۰۰-۷۰۰ نانومتر است. اشعه ماوراء بنفش را نمی‌توان برای فتوسنتز استفاده کرد، زیرا انرژی زیادی دارد که می‌تواند پیوند مولکولی را مختل کند. از سوی دیگر در انتهای طیف، نور مادون قرمز دارای انرژی کافی برای برانگیختن الکترون‌های موجود در مولکول‌ها برای فتوسنتز را ندارد. محدوده طول موج‌های نوری که برای فتوسنتز مناسب است، تابش فعال فتوسنتزی (PAR) نامیده می‌شود [۳۷].



شکل ۳. طیف الکترومغناطیسی [۳۹]. (الف) طیف تابش خورشیدی در محدوده مرئی در سطح زمین. (ب) طیف جذب برای پانل PV. (ج) طیف جذب برای یک محصول. (د) نمایش شماتیک ورودی (نور خورشید) و دو خروجی AVS (یعنی برق و زیست‌توده)

در مقابل، شدتی که تشعشع با آن وارد جو می‌شود تابش خورشیدی (R_s) است. مسافتی که تابش باید طی کند به زاویه خورشید بستگی دارد. هر چه زاویه بیشتر باشد، شدت خورشید کمتر است، به همین دلیل است که پارامتر R_s در صبح و عصر

شدت کمتری نسبت به ظهر دارد. علاوه بر این، R_s خالص سالانه، در استوا بیشتر از قطب‌های شمالی و جنوبی است. همچنین، زمانی که یک نیمکره از خورشید کج می‌شود، مقدار R_s کاهش می‌یابد [۳۸].

کیفیت تابش خورشیدی جذب‌شده توسط پانل‌های PV را می‌توان برای گرفتن یک طیف خورشیدی خاص یا کل طیف خورشیدی تنظیم کرد (شکل ۳-الف). در مقابل، طیف جذبی گیاهان توسط رنگدانه‌های فتوسنتزی آن‌ها تعیین می‌شود (شکل ۳-ب). مقدار تابش خورشیدی جذب‌شده و استفاده‌شده برای تولید محصولات، گیاهان و پانل‌های خورشیدی را بیشتر متمایز می‌کند. خروجی الکتریکی پانل‌های خورشیدی معمولاً به طور خطی متناسب با شدت نور فرودی است. اقدام برای متعادل کردن نیازهای تابش خورشیدی بین پانل‌های PV و محصولات کشاورزی ممکن است بتواند کارایی تولید برق و تولید کشاورزی را در سیستم‌های AV بهبود بخشد. بنابراین، در طراحی AVS باید به نحوه به حداکثر رساندن تابش خورشیدی با کیفیت بالا به پانل‌های PV و قرار گرفتن در معرض شار PAR بهینه در محصول زیرساخت‌های پانل توجه شود [۷].

۲. ادغام انرژی خورشیدی و کشاورزی

ادغام انرژی خورشیدی در مقیاس بزرگ و کشاورزی این ظرفیت را دارد که تولید انرژی کارآمد را تضمین کند و تولید کشاورزی را با حداقل اثرات زیست‌محیطی حفظ کند. این اقدام برای هم‌محلی به عنوان توسعه عمده کشاورزی و انرژی در یک مکان مشخص می‌شود. رشد کشاورزی می‌تواند در زیر یا نزدیک زیرساخت‌های انرژی رخ دهد. سه نوع فرصت و رویکرد هم‌محلی وجود دارد: انرژی محور، کشاورزی محور، و کشاورزی-انرژی محوری یکپارچه. رویکردهای انرژی محور برای هم‌مکانی توسعه‌های انرژی خورشیدی و کشاورزی با رفتارهایی مشخص می‌شوند که تولید انرژی خورشیدی را بهینه می‌کنند و در عین حال تغییرات در بهترین شیوه‌های ساخت‌وساز خورشیدی را به حداقل می‌رسانند و رشد کشاورزی را در زیر و اطراف تأسیسات خورشیدی تقویت می‌کنند. روش‌های انرژی محور می‌توانند برای مناطقی که مقادیر زیادی زمین برای تولید انرژی خورشیدی در نظر گرفته شده یا مناطقی که توسعه خورشیدی قبلاً در آن‌ها انجام شده است، مناسب‌تر باشند. برای مثال، زمانی که [۳] برای اولین بار مفهوم آگری‌ولتائیک را در سال ۱۹۸۲ معرفی کرد، طرح پیشنهادی بر تولید انرژی متمرکز بود. حداقل تغییر در ساختار PV انجام شده است تا اجازه دهد نور در شکاف بین ردیف‌های پانل‌های خورشیدی به زمین برسد و امکان کاشت محصولات را در آنجا فراهم کند. در مرحله بعد، TNB^1 یک مزرعه خورشیدی ۵۰ مگاواتی را در سالانگور، مالزی، به عنوان بخشی از طرح خورشیدی در مقیاس بزرگ LSS^2 به رهبری دولت مالزی توسعه داده است. این پروژه برای تولید انرژی تجدیدپذیر [۴۰] ایجاد شد و مفهوم AVS به طور غیرمستقیم در این مزارع خورشیدی با کاشت چمن برای کمک به حفظ پایداری خاک استفاده شد.

رویکردهای کشاورزی محور به مکان مشترک انرژی خورشیدی و کشاورزی به عنوان اقداماتی تعریف می‌شوند که در خدمت بهینه‌سازی فعالیت‌های تولید زیست‌توده و کاهش تغییرات در فعالیت‌های مدیریت فعلی کارخانه هستند، در حالی که هنوز فعالیت‌های تولید انرژی خورشیدی را یکپارچه می‌کنند. در مناطقی با زمین محدود یا مناطقی که قبلاً مناطق کشاورزی ایجاد شده‌اند، روش‌های کشاورزی محور می‌تواند مناسب باشد؛ برای مثال، همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است [۴۱] مطالعه‌ای را برای ارزیابی ادغام آرایش‌های مختلف مازول PV (یعنی الف) الگوی مستقیم و (ب) الگوی شطرنجی با جهت‌گیری‌های مختلف (جهت E-W و جهت N-S) برای تولید گلخانه‌ای در دسیمومانو^۳ (ساردینیا، ایتالیا) انجام داده است. این مطالعه مفروضات اساسی را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که کارایی کشاورزی زمین مورد استفاده به دلیل تولید خورشیدی قربانی نمی‌شود. در حالت ایده‌آل، بهینه‌سازی تولید انرژی خورشیدی به طور قابل توجهی مدیریت استاندارد زراعی را تغییر نمی‌دهد و تأثیر ناچیزی بر عملکرد کشاورزی دارد. در همین حال، [۴۲] به شدت مدل AVS دانشگاه کشاورزی جوناگاد^۴ (JAU) را به جامعه کشاورز در هند توصیه می‌کند. گفته می‌شود که این مدل از نظر انرژی برای عملیات کشاورزی و سایر عملیات خودکفا است.

1. Tenaga Nasional Berhad

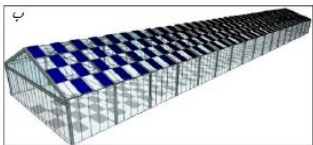
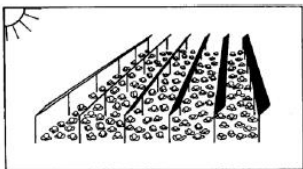
2. Large Scale Solar

3. Decimomannu

4. Junagadh Agricultural University

تولید محصول در این نوع سیستم ۱۵ درصد بیشتر از شرایط مزرعه باز ثبت شده است؛ کشاورز همچنین می‌تواند با تولید درآمد برق، درآمد اضافی داشته باشد.

جدول ۱. رویکردهای سیستم انرژی ولتائیک [۴۱]

کشاورزی-انرژی محوری یکپارچه	کشاورزی محور	انرژی محور
	 	 
		

در مرحله بعد، روش‌های ترکیبی وجود دارد که هدف آن‌ها ترکیب عملکرد انرژی و اهداف تولید کشاورزی، علاوه بر رویکردهای کشاورزی محور و انرژی محور برای هم‌مکانی فناوری‌های انرژی خورشیدی و کشاورزی است. این روش‌ها معروف به کشاورزی انرژی محور، هر چند می‌تواند به کاهش کشاورزی و تولید انرژی منجر شود، با این حال به علت مزایایی، از جمله درآمد اضافی و هم‌مکانی، این روش یکپارچه نیز ترجیح داده می‌شود. این روش‌ها با ادغام اولویت‌های کشاورزی و انرژی در طرح‌های سیستم متمایز می‌شوند. ادغام کشاورزی و انرژی در یک منطقه مشترک تولید می‌تواند مناسب باشد: (۱) در مزرعه یا زمین کشاورزی خورشیدی موجود، و (۲) در زمین توسعه‌نیافته. با این حال، رویکردهای ترکیبی برای ایجاد تغییرات در روش‌های کشاورزی و تولید انرژی خورشیدی می‌تواند از تغییرات ساختاری عمده تا تغییرات جزئی متغیر باشد. چندین آزمایش قبلی با تمرکز بر این روش‌ها انجام شده است. تغییراتی باید در سیستم انرژی خورشیدی، مانند تغییر ساختار پنل خورشیدی، استفاده از یک الگوریتم خاص برای رشد کشاورزی و اما همچنین از نظر استفاده از شیوه‌های زراعی برای به حداکثر رساندن خروجی انجام شود [۶]؛ جدول ۱ چندین مطالعه قبلی را بر اساس رویکردهای مختلف به سیستم انرژی ولتائیک نشان می‌دهد.

بر اساس توصیف رویکردهای AVS، توسعه‌دهندگان، تأمین‌کنندگان انرژی و کشاورزان باید تصمیم بگیرند که کدام رویکرد AVS برای علاقه‌شان مناسب‌تر است. درنهایت، سرمایه‌گذاری در AVS با احتمال زیاد در بلندمدت برای آن‌ها مفید باشد.

یافته‌ها

Agri-PV شامل استفاده هم‌زمان از زمین برای تولید برق خورشیدی فتوولتائیک و تولید کشاورزی است. این یک شکل ابتکاری از استقرار PV است که در سراسر جهان و در حال حاضر در اتحادیه اروپا نیز مورد توجه قرار گرفته است. این روش کارایی استفاده از زمین را افزایش می‌دهد که کمک قابل توجهی به افزایش انرژی بدون اشغال زمین‌های اضافی، اما با ایجاد مزیت برای فعالیت‌های کشاورزی دارد. در وضعیت بهره‌مندی از انرژی ولتائیک در اروپا بسیار به طیف وسیعی از سیاست‌ها، از جمله سیاست‌های مربوط به انتقال انرژی، کشاورزی، محیط زیست و تحقیق و نوآوری^۱ (R&I) مرتبط است که باید همراه با افزایش

آگاهی و حصول اطمینان از آموزش و پشتیبانی فنی در مکان‌های شناسایی شده باشد و مستقیم از اهداف قرارداد سبز اروپا (EGD)^۱ پشتیبانی کند. در نهایت، صرف نظر از پیشرفت‌های تکنولوژیکی، هنوز چالش‌های فنی وجود دارد که باید به منظور به حداکثر رساندن تولید برق و در عین حال در نظر گرفتن تنوع زیستی، همچنین حمایت از رفاه و امنیت کشاورزان به علت متأثر بودن از افزایش قیمت زمین و بدون به خطر انداختن قابل توجه عملکرد محصول، مورد توجه قرار گیرد.

در این گزارش به بررسی پتانسیل فنی سیستم‌های Agri-PV در اتحادیه اروپا پرداخته می‌شود که نشان می‌دهد استفاده از تنها ۱ درصد از منطقه کشاورزی مورد استفاده اتحادیه اروپا با سیستم‌های Agri-PV می‌تواند اجازه ۱ تراوات ظرفیت PV را بدهد که هدف کربن‌زدایی تا سال ۲۰۵۰ تسریع یابد؛ برای مثال در ارتباطات اخیر، استراتژی خورشیدی اتحادیه اروپا بسیار بالاتر از ۵۹۰ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی شده است. ادامه تحقیق و توسعه، به‌ویژه مطالعات مقطعی که جنبه‌های انرژی، عملکرد محصول و تنوع زیستی را در نظر می‌گیرد، برای غلبه بر چالش‌های فنی و تضمین راه‌حل‌های کاملاً پایدار برای آینده ضروری خواهد بود.

Agri-PV همچنین می‌تواند با مشارکت در برنامه اقدام پیش‌بینی شده در «چشم‌انداز بلندمدت برای مناطق روستایی اتحادیه اروپا - به سوی مناطق روستایی قوی‌تر، متصل، انعطاف‌پذیر و مرفه تا سال ۲۰۴۰» از آینده بهتری برای مناطق روستایی اتحادیه اروپا حمایت کند (کمیسون اروپایی، ۲۰۲۱a). این برنامه اقدام به طور خاص، خاطرنشان می‌کند: «تولید انرژی تجدیدپذیر، فرصتی برای مناطق روستایی برای مبارزه با فقر انرژی است، مشروط بر اینکه خدمات اکوسیستم به طور مناسب ارزش‌گذاری شده و مدل‌های تجاری ارزش را در جوامع روستایی حفظ کنند» [۴۳].

۱. چگالی توان PV

تخمین‌ها برای سیستم‌های Agri-PV بر اساس طراحی سیستم بسیار متفاوت است. آخرین دستورالعمل برای Agri-PV از Fraunhofer ISE شامل این تخمین است که اگر تنها ۴ درصد از زمین‌های کشاورزی آلمان تحت پوشش مازول‌های PV باشد، ظرفیت بالقوه ۱۷۰۰ گیگاوات، با فرض ظرفیت نصب‌شده ۰/۲۵ مگاوات در هکتار خواهد بود. Next2Sun اعلام می‌کند که ظرفیت نصب‌شده سیستم‌های Agri-PV آن‌ها در مراتع ۰/۴ مگاوات در هکتار است. از طیف گسترده‌ای از پروژه‌های Agri-PV محقق شده، محدوده به‌دست‌آمده برای توان PV نصب‌شده بین ۰/۲ تا ۰/۹ مگاوات در هکتار بسته به طراحی سیستم است که به طور میانگین مقدار چگالی توان نصب‌شده را ۰/۶ مگاوات در هکتار فرض می‌شود. به عنوان مرجع، مازول‌های PV با بازده ۲۰ درصد دارای نسبت توان به مساحت 200 W/m^2 هستند که به معنای ۲ مگاوات در هکتار است.

۲. پتانسیل فنی Agri-PV

طبق گزارش یورواستات^۲ (سال ۲۰۲۲)، در سطح اتحادیه اروپا، منطقه کشاورزی مورد استفاده (UAA)^۳ تقریباً ۱۵۸ میلیون هکتار است. این منطقه شامل حدود ۹۸ میلیون هکتار زمین زراعی، ۴۹ میلیون هکتار علفزار دائمی، ۱۰ میلیون هکتار کشت دائمی و ۲۹۰ هزار هکتار باغ بازار است.

اگر ۱ درصد از UAA اتحادیه اروپا با سیستم‌های Agri-PV پوشش داده شود، پتانسیل بین ۳۱۵ تا ۱۴۱۵ گیگاوات (بسته به چگالی توان) خواهد بود. حتی حد پایین این پتانسیل بسیار نزدیک به هدف کلی (FF55) Fit-for-55 برای PV است. پتانسیل برای همان درصد پوشش اراضی (۱ درصد) برای دسته‌های زمین زراعی و علفزار دائمی به‌ترتیب در محدوده ۱۹۶ - ۸۸۱ گیگاوات و ۹۸ - ۴۳۹ گیگاوات است.

۳. چالش‌های Agri-PV

توسعه Agri-PV به طور فعال در اروپا و در سطح بین‌المللی مورد بحث قرار گرفته است. در مارس ۲۰۲۲، JRC^۴ میزبان یک

1. European Green Deal

2. Eurostat

3. Utilised Agricultural Area

4. Joint Research Centre

کارگاه آموزشی Agri-Photovoltaics برای دستیابی به پتانسیل کامل خود در انتقال انرژی اتحادیه اروپا بود، که نمایندگانی از کمیسیون اروپا، کشاورزی، ساخت‌وساز و بخش‌های تحقیقات فتوولتائیک و صنعت در تلاشی برای شناسایی فرصت‌ها و چالش‌های مربوط به سیستم‌های Agri-PV حضور داشتند. برنامه همکاری فنی آژانس بین‌المللی انرژی در مورد سیستم‌های برق PV همچنین در سال ۲۰۲۲ یک کارگاه آموزشی در مورد جنبه‌های قانونی Agri-PV در فرانسه، آلمان، ایتالیا برگزار کرد. این بحث‌ها بینش‌هایی در مورد قوانین فعلی و همچنین، پیشرفت‌های مورد انتظار آینده در قوانین مختلف کشورهای عضو در مورد Agri-PV ارائه کرد.

نتایج دو کارگاه یادشده و همچنین، گفت‌وگوهای در حال انجام با ذی‌نفعان، موانع اصلی پیش روی در اجرای پروژه‌های Agri-PV را مشخص کرده است که انتظار می‌رود، حل شوند.

- اولین مانع بزرگ برای گسترش سیستم‌های Agri-PV، همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، فقدان یک تعریف روشن، قوی و جهانی در سطح اتحادیه اروپا و همچنین نبود استاندارد اختصاصی است. تلاش‌ها برای ایجاد یک تعریف Agri-PV و یک استاندارد مرتبط در حال حاضر در سطح کشورهای عضو انجام می‌شود و فاقد هماهنگی در سطح اتحادیه اروپا است.
- ضروری است که فعالیت کشاورزی همیشه حفظ شود، همان‌طور که در قوانین تدوین‌شده توسط کشورهای عضو در مورد این موضوع نیز منعکس شده است. با این حال، گزارش شده است که در چندین کشور عضو، خصوصیات زمین ممکن است پس از اجرای یک نصب Agri-PV تغییر کند، بنابراین موانع قانونی برای کشاورز ایجاد می‌شود. عدم قطعیت‌ها و پیامدهای مالی ممکن است به ادراک ناامنی قانونی و از دست دادن درآمد احتمالی برای کشاورز یا سرمایه‌گذار منجر شود.
- از آنجا که استقرار در مقیاس بزرگ Agri-PV نیاز به در نظر گرفتن و تضمین رفاه و درآمد کشاورزان دارد، اثرات قیمت بر زمین‌های کشاورزی باید ارزیابی شود. در فرانسه قیمت زمینی که می‌تواند میزبان سیستم‌های Agri-PV باشد در سال‌های گذشته افزایش یافته است. کمیسیون ویژه‌ای برای بررسی تأثیر این افزایش قیمت ایجاد خواهد شد.
- آگاهی عمومی و پذیرش در میان کشاورزان و جوامع روستایی به عنوان یک پارامتر محوری شناسایی می‌شود که مستقیم بر استقرار در مقیاس بزرگ Agri-PV تأثیر می‌گذارد. تمام موانع یادشده، در صورت عدم رسیدگی، باعث ایجاد ناامنی برای ذی‌نفعان و در نهایت، تضعیف تمایل آن‌ها برای سرمایه‌گذاری در Agri-PV می‌شود.
- با وجود اینکه تحقیقات روی سیستم‌های Agri-PV در سال‌های گذشته افزایش یافته است، هنوز چالش‌های فنی برای به حداکثر رساندن تولید برق و حصول اطمینان از کمترین تأثیر ممکن بر تولید محصول وجود دارد. چندین جنبه برای این سؤال وجود دارد، و اعتبارسنجی راه‌حل‌های بالقوه نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر از طریق پروژه‌های آزمایشی برای بررسی پارامترهای حیاتی مانند سایه جزئی و سایر جنبه‌های مهم برای رشد محصول، عملکرد فتوولتائیک در پیکربندی‌های مختلف و همچنین، اثرات تنوع زیستی روی محصول است.
- توسط همه ذی‌نفعان ذکر شده که Agri-PV هنوز به‌خوبی در برنامه‌های استراتژیک ملی و سیاست‌های ملی کشورهای عضو گنجانده نشده است. نقش Agri-PV به عنوان یک شکل نوآورانه استقرار PV که هم از تولید برق و هم تولید محصول حمایت می‌کند، باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد؛ علاوه بر این، از حمایت مالی اختصاصی برای Agri-PV استقبال شود.
- در نهایت، ذی‌نفعان تشخیص می‌دهند که مجوز و اتصال به شبکه سیستم‌های Agri-PV بسته به کشور از رویکردهای متفاوتی پیروی می‌کند. الزامات متفاوتی برای هر کشور عضو وجود، بنابراین با محدودیت‌هایی (بسته به مقررات محلی) مواجه هستند و زمان زیادی را صرف می‌کنند. تعریف واضح Agri-PV برای تسهیل فرایندهای صدور مجوز زمین و اتصال به شبکه مفید خواهد بود.

۳-۱. تنوع زیستی

علاوه بر ملاحظات مربوط به انرژی و عملکرد محصول، باید تأثیر Agri-PV بر تنوع زیستی در نظر گرفته شود. از تعهدات کلیدی برای حفاظت از طبیعت در استراتژی تنوع زیستی اتحادیه اروپا برای سال ۲۰۳۰ این است که برای حفظ محیط زیست و اقتصاد، باید از طبیعت بیشتر محافظت شود. به همین دلیل، باید حداقل ۳۰ درصد از زمین و ۳۰ درصد از دریا در اتحادیه اروپا محافظت شود (کمسیون اروپا، ۲۰۲۰a). بنابراین، کشورهای عضو برای دستیابی به هدف ۳۰ درصدی تعیین شده توسط استراتژی تنوع زیستی ۲۰۳۰ (کمسیون اروپا، ۲۰۲۱b) باید به طور جمعی بیشتر از ۴ درصد زمین و ۱۹ درصد از دریاها را خود محافظت کنند.

سیستم‌های Agri-PV باید از تضاد با حفاظت از طبیعت اجتناب کنند، که به این معناست که هیچ تأسیساتی نمی‌تواند در مناطق حفاظت شده مستقر شود (Natura 2000) و Agri-PV باید با هدف ۳۰ درصدی استراتژی تنوع زیستی اتحادیه اروپا مطابقت داشته باشد.

کمسیون اروپا گزارشی در مورد تأثیرات بالقوه کاربردهای PV بر اکوسیستم و تنوع زیستی منتشر کرده است (کمسیون اروپا، ۲۰۲۰b). اثرات منفی احتمالی Agri-PV شبیه به سیستم‌های PV سنتی روی زمین (مزارع خورشیدی) و مختص سایت است. این شامل از دست دادن و تخریب زیستگاه، تکه‌تکه شدن، حوادث اختلال و اثرات جابه‌جایی روی پرندگان و خفاش‌ها است. با این حال، ممکن است فرصت‌های عالی برای ایجاد یا افزایش تنوع زیستی نیز وجود داشته باشد. در واقع، در بسیاری از کشورهای اتحادیه اروپا زیستگاه‌ها بین صفحات خورشیدی (مانند نوارهای گل‌های وحشی) یا در اطراف مرزهای سایت (مانند پرچین‌ها) ایجاد می‌شود (کمسیون اروپا، ۲۰۲۰b).

در مورد خاک، استراتژی تنوع زیستی اتحادیه اروپا به طور خاص تصدیق می‌کند که مزارع پانل‌های خورشیدی ممکن است، پوشش خاک سازگار با تنوع زیستی را به عنوان یک راه حل برد - برد برای انرژی و تنوع زیستی فراهم کنند (کمسیون اروپا، ۲۰۲۰a). نصب PV در زمین‌های کشاورزی می‌تواند تنوع زیستی منطقه را افزایش دهد و سلامت خاک را که به دلیل چندین سال فعالیت کشاورزی تغییر کرده است، بهبود بخشد. بنابراین، ارزیابی ویژگی‌های اکولوژیکی سایت خاص در مرحله اولیه پروژه Agri-PV مهم است (SolarPower Europe, 2022b). هدف چنین رویکردهای پیشگیرانه، اعمال اقدامات صحیح برای افزایش تنوع زیستی از طریق نصب سیستم‌های Agri-PV به جای تلاش برای به حداقل رساندن تأثیرات آنها است.



شکل ۴. انواع اگری‌ولتائیک در کشورهای اروپایی

۴. تحقیق و توسعه اکوسیستم کشاورزی انرژی‌ولتائیک

فناوری‌های سیستم‌های Agri-PV در درجه اول به طراحی خاص سیستم بستگی دارد. مازول‌های PV می‌توانند تک‌وجهی یا دووجهی باشند. مازول‌های PV تک‌وجهی را می‌توان عمدتاً برای سیستم‌های سقفی استفاده کرد، در حالی که مازول‌های PV دووجهی برای نصب عمودی مناسب‌تر هستند. با توجه به تولید انرژی از سیستم PV، تحقیقات در حال انجام است. همچنین، تحقیقات بر برنامه‌ریزی سیستم‌های Agri-PV متمرکز شده است که ملاحظات فنی کمتری مانند پارامترهای اقتصادی، طبیعت و چشم‌انداز را تأیید می‌کنند.

حال سایه‌ها را می‌توان با استراتژی‌های مختلف دستکاری و مدیریت کرد. اولین مورد مربوط به سیستم‌های PV است که از مازول‌های PV مات معمولی ساخته شده از سلول‌های PV سیلیکونی تجاری استفاده می‌کنند [۴۴]. در این مورد، از دو روش برای دستکاری سایه ایجاد شده توسط مازول‌های PV به هم پیوسته روی محصولات کشت شده در زیر استفاده می‌شود:

۱. نصب مازول‌های PV در طرح‌های اصلاح شده مانند خطوط مستقیم یا آرایش شطرنجی برای بهبود انتقال نور [۴۵].
۲. استفاده از سیستم‌های ردیابی خورشید تک‌محوره و دومحوره (فقط در مزرعه باز) که سایه‌های پویا در نور روز تولید می‌کنند (شکل ۵-الف).

استراتژی دوم استفاده از مازول‌های PV دووجهی (شکل ۵-ب، د) و مازول‌های PV نیمه‌شفاف (شکل ۵-ج) است. مازول‌ها با افزایش سطح شفاف از گیاهان در برابر عوامل محیطی مضر محافظت می‌کنند بدون اینکه دسترسی به نور را به خطر بیندازند. هنگامی که از مازول‌های PV دووجهی استفاده می‌شود، نور می‌تواند به سطح پشتی برسد و برق تولید کند. بسته به تابش پشتی، بازده تولید الکتریسیته بالاتر را می‌توان با مازول‌های PV دووجهی (تا ۲۵ درصد) به دست آورد [۴۴].



شکل ۵. انواع حالت‌های مازول‌های APV، مزرعه بسته (گلخانه‌ای) و مزرعه باز [۴۶]. (الف) یک سیستم انرژی‌ولتائیک محرک توسعه یافته توسط استارت‌آپ 'AgriSun'؛ (ب) یک سیستم انرژی‌ولتائیک با استفاده از مازول‌های PV دووجهی نصب شده عمودی توسعه یافته توسط 'Next2Sun'؛ (ج) یک پروژه آزمایشی انرژی‌ولتائیک که از مازول‌های نیمه‌شفاف توسعه یافته توسط KU Leuven استفاده می‌کند، (د) یک سیستم انرژی‌ولتائیک که با استفاده از مازول‌های PV دووجهی توسط دانشگاه Mälardalen، سوئد پیاده‌سازی شده است.

سومین و نوآورانه‌ترین استراتژی (CPV)، استفاده از مواد PV جدید و طرح‌های ماژول است. با استفاده از ویژگی تقسیم طیف، فوتون‌های ناحیه فعال فتوستتزی (PAR) برای تولید غذا استفاده می‌شوند، در حالی که فوتون‌های باقی‌مانده برای تولید برق به سلول‌های خورشیدی هدایت می‌شوند.

تحقیقات در مورد اثرات سیستم‌های Agri-PV بر عملکرد محصول در سال‌های اخیر توسعه یافته است. محققان سیستم‌های Agri-PV آزمایشی را برای شناسایی بهبود یا تلفات عملکردی که یک سیستم PV ممکن است بسته به نیازهای خاص انواع مختلف محصول (نور خورشید، رطوبت، دما، آبیاری و ...) به همراه داشته باشد، آزمایش کرده‌اند. به عنوان مثال، می‌توان مشخص کرد که کدام نوع از محصولات ممکن است از کاهش دما به دلیل سایه زدن توسط ماژول‌های PV (مانند سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، فلفل، کاهو، کلم بروکلی و ذرت) بهره‌مند شوند. به این ترتیب، کشاورز می‌تواند مناسب‌ترین نوع محصول را برای رشد انتخاب کند و نصب‌کننده Agri-PV می‌تواند بهترین روش طراحی و ساخت سیستم را برنامه‌ریزی کند.

در بررسی کشورها نیز اگر ولتائیک ابتدا در کشورهای اروپایی مشاهده شده، ولی در حال گسترش یافتن در آمریکا هست؛ آمریکا از تحقیقات اروپا برای اندازه‌گذاری ارتفاع مناسب اگر ولتائیک‌ها برای بازار خود استفاده کرده است. دولت ایتالیا نیز حمایت‌های کلیدی با مشوق‌هایی تصویب کرده است. در نهایت، طبق تحقیقات کشور پرتغال، میانگین بازگشت سرمایه در سیستم اگر ولتائیک، کمتر از ۵ سال است.

بحث

در بررسی نحوه عملکرد پنل خورشیدی، مدیریت سایه، تنظیم شدت و توزیع طیفی به سیستم‌های PV نوآورانه اجازه می‌دهد تا مقادیر قابل توجهی برق تولید کنند بدون اینکه بر تولید کشاورزی تأثیر بگذارند. با در نظر گرفتن مزایای فناوری اگر ولتائیک، محصولات کشت‌شده تحت حفاظت ماژول‌های PV از توزیع مجدد مؤثرتر آب/باران، کاهش باد و محافظت در برابر نوسانات دما، کاهش تبخیر و تعرق، حفظ رطوبت خاک و ایمنی از عدم قطعیت‌های اقلیمی و رویدادهای خطرناک مانند توفان و تگرگ بهره‌مند می‌شوند [۴۷]. پروژه‌های نمایشی قبلاً در سرتاسر جهان توسعه یافته‌اند و تجربیات زیادی با راه‌حل‌های طراحی مختلف برای استفاده تجاری از ماژول‌های PV تک‌وجهی برای سیستم‌های سقفی و ماژول‌های PV دووجهی برای نصب عمودی وجود دارد.

حال یکی از این فناوری‌های جدید، فتوولتائیک متمرکزکننده (CPV) است. CPV دارای قابلیت‌های پردازش طیفی عالی و راندمان تولید انرژی بسیار متمرکز است که آن را به یک راه‌حل عالی برای ادغام با فتوستتز تبدیل می‌کند. هدف این گزارش، ارائه اصل کار ماژول‌های CPV با در نظر گرفتن کاربردهای کشاورزی است. در این روش، مشکل سایه با دو استراتژی اصلی کاهش می‌یابد: (۱) شیشه‌های سهموی پوشیده‌شده با یک لایه پلیمری دو رنگ چندلایه که تابش مادون قرمز نزدیک (NIR) را به سلول‌های خورشیدی نصب‌شده در ناحیه کانونی منعکس می‌کنند و فوتون‌ها را در محدوده تابش فعال فتوستتزی (PAR)، منتقل می‌کنند. (۲) لنزهای فرنل بسیار شفاف ردیابی خورشید که نور مستقیم خورشید را روی سلول‌های خورشیدی متمرکز می‌کنند تا الکتریسیته تولید کنند. در محلول اخیر، نور پراکنده خورشید باقی‌مانده برای استفاده توسط گیاهان در حال رشد به سمت زمین هدایت می‌شود. اگرچه روند توسعه CPV به دلیل هزینه سیلیکون کریستالی کند بوده است، توسعه CPV برای کشاورزی با جداسازی دقیق طیفی می‌تواند این صنعت را احیا کند. در این راستا، تحقیقات و توسعه بیشتری برای ارزیابی مناسب بودن موادی که خورشید را تقسیم می‌کنند مورد نیاز است.

فتوولتائیک متمرکزکننده (CPV)

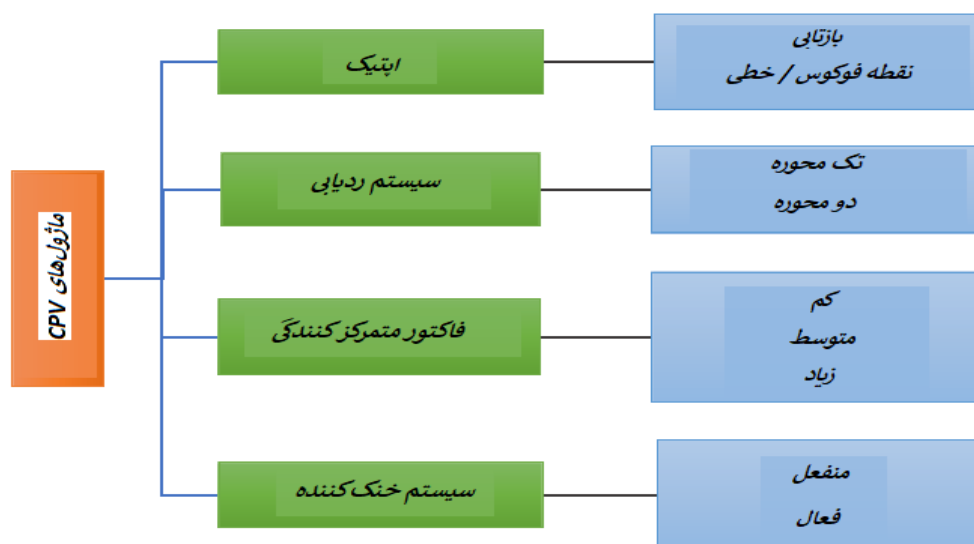
فتوولتائیک متمرکزکننده از بازتابنده یا لنزهای شفاف برای متمرکز کردن تابش خورشیدی تابشی روی سلول خورشیدی نصب‌شده در ناحیه کانونی استفاده می‌کند. استفاده از ماژول‌های CPV می‌تواند روشی امیدوارکننده برای تحقق مفهوم اگر ولتائیک باشد. ماژول‌های CPV جمع‌وجورتر هستند؛ آن‌ها همچنین قادر به دستیابی به عملکرد بالا حتی در شرایط محیطی

نامناسب هستند. آن‌ها عمدتاً کلکتورهای خورشیدی هیبریدی با بالاترین راندمان به دلیل عملکرد حرارتی و نوری عالی در نظر گرفته می‌شوند. در بیشتر موارد، بین کیفیت و کمیت گیاهان زراعی و مقدار تابش خورشیدی که به برق تبدیل می‌شود تا نیازها مطابق با کاربرد مورد استفاده قرار گیرد، تعادل وجود دارد.

این سیستم‌ها نه تنها در مناطق باز کشاورزی، بلکه در گلخانه‌ها و همچنین پارک‌ها، پشت‌بام‌ها و سایر محیط‌های شهری برای کشت گیاهان و سبزیجات مختلف مانند کاهو، گوجه‌فرنگی، خیار، اسفناج و پنبه قابل استفاده هستند. در زمینه سیستم‌های انرژی‌ولتائیک، یکی از مزایای اصلی CPV ها این است که به دلیل ویژگی منحصربه‌فرد آن‌ها در غلظت نور، سطح مورد نیاز PV کاهش می‌یابد و در عین حال، برای بازده بالا از سلول‌های خورشیدی چندپیوندی استفاده می‌شود. این باعث کاهش درجه سایه برای همان قدرت می‌شود. در بیشتر موارد، ماژول‌های CPV به ردیاب‌های خورشیدی نیاز دارند، زیرا فقط می‌توانند از تابش مستقیم استفاده کنند. این ویژگی آن‌ها را به‌صرفه‌تر می‌کند تا در مناطقی با قابلیت دسترسی به تابش عادی مستقیم^۱ (DNI) بالاتر از ۲ هزار کیلووات ساعت بر متر مربع در سال استفاده شوند [۴۸].

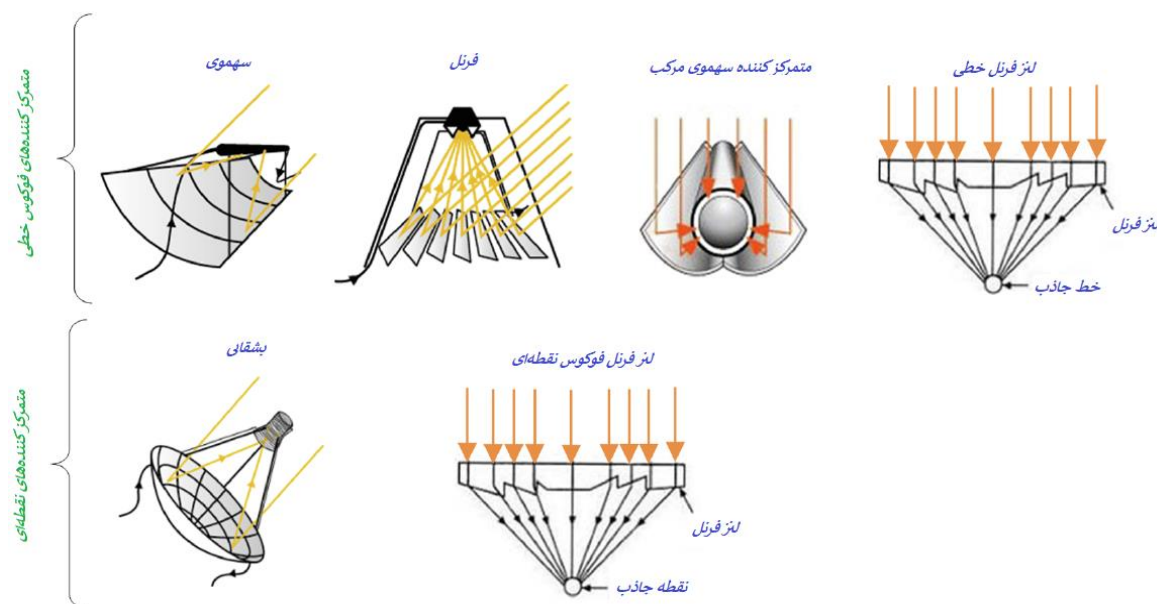
برای فراهم کردن فضای کافی برای رشد محصولات زراعی، فعالیت‌های ماشین‌آلات کشاورزی و کشاورزان و همچنین، جابه‌جایی دام‌ها، ماژول‌های CPV باید در ارتفاع ۵ متری یا بالاتر نصب شوند، اما رشد باکیفیت محصولات زراعی می‌تواند تحت تأثیر نامطلوب سایه انداختن قرار گیرد. درنهایت، به علت مسائل تجاری، استفاده از ماژول‌های CPV در سیستم‌های کشت کشاورزی فراگیر نیست.

مفهوم CPV جدید نیست، اما به دلیل مسائل مربوط به قابلیت اطمینان، هزینه‌های نصب بالا، کمبود داده‌ها و تخصص میدانی و اطلاعات در مورد هزینه‌های تعمیر، نگهداری و عملیات، توسعه نسبتاً کندی داشته است. فناوری‌های CPV باید در بلندمدت به‌صرفه‌تر شوند و قابلیت اطمینان بلندمدت را برای توسعه‌دهندگان پروژه و سرمایه‌گذاران فراهم کنند تا بازار بتواند به رشد خود ادامه دهد. بنابراین، با ورود بازیگران متعدد در صنعت CPV، راندمان عملیاتی بالاتر امکان‌پذیر شده است. سیستم‌های PV سنتی و CPV جدید به‌شدت از نظر سایه انداخته‌شده روی زمین متفاوت هستند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، CPV ها را می‌توان عمدتاً بر اساس نسبت غلظت، اپتیک، سیستم ردیابی و سیستم خنک‌کننده طبقه‌بندی کرد. عناصر نوری مورد استفاده در سیستم CPV بیشتر به سه نوع اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: (۱) آینه سهموی، (۲) آینه بازتابنده، و (۳) عدسی فرنل [۴۹].



شکل ۶. معیارهای طبقه‌بندی CPV [۵۰]

رایج‌ترین متمرکزکننده‌های خورشیدی که با ماژول‌های CPV یکپارچه شده‌اند، در شکل ۷ نشان داده شده است. ماژول‌های CPV باید روی یک سازه رفیع نصب شوند تا بتوانند تابش مستقیم خورشید را جذب کنند. با توجه به نوع سیستم ردیابی، CPVها به دو دسته اصلی تک‌محوره و دوماحوره با قابلیت ردیابی پرتوهای خورشید در دو جهت عمود بر هم و جذب حداکثر تابش خورشیدی طبقه‌بندی می‌شوند [۵۱].



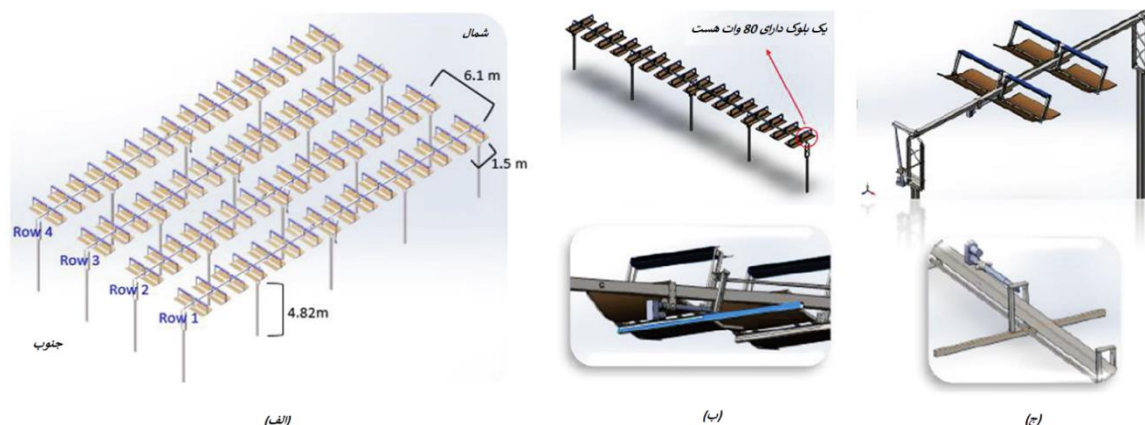
شکل ۷. متمرکزکننده‌های خورشیدی مختلف مورد استفاده در ماژول‌های CPV [۵۲]

تحولات و پیشرفت‌های CPV

CPV یک فناوری نوظهور است که درصد کمی از کل صنعت PV را نشان می‌دهد، اما در پروژه‌های نمایشی در سراسر جهان استفاده می‌شود [۵۳]. عناصر نوری CPV ترکیبی از تبدیل انرژی خورشیدی به برق و غذا را امکان‌پذیر می‌کند. گیاهان برای رشد نیازی به طیف کامل خورشید و شدت نور ندارند، بنابراین ترکیب فتوولتائیک و رشد گیاه در یک منطقه هم‌افزایی را نشان می‌دهد. مکانیسم نوری سیستم CPV می‌تواند مشکل تقسیم نور را بهتر حل کند. با هدف انتقال نور پراکنده می‌توان از نور سفید و نور آبی - قرمز برای رشد گیاه استفاده کرد.

به گفته ژانگ و همکاران [۵۳]، ترکیبی از انرژی ولتائیک و CPV در سال ۲۰۱۵ در شهر Hefei، آنهویی، چین آغاز شد و نمونه اولیه آن در سال ۲۰۱۶ تکمیل شد که شامل مساحت کل پانل بازتابنده ۱۲ متر مربع بود. هدف نهایی تکمیل ۱۰۰ پروژه نمایشی با مساحت ۱۰۲۴ متر مربع بود. از پروژه‌ای به پروژه دیگر، بهبودهای تدریجی، به‌ویژه در سیستم ردیابی دوگانه (همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است) و سلول‌های خورشیدی برای جذب انرژی خورشیدی متمرکز استفاده می‌شود، انجام شد. این گزارش به تفصیل پیشرفت‌های اخیر در این فناوری جدید را مورد بحث قرار می‌دهد، کارایی سلول‌های خورشیدی مورد استفاده در بخش CPV سیستم و کارایی کلی سیستم متمرکزکننده برای بهینه‌سازی آن برای حداکثر تولید برق را بررسی می‌کند.

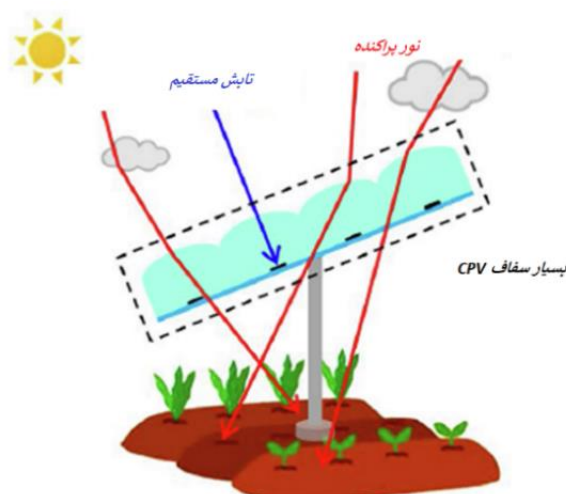
ژانگ و همکاران، به حداکثر راندمان ۱۶/۸ درصد برای سلول‌های خورشیدی CPV دست یافتند. همچنین، دریافتند که علی‌رغم هزینه‌های بالاتر، مزایایی از جمله استفاده کامل از زمین به طور هم‌زمان برای کشاورزی و تولید برق و محدود کردن تبخیر آب دارد که این مزایا می‌تواند هزینه‌های سرمایه و عملیات بالاتر را در مقایسه با سیستم‌های PV معمولی جبران کند.



شکل ۸. پیکربندی پانل‌های CPV [۵۳]: (الف) طراحی مقیاس پذیر عمومی، (ب) محور چرخش بازوی چرخشی برای ردیف‌های مختلف پانل‌های CPV، (ج) محدودیت میله متحرک برای اجازه ردیابی شرق به غرب واحدهای CPV جداگانه

علاوه بر این، چندین مطالعه روش‌های سودمندی را برای سایه‌زدایی پیشنهاد کرده‌اند، که دو راه‌حل اصلی به ویژه کارآمد هستند. رویکرد اول، که عمدتاً در فضاهای باز کشاورزی اعمال می‌شود، از یک پانل پارابولیک ساخته شده از شیشه استفاده می‌کند که با یک لایه پلیمری دو رنگ چندلایه پوشانده شده است که می‌تواند تابش مادون قرمز نزدیک (NIR) را روی سلول خورشیدی نصب شده در ناحیه کانونی منعکس کند، در حالی که نورهای قرمز و آبی توسط گیاهان به عنوان محدوده طول موج حیاتی برای رشد خود منتقل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور خاص، این پانل‌ها فقط فوتون‌ها را در PAR که در محدوده ۴۲۰-۴۶۰ نانومتر به نام ناحیه آبی و در محدوده ۶۳۰-۶۷۰ نانومتر که منطقه قرمز نامیده می‌شود، عبور می‌دهند. اوج جذب توسط کلروفیل a و کلروفیل b گیاهان در دو محدوده طول موجی که پیش‌تر ذکر شد، رخ می‌دهد که برای فتوسنتز بسیار مهم هستند.

حال باندهای باقی‌مانده برای استفاده توسط سلول‌های خورشیدی منعکس شده و برق تولید می‌شود. در این حوزه، استفاده از تکنیک‌های انتخابی (برای تقسیم طیف خورشیدی) نه تنها مشکل سایه را کاهش می‌دهد، بلکه باعث افزایش کیفیت گیاهان در حال رشد نیز می‌شود. در حالی که رویکرد دوم معمولاً در سایبان گلخانه‌ها و محصولات در فضای باز استفاده می‌شود. در این مورد، پرتوهای بسیار شفاف ردیابی خورشید یا لنزهای فرنل برای متمرکز کردن تابش عادی مستقیم روی سلول‌های خورشیدی نصب شده در ناحیه کانونی برای تولید برق و هدایت تابش پراکنده به زمین جایی که گیاهان رشد می‌کنند، استفاده می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹. شماتیک یک مازول CPV بسیار شفاف [۵۴]

در مطالعات مربوط به ردپای کربن و آب در انرژی‌های تجدیدپذیر، داده‌های کمی معمولاً برای ارزیابی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب در مراحل مختلف تولید، بهره‌برداری و دفع فناوری‌های انرژی پاک استفاده می‌شوند. برخی از روش‌های رایج تحلیل داده‌های کمی عبارت از تحلیل چرخه عمر، تحلیل کتاب‌سنجی و مدل‌سازی سناریوها هستند [۱].

در ایران شهر سمنان با ۳۲۵ روز آفتابی در سال و شرایط اقلیمی مناسب، از بهترین مکان‌ها برای احداث نیروگاه خورشیدی محسوب می‌شود و احداث یک نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی موجب کاهش ۹۳ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، که تأثیر مهمی در مقابله با تغییرات اقلیمی دارد [۵۵].

نتیجه‌گیری

در سال ۲۰۵۰، زمانی که انتظار می‌رود جمعیت جهان به ۹/۸ میلیارد نفر برسد، عرضه غذا با فشار بسیار بیشتری مواجه خواهد شد. تقاضا ۶۰ درصد بیشتر از امروز خواهد بود، اما تغییرات آب‌وهوایی، شهرنشینی و تخریب زمین، دسترسی به زمین‌های زراعی را محدود می‌کند. با توجه به مشکلات فعلی با کمبود آب، آلودگی و افزایش نابرابری، پیامدهای آن واضح است. ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر و کشاورزی یک گزینه برد - برد است. به عنوان مثال، در این بخش، منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و زیست‌توده را می‌توان برای همیشه برداشت کرد و برای کشاورزان یک منبع درآمد بلندمدت فراهم کرد. خورشید با منبع انرژی فراوان، می‌تواند به طور قابل توجهی به نیازهای انرژی آینده کمک کند [۵۶]. در زمینه پذیرش انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای گروه G7 نتایج نشان می‌دهد بریتانیا بالاترین رتبه را دارد، در حالی که کانادا در جایگاه آخر قرار گرفته است، که عمدتاً به دلیل انتشار بالای کربن نسبت به تولید ناخالص داخلی و سرمایه‌گذاری کمتر در انرژی‌های تجدیدپذیر است. همچنین، کشورهای اروپایی گروه G7، که وابستگی کمتری به سوخت‌های فسیلی دارند، عملکرد بهتری دارند [۵۷].

در دهه‌های اخیر، فن‌ولتائیک به یک فناوری جدید انرژی‌های تجدیدپذیر تبدیل شده است. سیستم‌های PV مستقل، برق در محدوده مگاوات تولید می‌کنند و به عنوان منبع تولید برق برای کاربردهای مختلف عمل می‌کنند. انرژی خورشیدی را می‌توان به روش‌های مختلفی در کشاورزی، مانند افزایش خودکفایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده کرد. هزینه تولید برق از انرژی خورشیدی حدود ۰/۰۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت برآورد شده است و دوره بازگشت سرمایه نیز بین ۷ تا ۱۰ سال تخمین زده می‌شود که نشان‌دهنده مزایای اقتصادی قابل توجه است [۵۵]. استفاده از انرژی خورشیدی برای فعالیتهای کشاورزی مختلف می‌تواند به کاهش هزینه‌های برق و گرمایش مزارع منجر شود. سیستم‌های انرژی خورشیدی و تولیدات کشاورزی را می‌توان با پیکربندی‌های مختلف، با تأثیرات کوچک تا بزرگ بر انرژی خورشیدی و شیوه‌های کشاورزی مرسوم، ادغام کرد [۵۸].

اگر ولتائیک کمک قابل توجهی به افزایش انرژی اتحادیه اروپا بدون اشغال زمین‌های اضافی، اما با ایجاد مزیت برای فعالیتهای کشاورزی محسوب می‌شود. اگرچه این یک مفهوم جدید نیست، علاقه به این شکل از استقرار PV در چند سال اخیر به سرعت افزایش یافته است که عمدتاً به دلیل افزایش نیاز به تولید برق و دسترسی محدود به زمین‌های جدید به دلیل افزایش تقاضای جهانی غذا است. Agri-PV موفق به ترکیب دو فعالیت بسیار مهم دنیای مدرن تولید برق و غذا با تأثیرات محدود یکی بر دیگری می‌شود. با این حال، هنوز برخی پارامترها مانع بهره‌برداری کامل از Agri-PV و استقرار در مقیاس بزرگ می‌شوند [۵۹].

در نهایت، در بحث متمرکزکننده‌ها، تحقیقات بیشتر و عمیق برای ارزیابی عملکرد و اعتبار مواد شکافت خورشیدی و اثرات آن‌ها بر عملکرد الکتریکی CPV و فیزیولوژی گیاه مورد نیاز است. علاوه بر این، تولید صنعتی مؤثر باید توسعه یابد تا قیمت کاهش یابد و CPV‌ها در بازار رقابتی‌تر شوند. بر این اساس، تنظیم طیف نور خورشید با استفاده از مواد پوشاننده خاص مانند عدسی‌های فرنل، مواد مسدودکننده NIR و UV از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا بر کیفیت و کمیت تابش خورشیدی تابشی تأثیر می‌گذارند. همچنین آینه‌های متمرکز ادغام‌شده در ماژول‌های CPV می‌توانند شفافیت انتخابی با طول موج را فراهم کنند و سیستم‌های آزمایشی که قبلاً پیاده‌سازی شده‌اند، ادغام آن‌ها در کاربری‌های زمینی دوگانه به دلیل ضریب شکل پایین‌تر ماژول‌های CPV مبتنی بر لنز در مقایسه با ماژول‌های CPV مبتنی بر آینه بسیار آسان‌تر است [۶۰].

منابع

- [1] K. Fardnia, H. Yousefi, and M. Abdoos, "A bibliometric analysis of carbon and water footprints in renewable energy: The post-COVID-19 landscape," Jul. 01, 2025, KeAi Communications Co. doi: 10.1016/j.grets.2024.100162.
- [2] F. Rasaei, H. Yousefi, M. Razeghi, A. Naseri, M. Abdoos, and R. Ghasempour, "Optimal selection of CSP site for desalination system using GIS and AHP method in Hormozgan province, Iran," Energy Reports, vol. 13, pp. 2255–2268, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.egyr.2025.01.082.
- [3] Goetzberger, A.; Zastrow, A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *Int. J. Sol. Energy* 1982, 1, 55–69.
- [4] Proctor, K.W.; Murthy, G.S.; Higgins, C.W. Agrivoltaics align with green new deal goals while supporting investment in the us' rural economy. *Sustainability* 2021, 13, 137.
- [5] Weselek, A.; Ehmann, A.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Schindele, S.; Högy, P. Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2019, 39, 1–20.
- [6] Dupraz, C.; Marrou, H.; Talbot, G.; Dufour, L.; Nogier, A.; Ferard, Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renew. Energy* 2011, 36, 2725–2732.
- [7] Mavani, D.D.; Chauhan, P.M.; Joshi, V. Beauty of Agrivoltaic System regarding double utilization of same piece of land for Generation of Electricity & Food Production. *Glob. Sci. J.* 2019, 10, 118–148.
- [8] Adeg, E.H.; Good, S.P.; Calaf, M.; Higgins, C.W. Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. *Sci. Rep.* 2019, 9, 1–6.
- [9] Lytle, W.; Meyer, T.K.; Tanikella, N.G.; Burnham, L.; Engel, J.; Schelly, C.; Pearce, J.M. Conceptual Design and Rationale for a New Agrivoltaics Concept: Pasture-Raised Rabbits and Solar Farming. *J. Clean. Prod.* 2021, 282, 124476.
- [10] Majumdar, D.; Pasqualetti, M.J. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landsc. Urban Plan.* 2018, 170, 150–168.
- [11] Metsolar What is Agrivoltaics? How Can Solar Energy and Agriculture Work Together? [Online]. Available: <https://metsolar.eu/blog/what-is-agrivoltaics-how-can-solar-energy-and-agriculture-work-together/> (accessed on 1 October 2020).
- [12] IEA. World Energy Outlook 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (accessed on 21 March 2021).
- [13] Santra, P.; Pande, P.C.; Kumar, S.; Mishra, D.; Singh, R.K. Agri-voltaics or solar farming: The concept of integrating solar PV based electricity generation and crop production in a single land use system. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2017, 7, 694–699.
- [14] Marrou, H.; Wery, J.; Dufour, L.; Dupraz, C. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Eur. J. Agron.* 2013, 44, 54–66.
- [15] Kumar, S.; Saravaiya, S.N.; Pandey, A.K. Precision Farming and Protected Cultivation: Concepts and Applications, 1st ed.; CRC Press: Oxon, UK, 2021; ISBN 9781032052762.
- [16] Hernandez, R.R.; Armstrong, A.; Burney, J.; Ryan, G.; Moore-O'Leary, K.; Diédhiou, I.; Grodsky, S.M.; Saul-Gershenz, L.; Davis, R.; Macknick, J.; et al. Techno-ecological synergies of solar energy for global sustainability. *Nat. Sustain.* 2019, 2, 560–568.
- [17] FOA. World Agriculture: Towards 2015/2030 Summary Report; FAO: Rome, Italy, 2002.
- [18] Schindele, S.; Trommsdorff, M.; Schlaak, A.; Obergfell, T.; Bopp, G.; Reise, C.; Braun, C.; Weselek, A.; Bauerle, A.; Högy, P.; et al. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Appl. Energy* 2020, 265, 114737.
- [19] Pascaris, A.S.; Schelly, C.; Pearce, J.M. A First Investigation of Agriculture Sector Perspectives on the Opportunities and Barriers for Agrivoltaics. *Agronomy* 2020, 10, 1885.
- [20] E. Mouhib et al., "Enhancing land use: Integrating bifacial PV and olive trees in agrivoltaic systems," *Appl Energy*, vol. 359, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122660.
- [21] Othman, N.F.; Mat Su, A.S.; Ya'Acob, M.E. Promising Potentials of Agrivoltaic Systems for the Development of Malaysia Green Economy. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2018, 146, 012002.

- [22] Kumpanalaisatit, M.; Sethapun, W.; Sintuya, H.; Jansri, S.N. Design and Test of Agri—Voltaic System. *Turk. J. Comput. Math. Educ.* 2021, 12, 2395–2404.
- [23] Othman, N.F.; Ya'Acob, M.E.; Abdul-Rahim, A.S.; Hizam, H.; Farid, M.M.; Abd Aziz, S. Inculcating herbal plots as effective cooling mechanism in urban planning. *Acta Hortic.* 2017, 1152, 235–242..
- [24] Allardyce, C.S.; Fankhauser, C.; Zakeeruddin, S.M.; Grätzel, M.; Dyson, P.J. The influence of greenhouse-integrated photovoltaics on crop production. *Sol. Energy* 2017, 155, 517–522.
- [25] Chel, K. Renewable energy for sustainable agriculture. *Agron. Sustain. Dev.* 2011, 31, 91–118.
- [26] Othman, N.F.; Ya'acob, M.E.; Abdul-Rahim, A.S.; Shahwahid Othman, M.; Radzi, M.A.M.; Hizam, H.; Wang, Y.D.; Ya'Acob, A.M.; Jaafar, H.Z.E. Embracing new agriculture commodity through integration of Java Tea as high Value Herbal crops in solar PV farms. *J. Clean. Prod.* 2015, 91, 71–77.
- [27] Zhai, M.; Huang, G.; Liu, L.; Zheng, B.; Guan, Y. Inter-regional carbon flows embodied in electricity transmission: Network simulation for energy-carbon nexus. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 118, 109511.
- [28] Othman, N.F.; Yap, S.; Ya'Acob, M.E.; Hizam, H.; Su, A.S.M.; Iskandar, N. Performance evaluation for agrovoltaic DC generation in tropical climatic conditions. *AIP Conf. Proc.* 2019, 2129, 020006.
- [29] Agostini, A.; Colauzzi, M.; Amaducci, S. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Appl. Energy* 2021, 281, 116102.
- [30] Burgess, P.; Graves, A.; de Jalón, S.G.; Palma, J.; Dupraz, C.; van Noordwijk, M. Modelling Agroforestry Systems. In *Agroforestry for Sustainable Agriculture*; Burleigh Dodds Science Publishing: Cambridge, UK, 2019; pp. 209–238.
- [31] Elamri, Y.; Cheviron, B.; Lopez, J.M.; Dejean, C.; Belaud, G. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agric. Water Manag.* 2018, 208, 440–453.
- [32] Kostik, N.; Bobyl, A.; Rud, V.; Salamov, I. The potential of agrivoltaic systems in the conditions of southern regions of Russian Federation. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020, 578, 012047.
- [33] Sekiyama, T.; Nagashima, A. Solar sharing for both food and clean energy production: Performance of agrivoltaic systems for corn, a typical shade-intolerant crop. *Environments* 2019, 6, 65.
- [34] Kuemmel, B.; Langer, V.; Magid, J.; De Neergaard, A.; Porter, J.R. Energetic, economic and ecological balances of a combined food and energy system. *Biomass Bioenergy* 1998, 15, 407–416.
- [35] Al-Saidi, M.; Lahham, N. Solar energy farming as a development innovation for vulnerable water basins. *Dev. Pract.* 2019, 29, 619–634.
- [36] Ayush Das, S.D. Simulation and Implementation of Single Axis Solar Tracker Ayush. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2020, 7, 756–761.
- [37] Dinesh, H.; Pearce, J.M. The potential of agrivoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 54, 299–308.
- [38] Dufour, L.; Metay, A.; Talbot, G.; Dupraz, C. Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modelling. *J. Agron. Crop Sci.* 2013, 199, 217–227.
- [39] Macmillan Learning The Electromagnetic Spectrum. Available online: <https://sites.google.com/site/chempendix/em-spectrum> (accessed on 20 January 2001).
- [40] Kenning, T. TNB connects first phase of Malaysia's largest solar project to the grid. [Online]. Available: <https://www.pv-tech.org/tnb-connects-malaysias-largest-solar-project-to-the-grid/> (accessed on 25 March 2021).
- [41] Cossu, M.; Cossu, A.; Deligios, P.A.; Ledda, L.; Li, Z.; Fatnassi, H.; Poncet, C.; Yano, A. Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 94, 822–834.
- [42] Makavana, J.M.; Kalaiya, S.V.; Chauhan, P.M.; Dulawat, M.S. Advantage of Agrivoltaics Across the Food-Energy-Water Connection. *ACTA Sci. Agric.* 2020, 4, 15–17.
- [43] Ademe et al. (2021) Characterising solar PV projects on agricultural land and agrivoltaism - Executive Summary. [Online]. Available: <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux->

- et-stockage/4992-caracteriser-les-projets-photovoltaiques-sur-terrains-agricoles-et-l-agrivoltaisme.html.
- [44] Gorjian S, Bousi E, Ozdemir OE, Trommsdorff M, Kumar NM, Anand A, et al. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;158:112126.
- [45] Mourtzikou A, Sygkridou D, Georgakopoulos T, Katsagounos G, Stathatos E. Semi-Transparent Dye-Sensitized Solar Panels for Energy Autonomous Greenhouses. *Int J Struct Constr Eng* 2020;14:10011098.
- [46] S. Gorjian et al., "Technological advancements and research prospects of innovative concentrating agrivoltaics," *Appl Energy*, vol. 337, May 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120799.
- [47] Marrou H, Dufour L, Wery J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? *Eur J Agron* 2013;50:38–51.
- [48] Wiesenfarth M, Philipps SP, Bett AW, Horowitz K, Kurtz S. Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology. 2017. Doi: <https://www.ise.fraunhofer.de/>.
- [49] Gonz'alez-Correa D, Osorio-G'omez G, Mej'ia-Guti'erez R. Concept of a methodical process for the design of concentrating photovoltaic systems according to the context of use. In: Sulima O V., Conibeer G, editors., 2016, p. 993700. Doi: 10.1117/12.2237209.
- [50] Maka AOM, O'Donovan TS. A review of thermal load and performance characterisation of a high concentrating photovoltaic (HCPV) solar receiver assembly. *Sol Energy* 2020;206:35–51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.022>.
- [51] Antonini P. Concentrated PhotoVoltaics (CPV): Is it a real opportunity? *EPJ Web Conf.*, vol. 54, 2013. Doi: 10.1051/epjconf/20135401015.
- [52] Gorjian S, Calise F, Kant K, Ahamed MS, Copertaro B, Najafi G, et al. A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *J Clean Prod* 2021;285:124807. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124807>.
- [53] Zhang Z, Zhang F, Li M, Liu L, Lv H, Liu Y, et al. Progress in agriculture photovoltaic leveraging CPV, 2018, p. 110006. Doi: 10.1063/1.5053554.
- [54] Hirai D, Okamoto K, Yamada N. Fabrication of highly transparent concentrator photovoltaic module for efficient dual land use in middle DNI region. 2015 IEEE 42nd Photovolt. Spec. Conf., IEEE; 2015, p. 1–4. Doi: 10.1109/PVSC.2015.7355759.
- [55] M. Razeghi et al., "Evaluating the economic impact of solar energy on local industries in Semnan, Iran," *Future Sustainability*, vol. 3, no. 1, pp. 49–58, Feb. 2025, doi: 10.55670/fppl.fusus.3.1.5.
- [56] P. Jain, G. Raina, S. Sinha, P. Malik, and S. Mathur, "Agrovoltaics: Step towards sustainable energy-food combination," *Bioresour Technol Rep*, vol. 15, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100766.
- [57] A. Tabrizi, H. Yousefi, M. Abdoos, and R. Ghasempour, "Evaluating renewable energy adoption in G7 countries: a TOPSIS-based multi-criteria decision analysis," *Discover Energy*, vol. 5, no. 1, p. 2, Jan. 2025, doi: 10.1007/s43937-025-00064-w.
- [58] M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, "Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review," Jul. 02, 2021, MDPI AG. doi: 10.3390/su13147846.
- [59] Anatoli. Chatzipanagi, Nigel. Taylor, and Arnulf. Jaeger-Waldau, Overview of the potential and challenges for agri-photovoltaics in the European Union. Publications Office of the European Union, 2023.
- [60] S. Gorjian et al., "Technological advancements and research prospects of innovative concentrating agrivoltaics," *Appl Energy*, vol. 337, May 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120799.