Comprehensive Journal of Science
Volume (9), Issue (36), (Sept 2025)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد(9) ملحق العدد (36) (سبتمبر 2025)
ردمد: 3014-6266

نُظُم الطاقة الكهروضوئية وتطبيقاتها الزراعية: رؤية مستقبلية

نسرين المبروك قريميدة[1]، المنتصر بالله محمد القريقني[2]، أشرف يعقوب سويدان[3]
[1، 2] قسم تقنية الميكنة الزراعية، المعهد العالي للتقنيات الزراعية، الغيران، طرابلس، ليبيا
[3]قسم الحفر والموارد المائية، المعهد العالي للتقنيات الزراعية، الغيران، طرابلس، ليبيا

تاريخ الاستلام:2025/8/21 –تاريخ المراجعة: 2025/9/20– تاريخ القبول: 2025/9/25– تاريخ للنشر: 3/10/ 2025

الملخص :

نتيجةً لتزايد الطلب على الطاقة الكهروضوئية كعنصرٍ أساسي في استراتيجية التحول نحو الطاقة المستدامة في العديد من بلدان العالم، والتي تستخدم الأراضي الزراعية بشكلٍ مستدام، وللمحافظة على المناظر الطبيعية ورفاهية الإنسان، برزت نماذج ومناهج وقطاعات سوقية جديدة تأخذ في الاعتبار منظوماتٍ متكاملة. ومن ضمن هذه المنظومات المتكاملة الطاقة الكهروضوئية الزراعية كخيارٍ واعدٍ للغاية لتحقيق فوائد في العلاقة بين الغذاء والطاقة والماء. وقد تم تطوير مشاريع تجريبية في جميع أنحاء العالم، ونتج عن ذلك تبادلٌ للمعلومات والخبرات بين تلك الدول للوصول إلى حلولٍ متنوعةٍ ومناسبة، ثم تصميمها للوصول إلى النطاق التجاري استنادًا إلى اعتبارات الكفاءة في استخدام الماء والطاقة والإنتاجية الزراعية، مع الأخذ بعين الاعتبار الاهتمام بالآثار البيئية المرتبطة التي تؤثر في اختيار التصاميم المحددة والمناسبة للحفاظ على البيئة الزراعية والطبيعية.

لذلك، تستعرض هذه الدراسة خيارات التصميم التكنولوجية والمكانية المتاحة التي تُمكّن من تحديد السمات الرئيسية للنظام من منظورٍ متعدد التخصصات.

الكلمات الدالة:

الطاقة الكهرو زراعية – استخدام الأراضي – نمط الطاقة الكهروضوئية – الطاقة الكهروضوئية المتكاملة – الطاقة الشمسية – تقييم كفاءة الالواح الشمسية – كفاءة استخدام الماء بالألواح الشمسية.

Photovoltaic Energy Systems and Their Agricultural Applications: A Future Vision

Nesrin Elmabrouk Gremida1, Almuntaser Bella Mohamed Elgregni2, Ashraf Yaqoup Swidan3
1,2 Department of Agricultural Mechanization Technology, Higher Institute of Agricultural Technologies, Al-Ghiran, Tripoli, Libya
3 Department of Drilling and Water Resources, Higher Institute of Agricultural Technologies, Al-Ghiran, Tripoli, Libya

Abstract:

Due to the increasing demand for photovoltaic energy as a key component in the transition toward sustainable energy in many countries around the world—where agricultural land is used sustainably to preserve natural landscapes and human well-being—new models, approaches, and market sectors have emerged that take into account integrated systems. Among these integrated systems, agrivoltaics has appeared as a highly promising option to achieve mutual benefits within the food–energy–water nexus. Experimental projects have been developed worldwide, resulting in the exchange of information and experiences among these countries to reach diverse and suitable solutions, which are then designed to achieve commercial-scale applications based on considerations of water and energy use efficiency as well as agricultural productivity, while taking into account the associated environmental impacts that influence the selection of specific and appropriate designs to preserve agricultural and natural ecosystems.

Therefore, this study reviews the available technological and spatial design options that enable the identification of the key features of the system from a multidisciplinary perspective.

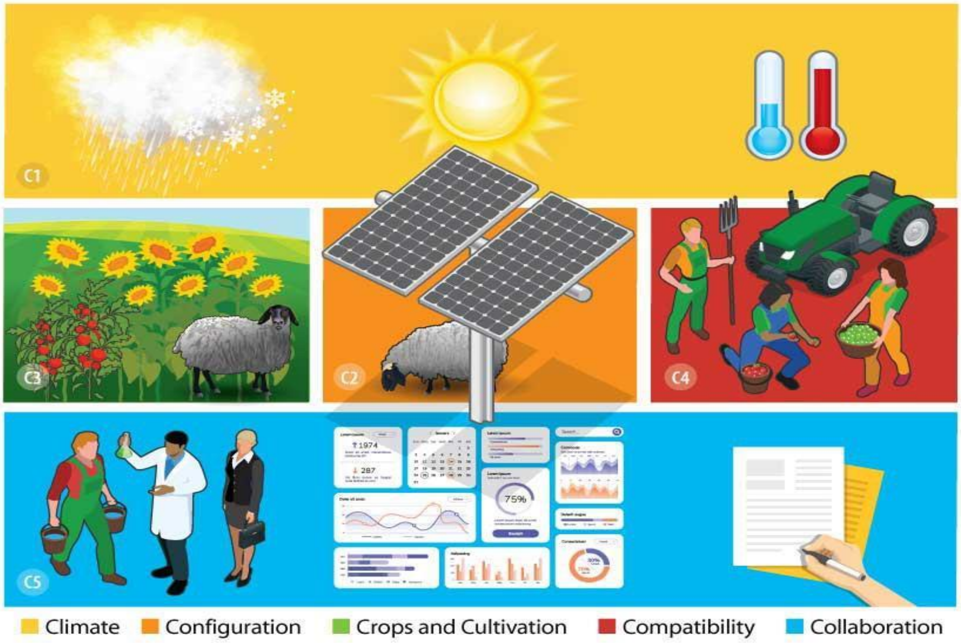
Keywords:

Agrivoltaics – Land use – Photovoltaic pattern – Integrated photovoltaics – Solar energy – Evaluation of solar panel efficiency – Water use efficiency in solar panels.

المقدمة:

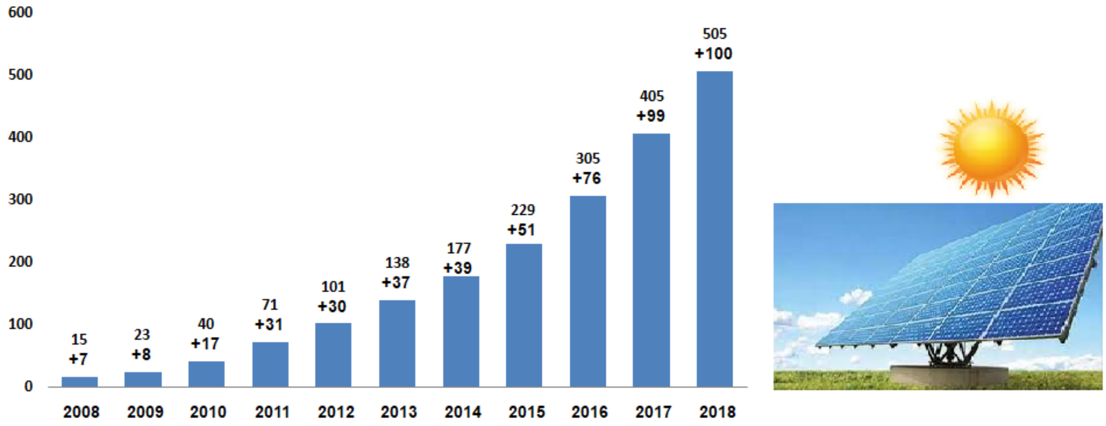
تُعتبر المياه والطاقة والغذاء من أهم الموارد الطبيعية لاستدامة الحياة على الكرة الأرضية (Goetzberger et al., 1982) (Proctor et al., 2021). إن المياه والطاقة والغذاء تواجه تحديات مشتركة تتمثل في محدودية الوصول إليها، وذلك بسبب زيادة الطلب العالمي عليها ووجود قيود لغرض استدامتها (Hernandez et al., 2019). وبسبب التزايد المتسارع في عدد السكان، زاد الطلب عليها بشكل كبير، وحسب توقعات الأمم المتحدة (UN, 2022) سوف يزداد عدد السكان من (8.5) مليار نسمة إلى (9.7) مليار في سنة 2015. (Valle et al., 2017) (Weselek et al., 2019) وقد يصل إلى (10.4) مليار في سنة (2080) وفقًا لمنظمة الأغذية والزراعة (FAO) سوف يُطلب من المزارعين زيادة الإنتاج الزراعي، خاصة في الدول النامية (Dupraz ,et al 2011). وهذه البلدان سوف تواجه قيودًا تتعلق بزيادة التنافس للحصول على المياه والطاقة والغذاء، ولمنع زيادة آثار التغير المناخي المتسارع. ونرى أن زيادة إنتاج الغذاء قد تصل إلى (60%) لتلبية الاحتياجات الأساسية للحياة (Sekiyama & Nagashima, 2019) وهذا يستدعي تغيير الأنظمة الغذائية.(Mavani et al., 2019) ولعل أهم مشاكل هذه التنمية القيود المرتبطة بالحصول على المياه والطاقة للري، من خلال توصيل المياه للمزارع باستخدام أنظمة اصطناعية (artificial systems) لتلبية الاحتياجات المائية عبر الري الزراعي، بسبب عدم كفاءة الأمطار في تلبية احتياجات المحاصيل ونموها.(Babatunde et al., 2019) والحقيقة أن تقنيات الري المتطورة المتوفرة حاليًا لضخ مياه الري تحتاج إلى زيادة كبيرة في متطلبات الطاقة لتشغيل شبكات الري واستمرارية الإمدادات المائية. ولذلك ظهرت وجهات نظر جديدة في استخدام الطاقة المتجددة (Renewable Energy) في أنظمة الري كبديل لضخ الماء بدلًا من الوقود الأحفوري.(Kostik etal., 2020)

إذا علمنا أن ارتفاع تكلفة إنتاج الكهرباء في المناطق الريفية وارتفاع أسعار الوقود قد يؤثر سلبًا على تشغيل أنظمة الري، مما يجعل اللجوء لاستخدام الألواح الشمسية الكهروضوئية خيارًا مفضلًا، لما تتميز به من مزايا بيئية وتكلفة أقل مقارنة بالوقود الأحفوري(AL–Saidi & Lahham, 2019) . وقد شهد العالم تقدمًا ملحوظًا ومتسارعًا في الابتكارات المميزة في استخدام الطاقة البديلة، كما هو مبين في الشكل (1) ، حيث شكّلت الطاقة المتجددة حوالي (20%) من الاستهلاك العالمي للطاقة، وكان للطاقة الشمسية الاستثمار الأكبر بنسبة (60%)، تليها طاقة الرياح بنسبة (030%).(Miao & Khanna, 2019) تكمن أهمية الطاقة الكهروضوئية في كونها أسلوبًا صديقًا للبيئة ومجزِئ اقتصاديًا مقارنة بطرق الري التقليدية (Babatunde, et al.,2019) AL–Saidi & Lahham, 2019) وتُعتبر الألواح الشمسية الكهروضوئية (Solar Photovoltaic Energy) أحد الحلول الرائدة في استخدام الطاقة الشمسية في العالم كما مبين في شكل (2)، وقد شهدت انخفاضًا مستمرًا في تكلفتها.



شكل (1) يوضح التطبيقات المختلفة في استخدام الطاقة البديلة

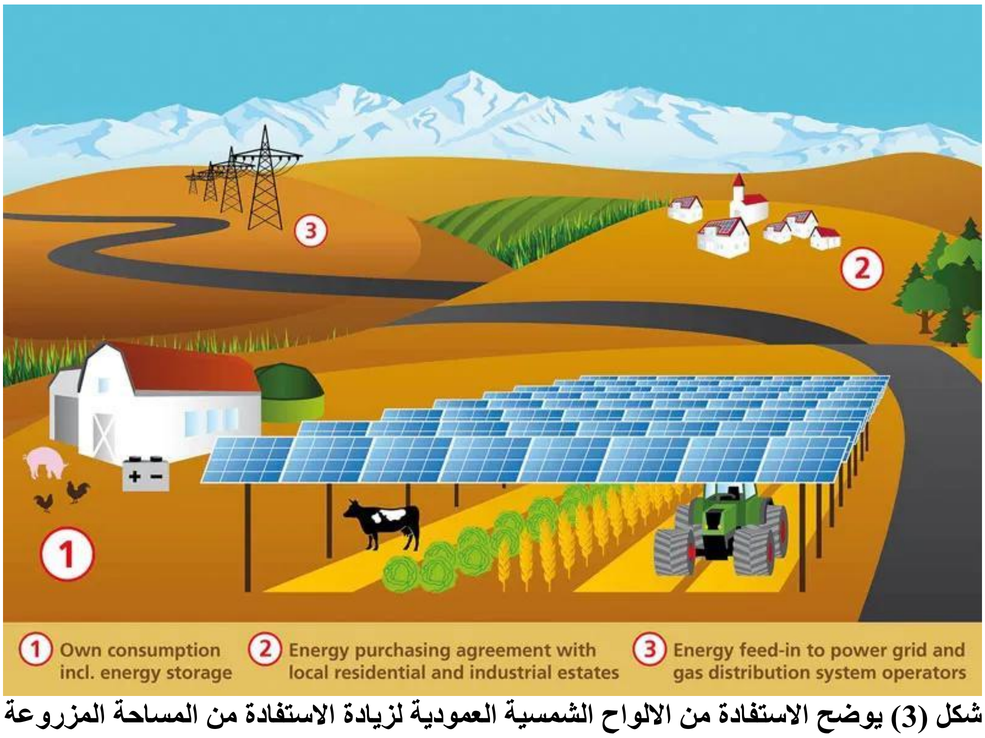
The National Renewable Energy Laboratory (NREL) August 18, 2022 article "Growing Plants, Power, and Partnerships Through Agrivoltaics"



شكل (2) يوضح معدل استخدام الطاقة الشمسية عالميا في الفترة من 2008-2018

ويتوقع الخبراء أن تشكل الطاقة الشمسية حوالي (25%) من طاقة الكهرباء المنتجة في سنة (2025)، وهذا يعني انخفاضًا قدره (4.9 Gton)من ثاني أكسيد الكربون، وهو ما يشكّل انخفاضًا في الانبعاثات بمقدار (8%) من إجمالي انبعاثات قطاع الطاقة (Lytle, et al 2021).

هناك بعض أراء بأن استخدام الألواح الشمسية لضخ مياه الري يمكن أن يقلل من المساحات المزروعة نظرا للمساحة التي تشغلها الألواح الشمسية ولعل أحد أهم هذه الحلول تبني رفع الألواح الشمسية لاستخدام المساحات الموجودة أسفلها لأغراض زراعية (Adeh,et al,2019)



شكل (3) يوضح الاستفادة من الالواح الشمسية العمودية لزيادة الاستفادة من المساحة المزروعة

Adapted from Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2024): Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition – A Guideline for Germany

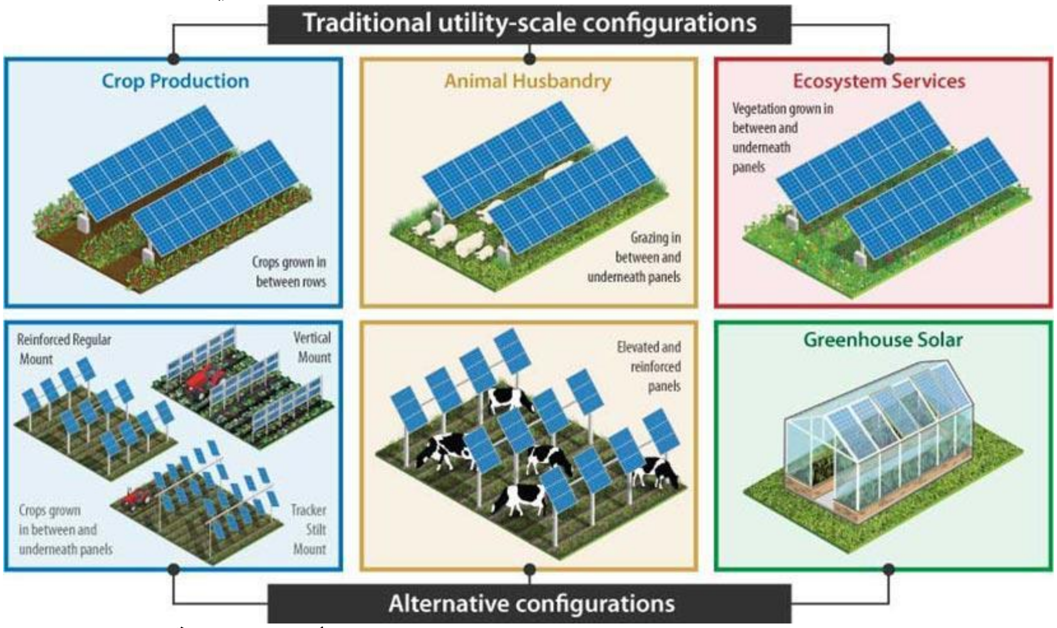
النظام الموضح في الشكل (3) سوف يخفف من مشاكل هذا النظام (Cuppari, et al, 2021) وبحسب (Li, et al, 2017) استخدام الألواح المزدوجة المرفوعة لأعلى قد تؤثر على المناخ المحلي (micro climatic) درجة الحرارة والإشعاع الشمسي والتنوع البيولوجي (biodiversity) والمياه ونوعية الهواء وتوازن النظام البيئي–الطاقة loco system– energy balance ونظرا لتأثير الألواح الشمسية على المحاصيل قدمت العديد من الدراسات في إعادة تصميم أفضل الالواح لتضمن انتاج المحاصيل ويمكن التركيز بشكل أساسي على ارتفاع الالواح والمسافات المناسبة لتهيئة بيئة مناسبة للمحاصيل التي تكون اسفل هذه الالواح وذلك بالنظر للتصاميم من خلال ادبيات الدراسات المتوفرة والتركيز على النجاحات والأخطاء.

ويهدف هذا البحث للتركيز على الأشعة الشمسية تحت مصفوفة الألواح الشمسية (PV array) وتقدير كمية التظليل الناتج من الالواح على المحاصيل مع التركيز على ترتيب الألواح واتجاهها وتأثير هذا على نموذجة الأداء الهجين على إنتاجية المحصول والظروف الجوية والاشعاع وارتفاعات الالواح.

التعريفات والمصطلحات:

الزراعة الكهروضوئية (agrivoltics) هو مفهوم عرف سنة 1980(D'Adamo& Rossa, 2020) ، وهو نظام يعتمد على مفهوم استخدام الأراضي بدمج مباشر بين إنتاج الطاقة الشمسية والأنشطة الزراعية التي تمارس في إطار تركيب الطاقة الكهروضوئية حقليا ويعتمد كلاهما على ضوء الشمس (Chamara & Beneragama, 2020) والحقيقة أن للزراعة الكهروضوئية عدة أسماء تختلف باختلاف المنطقة والتطبيق (Li & Ma, 2020) مثل:

1- الاستخدام المزدوج (dual-use)
2- التشارك في الموقع(co-locative)
3- الزراعة الكهروضوئية (agri-pv)
4- الزراعة الشمسية (agri-solar)
5- مشاركة الطاقة الشمسية (solar sharing)
6- الطاقة الشمسية الصديقة للملحقات (pollinator-friendly solar) كما هو مبين في الشكل (4)



شكل (4) يوضح الاستخدامات المتعددة للألواح الشمسية

The National Renewable Energy Laboratory (NREL) August 18, 2022 article "Growing Plants, Power, and Partnerships Through Agrivoltaics"

ان لتكنولوجيا الطاقة الكهروضوئية دورا هاما في تعزيز العلاقة بين الماء والطاقة والغذاء. (Kussul, et al 2020) وهي علاقة تكافلية ان صح التعبير بين النشاط الزراعي والبيئي ويستفيدان من هذه المشاركة حيث يمكن تطبيق وتنفيذ ممارسات زراعية كهروضوئية بطرق مختلفة تبعا للأنشطة السكانية في معينة وهذه الطاقة الكهروضوئية الزراعية مزيج من الطاقة مع الإنتاج الزراعي الحقلي او الإنتاج الزراعي والبيوت المحمية أو تربية الماشية أو توفير خدمات النظام البيئي من خلال إدارة الغطاء النباتي أو القيام بممارسات زراعية مختلفة (Marrou, et al 2013) .أثبتت الدراسات المتعددة (Kumar, et al 2021) أن الطاقة الكهروضوئية الزراعية تعمل على الحفاظ على التوازن بين القطاع الزراعي وقطاع الطاقة والإنتاج الغذائي باستخدام مزدوج وبالتالي يقلل من القيود الموضوعة على استخدام الطاقة والماء. وبالتالي يزيد من كفاءة انتاج التربة (Dos Santos, 2020) وذلك من خلال استخدام معامل نسبة تكافؤ الأراضي (LER) (Parameter Land Equivalence Ratio)وهي طريقة تستخدم لقياس استخدام الأراضي في أنظمة الزراعة الكهروضوئية (زراعة–كهرباء) شكل متكامل لزيادة الإنتاجية وإجمالي الدخل وهذه الطريقة دلت إن الزراعة الكهروضوئية تعمل على زيادة الإنتاجية الإجمالية بنسبة تراوحت ما بين (35%–37%) (FAO, 2002). وزيادة الإنتاج الزراعي بالنسبة للأراضي بمقدار (60%–70%) (Andrew, et al 2021)، وبالتالي زيادة القيمة الاقتصادية بمقدار أكبر من (30%) وهذا يعود لتقليل الخسائر الناتجة من التظليل واختيار المحصول المناسب (Leon & Ishiara, 2018) وكما أن هذه الكفاءة ارتفعت في الأماكن الجافة أكثر من (90%) في المناخ الجاف والحار على الرغم من أن الطاقة الكهروضوئية الزراعية ذات كفاءة أقل من التقليدية.

نبذة تاريخية عن استخدام الزراعة الكهروضوئية Agrivoltaics :

بدأ استخدام الزراعة الكهروضوئية (Agrivoltaics) بشكل تجريبي في أوائل الثمانينات، لكن أول مشروع علمي موثق كان في 1981 في اليابان، حيث ثم تم وضع ألواح شمسية فوق المحاصيل لدراسة التأثير المتبادل بين الزراعة والطاقة. (Goetzberger. & Zastrow, 1982)

نتيجة الطلب العالمي المتزايد على الغذاء، المرتبط بالنمو السكاني، يجب تحسين إنتاجية الأراضي الزراعية. إضافةً إلى ذلك، سيزداد الطلب على الطاقة، وخاصةً الكهرباء، في السنوات القادمة، مما سيؤدي إلى زيادة المساحة المخصصة لمنشآت الطاقة الشمسية. ومع ذلك، يتعارض هذا التطور مع الإنتاج الزراعي، ومن المؤكد أن المنافسة على الأراضي ستحدث. ولحل هذه المشكلة، اقتُرح لأول مرة عام 1982 دمج هذين النوعين من الإنتاج في نفس المساحة تحت مصطلح الطاقة الشمسية الكهروضوئية الزراعية .(Widmer2024) الزراعة الكهروضوئية هي حل مبتكر يجمع بين الإنتاج الزراعي والطاقة الشمسية، مما يتيح زراعة المحاصيل وتوليد الكهرباء في آنٍ واحد. تسمح الألواح الشمسية شبه الشفافة بمرور ضوء الشمس إلى المحاصيل بينما توفر لها الحماية من الظروف الجوية القاسية وتعزز من الإنتاجية الزراعية. تتميز أنظمة الزراعة الكهروضوئية من (Brite Solar) بدمج تقنيات النانو في ألواحها الشمسية شبه الشفافة. تحتوي هذه الألواح على جسيمات نانوية متخصصة تعمل على تحسين إدارة الضوء من خلال تحويل الأشعة فوق البنفسجية إلى الطيف الأحمر، وهو أكثر فائدة لعملية التمثيل الضوئي. وهذا ما يجعلها حلاً مستدامًا للمزارعين الحديثين. عند تنفيذها بشكل صحيح، يمكنها زيادة إنتاجية المحاصيل، وتقليل الأثر البيئي، وتحسين الاستدامة الاقتصادية للمزارع .(Belos,2025)

تبرز أهمية هذه الأنظمة بشكل واضح في البلدان التي لا تتوفر فيها المساحات الواسعة لتركيب أنظمة الطاقة الكهروضوئية، فيأتي هذا النوع من الأنظمة كحل يتم فيه استخدام الأراضي بشكل مزدوج للزراعة وإنتاج الطاقة في وقت واحد. عند تصميم هذه الأنظمة ينبغي الأخذ في الاعتبار الإنتاجية الكهربائية وإنتاجية المحاصيل الزراعية حيث أن إنتاجية المحاصيل الزراعية سوف تختلف مقارنة مع إنتاجية المحاصيل المزروعة بشكل تقليدي وذلك بناءا على نوع المحصول المزروع، وموقع المشروع وتصميمه. (نضال نصار 2022).

الزراعة الكهروضوئية تؤدي الى تحسين استخدام الأراضي من خلال الجمع بين إنتاج الغذاء والطاقة في نفس المساحة، كما أن ظل هذه الألواح الشمسية يحسن ظروف النمو لبعض المحاصيل، خصوصا في المناطق ذات الإشعاع الشمسي، ويجب التنوع في تصميم أنظمة الألواح الشمسية يمكن أن يحقق توازنا بين إنتاج الطاقة والإنتاج الزراعي. (Asa'a et al 2024)

في عام 2004، طور العالم الياباني أكيرا ناغاشيما أول نظام زراعة كهروضوئية مفتوحة الحقل في محافظة تشيبا. ابتكر هيكلا قابلا للتفكيك يمكن تعديله وفقا لاحتياج المحاصيل، وهذا الابتكار سمح بزراعة أكثر من 120نوعا من المحاصيل تحت الألواح الشمسية. تم تسجيل 1992 مزرعة كهروضوئية بحلول عام 2019 في 46 محافظة من أصل 47 محافظة يابانية، تغطي مساحة إجمالية 560 هكتارا. (Tajima & Lida 2021)

تقدم الزراعة الكهروضوئية حلاً لتحديين رئيسيين في عصرنا وهما زيادة إنتاج الغذاء لإطعام 9.8 مليار شخص بحلول عام 2050، والتحول من الوقود الأحفوري إلى الطاقة الخضراء – وهما هدفان يتطلبان مساحات شاسعة من الأراضي التي تتناقص باستمرار. كما تُوفّر زراعة المحاصيل تحت الألواح الكهروضوئية المياه وتُمكّن من إنتاج الغذاء في المناطق الجافة والحارة. في عام 2019، ومع توقع انخفاض أسعار الألواح الشمسية بنسبة تصل إلى 15%، ستصبح الطاقة الكهروضوئية الزراعية هي السائدة في القطاع الزراعي، ان تقنية دمج الألواح الشمسية مع النباتات ليست مفيدًة للمحاصيل فحسب، بل قد تزيد أيضًا من إنتاج الطاقة المتجددة. فعندما تصل درجات حرارة الألواح الشمسية إلى 25 درجة مئوية أو أكثر، تنخفض كفاءتها. لكن الاكتشاف غير المتوقع لمشاريع صحراء سنوران هو أن المحاصيل التي تتبخر تحت الألواح تُحدث ما يُطلق عليه قائد المشروع، جريج بارون-جافورد، وهو عالم جغرافيا حيوية في جامعة أريزونا، "تأثير التبريد التبخيري"، الذي يُبرّد الجانب السفلي من الألواح الشمسية ويُحسّن كفاءتها. (Bryce, 2019)

أعاد معهد فراونهوفر في ألمانيا إ حياء فكرة أنظمة الطاقة الشمسية في عام 2014 من خلال مشروع APV-RESOLA، وتم تركيب نظام بقدرة 194 كيلووات على ارتفاع 5 أمتار فوق الأرض في مزرعة Heggelbach . اوضحت النتائج زيادة في كفاءة استخدام الأرض بنسبة تتراوح بين 60% - 86%، مع الحفاظ على إنتاجية المحاصيل بنسبة تصل 80%. (Fraunhofer ISE 2019, 2024)

تركيب الألواح الشمسية فوق المحاصيل يمكن أن يزيد إنتاجية الأراضي الزراعية بنسبة 60% مقارنة باستخدامها للزراعة او للطاقة فقط. (Weselek, et al 2021)، إن التكامل بين الزراعة والطاقة الشمسية يمكن أن يزيد من إنتاجية المحاصيل بنسبة تصل 20-06 % بسبب تحسين البيئة الزراعية كما ان الزراعة الكهروضوئية يمكن أن تقلل من استهلاك المياه، مما يساهم من زيادة كفاءة الموارد المائية .(Widmer, 2024)

تجمع الطاقة الشمسية الكهروضوئية والكهربائية المائية بين إنتاج الطاقة المتجددة والزراعة وتربية الأحياء المائية. تتضمن الطاقة الشمسية الكهروضوئية الزراعية تركيب ألواح شمسية على الأراضي الزراعية، بينما تدمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية الأنظمة الكهروضوئية مع المسطحات المائية وتربية الأحياء المائية. تتناول هذه الورقة البحثية فوائد وتحديات الطاقة الشمسية الكهروضوئية والكهربائية المائية، مع التركيز على إمكاناتها للزراعة الكرواتية وتربية الأحياء المائية في المياه العذبة. تشمل الفوائد الاستخدام المزدوج للأراضي، مما يسمح للمزارعين بإنتاج طاقة نظيفة مع الحفاظ على الممارسات الزراعية. كما أنها تُنوّع مصادر الطاقة المتجددة وتُقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري. توفر الألواح الشمسية في الطاقة الشمسية الكهروضوئية الزراعية الظل، وتحمي المحاصيل، وتُقلل من احتياجات المياه، وتُزيد من الغلة. تشمل التحديات ارتفاع التكاليف الأولية ومحدودية إمكانية الوصول، وخاصةً لصغار المزارعين.(Matulić, et al 2023)

يعتمد نجاح الزراعة الكهروضوئية على خمسة عوامل رئيسية (التصميم الهندسي المناسب للألواح الشمسية، إدارة المياه والري، احتيار المحاصيل المناسبة، التعاون بين الزراعة والطاقة، ودعم السياسة الحكومية التي تسهم في تشجيع التكنولوجيا) ، عند توفر

العوامل الخمسة السابقة يمكن للزراعة الكهروضوئية أن ترفع إنتاجية المحاصيل بنسبة 30 –50 %مقارنة بالزراعة التقليدية.(Macknick, 2022)

فوائد الزراعة الكهروضوئية: (Belos,2025)

1. زيادة إنتاجية المحاصيل
   - تقليل الإجهاد الحراري من خلال توفير الظل الجزئي، مما يعزز نمو النباتات.
   - التحكم في الإشعاع الشمسي لحماية المحاصيل من درجات الحرارة المرتفعة والبرودة الشديدة.
2. توفير المياه
   - تقلل الألواح شبه الشفافة من تبخر المياه من التربة، مما يقلل الحاجة إلى الري.
   - تساعد الحماية من الرياح على الاحتفاظ برطوبة التربة.
3. حماية المحاصيل
   - تحمي من البَرَد والأمطار الغزيرة والإشعاع فوق البنفسجي الضار.
   - تعمل كحاجز ضد الظروف المناخية القاسية التي قد تؤثر على الإنتاج الزراعي.
4. الاستقلالية في إنتاج الطاقة للمزارع
   - يمكن للمزارعين تقليل تكاليف الطاقة من خلال استخدام الطاقة الشمسية في الري والتخزين وتشغيل المعدات.
   - يمكن بيع الطاقة الفائضة إلى الشبكة الكهربائية، مما يوفر مصدر دخل إضافي.
5. الجدوى الاقتصادية وفرص الاستثمار
   - تعمل الزراعة الكهروضوئية على زيادة قيمة الأراضي الزراعية وجعلها أكثر إنتاجية.
   - تتوفر حوافز حكومية وبرامج دعم لتشجيع تنفيذ هذه الأنظمة.

تطبيقات الزراعة الكهروضوئية:

1. المحاصيل متوسطة وقصيرة الارتفاع: مثالية لزراعة الكروم والخضروات والفراولة والأعشاب وغيرها من المحاصيل الحساسة لأشعة الشمس الزائدة.
2. البيوت الزجاجية ذات الاستقلالية الطاقية: يمكن تركيب الألواح الشمسية على البيوت الزجاجية لتوفير طاقة مستدامة وتحسين المناخ الداخلي.
3. الزراعة في الحقول المفتوحة: المناسبة للمناطق التي تحتاج إلى ظل جزئي لحماية المحاصيل من الحرارة الزائدة. (2025 Belos,)

أنواع الزراعة الكهروضوئية:

1. الأنظمة الثابتة :(Fixed Tilt Systems)

في هذه الأنظمة، تُركب الألواح الشمسية بزاوية ثابتة فوق المحاصيل. تُعتبر هذه الأنظمة بسيطة من حيث التصميم وأقل تكلفة في التركيب والصيانة، لكنها قد تكون أقل كفاءة في إنتاج الطاقة مقارنة بالأنظمة المتحركة. (NREL,2022)

شكل (5): يوضح أنظمة الزراعة الكهروضوئية الثابتة

(Trommsdorff, Gruber, Keinath, Hopf, Hermann, Schönberger, Gudat, Boggio, Gajewski, Högy 2024)

2. الأنظمة المتتبعة للشمس: (Tracking Syste)

تستخدم هذه الأنظمة آليات لتتبع حركة الشمس، مما يزيد من إنتاجية الطاقة. يمكن أن تكون هذه الأنظمة ذات محور واحد أو محورين، وتُستخدم بشكل متزايد في الزراعة الكهروضوئية لتحسين التوازن بين إنتاج الطاقة والنمو الزراعي. (GoGreenner 2025)

شكل (6): يوضح أنظمة الزراعة الكهروضوئية المتتبعة للشمس

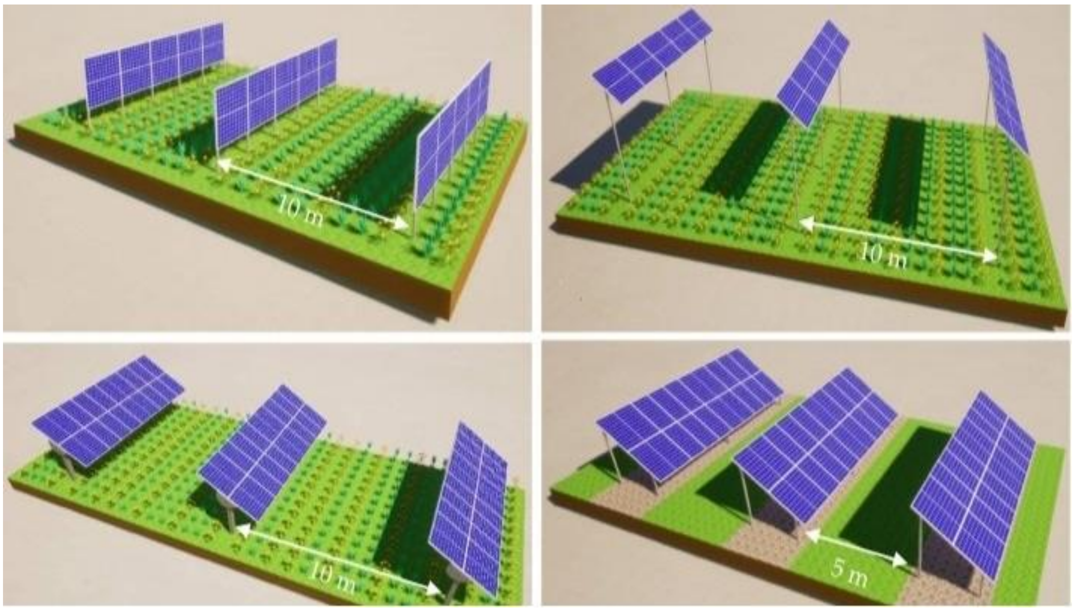
(Trommsdorff, Gruber, Keinath, Hopf, Hermann, Schönberger, Gudat, Boggio, Gajewski, Högy 2024)

3. الأنظمة المتكيفة: (Dynamic Agrivoltaics)

تُستخدم في هذه الأنظمة تقنيات ذكية مثل الحساسات والذكاء الاصطناعي لضبط زاوية الألواح أو ارتفاعها حسب احتياجات النبات والطقس، مما يحقق توازنًا أفضل بين إنتاج الكهرباء والمحصول الزراعي. (Asa'a , et al 2024)

تتزايد التأثيرات السلبية لتغير المناخ على القطاع الزراعي، حيث أصبحت الظواهر الجوية المتطرفة مثل الجفاف، موجات الحر، الصقيع، والأمطار الغزيرة أكثر تكرارًا وحدة. وفي مواجهة هذه التحديات، يبرز نظام (DAV)كحل مبتكر يجمع بين حماية المحاصيل الزراعية والمساهمة في ضمان الأمن الغذائي، إلى جانب دعم التحول العالمي نحو الطاقة المتجددة.

تصدرت شركة (Sun'Agr) الفرنسية، المتخصصة في تطوير أنظمة الزراعة الكهروضوئية الديناميكية الأبحاث العالمية المتعلقة بأنظمةDAV على مدار أكثر من 15 عامًا حيث أجرت دراسات على أكثر من 20 نوعًا من المحاصيل، بما في ذلك المحاصيل الحقلية، والبستانية، وكروم العنب، وأشجار الفاكهة. وقد شملت هذه الأبحاث تجارب ميدانية على محاصيل نُمت تحت مستويات مختلفة من التظليل باستخدام أنظمة DAV الديناميكية، بهدف تقييم تأثير استراتيجيات التظليل المتنوعة على المحصول من حيث الكمية والجودة، إلى جانب دراسات موسعة على نطاق تجاري لجمع البيانات الواقعية.



شكل (7): يوضح الأنظمة الزراعة الكهروضوئية المتكيفة

https:/metsolar.eu/blog (2020)

كشفت النتائج أهمية الإدارة الذكية للألواح الشمسية، بحيث تتيح نفاذ الضوء إلى النباتات في الأوقات الحرجة، حتى لو تطلب الأمر تقليل إنتاج الطاقة مؤقتًا. ويعتمد نظام DAV على أجهزة تتبع شمسية تُثبت فوق المحاصيل باتجاه شمال–جنوب، حيث تدور الألواح تلقائيًا لتوفير تظليل متغير وفقًا لاحتياجات المحاصيل الضوئية خلال فترات النهار وعلى مدار الموسم الزراعي. ولا يقتصر دور DAV على تحسين جودة ونمو النباتات من خلال ضبط دقيق للإضاءة والتظليل، بل يمتد أيضًا لحماية المحاصيل من المخاطر المناخية، مما يجعله خيارًا مستقبليًا واعدًا لتحقيق زراعة أكثر استدامة ومرونة في وجه التغيرات المناخية. (Fumey, et al 2024)

4. الأنظمة الرأسية: (Vertical Agrivoltaics)

توضع الألواح بشكل عمودي بين صفوف المزروعات. هذا التصميم يوفر مساحة ويقلل من تأثير الظل، ومفيد في المناطق ذات الأراضي المحدودة. (Sani Ibrahim & Kumari, 2020)

في دراسة أجريت في الدنمارك، تم تركيب نظام زراعة كهروضوئية باستخدام ألواح شمسية ثنائية الوجه بقدرة 89 كيلوواط، تم توزيعها بشكل رأسي ومائل. استمرت المراقبة لمدة عام كامل، وشملت متغيرات مناخية محلية، وإنتاج الطاقة الكهربائية، وإنتاجية محاصيل القمح وخليط البرسيم المزروع بين صفوف الألواح. أظهرت النتائج أن الألواح الشمسية الرأسية ساهمت في كسر شدة الرياح، مما أدى إلى مستويات إنتاجية زراعية مماثلة لتلك المسجلة في الحقول المفتوحة، بل وتفوقت على الأنظمة المائلة بزاوية 25 درجة والموجهة جنوبًا. إضافة إلى ذلك، تميزت أنظمة الألواح الرأسية بنمط إنتاج يومي يتوافق بشكل أفضل مع منحنى الطلب على الكهرباء. (Lindhardt, et al 2023)

شكل (8): يوضح الأنظمة الزراعة الكهروضوئية الرأسية

(Trommsdorff, Gruber, Keinath, Hopf, Hermann, Schönberger, Gudat, Boggio, Gajewski, Högy 2024)

5. الأنظمة العائمة: (Floating Agrivoltaics)

تُركب الألواح الشمسية على سطح الماء (مثل البرك أو الخزانات) وتُستخدم للزراعة المائية أو القريبة من مصادر المياه، وتساعد في تقليل تبخر الماء. تم اجراء تجربة على بحيرة ناصر في مصر توضح كيف أن تغطية 50% من البحيرة بالألواح الشمسية العائمة يمكن أن تقلل من التبخر بنسبة تصل إلى 61.71 %.(Gad & El-Din 2023)

شكل (9): يوضح الأنظمة الزراعة الكهروضوئية العائمة

(Carranza, Malheiros, Faria, Silva, & Mierzwa, 2022).

كيفية تقليل السموم الخضراء باستخدام الزراعة الكهروضوئية:

1. تقليل الحاجة للمبيدات: الالواح الشمسية توفر ظلا جزئيا للنباتات، وهذا يقلل من نمو الأعشاب الضارة، وبالتالي تقل الحاجة لاستخدام مبيدات الأعشاب.
2. تقليل تبخر المياه: الظل الناتج من الألواح الشمسية يقلل من تبخر المياه، مما يقلل من تركيز الأسمدة في التربة والمياه الجوفية، ويقلل من إضافتها بكثرة.
3. تحسين المناخ المصغر حول النبات: الظل الناتج يساعد على خفض درجات الحرارة، مما يقلل من انتشار الآفات التي تنمو في بيئات حارة وبالتالي تقق من استخدام المبيدات.

4. إنتاج طاقة نظيفة تقلل من التلوث: باستخدام الطاقة الشمسية في تشغيل مضخات الري او أدوات الزراعة، يقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري، وبالتالي تقلل من التلوث البيئي.
5. تشجيع الزراعة العضوية: هذا النظام يستخدم غالبا في المزارع التي تهتم بالاستدامة والبيئة، وبالتالي يقلل من الاعتماد على الكيماويات الضارة. (Weselek, et al 2021)

ويمكن الأزر بين الماء والطاقة والغذاء هذا النظام عمل على تقليل الخسائر ويمكن التأكد من دقة المعلومات باستخدام المعادلات التالية:

$$LER = \frac{Y_X\,(dual)}{Y_X\,(mono)} + \frac{Y_y\,(dual)}{Y_y\,(mono)} \qquad \text{..............................(1)}$$

$$LER = \frac{Y_X\,(dual)}{Y_X\,(mono)} + \frac{Y_y\,(dual)}{Y_y\,(mono)} + 8.3\% \qquad \text{.............................. (2)}$$

حيث أن:

LER : كفاءة النظام قيمة ($LER \geq 1$) تشير على كفاءة النظام متكامل وأكثر فعالية في إنتاج المحاصيل منفردة بدون طاقة كهربائية.

$Y_X\,(dual)$: الإنتاجية الزراعية في حال استخدام وحدة نظام الزراعة الكهروضوئية لنفس المنطقة.

$Y_X\,(mono)$: الإنتاجية الزراعية في حال استخدام وحدة ا لأرض فقط لنفس المنطقة.

$Y_y\,(dual)$: إنتاجية الكهرباء في ظل نظام كهروضوئي قياسي .

$Y_y\,(mono)$: إنتاجية النظام الزراعي الكهروضوئي.

8.3% : ثابت الأمان .

وهذه الصيغة الرياضية التي اقترحها (Tkommsdorff, et al 2022) لحساب معامل كفاءة الطاقة والصيغة الثانية لمراعاة ارتفاع خسارة الأرض بسبب المساحة التي يشغلها هياكل تركيب الألواح الشمسية الكهروضوئية.

كفاءة استخدام المياه بالألواح الشمسية:

يمكن قياس ثابت تصميم الطاقة الشمسية الكهروضوئية للإنتاج الزراعي من خلال كفاءة استخدام المياه (WUE) بالمعادلة التي اقترحها (Yano, et al 2014) وحسب (Amaducci, et al 2018) هي تنمية مستدامة ويتم تقدير كفاءة استخدام المياه كوحدة كتلة حيوية لكل وحدة مياه مستخدمة (Kg/m^3) باستخدام المعادلة:

$$WUE = \frac{WUE_{pv} - WUE_{cont}}{WUE_{cont}} \qquad \text{.. .... (3)}$$

حيث أن:

WUE : كفاءة استخدام *المياه* (Kg/m^3).

WUE_{pv}:كفاءة استخدام المياه تحت الألواح الشمسية.

WUE_{pv} :كفاءة استخدام المياه تحت الظروف الزراعية التقليدية.

مناقشة النتائج والخلاصة:

يسعى هذا البحث الي تحسين الطاقة والهندسة وتطوير تقنيات جديدة والاختيار الصحيح لأنواع النباتات الملائمة لأنظمة الطاقة الكهروضوئية. حيث من المتوقع حدوث تطور في الطاقة الكهروضوئية–الزراعية من زيادة الكفاءة للوصول لأكثر ربحية من خلال التآزر السليم والصحيح بين الطاقة والماء لإنتاج الغذاء وهو مجال واعد في ضوء تحسين الأداء البيئي للأنظمة الزراعية مؤديا لزيادة في الاقتصاد وفي مجالات الطاقة والزراعة ومجمع الالواح الشمسية. (Guo, et al 2013)

الحقيقة أن الطاقة الكهروضوئية هي نظام ذو ثلاثة أبعاد (تكنولوجيا الطاقة الشمسية، الزراعة، الهندسة) والأخذ بعين الاعتبار المناظر الطبيعية لأنظمة الالواح الشمسية. (Higgins & Najm, 2020) ويمكن تعزيز هذه الأنظمة عند استخدامها في البيئة

المحمية لرفع مستوى كفاءة استخدام الماء وتطوير هندسة البيوت المحمية المرتبطة بالألواح وتطوير نظم الري المصاحبة. (Moswetsi, et al 2017)

رؤية استشرافية لاستخدام الطاقة الكهروضوئية:

من خلال التحليلات السابقة ووفق(Li, et al 2017) (Santra, et al 2017)هناك اتجاهات وتطبيقات مستقبلية ترسم ملامحها بحيث تصبح المزارع الكهروضوئية أنظمة ذكية بالكامل تدار تلقائيا لتوازن بين الظل والضوء بناءا على بيانات الأقمار الصناعية وأجهزة الاستشعار عن بعد بما يسمى الكفاءة الشاملة لاستخدام الأرض (Land use Efficiency) و الزراعة التكيفية (Adaptive Agriculture) بالإضافة للطاقة الكهروضوئية العضوية (Organic Photovoltaic Energy) وذلك لصنع خلايا من مواد بوليميرية شبه شفافة ومرئية وهناك تصور لدمج الزراعة العمودية بالكامل مع الكهروضوئية (Vertical Farming with PV Integration) وذلك حسب الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRE NA) ومعهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية Fraunhofer ISE (Lytle, et al 2012) (Sani Ibrahim & Kumari, 2020)

الخلاصة والتوصيات:

رغم أن الطاقة الكهروضوئية بدأ العمل عليها 1980 لم تجرى سوى القليل من التجارب ولم يبدأ مطلب العمل الميداني الا سنة 2011 وزاد الطلب عليها بوضوح في السنوات الأخيرة. ومع تطور التقنيات الجديدة واختيار النموذج الملائم الى جانب التقدم المستمر، أدى النجاح العديد من التجارب الدولية من خلال مشاريع تجريبية تطبق حلول وتقنيات الطاقة الكهروضوئية المختلفة حيث لاقت قبولا كبيرا في الصناعة والحكومات الباحثة عن حلول مستدامة في الطاقة والغذاء والبيئة. (Welsek, et al, 2021) ويعتبر هذا النوع من الزراعة مثال جيد لبناء الزراعة المتكاملة Building integrated Agriculture (Chen, et al 2018) ولذلك يتوقع زيادة في عديد المنشآت في المستقبل القريب خاصة عند التركيز على كفاءة نظام الطاقة الكهروضوئية (زيادة الربحية الزراعة) مع تعزيز قضايا التحول البيئي والحضري. وللطاقة الكهروضوئية أنماط رباعية الابعاد للمناطق الطبيعية كحلول في مجالات الطاقة والزراعة والمجتمع والبيئة، وهذا النوع من الطاقة الكهروضوئية يتطلب تأزر الهندسة والزراعة والبيئة والمناظر الطبيعية.

المراجع العربية:

1- نضال نصار (2022): أنظمة الطاقة الشمسية الكهرو ضوئية الزراعية (agri PV). ماهي؟ وما أهميتها؟، ذاسولارست : مايو ، لبنان.

. **المراجع الإنجليزية:**

1- Adeh,E.H., Good, S.P., Calaf,M., Higgins, C.W.(2019): Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. Sci.Rep.9, 1-6. [CrossRef]
2- AL-Saidi, M., & Lahham, N. (2019): Solar energy farming as a development innovation for vulnerable water basins. Dev. Pract.9,1-6. [CrossRef]
3- Andrew, A.C., Higgins, C.W., Smallman, M.A., Graham, M., Ates, S. (2021): Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System. Front.Sustain. Food Syst.5,1-12. [CrossRef]
4- Asa'a ,S., Reher,T., Rongé, J., Diels,J., Poortmans, J., . Radhakrishnan,H.S., van der Heide, A., Van de Poel, B.& Daenen و M. (2024): A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Aug, Voluome: :200. https://doi.org/10.106/j.rser.2004.114515.
5- Babatunde, O. M., Denwingwe, L.H., Adedooja, O.S., Babatunde, D.E. Gbadamosi, S.L., (2019): Harnessing renewable energy for sustainable agricultural applications. Int.J. Energy Econ. Policy. 9,308-315. [CrossRef]
6- Bryce,E.(2019):A tech revolution will help farmers harvest sunshine with their crops. WIRED ,Jan, https://www.wired.com/story/energy-agrivoltic-farms
7- Carranza, G. A., Malheiros, T. F., Faria, L. O., Silva, A. C. D., & Mierzwa, J. C. (2022). Effects of a Floating Photovoltaic System on the Water Evaporation Rate in the Passaúna Reservoir, Brazil. Energies, 15(17), 6274. https://doi.org/10.3390/en15176274

8- Chamara, R. Beneragama, C. (2020): Agrivoltaic systems and its potential to optimize agricultural land use for energy production in Sri Lanka: A Review. J. Sol. Energy Res. 5, 417-431.
9- Chen, N., Wu, P., Gao, Y., Ma, X. (2018): Review on Photovoltaic Agriculture Application and Its Potential on Grape Farms in Xinjiang, China, Adv. Sci. Eng.10,73-81.
10- Cuppari, R.J., Higgins, C.W.,Characklis, G.W.(2021): Agrivoltaics and weather risk: A diversification strategy for landowners. Appl. Energy.291,116809. [CrossRef]
11- Belos, D. (2025): Agrivoltaics: Benefits and applications in agriculture. February, Bright
12- D'Adamo, I., Rossa, P.(2020): How do you see infrastructure? Green energy to provide economic growth after COVID-19. Sustainability. 12, 4738. [CrossRef]
13- Dos Santos, C.N.L. (2020): Agrivoltaic System: A Possible Synergy btween Agriculture and Solar Energy, KTH Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden.
14- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y. (2011): Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. Renew. Energy. 36, 2725-2732. [CrossRef]
15- FAO (2002): World Agriculture: Towards 2015/2030 Summary Report., FAO: Rome, Italy.
16- Fraunhofer ISE (2019): Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and The Energy Transition. https://www.ise.fraunhofer.de/content/doments/publications/studies/APV-Guideline.bdf.
17- Fumey, D., Bellacicco,S., Lopez Velasco, G., & Sourd, F. (2024): Dynamic agrivoltaics: An agronomical tool to protect crops from climate change – Feedback from 15 years of research. Conference Paper. Retrieved from. https://www.researchgate.net/publication/387168047
18- Gad, A., & El-Din, M. A. (2023). Impact of Floating Photovoltaic Systems on Water Evaporation from Lake Nasser, Egypt. Water, 15(4), 635. https://doi.org/10.3390/w15040635
19- Goetzberger, A., & Zastrow,A., (1982) : On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. International Jornal of Solar Energy,1(1),55-69.
20- Goetzberger, A., Zastrow, A. (1982): on the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. Int. J. Sol. Energy. 1, 55-69. [CrossRef]
21- GoGreenner. (n.d.) (2025): Agrivoltaics: Maximizing Land Use with Green Energy. Retrieved, May 12, from https://gogreenner.com/maximizing-land-use-with-agrivoltaics/
22- Guo,L, Han,J.,Otieno,A.W. (2013): Design and Simulation of a Sun Tracking Solar Power System. In Proceedings of the 120th ASEE Annual Conference and Exposition, Atlana, GA, USA, 23-26, June, P.7854.
23- Hernandez, R.R., Armstrong, A., Burney, J., Ryan, G., Moore-O Leary, K., Diedhiou, I., Grodsky, S.M., Saul-Gershenz, L., Davis, R., Macknick, J., etal. (2019): Techno-ecological synergies of solar energy for global sustainability. Nat. Sustain. 2, 560-568. [CrossRef]
24- Higgins, C.W., Najm, M.A. (2020): An Organizing Principle for the Water-Energy-Food Nexus. Sustainability. 12,8135. [CrossRef]
25- Kostik, N., Bobyl, A., Rud, V.,Salamov, I. (2020): The potential of agrivoltaic systems in the conditions of southern regions of Russian Federation. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.578,012047. [CrossRef]
26- Kumar, S., Saravaiya, S.N., Pandey, A.K. (2021): Precision Farming and Protected Cultivation: Concepts and Applications, 1 st ed., CRC Press: Oxon, UK, ISBN 9781032052762.
27- Kussul, E., Baydyk, T., Garcia, N., Herrera, G.V., (2020): Department, A.V.C.L. Combinations of solar Concentrators with Agricultural Plants.J. Environ. Sci. Eng. B . 9,168-181. [CrossRef]
28- Leon,A., Ishiara, K.N. (2018): Assessment of new functional units for agrivoltaic systems. J. Environ. Manage. 226,493-498. [CrossRef]

29- Li, C.,Wang, H.,Miao,H.,Ye, B. (2017): The economic and social performance of integrated photovoltaic and agricultural greenhouses systems: Case study in China. Appl. Energy. 190,204-212.
30- Li, P.C., Ma, H. (2020): Evaluating the environmental Impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach. Resour. Conserv. Recycl. 157, 104789. [CrossRef]
31- Lindhardt, K. M., Møller, J. K., & Kessler, M. R. (2023): Vertical Agrivoltaics in a Temperate Climate: Exploring Technical, Agricultural, Meteorological, and Social Dimensions.Energies, 16(9), 3572. https://doi.org/10.3390/en16093572
32- Lytle, W., Meyer, T.K., Tanikella, N.G., Burnham, L., Engel, J., Schelly, C., Pearce, J.M. (2021): Conceptual Design and Rationale for New Agrivoltaics Concept: Pasture-Raised Rabbits and Solar Farming. J., Schelly,C., Prod.282,124476. [CrossRef]
33- Macknick ,J., Hartmann, H., Barron-Gafford ,G., Beatty.B., etal(2022): The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons From the In SPIRE Research Study, NREL, Aug, 1:80. https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566pdf.
34- Marrou, H., Wery, J., Dutour, L., Dupraz, C. (2013): Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. Eur. J. Agron. 44, 54-66. [CrossRef]
35- Matulić, D., Andabaka, Ž., Radman, S., Fruk, G., Leto, J., Rošin, J., Rastija, M., Varga, I., Tomljanović, T., Čeprnja, H., & Karoglan, M. (2023): Agrivoltaics and Aquavoltaics: Potential of Solar Energy Use in Agriculture and Freshwater Aquaculture in Croatia. Agriculture, 13(7), 1447. https://doi.org/10.3390/agriculture13071447
36- Mavani, D.D., Chauhan, P.M., Joshi, V. (2019): Beauty of Agrivoltaic System regarding double utilization of same piece of land for Generation of Electricity & Food Production. Glob. Sci. J. 10,118-148.
37- Miao, R., Khanna, M. (2019): Harnessing Advances in Agricultural Technologies to Optimize Resource Utilization in the Food-Energy-Water Nexus. Annu. Rev. Resour. Econ. Forthcom.12, 6585. [CrossRef]
38- Moswetsi, G., Fanadzo, M., Ncube, B. (2017): Review Article Cropping Systems and Agronomic Management Practices in smallholder Farms in South Africa: Constraints, Challenges and Opportunities. J. Agron. 16, 51-67. [CrossRef]
39- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2022). Agrivoltaics Research. Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566.pdf
40- Proctor, K.W., Murthy, G.S., Higgins, C.W. (2021): Agrivoltaics align with green new deal goals while supporting investment in the us rural economy. Sustainability.13, 137. [CrossRef]
41- Sani Ibrahim, M., Kumari, R. (2020): Emerging Solar Energy Technologies for Sustainable Farming: A Review. J. Xi’an Univ. Archit. Technol. 12, 5328-5336.
42- Sekiyama, T., Nagashima, A., (2019): Solar sharing for both food and clean energy production: performance of agrivoltaic systems for corn, a typical shade-intolerant crop. Environments. 6,65. [CrossRef]
43- Tajima,M., & Lida,T.(2021): Evolution of a grivoltaic farms in Japan. AIP, Conference Proceedings, 2361(1),030002. https://doi.org/10.1063/5.0054674.
44- Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Gudat, C., Boggio, A. T., Gajewski, M., & Högy, P. (2024): Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition – A Guideline for Germany. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Retrieved from https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.htm
45- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M.,Christophe, A. (2017): Inccreasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. Appl. Energy. 206, 1495-1507. [CrossRef]

46- Welsek ,A.,Bauerle, A., Zilkeli, S., Lewandowski, I., Hogy, P.(2021): Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (Apium graveolens L. var. rapaceum) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System. Agronomy, 11,733. [CrossRef]
47- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Hogy,P.(2019): Agrophotovoltic system: Applications, challenges, and opportunities. A review. Agron. Sustain. Dev. 39,1-20. [CrossRef]
48- Weselek, J., Ehmann. M., Zikeli, M., Lewandowski, F, Schindele, J., and Hogy A. Hogy (2021): Agri-Photovoltaics: A Systematic Review Across Disciplines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, May.Voluome :141.
49- Widmer, J., Christ, B., Grenz, J., & Norgrove, L. (2024) : Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume :192, March .
50- Santra, P., Pande, P.C.,Kumar, S., Mishra, D., Singh, R.K.(2017): 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. 7, 694-699.