



Energetic Dark Greenhouses: A Novel Approach in Urban Policy for Agricultural Advancements and Environmental Sustainability

Yazdan Alvari¹ | Sara Mahmoodian Younesi² | Majid Zandi^{3*}

1. PhD Student, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University Tehran, Iran. Email: yazdan.alvari.a@gmail.com
2. PhD Student, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University Tehran, Iran. Email: s_mahmoodian@sbu.ac.ir
3. Corresponding Author, Associate Professor, Energy Research Center (ERC), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 15 March 2025
Revised 15 April 2025
Accepted 15 May 2025
Published Online 01 June 2025

Keywords:
Energetic dark greenhouses,
Urban agriculture,
Urban food security,
Sustainable food production.

ABSTRACT

Energetic dark greenhouses, as an innovative technology, hold significant potential to transform urban agriculture and enhance environmental sustainability. These systems utilize advanced technologies such as low-energy LEDs, environmental control systems, and vertical farming to enable agricultural production in small spaces without the need for natural sunlight. This study examines the benefits of Energetic dark greenhouses, including reduced water and energy consumption, increased food security, and lower carbon footprints. Additionally, the challenges of implementing these systems, such as high initial costs and the need for technical expertise, are analyzed. Finally, policy recommendations for expanding this technology in urban areas—including financial support, development of renewable energy infrastructure, and public-private partnerships—are proposed. Case studies of successful global implementations, such as those in New York and London, demonstrate that this technology can be effectively deployed in cities, contributing to the creation of more sustainable and self-sufficient urban environments.

Cite this article: Alvari, Y.; Mahmoodian Younesi, S. & Zandi, M. (2025). Energetic Dark Greenhouses: A Novel Approach in Urban Policy for Agricultural Advancements and Environmental Sustainability. *Urban Development Policy Making*, 2 (3), 263-275. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.513255.1025>



© Yazdan Alvari, Sara Mahmoodian Younesi, Majid Zandi
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.510867.1015>

Introduction

Urbanization and population growth have intensified the demand for sustainable food production in cities. Traditional agriculture faces challenges such as land scarcity, high water consumption, and dependence on climate conditions, making it unsuitable for urban areas. Energetic dark greenhouses, which use advanced technologies like LED lighting, vertical farming, and controlled-environment systems, offer a promising solution. These systems enable year-round food production in small urban spaces while minimizing resource use. This article explores the potential of dark greenhouses to transform urban agriculture, enhance food security, and promote environmental sustainability.

Methodology

The study examines Energetic dark greenhouses through a review of existing technologies, case studies, and policy frameworks. Data were collected from successful implementations worldwide, such as Gotham Greens in New York and Growing Underground in London. The analysis focuses on key components of dark greenhouses, including LED lighting, hydroponic systems, and energy recovery technologies. Additionally, the study evaluates the economic, environmental, and social

impacts of these systems, using metrics such as water and energy savings, carbon footprint reduction, and local food production capacity.

Results

The findings reveal that Energetic dark greenhouses significantly reduce water and energy consumption compared to traditional agriculture. For example, Gotham Greens reports up to 90% less water usage, while Nordic Harvest operates entirely on renewable energy. These systems also enhance food security by enabling local production and reducing reliance on imports. Case studies demonstrate their adaptability to various urban environments, from rooftops to underground spaces. However, challenges such as high initial costs, technical expertise requirements, and energy dependency were identified as barriers to widespread adoption.

Conclusion

Energetic dark greenhouses represent a transformative solution for urban agriculture, addressing critical issues such as food security, resource efficiency, and environmental sustainability. Despite challenges like high upfront costs and technical complexities, their benefits—ranging from reduced carbon footprints to year-round food production—make them a viable option for cities worldwide. Policymakers, private investors, and urban planners must collaborate to support the expansion of this technology through financial incentives, infrastructure development, and public awareness campaigns. By integrating dark greenhouses into urban landscapes, cities can move closer to achieving sustainability and resilience in food systems.



گلخانه‌های تاریک انرژی: رهیافتی نو در سیاست‌های شهری برای پیشرفت کشاورزی و دستیابی به پایداری محیطی

یزدان الواری^۱ | سارا محمودیان یونسی^۲ | مجید زندی^{۳*}

۱. مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: yazdan.alvari.a@gmail.com

۲. مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_mahmoodian@sbu.ac.ir

۳. نویسندهٔ مسئول، مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

کلیدواژه:

امنیت غذایی شهری،

تولید غذای پایدار،

کشاورزی شهری،

گلخانه تاریک انرژی.

گلخانه‌های تاریک انرژی به عنوان یک فناوری نوآورانه، پتانسیل بالایی برای تحول در کشاورزی شهری و افزایش پایداری محیطی دارند. این سامانه‌ها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف، سامانه‌های کنترل محیطی و کشت عمودی، امکان تولید محصول‌های کشاورزی در فضاهای کوچک و بدون نیاز به نور طبیعی خورشید را فراهم می‌کنند. این پژوهش به بررسی مزایای گلخانه‌های تاریک انرژی، از جمله کاهش مصرف آب و انرژی، افزایش امنیت غذایی و کاهش ردپای کربن می‌پردازد. همچنین، چالش‌های پیاده‌سازی این سامانه‌ها، مانند هزینه‌های اولیه بالا و نیاز به تخصص فنی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، سیاست‌های پیشنهادی برای گسترش این فناوری در مناطق شهری، از جمله حمایت مالی، توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر و مشارکت عمومی - خصوصی، ارائه می‌شود. بررسی نمونه‌های موفق جهانی گلخانه‌های تاریک انرژی، مانند نمونه‌هایی در نیویورک و لندن نشان می‌دهند این فناوری می‌تواند به طور مؤثر در شهرها پیاده‌سازی شود و به ایجاد شهرهای پایدارتر و خودکف‌تر کمک کند.

استناد: الواری، یزدان، محمودیان یونسی، سارا و زندی، مجید (۱۴۰۴). گلخانه‌های تاریک انرژی: رهیافتی نو در سیاست‌های شهری برای پیشرفت کشاورزی و دستیابی به پایداری محیطی. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۳) ۲۶۳-۲۷۵.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.510867.1015>

© یزدان الواری، سارا محمودیان یونسی، مجید زندی

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.510867.1015>



۱. مقدمه

رشد سریع شهرنشینی در قرن بیست و یکم، همراه با افزایش جمعیت شهری، فشار بی سابقه‌ای بر سامانه‌های تأمین مواد غذایی وارد کرده است. امروزه شهرها به طور فزاینده‌ای به منابع غذایی وارداتی وابسته هستند، که این موضوع نه تنها هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی بالایی دارد، بلکه امنیت غذایی را نیز تهدید می‌کند. در چنین شرایطی، نیاز به راه‌حل‌های نوآورانه برای تولید غذا در داخل شهرها بیش از پیش احساس می‌شود.

کشاورزی سنتی با چالش‌های متعددی مانند نیاز به زمین‌های وسیع، مصرف زیاد آب، وابستگی به شرایط آب‌وهوایی و استفاده گسترده از کودها و سموم شیمیایی روبه‌رو است. این روش‌ها نه تنها برای محیط زیست مضر هستند، بلکه در مناطق شهری که فضا و منابع محدود است، قابل اجرا نیستند. بنابراین، یافتن روش‌های جایگزین برای تولید غذا در شهرها ضروری به نظر می‌رسد.

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین کشاورزی مانند کشت عمودی، گلخانه‌های پیشرفته و سامانه‌های کشت هیدروپونیک و آکواپونیک، امیدهای تازه‌ای برای حل چالش‌های کشاورزی شهری ایجاد کرده‌اند. در این میان، گلخانه‌های تاریک انرژیتیک، به عنوان یک راه‌کار پیشرفته و پایدار، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند.

گلخانه‌های تاریک انرژیتیک، سامانه‌های کشت کنترل‌شده‌ای هستند که بدون نیاز به نور طبیعی خورشید عمل می‌کنند. این سامانه‌ها با استفاده از فناوری‌هایی مانند ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف، سامانه‌های بازیابی انرژی و کنترل دقیق دما و رطوبت، امکان تولید محصول‌های کشاورزی در محیط‌های بسته و با مصرف بهینه انرژی را فراهم می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود تا گلخانه‌های تاریک انرژیتیک در فضاهای کوچک شهری مانند پشت‌بام‌ها، زیرزمین‌ها یا ساختمان‌های متروکه نیز قابل اجرا باشند. این سامانه‌ها مزایای متعددی از جمله کاهش مصرف آب و انرژی، افزایش بهره‌وری در تولید غذا، کاهش ردپای کربن و امکان تولید محصول‌های تازه و سالم طی سال دارند. علاوه بر این، گلخانه‌های تاریک انرژیتیک می‌توانند به ایجاد اشتغال در حوزه‌های فناوری و کشاورزی شهری کمک کنند و نقش مهمی در افزایش امنیت غذایی شهرها ایفا کنند.

این پژوهش به بررسی نقش گلخانه‌های تاریک انرژیتیک در توسعه کشاورزی شهری و پایداری محیطی می‌پردازد. در ادامه، فواید این سامانه‌ها، چالش‌های پیش رو و نمونه‌های موفق اجرا شده در شهرهای مختلف جهان مورد تحلیل قرار می‌گیرد. هدف نهایی این پژوهش، ارائه راه‌کارهایی برای گسترش این فناوری در مناطق شهری و کمک به ایجاد شهرهایی پایدارتر و خودکفاتر از نظر غذایی است.

۲. روش‌شناسی

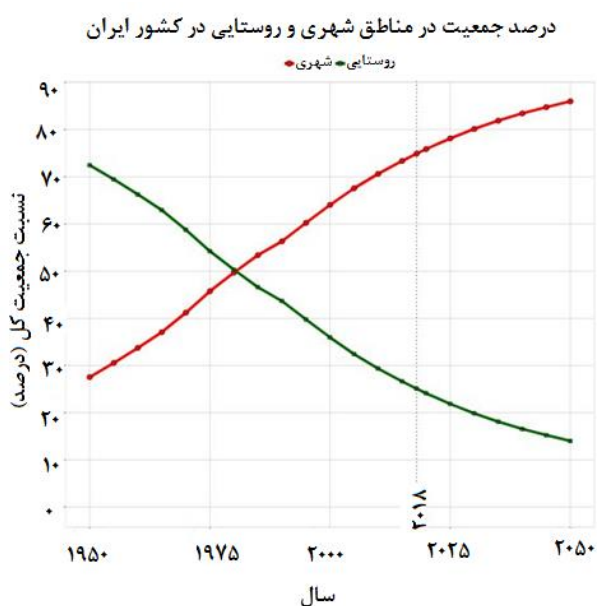
در این پژوهش، به منظور ایجاد امنیت پایدار غذایی، چهار حوزه آب، محیط زیست، غذا و انرژی در ترکیب و تعامل با یکدیگر در نظر گرفته شده است. به منظور ارائه این راه‌کار، ابتدا مفهوم کشاورزی در بخش اول بیان شده است. سپس گلخانه تاریک انرژیتیک به عنوان راه‌کار این پژوهش معرفی و مزایای آن ذکر شده است. سپس دو حوزه جدید در این موضوع شامل به‌کارگیری نور مصنوعی، هوشمندسازی گلخانه‌ها و به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در گلخانه‌ها بررسی شده است. در ادامه چند نمونه موردی پیاده‌سازی گلخانه تاریک انرژیتیک در جهان و همچنین سیاست‌گذاری‌هایی برای گسترش گلخانه‌های تاریک انرژیتیک در مناطق شهری ارائه شده است.

۲-۱. کشاورزی شهری

یکی از بخش‌های کلیدی در کشورهای در حال توسعه که با چالش کمبود منابع آب و غذا و انرژی مواجه هستند، بخش کشاورزی است. استفاده از هم‌بست چهارگانه آب، محیط زیست، غذا و انرژی در کاربرد کشاورزی و دیدگاه حجمی نسبت به آن، به بسیاری از چالش‌های این بخش، پاسخ می‌دهد.

در می ۲۰۰۳، برای اولین بار در تاریخ بشریت، جمعیت شهری و روستایی در دنیا برابر شد [۱]. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۷۰ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی کنند [۱]. گسترش جمعیت شهری در کشورهای در حال توسعه به

دلایلی مانند مهاجرت از شهرها به روستا و افزایش جمعیت، بیشتر به چشم می‌خورد. در شکل ۱ نمودار درصد جمعیت شهری و روستایی در سال‌های مختلف در کشور ایران نمایش داده شده است.



شکل ۱. درصد جمعیت در مناطق شهری و روستایی در کشور ایران [۲]

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، در کشور ایران در حال حاضر، درصد جمعیت شهری از جمعیت روستایی بیشتر است. همچنین روند رشد جمعیت برای مناطق شهری صعودی است، در حالی که روند رشد جمعیت روستایی نزولی است. مدت‌های طولانی این تصور وجود داشت که برای نیاز جمعیت شهرنشین، تکیه کردن به محصولات کشاورزی روستاها کافی است، اما در بسیاری از شهرهای جهان در کشورهای در حال توسعه، به دلایلی مانند کافی نبودن زیرساخت‌ها در زمینه حمل‌ونقل، جاده، بازار و موارد دیگر، این تصور اشتباه به نظر رسید. به همین دلیل، موضوع کشاورزی شهری در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفت.

کشاورزی شهری به عنوان تولید محصول در خانه یا در مناطق شهری یا اطراف شهرها تعریف می‌شود. به دلیل اینکه در بیشتر موارد، این فعالیت‌ها غیررسمی است، توصیف آن با داده‌ها و روندهای دقیق بسیار دشوار است. همچنین، کشاورزی شهری از آب شهر و حتی آب‌های بازیافتی استفاده می‌کند؛ بنابراین نقش مهمی در مدیریت منابع طبیعی برای دستیابی به توسعه پایدار شهری دارد.

کشاورزی شهری از منابع شهری (زمین، انرژی، زباله‌های آلی و آب) استفاده می‌کند و غذای ساکنان شهر را تأمین می‌کند، کشاورزی شهری به شدت تحت تأثیر شرایط احتمالی مانند (سیاست‌ها، رقابت بر سر زمین، بازار، روند قیمت و استانداردهای کیفیت) است و نقش مهمی در شرایط اجتماعی اقتصادی (تأثیر بر امنیت غذایی، فقر، سلامتی و محیط زیست) ساکنان شهری ایفا می‌کند [۳]. مزایای کشاورزی شهری در جدول ۱ ارائه شده است.

یکی از راه‌های ایجاد امنیت پایدار غذایی، کشاورزی شهری است. راه دیگر ایجاد امنیت پایدار غذایی، به‌کارگیری انواع مختلف گلخانه‌های مدرن است. گلخانه‌ها از جنبه‌های مختلفی برای مثال سامانه‌های سرمایش و گرمایش گلخانه‌ها، سامانه روشنایی و همچنین از نظر نوع کنترل دسته‌بندی می‌شوند.

جدول ۱. مزایای کشاورزی شهری [۴]

مزایا	
محیط زیستی	<ul style="list-style-type: none"> کاهش نیاز به آب کاهش مصرف انرژی تولید بیشتر در واحد سطح تأمین غذای سالم کاهش ردپای کربن و تأثیر بر کیفیت هوا کاهش نیاز به سوخت‌های فسیلی فرصتی برای مناظر شهری جدید مقاومت در برابر آفت‌ها و بیماری‌ها مقاومت در برابر تغییر اقلیمی
اجتماعی	<ul style="list-style-type: none"> افزایش امنیت غذایی ایجاد فرصت‌های شغلی رفاه زیبایی بصری
اقتصادی	<ul style="list-style-type: none"> فرصت اقتصادی در شرایط کمبود زمین قابل کشت کاهش هزینه انرژی کاهش قیمت مواد غذایی رشد اقتصادی جامعه

۲-۲. معرفی گلخانه تاریک انرژی

گلخانه تاریک انرژی یک سامانه پیشرفته کشت کنترل شده است که در آن محصولات کشاورزی بدون نیاز به نور طبیعی خورشید پرورش می‌یابند. این سامانه‌ها از فناوری‌هایی مانند ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف، سامانه‌های بازیابی انرژی و کنترل دقیق دما، رطوبت و دی‌اکسید کربن استفاده می‌کنند تا محیطی ایده‌آل برای رشد گیاهان فراهم کنند. به خلاف گلخانه‌های سنتی که به نور خورشید وابسته هستند، گلخانه‌های تاریک انرژی در محیط‌های بسته و تاریک نیز قابل راه‌اندازی هستند.

استقلال از شرایط آب‌وهوایی: یکی از مزایای مهم گلخانه‌های تاریک انرژی، استقلال آن‌ها از شرایط آب‌وهوایی است. در مناطق شهری که ممکن است فضای کافی برای کشاورزی سنتی وجود نداشته باشد یا شرایط جوی نامناسب باشد، این سامانه‌ها می‌توانند به طور مداوم و در تمام طول سال محصول باکیفیت تولید کنند. این ویژگی به‌ویژه در شهرهایی با آب‌وهوای سرد یا آلوده بسیار مفید است.

استفاده بهینه از فضاهای کوچک: گلخانه‌های تاریک انرژی به دلیل طراحی فشرده و عمودی، می‌توانند در فضاهای کوچک و غیرقابل استفاده شهری مانند پشت‌بام‌ها، زیرزمین‌ها، پارکینگ‌های متروکه یا حتی داخل ساختمان‌ها نصب شوند. این ویژگی باعث می‌شود که این سامانه‌ها برای مناطق شهری که با کمبود فضا مواجه هستند، ایده‌آل باشند.

کاهش مصرف آب و انرژی: این سامانه‌ها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند آبیاری قطره‌ای، بازیابی آب و نوردهی دقیق با ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف، مصرف آب و انرژی را به حداقل می‌رسانند. در مقایسه با کشاورزی سنتی، گلخانه‌های تاریک انرژی تا ۹۰ درصد آب کمتری مصرف می‌کنند و انرژی مورد نیاز آن‌ها نیز از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که این سامانه‌ها برای شهرها که اغلب با محدودیت منابع مواجه هستند، بسیار مناسب باشند.

کاهش ردپای کربن و آلودگی: با تولید غذا در داخل شهرها، نیاز به حمل‌ونقل مواد غذایی از مناطق دور کاهش می‌یابد. این موضوع باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی ناشی از حمل‌ونقل می‌شود. علاوه بر این، گلخانه‌های تاریک انرژی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سامانه‌های بازیابی انرژی، ردپای کربن خود را به حداقل می‌رسانند.

افزایش امنیت غذایی شهری: گلخانه‌های تاریک انرژی می‌توانند به افزایش امنیت غذایی در مناطق شهری کمک کنند. با تولید محصولات تازه و سالم در داخل شهرها، وابستگی به واردات مواد غذایی کاهش می‌یابد و دسترسی شهروندان به

غذاهای باکیفیت بهبود می‌یابد. این موضوع به‌ویژه در شهرهای بزرگ که با چالش‌های تغذیه‌ای مواجه هستند، بسیار حائز اهمیت است.

در مقابل مزایای متعدد، گلخانه‌های تاریک انرژیتیک چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز دارد. چالش‌ها و محدودیت‌های پیاده‌سازی گلخانه‌های تاریک انرژیتیک (به شرح زیر است):

هزینه‌های اولیه بالا: راه‌اندازی گلخانه‌های تاریک انرژیتیک به سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی برای خرید تجهیزات پیشرفته، سامانه‌های نوردهی ال‌ای‌دی و فناوری‌های کنترل محیطی نیاز دارد. این هزینه‌ها ممکن است برای بسیاری از شهرها یا سرمایه‌گذاران خصوصی چالش‌برانگیز باشد.

نیاز به تخصص و دانش فنی: مدیریت و نگهداری گلخانه‌های تاریک انرژیتیک به دانش فنی و تخصص در حوزه‌هایی مانند کشت کنترل‌شده، فناوری‌های انرژي و سامانه‌های هوشمند نیاز دارد. کمبود نیروی کار ماهر می‌تواند یکی از موانع اصلی در اجرای این پروژه‌ها باشد.

مصرف انرژي در صورت استفاده از نور مصنوعی: اگرچه ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف استفاده می‌شوند، اما همچنان نیاز به انرژي برای نوردهی و کنترل محیط وجود دارد. در مناطقی که انرژي تجدیدپذیر در دسترس نیست، این موضوع می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و کاهش پایداری سامانه شود.

محدودیت در تنوع محصولات: گلخانه‌های تاریک انرژیتیک اغلب برای کشت محصولات خاصی مانند سبزی‌های برگ‌دار، گیاهان دارویی یا گوجه‌فرنگی مناسب هستند. تولید محصول‌هایی مانند غلات یا درختان میوه در این سامانه‌ها چالش‌برانگیز است و ممکن است نیاز به فناوری‌های پیچیده‌تری داشته باشد.

وابستگی به فناوری‌های پیشرفته: سامانه‌ها به دلیل وابستگی به فناوری‌های پیشرفته، ممکن است در برابر خرابی‌های فنی یا قطعی برق آسیب‌پذیر باشند. همچنین، نیاز به به‌روزرسانی مداوم تجهیزات و نرم‌افزارها می‌تواند هزینه‌های اضافی ایجاد کند.

مقاومت فرهنگی و اجتماعی: در برخی موارد، شهروندان یا کشاورزان سنتی ممکن است نسبت به پذیرش فناوری‌های جدید مقاومت نشان دهند. این مقاومت می‌تواند ناشی از عدم آگاهی، ترس از تغییر یا نگرانی‌های اقتصادی باشد. برای موفقیت این پروژه‌ها، آموزش و آگاهی‌بخشی به جامعه ضروری است.

با وجود چالش‌ها و محدودیت‌های پیاده‌سازی گلخانه‌های تاریک انرژیتیک، مزایای این سامانه‌ها به حدی چشم‌گیر و دگرگون‌کننده است که به راحتی می‌توان از چالش‌های آن چشم‌پوشی کرد یا آن‌ها را مدیریت کرد. این سامانه‌ها نه تنها مشکل امنیت غذایی در مناطق شهری را حل می‌کنند، بلکه با کاهش مصرف آب و انرژي، کاهش ردپای کربن و استفاده بهینه از فضاهای کوچک، به ایجاد شهرهای پایدار و هوشمند کمک شایانی می‌کنند. علاوه بر این، تولید مداوم و باکیفیت محصول‌های کشاورزی در تمام طول سال، وابستگی به واردات مواد غذایی را کاهش می‌دهد و به اقتصاد محلی رونق می‌بخشد. حتی چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا یا نیاز به تخصص فنی، با پیشرفت فناوری و حمایت دولت‌ها و بخش خصوصی، به مرور زمان کاهش خواهند یافت.

۲-۳. به کارگیری نور مصنوعی در گلخانه‌های تاریک

یکی از پارامترهای مورد نیاز رشد گیاهان، نور است فرایند فتوسنتز، به طول موج تابش فعال فتوسنتزی^۱ یا نور مرئی نیاز دارد. کمبود نور، بر رنگ، جرم، کیفیت و اندازه محصول‌های برداشت‌شده تأثیر منفی می‌گذارد. به همین دلیل، مطالعه‌های متعددی برای غلبه بر کمبود روشنایی طبیعی در رشد گیاه انجام شده است. نور مصنوعی به روش‌ها و شکل‌های مختلفی مانند نورپردازی بین بوته‌ها، نورپردازی دوره‌ای و نورپردازی با استفاده از ترکیب‌های مختلف طول موج مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، اثربخشی انواع چراغ‌ها و طول موج نور ساطع‌شده از روشنایی مصنوعی، یکی از موارد مهم در نظر گرفته شده در گلخانه‌ها است.

1. Photosynthetically Active Radiation (PAR)

مزایا و معایب انواع چراغ‌ها، در جدول ۲ ارائه شده است. امروزه به‌کارگیری چراغ‌های ال‌ای‌دی^۱ در کاربردهای مختلف، به دلیل عملکرد خوب، قیمت مناسب، راندمان بالای تبدیل انرژی الکتریکی به نورانی، تنوع در طیف رنگی، دمای پایین و عمر زیاد، بسیار رایج شده است.

استفاده از چراغ‌های ال‌ای‌دی در کاربرد پژوهش‌های باغبانی و کشاورزی، از سال ۱۹۹۰ میلادی آغاز شده است. در سال ۲۰۰۵، این چراغ‌ها بعد از ساخت گلخانه تجاری برای پرورش سبزی‌های برگی، جای‌گزینی برای چراغ‌های فلورسنت شدند. رشد گیاهان تحت تأثیر نور محیط قرار دارد. نور شامل شدت نور یا چگالی شار فوتون فتوسنتزی^۲، دوره نوری (طول روز) و کیفیت نور (طیف‌های نوری) است؛ بنابراین چراغ‌های ال‌ای‌دی به دلیل تنوع زیاد در طیف، برای کنترل رشد و پرورش گیاه بسیار مورد توجه هستند.

به‌کارگیری چراغ‌های ال‌ای‌دی، به‌تدریج مورد استقبال بسیاری از گلخانه‌ها و پژوهش‌ها در زمینه کشاورزی قرار گرفت. در بسیاری از پژوهش‌ها، تأثیر طیف نورهای مختلف و شدت نورهای متفاوت بر رشد گیاه مورد بررسی قرار گرفت [۶-۹]. روند به‌کارگیری چراغ‌های ال‌ای‌دی در پرورش گیاه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. مزایا و معایب انواع مختلف لامپ چراغ‌ها [۵]

نوع لامپ چراغ	مزایا	معایب
رشته‌ای	نصب راحت، تمرکز نور تابش شده و داشتن طیف نور قرمز	بازده انرژی و طول عمر پایین پایین بودن نسبت نور قرمز به نور فروسرخ
فلورسنت	بازدهی و طول عمر بالا و پرتو فروسرخ کم	برای گیاهان روزبند و بالارونده مناسب نیست، طیف نور آبی مناسبی ندارد
متال هالید	ایجاد سایه کم، بازده انرژی بالا و طیف نوری مناسب برای رشد اندام‌های گیاهی	شدت نور کم، هزینه بالا، عمر مفید پایین، قابل اشتعال و انفجار
سدیمی فشار بالا	پخش نور یکنواخت و بدون سایه و اشعه فروسرخ کم	هزینه نصب و راه‌اندازی بالا، طول عمر آن در اثر خاموش بودن طولانی‌مدت کاهش می‌یابد
ال‌ای‌دی	طول عمر بالا، بازده انرژی بسیار بالا، قابلیت تنظیم طیف و قابلیت تنظیم شدت نور	هزینه بالا

جدول ۳. روند به‌کارگیری چراغ‌های ال‌ای‌دی در پرورش گیاه [۵]

سال (میلادی)	رویدادهای کلیدی
۱۹۸۹-۱۹۹۰	اولین بار چراغ ال‌ای‌دی با طول موج ۶۶۰ نانومتر، برای پرورش گیاه به کار گرفته شد.
۱۹۹۳	چراغ ال‌ای‌دی برای رشد گیاه در خارج از جو زمین به کار گرفته شد.
۱۹۹۴-۱۹۹۵	چراغ ال‌ای‌دی به عنوان ابزاری در پژوهش‌هایی در حوزه گیاهان به کار گرفته شد.
۱۹۹۵-۱۹۹۶	چراغ ال‌ای‌دی آبی با توان بالا اختراع شدند و ناسا برای پرورش گیاه در خارج از جو زمین این چراغ‌ها را به کار گرفت.
۱۹۹۹-۲۰۰۰	چراغ‌های ال‌ای‌دی با توان بالا (۱ وات) موجود شدند
۲۰۰۰-۲۰۰۱	اولین واحد صنعتی پرورش گیاه با چراغ ال‌ای‌دی در ژاپن راه‌اندازی شد.
۲۰۰۰-۲۰۰۱	ماژول‌های صنعتی ال‌ای‌دی توسعه پیدا کردند.
۲۰۰۱-۲۰۰۲	چراغ‌های ال‌ای‌دی با روشنایی بالا و با چندین نوع طیف توسعه پیدا کردند.
۲۰۰۳	چراغ ال‌ای‌دی مناسب برای پرورش گیاه در محیط‌های بسته در ابعاد تجاری موجود شدند.
۲۰۰۴	چراغ‌های ال‌ای‌دی در میان بوته‌های گیاهان به کار گرفته شد.
۲۰۰۴-۲۰۰۵	چراغ‌های ال‌ای‌دی با توان‌های بالا (بیش از ۱ وات) توسعه پیدا کردند.
۲۰۰۵-۲۰۰۶	چراغ‌های ال‌ای‌دی در مقیاس‌های بزرگ موجود شدند.
۲۰۰۷	راندمان و کارایی چراغ‌های ال‌ای‌دی افزایش یافت
۲۰۰۷	چراغ‌های ال‌ای‌دی به‌عنوان نور مکمل در گلخانه‌ها به‌کار گرفته شدند.
۲۰۰۸-۲۰۱۳	چراغ‌های ال‌ای‌دی قرمز و آبی، به‌عنوان اصلی‌ترین چراغ‌ها در روشنایی گلخانه‌ها به کار گرفته شدند
۲۰۰۸-۲۰۱۳	انواع مختلف ال‌ای‌دی‌ها در کشاورزی و باغبانی حفاظت‌شده به کار گرفته شدند.

1. Light Emitting Diode (LED)

2. Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD)

۲-۴. هوشمندسازی گلخانه‌ها

پژوهش و توسعه گلخانه در دهه‌های قبل بیشتر در زمینه فناوری‌های مربوط به روشنایی بوده است. در سال‌های اخیر، هوشمندسازی گلخانه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

کنترل یک گلخانه تاریک از نظر رطوبت، دما، روشنایی و دی‌اکسید کربن مورد نیاز، ساده به نظر می‌رسد اما در واقع، بسیار پیچیده است، بنابراین استفاده از یک سامانه کنترل اتوماتیک، بسیار ارزشمند است. یک سامانه کنترل اتوماتیک دارای مزایای بسیاری است، به عنوان مثال غلظت دی‌اکسید کربن، دما، رطوبت و رطوبت خاک را در گلخانه کنترل می‌کند؛ اما در مقایسه با کنترل دستی، دارای معایبی مانند افزایش هزینه است. برای کنترل هوشمند گلخانه‌ها، سامانه‌هایی استفاده می‌شوند که می‌توانند با کاهش هزینه و اندازه سنسورها، کارایی و عملکرد گلخانه‌ها را افزایش دهند. در زمینه هوشمندسازی گلخانه‌ها نیز پژوهش‌های متعددی وجود دارد [۱۰ و ۱۱].

۲-۵. انرژی‌های تجدیدپذیر در گلخانه‌ها

تا کنون سوخت‌های فسیلی، منابع اصلی انرژی مصرف‌شده روی کره زمین بوده است. به کارگیری این سوخت‌ها، باعث تغییر دما در سراسر جهان و تغییرهای اقلیمی شده است. بیشتر انرژی مصرف‌شده در ساختمان‌ها و گلخانه‌های سنتی، برای گرمایش است. تقاضای انرژی به منظور گرمایش، ۶۵ تا ۸۵ درصد از کل تقاضای انرژی را تشکیل می‌دهد.

امروزه بسیاری از پژوهشگران، از سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک به عنوان تأمین‌کننده انرژی الکتریکی در گلخانه‌ها و در ظرفیت‌های مختلف، استفاده می‌کنند. سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک می‌توانند در بخش‌های گرمایشی، سرمایشی و روشنایی در گلخانه کاربرد داشته باشند [۱۲-۱۷].

استفاده از سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک در گلخانه‌ها، در سال‌های اخیر عملی شده است، زیرا قیمت این سامانه‌ها با وجود افزایش بهره‌وری، کاهش یافته است. علاوه بر این، سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک می‌توانند به عنوان دیوار یا سقف گلخانه نیز مورد استفاده قرار گیرد که از این طریق، انتقال حرارت را کاهش می‌دهند. در نتیجه، تقاضای انرژی گرمایشی و سرمایشی و وابستگی به شبکه برق نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین هزینه‌های عملیاتی نیز کاهش می‌یابد.

۲-۶. چند نمونه موردی پیاده‌سازی گلخانه تاریک انرژی در جهان

در این بخش، چند نمونه موردی از پیاده‌سازی گلخانه‌های تاریک انرژی در دنیا از جمله در ایالات متحده، ژاپن، سنگاپور، انگلستان، دانمارک و امارات متحده عربی آورده شده است [۱۸].

• شهر نیویورک، ایالات متحده

گتام گرینز^۱، یک شرکت پیشرو در زمینه گلخانه‌های شهری است که چندین گلخانه در پشت‌بام‌های نیویورک و دیگر شهرهای آمریکا راه‌اندازی کرده است. این گلخانه‌ها از فناوری‌های پیشرفته مانند ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف و سامانه‌های کنترل محیطی استفاده می‌کنند.

• توکیو، ژاپن

شرکت پاسونا^۲ در توکیو یک گلخانه زیرزمینی به نام پاسونا اودو^۳ ایجاد کرده است که در آن محصول‌های کشاورزی در محیطی کنترل‌شده و با استفاده از نور مصنوعی پرورش می‌یابند [۱۹].

• سنگاپور

اسکای گرینز^۴، یک سامانه کشت عمودی است که در سنگاپور راه‌اندازی شده و از انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های کم‌مصرف استفاده می‌کند. این سامانه به دلیل محدودیت فضا در سنگاپور، یک راه‌کار ایده‌آل برای تولید غذا در مناطق شهری است [۲۰].

1. Gotham Greens
2. Pasona
3. Pasona O2
4. Sky Greens

- لندن، انگلستان

گروینگ آندرگروند^۱، یک گلخانه زیرزمینی در لندن است که در یک پناهگاه قدیمی جنگ جهانی دوم راه‌اندازی شده است. این گلخانه از ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف و سامانه‌های هیدروپونیک برای تولید سبزی‌های برگ‌دار استفاده می‌کند [۲۱].

- کپنهاگ، دانمارک

نوردیک هاروست^۲، بزرگ‌ترین گلخانه عمودی اروپا را در نزدیکی کپنهاگ راه‌اندازی کرده است. این گلخانه از انرژی بادی برای تأمین برق استفاده می‌کند و محصول‌های خود را به صورت محلی توزیع می‌کند [۲۲].

- دبی، امارات متحده عربی

بادیا فارمز^۳، اولین گلخانه عمودی در خاورمیانه است که در دبی راه‌اندازی شده است. این گلخانه از فناوری‌های پیشرفته برای تولید سبزی‌های تازه در یک محیط بیابانی استفاده می‌کند [۲۳].

۲-۷. سیاست‌گذاری‌های برای گسترش گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک در مناطق شهری

برای گسترش گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک در مناطق شهری نیاز به سیاست‌گذاری‌های متعدد در آینده کشور ضروری خواهد بود. سیاست‌های پیشنهادی برای گسترش گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک در مناطق شهری به شرح زیر است:

- حمایت مالی و مشوق‌های اقتصادی

دولت‌ها و شهرداری‌ها می‌توانند با ارائه تسهیلات کم‌بهره، وام‌های بلندمدت یا کمک‌های مالی بلاعوض، هزینه‌های اولیه راه‌اندازی گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک را کاهش دهند. همچنین، اعطای معافیت‌های مالیاتی یا کاهش عوارض برای کسب‌وکارهایی که در این حوزه سرمایه‌گذاری می‌کنند، می‌تواند انگیزه‌بخش باشد. این مشوق‌ها به‌ویژه برای جلب مشارکت بخش خصوصی حیاتی هستند.

- توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر

برای کاهش وابستگی گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک به انرژی‌های فسیلی، دولت‌ها باید سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی را افزایش دهند. این اقدام نه تنها پایداری سامانه‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد.

- آموزش و توانمندسازی نیروی کار

برای مدیریت مؤثر گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک، آموزش نیروی کار ماهر ضروری است. دولت‌ها می‌توانند با همکاری دانشگاه‌ها و مراکز آموزشی، دوره‌های تخصصی در حوزه کشت کنترل‌شده، فناوری‌های انرژی و سامانه‌های هوشمند برگزار کنند. همچنین، ایجاد برنامه‌های کارآموزی و حمایت از استارت‌آپ‌های فعال در این حوزه می‌تواند به توسعه مهارت‌های مورد نیاز کمک کند.

- تسهیل مقررات و صدور مجوزها

دولت‌ها و شهرداری‌ها باید با بازنگری در قوانین و مقررات، فرایند صدور مجوز برای راه‌اندازی گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک را تسهیل کنند. این شامل کاهش بروکراسی، ایجاد چارچوب‌های قانونی شفاف و ارائه راهنمایی‌های فنی به متقاضیان است. همچنین، اختصاص فضاهای شهری مناسب مانند پشت‌بام‌ها یا ساختمان‌های متروکه به این پروژه‌ها می‌تواند به گسترش آن‌ها کمک کند.

• تشویق مشارکت عمومی - خصوصی

دولت‌ها می‌توانند با ایجاد شراکت‌های عمومی - خصوصی، سرمایه‌گذاری در این حوزه را افزایش دهند. این مشارکت‌ها می‌توانند شامل همکاری با شرکت‌های فناوری، کشاورزی و انرژي برای توسعه پروژه‌های پایلوت یا ارائه خدمات پشتیبانی فنی و مالی باشد. چنین همکاری‌هایی ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد و سرعت گسترش فناوری را افزایش می‌دهد.

• آگاهی‌بخشی و جلب مشارکت جامعه

برای موفقیت گلخانه‌های تاریک انرژیتیک، جلب حمایت و مشارکت شهروندان ضروری است. دولت‌ها و شهرداری‌ها می‌توانند با برگزاری کمپین‌های آموزشی، کارگاه‌های عمومی و نمایشگاه‌های فناوری، مزایای این سامانه‌ها را به جامعه معرفی کنند. همچنین، تشویق شهروندان به خرید محصول‌های محلی تولیدشده در این گلخانه‌ها می‌تواند به تقویت اقتصاد محلی و افزایش پذیرش این فناوری کمک کند.

۳. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش برای حل چالش امنیت پایدار غذایی، راه‌کاری با دیدگاه جمعی به نگرش آب، محیط زیست، غذا و انرژي، تحت عنوان گلخانه تاریک انرژیتیک ارائه شده است. گلخانه تاریک انرژیتیک، یک سامانه به طور کامل ایزوله و کنترل شده برای رشد و تولید محصول کشاورزی است. این راه‌کار به دلیل به‌کارگیری نور مصنوعی با طول موج مرئی به جای نور خورشید (به دلیل حذف طول موج فرورسرخ)، باعث کاهش مصرف آب در تولید گیاه می‌شود؛ بنابراین امنیت پایدار آبی ایجاد می‌کند. همچنین، این سامانه با به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر برای تأمین انرژي و جذب دی‌اکسید کربن محیط در مراحل مختلف رشد گیاه، امنیت پایدار انرژي و حفظ محیط زیست را نیز در پی دارد.

گتت دارای سامانه‌های مختلفی از جمله، سازه، سامانه هوشمند روشنایی مصنوعی، سامانه هوشمند تهویه مطبوع، سامانه هوشمند آبیاری، سامانه هوشمند تزریق دی‌اکسید کربن و سامانه هوشمند کنترلی است.

گلخانه‌های تاریک انرژیتیک به عنوان یک فناوری پیشرفته و نوآورانه، پتانسیل بالایی برای تحول کشاورزی شهری و ایجاد شهرهای پایدار دارند. این سامانه‌ها با استفاده از فناوری‌هایی مانند ال‌ای‌دی‌های کم‌مصرف، سامانه‌های کنترل محیطی و کشت عمودی، امکان تولید محصول‌های کشاورزی در فضاهای کوچک و بدون نیاز به نور طبیعی خورشید را فراهم می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گلخانه‌های تاریک انرژیتیک به طور ویژه برای مناطق شهری که با محدودیت فضا، منابع و آلودگی محیطی مواجه هستند، مناسب باشند.

مزایای این سامانه‌ها بسیار گسترده و چشم‌گیر است. از یک سو، آن‌ها می‌توانند با کاهش مصرف آب و انرژي، کاهش ردپای کربن و تولید محصول‌های تازه و سالم در تمام طول سال، به بهبود امنیت غذایی و پایداری محیطی کمک کنند. از سوی دیگر، این گلخانه‌ها با استفاده بهینه از فضاهای کوچک و غیرقابل استفاده شهری، مانند پشت‌بام‌ها، زیرزمین‌ها یا ساختمان‌های متروکه، می‌توانند به ایجاد شهرهایی خودکف‌تر و پایدارتر کمک کنند. علاوه بر این، نمونه‌های موفق جهانی مانند گتت‌ام گریز در نیویورک، گروینگ آندرگروند در لندن و نوردیک هاروست در دانمارک نشان می‌دهند این فناوری نه تنها امکان‌پذیر است، بلکه می‌تواند در مقیاس‌های مختلف و در شرایط آب‌وهوایی متنوع نیز پیاده‌سازی شود.

با این حال، پیاده‌سازی گسترده گلخانه‌های تاریک انرژیتیک با چالش‌هایی نیز همراه است. هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به تخصص فنی و وابستگی به فناوری‌های پیشرفته، از جمله موانع اصلی در راه گسترش این سامانه‌ها هستند. علاوه بر این، مقاومت فرهنگی و اجتماعی در برابر پذیرش فناوری‌های جدید نیز می‌تواند چالشی جدی باشد. با این وجود، این چالش‌ها با اتخاذ سیاست‌های هوشمندانه و هدفمند قابل مدیریت هستند.

برای تحقق کامل پتانسیل گلخانه‌های تاریک انرژیتیک در شهرها، طراحی و اجرای سیاست‌های هوشمندانه و جامع ضروری است. در سطح کلان، دولت‌ها باید با تدوین قوانین حمایتی، ایجاد چارچوب‌های تنظیمی مناسب و اختصاص بودجه‌های ویژه، بستر لازم برای توسعه این فناوری را فراهم کنند. این شامل ارائه مشوق‌های مالیاتی، تسهیلات کم‌بهره بلندمدت و کاهش

عوارض برای سرمایه‌گذاران این حوزه می‌شود. هم‌زمان، شهرداری‌ها می‌توانند با بازنگری در مقررات شهری، مجوزهای سریع‌تر و ساده‌تری برای احداث این گلخانه‌ها در فضاهای بلااستفاده شهری صادر کنند.

در سطح عملیاتی، ایجاد مراکز آموزشی تخصصی برای تربیت نیروی انسانی ماهر در حوزه کشت کنترل‌شده و فناوری‌های مرتبط، ضروری است. همکاری بین دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و بخش خصوصی می‌تواند به توسعه استانداردها و پروتکل‌های فنی کمک کند. همچنین، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های کاربردی برای بومی‌سازی این فناوری و کاهش هزینه‌های اجرایی آن در هر منطقه خاص، از اهمیت بالایی برخوردار است.

سیاست‌گذاری‌های انرژی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت این پروژه‌ها دارند. توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر و ایجاد مکانیسم‌های خرید تضمینی برق تولیدی از منابع پاک، می‌تواند وابستگی این سامانه‌ها به شبکه‌های سنتی را کاهش دهد. در نهایت، طراحی کمپین‌های آگاهی‌بخشی عمومی و مشارکت دادن ذی‌نفعان محلی در فرایند برنامه‌ریزی و اجرا، پذیرش اجتماعی این فناوری نوین را افزایش خواهد داد. این مجموعه سیاست‌ها در کنار هم می‌تواند گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک را به یکی از ارکان اصلی توسعه شهری پایدار تبدیل کند.

گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک، نه تنها یک راه‌کار فنی برای افزایش تولید غذا در شهرها هستند، بلکه می‌توانند به ایجاد تحول‌های اجتماعی، اقتصادی و محیطی گسترده‌تری نیز منجر شوند. این سامانه‌ها می‌توانند به کاهش نابرابری‌های غذایی، ایجاد اشتغال محلی و افزایش آگاهی عمومی درباره پایداری محیطی کمک کنند. با توجه به چالش‌های جهانی مانند تغییر اقلیم، رشد جمعیت شهری و کاهش منابع طبیعی، سرمایه‌گذاری در این فناوری می‌تواند به ایجاد آینده‌ای پایدارتر و عادلانه‌تر برای همه کمک کند.

به طور خلاصه، گلخانه‌های تاریک انرژی‌تیک نه تنها یک راه‌کار مؤثر برای مقابله با چالش‌های کشاورزی شهری هستند، بلکه می‌توانند الگویی برای آینده کشاورزی در سراسر جهان باشند. با حمایت دولت‌ها، مشارکت بخش خصوصی و آگاهی‌بخشی به جامعه، می‌توان این فناوری را در مقیاس گسترده‌تری پیاده‌سازی کرد و به ایجاد شهرهایی پایدارتر، سالم‌تر و خودکف‌تر کمک کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس خود را از مرکز پژوهشی انرژی و دانشکده انرژی دانشگاه شهید بهشتی به دلیل حمایت‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند این مجموعه طی این پژوهش ابراز می‌دارند. بازخوردهای سازنده، دسترسی به امکانات پژوهشی و مشارکت‌های علمی این مرکز نقش مهمی در غنای این مطالعه داشته است.

منابع

1. U. N. Educational, *World Urbanization Prospects*, vol. 12. 2018. doi: 10.4054/demres.2005.12.9.
2. "Website:," population Division, World Urbanization Prospects 2018.
3. F. Orsini and R. Kahane, "Urban agriculture in the developing world: a review," pp. 695–720, 2013, doi: 10.1007/s13593-013-0143-z.
4. L. J. Pearson *et al.*, "opportunities Sustainable urban agriculture: stocktake and opportunities," *International Journal of Agricultural sustainability*, vol. 5903, 2011, doi: 10.3763/ijas.2009.0468.
5. F. Tian, "study and optimization of lighting systems for plant growth in a controlled environment," 2016.
6. D. Singh, C. Basu, M. Meinhardt-wollweber, and B. Roth, "LEDs for energy efficient greenhouse lighting," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 139–147, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.117.
7. O. Długosz-grochowska, A. Kołton, and R. Wojciechowska, "Modifying folate and polyphenol concentrations in Lamb' s lettuce by the use of LED supplemental lighting during cultivation in greenhouses," *Journal of Functional Foods*, vol. 26, pp. 228–237, 2016, doi: 10.1016/j.jff.2016.07.020.
8. M. A. Islam *et al.*, "Scientia Horticulturae Artificial light from light emitting diodes (LEDs) with a high portion of blue light results in shorter poinsettias compared to high pressure sodium (HPS) lamps," *Scientia Horticulturae*, vol. 147, pp. 136–143, 2012, doi: 10.1016/j.scienta.2012.08.034.
9. R. Hernández and C. Kubota, "Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs," *Environmental and Experimental Botany*, vol. 121, pp. 66–74, 2016, doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.04.001.
10. M. Anpo, H. Fukuda, and T. Wada, *Plant factory Using Artificial Light*. 2019.
11. T. Kozai, *Smart Plant Factory*. 2018. doi: 10.1007/978-981-13-1065-2.
12. K. Roney, "Hydroponic greenhouse energy supply based on renewable energy source," in *8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, 2015, pp. 703–707. doi: 10.1016/j.protcy.2015.02.099.
13. N. Yildirim and L. Bilir, "Evaluation of a hybrid system for a nearly zero energy greenhouse," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 1278–1290, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.068.
14. A. Marucci and A. Cappuccini, "Dynamic photovoltaic greenhouse: Energy efficiency in clear sky conditions," *Applied Energy*, vol. 170, pp. 362–376, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.138.
15. R. Carbone, "Photovoltaic systems for powering greenhouses," *IEEE*, pp. 474–479, 2011, doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036294.
16. H. Fatnassi, C. Poncet, M. Madeleine, R. Brun, and N. Bertin, "ScienceDirect A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate," *Solar Energy*, vol. 120, pp. 575–584, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.07.019.
17. E. Cuce, D. Harjunowibowo, and P. Mert, "Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 34–59, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.077.
18. Sandra Meier, "GOTHAM GREENS FARMS LLC SUSTAINABLE URBAN CEA," 2011.
19. A. Misuri, "Domestic Farming: The Pasona HQ Urban Farm and Future Applications In Interior Design," 2024. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/381613127>
20. A. M. Beacham, L. H. Vickers, and J. M. Monaghan, "Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards," May 04, 2019, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/14620316.2019.1574214.
21. M. Jans Singh, P. Fidler, R. Ward, and R. Choudhary, "Monitoring The Performance of An Underground Hydroponic Farm," in *International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, Apr. 2019, pp. 133–141. doi: 10.1680/icsic.64669.133.
22. Anna Husted Lægaard and Katrine Reinholdt Rasmussen, "farming for the future, a case study of vertical farming in Denmark," Copenhagen Business School M.Sc. International Marketing and Management, 2021.
23. N. Panotra *et al.*, "Vertical Farming: Addressing the Challenges of 21st Century Agriculture through Innovation," *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 14, no. 4, pp. 664–691, May 2024, doi: 10.9734/ijec/2024/v14i44150.