The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems
Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Online ISSN: 2980-8693

Analysis of Carbon Dioxide Concentration Effects on Bio-Energy Efficiency in the Energetic Dark Greenhouse as a Sustainable Energy Management System

Yazdan Alvari[1] | Ali Jahangiri[2] | Mohammad Ameri[3] | Majid Zandi[4*]

1. PhD Candidate, Department of Energy Conversion, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: y_alvari@sbu.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Energy Conversion, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_jahangiri@sbu.ac.ir
3. Professor, Department of Energy Conversion, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_ameri@sbu.ac.ir
4. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 26 November 2025
Revised: 29 December 2025
Accepted: 27 February 2026
Published Online: 22 June 2026

Keywords:
Carbon dioxide enrichment,
Energetic Dark Greenhouse,
Bioenergy efficiency,
Gompertz model,
Controlled environment agriculture,
Sustainable energy systems.

ABSTRACT

The rapid increase in global population, growing food demand, and the accelerated emission of greenhouse gases have intensified the need for sustainable agricultural systems. Modern greenhouse technologies are recognized as effective solutions to enhance crop productivity while minimizing energy consumption. Among these, the Energetic Dark Greenhouse (EDG) represents an advanced closed-loop cultivation system that operates entirely under artificial lighting with full environmental control. Such systems allow for precise regulation of temperature, humidity, and carbon dioxide (CO_2) levels, thereby enabling optimized photosynthetic efficiency. Since CO_2 is one of the primary substrates of photosynthesis, its concentration in the growing environment directly affects the rate of biomass accumulation. However, the relationship between CO_2 enrichment and plant productivity is non-linear, with saturation often occurring beyond optimal levels. The present study investigates the impact of three CO_2 concentrations (800, 1000, and 1200 ppm) on biomass growth and bioenergy efficiency of six short-term crops cultivated under controlled conditions in a EDG system.

Cite this article: Alvari, Y.; Jahangiri, A.; Ameri, M. & Zandi, M. (2026). Analysis of Carbon Dioxide Concentration Effects on Bio-Energy Efficiency in the Energetic Dark Greenhouse as a Sustainable Energy Management System. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (3), 417-428. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.405871.1199

© Yazdan Alvari, Ali Jahangiri, Mohammad Ameri, Majid Zandi **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.405871.1199

1. Introduction

The growing global population and rising demand for food have significantly increased energy consumption and environmental pressure in the agricultural sector. Controlled-environment systems, especially greenhouses, consume a substantial share of total agricultural energy, highlighting the need for sustainable and energy-efficient cultivation methods. This study addresses this challenge by investigating the role of carbon dioxide (CO_2) enrichment in improving photosynthetic efficiency and biomass energy yield in a fully controlled cultivation environment.

2. Materials and Methods

The experimental work was conducted at the Energy Research Center of Shahid Beheshti University using a fully enclosed EDG system equipped with LED lighting (adjustable spectral intensity), automated CO_2 injection, and variable-speed ventilation to maintain CO_2 fluctuations within ±50 ppm. Six short-cycle plants basil, mint, pennyroyal, parsley, Leek, and radish were cultivated for a 44-day growth period. The environmental parameters were maintained at 25 ± 2 °C temperature, 60–70% relative humidity, and constant nutrient supply.

A completely randomized design with three replicates per CO_2 level was applied. Biomass samples were collected every four days, and dry mass was determined after oven-drying at 70 °C until constant weight. Growth data were fitted using the Gompertz model, expressed as:

$$W(t) = ae^{-be^{-ct}} \quad \text{Equation 1}$$

where a represents the asymptotic fresh biomass, b the displacement factor, and c the relative growth rate. Model fitting was performed using nonlinear least squares, and R^2 values were used to evaluate accuracy. The bioenergy efficiency was calculated as the ratio of stored chemical energy to the total input electrical energy.

3. Results

The results demonstrated that CO_2 enrichment significantly affected the growth pattern of all plant species. The fresh biomass accumulation followed a sigmoidal curve consistent with the Gompertz model, with R^2 values ranging from 0.95 to 0.99. Increasing CO_2 concentration from 800 ppm to 1000 ppm enhanced the final fresh biomass by 18–25%, while further increase to 1200 ppm produced negligible additional growth, indicating photosynthetic saturation.Calculated bioenergy efficiencies ranged between 0.45% and 3.18%. The highest efficiency was observed for mint, whereas pennyroyal had the lowest value (0.53%). On average, CO_2 enrichment from 800 ppm to 1000 ppm increased bioenergy efficiency by 15–20%, but further enrichment to 1200 ppm had no significant benefit.

4. Discussion and Conclusion

The species-specific responses highlight the importance of morphological and physiological traits—such as leaf area, stomatal conductance, and photosynthetic capacity in determining CO_2 utilization efficiency. Although overall bioenergy efficiency values appear low (below 5%), they are consistent with previous studies on artificial-light plant production systems, where only a small fraction of the input electrical energy is converted into stored chemical energy. Most energy losses occur during photon conversion and respiratory metabolism. The findings confirm that optimizing CO_2 concentration around 1000 ppm offers the best trade-off between plant growth and energy consumption. Implementing dynamic CO_2 and lighting control strategies can therefore substantially improve the energy sustainability of closed plant factories. From an energy-sustainability perspective, the EDG system demonstrates potential for integration into urban food production and carbon management frameworks. With intelligent environmental control and increased planting density, its overall system performance could be significantly enhanced. This study thus provides both experimental evidence and modeling insight for designing low-energy, CO_2-optimized greenhouses that contribute to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) related to affordable clean energy (SDG 7) and sustainable food systems.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

تحلیل اثر غلظت دی‌اکسید کربن بر بهره‌وری انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی در گلخانهٔ تاریک انرژتیک به عنوان سامانه‌ای پایدار در مدیریت انرژی

یزدان الواری[۱] | علی جهانگیری[۲] | محمد عامری[۳] | مجید زندی[۴*]

۱. دانشجوی دکتری، گروه تبدیل انرژی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: y_alvari@sbu.ac.ir

۲. دانشیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_jahangiri@sbu.ac.ir

۳. استاد، گروه تبدیل انرژی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_ameri@sbu.ac.ir

۴. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه:
غلظت دی‌اکسید کربن،
گلخانهٔ تاریک انرژتیک،
بهره‌وری انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی،
مدل گمپرترز،
کشاورزی در محیط کنترل‌شده،
سیستم‌های انرژی پایدار.

چکیده

افزایش انتشار گاز دی‌اکسید کربن و رشد روزافزون تقاضا برای تولیدات کشاورزی، ضرورت گذار به سامانه‌های پایدار تولید را برجسته ساخته است. سامانه‌های گلخانه‌ای بسته، به‌ویژه گلخانهٔ تاریک انرژتیک، با قابلیت کنترل هم‌زمان پارامترهای محیطی، ابزار مناسبی برای ارتقای بازده انرژی در تولید گیاهان به شمار می‌آیند. در این پژوهش، اثر سه سطح غلظت دی‌اکسید کربن (۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام) بر رشد و بهره‌وری انرژی ذخیره‌شده زیستی شش گونهٔ گیاهی کوتاه‌دوره شامل ریحان، نعنا، پونه، جعفری، تره و تربچه در سامانهٔ گلخانهٔ تاریک انرژتیک مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های تجربی تجمع زیست‌توده طی دورهٔ رشد ۴۴روزه با مدل گمپرترز تحلیل و پارامترهای رشد (a، b و c) استخراج شد. نتایج نشان‌داد افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام موجب افزایش معنادار نرخ رشد نسبی و وزن نهایی گیاهان شد، در حالی که در سطح ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام روند رشد به حالت اشباع نزدیک شد. بیشترین بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی در سطح ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد، به طوری که در مقایسه با سطح ۸۰۰ پی‌پی‌ام به طور میانگین ۱۵ تا ۲۰ درصد بهبود داشت. این نتایج بیانگر آن است که تنظیم غلظت دی‌اکسید کربن در محدودهٔ بهینه می‌تواند با افزایش کارایی فتوسنتز، نسبت انرژی خروجی به ورودی را در سامانه‌های گلخانه‌ای هوشمند بهبود بخشد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنایی برای طراحی سیستم‌های کنترل خودکار دی‌اکسید کربن و مدیریت هوشمند انرژی در گلخانه‌های جدید باشد. استفاده از این سامانه‌ها گامی مؤثر در جهت توسعهٔ سامانه‌های انرژی پایدار در بخش کشاورزی محسوب شود. این پژوهش در راستای هدف توسعهٔ پایدار شمارهٔ ۷ (انرژی پاک و به‌صرفه) با تمرکز بر کاهش مصرف انرژی انجام شده است.

استناد: الواری، یزدان؛ جهانگیری، علی؛ عامری، محمد و زندی، مجید (۱۴۰۵). تحلیل اثر غلظت دی‌اکسید کربن بر بهره‌وری انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی در گلخانهٔ تاریک انرژتیک به عنوان سامانه‌ای پایدار در مدیریت انرژی. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۳) ۴۱۷-۴۲۸.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.405871.1199

© یزدان الواری، علی جهانگیری، محمد عامری، مجید زندی

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.405871.1199

۱. مقدمه

افزایش شتابان جمعیت جهان، رشد مصرف مواد غذایی و محدودیت منابع طبیعی، سبب شده است که بخش کشاورزی با چالش‌های عمیق انرژی و پایداری روبه‌رو شود. بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، بیش از ۲۰ درصد انرژی نهایی مصرفی در جهان به طور مستقیم یا غیرمستقیم به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص دارد و در برخی کشورها، سهم بخش گلخانه‌ای به بیش از ۶۰ درصد انرژی کل کشاورزی می‌رسد [۱ و ۲]. سهم قابل توجه مصرف انرژی در این بخش فشار شدیدی بر شبکهٔ برق وارد می‌کند و پایداری آن را با مخاطره روبه‌رو می‌سازد [۳ و ۴]. همچنین این میزان مصرف، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، که نیاز به کنترل دما و رطوبت بالاست، باعث افزایش فشار بر شبکهٔ انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۵]. از این‌رو، حرکت به سمت سامانه‌های تولید با بهره‌وری بالا و مصرف انرژی پایین، از اولویت‌های اساسی در توسعهٔ کشاورزی پایدار محسوب می‌شود [۶ و ۷].

یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش بهره‌وری انرژی در تولید گیاهان، بهینه‌سازی فرایند فتوسنتز از طریق کنترل عوامل محیطی است. فتوسنتز، فرایندی است که طی آن انرژی نوری به انرژی شیمیایی در زیست‌تودهٔ گیاه تبدیل می‌شود و در نهایت، منبع اولیهٔ انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی[1] را شکل می‌دهد. در این‌میان، دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از مواد اولیه کلیدی در واکنش فتوسنتز، نقشی تعیین‌کننده در نرخ تبدیل انرژی دارد [۸]. افزایش کنترل‌شدهٔ غلظت دی‌اکسید کربن در محیط رشد می‌تواند کارایی مصرف نور و در نتیجه، بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی را به طور قابل توجهی ارتقا دهد. با این‌حال، رابطهٔ بین غلظت دی‌اکسید کربن و عملکرد گیاه یک تابع غیرخطی است؛ به طوری که در سطوح پایین، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن رشد را تسریع می‌کند، ولی در غلظت‌های بالاتر، سیستم فتوسنتزی به حالت اشباع می‌رسد. از این‌رو، تعیین غلظت بهینهٔ دی‌اکسید کربن یکی از محورهای مهم تحقیقات اخیر در حوزهٔ سیستم‌های کنترل محیطی گلخانه‌ها بوده است [۹].

در دههٔ گذشته، کشورهای پیشرو در فناوری کشاورزی مانند هلند، ژاپن و چین، پژوهش‌های متعددی در زمینهٔ بهینه‌سازی ترکیب نور و دی‌اکسید کربن انجام داده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داده است تنظیم دقیق غلظت دی‌اکسید کربن بین ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ پی‌پی‌ام می‌تواند بازده فتوسنتز و تولید زیست‌توده را تا ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۱۰ و ۱۱]. با این‌حال، اغلب این تحقیقات بر جنبهٔ فیزیولوژیکی گیاه تمرکز داشته‌اند و کمتر به رابطهٔ میان مصرف انرژی الکتریکی سیستم و انرژی ذخیره‌شده در زیست‌توده پرداخته‌اند. در حالی که از دیدگاه سیستم‌های انرژی پایدار، تحلیل تراز انرژی در این فرایند برای طراحی سامانه‌های کم‌مصرف ضروری است.

یکی از نوآوری‌های جدید در این حوزه، توسعهٔ سامانه‌های گلخانه‌ای بسته با قابلیت کنترل کامل پارامترهای محیطی است. در این سامانه‌ها، به خلاف گلخانه‌های سنتی، نور خورشید حذف شده و از منابع نوری مصنوعی مانند ال‌ای‌دی با طیف قابل تنظیم استفاده می‌شود [۱۲]. این فناوری، که در این پژوهش با عنوان گلخانهٔ تاریک انرژتیک (گُتا) شناخته می‌شود، امکان کنترل دقیق متغیرهایی همچون شدت نور، ترکیب طیفی، دما، رطوبت و غلظت دی‌اکسید کربن را فراهم می‌سازد. سامانهٔ گُتا نه‌تنها برای تحقیقات رشد گیاه در شرایط کنترل‌شده مناسب است، بلکه می‌تواند بستری برای تحلیل دقیق بازده انرژی و بهینه‌سازی مصرف برق در واحد سطح باشد [۱۳].

مطالعات متعددی نشان داده‌اند بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی در سامانه‌های گلخانه‌ای بسته کمتر از ۵ درصد است؛ به این معنا که از کل انرژی الکتریکی مصرف‌شده برای روشنایی و تهویه، تنها بخش اندکی به صورت انرژی شیمیایی در گیاه ذخیره می‌شود [۱۴ و ۱۵]. بنابراین، ارزیابی علمی این بازده و شناسایی شرایطی که آن را افزایش می‌دهد، گامی کلیدی برای دستیابی به پایداری انرژی در کشاورزی مدرن محسوب می‌شود. در این راستا، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از پارامترهای قابل کنترل، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود نسبت انرژی خروجی به ورودی داشته باشد.

در پژوهش حاضر، با هدف بررسی این ارتباط، اثر سه سطح غلظت دی‌اکسید کربن (۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام) بر رشد و بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی شش گونهٔ گیاهی کوتاه‌دوره شامل ریحان، جعفری، نعنا، پونه، تربچه و تره در سامانهٔ گلخانهٔ

1. Bioenergy

تاریک انرژتیک مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های تجربی رشد به کمک مدل گمپرترز تحلیل و پارامترهای رشد برای هر گونه استخراج شد. سپس، با مقایسهٔ انرژی مصرفی و انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در زیست‌توده، بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی محاسبه شد تا رابطهٔ بین غلظت دی‌اکسید کربن و کارایی سیستم مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای طراحی سامانه‌های گلخانه‌ای هوشمند با تنظیم خودکار غلظت دی‌اکسید کربن و نور و همچنین راهنمایی برای مدیریت انرژی در تولید محصولات کشاورزی در مقیاس صنعتی باشد. از دیدگاه کلان، این تحقیق در چارچوب اهداف توسعهٔ پایدار[1] و محور «انرژی پاک و به‌صرفه[2] قابل تفسیر است، زیرا بر بهینه‌سازی استفاده از انرژی در تولید غذا تمرکز دارد و می‌تواند به کاهش ناترازی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی کمک کند [۱۶].

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سامانهٔ گلخانهٔ تاریک انرژتیک واقع در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی انجام شد. این سامانه به صورت بسته طراحی شده و مجهز به واحدهای کنترل دما، رطوبت نسبی، شدت نور و غلظت دی‌اکسید کربن است. منبع نور از نوع ال‌ای‌دی[3] با نور بنفش و شدت قابل تنظیم بوده که در این آزمایش انتگرال نوری روزانهٔ آن ۱۴/۴ $\frac{mol}{m^2.day}$ با طیف نوری ۴۵۰ تا ۶۶۰ نانومتر و سیستم تأمین دی‌اکسید کربن از سیلندر فشرده با کنترل خودکار تزریق استفاده می‌کند. تهویهٔ داخلی و همگن‌سازی هوا توسط فن‌های دور متغیر انجام شد تا نوسانات غلظت دی‌اکسید کربن کمتر از ±۵۰ پی‌پی‌ام باقی بماند. تصویر واقعی از گلخانهٔ تاریک انرژتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. تصویر واقعی از گلخانهٔ تاریک انرژتیک واقع در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی

آزمایش در قالب طرح تصادفی با سه سطح غلظت دی‌اکسید کربن ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام و شش گونهٔ گیاهی کوتاه‌دوره شامل ریحان[4]، نعنا[5]، پونه[6]، جعفری[7]، تره[8] و تربچه[9] انجام شد. هر تیمار سه تکرار داشت و هر تکرار شامل ۱۰ بوته بود. دمای محیط در محدودهٔ ۲±۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و رطوبت نسبی در محدودهٔ ۶۰ تا ۷۰ درصد نگه داشته شد. تغذیهٔ گیاهان با محلول غذایی یکنواخت و ثابت طی دوره انجام گرفت.

دورهٔ رشد برای همهٔ گونه‌ها ۴۴ روز در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری از زیست‌توده در فواصل زمانی ۴روزه انجام و جرم خشک کل گیاه پس از خشک کردن در دمای ۷۰ درجهٔ سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد. داده‌ها به صورت میانگین هر تیمار گزارش شد.

1. SDGs
2. SDG7
3. LED
4. Basil - *Ocimum basilicum L*
5. Mint - *Mentha* spp
6. Pennyroyal - *Mentha pulegium* L
7. Parsley - *Petroselinum crispum*
8. Leek - *Allium ampeloprasum*
9. Radish - *Raphanus sativus L*

داده‌های تجمع زیست‌توده بر حسب زمان با استفاده از مدل گمپرترز برازش داده شدند. این مدل به صورت معادلهٔ ۱ تعریف می‌شود:

$$W(t) = ae^{-be^{-ct}} \quad (۱)$$

که در آن $W(t)$ وزن‌تر زیست‌توده در زمان، a حداکثر وزن‌تر زیست‌توده، bضریب جابه‌جایی (طول از مبدأ) و c نرخ رشد نسبی است. برازش مدل با استفاده از روش حداقل مربعات غیرخطی[1] و نرم‌افزار مینی‌تب[2] انجام شد و شاخص ضریب تعیین R^2 برای ارزیابی دقت برازش محاسبه شد [۱۷].

برای تحلیل بهره‌وری انرژی، انرژی الکتریکی مصرف‌شده در سامانهٔ نوردهی، کنترل و تهویه به عنوان انرژی ورودی E_{in} در نظر گرفته شد. انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در زیست‌تودهٔ E_{bio} با استفاده از رابطهٔ ۲ برآورد شد.

$$E_{bio} = m_d \times HV \quad (۲)$$

که در آن m_d جرم خشک گیاه برحسب کیلوگرم و HV ارزش حرارتی متوسط زیست‌توده $\frac{MJ}{kg}$ ۱۷ است. نسبت انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در زیست‌توده به انرژی الکتریکی مصرف‌شده به عنوان شاخص بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی (η_{bio}) معرفی شد. مقایسهٔ تیمارها بر اساس این شاخص و پارامترهای مدل رشد انجام شد.

۳. یافته‌ها

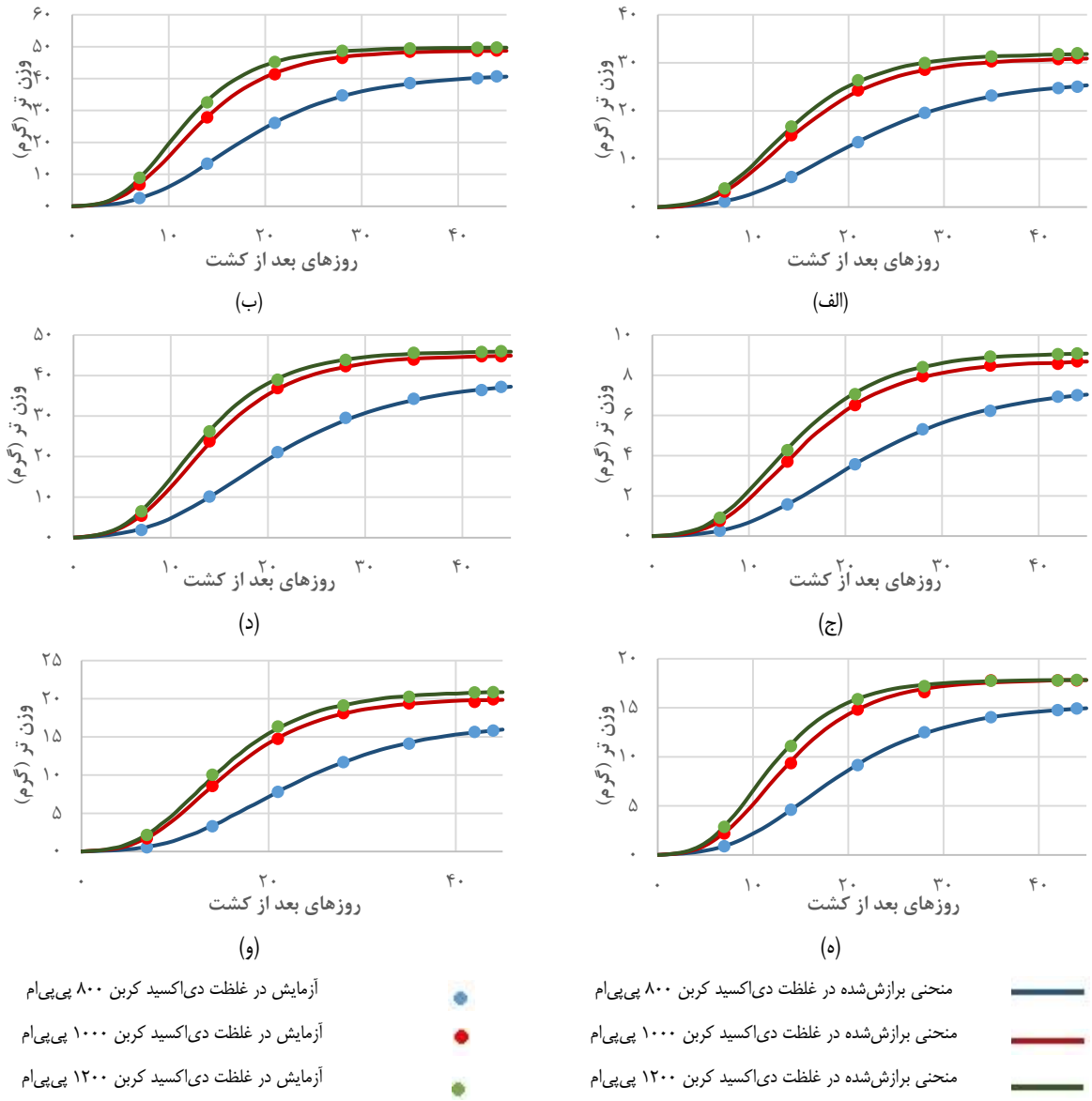
دورهٔ رشد برای همهٔ گونه‌ها ۴۴ روز در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری از زیست‌توده در فواصل زمانی ۴روزه انجام و وزن تر کل گیاه با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. داده‌ها به صورت میانگین هر تیمار گزارش شد. نتایج اندازه‌گیری وزن تر گیاهان طی دورهٔ رشد نشان داد افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تأثیر معناداری بر میزان تجمع زیست‌توده دارد. در همهٔ گونه‌ها، روند رشد از یک الگوی سیگموئیدی تبعیت کرد و حدود روز چهلم به حالت پایدار نزدیک شد. میانگین وزن تر در سطح ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام حدود ۱۸ تا ۲۵ درصد بیشتر از تیمار ۸۰۰ پی‌پی‌ام بود، در حالی که افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تا ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام به تغییر قابل توجهی در زیست‌تودهٔ نهایی منجر نشد. این نتیجه بیانگر رسیدن به آستانهٔ اشباع فتوسنتزی در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام است. تغییرات وزن تر شش گونهٔ گیاهی ریحان، نعنا، پونه، جعفری، تره و تربچه طی زمان تحت سطوح مختلف غلظت دی‌اکسید کربن در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳–۱. برازش مدل گمپرترز

مدل گمپرترز با دقت زیاد توانست تغییرات وزن تر بر حسب زمان را توصیف کند و ضریب تعیین R^2 برای همهٔ گونه‌ها بیش از ۰/۹۷ به دست آمد. پارامتر a حداکثر وزن تر زیست‌توده و c نرخ رشد نسبی در سطح ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام بیشترین مقدار را نشان دادند. این الگو نشان می‌دهد در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام، اگرچه آغاز رشد تسریع می‌شود، اما رشد کلی سیستم به دلیل محدودیت در کارایی نوری به حالت اشباع می‌رسد. مقادیر پارامترهای مدل گمپرترز برای گونه‌های مختلف در سطوح متفاوت دی‌اکسید کربن در جدول ۱ نشان داده شده است.

در شکل ۳ پارامترهای بی‌بعد a و c شش گونهٔ گیاهی تحت سطوح مختلف غلظت دی‌اکسید کربن نشان داده شده است. با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن از ۸۰۰ به ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام، مقدار a در تمامی گونه‌ها افزایش یافت و بیشترین رشد مربوط به نعنا و جعفری بود. همچنین، پارامتر c نیز روند افزایشی مشابهی نشان داد بیانگر بهبود نرخ رشد نسبی تحت شرایط دی‌اکسید کربن غنی‌شده است. در غلظت ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام، تغییرات دو پارامتر در بیشتر گونه‌ها به حالت اشباع نزدیک شد.

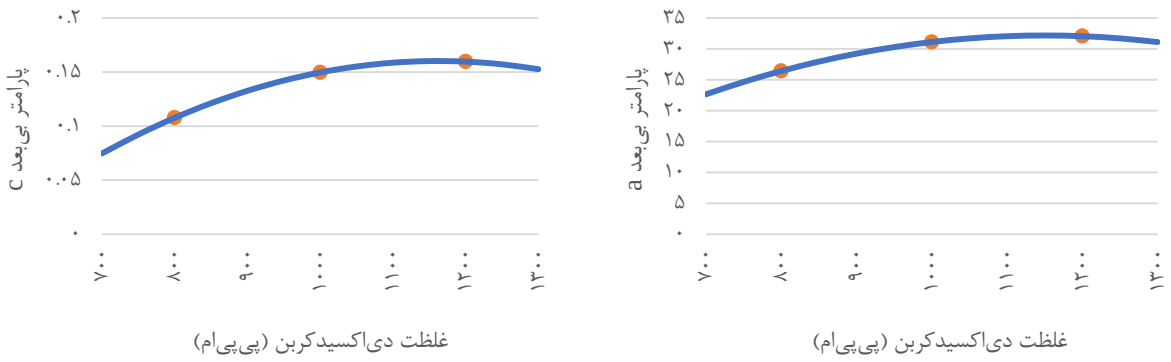
1. Nonlinear Least Squares
2. Minitab 19



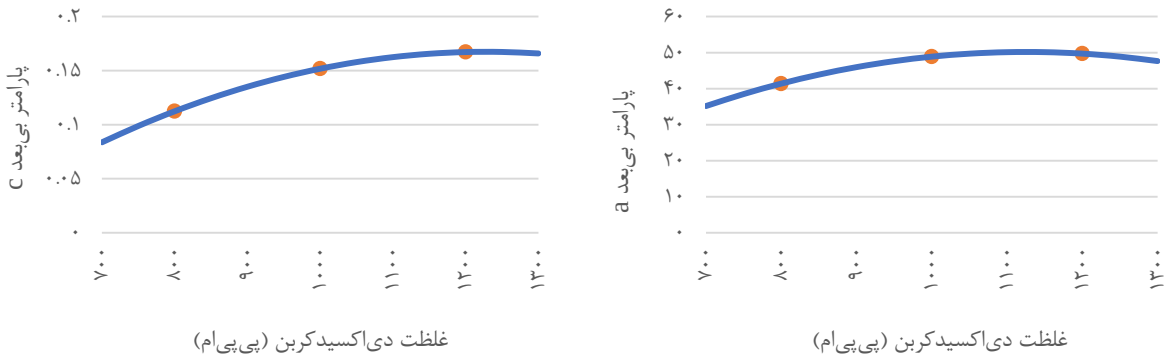
شکل ۲. تغییرات وزن تر شش گونهٔ گیاهی الف) ریحان ب) نعنا ج) پونه د) جعفری ه) تره و) تربچه طی زمان تحت سطوح مختلف غلظت دی‌اکسید کربن

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مدل گمپرترز برای گونه‌های مختلف در سطوح متفاوت دی‌اکسید کربن

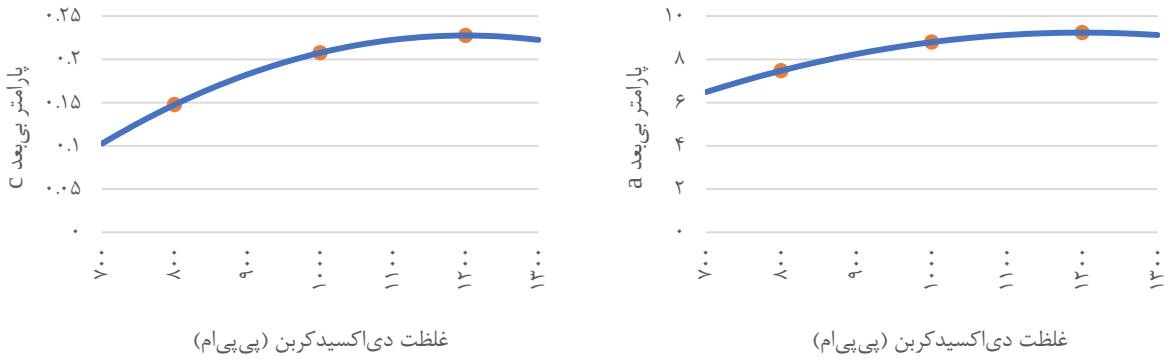
ریحان	$a=-0.000047(CO_2)^2+0.1081(CO_2)-29.9795$ $c=-0.0000004(CO_2)^2+0.00093(CO_2)-0.3803$
نعنا	$a=-0.000083(CO_2)^2+0.1868(CO_2)-54.9187$ $c=-0.0000003(CO_2)^2+0.000737(CO_2)-0.2852$
پونه	$a=-0.00011(CO2)^2+0.0264(CO2)-6.6027$ $c=-0.0000005(CO2)^2+0.0012(CO2)-0.4924$
جعفری	$a=-0.000063(CO_2)^2+0.1434(CO_2)-35.4208$ $c=-0.0000005(CO_2)^2+0.0013(CO_2)-0.5524$
تره	$a=-0.000032(CO_2)^2+0.0709(CO_2)-20.7002$ $c=-0.0000003(CO_2)^2+0.00077(CO_2)-0.3060$
تربچه	$a=-0.000026(CO_2)^2+0.0618(CO_2)-15.8769$ $c=-0.0000005(CO_2)^2+0.0012(CO_2)-0.4919$


پارامتر بی‌بعد a
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)
پارامتر بی‌بعد C
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)

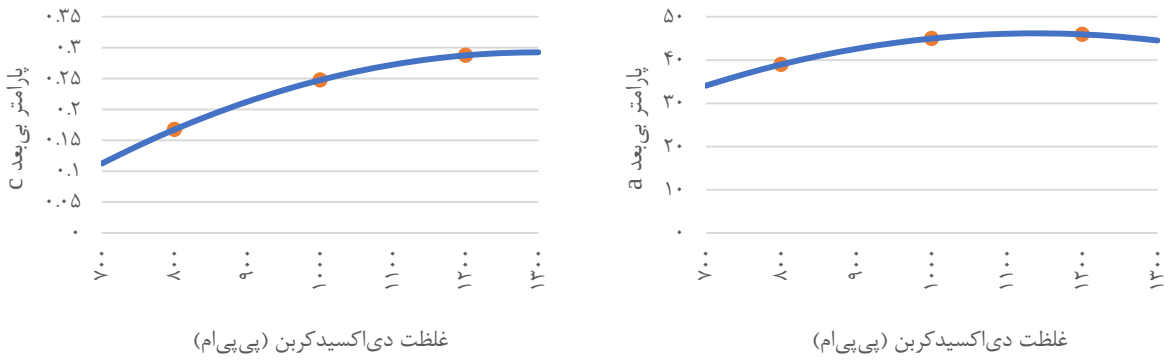
(الف)


پارامتر بی‌بعد a
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)
پارامتر بی‌بعد C
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)

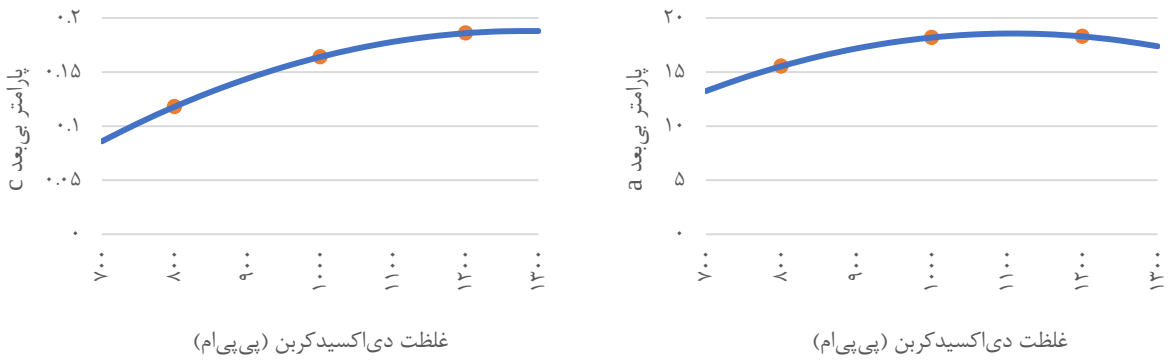
(ب)


پارامتر بی‌بعد a
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)
پارامتر بی‌بعد C
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)

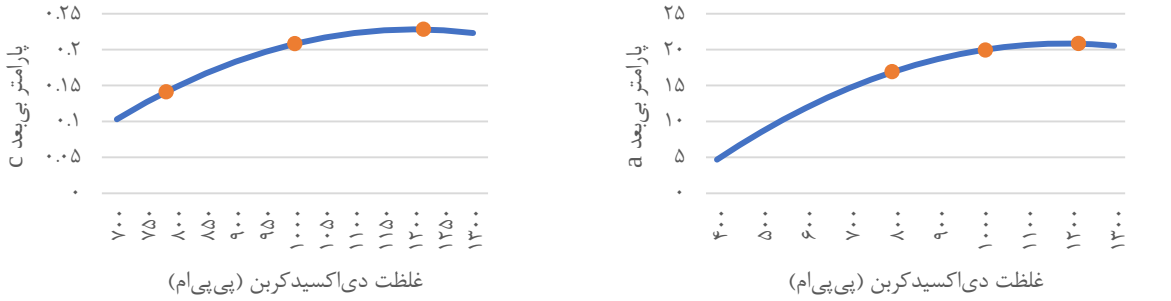
(ج)


پارامتر بی‌بعد a
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)
پارامتر بی‌بعد C
غلظت دی‌اکسیدکربن (پی‌پی‌ام)

(د)



(ه)



(و)

شکل ۳. پارامترهای بی‌بعد a و c شش گونهٔ گیاهی الف) ریحان ب) نعنا ج) پونه د) جعفری ه) تره و) تربچه تحت سطوح مختلف غلظت دی‌اکسید کربن

۳-۲. بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی

انرژی ورودی به سیستم رشد بسته گلخانهٔ تاریک انرژتیک برای هر مترمربع معادل ۱۲۵۹ مگاژول بود. با در نظر گرفتن نسبت‌های مادهٔ خشک برای هر گونه و ارزش حرارتی متوسط ۱۷مگاژول بر کیلوگرم، بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی محاسبه شد. بیشترین مقدار بازده در سطح غلظت دی‌اکسید کربن ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام مربوط به گیاه نعنا (۳/۱۳ درصد) و کمترین مقدار مربوط به پونه (۰/۵۳ درصد) بود. افزایش غلظت دی‌اکسید کربن از ۸۰۰ به ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام موجب افزایش ۱۰ تا ۲۵ درصدی بازده انرژی در بیشتر گونه‌ها شد، در حالی که در سطح ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام تغییر محسوسی مشاهده نشد. این نتایج بیانگر وجود نقطهٔ بهینهٔ عملکرد فتوسنتزی در حدود ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام است که با محدودیت‌های فیزیولوژیکی گیاه در غلظت‌های بالاتر سازگار است. بازده انرژی ذخیره‌شده زیستی گونه‌های مختلف در سطوح متفاوت دی‌اکسید کربن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی گونه‌های مختلف در سطوح متفاوت دی‌اکسید کربن

گونه	مادهٔ خشک (%)	η_{bio} (۸۰۰ پی‌پی‌ام)	η_{bio} (۱۰۰۰ پی‌پی‌ام)	η_{bio} (۱۲۰۰ پی‌پی‌ام)
تربچه	۱۳	٪۱.۱۹	٪۱.۴۱	٪۱.۴۸
نعنا	۱۹	٪۲.۶۵	٪۳.۱۳	٪۳.۱۸
پونه	۱۸	٪۰.۴۵	٪۰.۵۳	٪۰.۴۵
ریحان	۱۷	٪۱.۵۱	٪۱.۷۸	٪۱.۸۳
جعفری	۱۶	٪۲.۵۳	٪۲.۹۲	٪۲.۹۸
تره	۱۳	٪۰.۹۴	٪۱.۱۰	٪۱.۱۰

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در محدودهٔ ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام تأثیر قابل توجهی بر رشد و تولید زیست‌تودهٔ گیاهان دارد. روند تغییرات وزن تر در تمامی گونه‌ها از مدل گمپرترز تبعیت کرد و ضریب تعیین مدل برای تمامی گونه‌ها بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ بود که بیانگر دقت بالای برازش است. افزایش دی‌اکسید کربن تا سطح ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام به افزایش معنادار نرخ رشد نسبی و وزن نهایی گیاهان منجر شد، اما در غلظت ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام، شیب افزایش رشد کاهش یافت و در برخی گونه‌ها به حالت اشباع رسید.

مقایسهٔ گونه‌ها نشان داد واکنش گیاهان به افزایش دی‌اکسید کربن گونهٔ ویژه است. گونه‌هایی مانند نعنا و جعفری که دارای سطح برگ بالا و توان تبادلات گازی بیشتر هستند، نسبت به گونه‌هایی مانند پونه و تره عملکرد بهتری نشان دادند. بیشترین افزایش در زیست‌تودهٔ تازه مربوط به نعنا و جعفری بود که به‌ترتیب ۱۸ تا ۲۵ درصد نسبت به سطح ۸۰۰ پی‌پی‌ام افزایش داشتند. از سوی دیگر، تربچه و پونه به دلیل محدودیت رشد ریشه‌ای و ساختار برگ کوچک‌تر، افزایش کمتری را تجربه کردند. این رفتار گونهٔ ویژه را می‌توان به تفاوت در نرخ فتوسنتز خالص، راندمان مصرف آب و نسبت سطح برگ به وزن کل نسبت داد.

از نظر انرژی، محاسبهٔ بازده انرژی ذخیره‌شده زیستی نشان داد مقدار این پارامتر در محدودهٔ ۰/۴۵ تا ۳/۱۸ درصد متغیر است و بیشترین مقدار در سطح ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد. مقادیر به‌دست‌آمده با دامنهٔ گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه برای سامانه‌های رشد کنترل‌شده با نور مصنوعی (۲ تا ۵ درصد) همخوانی دارد. کم بودن مقدار بازده، نشانهٔ ناکارایی سیستم نیست، بلکه نتیجهٔ طبیعی تبدیل انرژی در مسیرهای نوری و زیستی است؛ زیرا تنها بخش محدودی از انرژی الکتریکی ورودی به صورت فوتون‌های فعال فتوسنتزی[1] جذب شده و سپس بخشی از آن نیز در تنفس گیاه به گرما تبدیل می‌شود. این نتایج تأیید می‌کند که طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های گلخانه‌ای بسته باید بر بهینه‌سازی ترکیب نور و کنترل دی‌اکسید کربن متمرکز باشد تا نسبت انرژی خروجی به ورودی افزایش یابد.

از منظر شبکهٔ برق، سامانه‌های گُتا اگرچه انرژی‌بر هستند، اما بار آن‌ها پیوسته و قابل زمان‌بندی است. بنابراین، می‌توان با تنظیم ساعت‌های روشنایی و تهویه، بخش قابل توجهی از مصرف را از دوره‌های پیک به ساعت‌های کم‌باری منتقل کرد. این ویژگی باعث می‌شود چنین گلخانه‌هایی به خلاف بسیاری از بارهای کشاورزی، پیک‌ساز نباشند و حتی در چارچوب مدیریت مصرف، به کاهش فشار شبکه کمک کنند.

با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن از ۸۰۰ به ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام، بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی به طور میانگین ۱۵ تا ۲۰ درصد بهبود یافت؛ اما از ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام تغییر معناداری مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد سطح بهینهٔ غلظت دی‌اکسید کربن برای تولید زیست‌تودهٔ تازه در محدودهٔ ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام قرار دارد. در سطح بالاتر، محدودیت در جذب نور و اشباع فتوسنتز باعث افت کارایی استفاده از انرژی می‌شود. بنابراین، افزایش بیش از حد غلظت دی‌اکسید کربن نه تنها مزیت قابل توجهی ندارد، بلکه می‌تواند مصرف انرژی را بدون افزایش متناسب زیست‌توده بالا ببرد.

از دیدگاه اقتصادی، مصرف بالای انرژی در سامانه‌های بسته تولید گیاه، مهم‌ترین مانع توسعه در مقیاس صنعتی است. در سامانهٔ گُتا مورد استفاده در این پژوهش، بخش عمده انرژی ورودی ۱۲۵۹ مگاژول بر مترمربع مربوط به واحدهای روشنایی و کنترل اقلیم بود. اگرچه بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی محاسبه‌شده پایین است (۰/۴۵ تا ۳/۱۸ درصد)، اما بهینه‌سازی غلظت دی‌اکسید کربن در سطح ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام موجب کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی مصرف ویژهٔ انرژی بر واحد زیست‌توده شد. این بهبود نشان می‌دهد بهره‌گیری از کنترل هوشمند نور و دی‌اکسید کربن می‌تواند نقش مؤثری در اقتصادی‌سازی سامانه‌های گُتا از طریق کاهش مصرف برق داشته باشد.

از دیدگاه پایداری انرژی، یافته‌های این پژوهش اهمیت بالایی دارند. اگرچه بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی کوچک است، اما در مقیاس صنعتی، با افزایش چگالی کاشت و بهینه‌سازی پارامترهای محیطی (نور، دی‌اکسید کربن و رطوبت)، می‌توان عملکرد کلی سامانه را به طور قابل توجهی ارتقا داد. علاوه بر این، انرژی ذخیره‌شده در زیست‌توده می‌تواند به عنوان منبع

1. PAR

انرژی زیستی[1] در زنجیرهٔ تولید پایدار مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع طبیعی و هدف‌گذاری برای کاهش شدت انرژی در بخش کشاورزی، اهمیت مضاعف دارد.

به طور کلی، نتایج نشان داد:

۱. مدل گمپرترز می‌تواند روند تجمع زیست‌تودهٔ تازه را با دقت بالا پیش‌بینی کند.

۲. غلظت بهینهٔ دی‌اکسید کربن برای حداکثر رشد و بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی حدود ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام است.

۳. تفاوت واکنش گونه‌ها به غلظت دی‌اکسید کربن باید در طراحی سامانه‌های کنترل محیط رشد لحاظ شود.

۴. بازده انرژی ذخیره‌شدهٔ زیستی به‌دست‌آمده در محدودهٔ طبیعی و قابل قبول برای سامانه‌های ال‌ای‌دی محور است.

توسعهٔ سیستم‌های رشد بسته با مدیریت هوشمند انرژی می‌تواند نقش مهمی در امنیت غذایی و انرژی ایفا کند.

در نهایت، این مطالعه می‌تواند مبنایی برای طراحی سامانه‌های گلخانه‌ای کم‌مصرف با قابلیت جذب و تبدیل بهینهٔ دی‌اکسید کربن باشد. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی رشد گیاه در کنار تحلیل‌های انرژی، راهی مؤثر برای کاهش ناترازی انرژی و ارتقای بهره‌وری در بخش کشاورزی پایدار فراهم می‌آورد. گلخانه‌های تاریک انرژتیک در ایران می‌توانند به ارتقای بهره‌وری کشاورزی کمک کنند و در سیاست‌های توسعهٔ انرژی پایدار کاربرد داشته باشند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پژوهش‌های آینده می‌توانند به بررسی تأثیر طولانی‌مدت گلخانه‌های تاریک انرژتیک بر مصرف انرژی شبکه، تحلیل اقتصادی بهره‌برداری و بهینه‌سازی سیستم‌های کنترل اقلیمی اختصاص یابند. همچنین، توسعهٔ مدل‌های پیش‌بینی رشد گیاه با استفاده از هوش مصنوعی و داده‌های محیطی گسترده، می‌تواند افق‌های جدیدی در بهبود بهره‌وری و پایداری انرژی باز کند.

1. Bioenergy

منابع

[1] The State of Food and Agriculture 2021. The State of Food and Agriculture 2021. FAO; 2021.

[2] Paris B, Vandorou F, Balafoutis AT, Vaiopoulos K, Kyriakarakos G, Manolakos D, et al. Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption. Applied Sciences (Switzerland). 2022 May 1;12(10).

[3] Ghandriz Y, Mahmoodian-Yonesi S, Alvari Y, Zandi M, Gavagsaz-Ghoachani R, Phattanasak M. A new techno-economic solution to supply energy, decrease the peak and reduce the cost of electricity consumed in the new agricultural structure. In: 2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C). 2022. p. 353–7.

[4] Gandomzadeh M, Younesi SM, Mosayyebi A, Zandi M. Development scenarios for electrical energy storage in Iran with Cross-Impact Balance method [Internet]. Vol. 1, Journal of Sustainable Energy Systems. 2022. Available from: https://ses.ut.ac.ir, (Persian).

[5] Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Long-term comparative analysis of machine learning models: A deep dive into applications of artificial intelligence for enhancing photovoltaic performance prediction. International Journal of Electrical Power & Energy Systems [Internet]. 2025;170:110866. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061525004144

[6] Akbarnejad S, Piryaei Z, Alvari Y, Shahidi P, Lavasani G, Zandi M. A Comparative Study on Different Energy Storage Scenarios in an Off-Grid Dark Vertical Greenhouse. In: 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). 2025. p. 1–6.

[7] Ghandriz Y, Alvari Y, Mahmoodian S, Mosayyebi A, Mir Drikvand M, Jahangiri AA, et al. Dynamic Modeling of Sustainable Water Security Based on Water, Environment, Food, and Energy Nexus (WEFEN) in an Energetic Dark Greenhouse (EDG). Journal of Sustainable Energy Systems [Internet]. 2024;3(4):361–79. Available from: https://ses.ut.ac.ir, (Persian).

[8] Alvari Y, ; Mahmoodian Younesi S, Zandi M. Energetic Dark Greenhouses: A Novel Approach in Urban Policy for Agricultural Advancements and Environmental Sustainability. Urban Development Policy Making [Internet]. 2025;2(3):263–75. Available from: https://judpm.ir, (Persian).

[9] Younesi SM, Alvari Y, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Modeling of Light and Carbon Dioxide Concentration in Energetic Dark Greenhouse (EDG). In: 2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). 2024. p. 1–6.

[10] Marchi B, Zanoni S, Pasetti M. Industrial Symbiosis for Greener Horticulture Practices: The CO2 Enrichment from Energy Intensive Industrial Processes. In: Procedia CIRP. Elsevier B.V.; 2018. p. 562–7.

[11] Sicher Richard RC, Bunce JA. The impact of enhanced atmospheric CO2 concentrations on the responses of maize and soybean to elevated growth temperatures. In: Combined Stresses in Plants: Physiological, Molecular, and Biochemical Aspects. Springer International Publishing; 2015. p. 27–48.

[12] Sara Mahmoodian Yonesi, Yazdan Alvari , Mahdi Soofi Abolghasem Mosayyebi MZ. Mini Energetic Dark Greenhouse (MEDG) with an approach to family economy of Tehran. Urban economics and planning. 2021, (Persian).

[13] Alvari Y, Zandi M, Jahangiri A, Ameri M, Gholami A, Shahidi P, et al. BIPV-driven smart vertical greenhouses: a water energy food environment nexus framework for sustainable urban agriculture. Energy Nexus [Internet]. 2025;19:100473. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125001147

[14] Graamans L, Baeza E, van den Dobbelsteen A, Tsafaras I, Stanghellini C. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. Agric Syst [Internet]. 2018 Feb 1 [cited 2023 Jun 5];160:31–43. Available from: https://research.wur.nl/en/publications/plant-factories-versus-greenhouses-comparison-of-resource-use-eff

[15] Engler N, Krarti M. Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021 May 1;141.

[16] THE 17 GOALS | Sustainable Development [Internet]. [cited 2025 Nov 8]. Available from: https://sdgs.un.org/goals

[17] Wang J, Guo X. The Gompertz model and its applications in microbial growth and bioproduction kinetics: Past, present and future. Biotechnol Adv [Internet]. 2024;72:108335. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975024000296