نشریه آب و توسعه پایدار. شهریور ماه ۱۴۰۵
سال سیزدهم. شماره دوم (پیاپی ۴۰). صفحات ۱۱۱ تا ۱۲۰

Journal of Water and Sustainable Development. September 2026
Volume 13. Issue 2 (Serial No. 40). pages 111 to 120

CC BY

نوع مقاله: پژوهشی کاربردی

Document Type: Applied Research Article

مقایسه بهره‌وری آب در سه سامانه کشت عمودی در شرایط غیرگلخانه‌ای در یک منطقه شهری نیمه‌خشک

مهدی حسین‌زاده[۱]، حسین انصاری[۲*]، ابوالفضل مساعدی[۲]، جواد شباهنگ[۳]

۱، ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانش آموخته دکتری بوم‌شناسی کشاورزی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: ansary@um.ac.ir

تاریخ دریافت ◄ ۱۴۰۴/۱۱/۲۹
تاریخ بازنگری ◄ ۱۴۰۵/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش ◄ ۱۴۰۵/۰۲/۱۲
تاریخ انتشار ◄ ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

چکیده

با تشدید بحران آب، گذار به سامانه‌های کشاورزی با بهره‌وری بالا یک ضرورت راهبردی برای ایران است؛ اما کشت عمودی به دلیل نبود داده‌های مقایسه‌ای میدانی از عملکرد سامانه‌های مختلف در شرایط واقعی، با مانع اجرا مواجه است. هدف این پژوهش، تحلیل کمّی بهره‌وری آب سه سامانه رایج کشت عمودی سیلندری در اقلیم نیمه‌خشک و فضای باز بود. این تحقیق به‌صورت میدانی در مشهد و در قالب طرح فاکتوریل سه‌عاملی (سامانه کشت × گونه گیاهی × سطح ارتفاعی) با پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در دو سال اجرا شد. کاهو، ریحان و تربچه در سازه‌های عمودی کشت و مدیریت آبیاری و تغذیه در همه سامانه‌ها یکسان‌سازی شد. نتایج مدل اثرات مختلط نشان داد؛ اثر اصلی سامانه کشت بر بهره‌وری آب معنی‌دار است. سامانه هیدروپونیک با بهره‌وری ۷/٤٦ گرم بر لیتر و کشت خاکی با ۷/۲۳ گرم بر لیتر در گروه آماری برتر قرار گرفتند و سامانه غیرخاکی با بهره‌وری ۵/۳۱ گرم بر لیتر عملکرد ضعیف‌تری داشت. گونه گیاهی قوی‌ترین عامل تأثیرگذار بود و بهره‌وری بر اساس وزن تر برای تربچه ۹/۰٤، ریحان ۵/۹٦ و کاهو ٤/۹۷ گرم بر لیتر به‌دست آمد. تربچه در بستر خاکی به حداکثر بهره‌وری رسید. همچنین گیاهان در سطوح میانی و پایینی سازه عملکرد بهتری از سطح فوقانی داشتند. یافته‌ها نشان می‌دهد اگرچه سامانه هیدروپونیک از نظر بهره وری مصرف آب کارآمدترین گزینه است، اما سامانه کشت عمودی خاکی با بهره‌وری بسیار نزدیک به هیدروپونیک، هزینه کمتر و سازگاری بالاتر با شرایط، راهکار عملی‌تر و قابل‌ترویج‌تری برای ایران محسوب می‌شود. انتخاب گونه مناسب و مدیریت ارتفاع کشت نیز برای بهینه‌سازی عملکرد ضروری است.

واژه‌های کلیدی: کشاورزی عمودی، بهره‌وری آب، هیدروپونیک، کشت غیرخاکی، کشت عمودی خاکی.

Comparison of Water Use Efficiency in Three Vertical Farming Systems under Non-Greenhouse Conditions in a Semi-Arid Urban Area

M. Hosseinzadeh[1], H. Ansari[2*], A. Mosaedi[2], J. Shabahang[3]

1, 2- Ph.D. Candidate and Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Ph.D. in Agricultural Ecology, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*** Corresponding, Author Email:** ansary@um.ac.ir

Received ▶ 18-02-2026
Revised ▶ 11-04-2026
Accepted ▶ 02-05-2026
Available online ▶ 16-09-2026

Abstract

With the intensification of the water crisis, transitioning to high-efficiency agricultural systems is a strategic necessity for Iran. However, vertical farming faces implementation barriers due to the lack of comparative field data on different systems under real-world conditions. This study provides a quantitative analysis of water use efficiency (WUE) in three common cylindrical vertical farming systems under semi-arid open-field conditions. The field research was conducted in Mashhad using a three-factor factorial design (cultivation system × plant species × vertical level) based on randomized complete blocks over two years. Lettuce, basil, and radish were cultivated in vertical structures, with irrigation and nutrition management standardized. Results from the mixed-effects model showed that the main effect of cultivation system on WUE was significant. The hydroponic system (7.46 g/L) and soil-based system (7.23 g/L) were in the same superior statistical group, while the soilless system (5.31 g/L) showed lower performance. Plant species was the strongest factor, with WUE based on fresh weight for radish (9.04 g/L), basil (5.96 g/L), and lettuce (4.97 g/L). Radish achieved maximum efficiency in the soil-based medium. Plants at the middle and lower levels performed better than those at the upper level. The findings indicate that although the hydroponic system is the most efficient option in terms of water use efficiency, the soil-based vertical farming system, with its close efficiency, lower cost, and compatibility with local conditions, represents a more practical solution for Iran. Selecting appropriate species and managing cultivation height are essential for optimizing performance.

Keywords: Vertical Farming, Water Use Efficiency, Hydroponics, Soilless Cultivation, Soil-Based Vertical Cultivation.

How to cite this article:

Hosseinzadeh, M., Ansari, H., Mosaedi, A. and Shabahang, J. (2026). Comparison of Water Use Efficiency in Three Vertical Farming Systems under Non-Greenhouse Conditions in a Semi-Arid Urban Area. Journal of Water and Sustainable Development, 13(2), 111-120. https://doi.org/10.22067/jwsd.v13i2.2602-1505

مقدمه

تأمین امنیت غذایی در شـرایط بحران آب و تغییرات اقلیمی، از اصـلی‌ترین دغدغه‌های کشـاورزی پایدار در ایران اسـت. با سرانه آب تجدیدپذیر کمتر از ۱۴۰۰ مترمکعب در سال، کشور در مرز تنش آبی شدید قرار گرفته و بخش کشاورزی به عنوان مصـرف‌کننده بیش از ۹۰ درصـد منابع آب، نیازمند تحولی بنیادین در الگوی مصـرف اسـت (Karandish و همکاران، ۲۰۲۲). هم‌زمان، گسـترش فیزیکی شـهرها به تغییر کاربری و کاهش اراضـی مسـتعد کشـاورزی در حاشـیه مناطق شـهری منجر شده است؛ روندی که می‌تواند ظرفیت تولید محلی غذا را محدود کند (Ahmadi Nadoushan و همکاران، ۲۰۲۳). این چالش دوگانه، ضـرورت توسـعه سـامانه‌های تولیدی با دو ویژگی کلیدی را آشکار می‌سازد: الف) بهره‌وری بسیار بالای آب و ب) قابلیت اسـتقرار در داخل یا مجاورت مراکز شـهری. در این راسـتا، کشـاورزی عمودی به عنوان یک پارادایم نوین، با چیدمان طبقات کشت در ارتفاع و خلق محیط‌های کنترل‌شده یـا نیمـه‌کنترل، وعـده تحقق هر دو ویژگی را می‌دهـد (Despommier، ۲۰۱۰). برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که سامانه‌های کشت عمودی مبتنی بر هیدروپونیک و بازچرخانی محلول غذایی، بسـته به نوع سـامانه و محصـول، می‌توانند مصـرف آب را به‌طور قابل‌توجهی نسـبت به کشـت متعارف کاهش دهند (Barbosa و همکاران، ۲۰۱۵).

با وجود این پتانسـیل انکارناپذیر، مسیر بومی‌سازی و توسعه مقیاس‌پذیر کشـت عمودی در ایران با مانعی جدی فقدان داده‌های مقایسـه‌ای معتبر از عملکرد سـامانه‌های مختلف در شرایط واقعی محیطی کشور مواجه است. مرور منابع داخلی نشـان می‌دهد تمرکز پژوهش‌های پیشـین عمدتاً بر دو حوزه متمرکز بوده اسـت: نخسـت، مطالعات نظری و امکان‌سـنجی کلان و دوم، گزارش عملکرد یـک سـامانـه خـاص (عمـدتـاً هیدروپونیک) در محیط‌هـای کـاملاً کنترل‌شـده گلخـانه‌ای هسـتند. با وجود توجه پژوهش‌های اخیر به امکان‌سـنجی کشاورزی عمودی در ایران، مقایسه تجربی عملکرد سامانه‌های مختلف کشـت عمودی در شـرایط محیطی واقعی کشـور همچنان به بررسـی بیشـتری نیاز دارد (Akbari و همکاران، ۲۰۲۴) . اگرچه این مطالعات ارزشـمند هسـتند، اما شـکاف عملیاتی آشـکاری را نمایان می‌سـازند: مدل‌های اقتصـادی پایدار و قابل ترویج برای کشـاورزان خرده‌پا یا کسـب‌وکارهای کوچک، اغلب ناگزیر به کار در فضـاهای باز یا نیمه‌باز با حداقلی از تجهیزات کنترل محیط هسـتند. در این شـرایط، مقایسه مستقیم و هم‌زمان سامانه‌های جایگزین- از پیشرفته (هیدروپونیک) و میانه (غیرخاکی) تا سـاده و کم‌هزینه (کشـت خاکی) - بر مبنای شـاخص‌های کلیدی مانند بهره‌وری آب، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

این شـکاف دانشـی، پیامدهای اجرایی مسـتقیمی دارد. تصمیم‌گیری بدون داده‌های مقایسـه‌ای ممکن است منجر به انتخاب نامتوازن سامانه شود. ممکن است یک پروژه صرفاً بر اسـاس ادعای بهره‌وری بالای هیدروپونیک، متحمل هزینه سـرمایه‌گذاری و عملیاتی سـنگینی شـود که در شـرایط واقعی بازدهی متناسـبی ندارد؛ یا بالعکس، از سـامانه سـاده‌تر خاکی چشـم‌پوشـی شـود درحالی‌که می‌تواند با هزینه‌ای به مراتب کمتر، بخش عمده‌ای از اهداف صـرفه‌جویی آب را محقق کند. افزون بر این، دو متغیر مهم دیگر نیز در موفقیت عملی یک سامانه کشت عمودی تأثیر به‌سزایی دارند که در مقایسه‌های سـاده‌شـده غالباً نادیده گرفته می‌شـوند. اول، واکنش ویژه ژنوتیپ‌های گیاهی مختلف به محیط ریشـه در هر بسـتر که می‌تواند بر عملکرد و بهره‌وری آب تأثیر قاطعی بگذارد (Kozai و همکاران، ۲۰۱۵) . این مسئله به‌ویژه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌خشـک اهمیت بیشـتری دارد (Savvas و Gruda، ۲۰۱۸). دوم، ایجاد ناهمگنی‌های ریزاقلیمی، به‌ویژه در توزیع نور و شـرایط محیطی در سـاختار عمودی سـامانه، می‌تواند موجب تفاوت در شـرایط رشـد و عملکرد گیاهان در سـطوح ارتفاعی مختلف شـود (Kamenchuk و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، یک ارزیابی واقع‌بینانه و کاربردی نمی‌تواند تنها به مقایسـه سـامانه‌ها محدود شـود، بلکه باید این ارزیابی را در قالب یک طرح چندعاملی که اثرات اصـلی و متقابل نوع سـامانه، گونه گیاهی و سـطح ارتفاعی را یکجا مورد سـنجش قرار دهد، انجام پذیرد.

بر این اسـاس، هدف اصـلی این پژوهش طراحی و اجرای یک آزمایش میدانی فاکتوریل کامل برای ارائه پاسـخی کمّی و مبتنی بر شـواهد به این پرسـش کلیدی است که «در شـرایط اقلیمی نیمه‌خشـک و فضـای باز، کدام سـامانه کشـت عمودی (هیـدروپونیـک، غیرخـاکی یـا خـاکی) از نظر بهره‌وری آب و عملکرد، برتری دارد، و این برتری چگونه تحت تأثیر انتخاب گونه گیاهی (کاهو، ریحان، تربچه) و موقعیت ارتفاعی گیاه در سـازه قرار می‌گیرد؟» سـؤالات ویژه پژوهش عبارتند از: ۱) آیا تفاوت معنی‌داری در شـاخص بهره‌وری آب بین سـه سـامانه مورد مطالعه وجود دارد؟ ۲) اثر متقابل سـامانه کشـت و گونه گیاهی بر عملکرد و بهره‌وری آب چگونه اسـت؟ ۳) گیاهان در کدام یک از سـطوح ارتفاعی (بالا، میانه، پایین) سـازه عملکرد بهتری دارند و آیا این الگو برای همه گونه‌ها یکسـان است؟ ۴) در نهایـت، بـا تلفیق یـافتـه‌هـای فنی و ملاحظـات عملیـاتی (پیچیدگی، قابلیت ترویج)، چه اولویت‌بندی برای کاربرد این سامانه‌ها در شرایط مشابه ایران قابل پیشنهاد است؟ نوآوری این مطالعه در رویکرد یکپارچه آن است که برای نخستین بار در کشور، این سه فاکتور مؤثر را به صورت هم‌زمان در شرایط غیرکنترل‌شـده میدانی مورد آزمون قرار می‌دهد. خروجی این تحقیق، فراتر از مقایسـه فنی، یک چارچوب تصـمیم‌گیری سیسـتمی ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنای علمی مستحکمی برای برنامه‌ریزی، سـرمایه‌گذاری و توسـعه قاعده‌مند کشـت عمودی در ایران به منظور بالابردن بهروری آب باشد.

مواد و روش‌ها

۱- محل و زمان اجرای پژوهش

این تحقیق به‌صورت میدانی و در دو سال متوالی (بهار سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴) در فضای باز پشت‌بام یک ساختمان مسکونی واقع در شهر مشهد اجرا شد. مختصات جغرافیایی محل آزمایش ۳۶ درجه، ۲۸ دقیقه و ۱۹ ثانیه شمالی و ۵۹ درجه، ۳۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۹۹۵ متر می‌باشد. شهر مشهد دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارش سالانه ۲۵۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد است. داده‌های اقلیمی تفصیلی منطقه در جدول (۱) ارائه شده است. انتخاب این محل، شرایط واقعی مواجهه سامانه‌های کشت عمودی با عوامل محیطی طبیعی از جمله تابش مستقیم خورشید، نوسان دمای روزانه، وزش باد و رطوبت نسبی پایین را تضمین می‌نمود.

جدول۱- مقادیر دراز مدت متغیرهای آب و هوایی شهر مشهد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۲)

پارامتر	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	میانگین
بارش (mm)	۵۰	۴	۷۸	۱۲۳	۲۵۶
دما (°C)	۱۴/۱	۲۴	۱۹/۶	۴/۶	۱۵/۷
رطوبت نسبی (%)	۶۲/۵	۳۵/۶	۴۹/۹	۷۳	۵۰/۴
تعداد روزهای یخبندان	۳۵	۰	۱	۵۴	۹۰

۲- طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل سه عاملی اجرا گردید. فصل به عنوان بلوک در نظر گرفته شد تا از اثرات فصل و سال بتوان به عنوان عامل مزاحم چشم‌پوشی نمود. فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از:

فاکتور اول (A): نوع سامانه کشت در سه سطح: ۱- هیدروپونیک، ۲-کشت غیرخاکی و ۳- کشت خاکی.

فاکتور دوم (B): گونه گیاهی در سه سطح: ۱- کاهو فرانسوی قرمز، ۲- ریحان سبز و ۳- تربچه.

فاکتور سوم (C): سطح ارتفاعی در سه سطح: ۱- سطح بالا (۶۷ سانتی متر بالا)، ۲-سطح میانی (۶۷ سانتی متر میانی) و ۳-سطح پایین (۶۷ سانتی متر پایین).

هر یک از ۲۷ ترکیب تیماری (۳×۳×۳) با ۵ تکرار و در دو سال (در نظر گرفته شده به عنوان بلوک برای کنترل اثرات فصلی) مورد ارزیابی قرار گرفتند که در مجموع منجر به ایجاد ۲۷۰ واحد آزمایشی مستقل شد.

۳- مشخصات و طراحی سازه کشت عمودی

سازه اصلی: برای تمامی تیمارها از سازه‌ای یکسان متشکل از ۹ ستون عمودی از جنس لوله PVC با قطر ۹۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲ متر استفاده شد (شکل ۱-الف). ستون‌ها به فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر و همانند رویکرد مورد استفاده در پژوهش‌های مشابه با جهت‌گیری شمالی-جنوبی نصب شدند تا حداکثر دریافت نور یکنواخت فراهم شود (Pennisi، ۲۰۲۰). بر روی هر ستون، ۱۵ حفره به فاصله ۱۳ سانتی‌متر برای استقرار گیاهان ایجاد شد. هر ستون به سه بخش مساوی (هر بخش حدود ۶۶ سانتی‌متر) تقسیم شد که به ترتیب از بالا به پایین به عنوان سطوح ارتفاعی بالا، میانی و پایین در نظر گرفته شدند. در مجموع، هر سطح ارتفاعی شامل ۵ گیاه بود. برای بررسی دقیق‌تر سازه، شکل (۱-ب) نمای شماتیک از چیدمان ستون‌ها، سیستم آبیاری و نحوه قرارگیری گیاهان را نشان می‌دهد. این طراحی امکان بررسی اثر ارتفاع و مقایسه مستقل سامانه‌ها را فراهم می‌کرد.

۴- آماده‌سازی سامانه‌های کشت

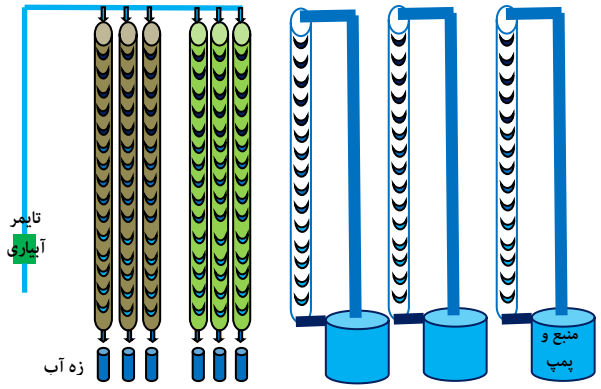
سامانه هیدروپونیک: در این ستون‌ها از بستر جامدی استفاده نشد. گیاهان درون سبدهای کشت کوچک حاوی پرلیت درشت قرار گرفته و ریشه‌های آنان در فضای داخلی ستون آویزان شد. یک سیستم چرخش آب و مواد غذایی مستقل برای هر گیاه (مخزن ۲۰ لیتری، پمپ، تایمر) طراحی شد. محلول غذایی هوگلند، استاندارد (EC=2 dS/m, pH=5.8-6) نگه داشته شد، و در چرخه‌ای ۵ دقیقه روشن و ۱۵ دقیقه خاموش به بالای ستون پمپاژ شد و به صورت ثقلی از روی ریشه‌ها عبور داده می‌شد. آب خروجی از پایین ستون جمع‌آوری و به مخزن بازگردانده می‌شد.

سامانه غیرخاکی: بستر کشت از مخلوط ۷۰ درصد کوکوپیت و ۳۰ درصد پرلیت (حجمی/حجمی) تشکیل شد. مشخصات فیزیکی-شیمیایی این بستر پیش از کشت تعیین گردید (جدول ۲). آبیاری با استفاده از یک سیستم قطره‌چکان مستقل برای هر ستون انجام شد. بر روی لوله داخلی در مرکز هر ستون، ۴ قطره‌چکان فشارثابت با دبی ۲ لیتر بر ساعت در فواصل ۴۰ سانتی‌متری نصب شد. زمان آبیاری روزانه با تایمر تنظیم می‌گردید.

سامانه خاکی: بستر کشت از ترکیب ۶۰ درصد خاک لومی زراعی، ۲۰ درصد خاک‌برگ پوسیده، ۱۰ درصد کوکوپیت و ۱۰ درصد پرلیت (حجمی/حجمی) تهیه شد. مشخصات این بستر در جدول (۲) ارائه شده است. سیستم آبیاری در این سامانه کاملاً مشابه سامانه غیرخاکی بود.



الف



ب

شکل ۱- الف) تصویر سازه طراحی و استفاده شده ب) نمای شماتیک از سازه

جدول ۲- مشخصات بسترهای کشت مورد استفاده در طرح

بخش	پارامتر	بستر خاکی	بستر غیرخاکی	واحد
ترکیب بستر	خاک زراعی	۶۰	-	%
	خاک‌برگ	۲۰	-	%
	کوکوپیت	۱۰	۷۰	%
	پرلیت	۱۰	۳۰	%
خصوصیات فیزیکی	ظرفیت نگهداری آب	۴۵-۵۰	۶۵-۷۵	%
	وزن مخصوص ظاهری	۹/۸-۰/۰	۲۵/۱۵-۰/۰	g/cm2
خصوصیات شیمیایی	pH	۵-۷/۶	۵/۵.۵-۶	-
	هدایت الکتریکی	۵/۱-۱	۰/۵-۱/۰	dS/m
	ماده آلی	4-5	-	%
	نیتروژن کل	۱۸/۱۲-۰/۰	-	%
	فسفر قابل جذب	۱۵-۲۰	-	mg/kg
	پتاسیم قابل جذب	۱۵۰-۲۰۰	-	mg/kg

جدول ۳- ویژگی منبع آب مصرفی در طرح

پارامتر	مقدار اندازه‌گیری‌شده	واحد اندازه‌گیری
pH	۲/۷	-
کدورت	۵/۱	NTU
شوری	۸۵۰	µS/cm
سختی کل	۲۸۰	mg/L
نیترات (NO3)	۲۵	mg/L
نیتریت (NO2)	۱/۰	mg/L
سرب (Pb)	۲	µg/L
آرسنیک (As)	۳	µg/L
کلیفرم کلی	صفر	CFU/100ml

۵- مدیریت کشت، آبیاری و تغذیه

منبع آب و کیفیت آن: آب مورد استفاده از شبکه آبرسانی شهری مشهد تأمین شد. مشخصات آب مصرفی در جدول (۳) آمده است.

تهیه بذر و کشت: بذرهای همه گیاهان با قوه نامیه بالای ۹۵٪ تهیه شدند. بذرها پیش از کشت به مدت ۱۵ دقیقه در محلول ۱٪ هیپوکلرید سدیم ضدعفونی شده و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند. بذرها در سینی‌های نشا حاوی پرلیت و کوکوپیت کشت شدند. پس از رسیدن نشاها به مرحله ۴-۲ برگی حقیقی، به ستون‌های عمودی منتقل شدند. دوره رشد از زمان انتقال نشا تا برداشت برای تربچه ۳۰ روز، برای کاهو ۴۵ روز و برای ریحان ۵۵ روز به طول انجامید.

مدیریت یکپارچه تغذیه: برای حذف اثر متغیر تغذیه، یک رژیم غذایی تحمیلی یکسان بر هر سه بستر اعمال گردید.

تمامی عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان منحصراً از طریق محلول غذایی هوگلند (Hoagland و Arnon، ۱۹۳۸) که مستقیماً به آب آبیاری تزریق می‌شد، تأمین گردید. غلظت این محلول با در نظر گرفتن ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر و احتمال آزادسازی تدریجی عناصر از خاک، برای بستر خاکی (EC=1.0 dS/m) پایین‌تر از بستر غیرخاکی EC=1.5 (dS/m) تنظیم شد. هدف این بود که غلظت نهایی و در دسترس عناصر غذایی در محیط ریشه هر سه ستون تا حد امکان یکسان باشد.

یکنواختی رطوبت: به منظور ایجاد شرایط رطوبتی قابل مقایسه در تمام سیستم‌های کشت، رویکرد آبیاری به گونه‌ای طراحی شد که در هر سه سیستم، گیاهان دسترسی یکنواخت و پایدار به رطوبت داشته باشند. در سیستم هیدروپونیک، این امر از طریق چرخش مداوم محلول غذایی محقق شد. برای ایجاد شرایط مشابه در سیستم‌های خاکی و غیرخاکی، آبیاری به میزانی انجام گردید که پس از هر دور آبیاری در هر بستر تخلیه زه‌آب انجام گیرد و این کار روزانه تکرار می‌شد، در این شرایط پس از تخلیه زه‌آب رطوبت یکنواختی در اختیار گیاهان قرار می‌گیرد. این رویکرد امکان مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف را تحت شرایط رطوبتی مشابه فراهم می‌سازد.

مدیریت آبیاری: حجم آب مصرفی در هر سامانه به دقت اندازه‌گیری شد. در سامانه هیدروپونیک، حجم آب ورودی به سیستم به صورت روزانه ثبت گردید. در سامانه‌های خاکی و غیرخاکی، حجم آب ورودی توسط تایمر نصب‌شده روی خط اصلی کنترل و حجم زه‌آب خروجی از هر ستون در ظروف توزین جمع‌آوری و اندازه‌گیری روزانه شد. مصرف آب خالص برای هر واحد آزمایشی از رابطه (حجم آب ورودی منهای حجم زه‌آب) محاسبه گردید.

۶- اندازه‌گیری‌ها و صفات مورد ارزیابی

در پایان دوره رشد و در زمان رسیدگی تجاری هر گیاه، عملکرد وزن تر و خشک کلیه اندام قابل مصرف از هر گیاه اندازه‌گیری شد. وزن تر بلافاصله با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱گرم اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته تا به وزن ثابت رسیدند و وزن خشک آن‌ها ثبت گردید.

مصرف آب: کل آب مصرفی خالص هر واحد آزمایشی از ابتدای دوره رشد تا زمان برداشت، از جمع‌آوری داده‌های روزانه محاسبه شد.

شاخص بهره‌وری آب برای هر گیاه و بر اساس هر دو وزن تر و خشک، به صورت مستقل از روابط زیر محاسبه شد:

بهره‌وری آب با وزن تر(WUEW) (گرم بر لیتر) = عملکرد وزن تر گیاه (گرم) / آب مصرفی خالص همان گیاه (لیتر)

بهره‌وری آب با وزن خشک (WUED) (گرم بر لیتر) = عملکرد وزن خشک گیاه (گرم) / آب مصرفی خالص همان گیاه (لیتر)

۷- تجزیه و تحلیل آماری

پس از اطمینان از برقراری مفروضات نرمالیته (آزمون شاپیرو-ویلک) و همگنی واریانس‌ها (آزمون لوین)، داده‌ها با استفاده از رویه مدل مختلط در نرم‌افزار SPSS تحلیل ند. در این مدل، اثرات سه فاکتور اصلی (سامانه کشت، گونه گیاهی، سطح ارتفاعی) و تمامی اثرات متقابل دو و سه‌گانه آنها به عنوان اثرات ثابت، و اثر بلوک (فصل) به عنوان اثر تصادفی در نظر گرفته شد. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و همچنین مقایسه میانگین‌های سطوح هر فاکتور در سطوح فاکتورهای دیگر (بررسی اثرات متقابل ساده) در صورت معنی‌دار بودن اثرات، با استفاده از آزمون تعقیبی انجام گرفت. همچنین، اندازه اثر (η^2 - Eta Squared) برای تعیین سهم هر فاکتور در تبیین واریانس کل محاسبه شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل آماری

۱- بررسی فرضیات آماری و انتخاب مدل

پیش از تحلیل نهایی، فرضیات بنیادین مدل‌های پارامتریک بررسی شد. با توجه به حجم نمونه مناسب (n=270) و تاب‌آوری قضیه حد مرکزی در برابر انحراف از نرمالیتی، استفاده از روش‌های پارامتریک موجه تشخیص داده شد. با این حال، آزمون لوین نشان داد که فرض همگنی واریانس‌ها برای داده‌های بهره‌وری آب در حالت وزن تر (p=0/007) و وزن خشک (p=0/001) نقض شده است. همچنین، حضور یک عامل تصادفی مؤثر (بلوک یا فصل) در طرح آزمایشی محرز بود. به همین دلایل، برای برآورد دقیق‌تر پارامترها و کنترل این ناهمگنی‌ها، از مدل اثرات مختلط (Mixed Model) با در نظر گرفتن «فصل» به عنوان اثر تصادفی استفاده شد. این رویکرد، قابلیت اطمینان و اعتبار نتایج استنباطی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۲- تجزیه واریانس و اندازه اثر

نتایج حاصل از مدل اثرات مختلط در جدول (۴) ارائه شده است. تمامی اثرات اصلی و تعاملی مورد بررسی، در سطح احتمال p≤۰/۰۵ معنی‌دار بودند. مقدار F برای اثر اصلی سامانه کشت بر بهره‌وری آب وزن تر ۳۹/۴۹ و برای گونه گیاهی ۱۶۰/۳۳ به دست آمد که نشان از تأثیر بسیار قوی این فاکتورها بر شاخص بهره‌وری آب دارد. اثر اصلی سطح ارتفاعی نیز با مقدار F=۷/۹۱ معنی‌دار بود. بر اساس محاسبه اندازه اثر (η^2)، فاکتور گونه گیاهی با تبیین ۵۱/۵ درصد از واریانس بهره‌وری آب وزن تر، بیشترین سهم را در تغییرات این شاخص داشت. پس از آن، فاکتور سامانه کشت با ۲۴/۷ درصد و فاکتور سطح ارتفاعی با ۵ درصد قرار گرفتند.

جدول ٤ - نتایج تجزیه واریانس حاصل از مدل اثرات مختلط برای شاخص‌های بهره‌وری آب

منبع تغییرات	درجه آزادی	بهره‌وری آب وزن تر			بهره‌وری آب وزن خشک		
		مقدار F	سطح معنی‌داری (p)	اندازه اثر (η^2)	مقدار F	سطح معنی‌داری (p)	اندازه اثر(η^2)
سامانه کشت (A)	۲	۳۹/۴۹	<۰/۰۰۱	۰/۵۱۵	۳/۸۳۷	<۰/۰۰۱	۰/۳۵۳
گونه گیاهی (B)	۲	۱۶۰/۳۳	<۰/۰۰۱	۰/۲۴۷	۸۵/۰۹	<۰/۰۰۱	۰/۳۴۸
سطح ارتفاعی (C)	۲	۷/۹۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۵۰	۳/۷۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۲
B × A	۴	۱۳/۸۳	<۰/۰۰۱	-	۴۰/۵۱	<۰/۰۰۱	-
C × A	۴	۲/۵۳	۰/۰۴۱	-	۵/۱۴	<۰/۰۰۱	-
C × B	۴	۹/۸۳	<۰/۰۰۱	-	۱۱/۰۸	<۰/۰۰۱	-
B × C × A	۸	۲/۹۸	۰/۰۰۳	-	۲/۳۱	۰/۰۲۱	-

۳- مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی

میانگین‌های سطوح مختلف فاکتورهای اصلی در جدول (۵) ارائه شده‌اند. مقایسه این میانگین‌ها با آزمون تعقیبی بونفرونی (برای کنترل خطای نوع اول در مقایسه‌های چندگانه) نشان داد که سامانه‌های هیدروپونیک (۷/۴۵ گرم بر لیتر) و خاکی (۷/۲۲ گرم بر لیتر) از نظر بهره‌وری آب برای وزن تر در یک گروه آماری قرار داشتند و عملکرد آن‌ها به طور معنی‌داری بالاتر از سامانه غیرخاکی (۵/۳۱ گرم بر لیتر) بود. در میان گونه‌های گیاهی، تربچه با ۹/۰۴ گرم بر لیتر بالاترین و کاهو با ۴/۹۷ گرم بر لیتر پایین‌ترین بهره‌وری آب در حالت وزن تر را داشتند. گیاهان واقع در سطوح میانی (۶/۹۵ گرم بر لیتر) و پایین (۶/۹۱ گرم بر لیتر) سازه نیز به طور معنی‌داری از گیاهان سطح بالا (۶/۱۲ گرم بر لیتر) کارآمدتر بودند. الگوی مشابهی برای شاخص بهره‌وری آب در حالت وزن خشک مشاهده شد. فقط در این حالت از نظر گونه گیاهی ریحان بالاتر از تربچه است و تربچه و کاهو تفاوت معنی‌داری ندارند (جدول ۵).

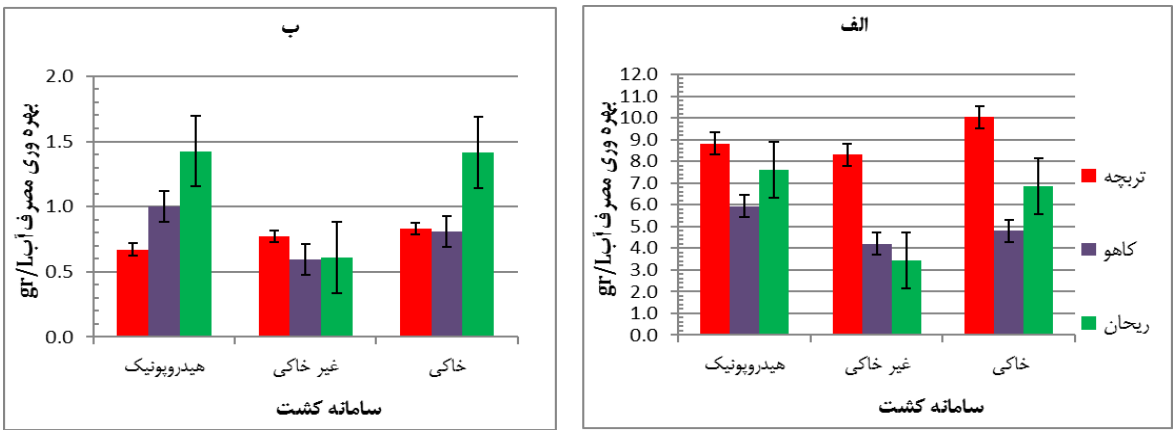
جدول ۵- مقایسه میانگین‌های شاخص بهره‌وری مصرف آب

فاکتور	سطح	WUEW (gr/L) (معیار انحراف ± میانگین)	گروه آماری**	WUED (gr/L) (انحراف معیار ± میانگین)	گروه آماری**
سامانه کشت	هیدروپونیک	۷/۴۵۶ ± ۲/۲۲	a	۱/۰۳۳ ± ۰/۴۳	a
	خاکی	۷/۲۲۶ ± ۳/۰۲	a	۱/۰۲۰ ± ۰/۳۹	a
	غیرخاکی	۵/۳۱۰ ± ۲/۷۸	b	۰/۶۵۸ ± ۰/۲۶	b
گونه گیاهی	تربچه	۹/۰۴۷ ± ۲/۶۳	a	۰/۷۵۸ ± ۰/۲۶	b
	ریحان	۵/۹۶۶ ± ۲/۳۶	b	۱/۱۵۰ ± ۰/۴۸	a
	کاهو	۴/۹۷۹ ± ۱/۷۳	c	۰/۸۰۳ ± ۰/۳۳	b
سطح ارتفاعی	میانی	۶/۹۵۷ ± ۳/۱۱	a	۰/۹۳۵ ± ۰/۳۴	a
	پایین	۶/۹۱۵ ± ۲/۹۲	a	۰/۹۲۴ ± ۰/۴۱	a
	بالا	۶/۱۲۰ ± ۲/۴۳	b	۰/۸۵۲ ± ۰/۴۶	b

**میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ هستند (آزمون LSD).

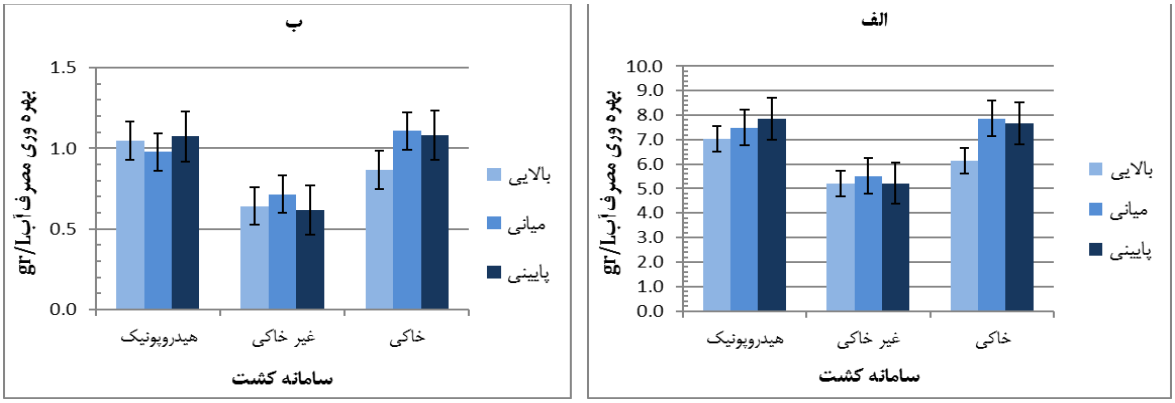
۴- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل

بررسی نمودار اثر متقابل سامانه کشت در گونه گیاهی نشان داد که الگوی واکنش بهره‌وری آب به نوع سامانه، برای هر گیاه، منحصربه‌فرد است (شکل ۲). بیشترین بهره‌وری آب بر اساس وزن تر با میانگین ۱۰/۳ گرم بر لیتر در تیمار کشت خاکی توأم با گیاه تربچه حاصل شد. پس از آن، تیمار هیدروپونیک توأم با تربچه با میانگین ۸/۹ گرم بر لیتر قرار داشت. در مقابل، کمترین بهره وری با میانگین ۳/۵ گرم بر لیتر متعلق به تیمار کشت غیرخاکی توأم با ریحان بود. در شاخص وزن خشک، بیشترین بهره‌وری با میانگین ۱/۴ گرم بر لیتر به تیمار هیدروپونیک توأم با ریحان تعلق گرفت.



شکل ۲- اثر متقابل سامانه کشت × گونه گیاهی بر بهره‌وری آب الف) وزن تر ب) وزن خشک

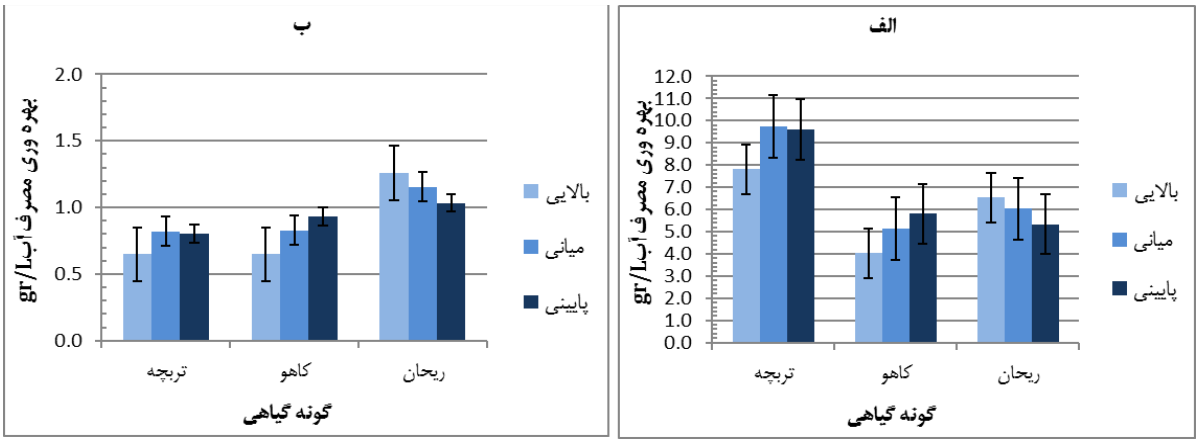
اثر متقابل سامانه کشت در سطح ارتفاعی حاکی از آن بود که اگرچه در بیشتر سامانه‌ها عملکرد در سطوح میانی و پایینی بر سطح بالایی برتری داشت، اما میزان این برتری تحت تأثیر نوع سامانه قرار داشت. به‌طور مشخص، کاهش عملکرد در سطح بالایی سازه در سامانه کشت خاکی محسوس‌تر از سامانه هیدروپونیک بود (شکل ۳).



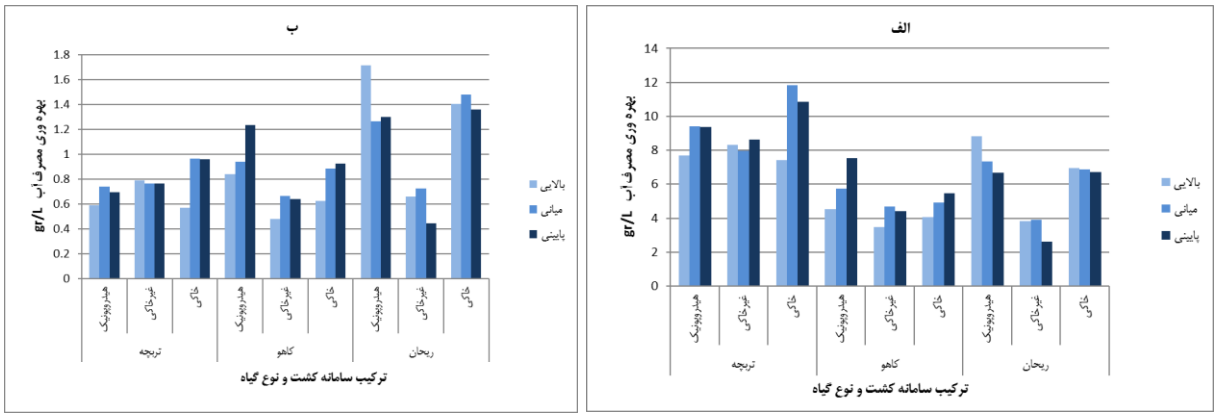
شکل ۳- اثر متقابل سامانه کشت × سطح ارتفاعی بر بهره‌وری آب الف)وزن تر ب)وزن خشک

در بررسی اثر متقابل گونه گیاهی در سطح ارتفاعی مشخص شد که حساسیت به تغییرات ارتفاع در گونه‌های مختلف یکسان نبود. گیاه کاهو بیشترین کاهش عملکرد را در سطح بالایی از خود نشان داد، درحالی‌که گیاهان تربچه و ریحان به طور معنی‌داری پایداری نسبی بیشتری در سطوح مختلف ارتفاعی داشتند (شکل ۴).

نهایتاً، معنی‌دار بودن اثر متقابل سه‌گانه سامانه کشت در گونه گیاهی و سطح ارتفاعی نشان داد که الگوی پاسخ گیاهان به تغییرات ارتفاع، وابسته به سامانه کشت انتخابی است (شکل ۵). به عنوان نمونه، برتری سطوح پایینی نسبت به بالایی برای گیاه تربچه در سامانه خاکی بسیار بارزتر از همان گیاه در سامانه هیدروپونیک بود.



شکل ٤- اثر متقابل گونه گیاهی × سطح ارتفاعی بر بهره‌وری آب الف)وزن تر ب)وزن خشک



شکل ۵- اثر متقابل سامانه کشت × گونه گیاهی × سطح ارتفاعی بر شاخص بهره‌وری آب الف)وزن تر ب)وزن خشک

بحث

۱- بهره‌وری سامانه‌های کشت: اولویت فنی در مقابل ملاحظات عملی

مطابق با انتظار و همسو با ادبیات جهانی (Al-Kodmany، ۲۰۱۸؛ Hasan و همکاران، ۲۰۲۵) سامانه هیدروپونیک با ثبت بالاترین میانگین بهره‌وری مصرف آب در حالت وزن تر (۷/۴۶ گرم بر لیتر) به عنوان کارآمدترین سامانه از نظر فنی شناسایی شد. پژوهش‌های اخیر نیز عملکرد برتر سیستم‌های هیدروپونیک را برای سبزیجات برگی تأیید کرده‌اند (Hutchinson و همکاران، ۲۰۲۵). این برتری را می‌توان به دسترسی مستقیم، یکنواخت و هوادهی‌شده ریشه به آب و مواد غذایی نسبت داد که منجر به جذب بهینه و کاهش تلفات می‌گردد (Resh، ۲۰۲۲). نکته قابل تأمل برای کاربرد در شرایط ایران، عملکرد بسیار نزدیک و آماری هم‌گروه سامانه خاکی (۷/۲۳ گرم بر لیتر) بود. این نتیجه نشان می‌دهد که با مدیریت صحیح می‌توان بهره‌وری آب در کشت خاکی عمودی را تا سطحی نزدیک به سیستم‌های پیشرفته افزایش داد. عملکرد ضعیف‌تر سامانه غیرخاکی احتمالاً ناشی از عدم تعادل رطوبتی و تهویه‌ای در شرایط آب و هوایی خشک است که با گزارش گرودا در مورد چالش‌های بسترهای سبک در اقلیم‌های خشک مطابقت دارد (Gruda، ۲۰۱۹).

۲- نقش تعیین‌کننده گونه گیاهی و تعامل آن با سامانه کشت

قوی‌ترین عامل تأثیرگذار در حالت تر در این پژوهش، گونه گیاهی بود که بیش از ۵۰٪ از تغییرات بهره‌وری آب را تبیین کرد. برتری تربچه در بهره‌وری آب در حالت وزن تر منطبق با ویژگی‌های فیزیولوژیک آن از جمله دوره رشد کوتاه، سیستم ریشه‌ای فشرده و بهره‌وری بالای انتقال فتوسنتزی است (Kozai و همکاران، ۲۰۱۵). تعامل معنی‌دار گونه و سامانه (مثلاً عملکرد عالی تربچه در خاک) نشان می‌دهد که سازگاری مورفولوژیک ریشه با ساختار بستر عاملی کلیدی است. این یافته با نتایج پژوهش‌های جدید در مورد برتری سیستم‌های بستری برای برخی محصولات همخوانی دارد (Hutchinson و همکاران، ۲۰۲۵). موفقیت ریحان در تولید ماده خشک در سیستم هیدروپونیک نیز می‌تواند ناشی از تأمین پایدار عناصر غذایی برای تولید متابولیت‌های ثانویه باشد (Sardare و Admane، ۲۰۱۳). این یافته‌ها بر لزوم انتخاب گونه‌های هدفمند برای هر سامانه تأکید می‌کنند.

۳- مدیریت ارتفاع: بهره‌برداری از گرادیان‌های ریزاقلیمی

برتری پایدار سطوح میانی و پایینی سازه بر سطح فوقانی، بازتاب واضحی از تشکیل گرادیان‌های ریزاقلیمی نامطلوب (دما و تابش بیشتر، رطوبت کمتر) در ارتفاع بالاتر است

(Kamenchuk و همکاران، ۲۰۲۳؛ Benke و Tomkins، ۲۰۱۷). کاهش کمتر عملکرد در سطح بالای سازه‌های هیدروپونیک، ظرفیت تعدیل‌کنندگی محیط ریشه در این سیستم‌ها را نشان می‌دهد (Kozai و همکاران ، ۲۰۱۵). این امر برای طراحی سازه‌ها حیاتی است. به این منظور می‌توان از کشت گونه‌های متحمل (مانند ریحان) در طبقات بالا استفاده نمود و یا اینکه تمهیدات سایه‌اندازی و خنک‌کنندگی برای طبقات بالا در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با رویکردی نظام‌مند و در شرایط واقعی میدانی، به مقایسه کمی بهره‌وری آب سه سامانه کشت عمودی رایج در اقلیم نیمه‌خشک پرداخت. یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب سامانه بهینه نیازمند نگاه چندبعدی به شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است (Pennisi و همکاران ، ۲۰۲۵) و در پاسخ به بحران آب و نیاز به تولید غذای پایدار، کشت عمودی در فضای باز می‌تواند یک راهکار عملی و با بهره وری بالا باشد، مشروط بر آن که انتخاب و مدیریت سامانه مبتنی بر شواهد و متناسب با شرایط بومی انجام پذیرد.

از نظر حداکثر بهره‌وری فنی مصرف آب، سامانه هیدروپونیک با اختلاف قابل توجهی نسبت به سامانه غیرخاکی و با برتری اندکی نسبت به سامانه خاکی، گزینه بهینه است. این برتری ناشی از کنترل دقیق‌تر محیط ریشه و کاهش اتلاف آب می‌باشد.

با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، فنی و قابلیت ترویج، سامانه کشت عمودی خاکی به عنوان راهکار برتر عملیاتی برای توسعه در مقیاس گسترده در ایران معرفی می‌شود. دلیل این امر، دستیابی به بهره‌وری آبی بسیار نزدیک به هیدروپونیک، همراه با هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی پایین‌تر، نیاز به دانش فنی کمتر و سازگاری بیشتر با ساختار کشاورزی موجود است.

گونه گیاهی قوی‌ترین عامل تعیین‌کننده بهره‌وری سیستم است. تربچه برای تولید سریع ماده تر و ریحان برای تولید ماده خشک و متابولیت‌های ثانویه، گونه‌های سازگار و کارآمد شناسایی شدند.

گرادیان نامطلوب ریزاقلیم در ارتفاع یک چالش واقعی است که با انتخاب گونه‌های متحمل برای سطوح بالا (مانند ریحان) و اولویت‌دهی به کشت‌های حساس در سطوح میانی و پایین (مانند کاهو) قابل مدیریت است.

به طور خلاصه، در شرایط نیمه‌خشک و فضای باز، سامانه هیدروپونیک از نظر فنی کارآمدترین گزینه است، اما سامانه کشت عمودی خاکی با بهره‌وری قابل قبول و نزدیک به آن، به دلیل هزینه کمتر، پیچیدگی پایین‌تر و سازگاری با دانش بومی، گزینه عملی‌تر و قابل ترویج‌تری برای توسعه در مقیاس وسیع‌تر در ایران محسوب می‌شود. موفقیت نهایی در گرو انتخاب سه‌گانه هوشمندانه است: ۱) سامانه کشت متناسب با بودجه و دانش فنی، ۲) گونه گیاهی سازگار با آن سامانه و بازار هدف، و ۳) مدیریت ارتفاع با اولویت‌دهی به سطوح میانی و پایین برای کشت‌های حساس.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهاد می شود که برنامه‌های حمایتی و آموزشی برای ترویج سامانه کشت عمودی خاکی به عنوان نقطه آغاز مقرون‌به‌صرفه و کم‌ریسک برای کشاورزان و کسب‌وکارهای کوچک توسعه یابد. ضمن آنکه سازه‌ها با در نظر گرفتن مدیریت ریزاقلیم (مانند استفاده از سایه‌بان جزئی برای طبقات فوقانی) می‌بایست طراحی شوند. علاوه بر موارد بیان شده، موارد زیر برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شوند.

- بررسی اقتصادی دقیق (تحلیل هزینه-فایده) هر یک از سامانه‌ها در مقیاس نیمه‌تجاری، با توجه به نقدهای اخیر در مورد ردپای کربن این سامانه‌ها.
- آزمون این سامانه‌ها با گونه‌های باارزش‌تر و پرمصرف (مانند توت فرنگی، سبزیجات برگی خاص) و مقایسه نتایج با پژوهش‌های مشابه داخلی.
- مطالعه تأثیر اصلاح‌کننده‌های مختلف بستر (مانند هیدروژل‌ها) بر پایداری رطوبت و بهره‌وری آب در سامانه خاکی.
- ادغام سامانه‌های کشت عمودی با سیستم‌های بازیافت آب خاکستری برای پایداری بیشتر.
- تغییر ابعاد سازه مانند اندازه سیلندر، فاصله استقرار و سایر پارامترها.

منابع

سازمان هواشناسی کشور. ۱۴۰۲. آمارنامه اقلیمی استان خراسان رضوی: دوره آماری ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۰). معاونت توسعه و پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور. https://www.irimo.ir/fa/climate

Ahmadi Nadoushan, M., Soffianian, A., Fakheran, S., & Kheirkhah Zarkesh, M. (2023). Measuring the extent and impact of urban expansion in an agricultural-urbanized landscape in Central Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 195, 1113. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11730-8

Akbari, Z., Yari Hesar, A., Siamian, N., Fürst, C., Värnik, R., & Azadi, H. (2024). Feasibility of using vertical farming in northern Iran: A multiple necessity. Journal of Environmental Management, 354, 120232. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120232?utm_source=chatgpt.com

efficiencies. HortScience, 60(4), 601–612. https://doi.org/10.21273/HORTSCI18391-24

Kamenchuk, V., Rumiantsev, B., Dzhatdoeva, S., Sadykhov, E., & Kochkarov, A. (2023). Analysis of Cross-Influence of Microclimate, Lighting, and Soil Parameters in the Vertical Farm. Agronomy, 13(8), 2174. https://doi.org/10.3390/agronomy13082174

Karandish, F., Nouri, H., & Schyns, J. F. (2022). Agricultural adaptation to reconcile food security and water sustainability under climate change: The case of cereals in Iran. Earth's Future, 10(9), e2021EF002095. https://doi.org/10.1029/2021EF002095

Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2015). Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Academic Press, Cambridge.

Pennisi, G. 2020. Resource use efficiency in a vertical farm: A case study on lettuce. Biosystems Engineering, 197, 183–96.

Pennisi, G., Gianquinto, G., Marcelis, L. F. M., Martin, M., & Orsini, F. (2025). Vertical farming: productivity, environmental impact, and resource use. A review. Agronomy for Sustainable Development, 45, Article 57. https://doi.org/10.1007/s13593-025-01055-w

Resh, H. M. (2022). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower (8th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003133254

Sardare, M. D., & Admane, S. V. (2013). A review on plant without soil–Hydroponics. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2(3), 299–304. https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203013

Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. European Journal of Horticultural Science, 83(5), 280–293. https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2

Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. Buildings, 8(2), 24. https://doi.org/10.3390/buildings8020024

Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12(6), 6879–6891. https://doi.org/10.3390/ijerph120606879?utm_source=chatgpt.com

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability: Science, Practice and Policy, 13(1), 13–26. https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

Despommier, D. D. (۲۰۱۰). The Vertical Farm: Feeding the World in the ۲۱st Century. New York: Thomas Dunne Books/St. Martin's Press.

Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. Agronomy, 9(6), 298. https://doi.org/10.3390/agronomy9060298

Hasan, M., Bhat, A.G., Kumar, V., et al. (2025). IoT-Based Smart Fertigation Scheduling and Wireless Microclimate Monitoring for a Greenhouse Dutch Bucket Hydroponic System. Irrigation and Drainage, 74(5), 1889–1903. https://doi.org/10.1002/ird.70012

Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1938). The water-culture method for growing plants without soil. University of California, College of Agriculture. Agricultural Experiment Station. Berkeley, California. Circular 347.

Hutchinson, G. K., Ames, Z. R., Nemali, K., & Ferrarezi, R. S. (2025). Arugula and lettuce responses to greenhouse hydroponic systems: An analysis of yield and resource use