DOI: 10.22034/jam.2023.55824.1230

طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه دوگانه آب/هواکشت

روزبه عباس زاده[1*]، علی زنوزی[1] ،سید محمد شتاب بوشهری[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

۱- گروه تولیدات گیاهی و کشاورزی پایدار – پژوهشکده کشاورزی - سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران - تهران - ایران
* مسئول مکاتبه E-mail: abbaszadeh@irost.ir

چکیده

بحران کمبود آب، پیاده‌سازی فناوری‌های نوین در زمینه افزایش بهره‌وری آب را ضروری می‌سازد و روش‌های آبکشت و هواکشت می‌توانند جزیی از این فناوری‌ها باشند. در این پژوهش، ابتدا طراحی و ساخت یک سامانه آب/هواکشت با فشار بالا شامل دو واحد مجزا به منظور اجرای آزمایش‌های تحقیقاتی انجام شد. در این فناوری، ریشه‌های گیاه در یک آرایش افقی در هوا و در معرض پاشش دوره‌ای محلول غذایی معلق بودند. محلول غذایی تهیه شده بر پایه فرمول هوگلند، توسط یک پمپ دیافراگمی منتقل و پس از عبور از فیلتر، از طریق نازل و در فواصل زمانی مشخصی به ریشه گیاهان پاشیده می‌شد. تجهیزات دیگری مثل سوئیچ فشار، فشارسنج، شیر تخلیه آب، تایمر قابل برنامه‌ریزی و انباره دیافراگمی در مدار هیدرولیک سامانه بکار رفت. محلول پاشیده شده به ریشه‌ها در انتهای محفظه جمع و در اثر نیروی ثقلی به مخزن برگشت داده می‌شد. طراحی طوری بود که همیشه مقداری از محلول در کف مخزن موجود باشد و ریشه‌ها بتوانند از این محلول نیز بهره ببرند. بنابراین، این سامانه را می‌توان به نوعی دوگانه آبکشت/ هواکشت در نظر گرفت. نور لازم نیز از طریق فلوئورسنت تامین می‌شد. نتایج نشان داد که این روش دوگانه به طور معنی داری باعث افزایش رشد ریشه نسبت به روش سنتی شد. سامانه ساخته شده در این تحقیق بخشی از مسیر استفاده بهتر از آب کشاورزی است و همچنان به بهینه‌سازی نیاز است. با توجه به روند توسعه کشت عمودی و کشاورزی شهری در دنیا، سامانه‌های آب/هواکشت می‌توانند نقش قابل توجهی در این زمینه ایفا نمایند.

واژه‌های کلیدی: هواکشت، کشت عمودی، آبکشت

How to cite:
Rouzbeh Abbaszadeh, Ali Zenouzi, Seyed Mohammad Shetab Boushehri, N. 2023. Design, Fabrication and Evaluation of a Hybrid Hydro/Aeroponic System.*Journal of Agricultural Mechanization* 8 (2): 19–31.

Design, Fabrication and Evaluation of a Hybrid Hydro/Aeroponic System

Rouzbeh Abbaszadeh[1], Ali Zenouzi[1], Seyed Mohammad Shetab Boushehri[1]

Received: 13 March 2023 Accepted: 31 July 2023

1- Department of Plant Production and Sustainable Agriculture, Agricultural research institute, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

Abstract

The water shortage crisis necessitates the implementation of new technologies to increase water productivity, and the aeroponics and hydroponics methods can be a part of these technologies. In this study, first, a high pressure aeroponics system including two separate units was designed and constructed for conducting research experiments. In this technology, the roots of the plant were suspended in a horizontal arrangement in the air and subjected to periodic spraying of the nutrient solution. The nutrient solution based on Hoagland's formula was transferred by a diaphragm pump and after passing through the filter, it was sprayed on the roots of the plants through the nozzle at regular intervals. Other equipment such as pressure switch, pressure gauge, drain valve, programmable timer, and diaphragm accumulator were used in the hydraulic circuit of the system. The sprayed solution was collected at the end of the chamber and returned to the tank due to the gravity force. The design was such that there is always some solution in the bottom of the tank and the roots can use this solution as well, so this system can be considered as a hybrid type. The required light was also supplied through the moonlight fluorescent. The results showed that this hybrid method significantly increased root growth compared to the traditional method. The system built in this research was a part of the path to better use of agricultural water. Due to the development of vertical farming and urban agriculture in the world, aeroponics systems can play a significant role in this regard.

Keywords: Aeroponics, Hydroponics, Vertical farming

۱- مقدمه

به طور ساده، آبکشت یا هیدروپونیک[1]، پرورش گیاهان بدون خاک است. خاک به عنوان تکیه‌گاهی برای گیاه عمل می‌کند زیرا یک ساختار فیزیکی را برای گرفتن ریشه ایجاد می‌کند. در یک سامانه هیدروپونیک، تکیه‌گاه فیزیکی که توسط خاک مهیا می‌شد با انواع مختلفی از مواد و سازه‌های داربستی جایگزین می‌شوند. همچنین خاک، مواد مغذی لازم برای رشد گیاه را فراهم می‌کند. سامانه‌های هیدروپونیک آب و مواد مغذی محلول در آن را توزیع می کنند. علاوه بر این، خاک محلی است برای زندگی جمعیت‌های میکروبی ضروری که روابط سودمندی را با ریشه گیاهان دارند. همین میکروب‌ها می‌توانند در یک محیط هیدروپونیک نیز زندگی و رشد نمایند. مزایای روش هیدروپونیک عبارت از عدم نیاز به خاک با کیفیت، امکان رشد سریعتر محصول، نیاز به فضای کمتر، وابستگی کمتر به فصل کشت، قابل استفاده در هر مکان، مصرف کمتر آب، عدم وجود علف هرز و علف‌کش، امکان کاهش یا حذف نیاز به سموم آفت‌کش، امکان کاهش یا حذف زه‌آب، امکان دستکاری محتوای مواد مغذی، افزایش توانایی جهت‌دهی به رشد محصول برای خصوصیات خاص، پاک و یا کثیفی کم و کاهش پتانسیل آلودگی محصولات می باشد (Baras, 2018).

به طور دقیق‌تر هیدروپونیک شکلی از کشت بدون خاک و بدون استفاده از بستر ریشه‌دهی است که ریشه‌های گیاه در یک محلول غذایی ثابت هوادهی شده یا در جریان پیوسته‌ای از محلول غذایی قرار می گیرند. در روش هواکشت یا ایروپونیک[2] نیز ریشه ها معلق در هوا و در معرض پاشش دوره ای محلول غذایی هستند (Jones Jr, 2016). با توجه به افزایش جمعیت زمین و مسائل زیست محیطی آن و در مقایسه با روش‌های سنتی تولید غذا و سایر روش‌های بدون خاک، سامانه هواکشت می‌تواند بهترین روش برای تامین امنیت غذایی و توسعه پایدار باشد (LakhiarGao *et al.*, 2018). در مقایسه‌ای میان روش کشت مرسوم و روش‌های هیدروپونیک و روش ایروپونیک، افزایش بهره‌وری آب برای روش هیدروپونیک حداکثر ۳۵ ٪ و برای ایروپونیک ۸۰ ٪ گزارش شده است (AlShrouf, 2017).

در سال‌های اخیر کشت گیاهان مختلف با روش هواکشت در مقالات متعددی مورد مرور قرار گرفته است (AlShrouf, 2017; Gopinath *et al.*, 2017; LakhiarGao *et al.*, 2018; Tunio *et al.*, 2020). با توجه به شرایط مساعد برای رشد ریشه در روش ایروپونیک، تولید غده‌های سیب زمینی با این روش بسیار مرسوم می‌باشد. به عنوان نمونه در یک تحقیق در مورد تراکم کشت ریزغده‌های سیب زمینی با روش ایروپونیک، جعبه پایش ریشه یا ریزوترون[3] از دو بخش تشکیل می‌شد. محفظه بالایی همراه با کنترل نورپردازی و محفظه زیرین در تاریکی تعبیه شده بودند. گیاهچه‌ها در یک نقطه از طریق یک ورق لاستیک ثابت شدند. ورق لاستیکی در بالای یک شبکه فلزی قرار گرفته بود که دو محفظه را تقسیم می‌کرد (Chiipanthenga *et al.*, 2012; FarranandMingo-Castel,

[1]- Hydroponic

[2]- Aeroponicrt

[3]- Rhizotron

2006). روش هواکشت روشی رایج برای تولید بذر سیب زمینی عاری از عوامل بیماری‌زا است و اگر با کشت بافت گیاهی تکمیل شود توان بالقوه‌ای برای کشورهای در حال توسعه دارد (Chiipanthenga *et al.*, 2012). یکی دیگر از محصولاتی که کشت آن با روش هواکشت مورد بررسی قرار گرفته است زنجبیل می‌باشد. به عنوان نمونه رشد ریزوم (یا ساقه زیرزمینی زنجبیل که بخش مورد استفاده آن است) در یک محفظه که بالای محفظه نازل‌های ایروپونیک بود مطالعه شد (Hayden *et al.*, 2004). کشت زعفران با روش هواکشت یکی از تکنیک‌هایی بوده است که مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال به منظور کشت بدون خاک زعفران و با روش ایروپونیک، استفاده از بیوراکتور[1] (SouretandWeathers, 2000) کشت در سبدهای پلاستیکی (Rohi, 2019) و یا با کنار هم چیدن پیازهای زعفران بر روی طبقات چوبی و رطوبت‌دهی به محیط (IRNA, 2018) انجام شده است و به نظر می‌رسد کشت زعفران با روش هواکشت، از نظر مقرون به صرفه‌بودن و کیفیت محصول، نیاز به بررسی و تامل بیشتری دارد (IRNA, 2018).

نمونه‌ای از پیاده‌سازی روش هواکشت به شکل تجاری توسط شرکت معروف ایروفارم انجام شده است. بنابر ادعای شرکت، کاربرد این روش به شکل کشت عمودی و در یک فضای بسته و محیط کنترل شده منجر به افزایش ۳۹۰ برابری تولید سالیانه در واحد سطح و کاهش ۹۵ درصدی مصرف آب نسبت به روش سنتی شده است. علاوه بر این نوردهی و تغذیه هوشمند متناسب با نیاز، مدیریت آفات و همچنین کاربرد بینایی ماشین، یادگیری ماشین و اینترنت اشیا و استفاده از یک بستر رشد پارچه‌ای با قابلیت استفاده مجدد از جمله فناوری‌های بکار رفته توسط این شرکت است (AeroFarms, 2022).

در طراحی یک سامانه هواکشت برای استفاده بهتر از نور خورشید از یک روش عمودی و گردشی برای کشت گیاهان استفاده شده است. همچنین انرژی پمپ‌ها از طریق انرژی خورشیدی تامین و پایش آنها توسط رایانه انجام می‌شد (Ziegler, 2005).

ترکیب هواکشت با شیوه لایه نازک غذایی (NFT^2) نیز انجام شده است. هدف از این کار کشت گلخانه‌ای گوجه فرنگی بدون استفاده از بستر کشت (به عنوان مثال پشم سنگ) و در نتیجه کاهش اثرات مخرب زیست محیطی آن بوده است. در این ترکیب، بخش بالایی ریشه ها تحت مه‌پاشی با روش ایروپونیک و بخش پایینی آن در تماس با لایه نازکی از محلول غذایی قرار می گیرند (Dannehl *et al.*, 2017). در یک فعالیت پژوهشی نیز واحدهای هواکشت که البته به نظر می‌رسد در طبقه‌بندی انواع روش‌های هواکشت، جزو نوع فشار پایین قرار می گیرند، ساخته شدند. از این سامانه برای جوانه‌زنی و رشد بذرهای ریحان که در داخل مکعب‌های پشم سنگ قرار گرفته بودند استفاده شد. پمپ در داخل مخزن قرار گرفته است و آب و مواد غذایی از طریق آرایش لوله‌های PVC به نازل‌ها منتقل می‌شوند. آزمایش‌ها در زیر نور خورشید و یا لامپ فلوئورسنت[3] T5 (۶۵۰۰K) انجام شد (Vassallo, 2018). در یک مطالعه در مورد روش ایروپونیک، فواصل پاشش محلول غذایی و کیفیت نور در محیط ریشه (ظروف کشت با رنگ‌های مختلف) مورد بررسی قرار گرفتند. در این آزمایش، با استفاده از هوای فشرده محلول غذایی به ریشه‌های گیاه زینتی آنتوریوم[4] پاشیده می‌شد . هوای تحت فشار درون سیستم از طریق لوله‌های پلی اتیلنی به لوله‌های اصلی منتقل و به‌طور متناوب به ظروف کشت پلی‌اتیلنی ۴۰ لیتری وارد می‌شدند. در پایین هر محفظه کشت، یک نازل پاشش تورو[5] از طریق یونولیت روی سطح محلول شناور بود. از یک کمپرسور با حجم ۵۰۰ لیتر به منظور فشرده کردن هوا استفاده شد و هوای متراکم با فشار ۵/۵ اتمسفر درون مخزن کمپرسور ذخیره می‌شد. کنترل عبور هوای فشرده و در نتیجه کنترل زمان پاشش به وسیله شیر برقی و تایمرها انجام می‌شد (Shahbani *et al.*, 2013). همچنین در یک ثبت اختراع، ایده استفاده از قالب میکروسیال[6] کنترل پذیر برای رساندن آب، مواد غذایی و سایر مایعات مفید مثل آفت کش به ریشه معلق در محفظه سامانه هواکشت مطرح شده است. از این طریق می‌توان مقدار دبی، فشار، حجم و یا اندازه ذرات را براساس برنامه از پیش تعیین شده توسط کاربر یا براساس مقادیر حس شده توسط حسگر رطوبت به ریشه تحویل داد (De FazioandDodd, 2018). تولید مه با روش فراصوت و انتقال آن به محفظه کشت گیاه با استفاده از دمنده روش دیگری است که در سامانه‌های هواکشت استفاده می‌شود. فرکانس کاری این مه سازها بین ۱ تا ۳ مگاهرتز[7] (MHz) است و نگهداری آنها پرهزینه و مشکل است. همچنین، آنها خواص شیمیایی محلول غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با این حال برای باغبانی در فضای بسته مناسب هستند (LakhiarGao *et al.*, 2018). همچنین در یک مطالعه اثر اتمایزرهای مختلف در ایروپونیک (اندازه قطرات) بر رشد، محتوای پلی فنول و فعالیت آنتی اکسیدانت[8] کاهو مورد بررسی قرار گرفت. زمان پاشش و فاصله پاشش‌ها به ترتیب ۲۰ دقیقه و ۳ ساعت در نظر گرفته شد. اندازه قطرات با تحلیلگر اندازه ذرات لیزری اندازه‌گیری شد. اندازه متوسط قطرات برای سه اتمایزر[9] مورد بررسی شامل هوا - محور (با کمپرسور)، بدون هوا و مه‌پاش فراصوت به ترتیب ۲۳/۲۸، ۴۶/۳۹ و ۳/۴۵ میکرومتر بود. نتایج نشان داد اتمایزر بدون هوا اثرات

[1] - Bioreactor
[2] - Nutrient Film Technique
[3] - Fluorescent lamp
[4] - *Anthurium andreanum*
[5] - Toro
[6] - Microfluidic
[7] - Mega Hertz
[8] - Antioxidant
[9] - Atomizer

معنی‌دارتری بر شاخص‌های مورد بررسی داشت (Lakhiar *et al.*, 2019). کاربرد سامانه‌های پایش و کنترل در روش هواکشت با استفاده از حسگرهای هوشمند نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نظارت متغیرهایی مثل دما، رطوبت، شدت نور، سطح محلول غذایی، مقادیر pH و EC [1]، غلظت CO_2، مدت زمان پاشش و فواصل زمانی بین پاشش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه همبستگی بین پارامترهای کلیدی و رشد گیاه می‌تواند برای محققین ارزشمند باشد. پیاده‌سازی یک شبکه حسگر بدون سیم، بهینه سازی مصرف انرژی با نرم‌افزاری بر پایه ژنتیک الگوریتم، طراحی شبکه‌ای از حسگرهای بی سیم و کاراندازها با استفاده از پروتکل زیگ‌بی[2]، توسعه سامانه پایش خودکار با استفاده از برد آردوینو[3]، سامانه کنترل وب - محور با استفاده از میکروکنترلرها، ماژولهای[4] ارتباطی و ...، انتقال داده‌های سنسورها به موبایل (توسط GSM)[5] یا رایانه‌های شخصی و یا اعلام خطر در صورت خروج داده‌ها از دامنه مشخص، اتصال دو آردوینو از طریق Wi-Fi و پیکربندی آنها بر پایه راهبر-رهرو، خودکارسازی سامانه با استفاده از اینترنت اشیا و برد رزبری‌پای[6] از جمله تلاش‌هایی هستند که پژوهشگران در زمینه پایش و کنترل ایروپونیک گزارش نموده‌اند (LakhiarJianmin *et al.*, 2018). همچنین در یک پژوهش، اثر مدت زمان پاشش و فواصل بین آنها و فرکانس اتمایزر فراصوت بر مقادیر pH و EC یک نوع محلول غذایی که برای گوجه فرنگی بکار می رفت، بررسی شدند. بیشترین و کمترین مقدار این کمیت‌ها به ترتیب در فرکانس ۱/۷ مگاهرتز و ۱۲۰ دقیقه پاشش و فرکانس ۲۸ کیلوهرتز و ۱۰ دقیقه پاشش بدست آمد، اگرچه مقادیر بیشینه کمتر از حد استاندارد برای رشد گوجه فرنگی بود و موجب شد روش اولتراسونیک (فراصوت) با فرکانس بالا برای محلول غذایی گوجه فرنگی یامازاکی[7] در کشت ایروپونیک مناسب نباشد (Liu *et al.*, 2018).

با توجه به بحران کمبود آب در کشور و رویکردهای نوین کشت محصولات در دنیا، ضرورت مطالعه و توسعه فناوری های آبکشت و هواکشت در کشور احساس می شود. هدف از این تحقیق طراحی و ساخت یک سامانه دوگانه آبکشت/ هواکشت و ارزیابی آن از طریق کشت کاهو است.

۲- مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت سامانه آب/هواکشت (ایروپونیک) با فشار بالا و تهیه محلولهای غذایی و کشت افقی کاهو، در آزمایشگاه بیوسیستم پژوهشکده کشاورزی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شد.

ترکیب محلول غذایی هوگلند و آرنون بر اساس هوگلند شماره ۱ با تغییراتی جزئی تهیه شد. مقادیر عناصر در جدول ۱ ارائه شده است (Jones Jr, 2016).

جدول ۱- مقادیر عناصر در محلول غذایی هوگلند و آرنون (ppm)*

Table 1. Amounts of elements in nutrient solution Hoagland and Arnon (ppm)

هوگلند شماره 2 Hoagland number 2	هوگلند شماره 1 Hoagland number 1	عنصر Elements
220	242	Nitrogen نیتروژن (NO_3)
12.6	-	Nitrogen نیتروژن (NH_4)
24	31	Phosphorus فسفر (P)
230	232	Potassium پتاسیم (K)
179	224	Calcium کلسیم (Ca)
49	49	Magnesium منیزیم (Mg)
113	113	Sulfur گوگرد (S)
0.45	0.45	Boron بر (B)
0.02	0.02	Copper مس (Cu)
7	-	Iron آهن (Fe)
0.05	0.5	Manganese منگنز (Mn)
0.0106	0.0106	Molybdenum مولیبدن (Mo)
0.48	0.48	Zinc روی (Zn)

* هوگلند و آرنون (Jones Jr, 2016)

* Hoagland and Arnon (Jones Jr, 2016)

[1] - Electrical conductivity
[2] - ZigBee protocol
[3] - Arduino Board
[4] - Modules
[5] - Global System for Mobile
[6] - Raspberry Pi Board
[7] - Yamazaki tomatoes

دسته‌بندی محلول‌های پایه[1] برای تهیه ۶ محلول به شرح ذیل انجام شد. محلول‌های پایه ماکروالمنت‌ها[2] بطور جداگانه در۴ محلول و محلول پایه میکروالمنت‌ها[3] در یک محلول و محلول پایه آهن نیز در یک محلول جداگانه تهیه شد. عنصر آهن بر اساس مقدار آهن در هوگلند شماره ۲ به فرم کلات[4] (شلات) آهن محاسبه و محلول پایه آن تهیه شد.

بر اساس جدول ۲ و با توجه به جرم ملکولی هر ماده، مقدار مورد نیاز آن ماده در محلول پایه محاسبه شد که در جدول ۲ مقادیر آنها آورده شده‌اند. منگنز مورد نیاز در هوگلند نیز به جای کلرید منگنز، بر اساس جرم ملکولی سولفات منگنز مونوهیدرات محاسبه شد. مقدار گوگرد اضافه شده به هوگلند توسط ماده اخیر ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. محلول پایه آهن نیز طبق دستور هوگلند شماره ۲ تهیه گردید.

با توجه به مقدار محلول هوگلند مورد نیاز در هر مرحله از آزمایش های ایروپونیک، برای تهیه یک لیتر محلول هوگلند، ۴ میلی‌لیتر از هر یک از محلول‌های ماکروالمنت، ۲ میلی‌لیتر از محلول آهن و ۱ میلی-لیتر از محلول میکروالمنت برداشته و با آب دیونایز[5] حجم یک لیتر رسانده می‌شد.

جدول ۲- مقادیر مورد نیاز برای ساخت استاک‌ها

Table 2. Amounts needed to make stocks

شماره استاک Stock number	مواد در استاک ها Materials in stocks	جرم ملکولی Molecular weight	مقدار مواد در استاک (gr) Amount of material in stock	حجم استاک (ml) Stock volume	مقدار محلول استاک لازم برای تهیه یک لیتر هوگلند (ml) The amount of stock solution needed to prepare one liter of Hoagland
1	$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	236	59	200	4
2	KNO_3	101	25.25	200	4
3	KH_2PO_4	136	6.8	200	4
4	$MgSO_4.7H_2O$	247	24.65	200	4
5	$FeCl_3$	162.5	0.842	200	2
	EDTA	372.2	0.842		
6	H_3BO_3	62	1.4	500	1
	$MnSO_4.H_2O$	169	0.75		
	$ZnSO_4.7H_2O$	287	0.11		
	$Na_2MoO_4.2H_2O$	242	0.0125		
	$CuSO_4.5H_2O$	249	0.05		

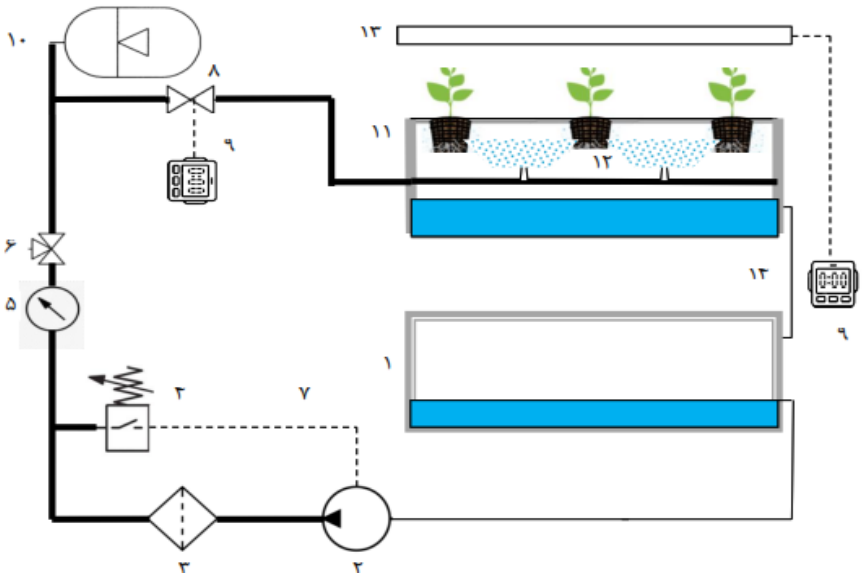
به عنوان مثال، به منظور تهیه ۵ لیتر محلول غذایی هوگلند، به ترتیب ۲۰ میلی‌لیتر از هر یک از محلول‌های پایه شماره ۱ و ۲ و ۳ و ۴ برداشته و در یک ارلن یک لیتری می‌ریزیم سپس ۱۰ میلی‌لیتر از محلول ۵ و سپس ۵ میلی‌لیتر از محلول ۶ را به ارلن اضافه می‌نماییم. ارلن را با آب دیونایز شده به حجم یک لیتر رسانده و در یک ظرف ۵ لیتری ریخته و ۴ لیتر دیگر آب دیونایز اضافه کرده تا حجم نهایی به ۵ لیتر برسد.

ساخت سامانه دوگانه هواکشت (ایروپونیک)

پس از مطالعات اولیه، طراحی و ساخت یک سامانه آب/هواکشت با فشار بالا شامل دو واحد مجزا به منظور اجرای آزمایش‌های تحقیقاتی در دستور کار قرار گرفت. در شکل ۱ طرحواره یک واحد از سامانه ارائه شده است. محلول غذایی در یک مخزن پلاستیکی مات (۱) نگهداری و توسط یک پمپ دیافراگمی اسمز معکوس یا تصفیه آب (۲) به داخل مدار ارسال می‌شد. با توجه به اینکه حداقل فشار مورد نیاز برای پاشش از نازل ها در ابعاد میکرون برابر با ۶ بار است لذا از پمپی استفاده شد

[1] - Stock Solution
[2] - Macroelements
[3] - Microelements
[4] - Chelate
[5] - Deionized Water

که توانایی تولید فشار حداقل ۸ بار را داشته باشد. بر این اساس کلیه اتصالات و شیلنگ‌های مدار نیز با فشار کاری ۱۰ بار (۱۵۰ psi) انتخاب شدند. حداکثر فشار پمپ ۱۳۰ psi و دبی آن ۱/۶ لیتر در دقیقه بود. این پمپ دیافراگمی دارای بالشتک‌های لرزه‌گیر و اتصالات ورودی و خروجی آن ۳/۸ اینچ بود. پمپ با برق DC و ۲۴ V کار می کرد. ولتاژ مورد نظر توسط یک آداپتور و از تبدیل برق شهر تامین می‌شد. مایع خارج شده از پمپ از یک فیلتر کاغذی (۳) عبور می‌کرد. با توجه به اینکه سیال در گردش آب بود به منظور کاهش هزینه، کلیه اتصالات از جنس برنجی و انصالات نیوماتیک از جنس پلی اتیلن تهیه شدند. با توجه به اینکه فشار بیش از حد ممکن است باعث آسیب به اجزای مدار شود و فشار کم هم موجب پاشش نامطلوب از سوی نازل‌ها شود، از یک سوئیچ فشار (۴) که متصل (۷) به پمپ بود، برای کنترل و تنظیم فشار استفاده شد. زمانی که فشار آب در سامانه به کمتر از ۶ اتمسفر[1] (Atm) می‌رسید، سوئیچ فشار موجب روشن شدن پمپ می‌شد و زمانی که مقدار فشار تقریبا به بیش از ۸ اتمسفر می‌رسید فرمان قطع پمپ صادر می‌شد. به منظور مشاهده فشار، یک فشارسنج عقربه ای خشک (۵) در طول مسیر نصب شد. همچنین یک شیر ربع‌گرد (۶) برای تخلیه آب پرفشار موجود در سامانه نیز تعبیه شد. از این شیر در مواقعی که سامانه به تعمیر، تعویض قطعه و یا هواگیری نیاز داشت و یا در مابین دو آزمایش جداگانه استفاده می‌شد.



شکل ۱- طرح‌واره سامانه آب/هواکشت افقی

Fig. 1. Diagram of horizontal water/aeroponic system

با توجه به اینکه در سامانه‌های هواکشت، محلول غذایی در فواصل زمانی مشخصی پاشیده می‌شود، از یک شیر برقی (۸) متصل به تایمر قابل برنامه ریزی (۹) استفاده شد. مدت زمان پاشش یک دقیقه و فاصله آن با پاشش بعدی چهار دقیقه در نظر گرفته شد. برای هر واحد یک تایمر جداگانه در نظر گرفته شد تا امکان بررسی اثر مدت زمان یا فواصل مختلف پاشش نیز فراهم شود اما در این تحقیق با توجه به اینکه مشاهده شد نوسانات برق ممکن است باعث اختلال در یکی از تایمرها و در نتیجه ایجاد تفاوت در شرایط کشت شود، به منظور حفظ زمانهای یکسان برای دو واحد از یک تایمر برای هر دو واحد استفاده شد. به منظور حفظ فشار ثابت در سامانه به ویژه در لحظه شروع پاشش از نازل‌ها، یک انباره دیافراگمی (۱۰) برای ذخیره انرژی در مدار قرار داده شد. این وسیله با ذخیره آب، از افت فشار ناگهانی خط پاشش و نوسانات فشار و همچنین چکه کردن نازل ها جلوگیری می‌کند. محلول پرفشار پس از عبور از شیر برقی به نازل‌های (۱۲) داخل محفظه گیاهان (۱۱) منتقل می‌شد. شش نازل که در دو طرف محفظه نصب شده بودند محلول را در فضای داخل محفظه که حاوی ریشه‌ها نیز بود، می‌پاشیدند. محفظه دارای ۱۲ سوراخ برای جای‌گذاری گلدان‌های مشبک هیدروپونیک بود. محلول پاشیده شده به ریشه‌ها در انتهای محفظه (۱۱) جمع می‌شد و توسط یک شلنگ (۱۴) و در اثر نیروی ثقلی (به خاطر اختلاف ارتفاع محفظه و مخزن) به مخزن برگشت داده می‌شد. سوراخی در دیواره محفظه، محلول جمع شده در کف را به بیرون هدایت و در نهایت توسط شلنگ به مخزن انتقال می یافت. سوراخ کمی بالاتر از کف تعبیه شده بود تا همیشه مقداری از محلول در کف مخزن موجود باشد. مزیت این طراحی زمانی است که ریشه گیاهان رشد کرده و به کف رسیده‌اند و همزمان با بهره مندی از پاشش یا در صورت قطع شدن سامانه پاشش به دلایل مختلف، می‌توانند از محلول موجود در کف بهره‌مند شوند، مشابه برخی روشهای آبکشت

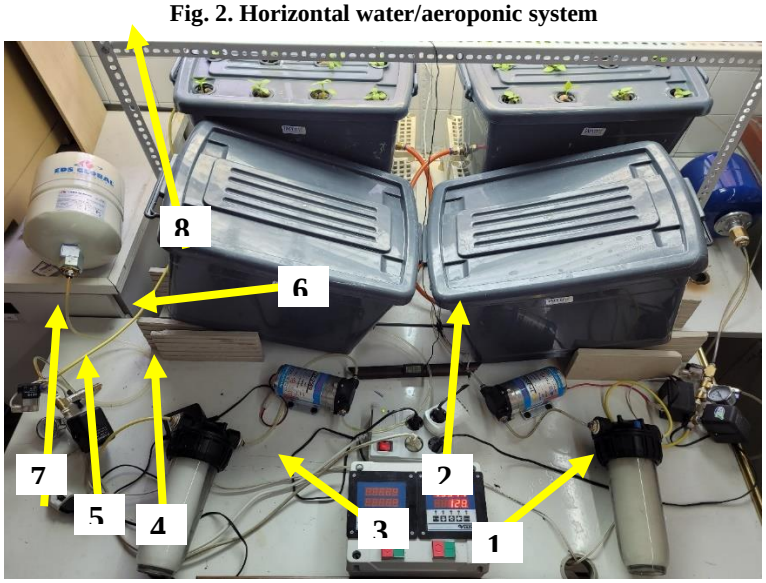
[1] - Atmosphere

مثل کشت آبی عمیق (DWC)[1] و تکنیک لایه نازک مواد غذایی (NFT). بنابراین، می‌توان این سامانه را به نوعی هیبرید[2] یا دوگانه در نظر گرفت.

از نه لامپ فلوئورسنت مهتابی (۱۳) برای تامین نور مصنوعی گیاهان استفاده می‌شد . مهتابی‌ها به شکل موازی به یکدیگر متصل شده و در سه قاب قرار گرفته بودند. نور سفید مهتابی با دمای رنگ ۶۵۰۰ کلوین برای رشد سبزی‌ها مفید است. مدت زمان روشنایی که به میزان ۱۶ ساعت در روز در نظر گرفته شده بود به وسیله یک تایمر دیجیتال کنترل می‌شد. یک سازه فلزی برای نگهداشتن قاب‌ها در بالای گیاهان ساخته شد و قاب‌های حاوی مهتابی توسط سیم مفتول به آن متصل شدند و قابلیت تنظیم ارتفاع بخش نوردهی نیز مهیا شده بود. در شکل‌های ۲ تا ۴ سامانه افقی آب/هواکشت نشان داده شده‌اند.

شکل ۲- سامانه افقی آب/هواکشت

Fig. 2. Horizontal water/aeroponic system



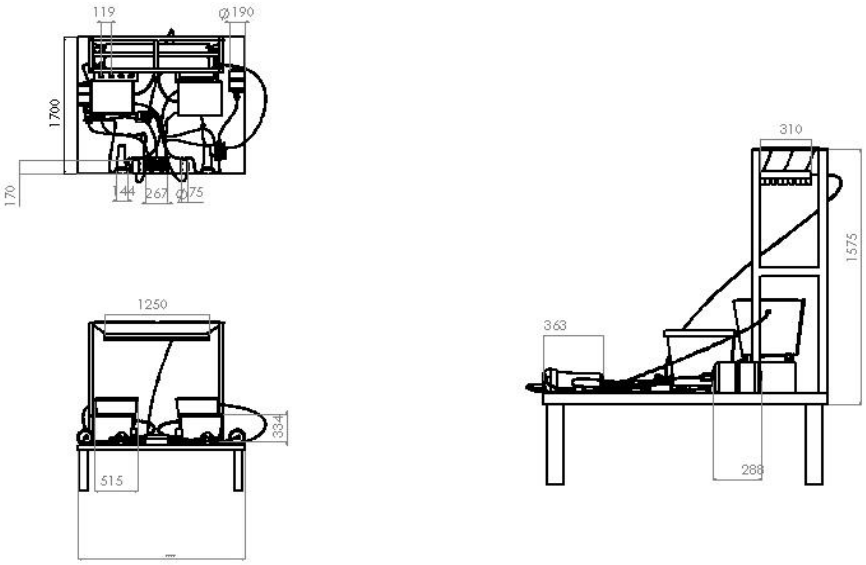
شکل ۳- اجزای سامانه آب/هواکشت : به ترتیب از وسط به کناره‌ها: ۱. تایمر، ۲. پمپ، ۳. فیلتر، ۴. سوییچ فشار، ۵. فشارسنج، ۶. شیر تخلیه، ۷. شیر برقی و ۸. انباره

Fig. 3. Components of the aeroponic system: in order from the middle to the sides: 1. Timer, 2. Pump, 3. Filter, 4. Pressure switch, 5. Pressure gauge, 6. Drain valve, 7. Solenoid valve and storage

[1]- Deep water Culture
[2] - Hybrid

شکل ۴- نازل‌های داخل محفظه گیاهان
Fig. 4. Nozzles inside the plant compartment

در شکل ۵ نیز ابعاد سامانه که البته قابل تغییر است بر حسب میلی‌متر نمایش داده شده است.



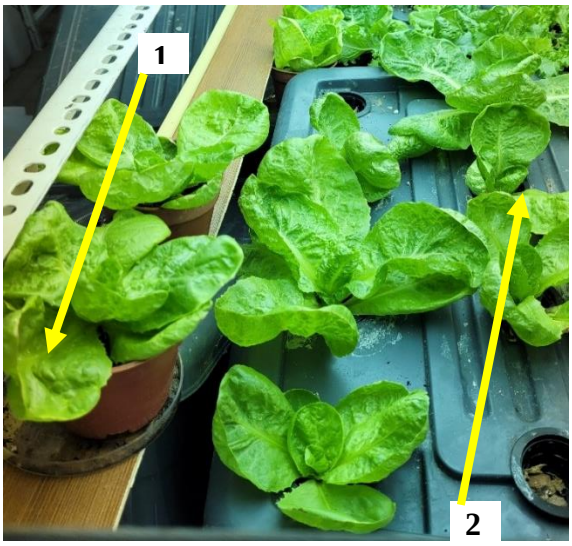
شکل ۵ - ابعاد سامانه از نماهای مختلف
Fig. 5. Dimensions of the system from different views

ارزیابی سامانه

به منظور بررسی عملکرد سامانه هیبرید افقی و مقایسه آن با یک روش سنتی، آزمایشی اجرا شد. یک واحد سامانه به کشت کاهو[1] اختصاص یافت. در حال حاضر کشت کاهو در بسترهای خاکی و یا روش هیدروپونیک مرسوم است. در این پژوهش، برای کنترل بهتر مواد غذایی از بسترهای هیدروپونیک استفاده شد. برای هر حالت پنج نمونه به عنوان شاهد در گلدان‌هایی با ارتفاع و قطر دهانه بالا به طول ۷ و ۸ سانتی‌متر کشت شدند. از پتری‌دیش پلاستیکی به عنوان زیرگلدانی استفاده شد. بستر کشت از حدود ۶۰ درصد پرلیت و ۴۰ درصد کوکوپیت[2] تشکیل شده بود. کاهوهای کشت شده با روش ایروپونیک با محلول هوگلند (توضیح در بخش مواد و روش‌ها) تغذیه می‌شدند و کود مصرفی در روش سنتی NPK: 20, 20, 20 همراه با عناصر میکرو بود. نشاها از گلخانه‌ای در شاهدشهر تهیه شدند. مدت کشت نیز چهار هفته بود. مدت زمان پاشش یک دقیقه و فاصله آن با پاشش بعدی چهار دقیقه و مدت زمان روشنایی به میزان ۱۶ ساعت در روز در نظر

[1] - *Lactuca sativa*
[2] - Coco peat

گرفته شد. نمونه‌های شاهد در جایگاهی نزدیک نمونه‌های تیمار قرار داده شدند تا شرایط نوری مشابهی را داشته باشند. در شکل ۳ و شکل ۶ نحوه قرار گیری نمونه‌های شاهد بین دو واحد و همچنین روبروی آنها نشان داده شده است. از هر واحد نمونه‌هایی که دارای رشدی نرمال بودند برای مقایسه با نمونه‌های کشت سنتی انتخاب شدند که بخشی از آنها در شکل ۶ ارائه شده است. پس از اتمام آزمایش، تعداد برگ نمونه‌های منتخب، وزن تر ساقه و برگ‌ها، وزن تر ریشه، وزن تر کل، وزن خشک ساقه و برگ‌ها، وزن خشک ریشه، وزن خشک کل و طول ریشه اندازه‌گیری شدند. اوزان بر حسب گرم و طول بر حسب سانتیمتر ثبت شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها تقریبا مدت ۴۸ ساعت در حدود دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند.



شکل ۶- کاهوهای کشت شده با روش ۱. کشت سنتی و ۲. هیبرید

Fig. 6. Lettuce cultivated with 1. Traditional cultivation method and 2. Hybrid

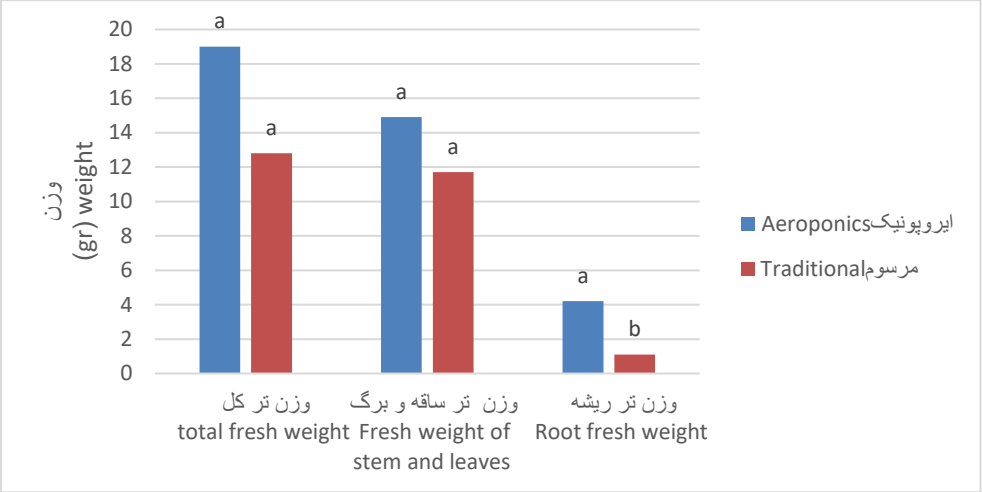
تحلیل آماری

از روش آزمون t[1] برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها و مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. بدین منظور نرم افزار SPSS (Version 21) مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

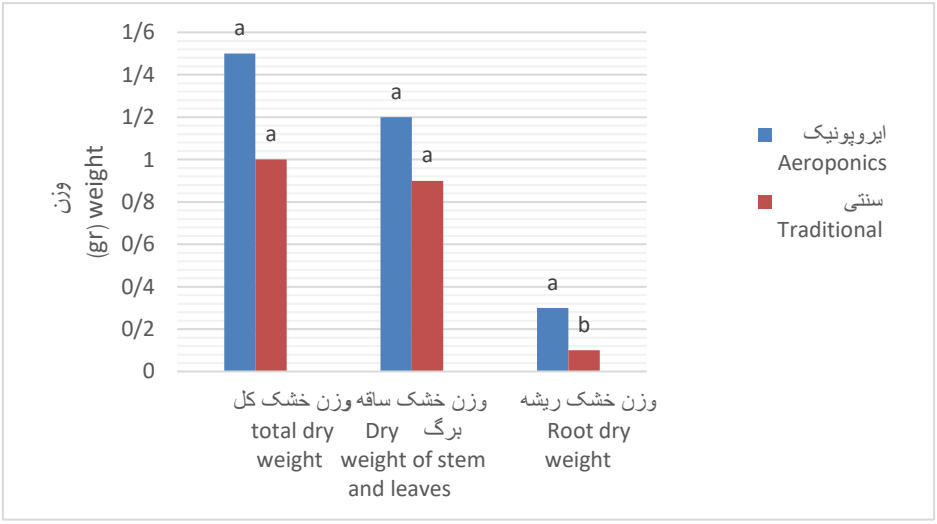
نتایج مقایسه نمونه‌های منتخب کشت شده با سامانه ایروپونیک پرفشار افقی و روش سنتی برای کاهو در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. با مقایسه میزان وزن تر ریشه، ساقه و برگ‌ها و عملکرد کلی روش ایروپونیک و روش مرسوم، اثر مثبت تکنیک آبکشت/ هواکشت مشاهده شد. وزن تر کل در این ارزیابی نزدیک ۵۰٪ افزایش داشت. همچنین نتایج، افزایش قابل ملاحظه وزن خشک و طول ریشه را نیز نشان داد. وزن تر، خشک و طول ریشه به ترتیب ۲۷۱٪، ۴۴۲٪ و ۴۳۴٪ برابر افزایش داشتند. با توجه به این نتایج، کاربرد روش هواکشت برای محصولاتی با ریشه‌های ارزشمند یا ریشه‌دار نمودن برخی محصولات یا قلمه‌ها و همچنین اعمال تمهیداتی برای کنترل نسبت ریشه به ساقه برای افزایش عملکرد محصولات برگی توصیه می شود. ضمنا روش هواکشت روش مناسبی برای مطالعه روند توسعه ریشه گیاهان است زیرا امکان خارج نمودن ریشه بدون نیاز به تمیز کردن آن ایجاد می شود و برخی محققان نیز از این امکان بهره برده اند (Cai *et al.*, 2023). علاوه بر مزایای ذکر شده برای هیدروپونیک و در مقایسه با روش‌های دیگر می‌توان مزایای بیشتری را برای ایروپونیک ذکر نمود. به عنوان مثال ریشه‌های گیاه در این روش در هوا رشد می‌کنند و در نتیجه شرایط بهتری در تامین اکسیژن ریشه و به تبع آن جذب بهتر یون‌ها به وجود می‌آید. همچنین صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در مصرف آب و عناصر غذایی انجام می‌شود و می‌توان جذب عناصر بدون تغییر ترکیب محلول را بدست آورد (Jones Jr, 2016). علیرغم وجود انواع مختلفی برای سامانه‌های هواکشت، در یک گزارش مروری که بر روی این سامانه‌ها اخیرا انجام شده بود بیان شد که هنوز سامانه مشخصی از نظر علمی توصیه نشده است و محققان و کشاورزان با توجه به نیاز و فضای موجود، این سامانه‌ها را توسعه داده‌اند. در جمع‌بندی این پژوهش مروری، روش ایروپونیک به عنوان یک رویکرد بین‌رشته‌ای، یکی از روش‌های متحول‌کننده و پایدار ذکر شده است زیرا باعث کاهش نیاز به آب و صرفه‌جویی قابل توجهی در فضا و خاک می‌شود (Lakhiar *et al.*, 2020).

[1] - Independent Samples t Test



شکل ۷- مقایسه میزان وزن تر ریشه، ساقه و برگ و وزن کل در روش ایروپونیک و روش سنتی (مرسوم)، (اختلاف معناداری در سطح ۵٪ بین تیمارهای حاوی حروف انگلیسی مشترک مشاهده نشده است).

Fig. 7. Comparison of fresh weight of root, stem and leaf and total weight in aeroponic method and traditional method (There is no significant difference at the 5% level between treatments containing common English letters)



شکل ۸ - مقایسه میزان وزن خشک ریشه، ساقه و برگ‌ها و وزن کل در روش ایروپونیک و روش سنتی، (اختلاف معناداری در سطح ۵٪ بین تیمارهای حاوی حروف انگلیسی مشترک مشاهده نشده است).

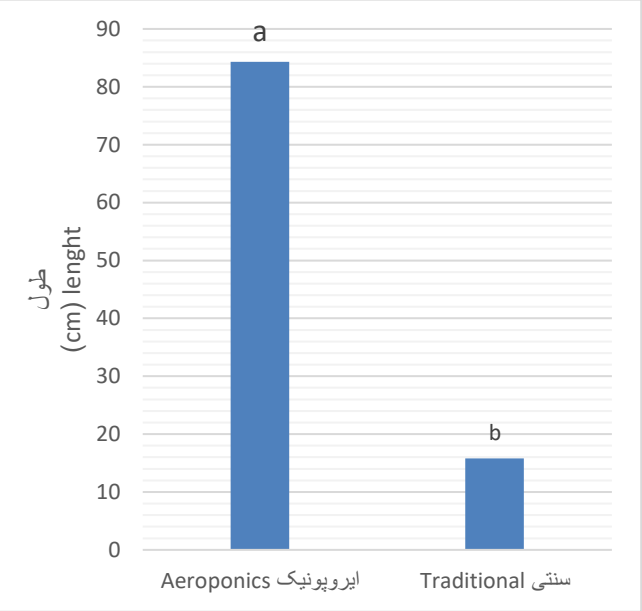
Fig. 8. Comparison of dry weight of root, stem and leaves and total weight in aeroponic method and traditional method (There is no significant difference at the 5% level between treatments containing common English letters)

براساس تجربیاتی که در طول طراحی و پیاده سازی این سامانه بدست آمد و با رویکرد تجاری سازی آن، بهینه‌سازی طراحی سامانه آب/هواکشت افقی پیشنهاد می‌شود. به عنوان مثال کاهش اندازه محفظه ریشه و به ویژه مخزن محلول، استفاده از پمپ‌های قوی‌تر و ارزان‌تر، استفاده از نازل‌های با روزنه درشت‌تر، کاهش زمان پاشش یا افزایش فاصله پاشش، استفاده از سه راهی مستحکم‌تر به جای سه راهی برنجی و شلنگ‌های منعطف‌تر، جایگزینی پاشش منظم با پاشش بر اساس رطوبت هوای داخل محفظه و جایگزینی لامپ‌های فلوئورسنت با لامپ‌های ال ای دی[1] از جمله این موارد هستند. اخیرا در یک تحقیق روش انتخاب پمپ، لوله و مخزن برای سامانه های مدیریت مواد مغذی بر اساس تعداد گیاهان بررسی شد و به عنوان نمونه مشخص شد که برای حفظ سرعت جریان و عملکرد مطلوب آبیاری، باید به جای یک پمپ بزرگ از چندین پمپ کوچک استفاده شود و یک رابطه متناسب بین اندازه مخزن، تعداد کل نازلها، تعداد بسترهای گیاهی و تعداد گیاهان یافت شد. براساس نظر این محققان انواع مختلف پمپ، الگوی موقعیت نازل، راهبردهای پاشش و مصرف آب محصول در مراحل

[1] - LED

مختلف رشد گیاه در تحقیقات آینده مورد توجه قرار خواهند گرفت (Chowdhury *et al.*, 2020).

پیشنهاد دیگر برای پژوهش های آتی شبیه‌سازی رایانه‌ای تاثیر محل قرارگیری ریشه‌ها و نازل‌ها و همچنین زاویه، تعداد و نحوه پاشش نازل‌ها و عوامل دیگری مثل فشار، مدت و فواصل پاشش‌ها و ... بر عملکرد سامانه (انتقال محلول غذایی کافی به ریشه و مصرف بهینه آب و انرژی) و بررسی این عوامل از طریق مدل‌سازی الگوی پاشش در محفظه‌ها و اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از ریشه‌های ساخته شده از کاغذ یا حتی گیاهان واقعی و همچنین تصویربرداری با دوربین است. از مدل مذکور می‌توان برای انتخاب بهینه متغیرهای اثرگذار در طراحی سامانه‌های آب/هواکشت استفاده نمود.



شکل ۹- مقایسه طول ریشه در روش ایروپونیک و روش سنتی (اختلاف معناداری در سطح ۵٪ بین تیمارهای حاوی حروف انگلیسی مشترک مشاهده نشده است).

Fig. 9. Comparison of root length in aeroponic method and traditional method (There is no significant difference at the 5% level between treatments containing common English letters)

در بررسی عملکرد سامانه ایروپونیک افقی برای کشت کاهو نتایجی که حاصل شد نشان داد این روش قابل رقابت با روش سنتی هست. در برخی منابع کاهش مصرف آب در روش هواکشت حتی تا ۹۸٪ نیز ذکر شده است (Kumari & Kumar, 2019, AlShrouf, 2017 Ziegler, 2005,). با در نظر گرفتن مزایای روش ایروپونیک در کاهش مصرف آب و در صورت رفع مشکلات ذکر شده، در تولید برخی محصولات کشاورزی، روش آب/هواکشت می‌تواند جانشین روش سنتی باشد. ضمنا با توجه به نتایج بدست آمده در مورد شاخص‌های مرتبط با ریشه در روش آب/هواکشت، می‌توان این روش را برای محصولاتی که عملکرد ریشه در آنها با اهمیت است پیشنهاد نمود. اخیرا در یک مطالعه سامانه هواکشت به عنوان روشی مناسب با کارایی بالاتر نسبت به کشت خاکی برای تولید ریز غده سیب زمینی معرفی شد. با توجه به امکان انتخاب غده با اندازه مورد نظر در زمان برداشت، ریزغده های برداشت شده در روش هواکشت از اندازه یکنواخت تری نسبت به کشت خاکی برخوردار بودند (Hasrak & Zarghami, 2023).

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، فناوری طراحی و ساخت سامانه‌های آب/هواکشت مورد بررسی قرار گرفتند و یک نمونه با قابلیت بالقوه تجاری‌سازی، پیاده‌سازی شد. با توجه به بحران آب در کشور، سامانه‌های ایروپونیک رویکرد مناسبی برای صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی هستند. سامانه‌های ساخته شده در این تحقیق بخشی از این مسیر هستند و همچنان به بهینه‌سازی و رفع برخی اشکالات نیاز است. همچنین با توجه به روند توسعه کشت عمودی و کشاورزی شهری در دنیا، سامانه‌های آب/هواکشت می‌توانند نقش قابل توجهی در این زمینه ایفا نمایند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران و پژوهشگاه فناوری های نوین برای در اختیار قراردادن امکانات مالی و آزمایشگاهی برای اجرای طرح ۱۰۱۱۰۹۸۰۰۵ در پژوهشکده کشاورزی تشکر و قدردانی می کنند.

منابع

AeroFarms. (2022). Commercial Farms. Retrieved from https://www.aerofarms.com/farms/

AlShrouf, A. (2017). Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, *27*(1), 247-255.

Baras, T. (2018). *DIY hydroponic gardens: How to design and build an inexpensive system for growing plants in water*: Cool Springs Press.

Cai, J., Veerappan, V., Arildsen, K., Sullivan, C., Piechowicz, M., Frugoli, J., & Dickstein, R. (2023). A modified aeroponic system for growing small-seeded legumes and other plants to study root systems. Plant methods, 19(1), 21.

Chiipanthenga, M., Maliro, M., Demo, P., & Njoloma, J. (2012). Potential of aeroponics system in the production of quality potato (Solanum tuberosum l.) seed in developing countries. *African Journal of Biotechnology*, *11*(17), 3993-3999. doi:10.5897/AJB10.1138

Chowdhury, M., Kabir, M. S. N., Kim, H. T., & Chung, S. O. (2020). Method of pump, pipe, and tank selection for aeroponic nutrient management systems based on

crop requirements. Journal of Agricultural Engineering, 51(2), 119-128.

Dannehl, D., Taylor, Z., Suhl, J., Miranda, L., Fitz-Rodriguez, E., Lopez-Cruz, I., . . . Schmidt, U. (2017). Sustainable cities: viability of a hybrid aeroponic/nutrient film technique system for cultivation of tomatoes. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering, 11*(6), 470-477.

De Fazio, M., & Dodd, S. (2018). Aeroponics system with microfluidic die and sensors for feedback control. In: Google Patents.

Farran, I., & Mingo-Castel, A. M. (2006). Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research, 83*(1), 47-53. doi:https://doi.org/10.1007/BF02869609

Gopinath, P., Vethamoni, P. I., & Gomathi, M. (2017). Aeroponics soilless cultivation system for vegetable crops. *Chem. Sci. Rev. Lett, 6*(22), 838-849.

Hasrak, S., & Zarghami, R. (2023). Comparison of minituber production in designed aeroponic system and soil cultivation. Acta Physiologiae Plantarum, 45(4), 57.

Hayden, A. L., Brigham, L. A., & Giacomelli, G. A. (2004). *Aeroponic cultivation of ginger (Zingiber officinale) rhizomes.* Paper presented at the VII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Production, Pest Management and Global Competition 659.

IRNA. (2018). Greenhouse cultivation of saffron, a new method or a profitable mirage. Retrieved from https://www.irna.ir/news/83132406 (In Persian).

Jones Jr, J. B. (2016). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*: CRC press.

Kumari, R., & Kumar, R. (2019). Aeroponics: A review on modern agriculture technology. Indian Farmer, 6(4), 286-292.

Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of plant interactions, 13*(1), 338-352. doi:https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308

Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., Tunio, M. H., Ahmad, F., & Solangi, K. A. (2020). Overview of the aeroponic agriculture–An emerging technology for global food security. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13*(1), 1-10.

Lakhiar, I. A., Gao, J., Xu, X., Syed, T. N., Chandio, F. A., Jing, Z., & Buttar, N. A. (2019). Effects of various aeroponic atomizers (droplet sizes) on growth, polyphenol content, and antioxidant activity of leaf lettuce (Lactuca sativa L.). *Transactions of the ASABE, 62*(6), 1475-1487. doi:doi: 10.13031/trans.13168

Lakhiar, I. A., Jianmin, G., Syed, T. N., Chandio, F. A., Buttar, N. A., & Qureshi, W. A. (2018). Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of Sensors, 2018*. doi:https://doi.org/10.1155/2018/8672769

Liu, X., Wang, G., & Gao, J. (2018). Experimental study of ultrasonic atomizer effects on values of EC and pH of nutrient solution. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11*(5), 59-64. doi:10.25165/j.ijabe.20181105.3790

Rohi, z. S. N. A., Kh. (2019). *Investigation and comparison of one-year yield of saffron cultivation by two methods of air cultivation (aeroponics) and soil cultivation (row cultivation) in Najaf Abad city*. Paper presented at the 6th International Conference on Applied Research in Agricultural Sciences, Iran, Tehtran. (in persian).

Shahbani, Z., Kafi, M., Naderi, R., & Taghavi, T. (2013). Effect of nutrient spray interval and light quality in root zone on growth characteristics of Anthurium andreanum L. in aeroponic system. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology, 3*(4), 105-116 (In Persian).

Souret, F. F., & Weathers, P. J. (2000). The growth of saffron (Crocus sativus L.) in aeroponics and hydroponics. *Journal of herbs, spices & medicinal plants 7*(3), 25-35. doi:https://doi.org/10.1300/J044v07n03_04

Tunio, M. H., Gao, J., Shaikh, S. A., Lakhiar, I. A., Qureshi, W. A., Solangi, K. A., & Chandio, F. A. (2020). Potato production in aeroponics: An emerging food growing system in sustainable agriculture forfood security. *Chilean journal of agricultural research, 80*(1), 118-132. doi:doi:10.4067/S0718-58392020000100118

Vassallo, A. (2018). *Low Effort Management of Basil (Ocimum Basilicum) Growth in an Aeroponic System.*

Ziegler, R. (2005). The vertical aeroponic growing system. *Synergyii International Inc*.