Plant Prod., 2026, 49(2), 189 - 205
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48287.2230
Received: 09 January 2025
Accepted: 08 July 2025

Plant Productions

Research Article

Optimization of growth conditions for in vitro-regenerated plantlets of cooper's haworthia (*Haworthia cooperi*)

Ahmad Sharifi[1], Zahra Sargazi Moghaddam[2], Maryam Moradian[2], Mahdiyeh Kharrazi[1], Azadeh Khadem[1]*

1. Department of Horticultural Plants Biotechnology, Research Institute for Industrial Biotechnology, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR)Khorasan Raza-vi Branch, Mashhad, Iran
2. Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Citation: Sharifi, A., Sargazi Moghaddam, Z., Moradian, M., Kharrazi, M., & Khadem, A. (2026). Optimization of growth conditions for in vitro-regenerated plantlets of cooper's haworthia (*Haworthia cooperi*). *Plant Productions*, 49(2), 189-205.

Abstract

Introduction

Cooper's haworthia (*Haworthia cooperi*), a succulent native to South Africa, is distinguished by its small, fleshy, and semi-transparent leaves forming a rosette shape. This plant is well-regarded among succulent enthusiasts for its attractive appearance and relatively easy-care requirements. The primary aim of this study was to investigate the growth response of cooper's haworthia under in vivo cultivation conditions following in vitro cultivation. In vitro propagation techniques offer a controlled environment to initiate growth, but transitioning plants to in vivo conditions is critical for their survival and subsequent development. Understanding the effects of different substrates and irrigation methods on this transition is essential for optimizing cultivation practices for cooper's haworthia and potentially other succulent species.

Materials and Methods

The experiment was designed as a factorial study, implemented using a completely randomized design with five replications to ensure the reliability and validity of the results. The initial propagation of plant samples was conducted in Murashige and Skoog (MS) medium, supplemented with 3 $mg.l^{-1}$ benzyladenine (BA) and 0.5 $mg.l^{-1}$ naphthaleneacetic acid (NAA) to encourage robust shoot formation. Rooting was achieved in half-strength MS medium containing 1 $mg.l^{-1}$ indole-3-acetic acid (IAA), providing an optimal balance of nutrients and growth regulators for root development.

Following successful acclimatization in a greenhouse setting, the plants were subjected to various substrates and irrigation levels to assess their effects on growth and physiological characteristics. The substrates tested included peat moss-perlite, cocopeat-perlite, and a mixture of sand-

* **Corresponding Author:** Azadeh Khadem
E-mail: azadeh.khadem@jdm.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

vermicompost-perlite. These substrates were selected for their differing properties in terms of aeration, moisture retention, and nutrient availability. Irrigation treatments included saturated, semi-saturated, and dry conditions to mimic different moisture availability scenarios.

Results and Discussion

The results demonstrated that the cocopeat substrate under dry irrigation conditions provided the best overall growth performance. Plants cultivated in this medium exhibited the highest fresh shoot weight, dry leaf weight, shoot volume, and shoot surface area compared with the other treatments. In addition, these plants showed increased concentrations of carotenoids and chlorophyll a, indicating enhanced photosynthetic capacity and improved physiological status. Fresh and dry root weights were also significantly higher in the cocopeat substrate, highlighting its effectiveness in promoting both shoot and root development. In contrast, the peat moss substrate showed superior performance under semi-saturated irrigation conditions by producing the highest number of leaves. This finding suggests that peat moss may offer a favorable balance between moisture retention and root aeration, thereby supporting enhanced leaf proliferation. Furthermore, saturated irrigation conditions in the peat moss substrate led to the highest chlorophyll b content, indicating a positive response of the plant's photosynthetic machinery to high moisture levels. Conversely, the mixed substrate of sand-vermicompost-perlite demonstrated the lowest performance under dry irrigation conditions. Plants in this treatment had the lowest fresh shoot weight, dry leaf weight, shoot volume, and shoot surface area, likely due to poor aeration and limited oxygen availability. These conditions are less conducive to the growth of cooper's haworthia, highlighting the importance of selecting appropriate substrates that ensure adequate aeration and moisture retention. The superior performance of cocopeat under dry irrigation conditions can be attributed to its high moisture-retaining capacity and nutrient availability. These properties are crucial for the growth and development of succulent plants, which typically thrive in well-drained yet moisture-retentive substrates. The findings also highlighted the significant role of irrigation methods in influencing plant growth. Optimal irrigation practices can prevent issues such as root rot and improve water use efficiency, further enhancing plant health and productivity.

Conclusion

This study demonstrates the critical impact of substrate and irrigation method on the growth and physiological characteristics of cooper's haworthia. The results suggest that cocopeat, due to its excellent moisture retention and nutrient provision capabilities, is the most suitable substrate for the optimal growth of this succulent. Additionally, adopting appropriate irrigation methods can significantly enhance plant performance and health. These findings have broader implications for horticultural practices, offering valuable insights for the cultivation of other succulent species. By selecting the right combination of substrate and irrigation, growers can ensure the successful adaptation and thriving of cooper's haworthia plants, paving the way for improved horticultural outcomes.

Keywords: Acclimatization, Irrigation stress, Micropropagation, Morphophysiological traits, Ornamental plants

تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۲)، ۱۸۹- ۲۰۵
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48287.2230
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی شرایط رشد گیاهچه‌های کشت بافتی گیاه ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای (*Haworthia cooperi*)

احمد شریفی[۱]، زهرا سرگزی مقدم[۲]، مریم مرادیان[۲]، سیده مهدیه خرازی[۱]، آزاده خادم[۱*]

۱- گروه پژوهشی بیوتکنولوژی گیاهان باغبانی، پژوهشکده بیوتکنولوژی صنعتی، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران
۲- گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

هاورتیا شیشه‌ای، یک گیاه ساکولنت بومی آفریقای جنوبی با برگ‌های گوشتی و نیمه‌شفاف است. این پژوهش به منظور بررسی پاسخ رشدی این گیاه به شرایط کشت خارج از محیط درون شیشه‌ای پس از کشت درون شیشه‌ای، در سال ۱٤۰۲ در آزمایشگاه کشت بافت پژوهشکده بیوتکنولوژی صنعتی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با پنج تکرار اجرا شد. گیاهچه‌های هاورتیا از طریق کشت بافت در محیط کشت پایهٔ موراشیگ و اسکوگ (MS) حاوی ۳ میلی‌گرم در لیتر بنزیل آدنین (BA) و ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر نفتالن‌استیک‌اسید (NAA) تکثیر و سپس در محیط کشت ½MS حاوی ۱ میلی‌گرم در لیتر ایندول‌استیک‌اسید (IAA) ریشه‌دار شدند. پس از سازگاری در گلخانه، اثر سه نوع بستر کشت (پیت ماس همراه با پرلیت، کوکوپیت همراه با پرلیت و مخلوط ماسه، ورمی کمپوست و پرلیت) همراه با سه سطح آبیاری (اشباع، نیمه اشباع و خشک) بر صفات رشدی و فیزیولوژیک گیاه بررسی شد. نتایج بررسی نشان داد که بستر کشت کوکوپیت در شرایط آبیاری خشک عملکرد بهتری از نظر وزن تر اندام هوایی (۱۷/۹ گرم)، وزن خشک برگ (۷٦/۲ میلی‌گرم)، حجم اندام هوایی (۱٦/۳ سانتی‌متر مکعب)، سطح اندام هوایی (۱٦/۹ سانتی‌متر مربع)، مقدار کلروفیل a (۷/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کاروتنوئیدها (۱/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نشان داد و همچنین وزن تر ریشه (۲/۰۱ گرم) و وزن خشک ریشه (۱۵/٦ میلی‌گرم) نیز به شکل قابل توجهی بیشتر بود. این تفاوت‌ها در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهندهٔ توانایی بالای مخلوط کوکوپیت-پرلیت در حفظ رطوبت، هوادهی ریشه گیاه و سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن است که باعث رشد بهتر برگ‌ها و اندام هوایی می‌شود. در بستر پیت ماس، بیشترین تعداد برگ (۱٤/۸ عدد) در شرایط آبیاری نیمه‌اشباع مشاهده شد و همچنین بیشترین مقدار کلروفیل b (۱/۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) تحت آبیاری اشباع تولید شد. این نتایج نشان‌دهندهٔ اثر مثبت پیت ماس در شرایط خاص آبیاری است که می‌تواند به بهبود برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه کمک کند. از سوی دیگر، بستر مخلوط در شرایط آبیاری خشک کمترین عملکرد را داشت، به‌طوری که کمترین وزن تر اندام هوایی (۱۰/٦ گرم)، وزن خشک برگ (۵۳/۱ میلی‌گرم)، حجم اندام هوایی (۸/۸ سانتی‌متر مکعب)، و سطح اندام هوایی (۱۳/۲ سانتی‌متر مربع) مشاهده شد. همچنین وزن تر ریشه (۰/٦۳ گرم) و وزن خشک ریشه (۷/٦ میلی‌گرم) نیز در این بستر به طور قابل

نویسنده مسئول: آزاده خادم
رایانامه: azadeh.khadem@jdm.ac.ir

توجهی کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که تهویه ضعیف و دسترسی کمتر به اکسیژن در بستر مخلوط نمی‌تواند شرایط بهینه‌ای برای رشد گیاه هاورتیا شیشه‌ای فراهم کند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که نوع بستر و میزان آبیاری تأثیر قابل توجهی بر رشد و سلامت هاورتیا شیشه‌ای دارد و بستر کوکوپیت+پرلیت تحت آبیاری خشک، به دلیل حفظ مناسب رطوبت و تهویه بهتر، گزینه‌ای مناسب برای بهبود رشد و کاهش پوسیدگی ریشه است.

کلید واژه‌ها: بستر کشت، تنش آبیاری، سازگاری، صفات مورفوفیزیولوژیک، گیاهان زینتی

مقدمه

گیاهان برگ زینتی مانند ساکولنت‌ها با برگ‌های گوشتی خود که آب را ذخیره می‌کنند، در مناطق گرمسیری و نیمه-گرمسیری رشد می‌کنند و به دلیل نیاز کم به آبیاری و کوددهی، جزء گزینه‌های اقتصادی به شمار می‌روند (Chen *et al.*, 2002). ساکولنت‌ها به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی مانند پوشش مومی یا مودار، برگ‌های کوچک یا بدون برگ، خارها یا کرک‌های محافظ، سیستم ریشه‌ای کم‌عمق یا گسترده و ساختارهای زیرزمینی برای ذخیرهٔ آب و مواد مغذی، برای شرایط خشک مناسب هستند. همچنین، متابولیسم اسید کراسولاسه به آن‌ها امکان می‌دهد تا دی‌اکسید کربن را در شب جذب کرده و در روز استفاده کنند تا از تعریق آب جلوگیری نمایند (Griffiths and Males, 2017).

گونه‌های مختلف هاورتیا عمدتا دارای برگ‌های گوشتی بوده و اغلب بدون ساقه هستند. در این میان، گیاه هاورتیا شیشه‌ای (*Haworthia cooperi*) به دلیل دارا بودن ویژگی‌های زینتی مانند برگ‌های نیمه‌شفاف و رشد برگ‌ها به صورت گل رز از محبوبیت بالایی در بازار برخوردار است. این گیاه بومی آفریقایی جنوبی بوده و توانایی بالایی در نگهداری آب در برگ‌های خود دارد (Kharrazi *et al.*, 2022).

با این که گیاه هاورتیا شیشه‌ای به راحتی کشت و نگهداری می‌شود، اما چالش‌هایی مانند پوسیدگی ریشه ناشی از آبیاری نامناسب و انتخاب بستر کشت نادرست موجب کاهش بازدهی تکثیر و نگهداری آن شده است. برای پیشگیری از این مشکلات، آبیاری صحیح همراه با به کارگیری بستر کشت مناسب بسیار لازم است (Emming, 2023). پوسیدگی ریشه که اغلب ناشی از آبیاری بیش از حد است، می‌تواند منجر به بیماری‌های قارچی و در نهایت از بین رفتن گیاه شود. بنابراین توجه به شرایط آب و هوایی، اندازهٔ گلدان و وضعیت گیاه برای تعیین میزان و شدت آبیاری ضروری است (Hammo, 2023). در نهایت گزینش بستر کشت مناسب با خصوصیاتی چون زهکشی خوب، هوادهی کافی، نگه‌داری مطلوب آب، تغذیه مناسب و تعادل pH، برای کاهش تلفات گیاهی و افزایش سلامت گیاهان زینتی مانند ساکولنت‌ها حیاتی است (Nerlich and Dannehl, 2021). در میان بسترهای کشت، پیت ماس و کوکوپیت به عنوان اصلاح‌کننده‌های خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند و به رشد و سلامت گیاهان کمک می-کنند (Kitir *et al.*, 2018; Joy *et al.*, 2020; Prisa and Caro, 2023). این بسترها برای کشت گیاهانی مانند *Echeveria pumila*، *Aloe vera* و *Crassula sarcocaulis* مناسب هستند و به عنوان بسترهایی مناسب برای رشد ساکولنت‌ها معرفی شده‌اند (Arellano-Ostoa *et al.*, 2019; Pourkhaloee *et al.*, 2023).

بستر مخلوطی که عمدتاً برای کشت ساکولنت‌ها به کار می‌رود، بستری است که دارای ویژگی‌های مناسبی از قبیل زهکشی خوب، هوادهی کافی و مواد مغذی مطلوب برای رشد این گیاهان است. این بستر ترکیبی از مواد آلی مانند کوکوپیت، کمپوست یا پوست درخت و مواد معدنی مانند ماسه، پرلیت یا پوکه تشکیل شده است (Krawczyk *et al.*, 2021; Olkova, 2022). تناسب این مواد می‌تواند بسته به نیازهای خاص گیاه و شرایط آب و هوایی متغیر باشد. این بستر کشت مخلوط در پرورش ساکولنت‌هایی چون *Aloe butteneri* و *Crassula helmsii* مورد استفاده قرار می‌گیرد (Brouwer *et al.*, 2017; Hammo, 2023).

در گلخانه‌ها، پوسیدگی ریشه بزرگ ترین دلیل تلفات ساکولنت‌ها و نارضایتی پرورش‌دهندگان این گیاهان است (Nerlich and Dannehl, 2021; Hammo, 2023). امروزه ضروری‌ترین جزء در پیشرفت علوم کشاورزی و کشاورزی مدرن برطرف کردن مشکلات پرورش‌دهندگان است. بر این اساس هدف پژوهش حاضر، انتخاب بستر کشت بهینه و نوع آبیاری ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای بود تا بتوان به بالاترین میزان عملکرد رشدی گیاهچه‌های کشت بافتی این گونه گیاهی و کاهش تلفات پوسیدگی ریشه آن دست یافت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف بررسی پاسخ گیاهچه‌های کشت بافتی ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای به شرایط کشت گلخانه‌ای در گروه بیوتکنولوژی گیاهان باغبانی سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی طراحی و اجرا گردید. به منظور تهیه ریزنمونهٔ گیاهی، تعدادی گیاه ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای دارای دو برگ کامل که در شرایط این ویترو (*In vitro*) در محیط کشت پایهٔ MS حاوی ۳ میلی گرم در لیتر BA به همراه ۰/۵ میلی گرم در لیتر NAA تکثیر و در محیط کشت MS ½ حاوی ۱ میلی گرم در لیتر هورمون IAA ریشه دار شدند (Kharrazi *et al*., 2022). گیاهان سازگار شده پس از انتقال به گلخانه تحقیقاتی در شرایط محیطی و تغذیهٔ مناسب نگه‌داری شدند تا اعمال تیمارها بر روی آن‌ها صورت گیرد.

به منظور بررسی اثر نوع بستر کشت و میزان آبیاری بر ویژگی های رشدی و فیزیولوژیک این نوع ساکولنت، گیاهچه‌های یکسان از نظر رشدی انتخاب و در بسترهای کشت مختلف پیت ماس-پرلیت، کوکوپیت-پرلیت به نسبت ۷ : ۳ و مخلوط ماسه، ورمی کمپوست و پرلیت به نسبت ۳ : ۵ : ۲ در گلدان‌های با عرض هشت سانتی متر کشت شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر کشت‌ها در جدول ۱ ذکر شده است. عصارهٔ آبی اشباع بستر کشت‌ها با نسبت ۵:۱ تهیه شده و مقدار هدایت الکتریکی و pH آن‌ها به ترتیب توسط دستگاه pH متر و هدایت سنج (ساخت شرکت HANNA مدل HI8733) اندازه‌گیری شد (Baruah and Borthakur, 1997). میزان کربن آلی هریک از نمونه‌ها با استفاده از روش والکی بلک و نیتروژن آنها توسط روش کجلدال تعیین شد (Jafari Haghighi, 2003). صفات وزن مخصوص حقیقی و وزن مخصوص ظاهری بر حسب گرم در هر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده و درصد تخلخل نیز بر اساس آنها محاسبه شد (Baruah and Borthakur, 1997).

ساکولنت‌های کشت شده در هر تیمار بستر کشت در سه گروه آبیاری در حد اشباع، آبیاری در حد نیمه اشباع و آبیاری در حد خشک شدن بستر دسته‌بندی شدند. اندازه‌گیری میزان آب مورد نیاز برای اشباع هر یک از بستر کشت‌ها نشان داد ۴۰۰ تا ۶۰۰ سی‌سی آب برای اشباع یک لیتر بستر کشت مورد نیاز است که این مقدار به طور میانگین، ۵۰۰ سی‌سی در نظر گرفته شد (Din, 2012).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بسترها.

Table 1. Physiochemical properties of the substrates.

Growth Substrate	pH	EC (µS cm^{-1})	C/N	Nitrogen (%)	Organic matter (%)	Bulk Density g.cm^{-3}	Particle Density g.cm^{-3}	Porosity (%)
Cocopeat	6.20	1.94	126.44	0.38	82.48	0.16	1.81	90
Peat moss	4.81	0.52	87.71	0.56	84.94	0.2	1.74	87.8
Mixed	7.35	4.45	10.15	0.53	9.27	0.81	2.27	62.2

مخففها: C/N : نسبت کربن به نیتروژن

Abbreviations: C/N: Carbon to Nitrogen Ratio

در تیمار اشباع، گیاهان هر دو روز یک بار به میزان ۵۰۰ سی‌سی برای ۱۵ گلدان از کف آبیاری می‌شدند. در تیمار نیمه اشباع زمانی که سطح بستر کشت خشک می‌شد (هر ۵ روز یک بار) آبیاری به میزان ۵۰۰ سی‌سی

برای ۱۵ گلدان از بالا آبیاری می‌گردید. در تیمار خشک، زمانی که بستر کشت کامل خشک می‌شد (تقریباً هر ۱۰ روز یک بار) آبیاری به میزان ۵۰۰ سی‌سی برای ۱۵ گلدان انجام شد. برای تغذیهٔ گیاهان، از محلول هوگلند با غلظت استاندارد (½×) استفاده شد. این کوددهی به صورت هفتگی و جایگزین یکی از دورهای آبیاری معمول انجام گرفت. در هر نوبت، محلول کود تا حد اشباع بستر به گلدان‌ها اعمال شد. پس از کشت، گلدان‌ها در شرایط نوری ۱۶ ساعت روشنایی (۳۰۰۰–۲۵۰۰ لوکس) و ۸ ساعت تاریکی در دمای ۱±۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و رطوبت محیطی ۴۵ درصد قرار داده شدند. پس از گذشت ۴۰ روز از کشت، صفات رشدی گیاهچه‌ها با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد.

وزن تر ریشه و اندام هوایی بلافاصله پس از برداشت با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و سپس تعداد برگ‌ها در هر گیاهچه شمارش شد. برای تعیین وزن خشک، نمونه‌های ریشه و اندام هوایی به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتیگراد قرار داده شدند تا به وزن ثابت برسند و سپس با ترازوی آنالیتیکال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شدند. تعداد برگ‌های کاملاً توسعه یافته (با طول حداقل ۰/۵ سانتی‌متر) به صورت دستی شمارش شد و برگ‌های آسیب دیده یا ناقص در محاسبات لحاظ نشدند. حجم اندام هوایی با روش جابجایی آب در استوانهٔ مدرج دقیق (دقت ۰/۱ میلی‌لیتر) تعیین گردید که در آن گیاه کامل به آرامی در آب مقطر غوطه‌ور شده و حجم آب جابجا شده اندازه‌گیری شد. همچنین سطح اندام هوایی و ریشه بدین صورت که برگ‌ها و یا ریشه‌ها بر روی یک سطح صاف قرار داده و با استفاده از دوربین، تصویر برگ‌ها و یا ریشه‌ها گرفته شد. سپس با نرم‌افزار ImageJ مساحت سطح اندازه‌گیری شد. همچنین شدت سبزینگی برگ نیز با استفاده از میانگین شدت رنگ سبز در پیکسل‌های موجود در تصویر برگ گیاهچه‌ها با استفاده از افزونه RGB measure در نرم‌افزار ImageJ محاسبه شد.

طیف جذبی کلروفیل a، b و کاروتنوئید در هر نمونه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانش شده و پس از جای‌گذاری در فرمول‌های زیر مورد ارزیابی قرار گرفتند (Arnon ,1949; Datt, 1998).

$C_a = (15.65\ A_{666} - 7.340\ A_{653})/\ FW$

$C_b = (27.05\ A_{653} - 11.21\ A_{666})/\ FW$

$Car = ((1000.\ A_{470} - 2.860\ C_a - 129.2\ C_b)\ /245)/\ FW$

آماده‌سازی داده‌ها در برنامه Excel و تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار JMP8 انجام شد. مقایسهٔ میانگین تیمارها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت و نمودارها نیز با استفاده از برنامهٔ Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

اثر شیوهٔ آبیاری و بستر کشت بر رشد اندام هوایی

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع بستر کشت و شیوه آبیاری اثر قابل توجهی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک گیاه ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای داشت (جدول ۲). تجزیهٔ واریانس داده‌ها نشان داد اثر ساده بستر کشت و شیوه آبیاری بر تمام صفات مورد بررسی شامل وزن تر و خشک برگ، حجم اندام هوایی، تعداد برگ، غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید، شدت سبزینگی و سطح اندام هوایی و برهم‌کنش آن‌ها نیز بر صفات وزن خشک برگ، حجم اندام هوایی، تعداد برگ، غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید، شدت سبزینگی و سطح اندام هوایی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

با توجه به نتایج مقایسهٔ میانگین داده‌ها، در تیمار آبیاری در مرحلهٔ خشکی کامل و بستر کشت کوکوپیت– پرلیت بالاترین وزن تر اندام هوایی (۱۷/۹ گرم)، وزن خشک برگ (۷۶/۲ میلی‌گرم)، حجم اندام هوایی (۱۶/۳ سانتی‌متر مکعب)، سطح اندام هوایی (۱۶/۹ سانتی‌متر مربع) و غلظت کلروفیل a (۷/۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) مشاهده شد (جدول ۲). این نتیجه با pH بهینه، تخلخل بالا، و مقدار EC مناسب این بستر کشت هم‌خوانی داشته که سبب شد زهکشی و تهویهٔ عالی فراهم شده و از پوسیدگی

ریشه جلوگیری شود (جدول ۱). در نتیجه در این بستر کشت، گیاهچه‌هایی سالم و شاداب رشد کردند (شکل ۱). با این حال، غلظت کلروفیل b (۰/۰۷ میلی‌گرم در گرم) در این تیمار کمترین مقدار را داشت. زمانی که تیمار آبیاری خشک به همراه بستر کشت پیت ماس- پرلیت استفاده شد، وزن تر اندام هوایی، وزن خشک برگ، حجم اندام هوایی و سطح اندام هوایی مقادیر کمتری در سطح آماری پنج درصد نسبت به کوکوپیت- پرلیت مشاهده شد. با این حال، میزان کاروتنوئید در این تیمار بیشترین مقدار (۱/۸ میلی‌گرم بر گرم) را داشت. همچنین در این تیمار آبیاری همراه با بستر کشت مخلوط، کمترین وزن تر اندام هوایی (۱۰/۶ گرم)، وزن خشک برگ (۵۳/۱ میلی‌گرم)، حجم اندام هوایی (۸/۸ سانتی‌متر مکعب) و سطح اندام هوایی (۱۳/۲ سانتی‌متر مربع) ایجاد شد که ممکن است به دلیل تهویهٔ ضعیف، دسترسی کمتر به اکسیژن و القای تنش شوری به دلیل مقدار بالای EC این بستر کشت بوده است (جدول ۳).

جدول ۲- خلاصه نتایج ANOVA (مقدار F) برای پارامترهای اندام هوایی گیاه هاورتیا شیشه‌ای.

Table 2. Summary of ANOVA results (F-values) for shoot parameters of cooper's haworthia.

S.O.V	df	SFW	SDW	SV	SSA	LN	Chl a	Chl b	Car.	GCI
Irrigation (A)	2	0.74	3.55*	0.70	0.64	3.94*	12.9***	27.15***	4.57*	63.4***
Substrate (B)	2	15.77***	6.28**	14.77***	5.91**	2.89	0.66	1.91	1.51	10.70***
A × B	4	4.2129**	4.40**	4.70**	1.60	1.24	13.73***	2.33	0.61	3.02*
Error	36	4.59	0.009	5.15	5.06	1.90	1.00	0.29	1.59	92.39
CV (%)	-	12.10	14.2	13.8	15.6	18.3	16.8	19.5	22.4	11.7

*سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵، ** سطح معنی داری کمتر از ۰/۰۱، ***سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۰۱ . مخفف‌ها: Error: میانگین مربعات خطا (MSE)، CV (درصد): (میانگین کلی/ مجذور میانگین مربعات خطا) × ۱۰۰، SFW: وزن تر اندام هوایی (گرم)، SDW: وزن خشک اندام هوایی (میلی‌گرم)، SV: حجم اندام هوایی (سانتی‌متر مکعب)، SSA: سطح اندام هوایی (سانتی‌متر مربع)، LN: تعداد برگ، Chl a: غلظت کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، Chl b: غلظت کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، .Car: محتوای کاروتنوئیدها (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، GCI: شاخص سبزینگی.

Significance levels: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001. "Error" = Mean Square Error (MSE). CV (%) = (√MSE/Overall mean) ×100. Abbreviations: SFW =Shoot fresh weight (g), SDW = Shoot dry weight (mg), SV = shoot volume (cm^3), SSA = Shoot surface area (cm^2), LN = Leaf number, Chl a = Chlorophyll a concentration (mg g^{-1} FW), Chl b = Chlorophyll b concentration (mg g^{-1} FW), Car. = Carotenoids content (mg g^{-1} FW), GCI = Green color index.

در تیمار آبیاری نیمه اشباع و بستر کشت کوکوپیت- پرلیت ، مقدار بالای وزن تر اندام هوایی (۱۵/۲ گرم)، وزن خشک برگ (۶۱/۳ گرم)، حجم اندام هوایی (۱۲/۶ سانتی‌متر مکعب)، سطح اندام هوایی (۱۶ سانتی‌متر مربع) و غلظت کلروفیل a (۶/۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. در همین تیمار آبیاری و بستر کشت پیت ماس- پرلیت، بیشترین تعداد برگ (۱۴/۸ عدد) مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ تأمین بهتر مواد مغذی و رطوبت در این بستر بود. همچنین وزن خشک برگ (۶۳/۳ گرم)، حجم اندام هوایی (۱۲/۶ سانتی‌متر مکعب) و سطح اندام هوایی (۱۵/۵ سانتی‌متر مربع) در این تیمار مقادیر بالایی داشت. این تیمار آبیاری در بستر کشت مخلوط- پرلیت، وزن تر اندام هوایی (۱۱/۷ گرم)، وزن خشک برگ (۵۸/۳ گرم)، حجم اندام هوایی (۹/۷ سانتی‌متر مکعب) و سطح اندام هوایی (۱۳/۵ سانتی‌متر مربع) داشت که این مقادیر به طور معنی‌داری در سطح پنج درصد کمتر از مقادیر مشاهده شده در بسترهای کوکوپیت و پیت ماس بودند. مقدار نیتروژن و ماده آلی بالای بستر کشت کوکوپیت-پرلیت احتمالاً در عملکرد مناسب آن موثر بوده است، اگرچه pH این بستر کشت ممکن است جذب برخی عناصر را محدود کرده باشد (جدول ۱).

در تیمار آبیاری اشباع و بستر کشت کوکوپیت- پرلیت، وزن تر اندام هوایی (۱۳/۱ گرم)، وزن خشک برگ (۵۳/۳

میلی‌گرم)، حجم اندام هوایی (۱۱/۳ سانتی‌متر مکعب) و سطح اندام هوایی (۱٤/۷ سانتی‌متر مربع) نسبت به تیمارهای خشک و نیمه اشباع مقادیر کمتری داشت. همچنین، غلظت کلروفیل a (۳ میلی‌گرم بر لیتر) در این تیمار کمترین مقدار را داشت که ممکن است به دلیل شرایط اشباع آب و کاهش تهویه گیاه باشد، اگرچه میزان EC مناسب این بستر کشت، احتمال القای تنش را در گیاه کاهش داده است (جدول ۱). در بستر کشت پیت ماس- پرلیت ، بالاترین میزان کلروفیل b (۱/۹ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ تأمین بهتر رطوبت و مواد مغذی در بستر پیت ماس-پرلیت بود. همچنین، وزن خشک برگ، حجم اندام هوایی و سطح اندام هوایی در این تیمار قابل توجه بود. زمانی که بستر کشت مخلوط- پرلیت در این تیمار آبیاری استفاده شد، کمترین وزن تر اندام هوایی (۱۰/۵ گرم)، وزن خشک برگ (۴۵/۳ میلی‌گرم)، حجم اندام هوایی (۸/۵ سانتی‌متر مکعب) و سطح اندام هوایی (۱۲/۱ سانتی‌متر مربع) مشاهده شد بستر کشت کوکوپیت با توجه به ساختار متخلخل و توانایی بالای نگهداری آب، همراه با آبیاری در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت، می‌تواند شرایط مطلوبی برای رشد ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای فراهم کند. ویژگی‌های فیزیکی این بستر باعث می‌شود گیاهان در فواصل آبیاری طولانی‌تر بتوانند به رطوبت کافی دسترسی داشته باشند و در نتیجه رشد بهتری نشان دهند. کاربرد بستر کشت کوکوپیت همراه با آبیاری در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت سبب می‌شود ریشه‌های گیاهان ساکولنت عمیق‌تر شوند و از رطوبت خاک بهرهٔ بیشتری ببرند (Qi *et al*., 2009). بر اساس مطالعات انجام گرفته، پیت ماس می‌تواند وزن تر و خشک اندام هوایی برخی از گیاهان مانند گوجه فرنگی، کاهو و توت فرنگی را در مقایسه با کوکوپیت افزایش دهد (Kowalczyk *et al*., 2014; Kalaivani & Jawaharlal, 2019; Madhavi *et al*., 2021). با این حال، مطالعات دیگر نشان داده‌اند برخی گیاهان مانند خیار، ژربرا و گل رز در بستر کشت کوکوپیت عملکرد بالاتری نسبت به پیت ماس دارند (Gungor & Yildirim, 2013; Khalaj *et al*., 2015; John *et al*., 2020).

مطالعات متعددی گزارش کرده‌اند پیت ماس می‌تواند حجم اندام هوایی برخی از ساکولنت‌ها مانند *Echeveria, Crassula* و *Sedum* را در مقایسه با سایر بسترها مانند کوکوپیت، پرلیت یا شن افزایش دهد (Lee *et al*., 2021; Prisa & Caro, 2023). با این حال، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که کوکوپیت می‌تواند حجم اندام‌های هوایی برخی از ساکولنت‌ها مانند *Aloe vera*، *Kalanchoe* و *Euphorbia tirucalli* را در مقایسه با سایر بسترها مانند ورمی‌کولیت کاهش دهد (Garg & Kumar, 2012; Kaur *et al*., 2015; Hammo, 2023).

تأثیر میزان و روش آبیاری بر تولید و تراکم برگ گیاهان نیز بسیار مهم است. برگ‌ها اندام هوایی گیاهان هستند که نقش مهمی در فتوسنتز، تنفس، تبخیر و تنظیم دما دارند. آبیاری مناسب می‌تواند به افزایش تعداد و سطح برگ گیاهان کمک کند، در حالی که آبیاری نامناسب می‌تواند باعث کاهش یا ریزش برگ گیاهان شود (Faraji, 2015).

بسترهای مختلف و روش‌های آبیاری متفاوت می توانند اثرات متفاوتی بر میزان کلروفیل a در گیاهان داشته باشند. به عنوان مثال، نتایج مطالعه‌ای نشان داد که ضایعات نخل خرمای کمپوست شده با کود حیوانی باعث افزایش میزان کلروفیل a در گیاهان گوجه فرنگی رشد یافته در سیستم کشت هیدروپونیک می‌شود (Aydi *et al*., 2023). پژوهش دیگری نشان داد که فیبر نارگیل یا همان کوکوپیت که معمولاً برای کشت بدون خاک استفاده می‌شود، میزان کلروفیل a را در گیاهان توت‌فرنگی که در سیستم کشت هیدروپونیک رشد می‌کنند، بهبود می‌بخشد (Ebrahimi *et al*., 2012).

جدول ۳- تأثیر روش‌های آبیاری بر ویژگی‌های رشدی اندام هوایی گیاه هاورتیا شیشه‌ای.

Table 3. The effect of irrigation methods on the shoot growth characteristics of cooper's haworthia.

Irrigation	Substrate	SFW	SDW	SV	SSA	LN	Chl a	Chl b	Car.	GCI
Dry	Cocopeat	17.88^{a}	76.21^{a}	16.30^{a}	16.92^{a}	14.8^{a}	7.19^{a}	0.07^{e}	1.72^{a}	112.44^{c}
	Peat moss	11.42^{bcd}	49.48^{cd}	9.1d^{ef}	13.84^{bcd}	13.6^{abc}	6.67^{bc}	0.43^{de}	1.85^{a}	102.43^{cd}
	mixed	10.61^{d}	53.14^{c-e}	8.8^{ef}	13.17^{cd}	13.4^{a-c}	3.99^{fg}	1.29^{bc}	0.86^{bcd}	97.96^{d}
Semi-saturated	Cocopeat	15.18^{ab}	61.28^{a-c}	12.6^{abc}	15.93^{ab}	14.4^{ab}	6.65^{bc}	1.09^{bc}	1.11^{bc}	137.63^{b}
	Peat moss	14.26^{abc}	62.34^{ab}	12.6^{abc}	15.52^{abc}	14.8^{a}	5.46^{cd}	1.04^{bc}	1.35^{ab}	106.78^{cd}
	mixed	11.66^{bc}	58.34^{a-d}	9.7^{c-e}	13.55^{bcd}	14.0^{ab}	6.73^{ab}	0.88^{b-e}	1.12^{bc}	134.19^{b}
Saturated	Cocopeat	13.15^{bc}	53.31^{cde}	11.3^{b-d}	14.72^{bc}	12.6^{c}	3.02^{h}	1.56^{ab}	0.59^{cd}	148.22^{a}
	Peat moss	14.83^{ab}	59.80^{b-d}	13.2^{ab}	16.66^{ab}	14.2^{a-c}	5.63^{cd}	1.91^{a}	0.46^{d}	138.61^{ab}
	mixed	10.54^{d}	45.29^{e}	8.5^{f}	12.09^{d}	12.4^{c}	6.15^{c-e}	1.59^{ab}	0.58^{cd}	137.96^{b}

حروف مشابه در هر ستون، نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، بر اساس آزمون LSD است. مخفف‌ها: SFW: وزن تر اندام هوایی (گرم)، SDW: وزن خشک اندام هوایی (میلی‌گرم)، SV = حجم اندام هوایی (سانتی‌متر مکعب)، SSA: سطح اندام هوایی (سانتی‌متر مربع)، LN: تعداد برگ، Chl a: غلظت کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، Chl b: غلظت کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، .Car: محتوای کاروتنوئیدها (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و GCI: شاخص سبزینگی.

The similar letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level based on the LSD test. Abbreviations: SFW: Shoot fresh weight (g), SDW: Shoot dry weight (mg), SV: shoot volume (cm^3), SSA: Shoot surface area (cm^2), LN: Leaf number, Chl a: Chlorophyll a concentration (mg g^{-1} FW), Chl b: Chlorophyll b concentration (mg g^{-1} FW), Car.: Carotenoids content (mg g^{-1} FW), GCI: Green color index

در مطالعه‌ای دیگر، تنش خشکی در گیاه بابونه باعث کاهش مقدار کلروفیل a شد (Pirzad *et al.*, 2011). همچنین در مطالعه‌ای دیگر گزارش شده است که مقدار آبیاری در بسترهای پشم سنگ و کوکوپیت بر میزان کلروفیل a در گیاهان فلفل شیرین در طول دورهٔ باردهی تأثیر می‌گذارد (Aydi *et al.*, 2023). برخلاف این مطالعات، در پژوهش حاضر مشاهده گردید که تنش خشکی کنترل‌شده نیز منجر به افزایش غلظت کلروفیل aدر هاورتیا شیشه‌ای گردید. این یافته‌ها احتمالاً نشان‌دهندهٔ پاسخ سازشی این گیاه ساکولنت به شرایط کم‌آبی است که از طریق سازوکارهای فیزیولوژیک خاصی مانند افزایش کارایی فتوسنتزی صورت می‌گیرد. این نتایج نشان می‌دهد بستر کشت و نحوه آبیاری اثرات قابل‌توجهی بر صفات فیزیولوژیک در گیاهان مختلف دارند.

در تحقیقات پیشین گزارش شده است که بستر کشت بر نحوهٔ رشد اندام هوایی گیاهان از طریق چندین فرآیند مختلف اثرگذار است. به عنوان مثال بستر کشت می‌تواند با تأمین آب و هوا برای ریشه‌ها و اندام هوایی گیاهان بر رشد آن‌ها تاثیر بگذارد. از این‌رو بستر کشت باید دارای ظرفیت نگهداری آب و تهویه مناسب باشد تا ریشه‌ها و اندام هوایی گیاهان بتوانند از اکسیژن مورد نیاز خود برخوردار شوند (Eshaghi *et al.*, 2020; Khalaj *et al.*, 2023). از طرف دیگر تأمین عناصر غذایی برای

رشد و تکامل گیاهان از دیگر عواملی است که در بستر کشت‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. بدین منظور بستر کشت مناسب باید دارای مقدار کافی و متعادلی از عناصر غذایی مهم مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و غیره باشد تا گیاهان بتوانند از آن‌ها برای تولید زیست توده، فتوسنتز و تنظیم فرایندهای فیزیولوژیک استفاده کنند (Adak *et al.*, 2018). همچنین کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی یکی دیگر از فرآیندهایی است که نوع بستر کشت بر آن تاثیر می‌گذارد. بستر کشت باید دارای ویژگی‌هایی باشد که از رشد و گسترش عوامل بیماری‌زا مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و حشرات جلوگیری کند. برای این منظور لازم است بستر کشت در شرایط pH، دما و رطوبت مناسب باشد (Shaban *et al.*, 2023). این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب بستر کشت مناسب و شیوه آبیاری می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رشد و توسعهٔ ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای داشته باشد. به طور کلی، بستر کوکوپیت در شرایط خشک و نیمه اشباع نتایج بهتری در برخی از صفات رشدی و فیزیولوژیکی نشان داد. این یافته‌ها می‌تواند به بهبود روش‌های کشت و نگهداری این گیاه کمک کند و به کشاورزان و محققان در انتخاب بهترین شرایط کشت برای بهبود عملکرد و کیفیت گیاهان کمک کند.



شکل ۱- هاورتیا شیشه‌ای ریزازدیادی‌شده: گیاه سالم (چپ) در مقایسه با گیاه مبتلا به پوسیدگی ریشه (راست)

Figure 1. Micropropagated cooper's haworthia: a healthy plant (left) versus a plant affected by root rot (right)

اثر شیوهٔ آبیاری و بستر کشت بر رشد ریشه

اثر بستر کشت بر رشد ریشه موضوع پیچیده‌ای است که به عوامل زیادی از جمله خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک بستر کشت، نوع گیاه، شرایط محیطی و برهم‌کنش با عوامل دیگر مانند آبیاری بستگی دارد (Ma *et al.*, 2020). تجزیهٔ واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده بستر کشت و شیوه آبیاری بر تمام صفات مورد بررسی شامل وزن تر و خشک ریشه و سطح ریشه در و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

نتایج مقایسهٔ میانگین‌ها نشان داد که روش‌های مختلف آبیاری اثر معنی‌داری بر پارامترهای رشدی ریشه ساکولنت هاورتیا شیشه‌ای در سطح پنج درصد داشته است (جدول ۵). آبیاری در مرحلهٔ خشکی کامل در بستر کشت کوکوپیت- پرلیت مطلوب ترین عملکرد را نشان داد و مقادیر وزن تر ریشه (۲ گرم)، وزن خشک ریشه (۱۵/۶ میلی گرم) و سطح ریشه (۷/۸ سانتی‌متر مربع) اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان داد که کوکوپیت- پرلیت در شرایط کم‌آبی می‌تواند به خوبی آب را نگه دارد و ریشه‌ها را تغذیه کند. این شیوهٔ آبیاری در بستر کشت پیت ماس- پرلیت عملکرد کمتری نسبت به کوکوپیت- پرلیت داشت به طوری که وزن تر ریشه (۱/۱ گرم)، وزن خشک ریشه (۱۰/۴ میلی گرم) و سطح ریشه (۶/۳ سانتی‌متر مربع) کمتر از این میزان در بستر کشت کوکوپیت- پرلیت بود. در بستر کشت مخلوط- پرلیت، وزن تر ریشه (۰/۶۴ گرم)، وزن خشک ریشه (۷/۶ میلی گرم) و سطح ریشه (۲/۹ سانتی‌متر مربع) نشان‌دهندهٔ عملکرد ضعیف بستر کشت مخلوط- پرلیت در شرایط خشک بود. بستر کشت کوکوپیت- پرلیت در شرایط آبیاری نیمه‌اشباع عملکرد متوسطی از خود نشان داد. در مقابل، بستر کشت پیت‌ماس- پرلیت در همین شرایط آبیاری (نیمه‌اشباع) عملکرد مناسبی را ارائه کرد که شامل وزن تر ریشه (۱/۴ گرم)، وزن خشک ریشه (۱۲/۳ میلی گرم) و سطح اندازه‌گیری شده ریشه (۸/۹ سانتی‌متر مربع) بود. با این حال، تیمار مشابه آبیاری در بستر کشت مخلوط- پرلیت (وزن تر ریشه ۰/۹۶ گرم، وزن خشک ریشه ۹/۲ میلی گرم، و سطح ریشه ۵/۹ سانتی‌متر مربع) عملکرد متوسطی را ثبت نمود.

جالب توجه این که در شرایط آبیاری اشباع، بستر کشت کوکوپیت- پرلیت عملکرد مطلوب‌تری نسبت به پیت‌ماس- پرلیت و بستر مخلوط- پرلیت از خود نشان داد (جدول ۵). در این شرایط، بررسی داده‌ها نشان داد که در بستر کوکوپیت- پرلیت ، میانگین وزن تر ریشه به ۱/۱ گرم، وزن خشک ریشه به ۸/۱ میلی-گرم و سطح ریشه به ۳/۲ سانتی‌متر مربع رسید. این در حالی است که بستر پیت‌ماس- پرلیت در شرایط اشباع آب، مقادیر وزن تر ریشه (۱/۳ گرم)، وزن خشک ریشه (۸/۳ میلی گرم) و سطح ریشه (۳/۹ سانتی‌متر مربع) را نشان داد. بستر کشت مخلوط- پرلیت در این شرایط وزن تر ریشه (۰/۵۷ گرم)، وزن خشک ریشه (۵/۴ میلی گرم) و سطح ریشه (۲/۱ سانتی‌متر مربع) را نشان داد. نتایج نشان داد که پیت ماس- پرلیت در شرایط اشباع عملکرد متوسط و بستر کشت مخلوط- پرلیت در شرایط اشباع آب عملکرد ضعیفی داشت (شکل ۲).

جدول ٤- خلاصه نتایج ANOVA (مقادیر F) برای پارامترهای ریشه گیاه هاورتیا شیشه‌ای

Table 4. Summary of ANOVA results (F-values) for root parameters of cooper's haworthia

S.O.V	df	RFW	RDW	RGA
Irrigation (A)	2	6.76**	12.75***	71.10***
Substrate (B)	2	33.52***	8.99***	33.43***
A × B	4	8.13***	4.02**	15.27***
Error	36	0.068	0.0007	0.93
CV (%)	-	8.2	10.5	6.7

* سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵، ** سطح معنی داری کمتر از ۰/۰۱، *** سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۰۱. مخففها : Error: میانگین مربعات خطا (MSE)، CV (درصد): (میانگین کلی/ مجذور میانگین مربعات خطا) × ۱۰۰، RFW: وزن تر ریشه، RDW: وزن خشک ریشه، RGA: سطح رشد ریشه.

Significance levels: *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001. Error: Mean Square Error (MSE). CV (%): (√MSE/Overall mean) ×100. Abbreviations: RFW: Root fresh weight, RDW: Root dry weight, RGA: Root growth area.

مطالعات مختلف اثر بستر کشت‌های مختلف بر نحوهٔ رشد ریشه گیاهان مختلف مانند خیار، فلفل شیرین، نرگس و گوجه‌فرنگی را گزارش کرده‌اند (Hodge *et al.*, 2009; Gallegos *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2021). در بررسی انجام شده بر نوع بستر کشت بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی بابونهٔ آلمانی (*Matricaria chamomilla*) تحت تنش شوری مشخص شد بستر کشت حاوی ۷۵ درصد کوکوپیت و ۲۵ درصد پرلیت موجب افزایش ۱۱/۲ درصدی وزن تر ریشه نسبت به بستر کشت حاوی ۲۵ درصد کوکوپیت و ۷۵ درصد پرلیت شد (Mazhari, 2023). در مطالعه‌ای دیگر پاسخ برخی ویژگی‌های رشدی و بیوشیمیایی نشاء خیار در بسترهای مختلف کشت به محلول‌پاشی سرکهٔ چوب نشان داد استفاده از سرکهٔ چوب پسته ۰/۵ درصد در بستر کوکوپیت و پیت ماس در مقایسه با شاهد موجب افزایش وزن خشک شاخساره و درصد وزن خشک شاخساره نسبت به ریشه به میزان ۴/۳ درصد شد (Afsharipour *et al.*, 2023). همچنین در مطالعه اثر بستر کاشت بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه عنصل (*Drimia maritima* L.) مشخص شد در بین بسترهای مختلف بیشترین میزان وزن تر در بستر پرلیت بوده اما از نظر وزن خشک ریشه‌ها در بسترهای مختلف تفاوتی مشاهده نشد (Heydari & Kiani, 2021). در این مطالعه، تفاوت معنی‌داری میان بستر کشت کوکوپیت و پیت ماس وجود نداشت که این موضوع ممکن است بسته به نیازها و ترجیح خاص این گونه گیاهی باشد ولی بستر کشت مخلوط که دارای ورمی کومپوست بود به طور معنی‌داری وزن تر و خشک ریشه را کاهش داد.

ریشه عضوی است که گیاه را به بستر متصل می‌کند و بستر کشت می‌تواند از طریق سازوکارهای مختلفی مانند ایجاد مقاومت مکانیکی، سطح تماس، تخلخل و حفظ آب بر مورفولوژی و استحکام ریشه روی ریشه اثر بگذارد (Meng *et al.*, 2019). به عنوان مثال ساختار بستر کشت می‌تواند بر افزایش طول، انشعاب و نحوهٔ رشد ریشه اثر بگذارد (Ren *et al.*, 2023). همچنین بستر کشت می‌تواند با تأمین مواد مغذی، pH، هدایت الکتریکی و مواد آلی بر متابولیسم، رشد و کیفیت ریشه تاثیر بگذارد. به عنوان مثال، pH بستر کشت و دسترسی به مواد مغذی بر جذب ریشه، انتقال و جذب عناصر ضروری مؤثر است (Kang *et al.*, 2022). از سوی دیگر بستر کشت می‌تواند با دارا بودن میکروبیوم مفید بر سلامت ریشه، مقاومت در برابر بیماری و همزیستی اثر بگذارد. به عنوان مثال، ترکیب سوبسترا و مواد آلی می‌تواند بر نحوهٔ رشد ریشه، تعامل و انتقال سیگنال با میکروارگانیسم‌های مفید یا مضر تأثیرگذار باشد (Molefe *et al.*, 2023). بنابراین بستر کشت از طریق فرآیندهای مختلف می‌تواند اثرات قابل توجهی بر روی ریشه داشته باشد که این اثرات یکنواخت نیستند و ممکن است بسته به شرایط محیطی و برهم‌کنش با عوامل دیگر تغییر کند. از سوی دیگر، ظرفیت نگهداشت آب در بستر کشت از عوامل مهمی است که در سلامت ریشه و گیاه بسیار مؤثر است به طوری که اشباع آب با کاهش دسترسی به اکسیژن و افزایش تنفس بی هوازی ریشه‌ها باعث کاهش سطح ریشه شده که در نهایت می‌تواند منجر به مرگ گیاه شود (Luo *et al.*, 2022). همچنین اشباع آب می‌تواند منجر به افزایش فشار آب و کاهش نیروهای مویرگی بستر کشت شود که مانع از کشیدگی و انشعاب ریشه خواهد شد (Huang & Yu, 2022). بنابراین اشباع آب می‌تواند اثرات منفی بر سطح ریشه و رشد کلی ریشه داشته باشد.

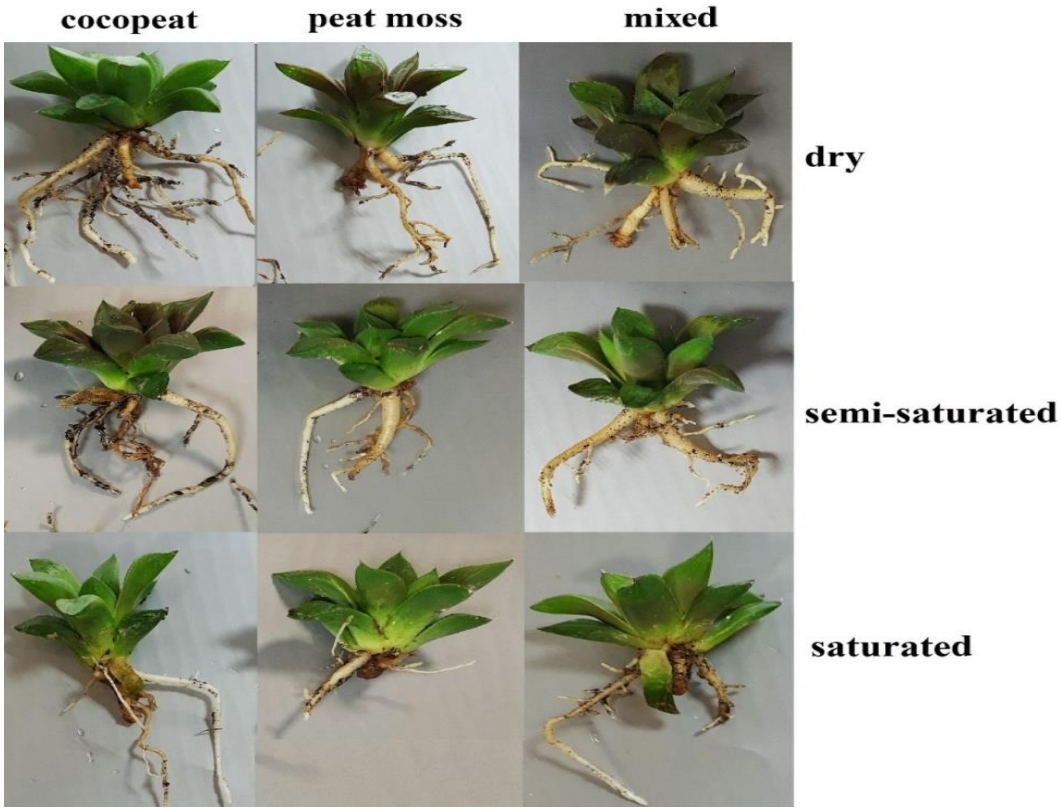
جدول ۵- تأثیر روش‌های آبیاری بر ویژگی‌های رشدی ریشه گیاه هاورتیا شیشه‌ای

Table 5. The effect of irrigation methods on the root growth characteristics of cooper's haworthia

Irrigation method	Substrate	RFW	RDW	RA
Dry	Cocopeat	2.01^{a}	15.58^{a}	7.77^{b}
	Peat moss	1.14^{cd}	10.36 ^{bc}	6.31^{c}
	mixed	0.64^{e}	7.58^{de}	2.88^{de}
Semi-saturated	Cocopeat	1.19^{b-d}	9.66^{cd}	5.59^{c}
	Peat moss	1.41^{b}	12.29^{b}	8.92^{a}
	mixed	0.96^{d}	9.21^{cd}	5.98^{c}
Saturated	Cocopeat	1.09^{cd}	8.12^{cd}	3.22^{d}
	Peat moss	1.30^{bc}	8.29^{cd}	3.88^{d}
	mixed	0.57^{e}	5.38^{e}	2.11^{e}

حروف مشابه در هر ستون، نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، بر اساس آزمون LSD است. مخفف‌ها: RFW: وزن تر ریشه (گرم)، RDW: وزن خشک ریشه (میلی‌گرم)، RA: سطح ریشه (سانتی‌متر مربع).

The similar letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level based on the LSD test. Abbreviations: RFW: Root fresh weight (g), RDW: Root dry weight (mg), RA: Root area (cm^2)



شکل ۲- گیاهان هاورتیا شیشه‌ای رشد کرده در بسترهای مختلف با روش‌های گوناگون آبیاری

Figure 2. Cooper's haworthia plants grown in different substrates with various irrigation methods

نتیجه‌گیری

بستر کشت و شیوهٔ آبیاری از عوامل مهمی هستند که بر رشد اندام هوایی و ریشه گیاهان تأثیر می گذارند. بستر کشت باید ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مناسبی داشته باشد تا گیاهان بتوانند به خوبی در آن رشد کنند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بستر کشت می‌تواند بر صفات فیزیولوژیک گیاه تأثیر بگذارد. بهترین نتایج در صفات مورد بررسی در آبیاری به شیوهٔ خشک و بستر کشت کوکوپیت حاصل شد. این تیمار بر صفاتی همچون میزان وزن تر و خشک اندام هوایی، حجم اندام هوایی، سطح اندام هوایی، مقدار کاروتنوئید، کلروفیل a و همچنین وزن تر و خشک ریشه اثر گذاشته و این صفات را به شکل قابل توجهی نسبت به سایر تیمارهای مورد بررسی افزایش داد. کوکوپیت یک نوع بستر کشت است که قابلیت نگهداری آب را به میزان بالایی دارد. این بستر کشت باعث می‌شود که ساکولنت‌ها در شرایط کم‌آبی بتوانند رشد بهتری داشته باشند و صفات فیزیولوژیکی گیاه را بهبود بخشند. آبیاری خشک نیز با کاهش میزان آب مصرفی، بازدهی ساکولنت را افزایش داد. این روش باعث می‌شود که ریشه‌های ساکولنت عمیق‌تر شوند و از رطوبت خاک بهره بیشتری ببرند. علاوه بر آن، این روش می‌تواند از آبیاری بیش از حد و پوسیدگی ریشه به عنوان مانع اصلی رشد گیاهچه‌های ساکولنت جلوگیری نماید.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله حاضر از همکاری گروه پژوهشی بیوتکنولوژی گیاهان باغبانی سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی به منظور تأمین زیرساخت آزمایشگاهی مورد نیاز برای انجام این پژوهش کمال قدردانی را به عمل می‌آورند.

References

Adak, N., Tozlu, I., & Gubbuk, H. (2018). Influence of different soilless substrates to morpho-physiological characteristics and yield relations in strawberries. *Erwerbs-Obstbau*, 60(4), 341-348. https://doi.org/10.1007/s10341-018-0382-x

Afsharipour, S., Mirzaalian Dastjerdi, A., & Seyedi, A. (2022). The response of some growth and biochemical traits of cucumber seedlings in different culture mediums to wood vinegar foliar spraying. *Journal of Plant Process and Function*, 56(12), 393-406. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1857-en.html [In Persian].

Arellano-Ostoa, G., Lagunas-Santiago, S., Alvarez-Ruiz, M. A., Gutiérrez, E. V., & Martínez, R. R. (2019). In vitro multiplication and rooting of *Echeveria pumila* Lem. free of phytoplasmas. Paper presented at the IX International Symposium on New Ornamental Crops, 1288. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1288.29.

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Aydi, S., Sassi Aydi, S., Marsit, A., El Abed, N., Rahmani, R., Bouajila, J., Merah, O. & Abdelly, C. (2023). Optimizing alternative substrate for tomato production in arid zone: lesson from growth, water relations, chlorophyll fluorescence, and photosynthesis. *Plants*, 12(7), 1457. https://doi.org/10.3390/plants12071457

Baruah, T. C., & Borthakur, H. P. (1997). Soil Chemistry. Baruah, TC, Borthakur, HP. A Textbook of Soil Analysis. *Vikas Publishing House Pvt. Ltd., New Delhi*, 118-132.

Brouwer, E., Denys, L., Lucassen, E., & Onkelinx, T. (2017). Competitive strength of Australian swamp stonecrop (*Crassula helmsii*) invading moorland pools. *Aquatic Invasions*. 12(3), 321–331. https://doi.org/10.3391/ai.2017.12.3.06

Chen, J., Henny, R. J., & McConnell, D. B. (2002). Development of new foliage plant cultivars. *Trends In New Crops and New Uses*, 36, 466-472.

Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, 66(2), 111-121. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00046-7

Din, E. (2012). Soil Improvers and growing media–Determination of physical properties–Drybulk density, air volume, water volume, shrinkage value and total pore space. German Version prEN,Beuth, Berlin/Cologne.

Ebrahimi, R., Ebrahimi, F., & Ahmadizadeh, M. (2012). Effect of different substrates on herbaceous pigments and chlorophyll amount of strawberry in hydroponic cultivation system. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 12, 154-158.

Emming, J. (2023). Landscaping with large succulents: a watering guide for ocotillos, cacti, and yuccas part one: general information, and tips regarding ocotillos. *Cactus and Succulent Journal*, 95(1), 67-77. https://doi.org/10.2985/015.095.0110

Eshaghi, T., Zare Mehrjerdi, & M., Sharifi, A. (2020). Effect of medium, iron-chelating agent and plant growth regulator on micropropagation of pomegranate (*Punica granatum* L.). *Plant Productions*, 43(2), 309-322. https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27232.1655 [In Persian].

Faraji, H. (2017). Evaluation relationships between seed number, used water in evapotranspiration and leaf relative water content with canola seed weight. *Journal of Crops Improvement*, 17(1), 257-270. https://jci.ut.ac.ir/article_54805_7398.html [In Persian].

Gallegos, J., Álvaro, J. E., & Urrestarazu, M. (2020). Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. *HortScience*, 55(6), 787-794. https://doi.org/10.21273/HORTSCI14954-20

Garg, J., & Kumar, A. (2012). Effect of different soil types on growth and productivity of *Euphorbia lathyris* L. A hydrocarbon yielding plant. *International Journal of Life Science and Pharma Research*, 2, 164-173. http://ijlpr.com/admin/php/uploads/114_pdf.pdf

Griffiths, H., & Males, J. (2017). Succulent plants. *Current Biology*, 27(17), R890-R896. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.021

Gungor, F., & Yildirim, E. (2013). Effect of different growing media on quality, growth and yield of pepper (*Capsicum annuum* L.) under greenhouse conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 45(5), 1605-1608 .

Hammo, Y. H. (2023). Effect of NPK fertilizer and growing media on the growth and gel production of two species of Aloe plant (*Aloe Vera* and *Aloe Butteneri*). *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 51(3), 109-121. https://doi.org/10.33899/magrj.2023.139367.1226

Heydari, K., & Kiani, S. (2021). Effect of seed bed on germination and seedling growth of Sea Squill (*Drimia maritima* L.). *Journal of Seed Research*, 11(1), 46-56. [In Persian].

Hodge, A., Berta, G., Doussan, C., Merchan, F., & Crespi, M. (2009). Plant root growth, architecture and function. *Plant Soil*, 321, 153–187. https://doi.org/10.1007/s11104-009-9929-9

Huang, S., & Yu, S. (2022). Effect of water saturation on the strength of sandstones: experimental investigation and statistical analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(8), 323. https://doi.org/10.1007/s10064-022-02822-9

Jafari Haghighi, M. (2003). Analytical methods of soil and the important physical and chemical sampling and analysis, with emphasis on theory and application. *Nedaye zoha Publication*, 236 p.

John, S., Sankar, M., Sreelatha, U., Kumar, K. A., & Deepthy, K. (2020). Morphological and floral characters of rose as influenced by growing media and growth regulators. *Journal of Tropical Agriculture*, 58(1).

Joy, Y. S., Lee, A. Y., & Park, S.-A. (2020). A horticultural therapy program focused on succulent cultivation for the vocational rehabilitation training of individuals with intellectual disabilities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1303. https://doi.org/10.3390/ijerph17041303

Kalaivani, K., & Jawaharlal, M. (2019). Study on physical characterization of coco peat with different proportions of organic amendments for soilless cultivation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 2283-2286 .

Kang, J., Peng, Y., & Xu, W. (2022). Crop root responses to drought stress: Molecular mechanisms, nutrient regulations, and interactions with microorganisms in the rhizosphere. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9310. https://dx.doi.org/10.3390/ijms23169310

Kaur, A., Dubey, R., & Singh, S. (2015). Effect of different potting media on growth and flowering of kalanchoe (*Kalanchoe blossfeldiana* Poelln.). *Indian Journal of Horticulture*, 72(3), 388-391. https://doi.org/10.5958/0974-0112.2015.00075.4

Khalaj, M. A., Amiri, M., & Sindhu, S. (2015). Study on the effect of different growing media on the growth and yield of gerbera (*Gerbera jamesonii* L.). *Journal of Ornamental Plants*, 1(3), 185-189.

Khalaj, M. A., Azimi, M., & Yousefbiki, A. (2023). Effect of different growing media on morpho-physiological, biochemical and nutrient uptake characteristics of Amaryllis (*Hippeastrum* spp.) under vegetative growth period. *Plant Productions*, 45(4), 519-531. https://doi.org/10.22055/ppd.2023.42479.2066 [In Persian].

Kharrazi, M., Moradian, M., Safari, N., Khadem, A., & Sharifi, A. (2022). Optimization of in vitro cultural conditions of Haworthia (*Haworthia cooperi* Baker). *Plant Productions*, 45(1), 53-66. doi:10.22055/ppd.2021.36744.1971. https://doi.org/10.22055/PPD.2021.36744.1971 [In Persian].

Kitir, N., Yildirim, E., Şahin, Ü., Turan, M., Ekinci, M., Ors, S., Kul, R., Ünlü, H. and Ünlü, H. (2018). *Peat use in horticulture* (pp. 75-90). London, UK: IntechOpen.

Kowalczyk, K., Mirgos, M., Bączek, K., Niedzińska, M., & Gajewski, M. (2014). Effect of different growing media in hydroponic culture on the yield and biological quality of lettuce *(Lactuca sativa var. capitata).* Paper presented at the *VI Balkan Symposium on Vegetables and Potatoes*, 1142. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1142.17

Krawczyk, A., Domagała-Świątkiewicz, I., & Lis-Krzyścin, A. (2021). Time-dependent changes in the physico-chemical parameters and growth responses of *Sedum acre* (L.) to waste-based growing substrates in simulation extensive green roof experiment. *Agronomy*, 11(2), 298. https://doi.org/10.3390/agronomy11020298

Lee, J. H., Lim, Y. S., & Nam, S. Y. (2021). Optimization of shading levels, potting media, and fertilization rates on the vegetative growth of *Sedum zokuriense* Nakai. *Flower Research Journal*, 29(4), 239-246. https://doi.org/10.11623/frj.2021.29.4.04

Luo, D., Xie, Y., Lu, S., & Su, G. (2022). Experimental study on the effects of water saturation on the microseismic and acoustic emission characteristics of sandstone in different stress states. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(11), 6583-6603. https://doi.org/10.1007/s00603-022-03001-8

Ma, G., Mao, H., Bu, Q., Han, L., Shabbir, A., & Gao, F. (2020). Effect of compound biochar substrate on the root growth of cucumber plug seedlings. *Agronomy*, 10(8), 1080. https://doi.org/10.3390/agronomy10081080

Madhavi, B. G. K., Khan, F., Bhujel, A., Jaihuni, M., Kim, N. E., Moon, B. E., & Kim, H. T. (2021). Influence of different growing media on the growth and development of strawberry plants. *Heliyon*, 7(6). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07170

Mazhari, R. (2023). Investigating the effect of different planting substrates on the some of the morphological and physiological characteristics of the german chamomile (*Matricaria chamomilla*) under salt stress. *Applied Soil Research*, 11(2), 129-140. https://doi.org/10.30466/asr.2023.121370 [In Persian].

Meng, F., Xiang, D., Zhu, J., Li, Y., & Mao, C. (2019). Molecular mechanisms of root development in rice. *Rice*, 12(1), 1-10. https://doi.org/10.1186/s12284-018-0262-x

Molefe, Rebaona R., Adenike E. Amoo, and Olubukola O. Babalola (2023). Communication between plant roots and the soil microbiome; involvement in plant growth and development. *Symbiosis*, 90(3), 231-239. https://doi.org/10.1007/s13199-023-00941-9

Nerlich, A., & Dannehl, D. (2021). Soilless cultivation: dynamically changing chemical properties and physical conditions of organic substrates influence the plant phenotype of lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 11, 601455. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601455

Olkova, A. (2022). Advantages of using peat gel to reduce the toxicity of soils polluted with oil products. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), 3481-3490. https://doi.org/10.1007/s13762-022-03971-w

Park, M. S., Kim, H. C., An, S., Lee, C. W., & Choi, J. M. (2021). Influence of pre-plant root substrate nitrogen levels on growth of selected fruit bearing vegetable seedlings in cylindrical paper pots. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 62, 367-375. https://doi.org/10.1007/s13580-020-00327-6

Pirzad, A., Shakiba, M. R., Zehtab-Salmasi, S., Mohammadi, S. A., Darvishzadeh, R., & Samadi, A. (2011). Effect of water stress on leaf relative water content, chlorophyll, proline and soluble carbohydrates in *Matricaria chamomilla* L. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(12), 2483-2488 .

Pourkhaloee, A., Khosh-Khui, M., & Barba-Gonzalez, R. (2023). Somatic embryogenesis of tuberose (*Agave amica* L.) was improved by milk as a potential biostimulant in plant tissue culture. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 10(3), 257-268. https://doi.org/10.22059/ijhst.2022.330660.504

Prisa, D., & Caro, S. (2023). Alternative substrates in the cultivation of ornamental and vegetable plants. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 24(1), 209-220. https://doi.org/10.30574/gscbps.2023.24.1.0268

Qi, H., Zhang, S., Song, C., Sun, Z., & Zhai, X. (2009). Effects of different substrates and watering modes on physicochemical properties of substrate and ornamental quality of *Euphorbia pulcherrima*. *Journal of Plant Resources and Environment*, 18(3), 74-80.

Ren, M., Li, Y., Zhu, J., Zhao, K., Wu, Z., & Mao, C. (2023). Phenotypes and molecular mechanisms underlying the root response to phosphate deprivation in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5107. https://doi.org/10.3390/ijms24065107v

Shaban, A. S., Safhi, F. A., Fakhr, M. A., Pruthi, R., Abozahra, M. S., El-Tahan, A. M., & Subudhi, P. K. (2023). Comparison of the morpho-physiological and molecular responses to salinity and alkalinity stresses in rice. *Plants*, 13(1), 60.