Journal of Research in Horticultural Science
پژوهش در علوم باغبانی
Vol. 5, No. 1 Spring and Summer 2026 (121–132)
جلد ۵، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۵ (ص ۱۳۲-۱۲۱)
10.22092/rhsj.2025.368778.1154
مقاله علمی پژوهشی
تارنمای مجله: https://rhsj.areeo.ac.ir

تأثیر بستر کاشت لایه‌ای با الگوی ساختار شبه‌گلدانی بر هیدرولیک خاک، ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک و رشد نهال انار در شرایط اقلیم خشک

محمد رضا وظیفه شناس[۱]، اعظم رضوی نسب[۲*]، فرح امامی نائینی[۳]

۱- استادیار، بخش باغبانی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، ایران، یزد.
۲- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، ایران، یزد.
۳- محقق بخش خصوصی، ایران، یزد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۲۰

چکیده

بحران خشکسالی، بازنگری در الگوهای سنتی باغداری را الزامی کرده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی الگوی کاشت شبه‌گلدانی همراه با غنی‌سازی خاک اجرا گردید. این پژوهش طی ۲۴ ماه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار (شامل T1: شاهد/کاشت سنتی، T2: چاله سنتی + کود دامی خام، T3: چاله با لایه سلولزی خام، T4: چاله شبه‌گلدانی با لایه سلولزی + هوموس، و T5: چاله شبه‌گلدانی زیستی: چهارگانه سلولزی-هوموسی-بیوچار + مایه‌زنی میکوریزا و ازتوباکتر) و سه تکرار بر روی نهال‌های انار در یزد اجرا گردید. رطوبت حجمی خاک، شاخص‌های اکوفیزیولوژیک، ویژگی‌های مورفولوژیک و حجم ریشه‌های موئین ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که تیمار (T5) به دلیل مهار جریان غیراشباع و قطع خطوط موئینگی، فواصل آبیاری را از هفت به ۳۰ روز افزایش داد. بیشترین مقادیر شاخص‌های فیزیولوژیک شامل هدایت روزنه‌ای، محتوای نسبی آب برگ، قطر طوقه و طول شاخه‌های جانبی به ترتیب با مقادیر ۳۴۰ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه، ۷/۸۸ درصد، ۸/۱۲ میلی‌متر و ۱/۵۴ سانتی‌متر در تیمار T5 ثبت شد که نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری داشتند. همچنین، حجم ریشه‌های موئین فعال ۸/۳ برابر افزایش یافت. از نظر فنولوژی، این تیمار منجر به ۵/۸ روز تعجیل در بیداری بهاره گردید که در مناطق با ریسک سرمای دیررس بهاره، توجه به تمهیدات حفاظتی متمم توصیه می‌شود. این الگو با تحقق اصول کشاورزی حفاظتی خاک و همچنین ترسیب موضعی کربن آلی پایدار (تثبیت ۳۰ کیلوگرم ترکیبات سلولزی-بیوچار در عمق خاک)، راهکاری کاملاً اقتصادی و پایدار برای مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: بحران آب، غنی‌سازی زیستی، کاشت شبه‌گلدانی، کشاورزی حفاظتی، نگه‌داشت رطوبت.

The Effect of a Layered Planting Bed with a Quasi-Pot Structural Pattern on Soil Hydraulics, Ecophysiological Characteristics, and Pomegranate Seedling Growth under Arid Climatic Conditions

Mohammad Reza VazifehShenas[1], Azam Razavi Nasab[2]*, Farah Emami Naeini[3]

1- Assistant Professor, Horticulture Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran.
2- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran.
3- Private sector researcher Yazd, Iran.

Received: August 2026 Accepted: November 2026

Abstract

The drought crisis has necessitated a re-evaluation of traditional orchard management practices. This study was conducted to evaluate the efficacy of a "quasi-pot" planting model combined with soil enrichment. Over a 24-month period, an experiment was carried out on pomegranate saplings in Yazd using a randomized complete block design with five treatments and three replications. The treatments included: T1 (control/traditional planting); T2 (traditional planting pit + raw animal manure); T3 (planting pit with a raw cellulosic layer); T4 (quasi-pot planting pit with a cellulosic layer + humus); and T5 (a bio-quasi-pot pit: a cellulosic-humus-biochar combination inoculated with mycorrhiza fungi and Azotobacter). Soil volumetric moisture, ecophysiological indices, morphological characteristics, and the volume of fine (hair) roots were assessed. The results indicated that treatment T5 extended the irrigation interval from 7 days to 30 days by inhibiting unsaturated water flow and disrupting capillary pathways. The highest values for physiological indicators, including stomatal conductance (340 mmol m^{-2} s^{-1}), leaf relative water content (88.7%), root collar diameter (12.8 mm), and lateral branch length (54.1 cm) were recorded in treatment T5, representing significant increase compared to the control. Furthermore, the volume of active fine roots increased 3.8-fold. In terms of phenology, this treatment resulted in an advancement of spring awakening by 8.5 days; therefore, in regions prone to the risk of late-spring frosts, the implementation of supplementary protective measures is recommended. By adhering to the principles of conservation agriculture specifically through the localized sequestration of stable organic carbon (achieved by incorporating 30 kg of cellulose-biochar compounds into the soil profile) this approach offers a highly economical and sustainable strategy for addressing the consequences of climate change.

Keywords: Biological enrichment, Conservation agriculture, Moisture retention, Quasi-pot planting, Water crisis.

*نویسنده مسئول: a.razavinasab@areeo.ac.ir

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی جهانی و خشکسالی‌های ساختاری فراگیر، استان یزد را به عنوان یکی از خشک‌ترین مناطق فلات مرکزی ایران با بحران بی‌سابقه «ورشکستگی هیدرولیکی» مواجه کرده است (زارعیان و همکاران، ۱۴۰۲؛ زارع چاهوکی و همکاران، ۱۴۰۱). استان یزد با میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۶۰ میلی‌متر و نرخ تبخیر پتانسیل سالانه بیش از ۳۵۰۰ میلی‌متر، شدیدترین شرایط اقلیمی اریدیک و هایپرترمیک را تجربه می‌کند (زارعیان و همکاران، ۱۴۰۲). حفر چاه‌های عمیق و برداشت بی‌رویه طی چهار دهه گذشته، تراز سفره‌های آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان را با افت سالانه بیش از ۵۰ سانتی‌متر و شور شدن تصاعدی آب استحصالی (افزایش EC به بالای ۱۰،۰۰۰ دسی‌زیمنس بر متر) مواجه کرده است (شکرخدایی، ۱۴۰۲). از سوی دیگر، استان یزد یکی از قطب‌های اصلی تولید انار (*Punica granatum* L.) در کشور محسوب می‌شود؛ اما افت شدید کمی و کیفی منابع آب و خاک، استقرار، رشد رویشی و پایداری باغ‌های انار منطقه را با تهدید جدی مواجه ساخته است (زارع چاهوکی و همکاران، ۱۴۰۱). از این رو، بازنگری در الگوهای سنتی کاشت و ابداع روش‌های نوآورانه برای مدیریت موضعی آب در ناحیه ریشه این محصول ارزشمند، ضرورتی حیاتی است. یکی از موانع اصلی در تثبیت زیستی خاک و توسعه باغ‌ها در مناطق خشک، فقر مفرط خاک‌های این مناطق از نظر کربن آلی است (Guati and Kukal, 2026). میزان ماده آلی خاک در بیش از ۸۰ درصد از اراضی فلات مرکزی ایران، کمتر از نیم درصد گزارش شده است؛ در حالی که مرز بهینه برای یک خاک زنده و نفوذپذیر بین دو تا سه درصد است. این کمبود شدید فیزیکی و زیستی، تبعات زیر را به همراه دارد:

تراکم ساختاری و سخت‌لایه (Hardpan): خاک‌های با بافت سنگین (رسی) یا سدیمی (سدیک)، فاقد خاکدانه‌های پایدار بوده و پس از اولین آبیاری دچار سله‌بندی شدید و متراکم می‌شوند. این پدیده مانع از نفوذ اکسیژن به منطقه ریشه شده و شرایط بی‌هوازی کاذب ایجاد می‌کند (Zhou *et al.*, 2025).

نرخ نفوذ ناچیز و فرسایش خاک: به دلیل عدم وجود کمپلکس‌های هوموسی و موادآلی در ساختار خاک، آب حاصل از بارندگی‌های سیل‌آسا یا آبیاری‌های غرقابی فرصت نفوذ عمودی پیدا نکرده و به سرعت به صورت روان‌آب سطحی خارج شده یا تبخیر می‌گردد (Carbonell *et al.*, 2024). نرخ فرسایش خاک در ایران اکنون به حدود ۱۵ تا ۱۶ تن در هکتار در سال رسیده که چندین برابر استانداردهای جهانی است.

اتلاف نهاده‌ها در روش چاله کودی سنتی: در روش‌های مرسوم باغبانی، کشاورزان اقدام به حفر چاله‌های بزرگ و پر کردن آن‌ها با مخلوطی از کود دامی خام و خاک محل می‌کنند. در روش سنتی، اگرچه استفاده از کود دامی پوسیده توصیه می‌گردد، اما در عمل کاربرد کودهای فرآوری‌نشده یا نیمه‌پوسیده به دلیل نسبت بالا و متغیر C/N ، منجر به آزادزیستی حرارت و رقابت نیتروژنی در فاز اولیه تجزیه شده و می‌تواند به ریشه‌های موئین آسیب برساند (Zhou *et al.*, 2025). علاوه بر این، کود دامی پوسیده به تنهایی فاقد ساختار متخلخل و پایدار بیوچار و کارکردهای هم‌افزای پروبیوتیک‌های مفید جهت ارتقای هیدرولیک ریزوسفر در شرایط تنش شوری و خشکی است. علاوه بر این، سرعت بالای آب‌شویی عناصر غذایی (به‌ویژه نیترات و پتاسیم) در خاک‌های سبک، این عناصر را از دسترس ریشه خارج کرده و به لایه‌های زیرین هدایت می‌کند.

با توجه به نارسایی‌های فوق، طراحی بستر کاشت که بتواند نقش یک «میکرو-مخزن هیدرولیکی هوشمند» را در اطراف ریشه ایفا کند، حیاتی است (EGU, 2025; Smith *et al.*, 2024). طرح کاشت شبه‌گلدانی نه به عنوان یک تغییر ساده در فرم حفر چاله، بلکه به عنوان یک مهندسی مجدد بیوفیزیکی و میکروزیستی در محیط ریزوسفر مطرح است (Fouad *et al.*, 2024). این سیستم با ایجاد مرزهای هدایت هیدرولیکی متمایز و استفاده از ترکیبات سلولزی و هوموسی فرآوری‌شده، رفتار هیدرولیکی خاک را تغییر داده و پایداری بلندمدت نهال را در برابر تنش‌های شدید حرارتی و رطوبتی تضمین می‌نماید.

فناوری‌های مدیریت موضعی خاک و بهینه‌سازی ماندگاری آب در ناحیه ریشه، در سال‌های اخیر با ورود

ابزارهای دقیق اندازه‌گیری رطوبت، مدل‌سازی هیدرولیکی و مهندسی میکروبیوم ریزوسفر وارد فاز جدیدی شده است. در یک مطالعه بنیادین، اسمیت و همکاران، (Smith *et al.*, 2024) به بررسی رفتار هیدرولیکی مواد سلولزی دیرتجزیه در لایه‌های زیرسطحی خاک‌های مناطق خشک پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مدفون کردن ساختاریافته مواد گیاهی لیگنوسلولزی در عمق ۴۰ تا ۷۰ سانتی‌متری خاک، به دلیل ساختار متخلخل داخلی این مواد، ظرفیت نگه‌داشت آب اشباع را تا ۱۲۰ درصد بهبود می‌بخشد. این محققان اثبات کردند که این مواد همانند یک پمپ اسمزی معکوس، در زمان اشباع بستر، آب را جذب کرده و در زمان افزایش تنش ماتریکی خاک، آن را به آرامی به محیط اطراف ریشه (ریزوسفر) پس می‌دهند. در همین راستا، کاربونل و همکاران، (Carbonell *et al.*, 2024) با به کارگیری فناوری تصاویر رادیوگرافی نوترونی جهت ردیابی حرکت آب در نیمرخ خاک، نشان دادند که ایجاد یک سد اندامیک آلی در کف چاله کاشت، خطوط جریان عمودی را مهار کرده و هدایت هیدرولیکی غیراشباع را به شدت کاهش می‌دهد. این فرایند باعث می‌شود که آب ترشح‌شده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، به جای حرکت برداری مستقیم به سمت لایه‌های زیرین به صورت جانبی و موئینه در ناحیه افقی ریشه پخش شود. همچنین پژوهش جامع گولاتی و کوکال (Gulati and kukal, 2026) در خصوص ارزیابی اثر افزودن کربن بر نگه‌داشت رطوبت خاک اثبات کرد که افزایش صرف ماده آلی سطحی تأثیر بسیار محدودی (کمتر از شش درصد) بر نگه‌داشت رطوبت دارد؛ اما متمرکز کردن آن به صورت اصلاح‌کننده‌های زیستی متراکم در زیر منطقه ریشه، رفتار هیدرولیکی متفاوتی ایجاد کرده و راندمان آبیاری را به طور چشمگیری ارتقا می‌دهد.

تحقیقات گسترده زو و همکاران (Zhou *et al.*, 2025) بر روی پویایی کربن و نیتروژن در سیستم‌های اصلاح موضعی خاک، ابعاد جدیدی از مضرات روش‌های کودی سنتی را آشکار ساخت. این پژوهشگران نشان دادند که تزریق کودهای دامی فرآوری‌نشده با شاخص C/N پایین (کمتر از ۱۵)، منجر به انفجار جمعیت باکتری‌های هتروتروف زودهنگام می‌شود. این باکتری‌ها در فرآیند تنفس شدید خود، اکسیژن محلول در ریزوم‌های چاله را مصرف کرده و پتانسیل اکسیداسیون-احیای خاک را به زیر منفی ۱۰۰ میلی‌ولت کاهش می‌دهند.

در مقابل، مطالعات مروری و تجربی فواد و همکاران (Fouad *et al.*, 2026) و چن و همکاران (Chen *et al.*, 2025) نشان می‌دهند که مهندسی میکروبیوم ریزوسفر با استفاده از باکتری‌های محرک رشد (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR) و قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا (Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)، تحت شرایط تنش شور و خشک، تولید اگزوپلی‌ساکاریدها و بیوفیلم‌های محافظ را افزایش می‌دهد. این میکروارگانیسم‌های میکروسکوپی نه تنها ساختار خاکدانه‌ها را تثبیت می‌کنند، بلکه جذب عناصر کم‌مصرف آهن و روی را از طریق کلات‌سازی طبیعی در بازه ۳۶ ماهه تسهیل می‌نمایند. فناوری نگه‌داشت آب زیرسطحی (Subsurface Water Retention Technology, SWRT) که ابتدا توسط تیم تحقیقاتی دانشگاه ایالتی میشیگان با غشاهای پلیمری توسعه یافته بود، در پژوهش‌های اخیر سال ۲۰۲۵ وارد فاز کاربردی نوین شده است (Guber *et al.*, 2015). پژوهشگران در اجلاس زمین‌پژوهی اروپا (EGU, 2025) با ارزیابی مدل‌سازی دو بعدی هایدروس (HYDRUS-2D) نشان دادند که به‌کارگیری فناوری سامانه‌های نگه‌داشت آب زیرسطحی یا لایه‌های جایگزین زیست‌تخریب‌پذیر در عمق زیرین ریشه نهال‌های درختان خشکی‌پسند، تلفات آب حاصل از نفوذ عمقی را تا ۸۵ درصد کاهش داده و شانس بقای نهال‌ها در شرایط خشکسالی حاد را دو برابر می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در یک باغ خصوصی در شهر زارچ، روستای چرخاب رضوی در ۲۰ کیلومتری شهرستان یزد با طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی که میانگین بارش سالانه حدود ۹۵ تا ۱۱۰ میلی‌متر و میانگین تبخیر سالانه ۳۵۰۰ میلی‌متر است، بر روی نهال‌های انار اجرا گردید. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه.

ویژگی	EC خاک (dSm^{-1})	pH خاک	کربن آلی (٪)	چگالی ظاهری (gcm^{-3})	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	بافت خاک
مقدار	۶/۸	۸/۲	۰/۲۸	۱/۶۲	۳۸	۳۴	۲۸	لوم رسی

تحقیق حاضر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و پنج تیمار و در ۱۵ ردیف در یک بازه زمانی ۲۴ ماهه عملیاتی گردید.

T1: شاهد (کاشت سنتی، چاله معمولی بدون اصلاح‌کننده)

T2: چاله سنتی + کود دامی خام (روش مرسوم چالکود)

T3: چاله با لایه سلولزی خام بدون مایه‌زنی زیستی

T4: چاله شبه‌گلدانی با لایه‌بندی سلولزی + هوموس (بدون بیوچار و میکوریزا)

T5: چاله شبه‌گلدانی زیستی (چاله کامل شبه‌گلدانی، لایه‌بندی ۴ گانه + هوموس + بیوچار + مایه‌زنی میکوریزا و ازتوباکتر).

مهندسی چاله شبه‌گلدانی (تیمار ۵) بر اساس مراحل زیر به صورت دقیق پیاده‌سازی شد (اطلاق واژه "شبه‌گلدانی" به این الگوی کاشت، به دلیل ایجاد یک محیط هیدرولیکی ایزوله و مستقل در داخل چاله است؛ به‌طوری‌که لایه‌بندی آلی سلولزی و زهکش سفلی با قطع پیوستگی خطوط موئینگی خاک پیرامون، رفتاری مشابه دیواره‌های یک گلدان فیزیکی در مهار خروج آب به خاک اطراف و کنترل تبخیر ایفا می‌کنند).

چاله‌های کاشت با استفاده از مته‌های پشت‌تراکتوری به قطر ۸۰ سانتی‌متر و عمق ۱۰۰ سانتی‌متر حفر شدند. ابعاد بزرگ چاله به این دلیل انتخاب شد تا فضای کافی برای ایجاد لایه‌های هیدرولیکی فراهم آید. پس از حفر، دیواره‌های چاله که توسط حرکت چرخشی مته دچار حالت صیقلی و متراکم شده بودند، توسط تیشه‌های دستی خراش داده شدند تا منافذ جانبی خاک باز شده و ارتباط هیدرولیکی چاله با خاک پیرامون قطع نگردد.

۲-۱- لایه‌بندی سیستماتیک و عملکرد فیزیکی هر لایه

لایه اول: فیلتر نفوذپذیر و زهکش پایینی (عمق ۹۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر): در قعر چاله، لایه‌ای به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر شامل سنگریزه‌های رودخانه‌ای شسته شده با قطر دو تا پنج سانتی‌متر همراه با مخلوطی از ماسه بادی قرار داده شد. وظیفه این لایه، ایجاد یک گسست اساسی در لوله‌های موئین خاک زیرین است تا از بالا آمدن شوری و نمک‌های محلول سفره‌های زیرزمینی به داخل چاله در اثر تبخیر شدید جلوگیری کند.

لایه دوم: میکرو-مخزن سلولزی اسفنجی (عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر): این لایه کلیدی‌ترین بخش ساختار شبه‌گلدانی است. در این منطقه، مقدار ۳۰ کیلوگرم از بقایای سلولزی خردشده شامل کاه گندم، باگاس نیشکر و سرشاخه‌های خردشده درختان، لایه‌ای که به مدت سه ماه در معرض تابش مستقیم خورشید و فرآیند اولیه اشباع با آب قرار گرفته بودند، به صورت فشرده (با چگالی ظاهری حدود ۰/۴گرم بر سانتی‌متر مکعب) مستقر شدند. این لایه توانایی دارد در زمان آبیاری، تا چهار برابر وزن خشک خود آب ذخیره کند.

لایه سوم: منطقه زیستی ریزوسفر (عمق ۱۰ تا ۶۰ سانتی‌متر): این بخش بستر اصلی استقرار ریشه نهال است. ترکیب این لایه شامل ۶۰ درصد خاک لومی-شنی (بافت متوسط)، ۳۰ درصد هوموس فرآوری‌شده صنعتی (دارای تأییدیه استاندارد با اسید هومیک بالای ۱۵ درصد) و ۱۰ درصد بیوچار حاصل از پیرولیز بقایای گیاهی بود. بیوچار به دلیل سطح ویژه بسیار بالا (بیش از ۲۰۰ گرم بر سانتیمتر مکعب)، به عنوان یک زیستگاه پایدار برای ریزجانداران مفید خاکزی عمل می‌کند.

لایه چهارم: مالچ اتمسفری سطحی (عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر): پس از غرس نهال و پر کردن چاله، سطح فوقانی چاله با لایه‌ای از پوست درختان خردشده و تراشه‌های چوب به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر پوشانده شد. این لایه ارتباط مستقیم خاک با جریان‌های هوایی گرم و تابش فرابنفش را قطع کرده و نرخ تبخیر سطحی را تا ۹۵ درصد کاهش می‌دهد.

در این طرح، هرگونه استفاده از کودهای شیمیایی فسفردار و نیتروژن‌دار متداول حذف گردید. به جای آن، از تکنیک غنی‌سازی زیستی با استفاده از قارچ‌های میکوریزا (*Glomus intraradices*) و باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن (*Azotobacter chroococcum*) استفاده شد. ریشه نهال‌ها قبل از کاشت در دوغابی از این ترکیبات زیستی غوطه‌ور گردید. قارچ میکوریزا با ایجاد شبکه گسترده‌ای از ریسه‌ها، سطح جذب ریشه را تا ۱۰۰ برابر افزایش داده و دسترسی گیاه به فسفر تثبیت‌شده و آب در مکش‌های بالا را میسر می‌سازد. نهال‌ها در این گودال‌ها کاشته شد.

۲-۲- ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری

رطوبت حجمی خاک توسط دستگاه TDR در دو عمق ۴۰ و ۷۰ سانتی‌متری چاله‌ها، به صورت دوره‌ای در فواصل مشخص (شامل بلافاصله قبل از هر آبیاری، ۲۴ ساعت پس از آبیاری جهت ثبت ظرفیت مزرعه، و سپس هر سه روز یک‌بار طی دوره‌های عدم آبیاری ۳۰ روزه) در طول ۲۴ ماه اجرای طرح اندازه‌گیری و ثبت گردید.

هدایت روزنه‌ایی (g_s) ($mmol\ m^{-2}s^{-1}$) به‌روش هدایت روزنه‌ای برگ در میان‌روز (ساعت ۱۱ الی ۱۳) بر روی برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته و آفتاب‌گیر، با استفاده از دستگاه پرومتر (Stomatal Porometer) مدل (AP4 Delta-T Devices, UK) اندازه‌گیری شد.

محتوی نسبی آب برگ RWC%) Relative Water Content) طبق روش Weatherley (1950) اندازه‌گیری شد. دیسک‌های برگی تازه بلافاصله وزن شدند (FW) سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر و دمای چهار درجه سانتی‌گراد در تاریکی قرار گرفتند تا به تورژانس کامل برسند و وزن تورژانس (TW) ثبت شد. در نهایت، دیسک‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و وزن خشک (DW) اندازه‌گیری شد. مقدار RWC با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$RWC\ (\%) = (FW - DW/TW - DW) * 100$$

قطر یقه نهال (mm)، طول شاخه‌های جانبی (cm)، تراکم و طول پاجوش‌های فعال با کولیس و خط‌کش و نرخ بیداری بهاره (تعجیل به روز) ثبت گردید.

۳- نتایج و بحث

داده‌های حاصل از پایش ۲۴ ماهه نهال‌های تیمارشده با روش شبه‌گلدانی در مقایسه با روش کاشت سنتی (شاهد)، به کمک نرم افزار آماری SAS آنالیز آماری شد و سپس میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه گردید.

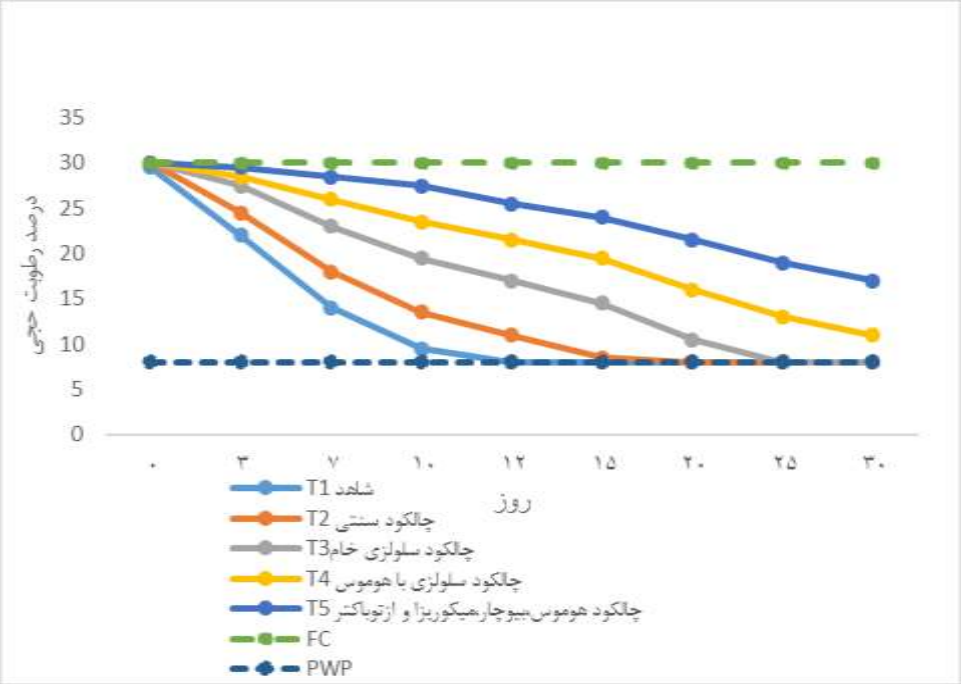
جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های اندازه گیری شده.

منابع تغییرات SOV		میانگین مربعات					
	درجه آزادی	هدایت روزنه‌ای $cmday^{-1}$	محتوای نسبی آب (٪)	قطر یقه نهال (mm)	طول شاخه‌های جانبی	تراکم و طول پاجوش‌های فعال	نرخ بیداری بهاره (تعجیل به روز)
بلوک (تکرار)	۲	۱۲۴ns	۱۲/۳ns	۰/۴۵ns	۲/۱۵ns	۰/۰۸ns	۰/۳۲ns
تیمار (روش کاشت)	۴	۳۴۵۲۰**	۴۱۲**	۴۸/۲۵**	۸۲۶**	۱۱/۸۵*	۴۲/۶**
خطا	۸	۳۱۵	۶/۴۵	۰/۶۲	۵/۴	۰/۱۴	۰/۴۵
ضریب تغییرات CV%	=	۷/۴	۳/۳	۵/۸	۴/۲	۸/۱	۶/۵

ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار آماری . * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد. ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

۳-۱- دینامیک رطوبت خاک و شاخص‌های هیدرولوژیک

اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط سنسورهای رطوبت‌سنج TDR (Time-Domain Reflectometry) مستقر در عمق ۴۰ و ۷۰ سانتی‌متری چاله‌ها نشان داد که منحنی مشخصه رطوبتی خاک در تیمار شبه‌گلدانی رفتار کاملاً متمایزی دارد. در روش سنتی (شاهد)، رطوبت حجمی خاک ظرف مدت ۱۰ تا ۱۲ روز از ظرفیت زراعی (FC = 30%) به محدوده آستانه نقطه پژمردگی دائم (PWP = 8%) افت کرده و پتانسیل مکش خاک به حدود ۱/۵- مگاپاسکال نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده لزوم آبیاری مجدد در دورهای کوتاه (۷ تا ۱۰ روزه) جهت جلوگیری از بروز تنش است. در مقابل، در سیستم شبه‌گلدانی (T5)، به دلیل ساختار متخلخل بستر و آزادسازی تدریجی آب از مخزن سلولزی لایه زیرین، رطوبت حجمی خاک تا روز ۳۰ همچنان در محدوده ایمن و قابل دسترس برای گیاه (بالاتر از ۱۷ درصد، معادل پتانسیل مکش بین ۰/۰۳ تا ۰/۱ مگاپاسکال) باقی می‌ماند. این رفتار هیدرولیکی بستر اجازه داد تا فواصل آبیاری از هفت روز به ۳۰ روز افزایش یابد بدون آنکه ریشه گیاه وارد آستانه تنش خشکی گردد.



شکل ۱- تغییرات درصدی رطوبت حجمی خاک در طول یک دوره ۳۰ روزه عدم آبیاری برای ۵ تیمار مختلف.

بررسی منحنی‌های پایش رطوبت حجمی خاک طی ۳۰ روز دوره عدم آبیاری (شکل ۱) تفاوت ساختاری و معنی‌داری را در رفتار هیدرولیکی بسترهای مختلف نشان داد. در تیمار شاهد (T1 کاشت سنتی)، افت رطوبت با شیب بسیار تندی رخ داد؛ به طوری که رطوبت خاک از ۳۰ درصد (ظرفیت زراعی) تنها طی ۱۰ روز به ۹/۵ درصد رسید و در روز دوازدهم کاملاً به آستانه نقطه پژمردگی دائم (PWP = 8%) سقوط کرد. این تخلیه سریع رطوبت نشان‌دهنده فعالیت بی‌واسطه «پمپ تبخیر خاک» در اراضی خشک است که طی آن پیوستگی خطوط موئینگی، آب را مستقیماً از اعماق به سطح گسیل داشته و تبخیر می‌سازد.

در مقابل، پایش ۳۰ روزه در تیمار شبه‌گلدانی زیستی (T5) نشان داد که رطوبت خاک تا روز ۳۰ همچنان در محدوده ایمن ۱۷ درصد (بسیار بالاتر از آستانه PWP = 8%) باقی می‌ماند. این نگه‌داشت ماندگار رطوبت در بستر T5حاصل سه مکانیسم هیدرولیکی هم‌افزا در چاله کاشت است:

۱- **گسست موئینگی و مهار تبخیر سطحی:** لایه‌بندی سیستماتیک و ایجاد سد آلی-سلولزی در زیر سطح، پیوستگی لوله‌های موئینگی عمودی به سمت سطح را قطع کرده است. این امر بر اساس یافته‌های کادر و همکاران (Kader *et al.*, 2017) هدایت هیدرولیکی غیراشباع به سمت اتمسفر را مهار کرده و از خروج آب به صورت بخار جلوگیری می‌کند.

۲- **افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب توسط ترکیب بیوچار و ماده آلی:** تلفیق اصلاح‌کننده‌های زیستی (بیوچار و هوموس) در اعماق چاله کاشت T5، ساختار تخلخل خاک را بهبود بخشیده است. طبق بررسی جامعی که بالانکو-کانکویی Blanco-Canqui (2017) روی ویژگی‌های فیزیکی خاک انجام داد، افزودن بیوچار با ایجاد ریزتخلخل‌های متراکم و افزایش سطح ویژه، ظرفیت نگهداشت آب قابل دسترس (AWC) را بین چهار تا ۱۳۰ درصد ارتقا می‌دهد و آب را با پتانسیل مکش مناسب در دسترس ریشه نگه می‌دارد.

۳- **کاهش تلفات نفوذ عمقی (مطابق با الگوی SWRT):** تثبیت رطوبت حجمی در بازه ۱۷ تا ۳۰ درصد طی ۳۰ روز عدم آبیاری، ناشی از کاهش نفوذ عمودی آب به اعماق خارج از دسترس ریشه است. این رفتار هیدرولیکی با اصول فناوری سامانه‌های نگه‌داشت آب زیرسطحی (SWRT) مطابقت دارد که طبق تحقیقات سوبرتو و همکاران (Guber *et al.*, 2015) با ایجاد مرزهای ناپیوستگی در زیر ناحیه ریشه، نفوذ عمقی را مهار کرده و بازده مصرف آب را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌دهد.

در مجموع، داده‌های شکل ۱ اثبات می‌کند که بستر شبه‌گلدانی (T5) توانسته است با قطع «پمپ تبخیر» و مهار «زهکشی عمقی»، فواصل آبیاری را از هفت روز به ۳۰ روز تمدید نماید، بدون آنکه گیاه وارد محدوده تنش PWP گردد.

۴-۱- ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک نهال

جدول ۳- تغییرات شاخص‌های رشد رویشی ثبت‌شده در تیمارهای مختلف در پایان سال دوم پژوهش.

ویژگی/تیمارها	شاهد (چاله سنتی) T1	چاله سنتی + کود دامی خام T2	چاله با لایه سلولزی خام T3	چاله با لایه سلولزی + هوموس T4	چاله با لایه سلولزی + هوموس + بیوچار+ میکوریزا + ازتوباکتر T5	سطح معنی‌داری
هدایت روزنه‌ایی	۱۲۰/۵_+۸/۲^{e}	۱۴۵/۲_+۹/۱^{d}	۱۵۸_+۱۱/۴^{c}	۲۷۵/۴_+۱۴/۲^{b}	۳۴۰/۲_+۱۴/۵^{a}	P<0.01
محتوی آب نسبی برگ	۶۲/۴_+۴/۱^{d}	۶۶/۸_+۳/۵^{d}	۷۱/۲_+۳/۸^{c}	۸۰/۵_+۲/۹^{b}	۸۸/۷_+۳/۲^{a}	P<0.01
افزایش قطر یقه نهال	۴/۲_+۰/۵^{e}	۵/۸_+۰/۶^{d}	۷/۱_+۰/۷^{c}	۹/۹_+۰/۸^{b}	۱۲/۸_+۱/۱^{a}	P<0.005
طول شاخه‌های جانبی جدید	۱۸/۵_+۲/۳^{e}	۲۳/۱_+۲/۸^{d}	۲۹/۴_+۳/۱^{c}	۴۱_+۳/۵^{b}	۵۴/۱_+۳/۸^{a}	P<0.01
تراکم و طول پاجوش‌های فعال	کمتر از ۱	۱/۲_+۰/۲^{c}	۲/۱_+۰/۴^{b}	۳/۵_+۰/۵^{a}	۴/۵_+۰/۵^{a}	P<0.05
نرخ بیداری بهاره (تعجیل به روز)	۰^{d}	۱/۵_+۰/۵^{c}	۳_+۰/۸^{c}	۶/۲_+۱/۱^{b}	۸/۵_+۲/۲^{a}	P<0.01

در هر ردیف میانگین‌های ثبت شده با حروف مشترک، در سطح پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.

بررسی داده‌های فنولوژیک (جدول ۳) نشان داد که استفاده از بستر شبه‌گلدانی اصلاح‌شده (T5) موجب تعجیل در بیداری بهاره و تسریع در شروع فعالیت جوانه‌ها شده است. با این حال، از منظر اکوفیزیولوژی درختان میوه، تعجیل در بیداری بهاره یک تیغ دو لبه است؛ در اقلیم‌هایی که مواجهه با خطرات سرمای دیررس بهاره محتمل است، شکست زودهنگام خواب جوانه می‌تواند آسیب‌پذیری بافت‌های زاینده و گل‌ها را در برابر جبهه‌های هوای سرد به شدت افزایش داده و منجر به افت شدید محصول گردد.

با این وجود، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در بستر T5 به دلیل وجود لایه سلولزی و مالچ سطحی، خاک از یک «عایق حرارتی» بهره‌مند شده که نوسانات شدید دمای روزانه

خاک را تعدیل می‌کند. این لایه‌بندی محافظتی با جلوگیری از گرم شدن ناگهانی و کاذب منطقه ریشه در اواخر زمستان، از بیداری بسیار زودهنگام و غیرکنترل‌شده جلوگیری کرده و بیداری تدریجی و هماهنگ را به همراه دارد. به نظر می‌رسد تعجیل اندک مشاهده شده در این بستر، حاصل بهبود وضعیت هورمونی (افزایش نسبت سیتوکینین به اسید آبسیزیک) و تغذیه‌ای ریشه باشد، نه صرفاً پاسخ دمایی به محیط. با این حال، توصیه می‌شود در مناطقی با سابقه سرمای دیررس بهاره، مدیریت این بسترها با راهکارهای موازی کاهش ریسک سرمازدگی همراه گردد.

تحلیل بافت‌شناسی ریشه‌ها نشان داد که حجم ریشه‌های موئین فعال (قطر کمتر از دو میلی‌متر) در تیمار شبه‌گلدانی ۳/۸ برابر تیمار شاهد بوده است. این توسعه خیره‌کننده به دلیل تخلخل تهویه‌ای بهینه در لایه میانی چاله است که اکسیژن‌رسانی به میتوکندری‌های سلول‌های ریشه را جهت تنفس سلولی و جذب فعال عناصر تسهیل کرده است. موفقیت چشمگیر الگوی کاشت شبه‌گلدانی را نمی‌توان صرفاً به ذخیره‌سازی فیزیکی آب تقلیل داد، بلکه این فرآیند سیستمی متشکل از چند سازوکار هم‌افزا در حوزه‌های فیزیک، شیمی و میکروبیولوژی خاک است. از جمله:

مکانیسم هیدرولیکی گسست موئینگی و اثر گلدانی: در خاک‌های همگن فلات مرکزی، پس از آبیاری، به دلیل وجود لوله‌های موئینگی پیوسته، آب از طریق پیوندهای هیدروژنی و مکش ماتریکس به سمت سطح حرکت کرده و در اثر حرارت بالای اتمسفر تبخیر می‌شود. این پدیده به عنوان «پمپ تبخیر خاک» شناخته می‌شود که نه تنها آب را تلف می‌کند، بلکه نمک‌های لایه‌های زیرین را نیز به سطح آورده و پدیده شوری سطحی را تشدید می‌نماید. چاله شبه‌گلدانی با ایجاد یک مرز ناپیوستگی بافت بین داخل چاله و خاک اطراف، عملکردی شبیه به یک گلدان فیزیکی ایفا می‌کند. لایه فیلتر زیرین و دیواره‌های اصلاح‌شده با مواد آلی، سد بزرگی در برابر مکش ماتریکس خاک اطراف ایجاد می‌کنند (Carbonell *et al*., 2024; Smith *et al*., 2024). بر اساس قانون دارسی در محیط‌های غیراشباع زمانی که هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک اطراف به دلیل خشکی کاهش می‌یابد، جریان آب از داخل چاله پررطوبت به خارج به شدت مهار می‌شود (Carbonell *et al*., 2024). این رفتار هیدرولیکی تطابق کاملی با نتایج مدل‌سازی‌های HYDRUS-2D در سامانه‌های نگه‌داشت آب زیرسطحی (SWRT) دارد که نشان می‌دهند کنترل نفوذ عمقی، راندمان مصرف آب را تا حد شگفت‌انگیزی ارتقا می‌دهد (EGU, 2025). به عبارتی، آب درون چاله قفل شده و تنها مفر خروج آن، مسیر ترشح از طریق آوندهای چوبی ریشه نهال (تعرق) خواهد بود که این امر راندمان مصرف آب را به بالاترین سطح ممکن می‌رساند.

نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، اثرات بیوشیمیایی و پایداری هوموسی: یکی از چالش‌های اصلی استفاده از بقایای سلولزی خام در خاک، پدیده قفل شدن یا غیر متحرک شدن نیتروژن و کاهش شدید پتانسیل اکسیداسیون-احیا (Eh) در اثر تنش میکروبی است (Zhou *et al*., 2025). در این طرح، جهت جلوگیری از بحران تخلیه اکسیژن که طبق یافته‌های زو و همکاران (Zhou *et al*., 2025) در چاله‌های کودی مرسوم رخ می‌دهد، لایه سلولزی در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری (زیر منطقه اصلی ریشه‌های موئین اولیه) قرار داده شد تا فرآیند اولیه تجزیه بدون آسیب به ریشه طی شود. علاوه بر این، حضور هوموس فرآوری‌شده و بیوچار در لایه میانی، به عنوان یک ضربه‌گیر شیمیایی عمل می‌کند. اسیدهای فولیک و هیومیک به دلیل داشتن گروه‌های عاملی کربوکسیل (−COOH) و فنولیک (−OH)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بستر را به شکل چشمگیری ارتقا می‌دهند (Smith *et al*., 2024). در همین راستا، فواد و همکاران و چن و همکاران (Fouad *et al*., 2026 و Chen *et al*., 2025) نشان دادند که تلفیق ترکیبات هوموسی با مایه‌زنی زیستی (PGPR و AMF)، با تولید اگزوپلی‌ساکاریدها، نه تنها کلات‌سازی و جذب عناصر کم‌مصرف را تسهیل می‌کند، بلکه به صورت یک سیستم رهایش کنترل‌شده از شستشوی سریع عناصر غذایی جلوگیری می‌نماید.

بیوترمودینامیک بستر و پدیده زود بیداری بهاره: یکی از پدیده‌های جالب توجه در این پژوهش، بیداری زودهنگام (۸/۵ روز تعجیل) نهال‌های تیمار شبه‌گلدانی از خواب زمستانه بود. از منظر بیوژئوشیمی، فرآیند تجزیه کند و مداوم ترکیبات سلولزی و هوموسی توسط باکتری‌های اکتینومیست و قارچ‌های مفید در عمق چاله، یک فرآیند

گرمازا است. این حرارت کنترلی، توانایی دارد دمای منطقه ریشه را در اواخر زمستان. بین ۱/۵ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای خاک شاهد نگه دارد. مطابق با اصول فیزیک خاک و یافته‌های اخیر در زمینه دستکاری کربن منطقه ریشه، مواد آلی تیره رنگ (هوموس و بیوچار) ضریب جذب تابش خاک را کاهش داده و انرژی گرمایی بیشتری را در طول روز ذخیره می‌سازند (Gulati and Kukal, 2026). افزایش دمای ریشه در اوایل اسفندماه، سنتز هورمون سیتوکینین را در نوک ریشه تحریک می‌کند. این هورمون به صورت حرکت رو به بالا به سمت جوانه‌های هوایی حرکت کرده و با شکستن کربوهیدرات‌های ذخیره‌ای، فرمان باز شدن زودرس جوانه‌ها و شروع جهش رویشی بهاره را صادر می‌کند؛ مکانیزمی که پایداری فیزیولوژیک گیاه را در برابر بادهای گرم بهاره اواخر فصل بهبود می‌بخشد.

تحلیل هم‌زمان داده‌های رطوبتی (شکل ۱) و شاخص‌های اکوفیزیولوژیک (جدول ۳) نشان می‌دهد که ثبات رطوبت خاک در محدوده ۱۹ درصد در روز سی‌ام دوره عدم آبیاری در تیمار شبه‌گلدانی زیستی (T5) در مقایسه با افت شدید رطوبت در سایر تیمارها مستقیماً توانسته است از بروز تنش خشکی در نهال انار جلوگیری کرده و کارایی فیزیولوژیک آن را حفظ نماید:

۱- حفظ هدایت روزنه‌ای (g_s) و جلوگیری از انسداد آوندی: حفظ رطوبت بستر بالاتر از آستانه تنش، موجب شد هدایت روزنه‌ای در تیمار T5 به میزان ۳۴۰/۲ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه ثبت شود (جدول ۳). بر اساس یافته‌های فلکساس و همکاران (Flexas *et al.*, 2002)، عدم افت پتانسیل آب خاک مانع از ارسال سیگنال‌های هورمونی تنش (نظیر اسید آبسیزیک از ریشه به برگ) شده و با حفظ آماس سلول‌های نگهبان روزنه، تبادل گازی و فتوسنتز را بدون وقوع انسداد حبابچه‌ای در آوندها تداوم می‌بخشد.

۲- پایداری محتوای نسبی آب برگ: (RWC) دستیابی به ۸۸/۷٪ RWC در برگ‌های نهال تحت تیمار (T5 در مقایسه با افت شدید آن در شاهد T1) اثبات می‌کند که بستر هیدرولیکی پایدار ایجادشده در T5، مکش بافتی ریشه را در حد بهینه نگه داشته و تورژوسانس سلولی را کاملاً حفظ کرده است. چاوز و همکاران (Chaves *et al.*, 2009) نشان دادند که حفظ RWC بالای ۸۵ درصد در شرایط خشک، شرط اصلی بقای ساختار پروتئینی غشاهای سلولی و کارکرد سیستم فتوسنتزی است.

۳- پاسخ‌های مورفولوژیک و رویشی نهال: ثبات فیزیولوژیک فوق، مستقیماً در شاخص‌های رشد مورفولوژیک نهال منعکس شده است؛ به‌طوری‌که افزایش قطر یقه به ۱۲/۸ میلی‌متر و رشد طولی شاخه‌های جانبی به ۵۴/۱ سانتی‌متر در T5 به ثبت رسید (جدول ۳). پایش هیدرولیکی شکل ۱ نشان می‌دهد که فراهمی مداوم آب قابل دسترس در ناحیه فعال ریشه طی دوره ۳۰ روزه، تخصیص کربن به بافت‌های مریستمی را تداوم بخشیده و منجر به توسعه قطری و طولی اندام‌های رویشی شده است.

در مجموع، تطبیق شکل ۱ و جدول ۳ اثبات می‌کند که بستر شبه‌گلدانی (T5) با مهار افت رطوبت به محدوده PWP ، شرایط هیدرولیکی ایمنی فراهم کرده که ثمره آن حفظ تورژور برگ، تداوم فتوسنتز و جهش در شاخص‌های رشد رویشی نهال انار بوده است.

۳-۲- بررسی جامع جنبه‌های اقتصادی، مدیریتی و زیست‌محیطی

۳-۲-۱- ارزیابی شاخص‌های اثرگذاری اقتصادی و کارایی بستر

اجرای فناوری‌های نوآورانه در احداث باغ‌های مناطق خشک، همواره مواجهه با دو بخش از هزینه‌ها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX) و هزینه‌های جاری و عملیاتی (OPEX) را به همراه دارد. ارزیابی کیفی مؤلفه‌های اقتصادی این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه احداث بستر شبه‌گلدانی زیستی (T5) به دلیل نیاز به حفر چاله‌های عمیق‌تر و تأمین اصلاح‌کننده‌های آلی (بیوچار و هوموس) موجب افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه (CAPEX) در زمان استقرار نهال می‌شود، اما در میان‌مدت و بلندمدت از طریق سه مکانیسم هیدرولیکی-فیزیولوژیک، هزینه جاری (OPEX) را به شدت کاهش می‌دهد:

۱- کاهش هزینه‌های عملیاتی آبیاری و ترابری: پایش هیدرولیکی بستر (شکل ۱) اثبات کرد که تمدید فواصل آبیاری از هفت روز به ۳۰ روز، حجم آب مصرفی و تناوب آبیاری را تا ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. این امر مستقیماً

استهلاک تأسیسات، نیروی انسانی و سوخت پمپ‌ها یا هزینه حمل آب با تانکر را که سهم عمده‌ای در هزینه‌های جاری باغات اراضی خشک دارند، تعدیل می‌کند.

۲- حذف هزینه سنواتی اصلاح بستر: بر خلاف روش‌های سنتی که نیازمند حفر سالانه کانال‌کود و تزریق مداوم کودهای دامی خام هستند، پایداری زیستی بستر T5 به دلیل وجود ساختار سلولزی-هوموسی، نیاز به شارژ کودهای آلی را در سال‌های اولیه رشد رویشی رفع می‌سازد.

۳- کاهش هزینه‌های واکاری ناشی از حذف تنش خشکی: نتایج فیزیولوژیک (جدول ۳) نشان داد که حفظ رطوبت در محدوده بالای PWP، از مرگ‌ومیر نهال‌ها جلوگیری می‌کند. این پایداری، هزینه‌های سنگین واکاری (شامل خرید مجدد نهال، چاله کنی مجدد و اتلاف زمان رشد) را که در طرح‌های سنتی بعضاً به بیش از ۴۰ درصد می‌رسد، کاملاً منتفی می‌سازد.

بنابراین، از منظر اکونومیک، بستر شبه‌گلدانی با جابه‌جایی بار مالی از «هزینه‌های تکرارپذیر جاری» به «سرمایه‌گذاری اولیه یکباره»، کارایی اقتصادی بستر را در دوره بهره‌برداری به اثبات می‌رساند.

۳-۲-۲- مدیریت ریسک و انطباق با اصول کشاورزی حفاظتی

این الگو تطابق ۱۰۰ درصدی با اصول سه‌گانه کشاورزی حفاظتی شامل: حداقل دستکاری خاک، حفظ پوشش آلی سطح خاک (مالچ) و تناوب دینامیک درون‌بستری دارد (Sithole and Olorunfemi, 2024). نتایج بررسی‌های دزلی کورت و همکاران (De-Zelicourt *et al.*, 2013) در خصوص اصول کشاورزی حفاظتی در مناطق خشک تأکید می‌کند که ماندگاری بقایای آلی در منطقه ریشه و ایجاد مالچ سطحی، تبخیر از سطح خاک را تا ۸۰ درصد مهار کرده و فرسایش بادی را کاهش می‌دهد. ریسک‌های محیطی نظیر طوفان‌های شن و بادهای داغ که در مناطق کویری شایع است، به دلیل استقرار عمیق و مستحکم ریشه در بستر متخلخل شبه‌گلدانی به شدت مهار می‌شود.

۳-۲-۳- دستاوردهای زیست‌محیطی و ترسیب کربن

از منظر بین‌المللی و پروتکل‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای، مدفون کردن بقایای سلولزی و تبدیل آن‌ها به هوموس و بیوچار در اعماق خاک، یک روش کارآمد برای ترسیب کربن پایدار است (Machado *et al.*, 2026; Sithole and Olorunfemi, 2024).

مطالعات ۱۰ ساله ماچادو و همکاران (Machado *et al.*, 2026) و بلانکو کانکویی (Blanco-canqui, 2017) بر روی پویایی کربن آلی خاک اثبات کرده است که استفاده از بیوچار و مواد سلولزی پایدار در اعماق خاک، ذخایر کربن پایدار بستر را بین ۹۵ تا ۲۰۷ درصد ارتقا داده و این اثر تا بیش از یک دهه بدون تجزیه سریع باقی می‌ماند. کاه و سرشاخه‌هایی که در حالت عادی توسط کشاورزان سوزانده شده و باعث آلودگی شدید هوا و آزادسازی دی‌اکسیدکربن می‌شوند، در این طرح به زنجیره‌های کربن پلیمری پایدار در زیر زمین تبدیل می‌شوند که ده‌ها سال در خاک باقی می‌مانند.

۴- نتیجه‌گیری کلی

پایش ۳۰ روزه دینامیک رطوبتی خاک نشان داد که بستر شبه‌گلدانی زیستی (T5) با مهار تبخیر سطحی و کاهش نفوذ عمقی، رطوبت حجمی خاک را در بازه ۱۹ درصد حفظ کرده است. این پایداری هیدرولیکی امکان تمدید فواصل آبیاری از هفت روز در روش سنتی T1 به ۳۰ روز در بستر T5 را فراهم ساخته است. این کاهش معنی‌دار در تناوب آبیاری، بدون ورود گیاه به محدوده تنش (PWP = 8%)، نشان‌دهنده ارتقای بالای کارایی مصرف آب در سال‌های ابتدایی استقرار نهال است. نتایج این پژوهش اثبات کرد که تثبیت هوموس، بیوچار و مواد سلولزی در بستر T5، ساختاری خودگردان و ماندگار در منطقه ریشه ایجاد می‌کند. این پایداری ساختاری موجب حذف هزینه‌ها و عملیات اجرایی چالکود سنواتی در سال‌های اولیه رشد رویشی شده و هدررفت عناصر غذایی از طریق آبشویی را به حداقل می‌رساند. با افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود هوادهی ریشه، طول شاخه‌ها، تعداد پاجوش‌ها باعث بهبود رشد و مقاومت به تنش شده و درصد زنده‌مانی را به‌طور معنی‌داری افزایش داده است. بکارگیری بقایای گیاهی خام و پوسیده علاوه بر جلوگیری از فرسایش خاک، از انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از تخریب بقایا جلوگیری کرده و گامی موثر در جهت کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

تضاد و تعارض منافع – نویسندگان هر گونه تعارض و تضاد منافع اعم از تجاری و غیر تجاری و شخصی را که در ارتباط مستقیم یا غیر مستقیم با اثر منتشر شده است رد می نمایند.

فهرست منابع

زارع چاهوکی، م.، حیدری، م. و ا. تقوی. (۱۴۰۱). ارزیابی اثرات تنش خشکی و شوری بر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد باغات انار در مناطق خشک (مطالعه موردی: استان یزد). *پژوهش‌های باغبانی ایران*، ۳۵(۲)، ۱۴۵–۱۶۰.

زارعیان، م. ج. (۱۴۰۲).گزارش تفصیلی وضعیت تراز هیدرولوژیک و افت سطح ایستابی حوضه‌های آبریز ممنوعه فلات مرکزی ایران. موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو.

زارعیان، م. ج.، میرعباسی، ر.، و م. تجریشی. (۱۴۰۲). گزارش تفصیلی وضعیت تراز هیدرولوژیک و افت سطح ایستابی حوضه‌های آبریز ممنوعه استان یزد و فلات مرکزی ایران. موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

شکرخدایی، ف. (۱۴۰۲). سند راهبردی ارزیابی ریسک‌های اکولوژیک و تغییر اقلیم بر امنیت اقتصادی و باغبانی ایران. کمیسیون کشاورزی و محیط زیست اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی ایران.

Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, *81*(4), 687–711.

Carbonell, V., Martinez, J., & Santos, A. (2024). Subsurface organic barriers and their impact on soil moisture retention and unsaturated hydraulic conductivity in arid agro-ecosystems. *Journal of Arid Environments*, *218*, 105–118.

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, *103*(4), 551–560.

Chen, Y., Zhang, H., & Liu, W. (2025). Microbial resilience in arid soils: Ecological responses to drought and salinity stress. *Current Microbiology*, *82*, 576.

De Zelicourt, A., Al-Yousif, M., & Hirt, H. (2013). Rhizosphere microbes as essential partners for plant drought stress tolerance. *Molecular Plant*, *6*(2), 242–245.

European Geosciences Union (EGU). (2025). HYDRUS-2D assessment of subsurface water retention technology (SWRT) in enhancing seedling survival in arid zones. *EGU25 General Assembly Abstracts*, EGU25-9767.

Flexas, J., Bota, J., Escalona, J. M., Sampol, B., & Medrano, H. (2002). Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: An evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Functional Plant Biology*, *29*(4), 461–471.

Fouad, N., Elzayat, E. M., Amr, D., El-Khishin, D. A., Radwan, K. H., Youssef, A., Khalaf, A. A., Ahmed, H. A., Radwan, E. H., Tawkaz, S., & Baum, M. (2026). Rhizosphere microbiome engineering for climate-smart agriculture: From synthetic consortia to precision decision support. *Microorganisms*, *14*(5), 1138.

Guber, K. A., Smucker, A. J. M., Berhanu, S., and Miller, J. M. L. (2015). Subsurface water retention technology (SWRT) improves root zone water storage for corn production on coarse-textured soils. *Vadose Zone Journal*, *14*(7) 1-13.

Gulati, D., and Kukal, M. S. (2026). Improved water retention from soil carbon accrual delivers only marginal agrohydrological benefits under most conditions. *Water Resources Research*, 62(4), e2025WR041768.

Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying the soil environment: A review. *Soil and Tillage Research*, *168*, 155–166.

Machado, S., Ramírez, P. B., & Singh, S. (2026). Biochar effects on soil organic carbon sequestration and acidity amelioration persist after 10 years in dryland agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *10*, 1638625.

Sithole, T., & Olorunfemi, O. D. (2024). Sustainable Agricultural Practices in Sub-Saharan Africa: A Review of Adoption Trends, Impacts, and Challenges Among Smallholder Farmers. *Sustainability*, *16*(22), 9766.

Smith, A. J., Harrison, L., & Davies, R. (2024). Rethinking soil organic matter functionality: Lignocellulose-rich subsurface amendments as biomimetic water reservoirs in degraded arid lands. *Soil and Tillage Research*, *238*, 106–119.

Weatherley, P. E. (1950). Studies in the water relations of the cotton plant. I. The field measurement of water deficits in leaves. *New Phytologist*, *49*(1), 81–97.

Zhou, M., Wang, X., Zhang, L., & Liu, Y. (2025). Biochemical traps of raw manure amendments in dryland pits: Oxygen depletion dynamics, redox potential drop, and root system architecture responses. *Agricultural Water Management*, *302*, 109–125.