IRANIAN JOURNAL OF FOREST AND POPLAR RESEARCH
RIFR

10.22092/ijfpr.2025.368527.2194
Vol. 34, No. 1, Page 38-56 (2026)

Research Article

The impact of drought stress on water relations and morpho-physiological characteristics of *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. under saline water irrigation conditions

Mohammad Hadi Rad [1*], Mohammad Khosroshahi [2] and Moslem Yazdani [3]

1*- Corresponding Author, Associate Prof., Forests and Rangelands Research Department, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran. Email: mohammadhadirad@gmail.com
2- Prof., Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Ph.D., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 05.02.2025 Revised: 28.09.2025 Accepted: 16.10.2025

Abstract

Background and Objectives: Drought and desertification are among the major global ecological challenges that significantly affect vegetation cover. *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., as a highly resilient species, has the ability to adapt to harsh environmental conditions, particularly drought. Identifying the mechanisms underlying drought tolerance in this species can support its management in desertification control programs, sand stabilization, and dust storm mitigation. Therefore, this study aimed to investigate the effects of deficit irrigation (drought stress) under irrigation water salinity of 7.2 dS/m on water-relation traits and morpho-physiological characteristics of *P. juliflora* under lysimetric conditions.

Methodology: The experiment was conducted at the Shahid Sadoughi Yazd Desertification Research Station, Yazd Province, Iran, using nine weighing and drainage lysimeters, each with a volume of 1.95 m³. The lysimeter soil was analyzed and prepared with respect to texture, compaction, and field capacity. Irrigation treatments consisted of a control (100% field capacity), 30% deficit irrigation, and 60% deficit irrigation, applied from seedling establishment in April 2021 for a period of two years. Evaluated parameters included canopy volume and dry weight, root dry weight, shoot-to-root ratio, leaf relative water content (RWC), water potential, water use efficiency (WUE), and concentrations of photosynthetic pigments, including total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids. Canopy volume was estimated using measurements of tree height and canopy diameter. Plant dry weights were determined after oven-drying at 70°C for 48 h. Leaf RWC and water potential were measured using standard procedures. Water use efficiency was calculated as the ratio of produced dry biomass to plant evapotranspiration. Data were analyzed using a completely randomized design with three replications in SAS statistical software.

Results: Deficit irrigation treatments significantly affected the growth and physiological characteristics of *P. juliflora*. Evapotranspiration decreased by 61.7% under 60% deficit irrigation compared with the control, accompanied by a 37.5% reduction in canopy area, indicating that vegetative growth was significantly affected ($P < 0.01$) by severe drought stress. Shoot and root dry weights also declined significantly ($P < 0.01$), with reductions of 60.8% and 54.2%, respectively. The shoot-to-root ratio changed significantly ($P < 0.01$), reflecting greater allocation

Copyright: © 2026 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (https://ijfpr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

of resources to root development and enhanced water acquisition under drought conditions. Physiological assessments showed that deficit irrigation significantly altered water potential and RWC compared with the control ($P < 0.01$). Improved maintenance of water status and RWC contributed to sustaining photosynthetic activity and enhancing drought tolerance under saline conditions.

Conclusion: The findings demonstrate that *P. juliflora* employs multiple adaptive mechanisms to tolerate drought stress, including reduced evapotranspiration, increased allocation of resources to roots, maintenance of leaf relative water content, accumulation of ions such as sodium in leaves, regulation of water potential, and preservation of photosynthetic performance. Since drought stress was imposed under saline irrigation conditions, the results suggest that *P. juliflora* is well suited for stabilizing sand dunes, controlling dust storms, and rehabilitating degraded desert lands with saline water and soils. Nevertheless, its potential invasiveness and the associated risks to surrounding ecosystems should be carefully considered before large-scale implementation.

Keywords: Lysimeter, dust storm control, relative leaf water content, water potential.

تأثیر تنش خشکی بر روابط آبی و ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی کهور آمریکایی (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) در شرایط آبیاری با آب شور

محمدهادی راد [۱*]، محمد خسروشاهی [۲] و مسلم یزدانی [۳]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. پست الکترونیک: mohammadhadirad@gmail.com

۲- استاد، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۴

چکیده

سابقه و هدف: خشک‌سالی و بیابان‌زایی از چالش‌های مهم بوم‌شناختی جهانی است که تأثیر قابل‌توجهی بر پوشش گیاهی گذاشته است. کهور آمریکایی (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) به‌عنوان گونه‌ای مقاوم، توانایی سازگاری با شرایط سخت محیطی به‌ویژه خشکی را دارد. شناسایی سازوکارهای تحمل این گونه در برابر تنش خشکی می‌تواند به مدیریت آن در برنامه‌های بیابان‌زدایی، تثبیت شن و کنترل ریزگردها کمک کند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کم‌آبیاری یا تنش خشکی با شوری ۷/۲ دسی‌زیمنس بر متر آب آبیاری بر ویژگی‌های مرتبط با روابط آبی و مورفوفیزیولوژیکی در شرایط لایسیمتری انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش در ایستگاه تحقیقات بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد با استفاده از نُه لایسیمتر وزنی و زهکش‌دار، هرکدام با حجم ۱/۹۵ متر مکعب اجرا شد. خاک لایسیمترها ازنظر بافت، فشردگی و ظرفیت زراعی بررسی و آماده شد. تیمارهای آبیاری شامل شاهد (ظرفیت زراعی)، ۳۰ درصد کم‌آبیاری و ۶۰ درصد کم‌آبیاری بود که از ابتدای کاشت نهال‌ها در فروردین ۱۴۰۰ به مدت دو سال اعمال شد. شاخص‌های مورد ارزیابی شامل حجم و وزن خشک تاج‌پوشش، وزن خشک ریشه، نسبت اندام هوایی به ریشه، محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب، کارایی مصرف آب و غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل کل، کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید بود. حجم تاج‌پوشش با اندازه‌گیری ارتفاع و قطر تاج درختان محاسبه شد. وزن خشک اندام‌های گیاهی پس از خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت تعیین شد. محتوای نسبی آب برگ و پتانسیل آب با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. کارایی مصرف آب از نسبت جرم خشک تولیدی به میزان تبخیرتعرق گیاه محاسبه شد. داده‌ها با استفاده از طرح کامل تصادفی و با سه تکرار توسط نرم‌افزار آماری SAS تجزیه و تحلیل شدند.

نتایج: تیمارهای کم‌آبیاری، تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی کهور آمریکایی داشتند. کاهش میزان تبخیرتعرق در تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری نسبت به تیمار شاهد به میزان ۶۱/۷ درصد و درنتیجه، کاهش ۳۷/۵ درصدی در سطح تاج‌پوشش را نشان داد. چنانچه رشد رویشی گیاه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش شدید خشکی قرار گرفت ($P<0.01$). وزن خشک اندام هوایی و ریشه نیز در شرایط تنش خشکی شدید به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($P<0.01$). به‌طوری‌که وزن خشک اندام هوایی ۶۰/۸ درصد و وزن خشک ریشه ۵۴/۲ درصد کاهش نشان داد. نسبت اندام هوایی به ریشه نیز کاهش معنی‌داری داشت ($P<0.01$). چنانچه از ۲/۲ در تیمار شاهد به ۲/۷ در تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری کاهش یافت که بیانگر تخصیص بیشتر منابع به ریشه برای جذب بهتر آب در شرایط خشکی بود. بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیکی کهور آمریکایی نشان داد که تیمار کم‌آبیاری نسبت به شاهد سبب افزایش معنی‌دار پتانسیل

آبی و محتوای نسبی آب برگ شد ($P<0.01$). افزایش پتانسیل آبی و بهبود محتوای نسبی آب برگ موجب بهبود تحمل به خشکی از طریق حفظ فرایندهای فتوسنتزی شد.

نتیجه‌گیری کلی: براساس نتایج این پژوهش، کهور آمریکایی با بهره‌گیری از سازوکارهای متعدد مانند کاهش تبخیرتعرق، افزایش تخصیص منابع به ریشه، حفظ محتوای نسبی آب برگ، تجمع موادی مانند سدیم در برگ، تنظیم پتانسیل آبی و بهبود شرایط فتوسنتزی، توانایی زیادی در تحمل تنش خشکی دارد. باتوجه‌به مقاومت کهور آمریکایی در برابر تنش هم‌زمان خشکی و شوری به‌ویژه با توسعه ریشه، می‌توان این گونه را گزینه‌ای مناسب برای تثبیت شن‌های روان، کنترل ریزگردها و احیای اراضی بیابانی و تخریب‌یافته با شوری زیاد آب و خاک دانست. بااین‌حال، استفاده از این گیاه، نیازمند مدیریت دقیق و لحاظ کردن ملاحظات بوم‌شناختی است. زیرا احتمال مهاجم بودن آن می‌تواند تهدیدی برای محیط اطراف محسوب شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آبی، کنترل ریزگرد، لایسیمتر، محتوای نسبی آب برگ.

مقدمه

توجه به نیازهای بوم‌شناختی گونه‌های مورد استفاده در جنگل‌کاریِ مناطق خشک ازجمله نیاز آبی و راه‌های تأمین این نیاز، نقش مؤثری در پایداری این بوم‌سازگان‌ها دارد. عدم توجه به این موضوع ممکن است خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و به‌ویژه محیط‌زیستی را به‌دنبال داشته باشد. از شاخص‌های مطرح در انتخاب گونه برای کاشت در مناطق خشک به‌ویژه با هدف بیابان‌زدایی، تثبیت شن‌های روان و کنترل ریزگردها می‌توان به سرعت رشد زیاد همراه با مقاومت نسبت به شرایط نامساعد محیطی ازجمله شوری، خشکی و وزش بادهای گرم و خشک اشاره کرد (Sadeghzadeh *et al.*, 2024). مهم‌ترین عامل مؤثر بر رویش گونه‌های تندرشد، میزان دسترسی آن‌ها به آب است. با این وجود، برخی از این گونه‌ها نسبت به شرایط نامناسب محیطی، مقاومت بیشتری دارند. به‌ویژه اینکه اگر این گونه‌ها بتوانند بخشی از نیاز آبی خود را از منابع آبی غیرمعمول (آب شور، فاضلاب، پساب‌های صنعتی و حتی رطوبت موجود در جو و یا آب حاصل از تکاثف) تأمین و یا با سازوکارهای متداول با خشکی مقابله کنند. مقاومت به تغییرات رطوبت خاک، میزان املاح موجود در خاک به‌ویژه نمک، میزان شوری آب، نوسانات دمایی و رطوبت موجود در هوا و نیز مقاومت در برابر وزش بادهای شدید ازجمله عواملی هستند که باید در انتخاب گونه‌ها برای جنگل‌کاری در مناطق خشک به آن‌ها توجه شود (Lamers *et al.*, 2006). از اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌دلیل نگرانی‌های گسترده در بسیاری از کشورها برای تأمین سوخت و جنگل‌زدایی و نیز بیابان‌زایی در مناطق خشک، برخی گونه‌ها در زنجیره بیابان‌زدایی و تثبیت شن‌های روان قرار گرفتند (Nadjafi–Tireh–Shabankareh *et al.*, 2014). تاغ، گز، آتریپلکس و کهور آمریکایی از گونه‌های غالب برای این امر بودند که برحسب شرایط بوم‌شناختی مناطق انتخاب شده‌اند.

کهور آمریکایی یا سمر (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) که به آن کهور پاکستانی نیز می‌گویند، در بیشتر از ۱۲۹ کشور جهان یافت می‌شود (Eshetu *et al.*, 2024). این گونه، بومی آمریکا است که از آنجا به کشورهای متعددِ آمریکای جنوبی، آفریقا، آسیای مرکزی و استرالیا اغلب با اقلیم خشک، گرم و مدیترانه‌ای پراکنش یافته است (Hussain *et al.*, 2021). علی‌رغم پراکنش جهانی آن که با اهداف مختلف صورت گرفته است، اثرهای مخرب اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی متعددی به‌عنوان یک گونه مهاجم برای آن گزارش شده است. بررسی پراکنش کهور آمریکایی در استان بوشهر جزو ناحیه صحارا–سندی ایران نشان داد که استفاده از این گونه برای تثبیت شن‌های روان به‌دلیل سازگاری بسیار مناسب آن با شرایط اقلیمی آن استان –اقلیم بیابانی خشک و نیمه‌خشک– شاید در گام‌های

اولیه توجیه‌پذیر بود، اما کشت آن در اراضی که استعداد و قابلیت کشت گونه‌های بومی مانند کنار، استبرق و کهور ایرانی داشته‌اند، به‌دلیل گسترش تهاجمی آن، توجیه قانع‌کننده‌ای نداشته است (Sadeghi *et al*., 2024). آن‌ها پیشنهاد کردند که باتوجه‌به گسترش خودرو و رو به افزایش این گونه در جنوب کشور، جنگل‌کاری‌ها و پراکنش این گونه در سطح استان بوشهر به‌صورت مداوم پایش و بررسی شود. کشت و توسعه این گونه در بخش شرقی استان بوشهر، از رودخانه مند به طرف استان هرمزگان توصیه نمی‌شود.

کاربرد کهور آمریکایی در بیابان‌زدایی و کنترل فرسایش خاک، حفاظت از خاک‌های تخریب‌یافته و شور، تثبیت نیتروژن و ترسیب کربن، بهبود کیفیت هوا با کنترل ریزگردها، تولید چوب سخت و سنگین برای تولید زغال و اتانول، استفاده از آن برای برداشت عناصر سنگین از خاک‌های آلوده ناشی از فعالیت‌های صنعتی (گیاه‌پالایی) و نیز استفاده از سرشاخه و نیام در خوراک دام گزارش شده است (Askari *et al*., 2019; Amiri *et al*., 2023; de Lemos *et al*., 2023; Eshetu *et al*., 2024; Prasath & Mohanraj, 2024). توان استقرار زیاد به‌ویژه در اراضی شور، تجدیدحیات طبیعی و نیز سرعت رشد زیاد با ایجاد پوشش تاجی گسترده برای کنترل شن‌های روان (Amiri *et al*., 2023) ازجمله عواملی هستند که در انتخاب این گونه برای بیابان‌زدایی به‌ویژه در اراضی کم‌بازده و تخریب‌یافته در بسیاری از مناطق گرم خشک و نیمه‌خشک مؤثر بوده است. در بررسی پراکنش کهور آمریکایی در استان کهگیلویه و بویراحمد گزارش شد که آثار تخریبی خاصی ناشی از جنگل‌کاری با این گونه در برخی نقاط کشور مثل شهرستان گچساران مشاهده نشده است (Askari *et al*., 2025). در این شرایط به‌نظر می‌رسد که نمی‌توان از آن به‌عنوان گونه‌ای مضر نام برد. به اعتقاد مردمان بومی آن منطقه، کهور آمریکایی برای پوشش گیاهی و نیز تعلیف دام، آثار مثبت فراوانی دارد (Askari *et al*., 2025).

در هر حال باتوجه‌به اهمیت این گیاه و وجود دغدغه‌های محیط‌زیستی در جنگل‌کاری با آن به‌عنوان یک گونه غیربومی، انجام پژوهش‌های محلی به‌ویژه در رابطه با سازوکارهای سازگاری زیاد آن در محیط‌های کنترل‌شده برای روشن شدن ابهامات، مورد توجه است. گونه‌های بیابانی می‌توانند به وسیله جذب بیشینه آب از خاک و یا اتلاف کمینه آب از اندام‌های خود با تنش خشکی مقابله کنند (Madouh, 2022). برای مقاومت به خشکی، سازوکارهای متعدد ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی مانند تغییر در ساختار گیاه، کاهش میزان رشد، تطابق اسمزی بافت‌های گیاهی، هدایت روزنه‌ای، تغییر در پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک، اسیدهای آمینه آزاد، آنزیم‌ها و هورمون‌ها به‌ویژه آبسزیک‌اسید به کار گرفته می‌شود (Garau *et al*., 2008; Saglam *et al*., 2008; Li *et al*., 2022; Mohanta *et al*., 2024). Arndt و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند هنگامی که گیاهان در معرض تنش خشکی و شوری قرار می‌گیرند، شروع به ساختن و تجمع مواد محلولی چون آمینواسیدها (مثل پرولین و آسپاراتیک‌اسید)، پروتئین‌ها، قندها (مثل ساکارز، گلوکز و مانیتول)، ترکیبات الکلی (مثل گلایسین بتائین و آلانین بتائین)، سیکلیتول‌ها (مثل پینیتول، کیوبراجیتول و کوئرسیتول) و اسیدهای آلی در سلول‌های خود می‌کنند. نتیجه آن، افزایش پتانسیل اسمزی سلول و درنهایت، بهبود پتانسیل آبی است که رمز بقای بسیاری از گیاهان در مناطق خشک است. براساس پژوهش Gul و همکاران (۲۰۰۰) عامل اصلی در تطابق اسمزی در گیاهان هالوفیت، تجمع یون‌های معدنی در داخل سلول‌ها است که از خاک اطراف ریشه دریافت می‌شود. ضمن اینکه نقش مواد اسمولیتی دیگر را نباید نادیده گرفت.

کهور آمریکایی، درصد زیادی از ژن‌هایی که به‌طور معمول توسط تنش خشکی و شوری به‌طور خاص در بافت ریشه تنظیم می‌شوند، برای پروتئین‌های ریبوزومی مختلف کدگذاری می‌کند. همچنین، نقش احتمالی «سانترین‌ها» در این گونه در پاسخ به استرس‌ها گزارش شده است (George *et al*., 2017). به همین دلیل و عوامل تأثیرگذار دیگر بر مقاومت به خشکی، رویش این گیاه در محیط‌هایی با بارندگی کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر با موفقیت خوبی همراه بوده است (Hussain *et al*., 2021).

با هدف بررسی نیاز آبی و تأثیر کم‌آبیاری از طریق اعمال تنش خشکی بر برخی رفتارهای مرتبط با روابط آبی، مورفوفیزیولوژیک و زیست‌شیمیایی کهور آمریکایی، آزمایشی در محیط کنترل‌شده با استفاده از لایسیمترهای وزنی و زهکش‌دار به اجرا درآمد. همچنین، به‌وسیله آبیاری با آب شور، میزان مقاومت گیاه به تنش خشکی در شرایط شور بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مکان انجام آزمایش، شرایط اقلیمی و وضعیت خاک

از نُه عدد لایسیمتر سایت تحقیقاتیِ آزمایش‌های لایسیمتری در ایستگاه تحقیقاتی بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد استفاده شد. این لایسیمترها دارای حجم ۱/۹۵ متر مکعب (ارتفاع ۱۷۰ سانتی‌متر و قطر ۱۲۱ سانتی‌متر) و سطح ۱/۱۵ متر مربع بودند. جنس لایسیمترها از آهن گالوانیزه بود و بدنه آن‌ها به‌وسیله فوم و پشم شیشه برای کاهش تبادلات حرارتی پوشانده شد. کف لایسیمترها از شیب مناسب برخوردار بود تا آب اضافی را به لوله‌ای که برای خروج آب و جمع‌آوری زهکش در نظرگرفته شد، هدایت کند. به‌منظور بهبود وضعیت زهکش لایسیمترها از ماسه درشت به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و ماسه ریز به ارتفاع پنج سانتی‌متر در کف آن‌ها استفاده شد. جدول ۱ شرایط بوم‌شناختی ایستگاه تحقیقاتی ذکرشده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- شرایط بوم‌شناختی ایستگاه تحقیقاتی آزمایش‌های لایسیمتری در استان یزد

Table 1. Ecological conditions of the lysimetric experiments research site in Yazd province

Longitude	54° 11' 9"
Latitude	32° 4' 30"
Average annual precipitation (mm)	70
Maximum wind speed (km/h)	120
Average annual sunshine hours	3052
Average annual number of frost days	73
Average annual evaporation from Class A pan (mm)	3207.4
Average annual relative humidity in the morning (%)	57
Average annual relative humidity in the afternoon (%)	38.5
Average annual temperature (°C)	18
Absolute minimum annual temperature (°C)	- 13.5
Absolute maximum annual temperature (°C)	45.5
Climate of the area based on the modified Doorenbos method	Cold semi-arid

باتوجه‌به اینکه سطح لایسیمترها به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برای آبیاری خالی گذاشته شد، معادل ۱/۷۸ متر مکعب خاک با وزن ۲۸۶۰ کیلوگرم برای پر کردن هر لایسیمتر استفاده شد. تلاش شد تا خاک درون لایسیمترها از فشردگی کافی برخوردار باشد و به وزن مخصوص اولیه نزدیک شود. برای تعیین محتوای نسبی رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی، لایسیمترها با مقدار کافی آب آبیاری شد. پس از نفوذ، سطح لایسیمترها برای جلوگیری از تبخیر با پلاستیک پوشانده شد و هم‌زمان میزان آب زهکش‌یافته اندازه‌گیری شد. میزان آب خروجی از زهکش‌ها از مجموع آب واردشده به لایسیمترها کسر شد و عدد به‌دست‌آمده به‌عنوان شاخص گنجایش نسبی آب برای هر لایسیمتر منظور شد. هم‌زمان در چند نوبت، رطوبت خاک به‌صورت حجمی و در اعماق مختلف به‌وسیله TDR قرائت شد. از این طریق، میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی به‌صورت حجمی و وزنی محاسبه شد. میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی به همراه شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی دیگر خاک مورد استفاده در لایسیمترها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در لایسیمترها

Table 2. Some physical and chemical properties of the soil used in the lysimeters

Texture	Loamy-sandy
Electrical conductivity (EC × 10^3)	4.8
Saturation soil reaction (pH)	7.1
Neutralizing substances (%)	24.87
Bulk density	1.58
Sand (%)	69.7
Silt (%)	12.3
Clay (%)	18
Organic carbon (%)	9.5
Bulk density	1.64
Volumetric moisture content at field capacity (%)	17.85
Gravimetric moisture content at field capacity (%)	17.3

نهال‌ها از ابتدای کاشت در لایسیمترها، با آب ایستگاه بیابان‌زدایی شهید صدوقی یزد با شوری ۷/۲ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شدند.

کشت، مراقبت از نهال‌ها و اعمال تیمارهای آبیاری

با آماده شدن لایسیمترها و فراهم شدن شرایط برای کاشت نهال در آن‌ها، یک اصله نهال یک‌ساله در هر لایسیمتر که از نهالستان اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان بوشهر تهیه شد، کشت شد. نهال‌ها در اوایل فروردین‌ماه سال ۱۴۰۰ غرس شدند. آن‌ها به مدت دو سال تحت تیمار سه سطح آبیاری شامل شاهد (بدون تنش با آبیاری در سطح ظرفیت زراعی)، ۳۰ درصد کم‌آبیاری (تنش ملایم با آبیاری در سطح ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) و ۶۰ درصد کم‌آبیاری (تنش شدید با آبیاری در سطح ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) با سه تکرار در قالب طرح آزمایشی کامل تصادفی قرار گرفتند. مراقبت‌های لازم برای بقای نهال‌ها در طول دوره آزمایش انجام شد. آزمایش از ابتدای سال ۱۴۰۰ آغاز شد و در پایان سال ۱۴۰۱ خاتمه یافت. تیمارهای آبیاری به مدت دو سال و از ابتدای کاشت نهال در داخل لایسیمترها اعمال شد.

شاخص‌های مورد ارزیابی

شاخص‌های ریخت‌شناسی: طول بزرگ‌ترین انشعاب، تعداد انشعاب، قطر بزرگ‌ترین ساقه، قطر متوسط یقه و حجم پوشش تاجی به‌عنوان شاخص‌های مهم ریخت‌شناسی اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری قطر بزرگ‌ترین ساقه و قطر یقه از کولیس دیجیتال استفاده شد. برای اندازه گیری حجم تاج، با اندازه‌گیری ارتفاع و قطر تاج نهال‌ها (در دو جهت شمال- جنوب و شرق- غرب) میزان حجم تاج درختان (v) از طریق رابطه (۱) محاسبه شد (Westwood, 1987).

رابطه (۱) (باتوجه‌به اینکه در همه تیمارها، ارتفاع کمتر از قطر بود)

$$v = \frac{4}{3}\pi a^2 b \qquad (۱)$$

a= ۱:۲ ارتفاع درخت و b = ۱:۲ قطر متوسط درخت بودند.

وزن خشک اندام هوایی: در پایان آزمایش (اواسط پاییز ۱۴۰۱) قسمت هوایی درختان قطع شد. با قرار دادن آن‌ها در کوره در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت (Yin *et al.*, 2005) وزن خشک آن‌ها محاسبه شد.

وزن خشک ریشه: پس از جدا کردن قسمت هوایی، خاک و ریشه در عمق‌های کمتر از ۳۰، ۳۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۹۰ و ۹۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متری برداشت شد. با الک کردن و سپس، شستشوی خاک، ریشه‌های ضخیم و موئین جدا و با قراردادن در کوره و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت (Yin *et al.*, 2005) وزن خشک آن‌ها به‌دست آمد. با اندازه‌گیری میزان وزنی ریشه در عمق‌های مختلف خاک، تأثیر تیمارهای رطوبتی بر توسعه ریشه شد.

نسبت اندام هوایی به ریشه: پس از خشک کردن اندام هوایی و ریشه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و توزین آن‌ها، نسبت وزنی اندام هوایی به ریشه محاسبه شد.

محتوای نسبی آب برگ: محتوای نسبی آب برگ، یکی از شاخص‌های مؤثر در تداوم رشد گیاه است. مقدار بیشتر آن می‌تواند عامل استمرار رشد در شرایط تنش خشکی باشد. به‌منظور تعیین محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی، از روش گزارش‌شده توسط Martinez و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد (رابطه ۲). این متغیر پیش از آبیاری و در اواسط تابستان اندازه‌گیری شد.

رابطه (۲) ۱۰۰ × [(وزن برگ خشک‌شده– وزن برگ آماس‌شده) / (وزن برگ خشک‌شده– وزن برگ تازه)]= محتوای نسبی آب برگ

پتانسیل آب: برای اندازه‌گیری پتانسیل آب از دستگاه بمب فشار قابل‌حمل استفاده شد. به این منظور هنگام وقوع تنش بیشینه، یعنی در اواسط روز (یک روز پیش از آبیاری) با برداشت قسمت انتهایی شاخه‌های جانبی به‌طول ۱۰ سانتی‌متر، میزان پتانسیل آب که شاخصی برای اندازه‌گیری مقدار و چگونگی حرکت آب در گیاه است، برآورد شد.

کارایی مصرف آب: با برداشت اندام هوایی و ریشه و خشک کردن آن‌ها در شرایط ذکرشده، وزن خشک کل زی‌توده در هر درخت محاسبه شد. با محاسبه تبخیرتعرق و دارا بودن وزن خشک کل زی‌توده در هریک از تیمارها، کارایی مصرف آب (WUE) برمبنای گرم ماده خشک تولیدی به‌ازای هر لیتر آب مصرف‌شده (تبخیرتعرق) محاسبه شد (رابطه ۳).

رابطه (۳) $\mathrm{WUE}=\frac{D}{W}$

که در آن، D جرم ماده خشک تولیدشده و W جرم آب مصرف‌شده (تبخیرتعرق) توسط گیاه است.

رنگ‌دانه‌های کلروفیل و کارتنوئید: مقدار ۰/۱ گرم برگ از هر درخت برداشت شد و با انتقال به آزمایشگاه، نمونه‌ها برای قرائت توسط اسپکتروفتومتر در طول‌موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵، ۴۹۰ نانومتر آماده شدند. برای این منظور، بافت تر برگ گیاه با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد هموژن شد. مخلوط به‌دست‌آمده به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. عمل هموژن کردن در محیط سرد و تاریک انجام شد. پس از قرائت شدت جذب در طول‌موج‌های ذکرشده توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل جن‌وی (۶۱۰۵)، مقادیر کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید به‌وسیله رابطه‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد (Masalo & Oca, 2020).

رابطه (۴) $a \text{ کلروفیل} = \frac{(12.7 \times D663) - (2.69 \times D645) \times V}{1000 \times W}$

رابطه (۵) $b \text{ کلروفیل} = \frac{(22.9 \times D645) - (4.63 \times D663) \times V}{1000 \times W}$

رابطه (۶) $\text{کلروفیل کل} = \frac{(20.2 \times D645) - (8.02 \times D633) \times V}{1000 \times W}$

رابطه (۷) $\text{کارتنوئید} = \frac{100(D470 - 3.27(mg\ chl.a) - 104(mg\ chl.b)}{227}$

در رابطه‌های فوق، V، W، D به‌ترتیب حجم عصاره (میلی‌لیتر)، وزن تر (میلی‌گرم) و شدت جذب در طول‌موج های ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۰ هستند.

تجزیه آماری داده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام شد. میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح $p \leq 0.05$ و $p \leq 0.01$ مقایسه شد.

نتایج

میزان تبخیرتعرق در رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری

جدول ۳ مقادیر حاصل از میزان تبخیرتعرق اندازه‌گیری‌شده به‌صورت تجمعی و برای دو فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ را نشان می‌دهد. گفتنی است که به‌دلیل استقرار سه پایه (سه تکرار) در هر تیمار، عددهای ذکرشده مربوط به میانگین سه تکرار هستند.

جدول ۳- حجم آب مصرف‌شده (تبخیرتعرق) به‌صورت تجمعی و برای دو فصل زراعی توسط نهال‌های کهور آمریکایی در سطوح مختلف آبیاری (در شرایط لایسیمتری)

Table 3. Cumulative water consumption (evapotranspiration) by *Prosopis juliflora* saplings under different irrigation levels (in lysimetric conditions) for two growing seasons

Plant evapotranspiration rate under 60% deficit irrigation conditions (liters per tree)	Plant evapotranspiration rate under 30% deficit irrigation conditions (liters per tree)	Plant evapotranspiration rate under field capacity conditions (liters per tree)
2422	4387	6336

تأثیر رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری بر شاخص‌های مرتبط با روابط آبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به وزن خشک کل اندام هوایی، وزن خشک ریشه، نسبت اندام هوایی به ریشه، میزان تبخیرتعرق دو سال رویش و کارایی مصرف آب نشان داد که شاخص‌های عملکردی و تبخیرتعرق تحت تأثیر معنی‌دارِ رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری بودند ($P<0.01$). با محاسبه نسبت اندام هوایی به ریشه و کارایی مصرف آب مشخص شد که این دو شاخص مهم در موضوع روابط آبی، تحت تأثیر معنی‌داری نسبت به تنش خشکی قرار نگرفتند (جدول ۴).

جدول ۴- آنالیز واریانس سطوح مختلف رژیم‌های آبیاری بر وزن خشک اندام هوایی (کل)، وزن ریشه، نسبت اندام هوایی به ریشه و کارایی مصرف آب در کهور آمریکایی

Table 4. Analysis of variance of different levels of irrigation regimes on shoot dry weight (total), root weight, shoot to root ratio and water use efficiency in *Prosopis juliflora*

		Mean square					
Source	Df	Dry weight of aerial parts	Dry root weight	Total dry weight	Shoot-to-root ratio	Total evapotranspiration rate	Water use efficiency
Model	2	14.84**	1.155**	15.44**	0.18ns	7509039/58**	0.63ns
Error	6	0.36	0.007	0.93	0.074	3829.14	0.043
Corrected total	9						

**: Significant at p<0.01; ns: non-significant

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح تنش خشکی، عملکرد اجزای مختلف ازجمله اندام هوایی و ریشه کاهش یافت. چنانچه بین سطوح مختلف رژیم‌های کم‌آبیاری، اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. اختلاف بین سطوح مختلف کم‌آبیاری ازنظر نسبت اندام هوایی به ریشه و کارایی مصرف آب غیرمعنی‌دار بود (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین سطوح مختلف رژیم‌های آبیاری بر وزن خشک اندام هوایی (کل)، وزن ریشه، نسبت اندام هوایی به ریشه و کارایی مصرف آب در کهور آمریکایی در شرایط لایسیمتری

Table 5. Comparison of the mean values of different irrigation regimes on the dry weight of total aerial parts, root eight, shoot-to-root ratio, and water use efficiency of *Prosopis juliflora* under lysimetric conditions.

Deficit irrigation regime	Index					
	Dry weight of aerial parts (kg)	Dry root weight (kg)	Total dry weight (kg)	Shoot-to-root ratio	Total evapotranspiration rate (liters per tree)	Water use efficiency (grams per liter)
Field capacity	7.14 [a]	2.64 [a]	9.78 [a]	2.23 [a]	6336 [a]	1.54 [a]
30% deficit irrigation	4.66 [b]	2.01[b]	6.67[b]	2.32 [a]	4387 [b]	1.52 [a]
60% deficit irrigation	2.71 [c]	1.31[c]	3.91[c]	2.7 [a]	2422 [c]	1.62 [a]

Letters that differ indicate a significant difference between means (P<0.05).

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به رطوبت برگ، پتانسیل آبی و محتوای نسبی آب برگ (RWC) نشان داد که اعمال رژیم‌های کم‌آبیاری، تأثیر معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر مؤلفه‌های مذکور داشت (جدول ۶).

جدول ۶- آنالیز واریانس سطوح مختلف تیمار رطوبتی، توده و اثرات متقابل آن‌ها بر شاخص‌های مربوط به روابط آبی کهور آمریکایی

Table 6. Analysis of variance of different moisture treatment levels, mass and their interaction effects on indicators related to water relations of *Prosopis juliflora*

Source	Df	Mean square		
		Leaf moisture content (%)	Plant water potential (bar)	Relative water content (%)
Model	2	45.19**	209.69**	58.71**
Error	6	2.52	5.53	3.96
Corrected total	9			

**: Significant at p<0.01

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح تنش خشکی از طریق کم‌آبیاری، درصد رطوبت برگ و محتوای نسبی آب برگ کاهش و پتانسیل آبی گیاه افزایش یافت. بااین‌حال، بین تیمار ظرفیت زراعی و ۳۰ درصد کم‌آبیاری ازنظر درصد رطوبت برگ و محتوای نسبی آب برگ، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف تیمار رطوبتی بر شاخص‌های مربوط به روابط آبی کهور آمریکایی

Table 7. Comparison of the mean effect of different irrigation regimes on the water relations indices of *Prosopis juliflora.*

Deficit irrigation regime	Index		
	Leaf moisture content (%)	Plant water potential(bar)	Relative water content (%)
Field capacity	62.16 [a]	24 [c]	62.36 [a]
30% deficit irrigation	65.16 [a]	31 [b]	63.46 [a]
60% deficit irrigation	57.46 [b]	41 [a]	55.31 [b]

Letters that differ indicate a significant difference between means (P<0.05).

تأثیر رژیم‌های مختلف کم آبیاری بر شاخص‌های ریخت‌شناسی

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به شاخص‌های ریخت‌شناسیِ اندام‌های رویشی مثل قطر و ارتفاع تاج، سطح و حجم تاج‌پوشش، طول بزرگ‌ترین انشعاب، تعداد انشعاب، قطر بزرگ‌ترین ساقه، قطر متوسط یقه، وزن تر برگ و سرشاخه، وزن تر چوب، وزن خشک برگ و سرشاخه، وزن خشک چوب و وزن خشک کل اندام هوایی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری، نشان داد که این شاخص‌ها، رفتارهای متفاوتی داشتند. در میان شاخص‌های ذکرشده، قطر متوسط تاج، حجم و سطح تاج‌پوشش، وزن تر برگ و سرشاخه، وزن تر چوب، وزن خشک برگ و سرشاخه و وزن خشک کل در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بودند. ارتفاع و طول بزرگ‌ترین انشعاب و وزن خشک چوب نیز با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۸).

جدول ۸- آنالیز واریانس سطوح مختلف رژیم آبیاری بر شاخص‌های ریخت‌شناسی اندام‌های رویشی کهور آمریکایی

Table 8. Analysis of variance of different levels of irrigation regime on morphological indices of vegetative organs of *Prosopis juliflora.*

		Mean square				
Source	Df	Crown diameter	Crown height	Crown volume	Crown cover area	Length of the largest branch
Model	2	10063.19**	744.44*	86.69**	17.23**	5636.11*
Error	6	577.08	141.66	1.83	0.402	744.44
Corrected total	9					

**: Significant at p<0.01; *: Significant at p<0.05

مقایسه میانگین تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری بر شاخص‌های ریخت‌شناسیِ اندام‌های رویشی نشان داد که در همه شاخص‌های بررسی‌شده، رژیم آبیاری ظرفیت زراعی سبب بهبود شرایط رویشی گیاه و عملکرد بهتر شد (جدول ۹).

جدول ۹- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف رژیم آبیاری بر شاخص‌های ریخت‌شناسی اندام‌های رویشی کهور آمریکایی

Table 9. Comparison of the mean effect of different irrigation regimes on the morphological indices of the vegetative organs of *Prosopis juliflora*.

Deficit irrigation regime	Index				
	Crown diameter (cm)	Crown height (cm)	Crown volume (m^3)	Crown cover area (m^2)	Length of the largest branch (cm)
Field capacity	416.67 a	131.67 a	17.89 a	12.35 a	3.05 a
30% deficit irrigation	358.33 b	108.33 ab	10.81 b	11.13 a	2.6 ab
60% deficit irrigation	300.83 c	101.67 bc	7.35 c	7.72 b	2.18 bc

Letters that differ indicate a significant difference between means (P<0.05).

تأثیر رژیم‌های مختلف کم‌آبیاری بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به برخی از شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه شامل کلروفیل کل، کارتنوئید، کلروفیل a و b نشان داد که این شاخص‌ها، تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری قرار داشتند. به‌طوری‌که با افزایش سطح تنش ناشی از کم‌آبیاری، تغییرات معنی‌داری در سه شاخص اول مشاهده شد ($P<0.01$)، اما تغییرات کلروفیل b برگ‌ها، معنی‌دار نبود (جدول ۱۰).

جدول ۱۰- آنالیز واریانس سطوح مختلف رژیم‌های آبیاری بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک درختان کهور امریکایی در شرایط لایسیمتری

Table 10. Analysis of variance of different levels of irrigation regimes on some physiological indicators of *Prosopis juliflora* trees under lysimeter conditions

Source	Df	Mean square			
		Chlorophyll a (mg/g FW)	Chlorophyll b (mg/g FW)	Total chlorophyll (mg/g FW)	Carotenoids (mg/g FW)
Model	2	0.288**	0.004ns	0.334**	0.008**
Error	6	0.007	0.001	0.009	0.001
Corrected total	9				

**: Significant at p<0.01; ns: non-significant

مقایسه میانگین داده‌ها در خصوص تأثیر تیمارهای مختلف رطوبتی بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک نشان داد که کلروفیل کل که اغلب مربوط به حضور بیشتر کلروفیل a است، در اثر تنش خشکی افزایش یافت. هرچند از این نظر، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای ظرفیت زراعی و ۳۰ درصد کم‌آبیاری مشاهده نشد. شرایط یکسانی را برای کلروفیل a می‌توان گزارش کرد (جدول ۷). در خصوص میزان کارتنوئید نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد. بیشترین مقدار کلروفیل کل، کلروفیل a و کارتنوئید مربوط به تیمار تنش شدید خشکی و یا ۶۰ درصد کم‌آبیاری بود (جدول ۱۱).

جدول ۱۱- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف رژیم‌های آبیاری بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک اندام‌های رویشی کهور آمریکایی

Table 11. Comparison of the mean effect of different irrigation regimes on some physiological indices of the vegetative organs of *Prosopis juliflora* trees.

Deficit irrigation regime	Index			
	Total chlorophyll (mg/g FW)	Chlorophyll a (mg/g FW)	Chlorophyll b (mg/g FW)	Carotenoids (mg/g FW)
Field capacity	1.3 b	0.966 b	7.424 a	0.333 b
30% deficit irrigation	1.433 b	1. 033 b	6.201 a	0.339 b
60% deficit irrigation	1.933 a	1.533 a	7.552 a	0.425 a

Letters that differ indicate a significant difference between means (P<0.05).

تأثیر سطوح مختلف رژیم کم‌آبیاری بر غلظت عناصر ازت، فسفر، پتاسم، سدیم و نسبت سدیم به پتاسیم در برگ

براساس نتایج جدول ۱۲، تجزیه واریانس داده‌های مربوط به رژیم آبیاری بر غلظت عناصر ازت، فسفر، پتاسیم، سدیم و نسبت سدیم به پتاسیم در برگ نشان داد که در همه موارد ذکرشده به‌غیر از درصد فسفر برگ، اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف آبیاری وجود داشت ($P<0.05$).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که افزایش سطح تنش خشکی از طریق کم‌آبیاری سبب تغییر در میزان و درنتیجه، درصد عناصر معدنی مورد اندازه‌گیری شد. ازت، فسفر و پتاسیم و سدیم، رفتار متفاوتی را در برابر تنش خشکی از خود نشان دادند. در همه موارد با افزایش سطح تنش خشکی، غلظت این عناصر در برگ افزایش یافت. هرچند اختلاف معنی‌داری بین تیمار ظرفیت زراعی و ۳۰ درصد کم‌آبیاری مشاهده نشد. بیشترین مقادیر شاخص‌های مورد اندازه‌گیری در این خصوص مربوط به ۶۰ درصد کم‌آبیاری بود. نسبت پتاسیم به سدیم که شاخص مهمی در ارزیابی میزان تحمل به تنش خشکی است، در تیمار ظرفیت زراعی افزایش معنی‌داری داشت. اگرچه با افزایش سطح تنش خشکی، مقدار این نسبت کاهش یافت، با این وجود بین دو سطح کم‌آبیاری،

اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۱۳).

جدول ۱۲- آنالیز واریانس سطوح مختلف رژیم آبیاری بر غلظت عناصر ازت، فسفر، پتاسیم، سدیم و نسبت سدیم به پتاسیم برگ درختان کهور آمریکایی

Table 12. Analysis of variance of different levels of irrigation regime on the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, sodium and sodium to potassium ratio of *Prosopis juliflora* leaves

		Mean square				
Source	Df	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Sodium	Sodium to Potassium Ratio
Model	2	0.567*	0.001ns	0.047*	0.039*	0.040*
Error	6	0.089	0.001	0.005	0.006	0.006
Corrected total	9					

*: Significant at p<0.05; ns: non-significant

جدول ۱۳- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف رژیم آبیاری بر غلظت عناصر ازت، فسفر، پتاسیم، سدیم و نسبت پتاسیم به سدیم در برگ درختان کهور آمریکایی

Table 13. Comparison of the mean effect of different irrigation regimes on the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, and the potassium-to-sodium ratio in the leaves of *Prosopis juliflora* trees.

Deficit irrigation regime	Index				
	N content (%)	P content (%)	K content (%)	Na content (%)	(K/Na)
Field capacity	2.98 b	0.16 a	0.73 b	0.053 b	14.32 a
30% deficit irrigation	3.15 b	0.16 a	0.63 b	0.093 b	7.11 b
60% deficit irrigation	3.18 b	0.18 a	0.88 a	0.26 a	3.85 b

Letters that differ indicate a significant difference between means (P<0.05).

بحث و نتیجه‌گیری

با اعمال سطوح مختلف کم‌آبیاری شامل ظرفیت زراعی، ۳۰ درصد و ۶۰ درصد کم‌آبیاری در طول دو سال زراعی و در شرایط لایسیمتری در اقلیم گرم و خشک، مقدار تبخیر تعرق حاصل از این بررسی در سطوح آبیاری ذکرشده به‌ترتیب ۶۳۳۶، ۴۳۸۷ و ۲۴۲۲ لیتر به‌ازای هر درخت در طول دو سال به‌دست آمد. این موضوع نشان داد که با کاهش مصرف آب به میزان ۶۱/۷ درصد از سطح ظرفیت زراعی (تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری)، گیاه می‌تواند تنش خشکی را تحمل کند و با سازوکارهای مختلف به این شرایط سازگار شود. سطوح مختلف کم‌آبیاری، اثرات متفاوتی بر تولید ماده خشک اندام‌هوایی و ریشه داشتند. هم‌راستا با این نتایج، یافته‌های پژوهش‌های متعددی بر کاهش وزن خشک همه اندام‌های گیاه در اثر افزایش تنش خشکی دلالت داشتند (Abdalla & El-Khoshiban, 2007). کاهش معنی‌دار ماده خشک مؤلفه‌های مختلف درختانِ تحت تیمار ازجمله برگ، انشعاب‌های اصلی و فرعی و ریشه در اثر افزایش تنش خشکی بیانگر تحت تأثیر قرار گرفتن همه اجزا گیاه به این پدیده محیطی است. با افزایش سطح تنش خشکی از ظرفیت زراعی خاک به ۶۰ درصد کم‌آبیاری، وزن خشک اندام هوایی ۶۰/۸ درصد، وزن خشک ریشه ۵۴/۲ درصد و وزن خشک کل (اندام هوایی و ریشه) ۶۰/۱ درصد کاهش یافت. شاخص‌های ریخت‌شناسی نیز شامل قطر تاج با کاهش ۲۷/۸ درصد، ارتفاع با کاهش ۲۲/۸ درصد، حجم و سطح تاج نیز به‌ترتیب با کاهش ۵۸/۹ و ۳۷/۵ درصد مواجه شدند. تغییر همه این شاخص‌ها، معنی‌داری بود.

تنش خشکی سبب کاهش وزنی ریشه در شرایط لایسیمتری شد. وزن خشک ریشه در تیمار ظرفیت زراعی، ۲/۶۴ کیلوگرم بود، درحالی‌که این مقدار در تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری به ۱/۲۱ کیلوگرم کاهش یافت. علی‌رغم کاهش

وزن ریشه در اثر اعمال تنش خشکی، تغییرات نسبت وزن خشک اندام هوایی به ریشه در همه تیمارها، کم و غیرمعنی‌دار بود (۲/۲ در تیمار ظرفیت زراعی در مقایسه با ۲/۷ در تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری). Rad و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۶) در شرایط مشابه و برای گونه‌های *Eucalyptus microtheca* F.Muell.، *E. sargentii* Maiden و *E. camaldulensis* Dehnh. مقدار ریشه تولیدشده برای گیاهان دوساله (در شرایط ظرفیت زراعی) را به‌ترتیب ۱/۶۶، ۰/۸۱ و ۴/۲۸ کیلوگرم وزن خشک گزارش کردند. به‌نظر می‌رسد علی‌رغم اینکه کهور آمریکایی به‌عنوان گونه‌ای آب‌یاب یا فراتوفیت معرفی شده است (Hamza, 2010)، در این شرایط، مقدار ریشه کمتری در مقایسه با *E. camaldulensis* داشت و در سطوح مختلف کم‌آبیاری، کمتر تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت. در گونه‌های آب‌یاب با وجود تنش خشکی و عدم دسترسی به آب، تولید ریشه کند می‌شود. از این طریق، رشد اندام هوایی کاهش می‌یابد و گیاه در تعادلی بین اندام هوایی و ریشه، با شرایط خشک سازگار می‌شوند. گونه‌های آب‌یاب ازجمله کهور آمریکایی، تمایل زیادی به تولید ریشه برای برداشت آب بیشتر در خاک‌های با رطوبت زیاد (بالا بودن سطح سفره‌های زیرزمینی) دارند. این امر می‌تواند سبب اتلاف آب بیشتر از طریق افزایش تعرق شود (Hamza, 2010). کهور آمریکایی می‌تواند در اراضی مرتعی ساحلی تا ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا پراکنش یابد و از شرایط مطلوب برای برداشت و مصرف آب استفاده کند (Hamza, 2010). ضمن اینکه مقاومت آن به اراضی خشک و بسیار گرم، زیاد است و با پراکنش بارندگی ۱۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر سازگار می‌شود. Singh و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که این گیاه می‌تواند در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک با تولید ریشه‌های عمیق از منابع آب زیرزمینی استفاده و نیاز آبی خود را تأمین کند.

نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری شاخص‌های مربوط به روابط آبی مانند درصد رطوبت برگ، پتانسیل آبی برگ و محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های قابل‌اندازه‌گیری نشان داد که این عوامل تحت تأثیر معنی‌دارِ سطوح مختلف کم‌آبیاری قرار گرفتند. با افزایش سطح تنش خشکی ناشی از کم‌آبیاری به ۶۰ درصد، پتانسیل آبی گیاه افزایش یافت. در مقابل، درصد رطوبت برگ و محتوای نسبی آب برگ کم شد. علی‌رغم افزایش پتانسیل آبی در تیمار ۳۰ درصد کم‌آبیاری نسبت به تیمار ظرفیت زراعی، درصد رطوبت برگ و نیز محتوای نسبی آب برگ، تغییر معنی‌داری را نشان ندادند. این موضوع نشان می‌دهد که گیاه قادر است با افزایش پتانسیل آبی خود تا ۳۱- بار، آب را به خوبی از خاک دریافت کند و با ذخیره آن در اندام‌های هوایی، فعالیت‌های فیزیولوژیکی خود را در شرایط مطلوب حفظ کند. افزایش سطح تنش خشکی با کاهش بیشتر آب خاک سبب افزایش بیشتر پتانسیل آبی گیاه تا ۴۱- بار شد. این امر، تأثیر قابل‌توجه‌ای بر افزایش آب برگ نداشت، اما کاهش شدید رطوبت برگ و به‌دنبال آن، کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ را در پی داشت. این نتایج با محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای مختلف شوری که Fall و همکاران (۲۰۱۶) برای کهور آمریکایی گزارش کردند، مغایرت دارد. براساس یافته‌های پژوهش مذکور، محتوای نسبی آب برگ در تیمار بدون شوری تا ۹۰/۷ درصد افزایش یافت. هرچند در این خصوص، اختلاف معنی‌داری با سطوح دیگر شوری گزارش نشد. Rodríguez و همکاران (۲۰۱۲) حفظ آب برگ به‌ویژه حفظ محتوای نسبی آب برگ‌ها را را به‌عنوان سازوکاری معرفی کردند که شامل کاهش هدایت روزنه‌ای و کنترل اتلاف آب از طریق تعرق و حفظ تورژسانس برگ، بسته شدن کامل روزنه‌ها در شرایط تنش شدید، تطابق اسمزی از طریق تجمع مواد اسمولیتی در درون سلول‌ها و حفظ تورژسانس سلول‌ها و درنهایت، افزایش محتوای نسبی آب آپوپلاست است. حفظ محتوای نسبی آب برگ از طریق بهبود شرایط فیزیولوژیکی گیاه و نیز افزایش پتانسیل آب و برداشت آب بیشتر از خاک از سازوکارهای موفق کهور آمریکایی در مقابله با تنش خشکی محسوب می‌شود. در شرایط تنش خشکی، محتوای نسبی آب برگ با هدایت روزنه‌ای همبستگی دارد. تنزل مقدار آن به کاهش در هدایت روزنه‌ای و جذب دی‌اکسیدکربن منجر می‌شود و درنهایت، افت فتوسنتز و

کاهش رشد را به‌دنبال دارد (Mailer & Ayton, 2011).

علی‌رغم تغییر قابل‌توجه در میزان تبخیرتعرق تیمارهای مختلف، اختلاف معنی‌داری در میزان کارایی مصرف آب مشاهده نشد. درمجموع می‌توان بیان داشت که کهور آمریکایی قادر است به‌ازای هر لیتر آبی که مصرف می‌کند، ۱/۶ گرم ماده خشک (ریشه و اندام هوایی) تولید کند. اگرچه با افزایش سطح تنش خشکی، کارایی مصرف آب آن افزایش اندکی داشت، با این وجود در بسیاری از گزارش‌ها تأکید شده است که تنش خشکی سبب بهبود کارایی مصرف آب می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش پیش‌رو با برخی از پژوهش‌های انجام‌شده مغایرت دارد. Rajak و همکاران (۲۰۲۵) با بیان اینکه کاهش سطح بارندگی در مناطق پراکنش کهور آمریکایی می‌تواند سبب بهبود کارایی مصرف آب، نیتروژن برگ، محتوای ماده خشک برگ و طول ریشه شود، تأکید کردند که این مهم می‌تواند نقش اساسی را در پراکنش گسترده گیاه مذکور داشته باشد. با افزایش سطح تنش خشکی به‌دلیل بسته شدن بیشتر روزنه‌ها و کاهش اتلاف آب، کارایی مصرف آب از طریق جذب متعادل CO_2 بهبود می‌یابد. به‌نظر می‌رسد این موضوع در خصوص همه گیاهان عمومیت ندارد. Rad و همکاران (۲۰۱۶)، میانگین کارایی مصرف آب را برای دو گونه *Eucalyptus microtheca* و *E. sargentii* به‌ترتیب ۱/۶۹ و ۱/۷۴ گرم ماده خشک به‌ازای هر لیتر آب مصرف‌شده در شرایط لایسیمتر گزارش کردند. آن‌ها بیان کردند که کاهش کارایی مصرف آب با وجود رطوبت کافی در خاک دلالت بر باز بودن روزنه‌ها و اتلاف بیشتر آب از طریق تعرق دارد. کهور آمریکایی را می‌توان به‌عنوان گیاهی مقاوم به خشکی در این خصوص نام برد که با مقادیر متفاوتی از رطوبت موجود در خاک، امکان تولید ماده خشک برای آن میسر است. هنگامی که کهور آمریکایی در شرایط کاهش فشار بخار اشباع هوا (به‌عنوان تنش رطوبت نسبی هوا) قرار می‌گیرد، جذب CO_2 و درنتیجه، رشد و تولید ماده خشک آن کاهش می‌یابد (مشابه آنچه در خصوص کمبود رطوبت خاک رخ می‌دهد). به‌دنبال آن، کارایی مصرف آب کم می‌شود. در این پژوهش مشخص شد که مقدار زیاد آب سبب توسعه بیشتر اندام هوایی و ریشه می‌شود، سطح تعرق را افزایش می‌دهد و آب بیشتری تلف می‌شود، بدون اینکه نقشی در بهبود کارایی مصرف آب داشته باشد. در همین شرایط، گیاه توانسته است با کمبود رطوبت خاک، سازوکارهای مختلف سازگاری را فعال کند و ضمن محدود کردن توسعه رشد، آسیب به اندام‌های رویشی را کنترل و کارایی مصرف آب را در حد بهینه حفظ کند.

با بررسی شاخص کلروفیل کل و اجزای آن (a و b) و نیز کارتنوئید مشخص شد که با افزایش سطح تنش خشکی، بهبود معنی‌داری در میزان آن‌ها اتفاق افتاد، اما اختلاف معنی‌داری میان تیمار ظرفیت زراعی با ۳۰ درصد کم‌آبیاری مشاهده نشد. این موضوع نشان داد که کهور آمریکایی با سازوکار حفظ رطوبت در برگ‌های خود، میزان فتوسنتز را در حد مطلوبی حفظ و با خشکی مقابله می‌کند. سهم کلروفیل b در این راستا کم بود. این گیاه اغلب با مدیریت تولید کلروفیل a و به‌احتمال زیاد رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی دیگر، این روند را طی می‌کند. کارتنوئید نیز با افزایش سطح تنش خشکی بهبود یافت، اما اختلاف معنی‌داری بین دو سطح ظرفیت زراعی و ۳۰ درصد کم‌آبیاری مشاهده نشد. در منابع تأکید شده است که همبستگی محتوای نسبی آب برگ با هدایت روزنه‌ای و کاهش مقدار آن در شرایط تنش خشکی سبب کاهش جذب دی‌اکسیدکربن و درنهایت، افت فتوسنتز می‌شود (Mailer & Ayton, 2011). درمجموع طبق نتایج پژوهش پیش‌رو، محتوای نسبی آب برگ در درختان کهور آمریکایی در سطح کمی (بیشینه ۶۳/۵ درصد و کمینه ۵۵/۳ درصد) بود. گیاه می‌تواند در مقدار کم آب برگ، سطح فتوسنتز خود را حفظ کند و به ذخیره کربوهیدرات و شاخص‌های مؤثر دیگر بر زنده‌مانی و رشد بپردازد. این موضوع از طریق اندازه‌گیری درصد ماده خشک برگ در سطوح مختلف رطوبتی خاک به اثبات رسید. میزان ماده خشک برگ از ۴۳ درصد در تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری تا ۳۸ درصد در تیمار ۳۰ درصد کم‌آبیاری در نوسان بود. براساس نتایج گزارش‌شده توسط Khaleghi و همکاران (۲۰۱۲)، تنش خشکی سبب کاهش میزان کلروفیل کل (a و b) در زیتون شد که تأثیر آن بر کاهش

کلروفیل a به مراتب بیشتر از کلروفیل b بود. به عبارتی، مقاومت کلروفیل b در برابر تنش‌های اکسیداتیو و ازجمله تنش خشکی به‌مراتب بیشتر از کلروفیل a بود. این امر می‌تواند به بهبود نسبت کلروفیل b به کلروفیل a در شرایط تنش خشکی و سهم بیشتر آن در میزان کلروفیل کل منجر شود. به‌طورکلی، تنش خشکی، تأثیر قابل‌توجه‌ای بر کاهش غلظت رنگ‌دانه‌های کلروفیل ازجمله کلروفیل a، b و کارتنوئید دارد (Jaleel *et al.*, 2009). تنش خشکی می‌تواند باعث ایجاد تنش اکسیداتیو شود (Chaves & Oliveira, 2004). این فرایند می‌تواند نقش ویژه‌ای در تخریب سامانه‌های فتوسنتزی، تخریب غشای سلولی و کلروپلاست، کاهش مقدار رنگ‌دانه‌های کلروفیل a و b و متعاقب آن، کاهش توانایی فتوسنتز ایفا کند. رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در رقم‌های حساس به تنش خشکی و شوری، بیشتر از رقم‌های مقاوم آسیب می‌بینند که کاهش چشمگیر در میزان فتوسنتز را به‌دنبال خواهد داشت (Yordanov *et al.*, 2000). باتوجه‌به داده‌های به‌دست‌آمده در این خصوص و رفتارهای فیزیولوژیک کهور آمریکایی در مواجه با خشکی به‌نظر می‌رسد که این گیاه، تحمل زیادی نسبت به تنش خشکی دارد و می‌تواند با بهبود شرایط فیزیولوژیک با آن مقابله کند. ضمن اینکه بخش قابل‌توجهی از ذخیره آب در سرشاخه‌های جوان صورت می‌گیرد که در شرایط سخت در اختیار برگ‌ها قرار می‌دهند.

افزایش سطح تنش خشکی، اختلاف معنی‌داری را در میزان عناصری مانند نیتروژن و فسفر نشان نداد. هرچند افزایش پتاسیم و سدیم برگ‌ها مشاهده شد. کاهش معنی‌دار نسبت پتاسیم به سدیم در اثر تنش خشکی مورد توجه است. با این شرایط می‌توان بیان داشت که از سازوکارهای مقاومت به خشکی در کهور آمریکایی، کنترل فرایند تخریب سامانه‌های فتوسنتزی، حفظ و ذخیره‌سازی مواد پروتئینی، ذخیره‌سازی و مدیریت عناصری مانند سدیم برای بهبود پتانسیل اسمزی سلول، جذب بیشتر آب از خاک و نیز جذب عناصری مانند پتاسیم برای ایجاد تعادل در تبادلات سلولی و جلوگیری از تخریب غشای سلولی است. افزایش چشم‌گیر و چندبرابری میزان سدیم و پتاسیم برگ در تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری دلالت بر سازگاری این گیاه به شرایط شور دارد. آبیاری درختان موجود در لایسیمترها با شوری هفت دسی‌زیمنس بر متر و تجمع نمک در اطراف ریشه (علی‌رغم آب‌شویی) بیانگر مقاومت زیاد این گونه به شوری است. سازو کار جذب سدیم و انباشت آن در سلول‌های خود برای بهبود شرایط اسمولیتی سلول و به عبارتی، تطابق اسمزی برای جذب آب بیشتر در شرایط خشکی و شوری خاک از راهکارهای سازگاری به این شرایط در کهور آمریکایی است. Fall و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی اثر سطوح مختلف شوری آب آبیاری بر کهور آمریکایی گزارش کردند که با افزایش شوری، میزان سدیم برگ و ریشه افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان پتاسیم در اندام‌های ذکرشده کاهش یافت. این امر به کاهش نسبت پتاسیم به سدیم در برگ و ریشه منجر شد. با افزایش پتانسیل اسمزی خاک درنتیجه افزایش املاح خاک، جذب سدیم توسط ریشه‌ها افزایش می‌یابد. این امر موجب می‌شود تا رشد و فعالیت‌های متابولیکی گیاه تحت تأثیر قرار بگیرد و راندمان فتوسنتزی کاهش یابد (Deinlein *et al.*, 2014). موضوعی که در این پژوهش و برای کهور آمریکایی مشاهده نشد. یکی از دلایل این نتیجه، آستانه تحمل کهور آمریکایی به شوری است. به‌نظر می‌رسد که سطح شوری آب آبیاری (۷/۲ دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط آزمایش، کمتر از آستانه تحمل به شوری برای این گیاه باشد. با افزایش غلظت سدیم در بافت‌ها، میزان پتاسیم کم می‌شود که این امر سبب کاهش نسبت پتاسیم به سدیم به‌عنوان شاخص مناسب برای ارزیابی تحمل به شوری خواهد شد (Hauser & Horie, 2010; Byrt *et al.*, 2014). کهور آمریکایی در شرایط رطوبت بیشتر خاک با جذب کمتر سدیم و پتاسیم، نسبت بیشتری از این عناصر را نشان داد. در مغایرت با نتایج پژوهش پیش‌رو، Rajak و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که ذخیره بیشتر نیتروژن برگ در شرایط رویشی با بارندگی کمتر ممکن است اتفاق افتد.

بسیاری از منابع، کهور آمریکایی را به‌عنوان گونه‌ای مهاجم معرفی کرده‌اند و بر مضرات محیط‌زیستی آن ازجمله

تخلیه آب‌های زیرزمینی، حذف گونه‌های بومی و تغییر ساختار و ترکیب پوشش گیاهی تأکید دارند (Imani *et al*., 2018; Heshmati *et al*., 2019; Howari *et al*., 2022; Izadi *et al*., 2022)، با این وجود از دهه ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ به‌دلیل کاربردهای متعدد آن در امر تثبیت شن و بیابان‌زدایی، کنترل ریزگردها، تولید مواد سوختی در مناطق کمتر بهره‌مند، تولید شهد برای پرورش زنبور عسل، تولید سوخت زیستی و گیاه‌پالایی، با سرعت زیاد مورد توجه قرار گرفته است و استفاده از آن همچنان ادامه دارد (Askari *et al*., 2019; Amiri *et al*., 2023; de Lemos *et al*., 2023; Eshetu, *et al*., 2024; Prasath & Mohanraj, 2024). سطح پراکنش این گونه در سال‌های اخیر در سراسر جهان افزایش چشمگیری یافته است و در اراضی تخریب‌شده و مستعد فرسایش بادی، گونه‌ای امیدبخش به‌حساب می‌آید. درمجموع، براساس نتایج پژوهش پیش‌رو، اختلاف معنی‌داری در بسیاری از شاخص‌های مورد اندازه‌گیری بین تیمارهای ظرفیت زراعی و ۳۰ درصد کم‌آبیاری مشاهده نشد. همچنین، این گیاه در شرایط محدودیت شدید آب و افزایش تنش خشکی، سازوکارهای متعددی برای سازگاری به شرایط خشک خاک به کار می‌گیرد، بنابراین در مناطقی با محدودیت‌های رطوبتی و حتی شوری ، کهور آمریکایی می‌تواند گزینه مناسبی برای فعالیت‌های تثبیت شن و بیابان‌زدایی باشد. البته، پژوهش‌های بیشتری در این خصوص پیشنهاد می‌شود. ویژگی‌های خاص مقاومت به خشکی و شوری در این گونه باعث می‌شود تا توانایی زیادی در پراکنش و استقرار داشته باشد. درنتیجه، این گیاه می‌تواند با گونه‌های بومی در جذب آب و مواد غذایی رقابت کند و به‌عنوان گونه‌ایی مهاجم مطرح شود. توجه به نکات منفی آن ازجمله توانایی زیاد در پراکنش ناخواسته (تهاجمی بودن آن) و رقابت با گونه‌های بومی، بسیار ضروری است.

References

- Abdalla, M.M. and El-Khoshiban, N.H., 2007. The influence of water stress on growth, relative water content, photosynthetic pigments, some metabolic and hormonal contents of two *Triticium aestivum* cultivars. Journal of Applied Sciences Research, 3(12): 2062-2074.
- Amiri, M., Shafiezadeh, M., Tarkesh Esfahani, M. and Moslemi, S.M., 2023. Ensemble modeling of the potential invasion of *Prosopis juliflora* (SW.) DC in the Makuran region. Environmental Sciences, 21(1): 205-224 (In Persian with English summary).
- Arndt, S.K., Livesley, S.J., Merchant, A., Bleby, T.M. and Grierson, P.F., 2008. Quercitol and osmotic adaptation of field-grown Eucalyptus under seasonal drought stress. Plant, Cell and Environment, 31(7): 915-924.
- Askari, F., Yousef-Elahi, M. and Fazaeli, H. 2019. Chemical composition and digestibility of *Prosopis juliflora* pods and leaves and effect of pods in ration on the performance of fattening Tali kids. Journal of Ruminant Research, 7(2): 1-16 (In Persian with English summary).
- Askari, Y., Behnamfar, K. and Sadeghi, S.M., 2025. Distribution of *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. Journal of Iran Nature, 9(6): 53-60 (In Persian with English summary).
- Byrt, C.S., Xu, B., Krishnan, M., Lightfoot, D.J., Athman, A., Jacobs, A.K., ... and Gilliham, M., 2014. The Na^+ transporter, TaHKT1;5-D, limits shoot Na^+ accumulation in bread wheat. The Plant Journal, 80(3): 516-526.
- Chaves, M.M. and Oliveira, M.M., 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. Journal of Experimental Botany, 55(407): 2365-2384.
- Deinlein, U., Stephan, A.B., Horie, T., Luo, W., Xu, G. and Schroeder, J.I., 2014. Plant salt-tolerance mechanisms. Trends in Plant Science, 19(6): 371-379.
- de Lemos, A.B.S., Chaves, G., Ribeiro, P.P.C. and da Silva Chaves Damasceno, K.S.F., 2023. *Prosopis juliflora*: nutritional value, bioactive activity, and potential application in human nutrition. Journal of the Science of Food and Agriculture, 103(12): 5659-5666.
- Eshetu, A.A., 2024. A valuable or a curse resource? A systematic review on expansion, perception of local community, benefits and side effects of *Prosopis juliflora*. Frontiers in Conservation Science, 5: 1491618.

- Fall, D., Bakhoum, N., Fall, F., Diouf, F., Ly, M.O., Diouf, M., ... and Diouf, D., 2016. Germination, growth and physiological responses of *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC to salinity stress in greenhouse conditions. African Journal of Biotechnology, 15(37): 2017-2027
- Garau, A.M., Lemcoff, J.H., Ghersa, C.M. and Beadle, C.L., 2008. Water stress tolerance in *Eucalyptus globulus* Labill. subsp. *maidenii* (F. Muell.) saplings induced by water restrictions imposed by weeds. Forest Ecology and Management, 255: 2811-2819.
- George, S., Manoharan, D., Li, J., Britton, M. and Parida, A., 2017. Transcriptomic responses to drought and salt stress in desert tree *Prosopis juliflora*. Plant Gene, 12: 114-122.
- Gul, B., Weber, D.J. and Khan, M.A., 2000. Effect of salinity and planting density on physiological responses of *Allenrolfea occidentalis*. Western North American Naturalist, 60(2): 188-197.
- Hamza, N.B., 2010. Genetic variation within and among three invasive *Prosopis juliflora* (Leguminosae) populations in the River Nile State, Sudan. International Journal of Genetics and Molecular Biology, 2(5): 92-100.
- Hauser, F. and Horie, T., 2010. A conserved primary salt tolerance mechanism mediated by HKT transporters: a mechanism for sodium exclusion and maintenance of high K^+/Na^+ ratio in leaves during salinity stress. Plant, Cell and Environment, 33(4): 552-565.
- Heshmati, I., Khorasani, N., Shams-Esfandabad, B. and Riazi, B., 2019. Forthcoming risk of *Prosopis juliflora* global invasion triggered by climate change: implications for environmental monitoring and risk assessment. Environmental Monitoring and Assessment, 191(2): 72.
- Howari, F.M., Sharma, M., Nazzal, Y., El-Keblawy, A., Mir, S., Xavier, C.M., ... and Alaydaroos, F., 2022. Changes in the invasion rate of *Prosopis juliflora* and its impact on depletion of groundwater in the northern part of the United Arab Emirates. Plants, 11(5): 682.
- Hussain, M.I., Shackleton, R., El-Keblawy, A., González, L. and Trigo, M.M., 2021. Impact of the invasive *Prosopis juliflora* on terrestrial ecosystems: 223-278. In: Lichtfouse, E. (Ed.). Sustainable Agriculture Reviews 52. Springer, Cham, 460p.
- Imani, F., Moradi, M. and Basiri, R., 2018. Biological diversity of vegetation in the dunes after two decades of consolidation activities and afforestation (Case Study: Region Magran, Susa). Journal of Plant Research, 31(1): 12-23 (In Persian with English summary).
- Izadi, F., Chamani, A. and Zamani-Ahmadmahmoodi, R., 2022. Quantification of the effects of the invasion of mesquite (*Prosopis juliflora*) on native vegetation in Southern Iran. Environmental and Interdisciplinary Development, 7(77): 1-12 (In Persian with English summary).
- Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H.J., Somasundaram, R.A. and Panneerselvam, R., 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. International Journal of Agriculture and Biology, 11(1): 100-105.
- Khaleghi, E., Arzani, K., Moallemi, N. and Barzegar, M., 2012. Evaluation of chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters and relationships between chlorophyll a, b and chlorophyll content index under water stress in *Olea europaea* cv. Dezful. World Academy of Science, Engineering and Technology, 68: 1154-1157.
- Lamers, J.P.A., Khamzina, A. and Worbes, M., 2006. The analyses of physiological and morphological attributes of 10 tree species for early determination of their suitability to afforest degraded landscapes in the Aral Sea Basin of Uzbekistan. Forest Ecology and Management, 221: 249- 259.
- Li, C., Han, H., Ablimiti, M., Liu, R., Zhang, H. and Fan, J., 2022. Morphological and physiological responses of desert plants to drought stress in a man-made landscape of the Taklimakan desert shelter belt. Ecological Indicators, 140: 109037.
- Madouh, T.A., 2022. Eco-physiological responses of native desert plant species to drought and nutritional levels: case of Kuwait. Frontiers in Environmental Science, 10: 785517.
- Mailer, R. and Ayton, J., 2011. Effect of irrigation and water stress on olive oil quality and yield based on a four year study. Acta Horticulturae, 888: 63-72.
- Martinez, J.P., Silva, H., Ledent, J.F. and Pinto, M., 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). European Journal of Agronomy, 26: 30-38.
- Masalo, I. and Oca, J., 2020. Evaluation of a portable chlorophyll optical meter to estimate chlorophyll concentration in the green seaweed *Ulva ohnoi*. Journal of Applied Phycology, 32(6): 4171-4174.
- Mohanta, T.K., Mohanta, Y.K., Kaushik, P. and Kumar, J., 2024. Physiology, genomics, and evolutionary aspects of desert plants. Journal of Advanced Research, 58: 63-78.
- Nadjafi–Tireh–Shabankareh, K., Jalili, A. and Asadpour, R., 2014. Investigation on invasion effects

of *Prosopis juliflora* (SW.) DC. Arid Biome Scientific and Research Journal, 4(1): 54-64 (In Persian with English summary).
- Prasath, R.V.A. and Mohanraj, R., 2024. In situ bioaccumulation of metals by *Prosopis juliflora* and its detoxification potential at the metal contaminated sites. Science of The Total Environment, 951: 175715.
- Rad, M.H., Asareh, M.H. and Soltani, M., 2016. The relationship between root development and drought resistance of two *Eucalyptus* species (*Eucalyptus microtheca* Muell and *Eucalyptus sargentii* Maiden). Iranian Journal of Forest, 8(3): 393-404 (In Persian with English summary).
- Rad, M.H., Asareh, M.H., Soltani, M. and Tajamoliyan, M., 2013. Determination of water requirement, crop coefficient and water use efficiency of two eucalyptus species under the lysimetry experiments. Iranian Water Research Journal, 7(1): 71-78 (In Persian with English summary).
- Rajak, P., Afreen, T., Raghubanshi, A.S. and Singh, H., 2025. Rainfall fluctuation causes the invasive plant *Prosopis juliflora* to adapt ecophysiologically and change phenotypically. Environmental Monitoring and Assessment, 197(1): 26.
- Rodríguez, P., Mellisho, C.D., Conejero, W., Cruz, Z.N., Ortuno, M.F., Galindo, A. and Torrecillas, A., 2012. Plant water relations of leaves of pomegranate trees under different irrigation conditions. Environmental and Experimental Botany, 77: 19-24.
- Sadeghi, M., Behnamfar, K., Jafari, A., Sartavi, K., Farrar, N., Golestaneh, S.R. and Kazeruni, H., 2024. Distribution of American Mesquite (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC) in the Saharo-Sindian region of Iran-Bushehr province. Journal of Iran Nature, 9(2): 31-36 (In Persian with English summary).
- Sadeghzadeh, J., Kartoolinejad, D., Younesi Kordkheili, H., Zolfaghari, A.A. and Nikouee, E., 2024. Inefficacy of zinc oxide nanoparticles in creating resistance to drought stress in one-year seedlings of saltbush (*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 31(4): 292-308 (In Persian with English summary).
- Saglam, A., Kadioglu, A., Terzi, R. and Saruhan, N., 2008. Physiological changes in them in post-stress emerging *Ctenanthe setosa* plants under drought conditions. Russian Journal of Plant Physiology, 55(1): 48-53.
- Singh, P., Ramkumar, K.R. and Hasija, T., 2024. Assessing the impact of *Prosopis juliflora* on water level depletion: a comprehensive review. Proceedings of 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Kamand, India. 24-28 Jun. 2024: 1-6.
- Westwood, M.N., 1987. Tree size control as it relates to high density orchard system. Proceedings of the Washington State Horticultural Association, 65: 92-94.
- Yin, C., Wang, X., Duan, B., Luo, J. and li, C., 2005. Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric *Populus* species as affected by water stress. Environmental and Experimental Botany, 53(3): 315-322.
- Yordanov, I., Velikova, V. and Tsonev, T., 2000. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. Photosynthetica, 38(2): 171-186.