

## پاسخ فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و تغییرات عناصر برگ علف لیمو (*Cymbopogon citratus*) به برخی الیستورها در شرایط تنش شوری

فاطمه سلیمی، فرزین عبدالحی\* و علیرضا یآوری

گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰)

### چکیده

محلول پاشی الیستورهای زیستی و هورمونی از جمله کیتوزان و آبسیزیک اسید (ABA) جهت تعدیل اثرات منفی تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری در گیاهان مختلف توصیه شده است. به همین منظور این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل با دو عامل شوری (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار با استفاده از NaCl) و محلول پاشی سطوح مختلف الیستور (صفر، کیتوزان ۵۰، کیتوزان ۱۰۰، اسید آبسیزیک ۱۰، اسید آبسیزیک ۵ میلی‌گرم در لیتر) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در دانشگاه هرمزگان بر علف لیمو تحت تنش شوری انجام گرفت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شوری اثر منفی بر صفات رویشی، فیزیولوژیک و ساختار یونی علف لیمو گذاشت و شوری ۱۰۰ میلی‌مولار باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک کل بوته، سطح برگ به ترتیب به میزان ۲۰/۷۱، ۱۲/۴۰ و ۲۷/۷۶ درصد و افزایش معنی‌دار  $\text{Na}^+$  برگ به میزان ۳۷/۶۰ درصد در مقایسه با شاهد بدون محلول پاشی شد. در شرایط شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، محلول پاشی کیتوزان ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش وزن تر اندام هوایی، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید به ترتیب به میزان ۲۰/۸۶، ۲۲۹/۵، ۱۰۵/۳، ۲۰۶/۸ و ۱۹۶/۲ درصد و محلول پاشی ABA ۱۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش وزن تر کل بوته و تعداد پنجه به ترتیب به میزان ۲۲/۹ و ۸۵/۰ درصد در مقایسه با شاهد شد. تنش شوری از طریق تحریک تولید پراکسید هیدروژن باعث افزایش پراکسیداسیون چربی غشا و در نتیجه افزایش تولید مالون دی‌آلدهید شد در حالی که الیستورها با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی پراکسیداسیون چربی و در نتیجه تولید مالون دی‌آلدهید را محدود کردند در این بین کیتوزان ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و ABA ۱۰ میلی‌گرم در لیتر کارا تر بودند. نتایج نشان داد که محلول پاشی الیستورها باعث افزایش محتوای رطوبت نسبی، افزایش نسبت  $\text{K}^+$  به  $\text{Na}^+$  و کاهش نشت یونی در شرایط تنش شوری می‌شود. بنابراین کاربرد الیستورهای زیستی به ویژه کیتوزان ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش سازگاری گیاه علف لیمو به شرایط تنش شوری شده که این موضوع می‌تواند راهکاری برای توسعه کشت این گیاه در مناطق شور ایران در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: اسید آبسیزیک، کیتوزان، گیاه دارویی، لمون‌گراس

### مقدمه

دارویی و معطر از خانواده گندمیان است که بومی هند و عمدتاً

در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری رشد می‌کند (Du et al., )

لمون‌گراس یا علف لیمو (*Cymbopogon citratus*) گیاهی

۲۰۲۴). این گیاه به دلیل طعم دلپذیر و خواص درمانی‌اش مانند اثرات ضدالتهابی و آرام‌بخش، در طب سنتی به کار می‌رود (Borges et al., 2021; Solomon et al., 2019). اجزای شیمیایی آن شامل ترپنوئیدها، فلاونوئیدها و اسیدهای فنولیک هستند (Salimi et al., 2024) که فعالیت‌های دارویی متعددی دارند (Li et al., 2021; Umukoro et al., 2020). اسانس علف لیمو حاوی ترکیباتی مانند سیترال و جرانول است و در صنایع مختلف از جمله داروسازی و آرایشی کاربرد دارد (Avoseh et al., 2015). همچنین، به دلیل ویتامین A موجود در آن، برای درمان مشکلات پوستی نیز استفاده می‌شود (Massoud et al., 2022).

تنش به هر گونه محدودیت خارجی زنده (جانداران) یا غیرزنده (دما، شوری، خشکی و...) گفته می‌شود که سرعت فتوسنتز و در نتیجه توانایی عمومی گیاه را کاهش می‌دهد (Parihar et al., 2015). تنش‌هایی که بیش‌ترین تأثیر را بر بهره‌وری محصولات کشاورزی می‌گذارند عبارت از دمای بالا و پایین، تنش شوری و تنش خشکی هستند که همگی می‌توانند منجر به محدودیت آب در گیاهان شوند.

شوری خاک یک مشکل جهانی است که حدود ۲۰ درصد اراضی قابل کشت و ۹۵۴ میلیون هکتار از کل زمین‌ها را تحت تأثیر قرار داده و به دلیل تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در حال افزایش است (Hafeez et al., 2020; Arora, 2019). در ایران، ۱۶ تا ۲۳ میلیون هکتار از اراضی شامل اراضی قابل کشت، بیابان‌ها و دشت‌ها در معرض تنش شوری قرار دارند. از طرف دیگر تخمین زده می‌شود که ۵۰ درصد از اراضی تحت آبیاری در معرض شوری باشند (کافی و همکاران، ۱۳۸۹). غلظت بالای نمک در این اراضی جذب آب را برای ریشه‌ها دشوار می‌کند و در نتیجه به عنوان تهدیدی جدی برای تولید محصولات کشاورزی است که می‌تواند تا ۵۰ درصد عملکرد را کاهش دهد (El Sabagh et al., 2021). همچنین این تنش از طریق مختل کردن فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله ایجاد تنش اسمزی و کاهش باز بودن روزنه‌ها (Saddiq et al., 2021; Woodrow et al., 2017) بهره‌وری محصول را

به شدت کاهش می‌دهد (Toscano et al., 2023).

در مطالعاتی که توسط سلیمانی و همکاران (۱۴۰۲)، تدین و همکاران (۱۴۰۱) و Salama و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد با افزایش سطح شوری محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل کل، ارتفاع بوته، طول ریشه، وزن تر و وزن خشک برگ در علف لیمو به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. همچنین گزارش شده است که تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار شاخص‌های فتوسنتزی، ارتفاع بوته، وزن تر و خشک بوته، تعداد پنجه و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و میزان آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی و پرولین برگ علف لیمو (*Cymbopogon flexuosus* STEUD. WATS.) می‌شود (Rehman et al., 2022; Mukarram et al., 2023a).

راهکارهای مختلف از جمله کاربرد برخی ترکیبات همچون الیسیتورها (Elicitors) توسط محققان در گیاهان مختلف برای بهبود اثرات منفی تنش شوری مورد بررسی قرار گرفته است. گیاهان برای مقابله با تنش‌های محیطی مکانیسم‌های سازگاری پیچیده متابولیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی دارند که این مکانیسم‌ها را می‌توان از طریق کاربرد عوامل برون‌زاد الیسیتورها تحریک کرد (Isah, 2019). الیسیتورها عواملی با منشأ عوامل زنده، غیرزنده و محیطی هستند که در شرایط تنش‌های محیطی سنتز متابولیت‌های ثانویه، به عنوان یک مکانیسم دفاعی، را در گیاهان تسریع می‌کنند. متابولیت‌های ثانویه محصول جانبی و محصول نهایی مسیرهای مختلف انتقال سیگنال هستند که پاسخ دفاعی را توسط محرک‌های زنده و غیرزنده القا می‌کنند (Barka et al., 2022). بر اساس ماهیت الیسیتورها، می‌توان آن‌ها را به دو دسته زیستی (Biotic) و غیرزیستی (Abiotic) تقسیم کرد. الیسیتورهای زیستی منشأ بیولوژیکی دارند شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، آنزیم‌ها، پلی‌مرهای زیستی (مانند کیتوزان)، هورمون‌های گیاهی (از جمله ABA) و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاهی دارند. الیسیتورهای غیرزیستی شامل موادی هستند که منشأ غیر بیولوژیکی دارند و در عوامل فیزیکی، شیمیایی و هورمونی دسته‌بندی می‌شوند (Chamkhi et al., 2021).

اخیراً پلیمرهای زیستی از جمله کیتوزان به عنوان یک الیسیتور زیستی جهت بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی محصولات کشاورزی در شرایط تنش‌های محیطی استفاده می‌شوند (Sharif et al., 2018). کیتوزان از مشتقات کیتین است و از طریق استیل‌زدایی کیتین سنتز می‌شود و به دلیل خواص فیزیکی و بیولوژیکی برتر خود مانند آب‌دوستی، پلی‌کاتیونی بودن، زیست‌سازگاری، تجزیه‌پذیری، غیرسمی بودن، فعالیت ضد میکروبی و قابلیت ترکیب با سایر پلیمرهای زیستی مورد توجه ویژه محققین قرار گرفته است (Morin et al., 2019). در سال‌های اخیر کاربرد این ترکیب در کشاورزی، اهمیت زیادی پیدا کرده است. کیتوزان با افزایش سنتز پرولین، جلوگیری از تخریب کلروفیل و بهبود کارایی فتوسنتز گیاه (شامخ و همکاران، ۱۴۰۰) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز (شامخ و همکاران، ۱۴۰۱) و در نتیجه کاهش پراکسیداسیون چربی غشاء (Alenazi et al., 2024) و همچنین افزایش محتوای فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی (Ghahari et al., 2023)، تحمل گیاه را به تنش‌های مختلف افزایش می‌دهد.

هورمون ABA که معمولاً به عنوان هورمون تنش نیز نامیده می‌شود در فرایندهای متابولیسمی و مکانیسم‌های تحمل به تنش‌های غیرزیستی از جمله شوری نقش کلیدی دارد (Ye et al., 2023). این هورمون با تنظیم هموستاز یونی، بیوستنز اسمولیت‌ها، مهار گونه‌های اکسیژن فعال و بیان ژن پاسخگو به نمک، نقش اصلی و غیرقابل جایگزینی را در طی پاسخ به تنش شوری در گیاهان ایفا می‌کند (Edel and Kudlu, 2016). تحت تنش شوری، گیاهان تلاش می‌کنند با تنظیم سطوح ABA اثرات تنش را کاهش دهند. تجمع سریع ABA باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود که باعث کاهش اتلاف آب از طریق تعرق می‌شود. غلظت بالای ABA در بافت‌های برگ‌گی به سازگاری گیاه در تنش شوری با تنظیم اسمزی، تغییر فعالیت روزنه‌ای و بهبود تولید پروتئین‌های تنش کمک می‌کند (Wang et al., 2025).

در رابطه با نقش الیسیتورهای هورمونی و کیتوزان در

تعدیل اثرات منفی تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری بر علف لیمو مطالعات بسیار محدودی انجام شده است. در پژوهشی که توسط Mukarram و همکاران (۲۰۲۳b) انجام شد کاربرد اولیگومر کیتوزان باعث بهبود کارایی فتوسنتز، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و در نتیجه بهبود عملکرد علف لیمو در شرایط تنش شوری شد. همچنین Massoud و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که محلول‌پاشی کیتوزان در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان الیسیتور، باعث افزایش عملکرد علف لیمو، اسانس و بازده اقتصادی آن در شرایط تنش خشکی می‌شود.

در رابطه با نقش الیسیتوری ABA در بهبود رشد گیاه علف لیمو در شرایط تنش‌های محیطی مطالعه‌ای انجام نشده است اما در مطالعه‌ای Chen و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که هورمون ABA با بهبود فتوسنتز، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنزیم‌های غیرآنتی‌اکسیدانی و همچنین کاهش آسیب اکسیداتیو اثر بازدارندگی ناشی از شوری را در گیاه برنج را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، تنش شوری باعث بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده به هورمون ABA و تجمع ABA در ریشه اولیه می‌شود. این امر نشان‌دهنده این است که ABA نقش اساسی در رشد ریشه تعدیل شده با نمک بازی می‌کند (Huang et al., 2021).

با توجه به اینکه گیاه دارویی علف لیمو که پتانسیل دارویی و کاربردهای صنعتی دارد و در استان هرمزگان نیز مورد کشت و کار قرار می‌گیرد و این منطقه با شوری آب و خاک مواجه هست به کارگیری روش‌ها و راهکارهای نوین زیستی که اثرات تنش شوری را بر این گیاه کاهش دهد ضرورت دارد. از آنجا که تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی به منظور بررسی اثر کیتوزان و اسید آسبیزیک بر گیاه علف لیمو تحت تنش شوری صورت نگرفته است، لذا این آزمایش با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف اسید آسبیزیک و کیتوزان به عنوان الیسیتورهای هورمونی و زیستی بر پاسخ فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و تغییرات عناصر برگ علف لیمو (*Cymbopogon citratus*) در شرایط تنش شوری انجام شد.

## مواد و روش‌ها

**طرح آزمایشی و اعمال تیمارها:** جهت بررسی تأثیر الیستوره‌های مختلف بر صفات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه علف لیمو (*Cymbopogon citratus*) تحت تنش شوری این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور (شوری و الیستور) و سه تکرار (در هر تکرار دو گلدان) انجام شد. شوری در سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار غلظت نمک طعام (NaCl) و الیستورها شامل شاهد، کیتوزان (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و اسید آبسزیک (۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) اعمال شد. پس از تهیه نشاهای علف لیمو، نشاها در گلدان‌های پلاستیکی با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر که حاوی ۵ کیلوگرم خاک بودند کشت شد. به‌منظور تعیین مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری گلدان‌ها ابتدا چند گلدان به عنوان نمونه با خاک کاملاً خشک وزن شدند. سپس گلدان‌ها به حالت اشباع آبیاری و روی پایه قرار گرفتند تا زمانی که خروج آب از زیر گلدان‌ها متوقف شد. بعد از آن گلدان‌ها دوباره وزن و از اختلاف وزن آن‌ها ظرفیت زراعی اندازه‌گیری شد (Sepaskhah et al., 2006).

جهت تهیه محلول کیتوزان در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر از کیتوزان با وزن مولکولی متوسط و درجه دی‌استیله  $\leq 75$  درصد از شرکت سیگما آلد ریچ (انگلیس) استفاده گردید. برای تهیه غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کیتوزان به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ گرم کیتوزان را در ۵۰۰ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال ۱ درصد به‌طور کامل حل شد. جهت حل شدن کامل کیتوزان بشر را بر روی دستگاه هات پلیت مگنتی دیجیتال آلفا D500 با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و دور ۳۰۰ rpm قرار داده شد. سپس هر کدام از محلول‌ها به حجم نهایی ۴ لیتر رسانده شد. همچنین به‌منظور تهیه محلول اسید آبسزیک در دو غلظت ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۴ گرم از اسید آبسزیک برند سیگما در اتانول حل و سپس با آب مقطر به حجم ۴ لیتر رسانده شد. شوری در سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار غلظت نمک طعام (NaCl) اعمال شد. گیاهان به مدت ۹۰ روز آبیاری شدند. آبیاری هر

۴۸ ساعت یکبار انجام شد. به‌منظور جلوگیری از تشکیل بلور نمک در خاک گلدان پس از دو مرحله آبیاری با آب شور، تمامی نمونه‌ها یک مرحله با آب مقطر آبیاری شدند. محلول‌پاشی الیستورها بعد از آبیاری اول و به فاصله ۱۰ روز یکبار انجام شد.

**صفات رویشی:** سه ماه پس از کشت، بوته‌ها جهت اندازه‌گیری صفات مورد نظر برداشت شدند. گیاهان با دقت از گلدان‌ها خارج شده و با استفاده از آب به خوبی شسته شد. در روز پایان آزمایش تعداد پنجه‌ها در هر گلدان شمارش شد. سطح برگ نهایی با نرم‌افزار Digimizer، پس از اسکن تمام برگ‌ها سبز و سالم و بر حسب سانتی‌متر مربع به‌دست آمد. برای این منظور بعد از جداسازی تمام برگ‌های هر بوته، توسط اسکنر EPSON L3156 با نرم‌افزار Sigma Scanner Pro با وضوح ۳۰۰ نقطه در هر اینچ از برگ‌ها تصویربرداری شد و سپس سطح برگ با استفاده از تصاویر بدست آمده و توسط نرم‌افزار Digimizer نسخه ۵,۷,۲ محاسبه گردید (Carvalho et al., 2017). وزن تر اندام هوایی و ریشه توسط ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (AND مدل GF-6100) اندازه‌گیری شد. سپس اندام‌های هوایی و ریشه‌ها در دستگاه آون فن‌دار ۵۵ لیتری با محفظه آلومینیوم مارک شیماز با دمای ۷۰ درجه به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند (باغبانی آرانی و ادواری، ۱۴۰۰) و بعد از آن وزن خشک اندام هوایی ثبت شد.

**صفات فیزیولوژیک:** به‌منظور اندازه‌گیری محتوای کلروفیل‌ها و کاروتنوئید کل از روش Arnon (۱۹۶۷) با کمی تغییر استفاده گردید. ۰/۲۵ گرم از برگ تازه گیاه در هاون چینی به خوبی خرد و سائیده شد. سپس به آن ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد اضافه گردید. عصاره حاصل به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۴۰۰۰ سانتریفیوژ (مدل یونیورسال سری premium-20000R) شد. ۳ میلی‌لیتر از عصاره فوقانی حاصل از سانتریفیوژ جدا و به کووت دستگاه اسپکتوفتومتر مدل ۲۵۰۱ و ساخت سسیل - انگلیس اضافه شد و مقدار جذب در طول‌موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر خوانده گردید (از استون ۸۰ درصد به‌عنوان بلانک استفاده شد). تمامی مراحل

آزمایش در تاریکی انجام گرفت. غلظت کرومیل ها و کاروتنوئید با استفاده از روابط زیر بر حسب میلی گرم بر گرم وزن تر ( $\text{mg g FW}^{-1}$ ) محاسبه شد. در روابط ۱ تا ۴،  $V$  حجم استون مصرف شده،  $W$  وزن تر نمونه بر حسب گرم و  $A$  میزان جذب نور در طول موج های مورد نظر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر است.

(۱)

$$\text{Chl a} = 12.7 (A.663) - 2.69(A.645) \times V / 1000 \times W$$

(۲)

$$\text{Chl b} = 22.9 (A.645) - 4.68(A.663) \times V / 1000 \times W$$

(۳)

$$\text{Chl t} = A.652 \times 20.2 + A.663 \times 8.02 \times V / 1000 \times W$$

(۴)

$$\text{Car} = (1000 A.470 - 1.82 \text{ Chl a} - 85.02 \text{ Chl b}) / 198$$

جهت اندازه گیری محتوی نسبی آب برگ تازه، از هر برگ ۱ دیسک به قطر یک سانتی متر تهیه شد و به وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم شرکت Sartorius (Entris 124-) وزن شد. دیسک های برگ به آب مقطر درون پتری دیش 1S منتقل و وزن آن ها پس از گذشت ۲۴ ساعت دوباره مشخص گردید. سپس نمونه ها درون فویل نازک به آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد منتقل شدند و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها کاملاً خشک و وزن خشک آن ها اندازه گیری شد. میزان درصد آب با استفاده از رابطه ۵ تعیین و به درصد محاسبه شد (Cherki et al., 2002). در رابطه زیر،  $FW$  وزن تر،  $TW$  وزن آماس و  $DW$  وزن خشک بر حسب گرم است.

(۵)

$$\text{RWC (\%)} = \frac{(FW - DW)}{(TW - DW)} \times 100$$

برای ارزیابی میزان نشت یونی ( $IL$ )، ۲ گرم از برگ تازه را با آب دوبار تقطیر شستشو داده و به همراه ۱۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر در فالكون ۱۵ میلی لیتر قرار داده شدند. فالكون های حاوی نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند. پس از ۲۴ ساعت قابلیت هدایت الکتریکی ( $EC$ ) با دستگاه شوری سنج ( $EC$  متر رومیزی مدل HI2315) اندازه گیری شد. سپس نمونه ها را به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار

گرفتند. بعد از سرد شدن نمونه ها برای بار دوم قابلیت هدایت الکتریکی سنجیده و از رابطه ۶ نشت یونی به درصد محاسبه گردید (Kamies et al., 2014).

(۶)

$$IL = EC_1 / EC_2 \times 100$$

در رابطه بالا،  $IL$  نشت یونی،  $EC_1$  هدایت الکتریکی پس از ۲۴ ساعت و  $EC_2$  هدایت الکتریکی پس از بن ماری بر حسب میکروزیمنس بر سانتی متر است.

**صفات بیوشیمیایی:** برای اندازه گیری ظرفیت آنتی اکسیدانی

(%) ۱۰۰ میکرولیتر عصاره متانولی نمونه برگ به ۱۰۰ میکروتیوب حاوی میکرولیتر آب مقطر اضافه و به مدت ۵ دقیقه با دور ۱۲۰۰۰ و دمای ۴ درجه سانتیفریوز شد. ۱۵ میکرولیتر از عصاره رویی به ۸۵۸ میکرولیتر محلول DPPH افزوده (۰/۰۰۴۸ گرم از DPPH توسط ترازو دیجیتال با دقت ده هزارم وزن و به ۲۰۰ میلی لیتر متانول خالص اضافه شد) و با دستگاه ورتکس شد. سپس از هر نمونه ۲۵۰ میکرولیتر در چاهک های پلیت ریدر الایزا منتقل و جذب توسط دستگاه الایزا در طول موج ۵۱۷ نانومتر انجام گرفت. در این سنجش بلانک دستگاه متانول ۸۵ درصد و از محلول DPPH به عنوان کنترل استفاده و مراحل انجام آزمایش در تاریکی انجام شد (Sheng et al., 2018).

برای محاسبه پراکسید هیدروژن، ۰/۱ گرم از برگ با ۰/۹ میلی لیتر اسید تری کلرواستیک ۰/۱ درصد که در دمای ۴ درجه نگهداری شده بود در هاون چینی سائیده شد. مخلوط همگن شده به مدت ۱۰ دقیقه استراحت نمود. سپس میکروتیوب های حاوی مخلوط در دور ۱۲۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه و در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتیفریوز شد. ۰/۶ میلی لیتر از محلول رویی برداشته و به کووت دستگاه اسپکتروفتومتر انتقال داده شد بعد از آن ۱ میلی لیتر یدید پتاسیم ۱ مولار و ۱ میلی لیتر بافر فسفات ۱۰ میلی مولار اضافه شد. جذب نمونه ها در طول موج ۳۹۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. بلانک دستگاه شامل تمامی مواد استفاده شده بدون عصاره گیاهی است (Velikova et al., 2000).

به منظور اندازه گیری محتوای مالون دی آلدهید (میکرومول

حاصل توسط برنامه اکسل رسم شد.

### نتایج

**صفات رویشی، وزن تر اندام هوایی:** نتایج حاصل از تجزیه وریانس داده‌ها نشان داد، تأثیر سطوح مختلف شوری و الیسیتورها بر وزن تر اندام هوایی در سطح ۱٪ و اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ بر وزن تر اندام هوایی علف لیمو معنی‌دار بود (جدول ۱). تنش شوری باعث کاهش وزن تر اندام هوایی علف لیمو در مقایسه با شاهد شد که این کاهش برای شوری ۱۰۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود (شکل ۱). در هر سطح شوری، کاربرد الیسیتور باعث افزایش وزن تر اندام هوایی در مقایسه با گیاهان بدون محلول‌پاشی شد که این افزایش در اغلب موارد معنی‌دار بود. بیشترین افزایش با محلول‌پاشی کیتوزان ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد بطوری‌که با محلول‌پاشی آن، وزن تر اندام هوایی در شرایط شوری شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار به ترتیب به میزان ۱۳/۴۶، ۱۶/۷۳ و ۲۰/۸۶ درصد افزایش یافت. در مجموع بیشترین (۴۸۷/۳ گرم در بوته) و کمترین (۳۲۳/۲ گرم در بوته) میزان وزن تر اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای کاربرد کیتوزان با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط بدون تنش شوری و تیمار عدم محلول‌پاشی گیاهان در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد (شکل ۱).

**وزن خشک اندام هوایی:** بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس، اثر سطوح مختلف شوری در سطح ۱٪ و الیسیتورها در سطح ۵٪ معنی‌دار بود درحالی‌که اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۱). با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده گردید که شوری ۵۰ میلی‌مولار قادر به کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی علف لیمو نبود در حالی‌که شوری ۱۰۰ میلی‌مولار باعث کاهش معنی‌دار این صفت به میزان ۲۰/۷۱ درصد در مقایسه با شاهد شد. در مجموع بیشترین (۷۴/۰ گرم در بوته) و کمترین (۶۱/۳ گرم در بوته) وزن خشک اندام هوایی به ترتیب به شاهد و شوری ۱۰۰ میلی‌مولار مربوط بود (جدول ۲).

کاربرد الیسیتور (به استثنا کیتوزان ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی علف لیمو شد.

بر گرم) یک گرم نمونه برگ را در یک میلی لیتر تری کلرواستیک اسید (TCA) یک درصد در هاون چینی سائیده شد. و سپس با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. مقدار ۰/۶ میلی‌لیتر از محلول استخراج با ۱ میلی‌لیتر اسید تیوباربیتوریک (TBA) گرم در لیتر مخلوط شد، مخلوط در بن‌ماری آب گرم با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد و بلافاصله در یخ خنک شد. پس از آن، مخلوط در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. میزان جذب به ترتیب ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر تعیین شد. از رابطه ۷ برای محاسبه محتوای مالون دی‌آلدید (MDA) بر حسب نانومول بر گرم ( $\mu\text{mol/g}$ ) استفاده شد (Zheng et al., 2019).

(V)

$$\text{MDA} = 6.45 \times (\text{OD } 532 - \text{OD } 600) - 0.56 \times \text{OD } 450$$

در رابطه فوق، OD میزان جذب نور در طول موج‌های مورد

نظر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر است.

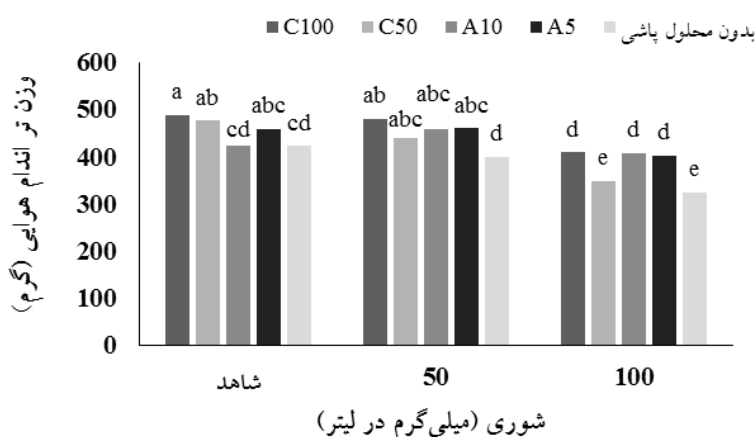
**عناصر برگ:** به منظور اندازه‌گیری غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم برگ علف لیمو با استفاده از روش Hamada و El-Enany (۱۹۹۴) ابتدا برگ‌ها درون دستگاه آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. نمونه‌های خشک‌شده با استفاده از آسیاب پودر شدند. ۰/۱ گرم از نمونه آسیاب‌شده به همراه ۱۰ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال ۰/۱ نرمال به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها به مدت دو ساعت درون حمام آب گرم (بن‌ماری) با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها توسط قیف و کاغذ صافی صاف شدند. از دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل JENWAY، ساخت کشور انگلستان) برای اندازه‌گیری میزان سدیم و پتاسیم (میلی‌گرم بر گرم) استفاده شد.

در پایان آزمایش تجزیه واریانس داده‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها توسط آزمون LSD در سطح آماری ۵ درصد انجام شد. نمودارهای

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر شوری، الیستور و اثر متقابل آن‌ها بر صفات رویشی علف لیمو

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | میانگین مربعات     |                     |                |                     |                    | تعداد پنجه |
|------------------|------------|--------------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------------|------------|
|                  |            | وزن تر اندام هوایی | وزن خشک اندام هوایی | وزن تر کل بوته | وزن خشک کل بوته     | سطح برگ            |            |
| شوری             | ۲          | ۲۶۵۰۸/۴۵**         | ۷۶۴/۶۲**            | ۲۰۰۳۵/۴۲**     | ۴۲۳/۴۶**            | ۷۴۵/۶**            | ۳۴۴/۱**    |
| الیستور          | ۴          | ۷۵۸۵/۲۰**          | ۱۰۴/۵۹*             | ۹۳۲۲/۴۰**      | ۱۵۲/۸۵**            | ۱۱۱/۱**            | ۲۱۸/۵**    |
| الیستور × شوری   | ۸          | ۱۳۹۹/۸۳*           | ۴۹/۲۰ <sup>ns</sup> | ۱۴۶۳/۲۶**      | ۶۰/۵۳ <sup>ns</sup> | ۶۷/۹ <sup>ns</sup> | ۱۲/۳*      |
| خطای آزمایش      | ۳۰         | ۶۰۰/۲۸             | ۳۷/۴۶               | ۳۳۰/۲۷         | ۳۰/۸۰               | ۱۷/۹               | ۵/۰        |
| خطای کل          | ۴۴         |                    |                     |                |                     |                    |            |
| ضریب تغییرات (%) | -          | ۵/۷۵               | ۸/۸۰                | ۳/۶۵           | ۶/۸۹                | ۱۲/۱۲              | ۶/۳۵       |

ns، \* و \*\* به ترتیب بی معنی و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر برهمکنش الیستورها و تنش شوری بر وزن تر اندام هوایی علف لیمو (در نمودار بالا حرف C و A به ترتیب نشان‌دهنده کیتوزان و اسید آسبیزیک است).

(جدول ۱). شوری باعث کاهش وزن تر کل بوته در هر سطح الیستور در مقایسه با شاهد شد هر چند که در اغلب موارد بین سطوح ۱۰۰ و ۵۰ میلی مولار تفاوت معنی‌دار وجود نداشت اما این کاهش برای شوری ۱۰۰ میلی مولار معنی‌دار بود (شکل ۲). از طرف دیگر در هر سطح شوری، محلول‌پاشی الیستور باعث افزایش معنی‌دار این صفت در مقایسه با گیاهان محلول‌پاشی نشده گردید بطوری‌که محلول‌پاشی ABA ۱۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش این شاخص به میزان ۲۲/۹ درصد در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲). بیشترین (۵۵۶/۱ گرم) وزن تر کل بوته در تیمار کیتوزان با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر در شرایط

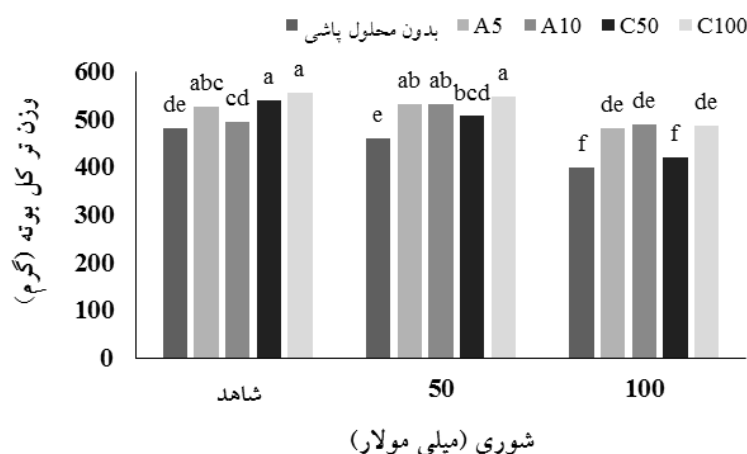
بطوری‌که در بین سطوح مختلف الیستورها بیشترین (۷۲/۷ گرم در بوته) وزن خشک اندام هوایی با کاربرد کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بدست آمد که بیانگر افزایش این صفت در مقایسه با گیاهان محلول‌پاشی نشده به میزان ۲۰/۰۸ درصد بود. کمترین (۶۰/۱ گرم در بوته) میزان وزن خشک اندام هوایی در گیاهان محلول‌پاشی نشده مشاهده شد که با اسید آسبیزیک ۵ میلی گرم در لیتر و کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۲).

**وزن تر کل بوته:** اثر سطوح مختلف شوری، الیستورها و اثر متقابل آن‌ها بر وزن تر کل بوته در سطح ۱٪ معنی‌دار بود

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر اصلی الیستور و شوری بر صفات رویشی علف لیمو

| شوری<br>(میلی مولار)          | وزن خشک<br>اندام هوایی | وزن خشک کل بوته<br>گرم در بوته | سطح برگ<br>سانتی متر مربع در بوته |
|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| شاهد                          | ۷۴/۰ <sup>a</sup>      | ۸۴/۶ <sup>a</sup>              | ۴۱/۹ <sup>a</sup>                 |
| ۵۰                            | ۷۳/۳ <sup>a</sup>      | ۸۳/۲ <sup>a</sup>              | ۳۴/۹ <sup>b</sup>                 |
| ۱۰۰                           | ۶۱/۳ <sup>b</sup>      | ۷۳/۷ <sup>b</sup>              | ۲۷/۸ <sup>c</sup>                 |
| الیستور<br>(میلی گرم در لیتر) | گرم                    | گرم                            | سانتی متر مربع                    |
| محلول پاشی نشده               | ۶۰/۱ <sup>b</sup>      | ۷۰/۷ <sup>b</sup>              | ۲۹/۹ <sup>c</sup>                 |
| کیتوزان ۵۰                    | ۶۹/۴ <sup>ab</sup>     | ۷۹/۹ <sup>a</sup>              | ۳۲/۹ <sup>bc</sup>                |
| کیتوزان ۱۰۰                   | ۷۲/۷ <sup>a</sup>      | ۸۴/۱ <sup>a</sup>              | ۳۵/۵ <sup>ab</sup>                |
| اسید آبسیزیک ۵                | ۶۹/۷ <sup>ab</sup>     | ۸۳/۳ <sup>a</sup>              | ۳۷/۹ <sup>a</sup>                 |
| اسید آبسیزیک ۱۰               | ۷۱/۹ <sup>a</sup>      | ۸۱/۷ <sup>a</sup>              | ۳۸/۲ <sup>a</sup>                 |

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند ( $P \leq 0.05$ ).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر برهمکنش الیستورها و تنش شوری بر وزن تر کل بوته علف لیمو (در نمودار بالا حرف C و A به ترتیب نشان‌دهنده کیتوزان و اسید آبسیزیک است).

بدون تنش شوری و کمترین (۳۹۵/۸ گرم در بوته) در تیمار شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بدون محلول پاشی بود که با سایر تیمارها به جز تیمار کیتوزان با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر اختلاف معنی‌داری داشت (شکل ۲).

وزن خشک کل بوته: نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد، اثر سطوح مختلف شوری و الیستورها در سطح ۱٪ بر وزن خشک کل بوته معنی‌دار بود درحالی‌که برهمکنش این دو معنی‌دار نبود (جدول ۱). با افزایش سطح شوری وزن

خشک کل بوته در مقایسه با شاهد کاهش یافت و این کاهش (۱۲/۴ درصد) در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود. بیشترین (۸۴/۱ گرم در بوته) و کمترین (۷۳/۷ گرم بوته) وزن خشک کل بوته به ترتیب در شاهد و شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بدست آمد (جدول ۲).

محلول پاشی سطوح مختلف الیستورها به طور معنی‌دار و مشابه باعث افزایش وزن خشک کل بوته در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده، گردید. بیشترین افزایش این صفت در

محلول پاشی سطوح مختلف الیستورها به طور معنی‌دار و مشابه باعث افزایش وزن خشک کل بوته در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده، گردید. بیشترین افزایش این صفت در

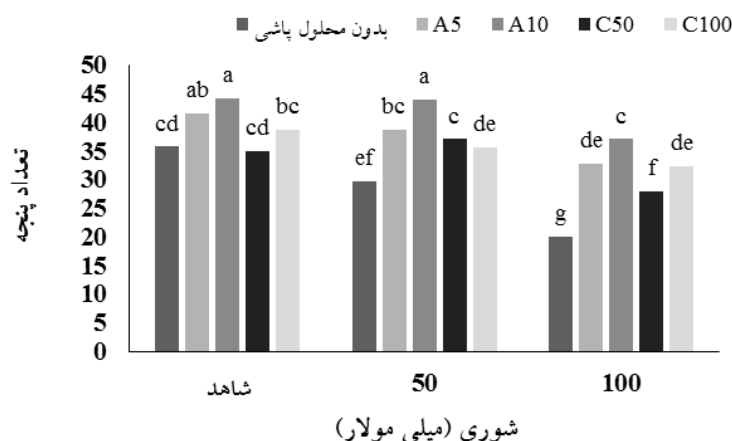
محلول پاشی سطوح مختلف الیستورها به طور معنی‌دار و مشابه باعث افزایش وزن خشک کل بوته در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده، گردید. بیشترین افزایش این صفت در



جدول ۳- تجزیه واریانس اثر شوری، الیستور و اثر متقابل آنها بر صفات فیزیولوژیکی علف لیمو

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | میانگین مربعات |           |            |           |                   |
|------------------|------------|----------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
|                  |            | کلروفیل a      | کلروفیل b | کلروفیل کل | کارتنوئید | RWC               |
| شوری             | ۲          | ۰/۰۱۲*         | ۰/۱۷۸**   | ۰/۰۷۷*     | ۴/۵۸۹*    | ۴۴/۱**            |
| الیستور          | ۴          | ۰/۱۰۵**        | ۰/۲۱۴**   | ۰/۱۵۴**    | ۲۹/۱۹**   | ۰/۳ <sup>ns</sup> |
| الیستور × شوری   | ۸          | ۰/۱۰۳**        | ۰/۲۰۵**   | ۰/۱۵۳**    | ۴۳/۱۴۵**  | ۶۳/۲**            |
| خطای آزمایش      | ۳۰         | ۰/۰۰۷۲         | ۰/۰۹۹     | ۰/۰۱۳      | ۰/۳۰۲     | ۰/۶               |
| خطای کل          | ۴۴         |                |           |            |           |                   |
| ضریب تغییرات (%) | -          | ۶/۶۸           | ۸/۵۴      | ۱۳/۴۶      | ۶/۶۰      | ۱۱/۳۹             |
| نش یونی          |            |                |           |            |           | ۶۱/۶**            |

ns، \* و \*\* به ترتیب بی معنی و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر برهمکنش الیستورها و تنش شوری بر تعداد پنجه در بوته علف لیمو (در نمودار بالا حرف C و A به ترتیب نشان دهنده کیتوزان و اسید آبسزیک است).

حاصل از مقایسه میانگین اثر الیستورها نشان داد که بیشترین میزان سطح برگ (۳۸/۲ سانتی متر مربع) در تیمار اسید آبسزیک با غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد که بیانگر افزایش ۲۷/۷۶ درصد سطح برگ نسبت به شاهد بود. از طرف دیگر کمترین میزان سطح برگ (۲۹/۹ سانتی متر مربع) مربوط به تیمار شاهد بود که با سایر تیمارها به جز تیمار کیتوزان با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد داشت (جدول ۲).

تعداد پنجه: اثر اصلی سطوح مختلف شوری و الیستورها در سطح ۱٪ و اثر متقابل آنها در سطح ۵٪ بر تعداد پنجه معنی دار بود (جدول ۱). در هر سطح الیستور، تنش شوری

مقایسه با شاهد، با کاربرد کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و به میزان ۱۸/۹۵ درصد شد (جدول ۲).

سطح برگ: نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی سطوح مختلف شوری و الیستورها کیتوزان و اسید آبسزیک بر سطح برگ در سطح ۱ درصد معنی دار بود. درحالی که اثر متقابل این دو عامل بر این صفت معنی دار نشد (جدول ۱). شوری اثر کاهشی معنی داری بر سطح برگ علف لیمو داشت (جدول ۲) به طوریکه کمترین سطح برگ (۲۷/۹ سانتی متر مربع) در تیمار شوری با غلظت ۱۰۰ میلی مولار مشاهده گردید که بیانگر کاهش ۳۳/۴ درصد در مقایسه با شاهد (۴۱/۹ سانتی متر مربع) بود (جدول ۳). همچنین نتایج

میلی مولار بدون محلول پاشی بود (جدول ۴).

**محتوای نسبی آب:** سطوح مختلف شوری، الیسیتورها و اثر متقابل آنها بر میزان محتوای نسبی آب در سطح ۱٪ اثر معنی داری داشت (جدول ۴). در هر سطح الیسیتور شوری باعث کاهش معنی دار محتوای نسبی آب شد. اما در هر سطح شوری، الیسیتورها باعث افزایش معنی دار محتوای نسبی آب در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده، گردید. در شرایط بدون شوری و شوری ۵۰ میلی مولار، بیشترین مقدار این صفت با کاربرد اسید آبسزیک ۱۰ و کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و در شوری ۱۰۰ میلی مولار با کاربرد کیتوزان ۵۰ میلی مولار بدست آمد هر چند که با سایر الیسیتورها تفاوت معنی دار نداشت. بیشترین (۹۴/۸ درصد) محتوای نسبی آب برگ در تیمار اسید آبسزیک با غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر در شرایط بدون تنش شوری مشاهده شد که بیانگر افزایش این شاخص به میزان ۱۰/۰ درصد در مقایسه با گیاهان شاهد بود. در حالی که کمترین (۷۷/۷ درصد) میزان محتوای نسبی آب برگ در تیمار تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار بدون محلول پاشی بود (جدول ۴).

**نشت یونی:** بر اساس نتایج جدول ۴ اثر سطوح مختلف شوری، الیسیتورها و برهمکنش آنها بر نشت یونی علف لیمو در سطح ۱٪ معنی دار بود. تنش شوری باعث افزایش نشت یونی در مقایسه با شاهد (بدون تنش) شد و این افزایش در تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار معنی دار بود. محلول پاشی الیسیتورها باعث تعدیل اثر منفی تنش شوری در افزایش نشت یونی شدند. گیاهان محلول پاشی شده اغلب به طور معنی دار نشت یونی کمتری در مقایسه با گیاهان تیمار نشده داشتند. بطوریکه در شرایط شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار اغلب الیسیتورها از طریق حفظ پایداری غشا نشت یونی مشابه با گیاهان تیمار نشده در شرایط بدون تنش شوری داشتند. در مجموع بالاترین (۳۳/۹ درصد) نشت یونی متعلق به تیمار تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار بدون محلول پاشی الیسیتور بود که با سایر تیمارها تفاوت معنی داری داشت و نسبت به کمترین میانگین (۲۱/۱ درصد) که متعلق به تیمار شاهد با محلول پاشی

۱۰۰ میلی مولار باعث کاهش تعداد پنجه در علف لیمو در مقایسه با شاهد شد. محلول پاشی الیسیتور به طور معنی دار باعث تعدیل اثرات منفی شوری بر تعداد پنجه شد. بطوریکه در شوری ۱۰۰ میلی مولار محلول پاشی ABA با غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش تعداد پنجه به میزان ۸۵/۰ درصد در مقایسه با شاهد شد. از طرف دیگر بیشترین (۴۴/۲) و کمترین (۲۰/۰) تعداد پنجه به ترتیب در تیمار بدون تنش شوری با محلول پاشی اسید آبسزیک با غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر و تیمار شوری ۱۰۰ میلی مولار بدون محلول پاشی مشاهده شد (شکل ۳).

### صفات فیزیولوژیک، رنگیزه های گیاهی: نتایج حاصل از

تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر شوری بر کلروفیل a، کل و کارتنوئید در سطح ۵٪ و بر کلروفیل b در سطح یک درصد معنی داری بود (جدول ۳). مقایسه میانگین ها نشان داد که در اغلب موارد شوری باعث کاهش معنی دار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید در هر سطح الیسیتور در مقایسه با شاهد می شود. محلول پاشی علف لیمو با الیسیتور، منجر به تعدیل اثرات منفی تنش شوری بر رنگیزه های گیاهی شد، بطوریکه در هر سطح تنش شوری این اقدام باعث افزایش معنی دار کلروفیل و کارتنوئید در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده گردید. در بین الیسیتورها، اغلب کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر کارایی بیشتری داشت (جدول ۴). بطوریکه در شوری ۱۰۰ میلی مولار محلول پاشی کیتوزان ۱۰۰، باعث افزایش کلروفیل a، کلروفیل b، کل و کارتنوئید به ترتیب به میزان ۲۲۹/۵، ۱۰۵/۳، ۲۰۶/۸ و ۱۹۶/۲ درصد در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده گردید. بیشترین میزان کلروفیل a (۰/۶۳۸ میلی گرم بر گرم وزن تر)، کلروفیل b (۰/۱۱۴ میلی گرم بر گرم وزن تر)، کلروفیل کل (۰/۷۸۴ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کارتنوئید (۰/۴۲۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) در شاهد و کاربرد کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بود. در حالی که کمترین میزان کلروفیل a (۰/۱۲۹ میلی گرم بر گرم وزن تر)، کلروفیل b (۰/۰۳۸ میلی گرم بر گرم وزن تر)، کلروفیل کل (۰/۱۶۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کارتنوئید (۰/۱۰۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) متعلق به تیمار شوری ۱۰۰

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر اصلی الیستور و شوری بر صفات رشدی گیاه علف لیمو

| شوری         | الیستور            | کلروفیل a              | کلروفیل b              | کلروفیل کل             | کارتونوئید             | RWC                | نشت یونی            |
|--------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------|
| (میلی مولار) | (میلی گرم در لیتر) | میلی گرم بر گرم وزن تر | میلی گرم بر گرم وزن تر | میلی گرم بر گرم وزن تر | میلی گرم بر گرم وزن تر | درصد               | درصد                |
| شاهد         | محلول پاشی نشده    | ۰/۴۸۷ <sup>c</sup>     | ۰/۰۷۹ <sup>bc</sup>    | ۰/۶۲۴ <sup>b</sup>     | ۰/۲۷۵ <sup>de</sup>    | ۸۶/۱ <sup>c</sup>  | ۲۴/۴ <sup>c-f</sup> |
|              | کیتوزان ۵۰         | ۰/۵۰۰ <sup>bc</sup>    | ۰/۰۹۸ <sup>a</sup>     | ۰/۶۶۰ <sup>b</sup>     | ۰/۳۸۱ <sup>b</sup>     | ۹۰/۷ <sup>b</sup>  | ۲۱/۷ <sup>fg</sup>  |
|              | کیتوزان ۱۰۰        | ۰/۶۳۸ <sup>a</sup>     | ۰/۱۱۴ <sup>a</sup>     | ۰/۷۸۴ <sup>a</sup>     | ۰/۴۲۷ <sup>a</sup>     | ۹۲/۴ <sup>ab</sup> | ۲۱/۱ <sup>g</sup>   |
|              | اسید آسبیزیک ۵     | ۰/۶۱۰ <sup>a</sup>     | ۰/۰۸۷ <sup>b</sup>     | ۰/۷۶۰ <sup>a</sup>     | ۰/۳۸۹ <sup>b</sup>     | ۹۰/۹ <sup>b</sup>  | ۲۲/۳ <sup>efg</sup> |
|              | اسید آسبیزیک ۱۰    | ۰/۴۲۲ <sup>d</sup>     | ۰/۰۷۹ <sup>bc</sup>    | ۰/۵۴۶ <sup>c</sup>     | ۰/۳۷۵ <sup>b</sup>     | ۹۴/۸ <sup>a</sup>  | ۲۲/۵ <sup>d-g</sup> |
|              | محلول پاشی نشده    | ۰/۲۶۳ <sup>f</sup>     | ۰/۰۵۲ <sup>d</sup>     | ۰/۳۴۶ <sup>e</sup>     | ۰/۲۰۳ <sup>f</sup>     | ۸۸/۳ <sup>c</sup>  | ۲۹/۶ <sup>b</sup>   |
|              | کیتوزان ۵۰         | ۰/۴۸۰ <sup>c</sup>     | ۰/۰۸۱ <sup>b</sup>     | ۰/۶۱۵ <sup>b</sup>     | ۰/۳۱۱ <sup>c</sup>     | ۸۵/۴ <sup>c</sup>  | ۲۶/۷ <sup>bc</sup>  |
| ۵۰           | کیتوزان ۱۰۰        | ۰/۵۴۲ <sup>b</sup>     | ۰/۰۷۹ <sup>bc</sup>    | ۰/۷۲۴ <sup>a</sup>     | ۰/۳۹۹ <sup>ab</sup>    | ۹۱/۱ <sup>b</sup>  | ۲۴/۸ <sup>cde</sup> |
|              | اسید آسبیزیک ۵     | ۰/۵۲۷ <sup>bc</sup>    | ۰/۰۸۵ <sup>b</sup>     | ۰/۶۲۰ <sup>b</sup>     | ۰/۳۷۸ <sup>b</sup>     | ۸۹/۲ <sup>c</sup>  | ۲۵/۴ <sup>cd</sup>  |
|              | اسید آسبیزیک ۱۰    | ۰/۳۵۴ <sup>e</sup>     | ۰/۰۶۱ <sup>c</sup>     | ۰/۴۷۷ <sup>cd</sup>    | ۰/۲۶۶ <sup>e</sup>     | ۹۱/۳ <sup>b</sup>  | ۲۳/۵ <sup>d-g</sup> |
|              | محلول پاشی نشده    | ۰/۱۲۹ <sup>g</sup>     | ۰/۰۳۸ <sup>e</sup>     | ۰/۱۶۱ <sup>f</sup>     | ۰/۱۰۶ <sup>g</sup>     | ۷۷/۷ <sup>e</sup>  | ۳۳/۹ <sup>a</sup>   |
|              | کیتوزان ۵۰         | ۰/۳۶۹ <sup>e</sup>     | ۰/۰۷۱ <sup>c</sup>     | ۰/۵۵۸ <sup>c</sup>     | ۰/۲۶۳ <sup>e</sup>     | ۸۳/۷ <sup>d</sup>  | ۲۸/۸ <sup>b</sup>   |
| ۱۰۰          | کیتوزان ۱۰۰        | ۰/۴۲۵ <sup>d</sup>     | ۰/۰۷۸ <sup>bc</sup>    | ۰/۴۹۴ <sup>c</sup>     | ۰/۳۱۴ <sup>c</sup>     | ۸۲/۹ <sup>d</sup>  | ۲۵/۱ <sup>cde</sup> |
|              | اسید آسبیزیک ۵     | ۰/۲۸۱ <sup>f</sup>     | ۰/۰۷۰ <sup>c</sup>     | ۰/۳۲۷ <sup>e</sup>     | ۰/۳۰۲ <sup>cd</sup>    | ۸۱/۹ <sup>d</sup>  | ۲۷/۴ <sup>bc</sup>  |
|              | اسید آسبیزیک ۱۰    | ۰/۲۷۳ <sup>f</sup>     | ۰/۰۵۳ <sup>d</sup>     | ۰/۳۱۰ <sup>e</sup>     | ۰/۲۵۰ <sup>e</sup>     | ۸۱/۷ <sup>d</sup>  | ۲۵/۳ <sup>cde</sup> |

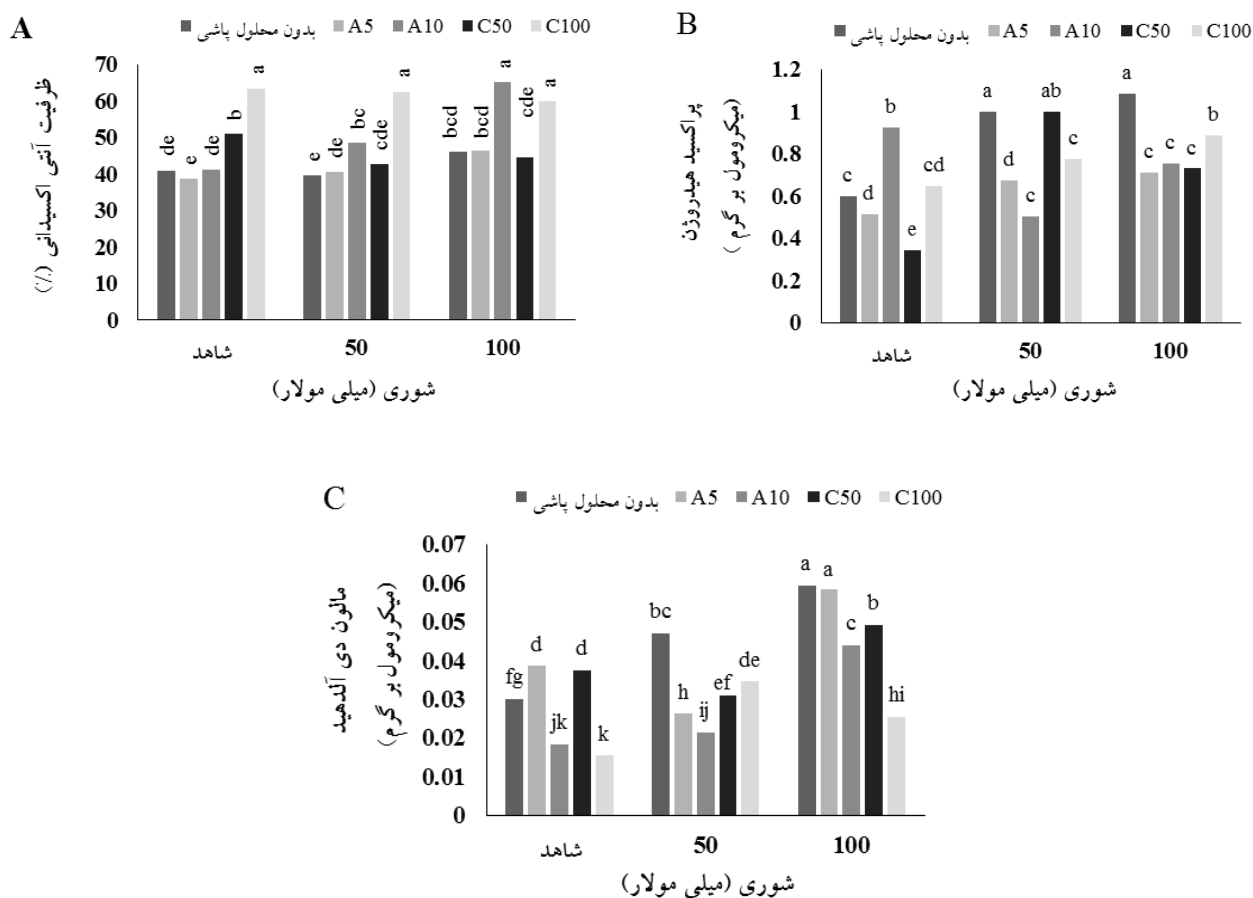
در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند ( $P \leq 0.05$ ).

۱۰۰ میلی گرم در لیتر کیتوزان بود به میزان ۳۸/۹۳ درصد بیشتر بود (جدول ۴).

**صفات بیوشیمیایی، ظرفیت آنتی اکسیدانی: نتایج جدول تجزیه واریانس** نشان داد که اثر شوری، الیستور و برهمکنش آن‌ها بر ظرفیت آنتی اکسیدانی علف لیمو در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است (جدول ۵). با افزایش تنش شوری تا ۱۰۰ میلی مولار، ظرفیت آنتی اکسیدانی علف لیمو در اغلب سطوح الیستور افزایش یافت. از طرف دیگر محلول پاشی با کیتوزان و ABA در هر سطح تنش باعث افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی در مقایسه با گیاهان تیمار نشده گردید (شکل ۴A). در شرایط بدون تنش و شوری ۵۰ میلی مولار بیشترین ظرفیت آنتی اکسیدانی (به ترتیب ۶۳/۵ و ۶۲/۵ درصد) با محلول پاشی کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بدست آمد. در حالی که در تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار بیشترین ظرفیت

آنتی اکسیدانی (۶۵/۱ درصد) با محلول پاشی ABA ۱۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۴A).

**پراکسید هیدروژن:** با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۵)، اثر تنش شوری و الیستور در سطح یک درصد و برهمکنش بین آنها در سطح ۵ درصد بر پراکسید هیدروژن برگ علف لیمو معنی‌دار بود. تنش شوری باعث افزایش تولید پراکسید هیدروژن در هر سطح الیستور شد. بیشترین افزایش در تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار بدست آمد (شکل ۴B). اگر چه اثر الیستور بر تغییرات پراکسید هیدروژن در شرایط بدون تنش روند منطقی نداشت اما محلول پاشی با هر دو الیستور باعث کاهش معنی‌دار تولید پراکسید هیدروژن در سطوح شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده گردید. بیشترین کاهش (۴۹/۷۰ درصد) با محلول پاشی ABA ۱۰ میلی گرم در لیتر در شرایط شوری ۵۰



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر تنش شوری بر (A) ظرفیت آنتی اکسیدانی (B) میزان مالون دی آلدئید و (C) میزان پراکسید هیدروژن برگ علف لیمو (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

میلی مولار بدست آمد (شکل ۴B).  
 مالون دی آلدئید: با توجه به نتایج جدول ۵ اثر شوری، الیستور و برهمکنش بین آنها بر تغییرات مالون دی آلدئید در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود. با افزایش شدت تنش شوری میزان تولید مالون دی آلدئید ناشی از پراکسیداسیون چربی در اغلب سطوح الیستور بطور معنی‌دار افزایش یافت. بطوریکه این شاخص در گیاهان تیمار نشده در تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار در مقایسه با شرایط بدون شوری به میزان ۹۸/۶ درصد افزایش یافت (شکل ۴C). کاربرد الیستور باعث کاهش پراکسیداسیون چربی و در نتیجه کاهش تولید مالون دی آلدئید شد بطوریکه این ترکیبات در شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار در اغلب موارد باعث کاهش معنی‌دار مالون دی آلدئید شدند. بیشترین کاهش در شوری ۵۰ میلی مولار

میلی مولار (۵۴/۴ درصد) و ۱۰۰ میلی مولار (۵۷/۴ درصد) به ترتیب با کاربرد ABA ۱۰ میلی گرم در لیتر و کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بدست آمد (شکل ۴C).  
 سدیدم: نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر عامل شوری در سطح ۱٪ بر تغییرات سدیدم برگ معنی‌دار بود درحالی‌که اثر الیستور و اثر متقابل شوری و الیستور بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۶). تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار بطور باعث افزایش معنی‌دار سدیدم برگ در مقایسه با شاهد و شوری ۵۰ میلی مولار به ترتیب به میزان ۳۷/۶ و ۳۱/۴ درصد شد. بیشترین (۸۷/۹ میلی گرم در گرم) و کمترین (۶۳/۹ میلی گرم در گرم) میزان سدیدم به ترتیب در شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار و شاهد مشاهده شد (شکل ۵A).

پتاسیم: براساس نتایج جدول ۶ اثر عامل شوری، الیستور

پتاسیم: براساس نتایج جدول ۶ اثر عامل شوری، الیستور

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر شوری، الیستور و اثر متقابل آن‌ها بر صفات بیوشیمیایی علف لیمو

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | میانگین مربعات      |                 |                 |
|------------------|------------|---------------------|-----------------|-----------------|
|                  |            | ظرفیت آنتی اکسیدانی | پراکسید هیدروژن | مالون دی آلدئید |
| شوری             | ۲          | ۱۵۲/۵**             | ۰/۱**           | ۰/۰۰۷۳**        |
| الیستور          | ۴          | ۶۲۹/۱**             | ۰/۴**           | ۰/۰۰۴۹**        |
| الیستور × شوری   | ۸          | ۱۱۱/۷**             | ۰/۳*            | ۰/۰۰۵۷**        |
| خطای آزمایش      | ۳۰         | ۱۰/۹                | ۰/۰۰۷۹          | ۰/۰۰۰۴۳         |
| خطای کل          | ۴۴         |                     |                 |                 |
| ضریب تغییرات (%) | -          | ۶/۷۴                | ۱۳/۴۴           | ۲۰/۱۵           |

ns، \* و \*\* به ترتیب بی معنی و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد

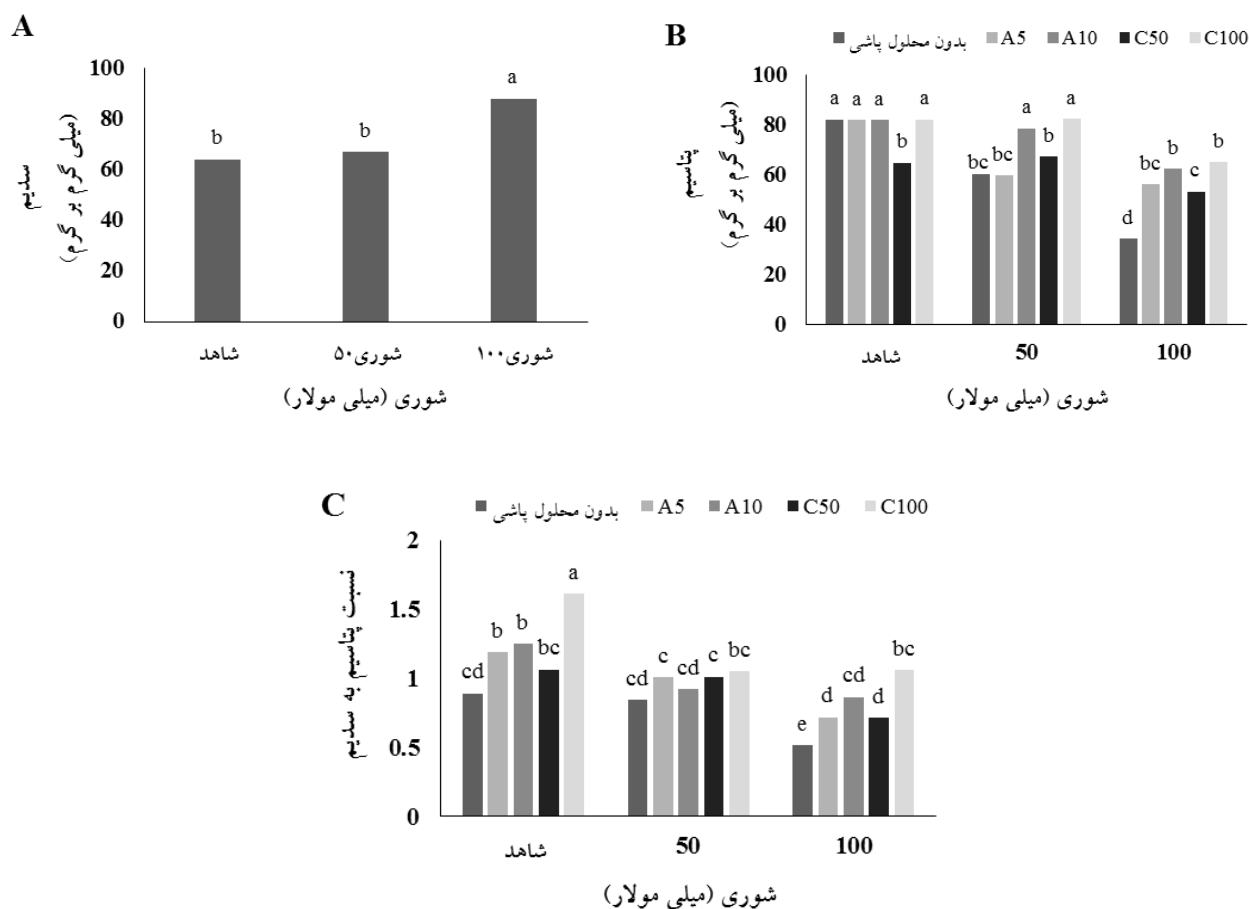
جدول ۶- تجزیه واریانس اثر شوری، الیستور و اثر متقابل آن‌ها بر عناصر گیاه علف لیمو

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | میانگین مربعات      |          |                     |
|------------------|------------|---------------------|----------|---------------------|
|                  |            | سدیم                | پتاسیم   | نسبت سدیم به پتاسیم |
| شوری             | ۲          | ۲۷۶۵/۰**            | ۸۸۸/۴**  | ۰/۳**               |
| الیستور          | ۴          | ۱۹۳/۸ <sup>ns</sup> | ۱۳۶۱/۵** | ۰/۶**               |
| الیستور × شوری   | ۸          | ۳۳۴/۵ <sup>ns</sup> | ۶۱۲/۸**  | ۰/۴**               |
| خطای آزمایش      | ۳۰         | ۱۶۲/۳               | ۱۶۳/۲    | ۰/۰۱                |
| خطای کل          | ۴۴         |                     |          |                     |
| ضریب تغییرات (%) | -          | ۱۶/۳۶               | ۱۲/۷۴    | ۱۰/۸۶               |

ns، \* و \*\* به ترتیب بی معنی و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد

و اثر متقابل آن‌ها بر پتاسیم برگ علف لیمو در سطح ۱٪ معنی دار بود. نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش شوری تا سطح ۱۰۰ میلی مولار، میزان یون پتاسیم کاهش یافته و محلول پاشی الیستورها از روند کاهشی آن‌ها جلوگیری نموده است (شکل ۵B). بیشترین (۸۲/۴۰ میلی گرم بر گرم) میزان پتاسیم در شرایط شوری ۵۰ میلی مولار و محلول پاشی کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بدست آمد که با سطوح مختلف محلول پاشی در سطح شوری صفر میلی مولار (بجز کیتوزان ۵۰ میلی گرم در لیتر) و کاربرد اسید آسبزیک ۱۰ میلی گرم در لیتر در شوری ۵۰ میلی مولار تفاوت معنی دار نداشت. کمترین (۳۴/۴۴ میلی گرم بر گرم) میزان پتاسیم در تیمار شاهد با شوری ۱۰۰ میلی مولار مشاهده شد (شکل ۵B).

نسبت پتاسیم به سدیم برگ: بر اساس نتایج جدول ۶ اثر سطوح مختلف شوری، الیستورها و برهمکنش آن‌ها بر نسبت پتاسیم به سدیم در سطح ۱٪ معنی دار بود. تنش شوری در اغلب موارد باعث کاهش معنی دار نسبت پتاسیم به سدیم برگ در مقایسه با شاهد شد. محلول پاشی الیستور باعث افزایش این نسبت در سطوح مختلف شوری شد. در بین الیستورها، کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بیشترین تأثیر در افزایش این شاخص داشت (شکل ۵C). بالاترین مقدار نسبت عنصر پتاسیم به سدیم (۱/۶۱) متعلق به تیمار کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بدون تنش شوری بود که با تمام تیمارها تفاوت معنی داری داشت و باعث افزایش نسبت پتاسیم به سدیم برگ در مقایسه با گیاهان علف لیمو محلول پاشی نشده به میزان ۸۱/۳ درصد



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر تنش شوری بر (A) سدیم (B) پتاسیم و (C) نسبت پتاسیم به سدیم برگ علف لیمو (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند).

صفات رویشی گیاه علف لیمو شامل وزن تر و خشک اندام هوایی و بوته، سطح برگ و تعداد پنجه با افزایش سطح شوری کاهش پیدا کردند. در تأیید این نتایج سلیمانی و همکاران (۱۴۰۲)، تدین و همکاران (۱۴۰۱) و Salama و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کردند که تنش شوری باعث محدود شدن رشد علف لیمو می‌شود و با افزایش سطح شوری وزن تر و خشک و ارتفاع بوته به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. همچنین گزارش شده است که تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته، وزن تر و خشک بوته و تعداد پنجه علف لیمو می‌شود (Rehman et al., 2022; Mukarram et al., 2023a). بدیهی است که با کاهش سطح برگ، گیاه آب کمتری را از طریق تعرق از دست می‌دهد، بنابراین محدود شدن رشد را می‌توان به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های دفاعی گیاهان برای

شد. در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بیشترین (۱/۰۶) نسبت پتاسیم به سدیم برگ با محلول‌پاشی کیتوزان ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بدست آمد که بیانگر افزایش ۱۰۷/۸ درصد در مقایسه با گیاهان تیمار نشده (۰/۵۱) بود (شکل ۵C).

## بحث

**صفات رویشی:** گیاهان در اثر شوری هم تنش اسمزی و هم تنش آبی را تحمل می‌کنند و یون‌های نمک انباشته‌شده برای آن‌ها کشنده است. کمبود آب در رگ‌برگ‌ها منجر به بسته شدن روزنه و کاهش رسانایی روزنه می‌شود که یکی از مکانیسم‌هایی است که سرعت فتوسنتز و در نتیجه رشد گیاه را محدود می‌کند (Muhammad et al., 2023). در پژوهش حاضر، نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد برخی از

تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی و بهبود پتانسیل آب سلول از طریق بسته‌شدن روزنه (Wang *et al.*, 2025; Singh and Roychoudhury, 2023; Li *et al.*, 2020; Anbarasi and Somasundaram, 2020)، رشد رویشی و زیست‌توده گیاهی را در شرایط تنش شوری بهبود بخشید.

**صفات فیزیولوژیک:** اثرات نامطلوب تنش‌های محیطی معمولاً با از بین رفتن رنگیزه‌های فتوسنتزی همراه است. کلروفیل‌ها، به عنوان رنگیزه‌های اولیه گیاهی، در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی نقش دارند (Tariq *et al.*, 2023). در تحقیق حاضر، میزان کلروفیل *a*، کلروفیل *b*، کلروفیل کل و کاروتنوئید با افزایش سطح شوری به طور معنی‌دار کاهش یافت. در پژوهشی که بر روی پاسخ گونه دیگری از علف لیمو (*Cymbopogon flexuosus*) به شوری انجام شد نیز نتایج نشان داد افزایش شدت تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (Aghdam *et al.*, 2019).

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، محلول‌پاشی کیتوزان و ABA در غلظت‌های مختلف در تمام سطوح شوری اثر مثبت بر میزان کلروفیل *a*، کلروفیل *b*، کلروفیل کل و کاروتنوئید داشت. مشابه این نتایج محلول‌پاشی ABA باعث افزایش معنی‌دار رنگیزه‌های گیاهی برنج در شرایط تنش شوری شد (Wang *et al.*, 2025). به نظر می‌رسد ABA از طریق کاهش تخریب کلروفیل، افزایش تجمع پرولین و قندهای محلول، کاهش میزان گونه‌های فعال اکسیژن و بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی باعث حفظ میزان کلروفیل گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود (Xu *et al.*, 2022).

نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج Mukarram و همکاران (۲۰۲۲) مشابه بود که نشان دادند محلول‌پاشی کیتوزان باعث بهبود رنگیزه گیاهی علف لیمو در شرایط تنش شوری می‌شود (Mukarram *et al.*, 2022). در گزارشی دیگر، غلظت‌های مختلف نانوذرات کیتوزان و کیتوزان باعث افزایش محتوای کلروفیل و در نتیجه فتوسنتز گیاه (Alenazi *et al.*, 2024; Nguyen Van *et al.*, 2013). اسپری کردن کیتوزان

اجتناب از شوری دانست (Humbal and Pathak, 2023; Saddiq *et al.*, 2021).

نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی کیتوزان به ویژه غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اثرات منفی تنش شوری بر صفات رویشی گیاه علف لیمو را تعدیل کرد. در تأیید این نتایج نیز تأثیر مثبت محلول‌پاشی کیتوزان بر ویژگی‌های رویشی گیاهان زراعی مختلف از جمله علف لیمو در شرایط تنش شوری گزارش شده است (Alenazi *et al.*, 2024; Mukarram *et al.*, 2023b; Balusamy *et al.*, 2022). محلول‌پاشی کیتوزان ممکن است از یک طرف از طریق کاهش تعرق و تنظیم فشار اسمزی (Khalil and Badr Eldin, 2021) و از طرف دیگر از طریق تحریک رشد ریشه و در نتیجه افزایش جذب آب (Shahrajabian *et al.*, 2021) وضعیت آبی گیاه را در شرایط تنش شوری بهبود بخشد. این موضوع باعث بهبود ویژگی‌های رویشی گیاه می‌شود. همچنین گزارش شده است که کیتوزان از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها و سم‌زدایی رادیکال‌های آزاد، افزایش فعالیت‌های آنزیمی، بهبود متابولیسم نیتروژن و افزایش فتوسنتز باعث بهبود وضعیت رویشی و مقاومت گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود (Chakraborty *et al.*, 2020; Alenazi *et al.*, 2024; Ullah *et al.*, 2020; Massoud *et al.*, 2022).

محلول‌پاشی ABA به ویژه غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر باعث بهبود صفات رویشی علف لیمو در شرایط تنش شوری شد. اگر چه در زمینه کاربرد ABA در بهبود ویژگی‌های رویشی گیاه علف لیمو در شرایط تنش‌های محیطی مطالعه‌ای انجام نشده است اما این نتایج با نتایج Li و همکاران (۲۰۲۰) و Wang و همکاران (۲۰۲۵) که اثر هورمون ABA را در بهبود ویژگی‌های رویشی گندم و برنج در تنش شوری بررسی کردند مشابه بود. به نظر می‌رسد که ABA با تغییر سریع شارهای یونی در سلول‌های نگهبان باعث بسته‌شدن روزنه می‌شود و این امر شامل تغییراتی در بیان ژن می‌شود. ثابت شده است که سازگاری گیاهان به تنش شوری توسط مسیر سیگنالینگ ABA تنظیم می‌شود و این هورمون ممکن است از طریق افزایش

مطابقت داشت ( Parveen et al., 2021; Wang et al., 2025; Li et al., 2020). در تأیید گزارش شده است که محلولپاشی کیتوزان، از طریق کاهش تولید پراکسید هیدروژن و در نتیجه کاهش پراکسیداسیون چربی باعث حفظ ساختار غشا و کاهش نشت یونی می‌شود (Alenazi et al., 2024). هورمون ABA می‌تواند هدایت روزنه‌ای، مصرف آب، پژمرگی و تعرق را کاهش دهد و با حفظ ساختار غشای سلولی باعث کاهش آسیب ناشی از شوری شود (Wang et al., 2025).

**صفات بیوشیمیایی:** پراکسید هیدروژن به عنوان یکی از مهمترین گونه‌های فعال اکسیژن، عمدتاً در طی واکنش زنجیره انتقال الکترون در فتوسنتز کلروپلاست، تنفس میتوکندری، پراکسیزوم، آنزیم‌های تنفسی غشای پلاسمایی تولید می‌شوند. شوری تولید پراکسید هیدروژن را تحریک می‌کند که منجر به افزایش آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو سلول از طریق ناپایدار کردن پروتئین‌ها، چربی‌های غشا و اسیدهای نوکلئیک می‌شود (Mittler et al., 2022; Foyer, 2018).

نتایج این مطالعه نشان داد که تنش شوری باعث افزایش میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدید می‌شود. در برگ علف لیمو شد که این موضوع باعث افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی علف لیمو می‌شود. در تأیید این نتایج گزارش شده است که در شرایط تنش‌های محیطی از جمله شوری به دلیل افزایش میزان گونه‌های فعال اکسیژن از جمله پراکسید هیدروژن در برگ علف لیمو، پراکسیداسیون چربی غشا افزایش یافته که این موضوع با افزایش میزان مالون دی‌آلدید نمایان می‌شود ( Mukarram et al., 2022; Rehman et al., 2022). از طرف دیگر افزایش میزان گونه‌های فعال اکسیژن، اثرات منفی بر فتوسنتز علف لیمو از طریق کاهش میزان کلروفیل برگ و افزایش کلروفیل فلورسانس برگ می‌گذارد (Foyer, 2018). در نتیجه در پاسخ به این شرایط، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی علف لیمو برای مقابله با این اثرات منفی تنش به عنوان یک مکانیزم دفاعی افزایش می‌یابد ( Mukarram et al., 2023b; Rehman et al., 2022).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که محلولپاشی علف لیمو

می‌تواند از طریق تحریک بیان ژن‌های دخیل در بیوستز رنگیزه‌های گیاهی باعث افزایش بیوستز آن‌ها می‌شود (Chamnanmanoontham et al., 2015). از طرف دیگر این ترکیب قادر است ژن‌های کدکننده آنزیم کلروفیل‌از را که یک کاتالیزور برای تخریب کلروفیل است، سرکوب کند بنابراین محتوای کلروفیل را در گیاهان افزایش می‌دهند ( Ghasemi Pirbalouti et al., 2017).

محتوای نسبی آب برگ، یک نشانگر مناسب برای سنجش میزان تنش در گیاه است. از نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌توان دریافت که با افزایش سطح شوری محتوای نسبی آب برگ بطور معنی‌دار کاهش یافت. درحالی‌که محلولپاشی کیتوزان و ABA باعث بهبود وضعیت آبی گیاه در شرایط تنش شوری و بدون تنش شوری می‌شوند. کیتوزان با تنظیم فشار اسمزی باعث افزایش دسترسی و جذب آب و عناصر غذایی ضروری می‌شود و اثر تنش شوری بر گیاه را کاهش می‌دهد و رشد گیاه را افزایش می‌دهد (Aazami et al., 2023). ABA نقش مهمی در بسته‌شدن روزنه‌ها با تنظیم شارهای یونی سلول‌های نگهبان روزنه دارد بطوری‌که با کنترل میزان باز بودن روزنه‌ها، بر تعرق و هدایت آب و در نتیجه محتوای نسبی آب اثر می‌گذارد و باعث بهبود وضعیت آبی گیاه می‌شود ( Singh and Roychoudhury, 2023).

یکی از شاخص‌های آسیب ناشی از تنش شوری، میزان نسبی نشت یونی است. سطح بالاتری از نشت یونی نشان‌دهنده آسیب بیشتر شوری به سیستم غشا گیاهی است در حالی‌که مقادیر پایین‌تر نشت یونی نشان می‌دهند که گیاهان تیمار شده از آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش شوری محافظت شده‌اند (Alqarawi et al., 2014).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش شوری نشت یونی نیز افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده آسیب تنش شوری به بافت غشا است، تنش شوری اثرات منفی قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی از قبیل نشت یونی دارد. همچنین نتایج نشان داد محلولپاشی ABA و کیتوزان اثر مثبتی بر کاهش میزان نشت یونی داشت که با نتایج سایر محققین



با الیستورهای کیتوزان و ABA باعث افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و در نتیجه کاهش تولید پراکسید هیدروژن و در نتیجه کاهش پراکسیداسیون چربی غشا و در نهایت کاهش تولید مالون دی آلدید در شرایط تنش شوری می شود. علاوه بر این کاربرد کیتوزان ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و ABA ۱۰ میلی گرم در لیتر در این زمینه کارا تر بودند. در تأیید این نتایج گزارش شده است که محلول پاشی کیتوزان باعث افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی علف لیمو در شرایط تنش شوری می شود (Mukarram et al., 2023b). مطالعات نشان داده است که کیتوزان از طریق فعال کردن آنزیم های مهارکننده گونه های فعال اکسیژن باعث کاهش پراکسیداسیون چربی و در نتیجه کاهش مالون دی آلدید در گیاه می شوند (Alenazi et al., 2024; Rabelo et al., 2019). همچنین کیتوزان از طریق افزایش بیان ژن های مسئول سنتز آنزیم های آنتی اکسیدان موجود در هسته و کلروپلاست باعث بهبود فعالیت آنتی اکسیدانی گیاه می شوند (Rabelo et al., 2019; Chamnanmanoontham et al., 2015). از طرف دیگر کیتوزان پس از ورود به گیاه در اثر فعالیت آنزیم های کتین سیتاز و کیتوزان داستیلاز تغییر ساختار داده و به اولیگومر کیتوزان تبدیل می شود که این ترکیب به عنوان یک پیام رسان ثانویه قوی باعث تحریک فعالیت آنزیمی عمل می کند (Hadwiger, 2015).

ABA در القای فرآیند سیستم دفاعی و آنتی اکسیدانی نقش مهمی دارد. به نظر می رسد آبسازیک اسید با ایجاد تغییرات متابولیک سلولی سبب افزایش سطح رادیکال های اکسیژن و در پی آن، افزایش فعالیت سیستم دفاع آنزیمی می شود (Ali et al., 2020; Edel and Kudlu, 2016). مشابه نتایج حاضر Chen و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که محلول پاشی ABA با بهبود فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی و آنزیم های غیرآنتی اکسیدانی و همچنین کاهش آسیب اکسیداتیو اثر بازدارندگی ناشی از شوری را در گیاه برنج کاهش می دهد. از طرف دیگر ABA با اتصال به گیرنده های غشای پلاسمایی باعث فعال شدن آبهارهای پیام رسانی از طریق اسیدی شدن

محیط سیتوزول و فعال سازی بیان ژن های مسئول سنتز آنزیم های آنتی اکسیدان می شود (Wong et al., 2022).

**عناصر برگ:** در تحقیق حاضر، با افزایش سطوح شوری غلظت  $\text{Na}^+$  در اندام هوایی علف لیمو افزایش پیدا کرد که این موضوع همراه با کاهش غلظت  $\text{K}^+$  و در نتیجه کاهش نسبت پتاسیم به  $\text{Na}^+$  بود. این نتایج مشابه با نتایج سایر محققین بود که نشان دادند در شرایط تنش شوری، تجمع  $\text{Na}^+$  در اندام هوایی باعث کاهش  $\text{K}^+$  می گردد (Alenazi et al., 2024). یون های  $\text{Na}^+$  و  $\text{K}^+$ ، که خواص فیزیکیوشیمیایی مشابهی دارند، در محل های انتقال برای ورود به سمپلاست رقابت می کنند بنابراین سطوح بالاتر  $\text{Na}^+$  در ریزوسفر جذب  $\text{K}^+$  را در خاک شور کاهش می دهد از این رو گیاهان باید به طور مداوم نسبت پایین  $\text{Na}^+$  به  $\text{K}^+$  را برای تحمل تنش شوری حفظ کنند (Evelin et al., 2019).

جریان بالای  $\text{Na}^+$  در محیط ریشه باعث مهار جذب  $\text{K}^+$  می شود که در نهایت ظرفیت فتوسنتزی، فعالیت های آنزیم های آنتی اکسیدان، بیوستنز و عملکرد پروتئین، آزادسازی هورمون و متابولیسم گیاهی و به این ترتیب رشد و عملکرد گیاه را مختل می کند (Kamran et al., 2020). پایین بودن نسبت  $\text{K}^+$  به  $\text{Na}^+$  در شرایط تنش شوری، بیانگر عدم توانایی گیاه در اجتناب از شوری از طریق کاهش جذب سدیم و تحمل کمتر گیاه و در نتیجه آسیب بیشتر گیاه به شرایط شوری خاک می باشد (Li and Yang, 2023).

محلول پاشی الیستورها باعث افزایش نسبت  $\text{K}^+$  به  $\text{Na}^+$  شد و تأثیر کیتوزان در مقایسه با ABA در بهبود این شاخص بیشتر بود. در تأیید این نتایج گزارش شده است که محلول پاشی کیتوزان در شرایط تنش شوری مانع از ایجاد اختلال در هموستازی یون می گردد و در نتیجه منجر به افزایش غلظت یون های مفید مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و آهن و کاهش یون های مضر مانند سدیم در گیاهان تحت تنش شوری می گردد (Elkarmout et al., 2022). از طرف دیگر ثابت شده است که محلول پاشی ABA، از طریق کاهش تعرق، باعث کاهش جذب  $\text{Na}^+$  از طریق ریشه می شود که این

موضوع باعث کاهش تجمع این یون در اندام هوایی در شرایط تنش شوری می شود (Parveen et al., 2021).

### نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می دهد شوری اثر منفی بر صفات رویشی و فیزیولوژیک گیاه علف لیمو دارد به طوریکه شوری موجب اثر منفی روی صفات رویشی، کاهش مقادیر رنگیزه گیاهی و نسبت  $K^+$  به  $Na^+$  اندام هوایی علف لیمو می شود. همچنین نتایج نشان داد که محلول پاشی کیتوزان و ABA در تمامی سطوح شوری (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار) اثر مثبتی بر صفات مورد ارزیابی در علف لیمو دارد و می توان از آن ها جهت کاهش اثرات نامطلوب شوری بر گیاه علف لیمو استفاده نمود. محلول پاشی علف لیمو با کیتوزان و ABA باعث افزایش

معنی دار شاخص های رویشی، رنگدانه های گیاهی و نسبت  $K^+$  به  $Na^+$  اندام هوایی می شود. همچنین این دو ترکیب از طریق افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی باعث کاهش پراکسیداسیون چربی و حفظ ساختار غشا سلولی علف لیمو در شرایط تنش شوری شدند. با بررسی کلیه صفات اندازه گیری شده می توان نتیجه گرفت که محلول پاشی علف لیمو با کیتوزان و ABA احتمالاً از طریق افزایش رنگدانه های گیاهی و ظرفیت آنتی اکسیدانی و همچنین بهبود شاخص نسبت پتاسیم به سدیم اثرات منفی شوری را تعدیل می کند که در این بین کیتوزان در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر برای بهبود رشد گیاه علف لیمو در همه شرایط مناسب تر بود.

### منابع

- باغبانی آرانی، ابوالفضل، و اداوی، ظهراب (۱۴۰۰). ارزیابی اثر سطوح و انواع مختلف کود نیتروژن بر رشد، عملکرد زیستی و اسانس و ترکیبات آن در دو توده شوید. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران. ۵۲، ۸۳-۹۵. <https://dor.isc.ac.ir/dor/20.1001.1.20084811.1400.52.2.7.5>
- تدین، محمودرضا، نظرنژاد، غلامرضا، دانش شهرکی، عبدالرزاق، و حاجبی، عبدالحمید (۱۴۰۱). اثر تیمارهای آب شور و برخی کودهای آلی بر صفات فیزیولوژیک و رشد گیاه لمون گراس (*Cymbopogon citratus*) مهندسی اکوسیستم بیابان، ۳۳ (۱۰)، ۲۷-۳۸. doi: 10.22052/deej.2021.10.33.21
- سلیمانی، فائزه، صمصام پور، داود، و باقری، عبدالنبی (۱۴۰۲). 'بررسی اثر قارچ آربوسکولار بر گیاه دارویی علف لیمو (*Cymbopogon citratus*) تحت تنش شوری. علوم باغبانی، ۳۷ (۳)، ۶۵۳-۶۴۳. doi: 10.22067/jhs.2022.75236.1140
- شامخ، محمدرضا، جعفری، لیلا، و عبدالحی، فرزین (۱۴۰۱). اثر محلول پاشی برخی تعدیل کننده های زیستی بر ویژگی های زیست شیمیایی، رویشی و عملکرد میوه گوجه فرنگی گلخانه ای در شرایط تنش خشکی. مجله علوم و فنون باغبانی ایران، ۲۳ (۳)، ۴۲۵-۴۳۶. <http://journal-irshs.ir/article-1-562-fa.html>
- شامخ، محمدرضا، جعفری، لیلا، و عبدالحی، فرزین (۱۴۰۰). اثر تعدیل کنندگی پرولین، کیتوزان و مشتقات آن بر رنگیزه های فتوسنتزی، شاخص های کلروفیل فلورسانس، ویژگی های کیفی و عملکرد گوجه فرنگی گلخانه ای (*Lycopersicon esculentum* Mill.) در شرایط کم آبیاری. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی، ۱۰ (۴۱)، ۷۷-۹۵. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1451-fa.html>
- کافی، محمد، باقری، عبدالرضا، نباتی، جعفر، زارع مهرجردی، محمد، و معصومی، علی (۱۳۸۹). بررسی تأثیر تنش شوری بر برخی متغیرهای فیزیولوژیک ۱۱ ژنوتیپ نخود در محیط هیدروپونیک. روابط خاک و گیاه (علوم و فنون کشت های گلخانه ای)، ۱ (۴)، ۵۵-۶۹.

Aazami, M. A., Maleki, M., Rasouli, F., & Gohari, G. (2023). Protective effects of chitosan based salicylic acid nanocomposite (CS - SA NCs) in grape (*Vitis vinifera* cv. 'Sultana') under salinity stress. *Scientific Reports*, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27618-z>

- Aghdam, M. S., Kakavand, F., Rabiei, V., Zaare-Nahandi, F., & Razavi, F. (2019).  $\gamma$ -Aminobutyric acid and nitric oxide treatments preserve sensory and nutritional quality of cornelian cherry fruits during postharvest cold storage by delaying softening and enhancing phenols accumulation. *Scientia Horticulturae*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.064>
- Alenazi, M. M., El-Ebidy, A. M., El-shehaby, O. A., Seleiman, M. F., Aldhuwaib, K. J., & Abdel-Aziz, H. M. M. (2024). Chitosan and chitosan nanoparticles differentially alleviate salinity stress in *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Plants*, 13(3), 398. <https://doi.org/10.3390/plants13030398>
- Ali, A., Pardo, J. M., & Yun, D. J. (2020). Desensitization of ABA-signaling: The swing from activation to degradation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00379>
- Alqarawi, A. A., Hashem, A., Abd Allah, E. F., Alshahrani, T. S., & Huqail, A. A. (2014). Effect of salinity on moisture content, pigment system, and lipid composition in *Ephedra alata* Decne. *Acta Biologica Hungarica*, 65(1), 61-71. <https://doi.org/10.1556/ABiol.65.2014.1.6>
- Anbarasi, G., & Somasundaram, S. T. (2020). Growth regulation and proteomic approaches of exogenous abscisic acid induced changes on salt tolerance factors in *Suaeda maritima*. *Plant Physiology Reports*, 25(1), 33-50. <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00477-5>
- Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.
- Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95-96. <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>
- Avoseh, O., Oyediji, O., Rungqu, P., Nkeh-chungag, B., & Oyediji, A. (2015). Cymbopogon Species; Ethnopharmacology, Phytochemistry and the Pharmacological Importance. *Molecules*, 20(5), 7438-7453. <https://doi.org/10.3390/molecules20057438>
- Balusamy, S. R., Rahimi, S., Sukweenadhi, J., Sunderraj, S., Shanmugam, R., Thangavelu, L., Mijakovic, I., & Perumalsamy, H. (2022). Chitosan, chitosan nanoparticles and modified chitosan biomaterials, a potential tool to combat salinity stress in plants. *Carbohydrate Polymers*, 284, 119189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119189>
- Barka, E. A., Lahlali, R., & Mauch-Mani, B. (2022). Editorial: Elicitors, secret agents at the service of the plant kingdom. *Frontiers in Plant Science*, 13, 8-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1060483>
- Borges, P. H. O., Pedreiro, S., Baptista, S. J., Geraldles, C. F. G. C., Batista, M. T., Silva, M. M. C., & Figueirinha, A. (2021). Inhibition of  $\alpha$ -glucosidase by flavonoids of *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf. *Journal of Ethnopharmacology*, 280, 114470.
- Carvalho, J. N., de, Roncalli, A. G., Cancela, M. de C., & Souza, D. L. B. de. (2017). Prevalence of multimorbidity in the Brazilian adult population according to socioeconomic and demographic characteristics. *PloS One*, 12(4), e0174322.
- Chakraborty, M., Hasanuzzaman, M., Rahman, M., Khan, M. A. R., Bhowmik, P., Mahmud, N. U., Tanveer, M., & Islam, T. (2020). Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer. *Agriculture (Switzerland)*, 10(12), 1-30. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120624>
- Chamkhi, I., Benali, T., Aanniz, T., El Menyiy, N., Guaouguaou, F. E., El Omari, N., El-Shazly, M., Zengin, G., & Bouyahya, A. (2021). Plant-microbial interaction: The mechanism and the application of microbial elicitor induced secondary metabolites biosynthesis in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 269-295.
- Chamnanmanoontham, N., Pongprayoon, W., Pichayangkura, R., Roytrakul, S., & Chadchawan, S. (2015). Chitosan enhances rice seedling growth via gene expression network between nucleus and chloroplast. *Plant Growth Regulation*, 75, 101-114.
- Chen, G., Zheng, D., Feng, N., Zhou, H., & Mu, D. (2022). Physiological mechanisms of ABA - induced salinity tolerance in leaves and roots of rice. *Scientific Reports*, 1-26. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11408-0>
- Cherki, G. H., Foursy, A., & Fares, K. (2002). Effects of salt stress on growth inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 47, 39-50. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00322-w>
- Du, X., Zhang, M., Wang, S., Li, J., Zhang, J., & Liu, D. (2024). Ethnopharmacology, chemical composition and functions of *Cymbopogon citratus*. *Chinese Herbal Medicines*, 16(3), 358-374. <https://doi.org/10.1016/j.chmed.2023.07.002>
- Edel, K. H., & Kudlu, J. (2016). Integration of calcium and ABA signaling. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.06.010>
- Elkarmout, A. F., Yang, M., & Hassan, F. A. (2022). Chitosan treatment effectively alleviates the adverse effects of salinity in *Moringa oleifera* Lam via enhancing antioxidant system and nutrient homeostasis. *Agronomy*, 12, 2513. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102513>
- EL Sabagh, A., Islam, M. S., Skalicky, M., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., Hossain, A., Mahboob, W., Iqbal, M. A., Ratnasekera, D., Singhal, R. K., Ahmed, S., Kumari, A., Wasaya, A., Sytar, O., Brestic, M., Cig, F., Erman, M., Habib Ur Rahman, M., & Arshad, A. (2021). Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the

- changing climate: Adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy*, 3, 1-20. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.661932>
- Evelin, H., Devi, T., Gupta, S., & Kapoor, R. (2019). Mitigation of salinity stress in plants by Arbuscular mycorrhizal symbiosis: Current understanding and new challenges. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00470>
- Foyer, C. H. (2018). Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 154, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>
- Ghahari, S., Sheybani, F., Zarnagh, H., Farokhnezhad Afshar, P., & Jamil, L. (2023). Comparison of the three methods of psychotherapy on marital satisfaction and intimacy in married women. *Moscow State University of Psychology and Education*, 12, 1-17. <https://doi.org/10.17759/cpse.2023120101>
- Ghasemi Pirbalouti, A., Malekpoor, F., Salimi, A., & Golparvar, A. (2017). Exogenous application of chitosan on biochemical and physiological characteristics, phenolic content and antioxidant activity of two species of basil (*Ocimum ciliatum* and *Ocimum basilicum*) under reduced irrigation. *Scientia Horticulturae*, 217, 114-122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.031>
- Hadwiger, L. A. (2015). Anatomy of a nonhost disease resistance response of pea to *Fusarium solani*: PR gene elicitation via DNase, chitosan and chromatin alterations. *Frontiers in Plant Science*, 6, 373. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00373>
- Hafeez, M. B., Raza, A., Zahra, N., Shaukat, K., Akram, M. Z., Iqbal, S., & Basra, S. M. A. (2020). Handbook of Bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00022-3>
- Hamada, A. M., & El-Enany, A. E. (1994). Effect of NaCl salinity on growth, pigment and mineral element contents, and gas exchange of broad bean and pea plants. *Biologia Plantarum*, 36, 75-81. <https://doi.org/10.1007/BF02921273>
- Huang, Y., Zhou, J., Li, Y., Quan, R., Wang, J., Huang, R., & Qin, H. (2021). Salt stress promotes abscisic acid accumulation to affect cell proliferation and expansion of primary roots in rice. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 10892.
- Humbal, A., & Pathak, B. (2023). Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolite in plants: A review ('VSI: secondary metabolites'). *Plant Stress*, 8, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100166>
- Isah, T. (2019). Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. *Biological Research*, 52(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s40659-019-0246-3>
- Kamies, R., Cannarozzi, G., Tadele, Z., Farrant, J., & Rafudeen, M. (2014). A proteomic approach to investigate the response of *Eragrostis tef* to drought. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> INPPO World Congress on Plant Proteomics: Methodology to Biology.
- Kamran, M., Parveen, A., Ahmar, S., Malik, Z., Hussain, S., Chattha, M. S., Saleem, M. H., Adil, M., Heidari, P., & Chen, J. T. (2020). An overview of hazardous impacts of soil salinity in crops, tolerance mechanisms, and amelioration through selenium supplementation. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(1), 148. <https://doi.org/10.3390/ijms21010148>
- Khalil, H. A., & Badr Eldin, A. M. (2021). Chitosan improves morphological and physiological attributes of grapevines under deficit irrigation conditions. *Journal of Horticultural Research*, 29(1), 9-22. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0003>
- Li, J., & Yang, Y. (2023). How do plants maintain pH and ion homeostasis under saline-alkali stress? *Frontiers in Plant Science*, 14, 1217193. <https://doi.org/doi:10.3389/fpls.2023.1217193>
- Li, C., Luo, Y., Zhang, W., Cai, Q., Wu, X., Tan, Z., Chen, R., Chen, Z., Wang, S., & Zhang, L. (2021). A comparative study on chemical compositions and biological activities of four essential oils: *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf, *Cinnamomum cassia* (L.) Presl, *Salvia japonica* Thunb. and *Rosa rugosa* Thunb. *Journal of Ethnopharmacology*, 280, 114472.
- Li, X., Li, S., Wang, J., & Lin, J. (2020). Exogenous abscisic acid alleviates harmful effect of salt and alkali stresses on wheat seedlings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph17113770>
- Massoud, G. F., Dapor, A. S., El-mansoury, M. A. M., & Mark, C. (2022). Impact of chitosan on growth and yield of lemongrass plant at different levels of irrigation water under sandy soil conditions. *Journal of Plant Production*, 13(6), 251-263. <https://doi.org/10.21608/jpp.2022.139065.1110>
- Mittler, R., Zandalinas, S. I., Fichman, Y., & Van Breusegem, F. (2022). Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23, 663-679. <https://doi.org/10.1038/s41580-022-00499-2>
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., & Crini, G. (2019). Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1667-1692. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00904-x>
- Muhammad, M. F., Aftab, B., Azam, M., Firdous, S., & Sadia, S. (2023). Short review : Crosstalk between abiotic and

- biotic stress responses of *Cymbopogon* species. *Research Gate*, 1-11.
- Mukarram, M., Khan, M. M. A., Uddin, M., & Corpas, F. J. (2022). Irradiated chitosan (ICH): An alternative tool to increase essential oil content in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). *Acta Physiologiae Plantarum*, 44(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03335-w>
- Mukarram, M., Khan, M. M. A., Kurjak, D., Lux, A., & Corpas, F. J. (2023a). Silicon nanoparticles (SiNPs) restore photosynthesis and essential oil content by upgrading enzymatic antioxidant metabolism in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1116769. doi: 10.3389/fpls.2023.1116769
- Mukarram, M., Khan, M. M. A., Kurjak, D., & Corpas, F. J. (2023b). Chitosan oligomers (COS) trigger a coordinated biochemical response of lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) plants to palliate salinity-induced oxidative stress. *Scientific Reports*, 13, 8636. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35931-w>
- Nguyen Van, S., Dinh Minh, H., & Nguyen Anh, D. (2013). Study on chitosan nanoparticles on biophysical characteristics and growth of Robusta coffee in green house. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2(4), 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.06.001>
- Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(6), 4056-4075. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1>
- Parveen, A., Ahmar, S., Kamran, M., Malik, Z., Ali, A., Riaz, M., Abbasi, G. H., Khan, M., Sohail, A., Rizwan, M., Afzal, S., & Ali, S. (2021). Absciscic acid signaling reduced transpiration flow, regulated Na<sup>+</sup> ion homeostasis and antioxidant enzyme activities to induce salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 101808. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101808>
- Rabelo, V. M., Magalhaes, P. C., Bressanin, L. A., Carvalho, D. T., Oliveira dos Reis, C., Karam, D., Doriguetto, A. C., Henrique dos Santos, M., Rodrigues dos Santos Santos Filho, P., & De Souza, T. C. (2019). The foliar application of a mixture of semisynthetic chitosan derivatives induces tolerance to water deficit in maize, improving the antioxidant system and increasing photosynthesis and grain yield. *Scientific Reports*, 9, 8164. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44649-7>
- Rehman, Z., Hussain, A., & Saleem, S. (2022). Exogenous application of salicylic acid enhances salt stress tolerance in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* STEUD. WATS.). *Pakistan Journal of Botany*, 54(2), 371-378. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-2\(13\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-2(13))
- Saddiq, M. S., Iqbal, S., Hafeez, M. B., Ibrahim, A. M. H., Raza, A., Fatima, E. M., Baloch, H., Jahanzaib Woodrow, P., & Ciarmiello, L. F. (2021). Effect of salinity stress on physiological changes in winter and spring wheat. *Agronomy*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy11061193>
- Salama, F. M., Abdel-Rahman, S. S. A., Ragaey, M. M., Mostafa, N. M. M., & Abdel-Kader, A. A. S. (2023). Biological and chemical substances as stimulants-inducing growth and oil yield in lemongrass under salinity stress. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 54(4), 90-107. <https://dx.doi.org/10.21608/ajas.2023.237082.1294>
- Salimi, F., Abdollahi, F., & Yavari, A. (2024). Investigating the quantitative and qualitative changes of Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil in response to drying methods. *Chemistry Africa*, 7, 3077-3087. <https://doi.org/10.1007/s42250-024-01023-z>
- Sepaskhah, A. R., Azizian, A., & Tavakoli, A. R. (2006). Optimal applied water and nitrogen for winter wheat under variable seasonal rainfall and planning scenarios for consequent crops in a semi- arid region. *Agricultural Water Management*, 8(4), 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.008>
- Shahrajabian, M. H., Chaski, C., Polyzos, N., Tzortzakis, N., & Petropoulos, S. A. (2021). Sustainable agriculture systems in vegetable production using chitin and chitosan as plant biostimulants. *Biomolecules*, 11(6), 819. <https://doi.org/10.3390/biom11060819>
- Sharif, R., Mujtaba, M., Ur Rahman, M., Shalmani, A., Ahmad, H., Anwar, T., Tianchan, D., & Wang, X. (2018). The multifunctional role of chitosan in horticultural crops; A review. *Molecules*, 23, 872. <https://doi.org/10.3390/molecules23040872>
- Sheng, K., Zheng, H., Shui, S. S., Yan, L., Liu, C., & Zheng, L. (2018). Comparison of postharvest UV-B and UV-C treatments on table grape: Changes in phenolic compounds and their transcription of biosynthetic genes during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 138, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.01.002>
- Singh, A., & Roychoudhury, A. (2023). Absciscic acid in plants under abiotic stress: Crosstalk with major phytohormones. *Plant Cell Reports*, 42, 961-974. <https://doi.org/10.1007/s00299-023-03013-w>
- Solomon, O., Enitan, F., Temitope, D., & Abraham, K. (2019). Phytochemistry and pharmacological activities of *Cymbopogon citratus*: A review. *Scientific African*, 6, e00137. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00137>
- Tariq, S., Bano, A., & Khan, N. (2023). Comparative analysis of various strains of plant growth promoting rhizobacteria on the physiology of garlic (*Allium sativum*). *Natural Science*, 15(03), 79-90. <https://doi.org/10.4236/ns.2023.153007>
- Toscano, S., Romano, D., & Ferrante, A. (2023). *Molecular Responses of Vegetable , Ornamental Crops , and Model Plants to Salinity Stress*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3190.

- Ullah, N., Basit, A., Ahmad, I., Ullah, I., Shah, S. T., Mohamed, H. I., & Javed, S. (2020). Mitigation the adverse effect of salinity stress on the performance of the tomato crop by exogenous application of chitosan. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, 181. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00435-4>
- Umukoro, S., Ben-Azu, B., Ajayi, A. M., Adebesein, A., & Emokpae, O. (2020). *Cymbopogon citratus* aqueous leaf extract attenuates neurobehavioral and biochemical changes induced by social defeat stress in mice. *Chinese Herbal Medicines*, 12(3), 303-309.
- Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151(1), 59-66. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
- Wang, X., Ma, G., Feng, N., Zheng, D., Zhou, H., Li, J., Wu, J., Xu, B., Su, W., & Huang, Y. (2025). Absciscic acid can improve the salt tolerance and yield of rice by improving its physiological characteristics. *Agronomy*, 15(2), 309. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020309>
- Wong, A., Bi, C., Pasqualini, S., & Gehring, C. (2022). Absciscic acid (ABA) signaling: finding novel components off the beaten track. *Plant Growth Regulation*, 97, 585-592. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00823-y>
- Woodrow, P., Ciarmiello, L. F., Annunziata, M. G., Pacifico, S., Iannuzzi, F., Mirto, A., D'Amelia, L., Dell'Aversana, E., Piccolella, S., Fuggi, A., & Carillo, P. (2017). Durum wheat seedling responses to simultaneous high light and salinity involve a fine reconfiguration of amino acids and carbohydrate metabolism. *Physiologia Plantarum*, 159(3), 290-312. <https://doi.org/10.1111/ppl.12513>
- Xu, Z., Wang, J., Zhen, W., Sun, T., & Hu, X. (2022). Absciscic acid alleviates harmful effect of saline-alkaline stress on tomato seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 175, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.018>
- Ye, N., Wang, Y., Yu, H., Qin, Z., Zhang, J., & Duan, M. (2023). Absciscic acid enhances trehalose content via OsTPP3 to improve salt tolerance in rice seedlings. *Plants (Basel)*, 12(14), 2665.
- Zheng, H., Liu, W., Liu, S., Liu, C., & Zheng, L. (2019). Effects of melatonin treatment on the enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit. *Food Chemistry*, 299, 125116. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125116>

## Physiological, biochemical responses and changes in leaf element of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) to some elicitors under salt stress conditions

Fatemeh Salimi, Farzin Abdollahi\*, Alireza Yavari

Department of Horticulture Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

(Received: 2025/04/13, Accepted: 2025/06/10)

### Abstract

Recently, applying biological and hormonal elicitors, including chitosan and abscisic acid (ABA), has been recommended to mitigate the harmful effects of environmental stresses, such as salinity stress, in various plants. For this purpose, this study was conducted as a factorial experiment with two factors: salinity (0, 50, and 100 mM) and different levels of elicitor application (0, 50 mg/L chitosan, 100 mg/L chitosan, 10 mg/L ABA, and 5 mg/L ABA) in a completely randomized design with three replicates in the University of Hormozgan on lemongrass under salinity stress. The present study showed that salinity harmed lemongrass vegetative and physiological traits and the ionic composition. A salinity level of 100 mM significantly reduced the shoot dry weight, total dry weight, and leaf area by 20.71%, 12.40%, and 27.76%, respectively, and increased Na<sup>+</sup> content in leaves by 37.60% compared to the control without spraying. Under 100 mM salinity conditions, the application of 100 mg/L chitosan significantly increased the shoot fresh weight of aerial parts, chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, and carotenoids by 20.86%, 229.5%, 105.3%, 206.8%, and 196.2%, respectively. The application of 10 mg/L ABA resulted in a significant increase in the total fresh weight and the number of tillers by 22.9% and 85.0%, respectively, compared to the control. Salt stress increases hydrogen peroxide production, which leads to enhanced membrane lipid peroxidation and consequently higher malondialdehyde (MDA) levels. Meanwhile, elicitors limited lipid peroxidation and MDA production by boosting antioxidant capacity. Among these, chitosan at 100 mg/L and ABA at 10 mg/L were the most effective. The results indicated that the application of elicitors increased relative water content, enhanced the K<sup>+</sup> to Na<sup>+</sup> ratio, and reduced ionic leakage under salinity stress conditions. Therefore, using biological elicitors, especially 100 mg/L chitosan, increased adaptation of lemongrass to salinity stress, which could be considered a strategy for the growth improvement of this plant in saline areas of Iran.

**Keywords:** Abscisic acid, Chitosan, Medicinal plant, Lemongrass

Corresponding author, Email: fabdollahi@hormozgan.ac.ir