

مواد و روش‌ها:

بذرهای سه گونه *Halostachys caspica*، *Atriplex leucoclada* و *Seidlitzia rosmarinus* از تالاب گاوخونی جمع‌آوری و پس از ضدعفونی کشت شدند. گیاهچه‌ها به سیستم هیدروپونیک با محلول هوگلند نصف منتقل و با غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌مولار NaCl تیمار شدند. نمونه‌برداری اندام هوایی برای بیان ژن P5CS با qRT-PCR و برای پرولین یک هفته پس از تیمار انجام شد. پرولین به روش Bates و بیان ژن P5CS با qRT-PCR روش $\Delta\Delta Ct$ و ژن مرجع 18 rRNA اندازه‌گیری شد. داده‌ها با ANOVA در نرم‌افزار SPSS تحلیل شدند (۳ تکرار).

جدول ۲: همبستگی بین محتوای پرولین و بیان ژن در سه گونه هالوفیت

گونه گیاهی	r (Proline vs FC)	نوع همبستگی
<i>Halostachys caspica</i>	۰/۰۳	بدون همبستگی
<i>Atriplex leucoclada</i>	۰/۱	بسیار قوی و مثبت
<i>Seidlitzia rosmarinus</i>	۰/۴۱	منفی متوسط

منابع:

Aranda, P. S., LaJoie, D. M., and Jorcyk, C. L. (2012). Bleach gel: A simple agarose gel for analyzing RNA quality. *Electrophoresis*, 33(2), 366–369.

Bates, L. S., Waldren, R. P., and Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205–207. <http://link.springer.com/>

Guo, C. J., Zhang, T., Leng, Q., Zhou, X., Zhong, J., and Liu, J. L. (2024). Dynamic Arabidopsis P5CS filament facilitates substrate channelling. *Nature Plants*, 10(6), 880–889.

Munns, R., Passioura, J. B., Colmer, T. D., and Byrt, C. S. (2020). Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil. *New Phytologist*, 225(3), 1091–1096.

Slama, I., Abdelly, C., Bouchereau, A., Flowers, T., and Saviouré, A. (2015). Diversity, distribution and roles of osmoprotective compounds accumulated in halophytes under abiotic stress. *Annals of Botany*, 115, 433–447.

Tran, D. Q., Konishi, A., Cushman, J. C., Morokuma, M., Toyota, M., and Agarie, S. (2020). Ion accumulation and expression of ion homeostasis-related genes associated with halophitism and NaCl-promoted growth in the halophyte *Mesembryanthemum crystallinum* L. *Plant Production Science*, 23(1), 91–102.

چکیده

شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی محدودکننده تولید گیاهان است. در این مطالعه، پاسخ سه هالوفیت *Halostachys caspica*، *Atriplex leucoclada* و *Seidlitzia rosmarinus* به شوری ۰، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌مولار با سنجش پرولین و بیان ژن P5CS بررسی شد. *A. leucoclada* افزایش همزمان پرولین و بیان P5CS (به‌ویژه در ۲۵۰ میلی‌مولار) را نشان داد. در *S. rosmarinus* افزایش پرولین تنها در ۵۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد، در حالی که *H. caspica* وابستگی به مکانیسم‌های غیرپرولینی تحمل شوری را نشان داد. نتایج بیانگر تنوع راهبردهای مولکولی هالوفیت‌ها در تحمل شوری است.

نتایج و بحث

محتوای پرولین اندام‌های هوایی (شکل ۱):

در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار، اختلاف معنی‌دار پرولین بین *H. caspica* و *S. rosmarinus* مشاهده شد. در ۲۵۰ میلی‌مولار، بیشترین انباشت پرولین در *A. leucoclada* ثبت شد، در حالی که بین *S. rosmarinus* و *H. caspica* تفاوتی وجود نداشت. در ۵۰۰ میلی‌مولار اختلاف معنی‌داری بین گونه‌ها دیده نشد. افزایش معنی‌دار پرولین تنها در *A. leucoclada* (۲۵۰ میلی‌مولار) و *S. rosmarinus* (۵۰۰ میلی‌مولار) مشاهده شد، اما *H. caspica* تغییر معنی‌داری نشان نداد.

بیان ژن P5CS در اندام‌های هوایی (شکل ۲ و جدول ۱):

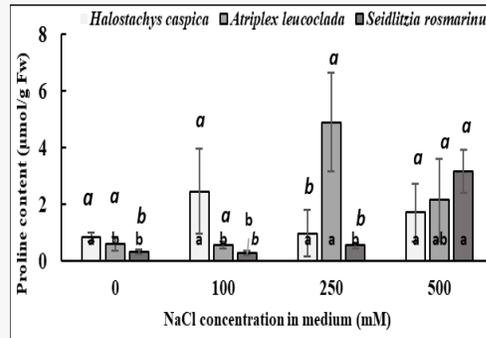
اثر تیمار نمک بر بیان ژن P5CS معنی‌دار بود ($p < 0.001$)، اما اثر گونه و اثر متقابل گونه-تیمار معنی‌دار نبود. افزایش معنی‌دار FC در *A. leucoclada* در ۲۵۰ میلی‌مولار و در *H. caspica* در تیمار شاهد و ۵۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد، در حالی که در *S. rosmarinus* تغییر معنی‌داری ثبت نشد.

همبستگی پرولین و بیان ژن (جدول ۲):

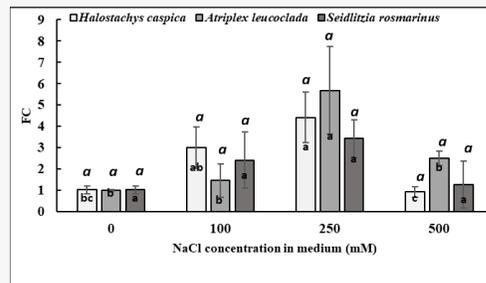
در *A. leucoclada* همبستگی مثبت و بسیار قوی بین پرولین و FC مشاهده شد ($r=0.99$)، که نشان‌دهنده فعال بودن مسیر سنتز پرولین در تحمل شوری است. در مقابل، *H. caspica* همبستگی ناچیز ($r=0.03$) و *S. rosmarinus* همبستگی منفی متوسط ($r=-0.41$) نشان دادند، که بیانگر استفاده از سازوکارهای جایگزین تنظیم اسمزی در این گونه‌ها است.

نتیجه‌گیری

یافته‌ها بیانگر وابستگی هالوفیت‌ها به گونه در تحمل شوری است؛ *Atriplex leucoclada* بر تنظیم ژنتیکی پرولین تکیه دارد، گونه‌های دیگر با تنظیم یونی یا اسمولیت‌ها سازگار می‌شوند، نیاز به بررسی دارد.



شکل ۱: اثر غلظت‌های مختلف NaCl بر محتوای پرولین اندام‌های هوایی *A. H. caspica*، *A. leucoclada* و *S. rosmarinus*. داده‌ها میانگین \pm انحراف معیار (n=3) هستند. حروف ایتالیک متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین گونه‌ها و حروف داخل ستون‌ها اختلاف معنی‌دار بین غلظت‌های نمک در هر گونه بر اساس آزمون توکی ($p < 0.05$) می‌باشند.



شکل ۲: اثر غلظت‌های مختلف NaCl بر FC ژن P5CS در اندام‌های هوایی *A. H. caspica*، *A. leucoclada* و *S. rosmarinus*. داده‌ها میانگین \pm انحراف معیار (n=3) هستند. حروف ایتالیک متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین گونه‌ها و حروف داخل ستون‌ها اختلاف معنی‌دار بین غلظت‌های نمک در هر گونه بر اساس آزمون توکی ($p < 0.05$) می‌باشند.

جدول ۱. آنالیز واریانس دو راهه اثرات گونه و تیمارهای نمک بر متغیرهای وابسته FC در بیان ژن P5CS

Source of changes	FC			
	Mean square	df	F	sig
Species	۰/۲۹۲	۲	۰/۵۳۱	۰/۵۹۲
Treatment	۱۰/۴۹۶	۳	۱۹/۱۰۴	۰/۰۰۰
Specie*Treatment	۰/۴۳۸	۶	۰/۷۹۷	۰/۵۷۷
R-squared (%)	۸۱/۹			