



بررسی گسترده ژنومی و آنالیز الگوی بیان خانواده ژنی HSP90 در گیاه آلوروپوس لیتورالیس تحت تنش شوری

سیدحمیدرضا هاشمی پطرودی^۱، قربانعلی نعمت‌زاده^۲، سمیرا محمدی^۳ و مارکوس کولمن^۴

۱- استادیار گروه مهندسی ژنتیک و بیولوژی، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول: shr.hashemi@sanru.ac.ir)

۲- استاد گروه مهندسی ژنتیک و بیولوژی، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- دانشجوی دکتری اصلاح نباتات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴- گروه ژنتیک مولکولی، مؤسسه ژنتیک گیاهی و تحقیقات گیاهان زراعی لینینز (IPK)، آلمان

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۸/۵/۱۵

صفحه: ۱۳۴ تا ۱۴۳

چکیده

پروتئین‌های شوک حرارتی ۹۰ کیلو دالتونی (HSP90)، یک چاپرون مولکولی وابسته به ATP می‌باشند که توالی آن‌ها از درجه حفاظت‌شدگی بسیار بالایی در باکتری‌ها تا یوکاریوت‌ها برخوردار می‌باشند. در گیاهان، پروتئین‌های HSP90 برای کنترل رشد و نمو طبیعی گیاه و همچنین پاسخ دفاعی در برابر محرک‌های زیست‌محیطی مورد نیاز می‌باشند. گرچه مطالعات متعددی در مورد نقش فیزیولوژیکی HSP90ها در گیاهان وجود دارد، با این حال شناخت ما از مکانیسم‌های دفاعی پروتئین‌های HSP90 در پاسخ به تنش، نقش آن‌ها به‌عنوان چاپرون‌های مولکولی و برهم‌کنش‌های مولکولی آن‌ها با دیگر پروتئین‌ها و کوچاپرون‌ها محدود می‌باشد. بنابراین، در مطالعه حاضر، با آنالیز جامعی از خانواده ژنی HSP90 در گیاه هالوفیت *Aeluropus litoralis* ۴ ژن HSP90 در این گیاه شناسایی و با استفاده از آنالیز پیش‌بینی جایگاه سلولی مشخص شد که این ژن‌ها در بخش‌های مختلف سلولی فعال می‌باشند. با استفاده از ابزارهای بیوانفورماتیکی مختلفی، ۴۵ ژن HSP90 نیز در سایر گونه‌های آراییدوپسیس، برنج، ذرت، سویا و *Brachypodium distachyon* شناسایی گردید. ۴۹ ژن HSP90 مورد بررسی، از نظر فیلوژنتیکی در سه گروه اصلی تقسیم‌بندی شدند. آنالیز ساختارهای ژنی و ترکیب موتیف‌ها نشان داد که این ژن‌ها در هر گروه تقریباً از حفاظت‌شدگی بالایی برخوردارند، که بیانگر این است که اعضای هر گروه ممکن است دارای کارکردهای یکسانی باشند. بر اساس داده‌های RNA-seq، ژن *AIHSP90.4* فعال در سیتوپلاسم با سطح بیان ۱/۳، بیشترین بیان را در بافت ریشه تحت شرایط تنش شوری و بازیابی به نمایش گذاشت. حداقل سطح بیان، نیز در ژن *AIHSP90.3* واقع در شبکه آندوپلاسمی، در پاسخ به تنش شوری و در شرایط بازیابی در بافت برگ مشاهده گردید. یافته‌های این بررسی، ضمن ارائه خصوصیات عملکردی ژن‌های *AIHSP90* اطلاعات پایه‌ای را برای تحقیقات آتی در مورد کاربرد بیولوژیکی این ژن‌ها مهیا می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آلوروپوس لیتورالیس، آنالیز بیان، آنالیز فیلوژنتیکی، پروتئین شوک حرارتی، HSP90

مقدمه

گیاهان در طول دوره رشد و نمو خود، اغلب در معرض تنش‌های غیرزیستی مختلفی، مانند شوری، خشکی، شدت نور بالا، شوک حرارتی، سرما و آلودگی‌های شیمیایی قرار می‌گیرند. این تنش‌ها با تأثیر بر روی گیاهان، سبب آسیب سلولی و القای واکنش‌های زیادی مانند پاسخ اسمزی و تنش اکسیداتیو می‌شوند (۳۹). گیاهان متنوع، پاسخ‌ها یا مکانیسم‌های دفاعی خاصی را برای مقابله با محیط‌های تحت تنش توسعه داده‌اند. یک مورد از این پاسخ‌ها، القای ژن‌های شوک حرارتی است که پروتئین‌های شوک حرارتی (HSP) (ها) را برای بقای سلول‌های تحت تنش کد می‌نمایند (۳۴). HSPها بر اساس وزن مولکولی خود، به پنج دسته اصلی به‌نام‌های HSP100 (یعنی ۱۰۰ کیلودالتون)، HSP90، HSP70، HSP60 و small HSP (sHSP) تقسیم می‌شوند. پروتئین‌های شوک حرارتی ۹۰ کیلو دالتونی یا HSP90 یک چاپرون مولکولی وابسته به ATP می‌باشند که توالی آن‌ها از درجه حفاظت‌شدگی بسیار بالایی در باکتری‌ها تا یوکاریوت‌ها و همولوگ‌های موجود در موجودات مختلف برخوردار هستند (۳۰). ساختار مرکزی پروتئین‌های HSP90، شامل یک دمین اتصال به ATP در انتهای آمینی، یک دمین میانی و یک دمین دایمریزاسیون^۲ در انتهای کربوکسیلی می‌باشند (۳۰).

یکی از ویژگی‌های قابل توجه HSP90ها در یوکاریوت‌ها، دارا بودن یک دمین اتصال‌دهنده طویل و پر انرژی بین انتهای آمینی و دمین میانی می‌باشد (۱۱). پروتئین‌های HSP90 در تنظیم و حفظ سازگاری انواع از پروتئین‌ها و همچنین حفاظت از سلول‌های طبیعی در برابر محرک‌های تنش نقش دارند (۳۱). در قارچ‌ها و در حیوانات، HSP90ها نقش‌های گسترده‌ای را در انتقال سیگنال تنش، مانند تاخوردگی گیرنده‌های هورمون‌های استروئیدی، پروتئین کینازها، فاکتورهای رونویسی و همچنین فعال‌سازی یک سوپسترا برای شروع انتقال سیگنال تنش ایفا می‌نمایند (۲۰، ۳۵، ۴۶). مطالعات اخیر در مورد HSP90های گیاهی بیشتر روی آنالیز تکاملی و عملکردهای فیزیولوژیکی متمرکز شده است (۱، ۴۰، ۴۱). در بسیاری از گیاهان، تعدادی از ژن‌های HSP90 شناسایی شده‌اند که تحت تنش‌های شوری، گرما، خشکی و فلزات سنگین به‌شدت بیان می‌شوند (۱۰، ۴۲). بیش‌بیش بیان ژن‌های *AtHSP90-2* در سیتوزول، *AtHSP90-5* در کلروپلاست و *AtHSP90-7* در شبکه آندوپلاسمی، تحمل آراییدوپسیس را در برابر تنش‌های شوری و خشکی کاهش، اما تحمل به غلظت بالای کلسیم را افزایش دادند (۳۶). القای ژن‌های پاسخگو به آبسزیک اسید با بیش‌بیش بیان *AtHSP90-2* سیتوزولی به تأخیر افتاد، اما با

در سیستم Illumina HiSeq 2500 به دست آمده است (منتشر نشده).

برای شناسایی اعضای خانواده ژنی *HSP90* در گیاه آلورپوس لیتورالیس، آنالیز جستجوی tBLASTN با استفاده از توالی‌های پروتئینی *HSP90* آراییدوپسیس و برنج به عنوان query در توالی ژنوم آلورپوس به صورت Local BLAST در نرم‌افزار BioEdit با E-value کمتر از 1E-10 انجام شد (۱۲). سپس تمام توالی‌های پروتئینی دریافت و توالی‌های تکراری حذف گردید. در ادامه، توالی‌ها به صورت دستی برای تأیید حضور دمین‌های HATPase و *HSP90* با استفاده از پایگاه‌های اطلاعاتی InterProScan (<https://www.ebi.ac.uk/interpro/search/sequence-> search) و Pfam (<http://pfam.xfam.org/>) مورد آنالیز اولیه قرار گرفتند (۶،۲۱). سپس توالی‌های CDS و ژنومی این خانواده شناسایی گردید.

توالی‌های پروتئینی *HSP90* ذرت، سویا و *Brachypodium distachyon* نیز از پایگاه اطلاعاتی Phytozome (<https://phytozome.jgi.doe.gov/pz/>) جمع‌آوری شدند. سپس توالی‌های پروتئینی به دست آمده با استفاده از پایگاه Pfam مورد بررسی قرار گرفتند.

تجزیه و تحلیل خصوصیات فیزیکی-شیمیایی پروتئین‌ها
برای پیش‌بینی جایگاه سلولی پروتئین‌های *HSP90* آلورپوس و آراییدوپسیس، از برنامه WoLF PSORT (<https://wolffpsort.hgc.jp/>) استفاده گردید (۱۹). نقاط ایزوالکتریک (PI) و وزن مولکولی (MW) پروتئین‌ها نیز با استفاده از ابزار ProtParam از پایگاه اطلاعاتی آنالین (<https://web.expasy.org/protparam/>) برآورد شد (۷).

شناسایی ساختار آگزون-اینترون

با استفاده از توالی‌های CDS و ژنومی آلورپوس و آراییدوپسیس، ساختار آگزون-اینترون ژن‌های *HSP90* در این گیاهان با استفاده از برنامه GSDS (<http://gsds.cbi.pku.edu.cn/>) ترسیم گردید.

شناسایی موتیف‌ها

شناسایی موتیف‌های حفاظت‌شده در توالی‌های پروتئینی *HSP90* آلورپوس و آراییدوپسیس، با برنامه MEME (<http://meme-suite.org/tools/meme/>) انجام گردید (۲). پارامترهای مورد استفاده شامل تعداد تکرار صفر یا یک برای هر توالی، شناسایی حداکثر ۱۰ موتیف، و حداقل و حداکثر طول موتیف‌ها به ترتیب ۶ و ۵۰ اسیدآمینو بود. لوگوی این موتیف‌ها توسط برنامه MEME ترسیم گردید و سپس انوتیشن آن‌ها در نرم‌افزار PSSMSearch (<http://slim.ucd.ie/pssmsearch/>) مورد بررسی قرار گرفت (۲۵).

تجزیه و تحلیل فیلوژنتیکی با ژن‌های اورتولوگ در دیگر گیاهان زراعی

روابط تکاملی میان ژن‌های *HSP90* در گونه‌های آلورپوس، آراییدوپسیس، برنج، ذرت، سویا و

بیش‌بیان ژن‌های *AtHSP90-5* و *AtHSP90-7* در شرایط تنش شوری و خشکی به شدت بیان شد. این امر نشان می‌دهد که در آراییدوپسیس، *HSP90*‌ها با چیدمان‌های مختلف سلولی، ممکن است از طریق مکانیسم‌های عملکردی متفاوت و احتمالاً از طریق مسیرهای وابسته به آبسزیک اسید یا کلسیم برای پاسخگویی به تنش‌های غیرزیستی مشارکت داشته باشند (۳۶).

اخیراً آنالیز پروتئومیکس و فسفوپروتئومیکس در گیاهان، نشان داد که تعدادی از پروتئین‌های *HSP90* تحت هر دو تنش خشکی و شوری القاء می‌شوند و احتمالاً در انتقال سیگنال در طول پاسخ به تنش درگیر هستند (۱۳،۲۶،۴۳). سیستم *HSP90* در گیاهان متفاوت از حیوانات می‌باشد. گیاهان با دارا بودن یک بخش سلولی اضافی به نام پلاستید، قادرند پاسخ‌های مولکولی سریعی را برای مقابله با تغییرات ناگهانی زیست‌محیطی اعمال کنند (۲۴). با وجود شناخت پروتئین‌های *HSP90* در گیاهان، با این حال، مطالعات محدودی در خصوص درک مکانیسم‌های دفاعی آن‌ها در پاسخ به تنش و برهم‌کنش‌های مولکولی آن‌ها با دیگر پروتئین‌ها و کوچاپرون‌ها صورت گرفته است (۳۲).

با توجه به تعیین توالی ژنوم گیاه هالوفیت آلورپوس لیتورالیس (*Aeluropus littoralis*) در پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری طبرستان (منتشر نشده)، فرصتی برای تجزیه و تحلیل و شناخت ژن‌های *HSP90* در یک گونه متحمل به تنش، فراهم گردید. گیاه آلورپوس لیتورالیس گیاهی است تک‌لپه از خانواده گندمیان که علاوه بر تحمل به شوری به طیف وسیعی از شرایط سخت محیطی متحمل می‌باشد (۱۶،۱۷،۱۸،۲۲). بنابراین این گیاه می‌تواند به عنوان یک منبع ژنتیکی حاوی ژن‌های متحمل به تنش‌های غیرزیستی برای اصلاح گیاهان زراعی در نظر گرفته شود (۴،۸،۹،۱۴،۱۵).

برای تعیین رابطه ساختار-عملکرد ژن‌های *HSP90* در این گیاه، آنالیز جامعی از سازمان‌دهی ژنوم، ساختار ژنی و پروفایل‌های بیان این ژن‌ها در دو بافت برگ و ریشه و پاسخ‌های آن‌ها تحت تنش شوری و بازیابی صورت گرفت. همچنین شباهت‌ها و تفاوت‌های بین پروتئین‌های *HSP90* در آلورپوس و آراییدوپسیس و روابط تکاملی بین این پروتئین‌ها در گونه‌های دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

شناسایی و بازیابی توالی‌های *HSP90*

ابتدا توالی‌های ژنومی، پروتئینی و CDS^۲ ژن‌های *HSP90* برنج و آراییدوپسیس، به ترتیب از پایگاه‌های اطلاعاتی RGAP (<http://rice.plantbiology.msu.edu/>) و TAIR (<https://www.arabidopsis.org/>) دریافت شدند. اطلاعات ژنوم مرجع گیاه آلورپوس لیتورالیس نیز در پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان موجود می‌باشد. این اطلاعات شامل ۱۵،۹۱۶ مدل ژن پیش‌بینی شده بوده که از تعیین توالی کامل ژنوم (WGS) آلورپوس

دارای جایگاه حفاظت شده *HSP90* (با شناسه PS00298) با توالی YsHKEVFLRE بودند. برای بررسی روابط تکاملی ژنهای *HSP90* در گیاهان، در مجموع، ۴۵ ژن *HSP90* شناسایی گردید که ۷ مورد به آراییدوپسیس، ۸ مورد به برنج، ۹ مورد به ذرت، ۱۳ مورد به سویا و ۸ مورد به *B. distachyon* تعلق داشت. با بررسی در پایگاه Pfam، حضور دمین‌های اختصاصی *HSP90* و HATPase_c تأیید گردید.

تجزیه و تحلیل خصوصیات فیزیوشیمیایی پروتئین‌ها
طول توالی کدکننده ژنهای *AIHSP90* از ۱۸۳۰ جفت‌باز در ژن *AIHSP90.2* تا ۲۴۲۱ جفت‌باز در ژن *AIHSP90.3* متغیر بود. طول پروتئین‌ها نیز از ۶۰۹ تا ۸۰۶ آمینواسید متغیر بود. وزن مولکولی آن‌ها نیز در محدوده ۶۹/۹۲ تا ۹۲/۴۸ کیلودالتون بود (جدول ۱).

طول پروتئین‌های *AtHSP90* از ۶۹۹ تا *AtHSP90.3* و *AtHSP90.4* تا ۸۲۳ اسیدآمینو (*AtHSP90.7*) و طول توالی‌های کدکننده این پروتئین‌ها از ۲۱۰۰ تا ۲۴۷۲ جفت‌باز متغیر بود. وزن مولکولی پروتئین‌ها نیز بین ۸۰/۰۵ تا *AtHSP90.3* (۹۴/۲۰ کیلودالتون متغیر بود (جدول ۱)).

دامنه نقطه ایزوالکتریک پروتئین‌های *AIHSP90* بیشتر اسیدی بوده و تنها یک پروتئین (*AIHSP90.2*) دارای نقطه ایزوالکتریک قلیایی (۷/۵) می‌باشد. نقطه ایزوالکتریک پروتئین‌های *AtHSP90* نیز اسیدی بوده و کمترین و بیشترین نقطه ایزوالکتریک با ۴/۹۳ در *AtHSP90.5* و ۵/۲۶ در *AtHSP90.6* مشاهده شد (جدول ۱).

مکان‌یابی سلولی یکی از ویژگی‌های کلیدی در بررسی کارکرد پروتئین می‌باشد و می‌تواند در فعالیت سلولی مشارکت داشته باشد و به‌طور کارآمدی در انتخاب جایگاه درست سلولی عمل کند (۴۵). آنالیزهای *In silico* با استفاده از نرم‌افزار پیش‌بینی جایگاه سلولی پروتئین‌ها، جایگاه احتمالی هر پروتئین را پیش‌بینی کرد. پروتئین‌های *AIHSP90.1* و *AIHSP90.2* با اطمینان بالا در کلروپلاست، *AIHSP90.3* در شبکه آندوپلاسمی و *AIHSP90.4* در سیتوپلاسم یا هسته، فعال هستند. همچنین مشخص شد که احتمالاً پروتئین‌های *AtHSP90.1* تا *AtHSP90.4* در سیتوپلاسم یا هسته، *AtHSP90.5* در کلروپلاست، *AtHSP90.6* در میتوکندری و *AIHSP90.4* در شبکه آندوپلاسمی، فعال می‌باشند (جدول ۱).

شناسایی ساختار اگزون-اینترون

بررسی ساختار ژنی می‌تواند شواهد بیشتری جهت تأیید روابط فیلوژنتیکی ارائه نماید. زیرا وجود اینترون فرآیند مهمی در تکامل ژنوم و یک مقیاس تطبیقی برای تکامل گونه می‌باشد (۲۹). در این تحقیق، ساختار اگزون-اینترون ژن‌های *AIHSP90* و *AtHSP90* با استفاده از پایگاه GSDS، ترسیم گردید. در بین ژن‌های *AIHSP90*، ژن *AIHSP90.1* با ۱۹ اگزون کوتاه و ۱۸ اینترون دارای بیشترین تعداد اگزون و اینترون بود. ژن *AIHSP90.4* نیز با ۴ اگزون و ۳ اینترون دارای کمترین تعداد اگزون و اینترون بود. در میان ژن‌های *AtHSP90*، ژن *AtHSP90.6* با ۲۰ اگزون کوتاه و ۱۹ اینترون دارای بیشترین تعداد اگزون و اینترون، و ژن‌های

B. distachyon به کمک توالی‌های پروتئینی حاصل از آن‌ها بررسی شد. ابتدا آنالیز هم‌ردیفی چندگانه با نرم‌افزار ClustalW (۳۸) انجام و در نهایت درخت فیلوژنتیکی با استفاده از نرم‌افزار MEGA 6.0 (۳۷) بر مبنای روش اتصال همسایه^۱ (NJ) با آزمون بوت‌استرپ^۲ (۵) با تکرار ۱۰۰۰ برای اطمینان از صحت گروه‌بندی ترسیم گردید.

آنالیز بیان ژن‌های *HSP90* در بافت‌های برگ و ریشه آلورپوس

برای آنالیز الگوی بیان ژن‌های *HSP90* آلورپوس از داده‌های RNA-seq استفاده شد. برای به‌دست آوردن داده‌های RNA-seq این گیاه، تنش شوری در غلظت ۶۰۰ میلی‌مولار بر روی گیاهان دو ماهه اعمال شد. سپس در زمان یک هفته پس از اعمال تنش شوری، نمونه‌برداری از دو بافت برگ و ریشه صورت گرفت. در ادامه، گیاهان باقیمانده به محیط هیدروپونیک فاقد نمک منتقل و از بافت‌های برگ و ریشه گیاهان بازیابی شده در مدت زمان یک هفته پس از انتقال به شرایط بازیابی، نمونه‌برداری صورت پذیرفت. فرآیند توالی‌یابی در دستگاه HiSeq 2500 شرکت Illumina صورت پذیرفت. آنالیز تفاوت بیان ژن‌ها به‌صورت Log2FC در شرایط تنش شوری و بازیابی با استفاده از نرم‌افزار CLC Genomics Workbench Version 6.5 (www.clcbio.com) بررسی گردید. بدین ترتیب که پس از تشکیل ماتریس بیان ژن که حاوی ژن‌ها و سطح بیان آن‌ها می‌باشد، بیان ژن‌های کاندید مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نتایج حاصله در نمودار Heatmap ترسیم شده توسط نرم‌افزار Clustvis (<https://biit.cs.ut.ee/clustvis/>) ارائه گردید (۲۸).

نتایج و بحث

شناسایی ژن‌های *HSP90* در آلورپوس لیئورالیس و سایر گونه‌های گیاهی

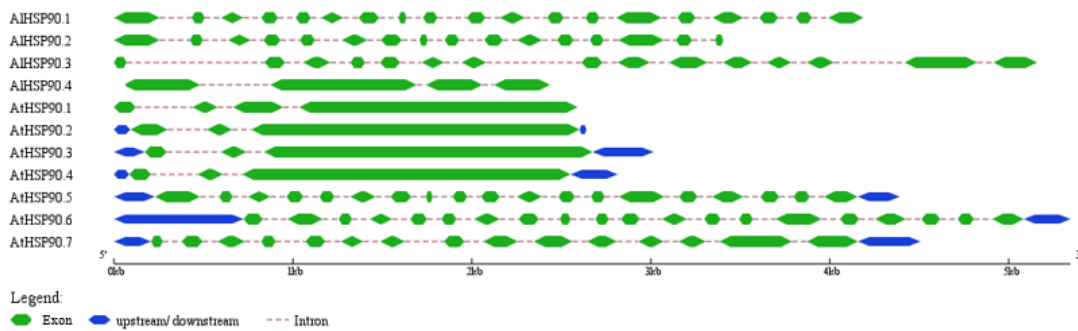
جهت شناسایی ژن‌های *HSP90* بالقوه در ژنوم آلورپوس لیئورالیس، آنالیز همولوژی بر مبنای پروتئین‌های *HSP90* آراییدوپسیس و برنج با ژنوم آلورپوس، منجر به شناسایی ۴ ژن گردید که در ۴ کانتینگ مختلف قرار داشتند. برای نام‌گذاری این ژن‌های *HSP90*، پیشوند AI قرار گرفته و به‌صورت *AIHSP90.1* تا *AIHSP90.4* نام‌گذاری شدند (جدول ۱). نتایج بررسی پروتئین‌ها در پایگاه InterProScan، نشان داد تمام پروتئین‌ها به خانواده پروتئینی *HSP90* با شناسه IPR001404 تعلق دارند. با بررسی این پروتئین‌ها در پایگاه Pfam، دمین‌های اختصاصی *HSP90* (PF00183) و HATPase_c (PF02518) مشاهده گردید. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است ژن *AIHSP90.4* دارای دو دمین *HSP90* می‌باشد. دمین HATPase_c متعلق به ابرخانواده اتصال به ATP^۳، شامل خانواده‌های پروتئینی متنوعی مانند DNA توپوایزومراز II، چاپرون‌های مولکولی *HSP90*، آنزیم‌های مسئول تعمیر بازهای اشتباه^۴ DNA، ATPase‌های شبیه فیتوکروم و هیستیدین کینازها می‌باشند (۳). در بررسی پروتئین‌های *HSP90* در سایت ScanProsite، نیز به جز *AIHSP90.4* بقیه پروتئین‌ها

اینترون دارای کمترین تعداد اگزون و اینترون بودند (شکل ۱).

جدول ۱- تعیین مشخصه ژن‌های *HSP90* در ژنوم آلورپوس لیتورالیس و آرابیدوسیس تالیانا

Table 1. Genomic characteristics of *HSP90* genes in *Aeluropus littoralis* and *Arabidopsis thaliana*

| نام ژن Gene Name | شماره ژن Gene ID | طول پروتئین Protein length (aa) | طول ژن Gene length (bp) | طول CDS CDS length (bp) | وزن مولکولی Molecular weight (kDa) | نقطه ایزوالکتریک Isoelectric point | جایگاه سلولی Subcellular localization | سازماندهی دمن Domain organization |
|---------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| <i>AIHSP90.1</i> | Alg920 | 780 | 4189 | 2343 | 87.83 | 4.99 | chlo: 13.5, chlo_mito: 7.5 | |
| <i>AIHSP90.2</i> | Alg14596 | 609 | 3405 | 1830 | 69.92 | 7.50 | chlo: 11.5, chlo_mito: 6.5, nucl: 2 | |
| <i>AIHSP90.3</i> | Alg13107 | 806 | 5158 | 2421 | 92.48 | 4.89 | E.R.: 14 | |
| <i>AIHSP90.4</i> | Alg2525 | 628 | 2437 | 1887 | 72.10 | 5.05 | cyto: 7.5, cyto_nucl: 6.5, nucl: 4.5, chlo: 1, cysk: 1 | |
| <i>AtHSP90.1</i> | At5g52640 | 700 | 2591 | 2103 | 80.63 | 4.96 | cyto: 8, nucl: 3, chlo: 2, plas: 1 | |
| <i>AtHSP90.2</i> | At5g56030 | 728 | 2640 | 2187 | 83.13 | 4.94 | cyto: 6, nucl: 2, plas: 2, mito: 1, vacu: 1, E.R.: 1, golg: 1 | |
| <i>AtHSP90.3</i> | At5g56010 | 699 | 3015 | 2100 | 80.05 | 4.95 | cyto: 7, plas: 2, nucl: 1, mito: 1, E.R.: 1, pero: 1, golg: 1 | |
| <i>AtHSP90.4</i> | At5g56000 | 699 | 2815 | 2100 | 80.14 | 4.96 | cyto: 7, nucl: 2, mito: 1, plas: 1, E.R.: 1, pero: 1, golg: 1 | |
| <i>AtHSP90.5</i> | At2g04030 | 780 | 4391 | 2343 | 88.66 | 4.93 | chlo: 13, nucl: 1 | |
| <i>AtHSP90.6</i> | At3g07770 | 799 | 5345 | 2400 | 90.57 | 5.26 | mito: 9.5, chlo_mito: 6.5, chlo: 2.5, nucl: 2 | |
| <i>AtHSP90.7</i> | At4g24190 | 823 | 4507 | 2472 | 94.20 | 4.94 | E.R.: 14 | |



شکل ۱- ساختار ژنی ژن‌های *HSP90* در آلورپوس و آرابیدوسیس. جعبه‌های سبز و آبی به ترتیب معرف ناحیه‌های اگزون و 5' و 3' UTR، و نقطه چین نشان‌دهنده اینترون‌ها می‌باشد. طول جعبه‌ها و نقطه چین‌ها بر اساس طول ژن‌ها مقیاس شده‌اند.

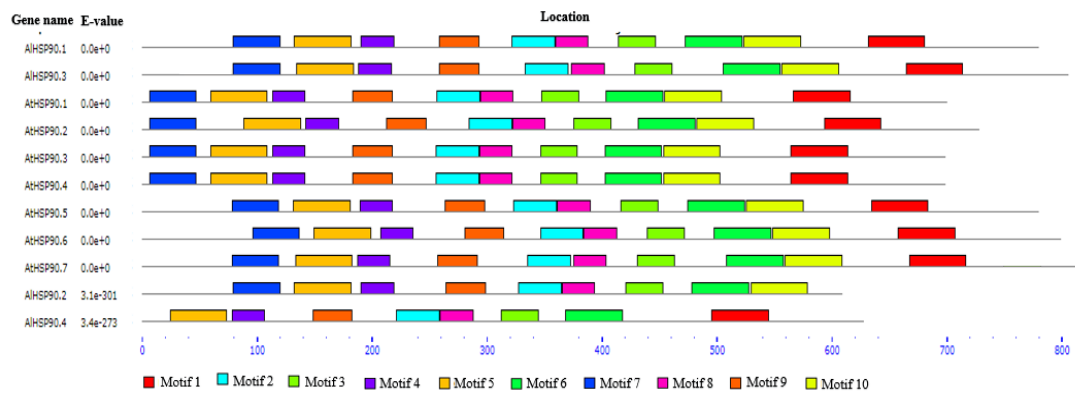
Figure 1. Gene structure of *HSP90* genes in *A. littoralis* and *A. thaliana*. Green and blue boxes indicate the exon and upstream/downstream UTR regions, respectively, while dashed lines indicate introns. The lengths of the boxes and dashed lines were scaled based on the length of the genes.

دارای کارکرد ¹HSP90AA4P با P-value (3.8e-09)،
 موتیف ۲ دارای کارکرد ²HSP90AB1 با P-value (3.8e-09)،
 موتیف ۳ دارای کارکرد ³PKNOX1 با P-value (4.7e-09)،
 موتیف ۴ دارای کارکرد ⁴STAM با P-value (2.4e-07)،
 موتیف ۵ دارای کارکرد ⁵TRP1 با P-value (1.0e-06)،
 موتیف ۶ دارای کارکرد ⁶EFCAB13 با P-value (0.8e-06)،
 موتیف ۷ دارای کارکرد ⁷TERF1 با P-value (2.0e-06)،
 موتیف ۸ دارای کارکرد ⁸GPS1 با P-value (2.0e-06)،
 موتیف ۹ دارای کارکرد ⁹USP34 با P-value (5.7e-07)،
 موتیف ۱۰ دارای کارکرد ¹⁰PNPLA8 با P-value (2.4e-06) و موتیف ۱۰ دارای کارکرد ¹⁰PNPLA8 با P-value (2.8e-07) می‌باشد.

شناسایی موتیف‌ها

جهت بررسی بیشتر تنوع بین توالی‌های آمینواسیدی *AIHSP90* و *AtHSP90* با برنامه MEME، ۱۰ موتیف متمایز شناسایی شد (شکل ۲). تمام پروتئین‌ها به جز *AIHSP90.2* و *AIHSP90.4* دارای ترکیب موتیف مشترکی بودند که احتمالاً نشان‌دهنده کارکرد مشابه آن‌ها می‌باشد. تعداد، پراکنش و حفاظت‌شدگی برخی دمن‌ها، دلالت بر نقش حیاتی آن‌ها در کارکردشان دارد. موتیف ۱ در تمام پروتئین‌ها به جز *AIHSP90.2* حضور داشتند و موتیف ۷ و ۱۰ فقط در پروتئین *AIHSP90.4* غایب بودند (شکل ۲). موتیف لوگوی موتیف‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. در بررسی انوتیشن این ۱۰ موتیف مشخص شد که موتیف ۱

- | | | |
|---|---|---|
| 1- HSP 90-alpha A4 | 2- Heat shock protein HSP 90-beta | 3- Homeobox protein PKNOX1 |
| 4- Signal transducing adapter molecule1 | 5- Heat shock protein 75 kDa, mitochondrial | |
| 6- EF-hand calcium-binding domain-containing protein 13 | | |
| 8- COP9 signalosome complex subunit 1 | | 7- Telomeric repeat-binding factor 1 |
| 10- Calcium-independent phospholipase A2-gamma | | 9- Ubiquitin carboxyl-terminal hydrolase 34 |



شکل ۲- موتیف‌های حفاظت‌شده پروتئین‌های HSP90 در آلوروپوس و آرابیدوپسیس. موتیف‌های شناسایی شده با شماره‌های ۱ تا ۱۰ با رنگ‌های مختلف و اندازه موتیف در پایین شکل، E-value و اسامی اعضای AIHSP90 و AtHSP90 در سمت چپ شکل نشان داده شده است.

Figure 2. Conserved motifs of HSP90 Proteins in *A. littoralis* and *A. thaliana*. The identified motifs were numbered from 1 to 10 with different colors, the motif sizes were indicated at the bottom of the figure, and the E-value and names of the AIHSP90 and AtHSP90 members were shown on the left side of the figure.

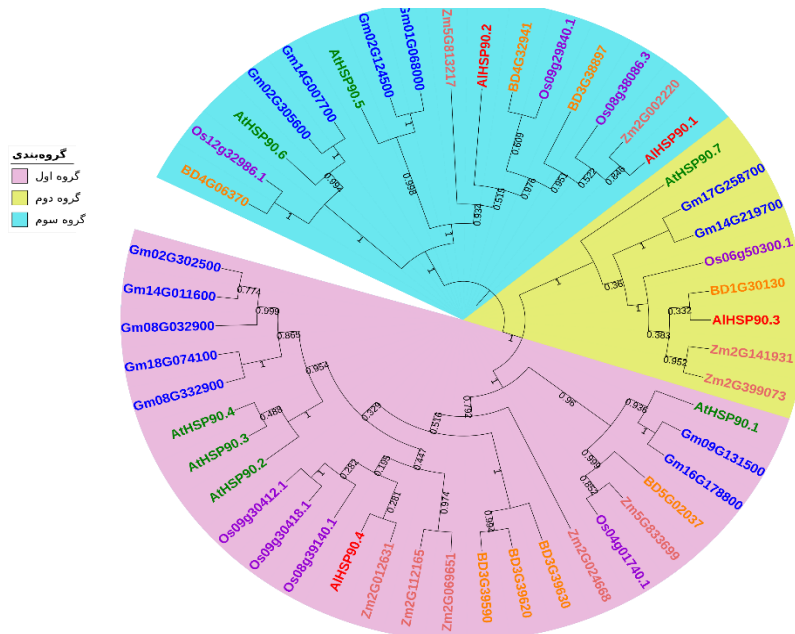
قبلی بود (۴۱،۴۴). نتایج نشان داد که ژن‌های واقع در هر گروه دارای ساختارهای اگزون-اینترون مشابه می‌باشند، در حالی که ژن‌های موجود در گروه‌های مختلف، ظاهری متفاوت از نظر ساختارهای اگزون-اینترون دارا بودند. علاوه بر این، این الگو در داخل گونه‌ها نیز مشاهده گردید. با استفاده از آنالیز مکان‌یابی سلولی، ژن‌های HSP90 فعال در هسته یا سیتوپلاسم در گروه اول واقع شدند. در گروه دوم، تقریباً ژن‌های فعال در شبکه آندوپلاسمی قرار گرفتند. ژن‌های واقع در گروه سوم نیز تقریباً در کلروپلاست یا میتوکندری فعال می‌باشند. بر اساس ساختار اگزون-اینترون و مکان‌یابی سلولی، می‌توان به قابل اعتماد بودن این طبقه‌بندی تکاملی در پروتئین‌های HSP90 گیاهی اطمینان حاصل کرد (۴۴).

تجزیه و تحلیل فیلوژنتیکی با ژن‌های اورتولوگ در دیگر گیاهان زراعی

جهت بررسی روابط تکاملی ژن‌های HSP90 در گونه‌های آلوروپوس، آرابیدوپسیس، برنج، ذرت، سویا و *B. distachyon*، توالی‌های آمینواسیدی ۴۹ پروتئین شناسایی شده ابتدا مورد آنالیز هم‌ردیفی چندگانه قرار گرفته، سپس درخت فیلوژنتیکی بر مبنای روش اتصال همسایه ترسیم گردید (شکل ۴). در نهایت، این ژن‌ها در ۳ گروه اصلی تقسیم‌بندی شدند. توزیع ژن‌های HSP90 در گونه‌های مختلف، تفاوت اندکی و الگوهای منحصر به فردی در هر گروه به نمایش گذاشت. از ۴۹ ژن HSP90 در این بررسی، ۲۵ ژن در گروه اول، ۸ ژن در گروه دوم و ۱۶ ژن در گروه سوم قرار گرفت (شکل ۴). این یافته‌ها مطابق با مطالعات



شکل ۳- موتیف لوگو توالی‌های HSP90 در آلوروپوس و آرابیدوپسیس. اندازه هر اسید آمینه، بیانگر فراوانی آن در زمین مربوطه می‌باشد.
Figure 3. Motif logos of HSP90 sequences in *A. littoralis* and *A. thaliana*. The height of the residue shows the relative frequency of each residue at that position.



شکل ۴- روابط فیلوژنتیکی اعضای خانواده HSP90 در ۶ گونه گیاهی. هم‌ردیفی چندگانه پروتئین‌های HSP90 در آلورپوس لیترالیس (Al)، آراییدوپسیس تالیانا (At)، برنج (Os)، ذرت (Zm) سویا (Gm) و *B. distachyon* (Bd) انجام و درخت فیلوژنتیکی به کمک نرم‌افزار MEGA 6.0 بر مبنای روش اتصال همسایه ترسیم گردید. مقادیر بوت استرپ روی شاخه‌های انتخابی نشان داده شده است.

Figure 4. Phylogenetic relationships of HSP90 family members from six plant species. Multiple alignment of HSP90 proteins from *A. littoralis* (Al), *A. thaliana* (At), *Oryza sativa* (Os), *Zea mays* (Zm), *Glycine max* (Gm) and *B. distachyon* (Bd) was performed using Clustal W, and a phylogenetic tree was constructed using by the Neighbor-Joining method using MEGA 6.0. Bootstrap values are shown on selected branches.

بیولوژیکی، به‌خصوص در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی مشارکت دارند (۳۶). علاوه بر این، تحقیقات قبلی نشان داده است که این ژن‌ها، مکانیسم‌های پاسخگویی متنوعی در پاسخ به تنش‌های مختلف به نمایش می‌گذارند (۲۷،۳۶). در این بررسی، ژن *AIHSP90.4* با داشتن دو دمین HSP90 که بر اساس مکان‌یابی سلولی در سیتوپلاسم فعال می‌باشد، در شرایط تنش شوری و بازیابی در بافت ریشه بیشترین بیان را نشان داد. ژانگ و همکاران (۴۴) با مشاهده روند افزایشی بیان ژن‌های *Bradi3g39620* و *Bradi5g02307* در پاسخ به تنش اسمزی عنوان نمودند که افزایش بیان این دو ژن *HSP90* سیتوپلاسمی ممکن است با آزادسازی فاکتورهای رونویسی نسبی که بیان ژن پایین‌دست تحمل به تنش را فعال می‌کنند، از طریق مسیر پیام‌دهی ABA در پاسخ به تنش اسمزی، مشارکت داشته باشند. علاوه بر این، ژن‌های *OsHSP90-2* و *OsHSP90-4* نیز در مواجهه با تنش‌های شوری، خشکی، سرما و گرما افزایش بیان نشان دادند (۳۳) که با نتایج این بررسی مطابقت دارند. در این مطالعه بر اساس مکان‌یابی سلولی و طبقه‌بندی تکاملی، ژن *AIHSP90.3* در شبکه آندوپلاسمی فعال می‌باشد. توزیع تکاملی این ژن با *AtHSP90.7* مشابه بود. الگوی بیانی این ژن در پاسخ به تنش شوری و تحت شرایط

آنالیز ترانسکریپتومیکس

به‌منظور بررسی الگوی بیان این خانواده ژنی، آنالیز ترانسکریپتوم گیاه آلورپوس لیترالیس در دو بافت برگ و ریشه، در شرایط تنش شوری و بازیابی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصله در مقیاس \log_2FC در نمودار Heatmap ارائه گردید (شکل ۵). در این تحقیق، بیان ژن به‌صورت افزایش بیان یا کاهش بیان مشاهده شد. ژن *AIHSP90.4* با مقدار بیان $1/3$ ، در شرایط تنش شوری و بازیابی در بافت ریشه (بیان $2/5$ برابری نسبت به شاهد)، بیشترین بیان را داشت. بعد از آن ژن *AIHSP90.2* دارای بیشترین مقدار بیان ($+0/74$)، در شرایط تنش شوری در بافت برگ بود. بیشترین کاهش بیان نیز در ژن *AIHSP90.3* در شرایط تنش شوری و بازیابی در بافت برگ مشاهده گردید. همان‌گونه که در نمودار Heatmap (شکل ۵) نشان داده شده است، الگوی متفاوتی در بیان ژن‌های *AIHSP90* مشاهده شد. این الگوی بیان متفاوت با توجه به وجود دمین‌های مشابه، می‌تواند به‌دلیل وجود عملکردهای مولکولی متفاوت و نیز مکانیسم‌های تنظیمی مختلف در کنترل فعالیت این ژن‌ها باشد.

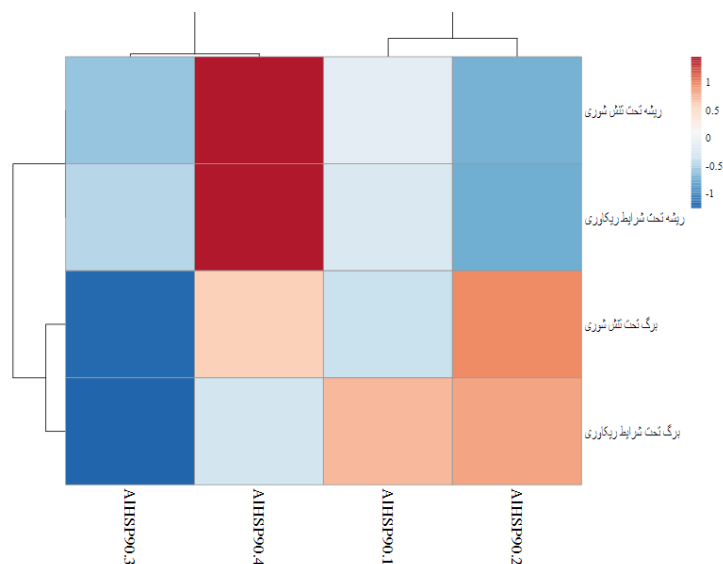
خانواده ژنی *HSP90* در گیاهان دارای کارکردهای متنوعی می‌باشند و آن‌ها در گستره وسیعی از فرآیندهای

که سطح پروتئین *HSP90* در گیاه برای هومئوستازی پروتئین‌های تحمل و یا پاسخ به تنش، حیاتی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب به شماره T234/96 انجام گردید و بدینوسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان جهت استفاده از امکانات آزمایشگاهی و حمایت‌های مالی در راستای تأمین هزینه‌های این تحقیق، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشند.

بازیابی در بافت برگگی کمترین بیان را نشان داد. در بررسی دیگری نشان داده شده است که *AtHSP90.7* در مقایسه با *AtHSP90.2* در پاسخ به تنش شوری و خشکی نیز حساسیت کمتری را نشان داد (۳۶). افزایش پروتئین *HSP90* در شبکه آندوپلاسمی می‌تواند تغییر و هدف‌گیری ترانسپورتهای یونی غشای پلاسمایی و واکوتلی را با کم کردن سدیم سیتوزولی برای مقابله با تنش شوری کاهش دهد (۲۳). علاوه بر این، افزایش پروتئین *HSP90*، بخصوص در کلروپلاست یا شبکه آندوپلاسمی می‌تواند منجر به یک هومئوستازی کلی شود، یا با تغییر سیستم ورود و خروج اندامکی یا هومئوستازی پروتئین، تحمل به تنش‌های اسمزی و شوری نرمال را افزایش دهد (۳۶). این نتایج نشان می‌دهد



شکل ۵- نمایش Heatmap و خوشه‌بندی سلسله مراتبی ژن‌های *HSP90* آلوروپوس لیئورالیس در دو بافت برگ و ریشه تحت شرایط تنش شوری و بازیابی

Figure 5. Heat map representation and hierarchical clustering of *A. littoralis HSP90* genes in leaf and root tissues under salinity stress and recovery conditions

منابع

1. Agarwal, G., V. Garg, H. Kudapa, D. Doddamani, L.T. Pazhamala, A.W. Khan, M. Thudi, S.H. Lee and R.K. Varshney. 2016. Genome-wide dissection of *AP2/ERF* and *HSP90* gene families in five legumes and expression profiles in chickpea and pigeonpea. *Plant biotechnology journal*, 14(7): 1563-1577.
2. Bailey, T.L., M. Boden, F.A. Buske, M. Frith, C.E. Grant, L. Clementi, J. Ren, W.W. Li and W.S. Noble. 2009. MEME SUITE: tools for motif discovery and searching. *Nucleic acids research*, 37: 202-208.
3. Dutta, R. and M. Inouye. 2000. GHKL, an emergent ATPase/kinase superfamily. *Trends in biochemical sciences*, 25(1): 24-28.
4. Faraji, S., H. Najafi-Zarrini, S. Hashemi-Petroudi and G. Ranjbar. 2017. *AIGLYI* gene implicated in salt stress response from halophyte *Aeluropus littoralis*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 64(6): 850-860.
5. Felsenstein, J. 1985. Confidence limits on phylogenies: an approach using the bootstrap. *Evolution*, 39(4): 783-791.
6. Finn, R.D., P. Coghill, R.Y. Eberhardt, S.R. Eddy, J. Mistry, A.L. Mitchell, S.C. Potter, M. Punta, M. Qureshi and A. Sangrador-Vegas. 2015. The Pfam protein families database: towards a more sustainable future. *Nucleic Acids Research*, 44: 279-285.

7. Gasteiger, E., C. Hoogland, A. Gattiker, M.R. Wilkins, R.D. Appel and A. Bairoch. 2005. Protein identification and analysis tools on the ExPASy server. In: Walker, J.M. (eds.) The proteomics protocols handbook. 571-607 pp., Humana Press, New York City, New York, United States.
8. Ghorbani, H., H. Samizadeh Lahiji and G.A. Nematzadeh. 2019. In Silico Characterization of Proteins Containing ARID-PHD Domain and Its Expression in *Aeluropus littoralis* Halophyte. Journal of Crop Breeding, 11(29): 143-152.
9. Ghorbani, H.R., H. Samizadeh Lahiji and G.A. Nematzadeh. 2017. Expression pattern analysis of transcription factors from *Aeluropus littoralis* in response to salt stress and recovery condition. Journal of Plant Molecular Breeding, 5(1): 19-30.
10. Grigorova, B., I. Vaseva, K. Demirevska and U. Feller. 2011. Combined drought and heat stress in wheat: changes in some heat shock proteins. Biologia Plantarum, 55(1): 105-111.
11. Hainzl, O., M.C. Lapina, J. Buchner and K. Richter. 2009. The charged linker region is an important regulator of Hsp90 function. Journal of Biological Chemistry, 284: 22559-22567.
12. Hall, T.A. 1999. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. Nucleic Acids Symposium Series, 41: 95-98.
13. Hao, P., J. Zhu, A. Gu, D. Lv, P. Ge, G. Chen, X. Li and Y. Yan. 2015. An integrative proteome analysis of different seedling organs in tolerant and sensitive wheat cultivars under drought stress and recovery. Proteomics, 15(9): 1544-1563.
14. Hashemi-Petroudi, S.H., H. Ghorbani and M. Kuhlmann. 2018. Isolation Phosphoglycerate Dehydrogenase gene from *Aeluropus littoralis* halophyte plant and functional analysis of T-DNA mutant in *Arabidopsis thaliana*. Crop biotechnology, 8(23): 79-92.
15. Hashemi-Petroudi, S.H., G.A. Nematzadeh, H. Askari and S. Ghahary. 2014. Involvement of Cytosine DNA methylation in different developmental stages of *Aeluropus littoralis*. Journal of Plant Molecular Breeding, 2(2): 56-67.
16. Hashemi-Petroudi, S.H., G.A. Nematzadeh, H. Askari and Y. Ghasemi. 2012. Pattern of DNA cytosine methylation in *Aeluropus littoralis* during temperature stress. Journal of Plant Molecular Breeding, 1(1): 16-24.
17. Hashemi-Petroudi, S.H., G.A. Nematzadeh and M. Kuhlmann. 2019. Identification and analysis of a *DEVIL* paralog gene cluster in *Aeluropus littoralis* by comparative genomic approach Crop biotechnology, 9(25): 79-92.
18. Hashemipetroudi, S., G. Nematzadeh, G. Ahmadian, A. Yamchi and M. Kuhlmann. 2016. Expression analysis of salt stress related expressed sequence tags (ESTs) from *Aeluropus littoralis* by quantitative real-time PCR. Bioscience Biotechnology Research Communications, 9(3): 445-456.
19. Horton, P., K.J. Park, T. Obayashi, N. Fujita, H. Harada, C. Adams-Collier and K. Nakai. 2007. WoLF PSORT: protein localization predictor. Nucleic acids research, 35: 585-587.
20. Jackson, S.E., C. Queitsch and D. Toft. 2004. Hsp90: from structure to phenotype. Nature Structural & Molecular Biology, 11: 1152-1155.
21. Jones, P., D. Binns, H.Y. Chang, M. Fraser, W. Li, C. McAnulla, H. McWilliam, J. Maslen, A. Mitchell and G. Nuka. 2014. InterProScan 5: genome-scale protein function classification. Bioinformatics, 30(9): 1236-1240.
22. Kaleybar Shahin, B., G. Nematzadeh, S.H.R. Hashemi, H. Askari and S. Kabirnataj. 2013. Physiological and Genetic Responses of Halophyte *Aeluropus Littoralis* to Salinity. Journal of Crop Breeding, 5(12): 15-29.
23. Klein, E.M., L. Mascheroni, A. Pompa, L. Ragni, T. Weimar, K.S. Lilley, P. Dupree and A. Vitale. 2006. Plant endoplasmic reticulum supports the protein secretory pathway and has a role in proliferating tissues. The Plant Journal, 48(5): 657-673.
24. Krishna, P. and G. Gloor. 2001. The Hsp90 family of proteins in *Arabidopsis thaliana*. Cell stress & chaperones, 6(3): 238-246.
25. Krystkowiak, I., J. Manguy and N.E. Davey. 2018. PSSMSearch: a server for modeling, visualization, proteome-wide discovery and annotation of protein motif specificity determinants. Nucleic acids research, 46: 235-241.
26. Lv, D.W., S. Subburaj, M. Cao, X. Yan, X. Li, R. Appels, D.F. Sun, W. Ma and Y.M. Yan. 2014. Proteome and phosphoproteome characterization reveals new response and defense mechanisms of *Brachypodium distachyon* leaves under salt stress. Molecular & Cellular Proteomics, 13(2): 632-652.
27. Marcu, M.G., M. Doyle, A. Bertolotti, D. Ron, L. Hendershot and L. Neckers. 2002. Heat shock protein 90 modulates the unfolded protein response by stabilizing IRE1 α . Molecular and cellular biology, 22(24): 8506-8513.
28. Metsalu, T. and J. Vilo. 2015. ClustVis: a web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. Nucleic acids research, 43: 566-570.

29. Moore, R.C. and M.D. Purugganan. 2003. The early stages of duplicate gene evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(26): 15682-15687.
30. Pearl, L.H. and C. Prodromou. 2000. Structure and in vivo function of Hsp90. *Current opinion in structural biology*, 10(1): 46-51.
31. Picard, D. 2002. Heat-shock protein 90, a chaperone for folding and regulation. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*, 59(10): 1640-1648.
32. Riggs, D.L., M.B. Cox, J. Cheung-Flynn, V. Prapapanich, P.E. Carrigan and D.F. Smith. 2004. Functional specificity of co-chaperone interactions with Hsp90 client proteins. *Critical reviews in biochemistry and molecular biology*, 39(5-6): 279-295.
33. Sangster, T.A., A. Bahrami, A. Wilczek, E. Watanabe, K. Schellenberg, C. McLellan, A. Kelley, S.W. Kong, C. Queitsch and S. Lindquist. 2007. Phenotypic diversity and altered environmental plasticity in *Arabidopsis thaliana* with reduced Hsp90 levels. *PloS one*, 2(7): e648.
34. Sangster, T.A. and C. Queitsch. 2005. The HSP90 chaperone complex, an emerging force in plant development and phenotypic plasticity. *Current opinion in plant biology*, 8(1): 86-92.
35. Shinozaki, F., M. Minami, T. Chiba, M. Suzuki, K. Yoshimatsu, Y. Ichikawa, K. Terasawa, Y. Emori, K. Matsumoto and T. Kurosaki. 2006. Depletion of Hsp90 β induces multiple defects in B cell receptor signaling. *Journal of Biological Chemistry*, 281(24): 16361-16369.
36. Song, H., R. Zhao, P. Fan, X. Wang, X. Chen and Y. Li. 2009. Overexpression of *AtHsp90. 2*, *AtHsp90. 5* and *AtHsp90. 7* in *Arabidopsis thaliana* enhances plant sensitivity to salt and drought stresses. *Planta*, 229(4): 955-964.
37. Tamura, K., G. Stecher, D. Peterson, A. Filipski and S. Kumar. 2013. MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Molecular biology and evolution*, 30(12): 2725-2729.
38. Thompson, J.D., T.J. Gibson and D.G. Higgins. 2003. Multiple sequence alignment using ClustalW and ClustalX. *Current protocols in bioinformatics*, 1: 2-3.
39. Wang, W., B. Vinocur, O. Shoseyov and A. Altman. 2004. Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends in plant science*, 9(5): 244-252.
40. Xu, Z.S., Z.Y. Li, Y. Chen, M. Chen, L.C. Li and Y.Z. Ma. 2012. Heat shock protein 90 in plants: molecular mechanisms and roles in stress responses. *International journal of molecular sciences*, 13(12): 15706-15723.
41. Zhang, J., J. Li, B. Liu, L. Zhang, J. Chen and M. Lu. 2013. Genome-wide analysis of the *Populus Hsp90* gene family reveals differential expression patterns, localization, and heat stress responses. *BMC genomics*, 14(1): 532.
42. Zhang, L., Y. Fan, F. Shi, S. Qin and B. Liu. 2012. Molecular cloning, characterization, and expression analysis of a cytosolic *HSP90* gene from *Haematococcus pluvialis*. *Journal of applied phycology*, 24(6): 1601-1612.
43. Zhang, M., C.Y. Ma, D.W. Lv, S.M. Zhen, X.H. Li and Y.M. Yan. 2014. Comparative phosphoproteome analysis of the developing grains in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under well-watered and water-deficit conditions. *Journal of proteome research*, 13(10): 4281-4297.
44. Zhang, M., Z. Shen, G. Meng, Y. Lu and Y. Wang. 2017. Genome-wide analysis of the *Brachypodium distachyon* (L.) P. Beauv. *Hsp90* gene family reveals molecular evolution and expression profiling under drought and salt stresses. *PloS one*, 12(12): e0189187.
45. Zhang, S., X. Xia, J. Shen, Y. Zhou and Z. Sun. 2008. DBMLoc: a Database of proteins with multiple subcellular localizations. *BMC bioinformatics*, 9(1): 127.
46. Zuehlke, A. and J.L. Johnson. 2010. Hsp90 and co-chaperones twist the functions of diverse client proteins. *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*, 93(3): 211-217.

Analysis of Expression Pattern of Genome and Analysis of *HSP90* Gene Family in *Aeluropus littoralis* under Salinity Stress

Seyyed Hamidreza Hashemi-Petroudi¹, Ghorbanali Nematzadeh², Samira Mohammadi³ and Markus Kuhlmann⁴

1- Assistant Professor, Department of Genetic Engineering and Biology, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan (GABIT), Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU)

(Corresponding author: shr.hashemi@sanru.ac.ir)

2- Professor, of Genetic Engineering and Biology, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan (GABIT), Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU)

3- PhD candidate in Plant Breeding, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU)

4- RG Abiotic Stress Genomics/ RG Heterosis, Department Molecular Genetics, Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK), Germany

Received: February 12, 2019

Accepted: August 6, 2019

Abstract

HSP90 protein is an ATP-dependent molecular chaperone that is evolutionarily conserved in bacteria to higher eukaryotes. In plants, HSP90s are required for control of normal plant growth and development, as well as immune responses to environmental stimuli. Although there are several studies explaining the physiological role of HSP90s in plants, our understanding of their stress response molecular mechanisms, their roles as molecular chaperones, and their molecular interactions with other clients and co-chaperones are still unclear. Therefore the present study aimed to perform a comprehensive analysis of the *HSP90* gene family in halophyte plant *Aeluropus littoralis*. Subcellular localization analysis showed that four identified *AIHSP90* gene were localized in different subcellular compartments. Based on different bioinformatics tools, 45 *HSP90* homologous genes were identified from *Arabidopsis*, rice, maize, soybean and *Brachypodium distachyon* species. 49 genes of *HSP90* were phylogenetically clustered into three major groups. Gene structure and motif composition revealed that these genes were relatively conservative in each group, suggesting that members of the same group may also have conserved functions. Based on RNA-seq data, *AIHSP90.4* gene localized in cytoplasm with expression levels of 1.3 was expressed more in root tissue under salinity stress and recovery. The least expression level was observed in *AIHSP90.3* gene localized in ER in root tissue under salinity stress and recovery. The findings of this study reveal the functional characteristics of the *AIHSP90* genes and provide basic information for future research on their biological functions.

Keywords: *Aeluropus littoralis*, Expression Analysis, Heat Shock Protein, HSP90, Phylogenetic Analysis