

تجزیه و تحلیل بیوانفورماتیکی توالی‌های EST گل شاخه بریده ژربرا (*Gerbera hybrid*) به منظور شناسایی ژن‌های دخیل در مقاومت به

بیماری بوتریتیس

Bioinformatics analysis of *Gerbera (Gerbera hybrid)* cut flower EST sequences to determining genes involved in resistance to Botrytis disease

علیرضا خالقی^{۱*}، حمید حسینیان خوشرو^۲

۱- استادیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
۲- استادیار، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مراغه، ایران

Khaleghi AR^{*1}, Hassaneian Khoshro H²

1- Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Arak University, Arak, Iran
2- Assistant Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran

* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khaleghi979@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۴ - تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۳)

چکیده

تنش‌های زیستی از جمله بیماری بوتریتیس از موانع اصلی در تولید گل ژربرا می‌باشند. این تحقیق به منظور شناسایی ژن‌های دخیل در مقاومت به بیماری بوتریتیس به کمک تجزیه و تحلیل اطلاعات EST کتابخانه گل ژربرا انجام شد. اطلاعات اولیه کتابخانه گل ژربرا شامل ۱۹۲۰ EST از بانک اطلاعاتی NCBI جمع‌آوری شدند. پس از پیرایش اولیه، توالی‌های EST دسته‌بندی و یکپارچه شدند که منتج به ایجاد ۱۱۳۹ ژن واحد (۳۶۱ توالی همپوشان و ۷۷۸ توالی منفرد) شد. نتایج جستجوی بلاست X نشان داد که ۶۸۸ ژن واحد دارای hit مشخص در بین پروتئین‌های آرآیدوبیس بودند و برای سایر توالی‌ها hit مشخصی شناسایی نشد. گروه‌بندی و آنالیز غنی‌سازی ژنی، توالی‌های EST کتابخانه ژربرا را بر اساس کارکرد مولکولی، نوع پروتئین و اجزای سلولی به ترتیب در ۱۰، ۲۵ و ۶ گروه کارکردی مختلف قرار داد که حضور ۶ گروه در سطح آماری یک درصد معنی‌دار شد. شبکه ژنی مربوط به توالی‌های با حضور بالا نشان داد که ژن‌های مربوط به فاکتورهای رونویسی خانواده MYB (*MYB73*، *ATMYB21* و *RHCIA*) که به شدت تحت تأثیر مسیر جاسمونیک اسید بودند، ژن‌های رمزکننده آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، ژن‌های دخیل در فرآیند انتقال پیام کلسیم (مثل ژن کلمودولین *CAM7*) و خانواده پروتئینی UBIQUITIN (UBQ) سهم بزرگی از شبکه تنظیمی را به خود اختصاص می‌دهند و نقش کلیدی در مقاومت به بیماری بوتریتیس برعهده دارند. ژن‌های شناسایی شده در این مطالعه می‌توانند نامزدهای مناسبی برای دست‌ورزی مقاومت به بیماری بوتریتیس در گل ژربرا باشند.

واژه‌های کلیدی

بیان ژن
تنش زیستی
ژنومیکس کارکردی
گروه‌های کارکردی
EST

مقدمه

ژبررا از خانواده Asteraceae و جنس *Gerbera*، دارای حدود ۴۰ گونه علفی و چند ساله می‌باشد. این گل در بین گل‌های شاخه بریده پس از رز، میخک، داودی و لاله، رتبه پنجم را دارد (Reynoird et al. 1997; Dole and Wilkins 2004).

از مهم‌ترین عواملی که باعث کاهش کیفیت و افزایش هزینه‌های تولید گل شاخه بریده ژبررا می‌شود، بیماری‌ها و از جمله مهم‌ترین آن‌ها، بیماری بوتریتیس است. عامل این بیماری با نام علمی *Botrytis cinerea* یک پاتوژن نکروتروف با دامنه وسیع میزبانی است که باعث کاهش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی تا ۲۰ درصد می‌شود. ژبررا از حساس‌ترین و مستعدترین گونه‌های گیاهی به بوتریتیس است و به دلیل عدم وجود مقاومت ژنتیکی در برابر پاتوژن‌های نکروتروف در واریته‌های تجاری ژبررا، این بیماری باعث ایجاد تلفات سنگین در طی تولید و مراحل فروش می‌شود (Vrind 2005; Williamson et al. 2007). Fu et al. (2017) به منظور مکان‌یابی QTL‌های مربوط به مقاومت به بیماری بوتریتیس در ژبررا، چهار والد از دو جمعیت F_1 را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ۲۰ QTLs را شناسایی و گزارش کردند که تعداد QTL شناسایی شده و تغییرات بیان شده در بسیاری از QTLها بیانگر این موضوع است که پاسخ به بیماری بوتریتیس در این گیاه بسیار پیچیده است.

در اصلاح گیاهان زراعی و باغی به منابع ژنتیکی برای تحمل به تنش‌های زنده و غیرزنده نیاز می‌باشد؛ لذا شناسایی عوامل مؤثر در تحمل به تنش‌های زنده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. روش‌های ژنومیکس کارکردی^۱ نظیر تجزیه و تحلیل توالی‌های EST^۲، امکان شناسایی، بررسی بیان و مطالعه رونوشت‌های ژنی درگیر در شبکه‌های تنظیمی و متابولیکی را فراهم کرده‌اند (Cushman and Bohnert 2000). می‌توان از ESTها و توالی‌های موجود در پایگاه‌های داده‌های اسید نوکلئیک استفاده نمود و به کمک این داده‌ها به ژن‌های خاصی دست یافت (Hide et al. 1999). طی تحقیقی که توسط Houde et al. (2006) انجام شد، با ایجاد توالی EST از گندم نان در مراحل مختلف نموی و در معرض تنش‌های

سرما، شوری و خشکی و ترکیب آن‌ها با توالی‌های EST موجود در بانک‌های اطلاعاتی و دسته‌بندی تمام توالی‌های ترکیب شده، به ۷۵۴۸۸ توالی شامل ۳۱۵۸۰ توالی همپوشان^۳ و ۴۳۹۰۸ توالی منفرد^۴ دست یافتند. بیش از ۴۳ درصد از این مجموعه‌ها تجزیه کارکردی شد و گروه‌های کارکردی مربوط به آن‌ها تعیین شد.

مکانیسم گیاهان برای محافظت خود در برابر پاتوژن‌ها شامل موانع ساختمانی و تحریک پاسخ‌های دفاعی است. بشره، دیواره سلولی و فیتوانتی‌سپین‌ها^۵ از موانع از پیش تشکیل شده فیزیکی و شیمیایی هستند که ورود میکروباها به درون سلول‌های گیاهی را محدود می‌کنند (Hael-Conrad et al. 2015). هم‌چنین انواعی از هورمون‌های گیاهی شامل اسید سالیسیلیک، جاسمونیک اسید و اتیلن باعث به وجود آمدن شبکه‌ای از سیگنال‌ها می‌شوند که نقش مهمی را در تنظیم پاسخ‌های دفاعی گیاه در برابر انواع پاتوژن‌ها بازی می‌کنند (Luo et al. 2011). گزارش شده‌است که سیستم دفاعی گیاهان در برابر پاتوژن‌های نکروتروف به‌طور عمده توسط مسیرهای وابسته به جاسمونیک اسید/اتیلن (JA/ET) کنترل می‌شود (Glazebrook 2005).

با استفاده از داده‌های NCBI پروتئین‌های رمز شده در طی آلودگی گندم به بیماری فوزاریوم^۶ شناسایی و عنوان شده‌است که پروتئین‌های وابسته به پاتوژن^۷ مثل *Thaumatin-like protein* (*PR5*) و *ABC transporter* و هم‌چنین مسیر انتقال سیگنال جاسمونیک اسید در مقاومت به این بیماری بسیار تعیین کننده هستند (Xiao et al. 2013). (Kruger et al. 2002) برای شناسایی ژن‌های بیان شده در طی آلودگی فوزاریوم در گندم از ESTها شامل ۲۸۳۱ توالی منفرد و ۷۱۵ توالی همپوشان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ژن‌های بیان شده از نظر عملکرد در ۵ گروه شامل ژن‌های ساختاری، متابولسمی، تنظیمی، متابولیت‌های ثانویه و پروتئین‌های سنتزی و تغییر یافته^۸ قرار می‌گیرند. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که ۳۱۲ توالی غیر تکراری رمزکننده آنزیم‌های مسیر فنیل پروپانوئید، پروتئین‌های وابسته به پاتوژن و چندین

³ Contig

⁴ Singleton

⁵ Phytoanticipins

⁶ *Fusarium graminearum*

⁷ Pathogenesis-related proteins

⁸ Protein synthesis and modification

¹ Functional genomics

² Expressed Sequenced Tage

گرفتن ۸۰ درصد همانندسازی دسته‌بندی^۱ و یکپارچه^۲ شدند. سپس جستجوی بلاست X برای تمام ژن‌های واحد شامل توالی‌های همپوشان (توالی‌های با دو یا تعداد بیش‌تری EST ادغام شده) و توالی‌های منفرد (توالی‌های EST‌های منفرد که وارد هیچ توالی همپوشانی نشدند) با در نظر گرفتن حداکثر E-value برابر با 10^{-5} در مقابل بانک توالی پروتئینی گیاه آرآبیدوپسیس به صورت Local و با نرم‌افزار Clc bio genomics workbench 8.5.1 انجام شد. برای دسته‌بندی کارکردی ژن‌ها و همچنین به منظور شناسایی گروه‌های کارکردی دارای حضور افزوده یا کاهش یافته معنی‌دار، ۶۸۸ توالی با hit مشخص به‌عنوان ورودی سایت PANTHER (<http://pantherdb.org>) استفاده شد، این کار با مرجع قرار دادن ژنوم آرآبیدوپسیس در سطح ۰.۵٪ ($P < 0.05$) انجام شد. پس از تجزیه اولیه شامل یکپارچه‌سازی، بلاست توالی‌های همپوشان و منفرد و در نهایت تعیین گروه‌های کارکردی و آنالیز آماری، شبکه ژنی مربوط به توالی‌های با حضور بالا که نماینده‌ای از ژن‌های با بیان بیشتر در ژبررا تحت تنش بیماری بوتریتیس هستند، تعیین شد. بدین منظور توالی‌های همپوشان با بیش از ۲۰ توالی EST از بین سایر توالی‌ها انتخاب شد. رمزهای پروتئین توالی‌های با بیان بالا که hit مشخصی در بین پروتئین‌های آرآبیدوپسیس داشتند، به‌منظور تعیین شبکه ژنی به‌عنوان ورودی سرویس GeneMANIA (<http://www.genemania.org>) به‌کار گرفته شدند.

نتایج و بحث

پس از ارزیابی اولیه ۱۹۲۰ توالی EST، ۱۹۱۵ توالی با کیفیت و عاری از هرگونه آلودگی باقی ماند. بعد از هم‌گذاری ۱۹۱۵ EST، ۳۶۱ توالی همپوشان و ۷۷۸ توالی منفرد در کتابخانه تحت تنش بیماری ژبررا با استفاده از نرم‌افزار EGassembler تشکیل شد. با نرم‌افزار CLCBio، بلاست موضعی (بلاست در برابر بانک اطلاعاتی آرآبیدوپسیس) توالی‌های همپوشان و منفرد انجام شد و تبدیل رمزهای ژنتیکی توالی‌های همپوشان و منفرد کتابخانه به رمزهای ژنتیکی گیاه آرآبیدوپسیس صورت گرفت. در مجموع

پروتئین وابسته به تنش و سیستم دفاعی می‌باشند که می‌توانند باعث افزایش مقاومت به بیماری شوند. با وجود اینکه تشخیص و ارزیابی ژرم پلاسماهای مقاوم به تنش‌های زنده فرآیند بسیار سخت و زمان‌گیر است، روش EST یکی از موثرترین روش‌ها برای کشف ژن‌های کارکردی جدید از تمام ژنوم است (Chen et al. 2005). با تکمیل پروژه‌های توالی‌یابی ژنوم در تعدادی از گیاهان، EST‌های فراوانی برای مطالعه سایر گیاهان فراهم شده‌است. چنانچه یک EST با یک ژن مشخص همانندی قابل قبولی داشته باشد، عملکرد بالقوه مشابهی برای آن EST در نظر گرفته می‌شود. تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر EST‌ها با مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی موجب افزایش آگاهی مسیرهای بیوشیمیایی ژن‌های کنترل‌کننده مقاومت می‌شود. ژبررا از گیاهان حساس به بیماری بوتریتیس بوده و این بیماری نه تنها در هنگام تولید بلکه در مراحل پس از برداشت و فروش نیز می‌تواند باعث کاهش کیفیت و یا از بین رفتن گل‌های شاخه بریده و در نتیجه خسارت‌های سنگین شود. ارائه ارقام مقاوم به بازار می‌تواند از شدت خسارت‌های مذکور بکاهد. در این پژوهش به‌منظور شناسایی و مقایسه دقیق ژن‌های دخیل در مقاومت به بیماری بوتریتیس در گل شاخه بریده ژبررا، یک کتابخانه EST مربوط به گلبرگ و برگ‌های ژبررا مورد تجزیه و تحلیل بیوانفورماتیکی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

۱۹۲۰ توالی EST مربوط به کتابخانه گیاه ژبررا تحت تنش بیماری بوتریتیس از پایگاه داده NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>) دریافت شد. توالی‌ها به‌منظور شناسایی آلودگی‌های ناقل و بررسی طول و کیفیت‌شان با استفاده از سرویس EGassembler (<http://egassembler.hgc.jp>) مورد ارزیابی قرار گرفتند. توالی‌های مربوط به ناقل، توالی‌های تکرار شونده، توالی‌های کلروپلاستی و میتوکندریایی حذف شدند و از بین توالی‌های ارزیابی شده توالی‌هایی با طول کوتاه‌تر از ۱۰۰ جفت‌باز کنار گذاشته شدند. در ادامه توالی‌های با کیفیت باقی‌مانده با استفاده از همان سرویس بیوانفورماتیک و با در نظر

¹ Clustering

² Assembling

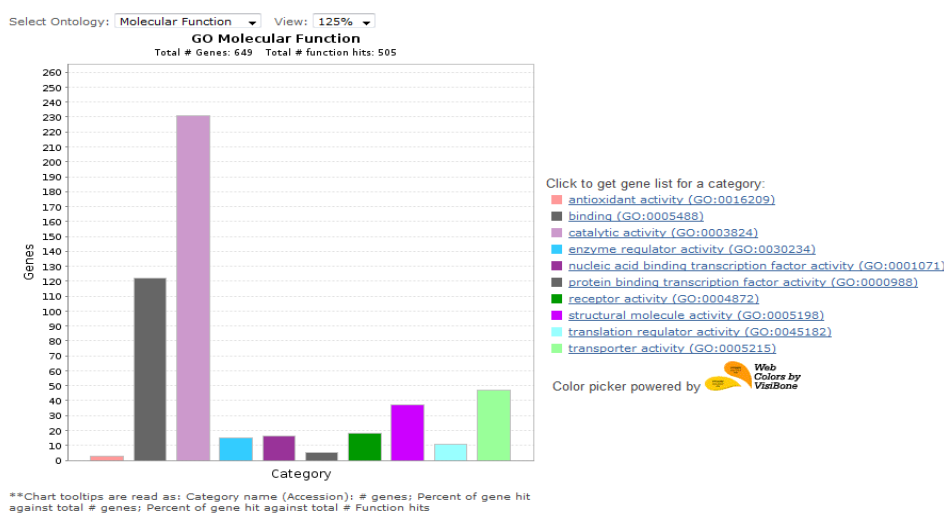
بود. در تنش‌های زیستی به‌ویژه بیماری بوتریس، افزایش فعالیت این آنزیم‌ها منجر به انتقال پیام و پاسخ ژن‌های مناسب خواهد شد. هم‌چنین اتصال بین آنزیم‌ها و دیواره سلولی و هم‌چنین در بین ترکیبات مختلف دیگر باعث افزایش انتقال پیام واکنش ژن‌ها می‌شوند (Ruepp et al. 2004). در بین گروه‌های کارکردی، گروه کارکردی با فعالیت آنتی اکسیدانت دیده می‌شود که مهم‌ترین نقش آن‌ها سمیت‌زدایی و حذف ROSها از سلول می‌باشد (Tausz 2003).

۶۸۸ ژن واحد دارای hit مشخص در بین توالی‌های پروتئینی آرآیدوپسیس بودند و برای ۴۵۱ توالی نیز hit مشخصی شناسایی نشد (جدول ۱).

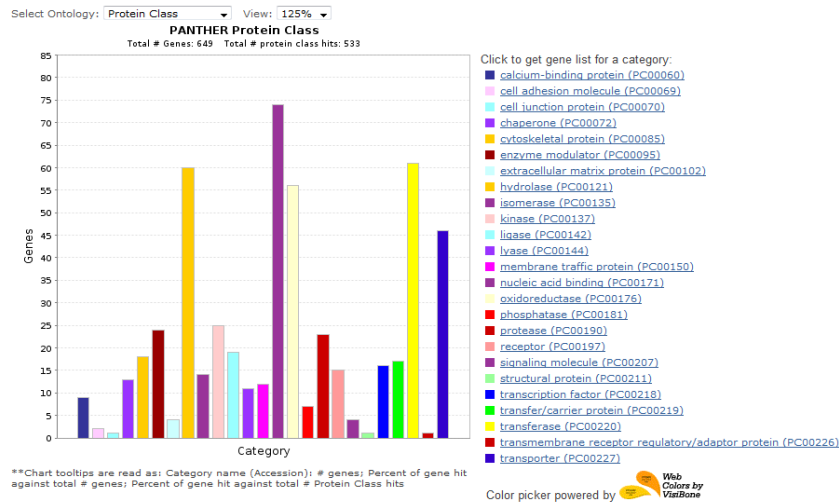
تمام ژن‌های واحد دارای hit مشخص در بین توالی‌های پروتئینی آرآیدوپسیس توسط نرم‌افزار PANTHER بر اساس کارکرد مولکولی، نوع پروتئین و اجزاء سلول به‌ترتیب در ۱۰، ۲۵ و ۶ گروه کارکردی مختلف قرار گرفتند (به‌ترتیب شکل‌های ۱، ۲ و ۳). گروه کارکردی با فعالیت کاتالیتی دارای بیش‌ترین ژن واحد

جدول ۱- تعداد ESTهای موجود در کتابخانه گیاه ژربرا تحت تنش بیماری بوتریس و تعداد توالی‌های همپوشان و منفرد کتابخانه

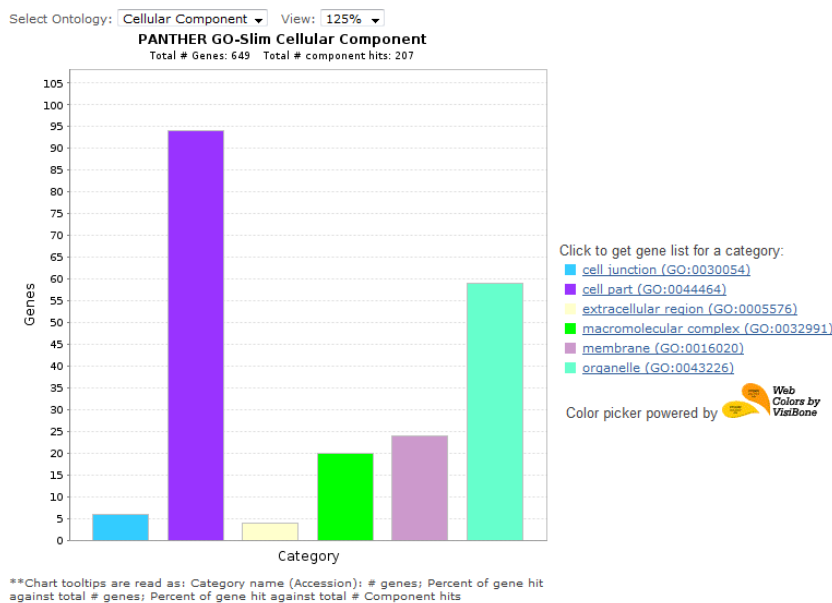
| کتابخانه | کتابخانه گیاه ژربرا تحت تنش بیماری بوتریس |
|--|---|
| تعداد کل ESTها | ۱۹۲۰ |
| تعداد توالی‌های همپوشان | ۳۶۱ |
| تعداد EST در توالی‌های همپوشان | ۷۸۱ |
| تعداد توالی‌های منفرد | ۷۷۸ |
| توالی‌های همپوشانی که hit مشخصی ندارند | ۱۱۹ |
| توالی‌های منفردی که hit مشخصی ندارند | ۳۳۲ |



شکل ۱- طبقه‌بندی ژن‌ها بر اساس کارکرد مولکولی ESTهای کتابخانه گیاه ژربرا تحت بیماری بوتریس



شکل ۲- طبقه‌بندی ژن‌ها بر اساس نوع پروتئین ESTهای کتابخانه گیاه ژربرا تحت بیماری بوتریس



شکل ۳- طبقه‌بندی ژن‌ها بر اساس اجزاء تشکیل دهنده سلول ESTهای کتابخانه گیاه ژربرا تحت بیماری بوتریس

2015). در طبقه‌بندی بر اساس اجزای سلولی (شکل ۳)، حداکثر تعداد ژن‌های واحد متعلق به گروه بخش‌های سلولی^۱ با ۹۴ ژن واحد و کمترین متعلق به نواحی خارج سلولی^۲ با ۴ ژن واحد بود (شکل ۳).

در تعیین اختلاف معنی‌دار بین گروه‌های کارکردی از نرم‌افزار Gene Enrichment سایت PANTHER استفاده شد. این تجزیه بر مبنای آزمون کای اسکور انجام شد و نتایج نشان داد که از ۱۰

¹ Cell part

² Extra cellular region

با توجه به نتایج طبقه‌بندی بر اساس نوع پروتئین (شکل ۲) مشاهده می‌شود که رونوشت‌های مربوط به گروه‌های کارکردی دیواره و غشای سلولی تحت تنش تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهند. تعداد زیادی از پروتئین‌ها، پروتئین‌های سنتز دیواره سلولی هستند که جزء پروتئین‌های دخیل در شرایط تنش هم محسوب می‌شدند. در واقع از اولین مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در برابر پاتوژن‌ها، موانع ساختمانی است. بشره و دیواره سلولی از موانع از پیش تشکیل شده فیزیکی هستند که ورود میکروب‌ها به درون سلول‌های گیاهی را محدود می‌کنند (Hael-Conrad et al.

متابولیت‌های اولیه^۶ نسبت به سایر گروه‌ها حضور افزایشی ($P < 0.05$) داشته‌اند (جدول ۳). در نهایت نتایج تجزیه گروه‌ها بر اساس نوع پروتئین نشان داد که از ۲۵ گروه شناسایی شده، دو گروه کارکردی یعنی گروه‌های ناقل آمینواسید^۷ و اکسیدوردوکتازها^۸ نسبت به سایر گروه‌ها حضور افزایشی ($P < 0.05$) داشته‌اند (جدول ۴). Smith et al. (2014) ژن‌های بیان شده در *S. lycopersicoides* طی آلودگی با پاتوژن بوتریتیس را در ۳ گروه اصلی تقسیم‌بندی کردند: الف) ژن‌های دخیل در فرآیندهای بیولوژیکی ب) ژن‌هایی با عملکرد ملکولی و ج) ژن‌های بیان کننده اجزا سلولی آن‌ها هم‌چنین پیشنهاد کردند که توقف شدید و سریع متابولیسم‌های اصلی در واکنش به *B. cinerea* احتمالاً به دلیل تخصیص مجدد منابع به واکنش‌های دفاعی می‌باشد و دو ژن *Pathogenesis-Related Protein (PR1)* و *Subtilisin-like Protein* را به‌عنوان ژن‌های کاندید برای ایجاد مقاومت به پاتوژن‌های نکروتروفیک در *S. lycopersicoides* گزارش کردند. توالی‌های همپوشان با ۲۰ و تعداد بیشتری EST به‌عنوان ژن‌های دارای بیان بالا در گل ژبررا در نظر گرفته شدند. بر این اساس، ۱۵ ژن شناسایی شد (جدول ۵ و شکل ۴). گروه‌بندی کارکردی ژن‌های با بیان بالا نشان داد که ارتباط مستقیمی بین فعالیت گروه‌های کارکردی و بیان ژن‌ها وجود دارد. چراکه بیش‌تر ژن‌های شبکه در گروه‌های کارکردی‌ای قرار گرفتند که خود به شکل معنی‌داری در گل ژبررا تحت بیماری بوتریتیس فعال بوده‌اند (مقایسه جدول‌های ۲ تا ۴).

گروه کارکردی مولکولی شناسایی شده، دو گروه کارکردی یعنی گروه‌های ژن‌های با فعالیت اکسیدوردوکتاز^۱ و ژن‌های با فعالیت کاتالیتی^۲ نسبت به سایر گروه‌ها حضور افزایشی ($P < 0.05$) داشته‌اند (جدول ۲).

افزایش بیان آنزیم‌های کاتالیتی منجر به انتقال پیام و پاسخ ژن‌های مناسب به تنش‌های زیستی از جمله بیماری بوتریتیس خواهد شد. هم‌چنین افزایش میزان بیان گروه کارکردی اکسیدوردوکتاز تحت تنش بیماری بوتریتیس در گیاه ژبررا، با توجه به نقش این گروه در سمیت‌زدایی و حفاظت سلول‌ها در برابر اکسیژن‌های فعال، می‌توان گفت که گیاه ژبررا برای تحمل و مقابله با بیماری بوتریتیس از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بهره می‌گیرد. مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت این دسته از آنزیم‌ها تحت تنش‌های محیطی از جمله تنش‌های زیستی به شدت افزایش می‌یابد؛ به‌عنوان مثال در گیاه فرفیون رونویسی و فعالیت این آنزیم‌ها به‌طور گسترده‌ای در بافت‌هایی که تحت تنش‌های محیطی هستند افزایش می‌یابد (Anderson and Davis 2004). بالابردن سطوح بیان ژن آنتی‌اکسیدان‌ها به‌نظر می‌رسد که توسط گیاهان مقاوم به تنش‌های زیستی و غیر زیستی کنترل می‌شود (Chugh and Khurana 2002).

نتایج مربوط به تجزیه گروه‌ها براساس فرآیند بیولوژیکی نشان داد که گروه‌های فرآیندهای متابولیتی^۳، فرآیندهای سلولی^۴، پروتئین‌های وابسته به فرآیندهای متابولیتی^۵ و فرآیندهای

¹ Oxidoreductase activity

² Catalytic activity

³ Metabolic process

⁴ Cellular process

⁵ Protein metabolic process

⁶ Primary metabolic process

⁷ Amino acid transporter

⁸ Oxidoreductase

جدول ۲- نتایج مرحله آنالیز غنی‌سازی ژنی برای تمام ژن‌های واحد گل ژبررا تحت تنش بیماری بوتریتیس بر اساس کارکرد مولکولی

| P-value ($P < 0.05$) | نسبت حضور | تعداد ژن واحد | گروه کارکردی |
|------------------------|-----------|---------------|--------------------------------|
| $1/28 E^{-3}$ | ۱/۸۷ | ۵۵ | ژن‌های با فعالیت اکسیدوردوکتاز |
| $1/58 E^{-7}$ | ۱/۴۳ | ۲۲۸ | ژن‌های با فعالیت کاتالیتی |
| $0/00 E^{-11}$ | ۰/۷۸ | ۳۲۸ | طبقه‌بندی نشده (نا معین) |

جدول ۳- نتایج مرحله آنالیز غنی‌سازی ژنی برای تمام ژن‌های گل ژربرا تحت تنش بیماری بوتریتیس بر اساس فرآیند بیولوژیکی

| گروه کارکردی | تعداد ژن واحد | نسبت حضور | P-value(P<0.05) |
|---|---------------|-----------|------------------------|
| فرآیندهای متابولیتی | ۲۹۱ | ۱/۴ | $9/09 \times 10^{-11}$ |
| فرآیندهای سلولی | ۱۲۸ | ۱/۳۸ | $1/39 \times 10^{-2}$ |
| پروتئین‌های وابسته به فرآیندهای متابولیتی | ۱۱۷ | ۱/۳۷ | $4/01 \times 10^{-2}$ |
| فرآیندهای متابولیت‌های اولیه | ۲۳۰ | ۱/۳۵ | $1/89 \times 10^{-5}$ |
| طبقه‌بندی نشده (نامعین) | ۳۰۴ | ۰/۷۵ | $0/00 \times 10^{-2}$ |

جدول ۴- نتایج مرحله آنالیز غنی‌سازی ژنی برای تمام ژن‌های گل ژربرا تحت تنش بیماری بوتریتیس بر اساس نوع پروتئین

| گروه کارکردی | تعداد ژن واحد | نسبت حضور | P-value(P<0.05) |
|-------------------------|---------------|-----------|-----------------------|
| ناقل آمینواسید | ۱۲ | ۳/۴۹ | $3/83 \times 10^{-2}$ |
| اکسیدوردوکتاز | ۵۶ | ۱/۸۴ | $1/89 \times 10^{-3}$ |
| طبقه‌بندی نشده (نامعین) | ۳۲۱ | ۰/۷۸ | $0/00 \times 10^{-2}$ |

احتمال زیاد، افزایش بیان فاکتورهای رونویسی *MYB73*، *ATMYB21* و *RHCIA* به دلیل افزایش سیگنال‌رسانی مسیر جاسمونیک اسید تحت تاثیر قارچ بوتریتیس می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت به بیماری بوتریتیس در گل ژربرا نیاز به مسیر سیگنال‌رسانی جاسمونیک اسید دارد.

یکی دیگر از ژن‌های مهم و کلیدی در بین ژن‌های با بیان بالا، ژن‌های مربوط به خانواده یوبی‌کوئیتین^۱ یا UBQ می‌باشد. حضور وسیع این پروتئین در جایگاه‌های مختلف و ثابت ماندن ساختار مولکولی آن در گونه‌های مختلف، حاکی از نقش یوبی‌کوئیتین در حیات سلولی می‌باشد. اتصال کوالان یوبی‌کوئیتین به پروتئین‌ها، از مهم‌ترین راه‌های هدایت بسیاری از بیومولکول‌های پروتئینی به سمت تجزیه پروتئوزومی به شمار می‌رود (Kimura and Tannaka 2010).

در بین ژن‌های با بیان بالا تعدادی از پروتئین‌های پاسخ به تنش گرمایی یا HSP نیز حضور داشتند. بالا بودن فعالیت این پروتئین‌ها چندان دور از انتظار نبود زیرا بسیاری از ژن‌های پاسخ به تنش اختصاصی نبوده و به صورت عمومی در اکثر تنش‌ها فعال بوده و در تکامل اندام‌های گیاهی نیز نقش فعالی دارند (Reeves et al. 2012). ژن‌های دخیل در فرایند انتقال پیام کلسیم^۲ نیز در شبکه ژنی حضور معنی‌داری داشتند (جدول ۵، ۶ و شکل ۴). یون Ca^{+2} نه تنها در تولید ولتاژ غشایی بلکه به عنوان یک مکانیسم پیام‌دهی عمل می‌کند. از ژن‌هایی که در فرآیند پیام‌دهی کلسیم

در بین ژن‌های با بیان بالا، ژن‌هایی وجود داشت که بسیار مهم و کلیدی بودند و خود به عنوان یک نقطه کارکردی یا تنظیمی مهم در شبکه فعالیت داشتند. ژن *MYB73* و *ATMYB21* از جمله ژن‌های مهم با بیان بالا می‌باشند. این ژن یک عامل رونویسی از زیر گروه ۷۳ و ۲۱ خانواده R2R3 پروتئین‌های MYB می‌باشند. این عامل رونویسی یک پروتئین اختصاصی می‌باشد که در پایین دست علامت‌دهی جاسمونیک اسید، در سیگنال‌رسانی نقش بسیار کلیدی دارد. یکی دیگر از عوامل رونویسی تحت تاثیر جاسمونیک اسید یعنی *RING-H2 finger CIA* یا *RHCIA* نیز در این پژوهش دارای بیان بالایی بود. این ژن، رمزکننده یکی از عوامل رونویسی خانواده *RING finger* می‌باشد که گفته شده در تکامل اندام‌های گل نظیر پرچم و هم‌چنین در پاسخ به تنش‌ها نقش دارد (Mandaokar et al. 2006). ژن‌های MYC و MYB به ترتیب به عناصر همسوساز MYBR (C/TAACNA/G) و MYCR (CANNTG) در ناحیه پروموتوری ژن‌های هدف متصل شده و از طریق فعال‌سازی ژن‌های پایین دست، منجر به ایجاد مقاومت به تنش‌ها از جمله خشکی و شوری می‌شوند (Tuteja 2007). با استفاده از روش ریزآرایه پیشنهاد شده است که مسیر سیگنال‌دهی جاسمونات و اتیلن ممکن است باعث ایجاد مقاومت به بیماری در گیاهانی هم‌چون گندم شود (Li and Yen 2008). مولکول‌های سیگنال دهنده گیاهی مثل سالیسیلیک اسید، جاسمونیک اسید، آبسزیک اسید و اتیلن ترکیبات ضد میکروبی از جمله فیتوالکسین‌ها و پروتئین‌های PR را القاء می‌کنند (Rossi et al. 2011). نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که به

¹ Ubiquitin family protein

² Calcium signaling

در دیواره سلولی، تولید فیتوآلکسین‌ها، فسفوریلاسیون پروتئین، فعال‌سازی مسیر سیگنال‌دهی MAPK² و القاء رونویسی ژن برای حفاظت در برابر پاتوژن‌ها و محدود کردن بیماری می‌شود (Hael- Conrad et al. 2015). لذا می‌توان گفت که علاوه بر مسیر سیگنال‌رسانی جاسمونیک اسید، ژن‌های دخیل در فرایند انتقال پیام کلسیم نیز، نقش مهمی در مقاومت به بیماری بوتریتیس در گل ژربرا بازی می‌کنند.

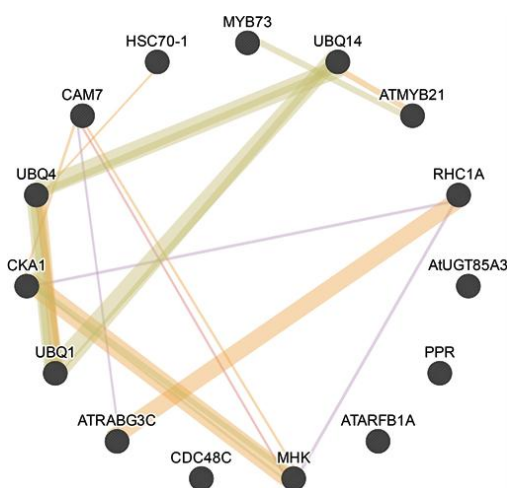
نقش دارند می‌توان به کلمودولین¹ (CAM7) اشاره نمود (جدول ۵). کلمودولین جز پروتئین‌های باند شونده با کلسیم است و می‌تواند با پروتئین‌های دیگر باند شود و عملکرد آن‌ها را تنظیم کند و به این وسیله می‌تواند روی خیلی از عملکردهای سلول نقش داشته باشد. (Kudla et al. 1999) مشخص‌ترین واکنش‌ها به آلودگی پاتوژن‌ها شامل تولید ROSها، جریان کلسیم (Ca²⁺) از فضاهای خارج سلولی و تغییر در غلظت کلسیم سیتوزولی و تغییر

² Mitogen-activated protein kinase (MAPK)

¹ Calmodulin

جدول ۵- ژن‌های با بیان بالا (≥۲۰ توالی EST): اسم ژن، شرح ژن و کد ژنی آرآبیدوپسیس مربوط به هر ژن آورده شده‌است.

| Gene | Description | Gene ID |
|-----------|--|-----------|
| MYB73 | myb domain protein 73 | AT4G37260 |
| PPR | Pentatricopeptide repeat (PPR) superfamily protein | AT4G35850 |
| ATMYB21 | myb domain protein 21 | AT3G27810 |
| RHC1A | RING-H2 finger C1A | AT2G40830 |
| MHK | Protein kinase superfamily protein | AT4G13020 |
| AtUGT85A3 | UDP-glucosyl transferase 85A3 | AT1G22380 |
| UBQ4 | ubiquitin 4 | AT5G20620 |
| CDC48C | cell division cycle 48C | AT3G01610 |
| HSC70-1 | heat shock cognate protein 70-1 | AT5G02500 |
| ATRABG3C | RAB GTPase homolog G3C | AT3G16100 |
| UBQ14 | Ubiquitin family protein | AT4G02890 |
| UBQ1 | ubiquitin extension protein 1 | AT3G52590 |
| CKA1 | casein kinase alpha 1 | AT5G67380 |
| CAM7 | calmodulin 7 | AT3G43810 |
| ATRABG3F | RAB GTPase homolog G3F | AT3G18820 |

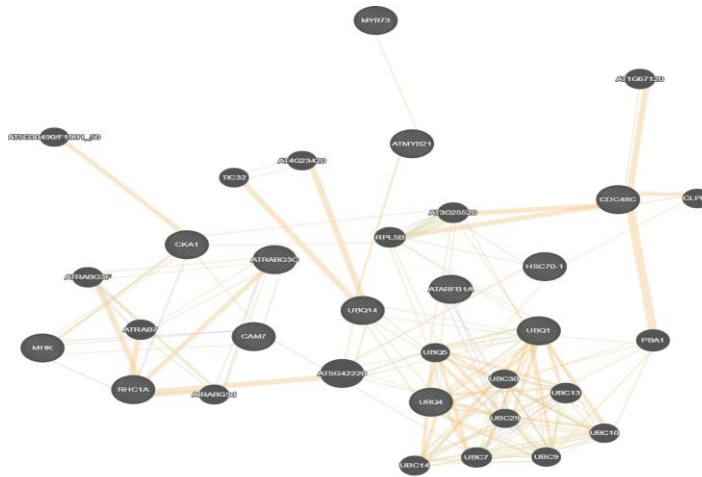


شکل ۴- شبکه‌ژنی ژن‌های با بیان بالا در گیاه ژربرا تحت تنش بیماری بوتریتیس: در این شبکه:

- Physical interactions
- Predicted
- Shared protein domains
- Co-expression
- Genetic interactions
- Co-localization

جدول ۶- ژن های با بیان بالا (≥ 20 توالی EST) به همراه ژن های اضافه شده: اسم ژن، شرح ژن و کد ژنی آراییدوپسیس مربوط به هر ژن آورده شده است.

| Gene | Description | Gene ID |
|-----------|---|-----------|
| MYB73 | myb domain protein 73 | AT4G37260 |
| PPR | Pentatricopeptide repeat (PPR) superfamily protein | AT4G35850 |
| ATARFB1A | ADP-ribosylation factor B 1A | AT2G15310 |
| ATMYB21 | myb domain protein 21 | AT3G27810 |
| RHC1A | RING-H2 finger C1A | AT2G40830 |
| MHK | Protein kinase superfamily protein | AT4G13020 |
| AtUGT85A3 | UDP-glucosyl transferase 85A3 | AT1G22380 |
| UBQ4 | ubiquitin 4 | AT5G20620 |
| CDC48C | cell division cycle 48C | AT3G01610 |
| HSC70-1 | heat shock cognate protein 70-1 | AT5G02500 |
| ATRABG3C | RAB GTPase homolog G3C | AT3G16100 |
| UBQ14 | Ubiquitin family protein | AT4G02890 |
| UBQ1 | ubiquitin extension protein 1 | AT3G52590 |
| CKA1 | casein kinase alpha 1 | AT5G67380 |
| CAM7 | calmodulin 7 | AT3G43810 |
| AT5G42220 | Ubiquitin-like superfamily protein | AT5G42220 |
| PBA1 | N-terminal nucleophile aminohydrolases (Ntn hydrolases) superfamily protein | AT4G31300 |
| RPL5B | ribosomal protein L5 B | AT5G39740 |
| AT3G25520 | ribosomal protein L5 | AT3G25520 |
| UBC13 | ubiquitin-conjugating enzyme 13 | AT3G46460 |
| ATRABG3F | RAB GTPase homolog G3F | AT3G18820 |
| ATRAB7 | RAB GTPase homolog G3E | AT1G49300 |
| UBC7 | ubiquitin carrier protein 7 | AT5G59300 |
| AT1G67120 | ATPases;nucleotide binding;ATP binding;nucleoside-triphosphatases; transcription factor binding | AT1G67120 |
| AtRABG3d | RAB GTPase homolog G3D | AT1G52280 |
| UBC14 | ubiquitin-conjugating enzyme 14 | AT3G55380 |
| TIC32 | NAD(P)-binding Rossmann-fold superfamily protein | AT4G23430 |
| AT4G23420 | NAD(P)-binding Rossmann-fold superfamily protein | AT4G23420 |
| CLPB2 | casein lytic proteinase B2 | AT4G14670 |
| UBC10 | ubiquitin-conjugating enzyme 10 | AT5G53300 |
| UBC9 | ubiquitin conjugating enzyme 9 | AT4G27960 |
| UBQ5 | ubiquitin 5 | AT3G62250 |
| UBC29 | ubiquitin-conjugating enzyme 29 | AT2G16740 |
| UBC30 | ubiquitin-conjugating enzyme 30 | AT5G56150 |



شکل ۵- شبکه ژنی ژن های با بیان بالا در گیاه ژربرا تحت تنش بیماری بوتریتیس به همراه ژن های اضافه شده در این شبکه:

- Physical interactions
- Predicted
- Shared protein domains
- Co-expression
- Genetic interactions
- Co-localization

کننده‌های رادیکال‌های آزاد^۵ و پروتئازهای مختلف (Iuchi et al. 2007)، گروه دوم شامل فاکتورهای رونویسی، پیغام‌برهای ثانویه و فسفاتازها و کینازها مانند کینازهای فعال‌کننده تقسیم سلول^۶ و پروتئین‌های وابسته به کلسیم^۷ و کینازهای وابسته به رشد و تمایز سلول^۸ که بیان ژن‌های دیگر در پاسخ به تنش‌ها را تنظیم می‌کنند (Kovtun et al. 2000).

دسته دوم یعنی ژن‌هایی که بیان ژن‌های دیگر در پاسخ به بیماری بوتریتیس را تنظیم می‌کنند، فاکتورهای رونویسی خانواده MYB، آنتی‌اکسیدان‌ها و کینازهای پاسخ به تنش هستند که در کتابخانه ژبررا تحت تنش بیماری بیان افزایشی داشتند (جداول ۶ و ۷ و شکل‌های ۲ و ۴)، این دسته از ژن‌ها نقش کلیدی را در هماهنگی بیان ژن‌ها در پاسخ به تنش‌های محیطی گوناگون دارند (Dunand-Sauthier et al. 2005).

به‌طور کلی بر اساس نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که ژن‌های رمزکننده آنزیم‌های دخیل در دفع مواد سمی از گیاه (آنتی‌اکسیدان‌ها)، فاکتورهای رونویسی از جمله خانواده MYB و کینازهای پاسخ به تنش بیشترین نقش را در گل ژبررا برای مقابله و تحمل بیماری بوتریتیس دارند.

⁴ Detoxifying enzymes

⁵ Free radical scavengers

⁶ Mitogen-activated kinases (MAPKS)

⁷ Calcium dependent protein kinases (CDPKs)

⁸ SoS kinases

منابع

Anderson J, Davis D (2004) Abiotic stress alters transcript profiles and activity of glutathione S-transferase, glutathione peroxidase, and glutathione reductase in *Euphorbia esula*. *Physiologia Plantarum* 120:421-433.
Chen L, Zhao LP, Gao QK (2005) Generation and analysis of expressed sequence tags from the tender shoots cDNA library of tea plant (*Camellia sinensis*). *Plant Science* 168:359-363.
Chugh A, Khurana P (2002) Gene expression during drought stress recent advances. *Current Science* 83:6-25.

جدول ۶ و شکل ۵ ژن‌های با بیان بالا (≥ 20 توالی EST) و شبکه‌ژنی به‌همراه ژن‌های اضافه شده توسط نرم‌افزار به‌عنوان همسایه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر ژن‌های با بیان بالا که در کتابخانه گل ژبررا شناسایی شده بود خود نرم‌افزار نیز ژن‌هایی را به‌عنوان همسایه و مرتبط با ژن‌های موجود در کتابخانه ژبررا که احتمالاً در مقاومت به بیماری بوتریتیس نقش دارند معرفی کرده است.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که ۱۵ ژن نقش کلیدی در مقاومت به بیماری بوتریتیس دارند و همچنین نتایج مربوط به ترسیم شبکه تنظیمی ژن نشان داد که ۱۲ ژن وارد شبکه شدند که مهم‌ترین آن‌ها فاکتورهای رونویسی خانواده MYB (*MYB73*، *ATMYB21* و *RHC1A*) که به شدت تحت تاثیر مسیر جاسمونیک اسید بودند، ژن‌های رمزکننده با فعالیت آنتی‌اکسیدانت، ژن‌های دخیل در فرآیند انتقال پیام کلسیم (مثل ژن کلمودولین CAM7) و خانواده پروتئینی UBQ بودند. به‌طور کلی محصولات ژن‌های القا شده تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی به‌طور وسیعی در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند. محصولات ژن‌های گروه اول به‌طور مستقیم سلول را در برابر تنش حمایت می‌کند مانند چاپرون‌ها^۱، پروتئین‌های LEA^۲، پروتئین‌های حفاظت‌کننده در برابر تنش‌های آسمزی^۳، آنزیم‌های دخیل در دفع مواد سمی از گیاه^۴، حذف

¹ Chaperons

² Late embryogenesis abundant proteins

³ Osmoprotectant

Cushman JC, Bohnert HJ (2000) Genomic approaches to plant stress tolerance. *Current Opinion in Plant Biology* 3:117-124.

Dole JM, Wilkins HF (2004) Floriculture: principles and species, 2nd edition. PearsonPrentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 347 pp.

Dunand-Sauthier I, Walker CA, Narasimhan J, Pearce AK, Humphrey TC (2005) Stress-Activated Protein Kinase Pathway Functions to Support Protein Synthesis and Translational Adaptation in Response to Environmental stress in Fission Yeast. *Eukaryotic Cell* 4:1785-1793.

- Fu Y, van Silfhout A, Shahin A, Egberts R, Beers M, Velde A, Houten A, Tuyl JM, Visser RGF, Arens P (2017) Genetic mapping and QTL analysis of Botrytis resistance in *Gerbera hybrida*. *Molecular Breeding* 37:13.
- Glazebrook J, (2005) Contrasting mechanisms of defense against biotrophic and necrotrophic pathogens. *Annual Review Phytopathology* 43:205-227.
- Hael-Conrad V, Abou-Mansour E, Diaz-Riccib J C, Mettrauxa JP, Serranoa M (2015) The novel elicitor AsES triggers a defense response against *Botrytis cinerea* in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 241:120-127.
- Hide W, Miller R, Ptitsyn A, Kelso J, Gopallakrishnan C, Christoffels A (1999) EST Clustering Tutorial. ISMB pp. 24.
- Houde M, Belcaid M, Ouellet F, Danyluk J, Monroy AF, Dryanova A, Gulick P, Bergeron A, Laroche A, Links MG, MacCarthy L, Corsby WL, Sarhan F (2006) Wheat EST resources for functional genomics for abiotic stress. *BMC Genomics* 7:149.
- Iuchi S, Kobayashi M, Taji T, Naramoto M, Seki M (2007) Regulation of drought tolerance by gene manipulation of 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, a key enzyme in abscisic acid biosynthesis in *Arabidopsis*. *Plant Journal* 27:325-33.
- Kimura Y, Tanaka K (2010) Regulatory mechanisms involved in the control of ubiquitin homeostasis. *Journal of Biochemistry* 147:793-798.
- Kovtun Y, Chiu WL, Tena G, SheenJ, (2000). Functional analysis of oxidative stress-activated mitogen-activated protein kinase cascade in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences Journal* 97: 2940–2945.
- Kruger WM, Pritsch C, Chao S, Muehlbauer GJ (2002) Functional and Comparative Bioinformatic Analysis of Expressed Genes from Wheat Spikes Infected with *Fusarium graminearum*. *The American Phytopathological Society* 15:445-455.
- Kudla J, Xu Q, Harter K (1999) Genes for calcineurin Blike proteins in *Arabidopsis* are differentially regulated by stress signals. *Plant Biology* 96:4718-4723.
- Li GL, Yen Y (2008) Jasmonate and ethylene signaling pathway may mediate *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Crop Science* 48:1888-1896.
- Luo Y, Shang J, Zhao P, Xi D, Yuan S, Lin H (2011). Application of jasmonic acid followed by salicylic acid inhibits cucumber mosaic virus replication. *Plant Pathology* 27:53-58.
- Mandaokar A, Thines1 B, Shin B, Markus Lange1B, Choi G, Koo YJ, Yoo YJ, Choi YD, Choi G, Browse J (2006) Transcriptional regulators of stamen development in *Arabidopsis* identified by transcriptional profiling. *Plant Journal* 46:984-1008.
- Ruepp A, Zollner A, Maier D, Albermann K, Hani J, Mokrejs M, Tetko I, Guldener U, Mannhaupt G, Munsterkotter M, Mewes HW (2004) The FunCat, a functional annotation scheme for systematic classification of proteins from whole genomes. *Nucleic Acids Research* 32: 5539-5545.
- Reeves PH, Ellis CM, Ploense SE, Wu M-F, Yadav V, Tholl D, Che telat A, Haupt I, Kennerley BJ, Hodgens C, Farmer EE, Nagpal P, Reed JW (2012) A Regulatory Network for Coordinated Flower Maturation. *PLoS Genetics*. 8:e1002506
- Reynold JP, Meynet J, Caissard JC, Chriqui D, (1997) Micropropagation of *Gerbera*. In: Widholm *et al.*, (eds), *Biotechnology in Agriculture and Forestry*. Vol. 40. Pp. 147-162.
- Rossi FR, Marina AGM, Romero FM, Gonzalez ME, Collado IG, Pieckenstein FL (2011) The sesquiterpene botrydial produced by *Botrytis cinerea* induces the hypersensitive response on plant tissues and its action is modulated by salicylic acid and jasmonic acid signaling. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 24:888-896.
- Smith JE, Mengesha B, Tang U, Mengiste T, Bluhm B (2014) Resistance to *Botrytis cinerea* in *Solanum lycopersicoides* involves widespread transcriptional reprogramming. *BMC Genomics* 15:334.
- Tausz M, Gullner G, Komives T, Grill D (2003) Role of thiols in plant adaptation to environmental stress. In: Abrol YP, Ahmad A (Ed.). *Sulphur in plants*. Dordrecht, Kluwer 221-244.
- Tuteja N (2007) Abscisic Acid and Abiotic Stress Signaling. *Plant Signaling and Behavior* 2:135-138.
- Vrind TA (2005) The Botrytis Problem in Figures. In: *Proceedings of VIIIth International Symposium on Postharvest Physiology of Ornamental Plants*. Netherlands, Doorwerth 99-102.
- Williamson B, Tudzynski B, Tudzynski P, Van Kan JAL (2007) *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology* 8:561- 580.
- Xiao J, Jin X, Wang H, Cao A, Zhao W, Pei H, Xue Z, He L, Chen Q, Wang X (2013) Transcriptome-based discovery of pathways and genes related to resistance against *Fusarium* head blight in wheat landrace Wangshuibai. *BMC Genomics* 14:197.