

بررسی تأثیر تغییر عملکرد ژن‌های مختلف بر واکنش گیاهان به اتیلن (C₂H₄) شرایط *in vitro* در *Arabidopsis thaliana*

سیده حمیده طاهری، رضا شیرزادیان خرم آباد*، علی اعلمی و حبیب الله سمیع زاده

گروه بیوتکنولوژی کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان، صندوق پستی ۱۳۱۴-۴۱۶۳۵

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۲۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۳/۰۴/۱۷)

چکیده:

اتیلن، اگر چه یک ملکول ساده است، از جمله فاکتورهای مهم و موثر بر رشد و نمو گیاهان محسوب می‌شود. واکنش سه‌گانه در گیاهچه های اتیوله *Arabidopsis* به اتیلن (C₂H₄) به طور گسترده ای جهت بررسی فعالیت بیوسنتز، درک و سیگنالینگ اتیلن و همچنین جداسازی موتانت‌های مرتبط با این رخدادها در اتیلن استفاده می‌شود. در این تحقیق گیاهان مختلف موتانت که هر یک حاوی موتاسیونی اختصاصی در یکی از ژن‌های مرتبط با سنتز هورمون‌هایی مانند اتیلن (*edr1* و *ein2*)، جاسمونیک اسید (*jar1*) و سالیسیلیک اسید (*NahG* و *pad4*) در *Arabidopsis* بودند جهت بررسی تأثیر تغییر عملکرد ژن‌های *EDR1*، *JAR1*، *PAD4* و *NahG* بر واکنش گیاهان به اتیلن مورد بررسی قرار گرفت. جهت انجام بررسی فوق از روش ارزیابی واکنش سه‌گانه (Ethylene Triple Response) برای ارزیابی گیاهان موتانت *edr1* و *pad4*، *NahG*، *jar1*، *ein2* مورد توجه قرار گرفت. لذا بذور گیاهان فوق در محیط MS شامل غلظت‌های مختلف ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid) برای مدت ۵ روز در شرایط تاریکی مطلق نگهداری و سپس صفات سه‌گانه چرخش قلاب رأسی، طول هیپوکوتیل و طول ریشه‌چه گیاهچه‌های موتانت مورد بررسی و تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و با شاهد والدینی (*Col-0*) مقایسه شد. بر اساس نتایج بدست‌آمده، هیچ‌کدام از موتانت‌های مورد بررسی در دو گروه (*Ethylene overexpression*) *eto* و *hls* (hook less) قرار نمی‌گیرند. در حالی که کلیه موتانت‌ها دارای تفاوتی معنی‌دار با ژنوتیپ مادری در صفات ۳ گانه واکنش به اتیلن بودند و فقط ژنوتیپ *pad4* از نظر طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه با ژنوتیپ مادری خود تفاوتی نداشت. لذا وقوع موتاسیون در ژن‌های مؤثر بر سنتز دیگر هورمون‌ها به نحو قابل توجهی می‌تواند بر واکنش گیاهان به اتیلن تغییر ایجاد نماید. همچنین بررسی واکنش سه‌گانه در گیاهچه های اتیوله موتانت می‌تواند به عنوان یک شاخص مهم و قابل توجهی برای ارزیابی واکنش گیاهان بالغ به اتیلن نیز محسوب گردد.

کلید واژه: اتیلن، ACC، گیاهچه اتیوله، واکنش سه‌گانه، موتانت‌ها.

مقدمه:

رسیدگی میوه، تأثیر دارد (Olmedo *et al.*, 2006). میزان تولید اتیلن در گیاهان تحت تأثیر عواملی چون دوره رشد و نمو گیاهان قرار گرفته و در پاسخ به محرک‌های محیطی زننده و غیر زننده تغییر می‌کند. از جمله این محرک‌ها می‌توان به ایجاد

هورمون اتیلن (C₂H₄)، اگر چه ملکولی بسیار ساده است، بر دامنه وسیعی از واکنش‌های فیزیولوژیکی در گیاهان از جمله جوانه‌زنی بذر، توسعه‌ی ریشه موئین، پیری گل، ریزش برگ و

* نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: R.shirzadian@gmail.com

که شامل: کوتاه شدن هیپوکوتیل، کوتاه و ضخیم شدن ریشه‌ها و چرخش در قلاب رأسی هیپوکوتیل می‌باشد. تغییرات مرفولوژیکی که در طول رشد گیاهچه‌های اتیوله روی می‌دهد به آسانی و با چشم قابل رویت هستند. گیاهچه‌های موتانت *Arabidopsis* که دارای تغییر در مسیر بیوستز، درک و یا سیگنالینگ اتیلن هستند ممکن است تغییراتی را در واکنش سه‌گانه نشان دهند (Li and Guo, 2007). نحوه‌ی واکنش گیاهچه‌های اتیوله آراییدوبسیس به ACC روشی مناسب برای جداسازی موتانت‌های مرتبط با واکنش اتیلن بوده و جهت شناسایی ژن‌های مؤثر بر این فرآیند از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و همچنین در زمینه بررسی مولکولی انتقال پیام اتیلن در گیاهان مهم به نظر می‌رسد (Kieber, 1997). موتانت‌هایی که دارای علائم کوتاه شدن طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه و دارای چرخش در قلاب رأسی در صورت عدم حضور تیمار اتیلن هستند، موتانت‌های گروه *eto* (Ethylene overexpression) نامیده می‌شوند. موتانت‌هایی که دارای علائم کوتاهی هیپوکوتیل و ریشه‌چه و فاقد چرخش در قلاب رأسی در عدم حضور تیمار اتیلن هستند متعلق به گروه موتانت‌های *hls* (*hook less*) بوده و دسته سوم علائم طویل شدن هیپوکوتیل و ریشه‌چه و عدم چرخش قلاب رأسی در حضور تیمار اتیلن را نشان می‌دهند و از گروه موتانت‌های *ein* (Ethylene insensitive) می‌باشند (Gusman and Ecker, 1990). موتانت‌های *eto* قادر به تولید سطوح بالایی از اتیلن نسبت به ژنوتیپ وحشی می‌باشند که این موتانت‌ها در مراحل قبل از مرحله تبدیل ACC به اتیلن در مسیر بیوستز اتیلن دچار تغییر شده‌اند. ممکن است تغییر در این موتانت‌ها در مرحله تبدیل SAM به ACC و ناشی از تغییر در بیان ACC سنتازها باشد. در موتانت‌های *ein* نیز مقدار تولید اتیلن افزایش می‌یابد، ولی بر خلاف موتانت‌های *eto*، این موتانت‌ها در مسیر سیگنالینگ اتیلن دارای تغییراتی هستند. در موتانت‌های *ein*، فعالیت پروتئین *ein2* به عنوان مهمترین جزء در مسیر سیگنالینگ اتیلن دچار تغییر شده و در نتیجه پیام اتیلن منتقل نشده و گیاه حساسیتی به حضور اتیلن نخواهد داشت (Wang et al., 2002). بررسی مکانیسم دریافت اتیلن توسط گیاه و انتقال پیام آن با

زخم، کمبود اکسیژن در بافت، میزان ازون، تنش سرما یا یخ زدگی اشاره کرد (Stepanova and Ecker, 2000). در مسیر بیوستز اتیلن در گیاهان ابتدا آمینو اسید متیونین توسط آنزیم SAM سنتاز و با مصرف ATP به SAM (*S-AdoMetionin*) تبدیل می‌شود. SAM یک سوبسترای مهم در بسیاری از چرخه‌های بیوشیمیایی از جمله چرخه بیوستز اتیلن است. مهم‌ترین قسمت این چرخه تبدیل SAM به ACC (*1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid*) توسط آنزیم ACC سنتاز است. در مرحله بعد ACC توسط آنزیم ACC اکسیداز اکسید می‌شود و به اتیلن تبدیل می‌گردد. مرحله‌ی محدود کننده در بیوستز اتیلن تبدیل SAM به ACC توسط آنزیم ACC سنتاز می‌باشد (Wang et al., 2002; Dalcin et al., 2006). پس از سنتز اتیلن، حضور آن توسط خانواده‌ای از گیرنده‌ها همچون *ETR1*, *ETR2*, *ERS1* (*ETR* for *Ethylene Resistant*) و *ERS2* در سطح دیواره سلولی و شبکه آندوپلاسمی دریافت و سپس در مسیر سیگنالینگ ویژه سیتوپلاسم و هسته ارسال می‌شود (Omalley et al., 2005; Ma et al., 2006). اولین عضو در مسیر سیگنالینگ اتیلن، پروتئین *CTR1* است. این پروتئین به طور مستقیم با *ETR1* و *ERS1* ارتباط داشته و آبشار سیگنالینگ *Map kinase* را فعال می‌کند. این پروتئین تنظیم کننده‌ی منفی واکنش پایین دست خود می‌باشد. *EIN2* در پایین دست *CTR1* و بالادست *EIN3* قرار گرفته است و یک تنظیم کننده‌ی مثبت واکنش پایین دست محسوب می‌شود و نقش مهمی در سیگنالینگ اتیلن دارد. *EIN3* در مسیر سیگنالینگ اتیلن پس از *EIN2* قرار می‌گیرد و از فاکتورهای مهم رونویسی در هسته می‌باشد. فعالیت این فاکتور موجب فعال شدن فاکتورهای خانواده‌ی *EIN3* همچون *EILs* شده و بیان ژن *ERF1* را تنظیم می‌کند. در این صورت عملیات مرتبط با بیان ژنهای مربوط با واکنش گیاه به حضور اتیلن را القا نموده و لذا گیاه واکنش لازم به حضور اتیلن را نشان خواهد داد (Wang et al., 2002).

تغییرات مرفولوژیکی در گیاهچه‌های اتیوله که توسط پیش ساز متابولیکی اتیلن (ACC) تیمار شده‌اند اصطلاحاً واکنش سه گانه (*Triple Response*) نامیده می‌شود (Wang et al., 2002). این واکنش اولین بار توسط Neljubow (۱۹۰۱) شرح داده شد

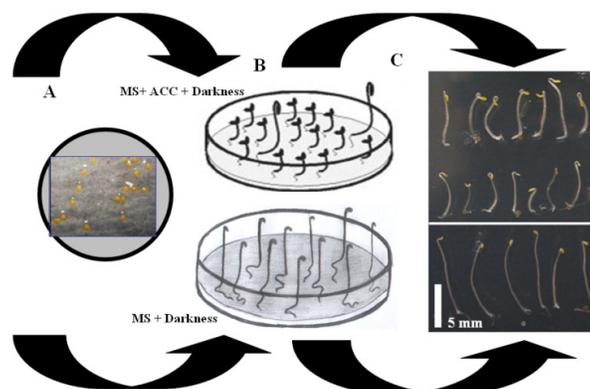
سالیسیلیک اسید در این موتانت‌ها می‌باشد (Tang *et al.*, 2005). مسیر سیگنالینگ سالیسیلیک اسید، جیبرلیک اسید و اتیلن در سیستم دفاعی گیاهان اثر متقابل و تداخلی بر هم دارند. برای اثر متقابل و تداخلی این هورمون‌ها نسبت به هم از اصطلاح cross-talk استفاده می‌شود. قطعاً تغییر در سطح هر کدام از این هورمون‌ها بر میزان فعالیت و سنتز سایر هورمون‌ها تأثیر می‌گذارد (Kunkle and Brook, 2002).

این تحقیق به منظور بررسی فعالیت مسیر بیوسنتزی اتیلن در این گروه از موتانت‌ها و چگونگی تأثیر تغییر ژن‌های مورد نظر در هر یک از موتانت‌ها بر واکنش موتانت‌ها به اتیلن صورت گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، هیچ‌کدام از موتانت‌های مورد بررسی در دو گروه موتانت‌های *eto* و *hls* قرار نمی‌گیرند.

مواد و روش‌ها:

این تحقیق به منظور بررسی واکنش موتانت‌های مختلف متعلق به گروه گیاهان مادری Col-0 در *Arabidopsis* شامل *ein2*، *jar1*، *NahG*، *pad4* و *edr1* به اتیلن در شرایط *in vitro* انجام شد. تهیه بذور وحشی و موتانت‌ها از دپارتمان بیولوژی گیاهی دانشگاه گرونینگن هلند و از دانشگاه مسی نیوزلند تهیه شد. جهت استریل نمودن بذور از محلول هیپوکلرید سدیم ۱۵٪ به مدت ۱۵ دقیقه استفاده شد و سپس در سه مرحله (هر مرحله به مدت ۳ دقیقه) بذور با آب مقطر استریل آبکشی شدند. سپس به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴°C و تاریکی مطلق نگهداری شدند و پس از یک ساعت قرار گرفتن در معرض نور، هر کدام از ژنوتیپ‌ها در پتری‌های حاوی محیط MS ۱/۲ و در ۵ غلظت (۰، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول) از ACC (۱-آمینوسیکلو پروپان-۱-کربوکسیلیک اسید) و سه تکرار کشت شدند (Shirzadian-Khorramabad *et al.*, 2010). نمونه‌ها به مدت ۵ روز در انکوباتور و در شرایط تاریکی مطلق و دمای ۲۳ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. در روز پنجم بررسی ۳ صفت طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه و چرخش هیپوکوتیل مطابق با شکل ۱ در گیاهچه‌های *Arabidopsis* تحت عنوان روش سه

استفاده از موتانت‌هایی که دارای نقص در واکنش به اتیلن هستند صورت می‌گیرد (Stepanova and Ecker, 2000). مطالعه حاضر به منظور بررسی فعالیت مسیر بیوسنتزی، درک و یا سیگنالینگ اتیلن در تعدادی از موتانت‌های *Arabidopsis* که در ژنوم مادری Col-0 به وجود آمده اند شامل موتانت‌های *ein2* (Ethylene insensitive 2) (Wang *et al.*, 2002)، *jar1* (Jasmonic Acid response locus)، *NahG* (دارای ژن باکتریایی از سویه Naphtalen-degrading) (Lawton *et al.*, 1995)، *pad4* (Phyto Alexin-Deficient 4) (Staswick and Tiryaki, 2004) و *edr1* (Enhanced disease resistance) (Tang *et al.*, 2005) انجام شد. EIN2 یکی از مهمترین اجزا در مسیر سیگنالینگ اتیلن و یک تنظیم کننده مثبت در مسیر انتقال پیام اتیلن است. جهش در لوکوس EIN2 موجب عدم حساسیت موتانت ایجاد شده در مقابل اتیلن داخلی و تیمار اتیلن می‌گردد (Alonso *et al.*, 1999). پروتئین JAR1 یک JA-amino synthase است که برای فعال سازی جاسمونیک اسید به منظور فعالسازی این هورمون و سیگنالینگ مطلوب آن در *Arabidopsis* لازم است. در موتانت *jar1* به دلیل نقص آنزیمی مقدار JA (جیبرلیک اسید) فعال کاهش می‌یابد. در نتیجه مکانیسم دفاع نیز کاهش یافته و ضعیف می‌شود (Staswick and Tiryaki., 2004). ژن *NahG* برای اولین بار در باکتری *Pseudomonas studzeri* سویه naphthalen-degrading شناسایی شد. در اثر بیان این ژن آنزیم سالیسیلات هیدروکسیلاز تولید می‌شود. سالیسیلات هیدروکسیلاز مانع تجمع SA (سالیسیلیک اسید) در هنگام حمله‌ی پاتوژن می‌شود. لذا بیان *NahG* در گیاهان ترانسژنیک موجب کاهش قدرت دفاعی این گیاهان شد (Lawton *et al.*, 1995). ژن *PAD4* برای سنتز کامالکسین در واکنش به آلودگی‌های باکتریایی و ویروسی در گیاه لازم است. موتانت‌های *pad4* در واکنش دفاعی نقص نشان می‌دهند که ناشی از نقص در سنتز کامالکسین می‌باشد (Zhou *et al.*, 1998). موتاسیون *edr1* در ژن EDR1 منجر به افزایش مقاومت در گیاه علیه بیماری سفیدک پودری می‌شود این افزایش مقاومت ناشی از افزایش تولید



شکل ۱- وضعیت شماتیک گیاهچه‌های رشد یافته در محیط غذایی MS بعد از مدت ۵ روز نگهداری در تاریکی مطلق: کشت بذور در محیط غذایی MS و ACC (A)، بروز واکنش سه گانه در گیاهچه‌هایی که دارای سیستم نرمال در زمینه بیوستز، دریافت و انتقال پیام اتیلن در گیاه است (B) و تصویری از نحوه ارزیابی گیاهچه‌ها (C) دیده می‌شود.

بدان معنی است که موتاسیون در ژن‌های *NAHG*، *JARI*، *EIN2*، *PAD4* و *EDR1* منجر به ایجاد واکنش کاذبی شبیه آنچه در موتانت‌های *hls* و *eto* مشاهده می‌شود، نمی‌گردد. موتانت‌های *hls* و *eto* در صورت عدم حضور تیمار اتیلن علائمی از واکنش سه‌گانه را نشان می‌دهند. زیرا موتانت‌های *eto* در مراحل قبل از تبدیل ACC به اتیلن در مسیر بیوستز اتیلن دچار تغییر شده و به دلیل تأثیر جهش بر روی ژن ACC سنتز، مقادیر بالایی از اتیلن را تولید می‌کنند و همچنین موتانت *hls* به دلیل تأثیر موتاسیون بر ژن *HLS* (Guzman and Ecker, 1990) دچار تغییر فعالیت اتیلن شده است.

بررسی تغییرات واکنش سه‌گانه در گیاهچه‌های موتانت

در حضور ACC: به منظور بررسی مقدماتی واکنش موتانت‌های مورد بررسی به اتیلن، وضعیت فنوتیپی واکنش سه‌گانه گیاهچه‌های موتانت در حضور ACC مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱). ژنوتیپ مادری Col-0 در حضور تیمار اتیلن هر سه فنوتیپ مربوط به واکنش سه‌گانه شامل کوتاهی ریشه‌چه، کوتاهی هیپوکوتیل و چرخش رأسی هیپوکوتیل را نشان داد. موتانت *ein2* دارای فنوتیپ متفاوتی در مقایسه با ژنوتیپ مادری در حضور پیش‌ساز اتیلن می‌باشد. این موتانت همانند موتانت‌های گروه *ein* در حضور ACC و تاریکی، فنوتیپ‌های کوتاهی هیپوکوتیل و ریشه‌چه و چرخش در هیپوکوتیل رأسی را نشان نمی‌دهد. در این موتانت، حضور اتیلن اثر مهارکنندگی

گانه Triple Response (Neljubow, 1901) اندازه‌گیری شد. ارزیابی واکنش گیاهچه‌ها به ACC می‌تواند الگویی از کارکرد فرآیند سنتز، دریافت و انتقال اتیلن در سلول در مرحله اولیه و در مراحل بعدی رشد در *Arabidopsis* را در اختیار قرار دهد. آنالیز داده‌ها بر مبنای آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی صورت گرفت. جهت آنالیز داده‌های بدست آمده از نرم افزار SAS نسخه ۹ و Excel نسخه ۲۰۰۷ استفاده شد.

جهت تیمار گیاهان بالغ با اتیلن، ابتدا گیاهان والدینی و گیاهان موتانت *ein2* در دمای 21°C و ۶۰٪ رطوبت نسبی محیط و تحت شرایط نور فلورسنت $60\mu\text{mol}^{-2}\text{sec}$ (۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی) برای مدت ۳۱ روز در اتاقک رشد نگهداری شدند. سپس برای مدت ۷۲ ساعت با گاز اتیلن ($10-40\mu\text{l l}^{-1}$) و نور فلورسنت مداوم تیمار شدند.

نتایج و بحث:

بررسی تغییرات واکنش سه‌گانه گیاهچه‌های موتانت در عدم حضور ACC: در صورت عدم استفاده از ACC در محیط MS ۱/۲ در شرایط تاریکی، کلیه گیاهچه‌های مادری و موتانت‌های *pad4*، *NahG*، *jar1*، *ein2* فنوتیپ و عکس‌العملی مشابه ژنوتیپ مادری خود (Col-0) را نشان دادند (داده‌ها نشان داده نشده). در این بررسی هیچ‌کدام از موتانت‌های مورد بررسی در دو گروه موتانت‌های *eto* و *hls* قرار نگرفتند. این

جدول ۱- بررسی وجود یا عدم وجود فنوتیپ سه گانه (Triple Response) در موتانت های گروه مادری Col-0 در حضور ACC و پس از ۵ روز تاریکی مطلق، تعداد تکرار برای هر مشاهده ۴ می باشد. ✓ (وجود) و × (عدم وجود).

ژنوتیپ	کوتاه و ضخیم شدن طول هیپوکوتیل	کوتاه شدن ریشه چه	چرخش در قلاب رأسی
Col-0	✓	✓	دارای چرخش
ein2	×	×	فاقد چرخش
jar1	✓	✓	فاقد چرخش
NahG	✓	✓	فاقد چرخش
pad4	✓	✓	فاقد چرخش
edr1	✓	✓	فاقد چرخش

بر طویل شدن هیپوکوتیل و ریشه چه نداشته است و چرخش قلاب رأسی در این موتانت دیده نمی شود (جدول ۱). بنابراین می توان نتیجه گرفت که این موتانت متعلق به گروه موتانت *ein* می باشد. در این موتانت، EIN بعنوان مهمترین جز در مسیر سیگنالینگ اتیلن دچار تغییر شده است و در نتیجه پیام اتیلن منتقل نشده و گیاه حساسیتی به حضور اتیلن نشان نمی دهد (Alonso et al., 1999). مطابق با جدول ۱ موتانت های *edr1*، *pad4*، *NahG*، *jar1* در حضور تیمار اتیلن فاقد چرخش در قلاب رأسی می باشند. با توجه به اینکه این موتانت ها جز گروه *ein* نبوده و از طرف دیگر به دلیل عدم چرخش در قلاب رأسی، با ژنوتیپ مادری Col-0 نیز تفاوت دارند، می توان آنها را در گروه جدیدی قرار داده و از آنها به عنوان گروه چهارم در این تحقیق نام برد. در گروه اخیر در حضور تیمار اتیلن طول ریشه و هیپوکوتیل کاهش می یابد، اما چرخش هیپوکوتیل صورت نمی گیرد. این ویژگی کاملاً متفاوت با ویژگی سه گروه دیگر می باشد. شکل قلاب رأسی هیپوکوتیل در اثر طویل شدن نامتقارن سلول ها و در اثر فعالیت مواد آنتاگونیست فعالیت اتیلن در رأس هیپوکوتیل صورت می گیرد. احتمالاً عدم تشکیل قلاب رأسی در حضور تیمار اتیلن در موتانت های این گروه به دلیل عدم حضور مواد آنتاگونیستی فوق بوده و در نتیجه اتیلن تأثیر خود را به طور کامل گذاشته و قلاب رأسی تشکیل نمی گردد.

در غلظت های ۰، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول از ACC اندازه گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تجزیه واریانس داده های حاصل از تأثیر مقادیر مختلف ACC بر دو صفت طول هیپوکوتیل و ریشه چه ژنوتیپ Col-0 و موتانت های *ein2*، *jar1*، *NahG*، *pad4* و *edr1* در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس داده های بدست آمده نشان می دهد که دو فاکتور ژنوتیپ و سطوح مختلف ACC و اثر متقابل آنها دارای تأثیرات معنی داری در سطح ۱٪ بر صفات اندازه گیری شده در این موتانت ها شامل طول هیپوکوتیل و ریشه چه می باشد.

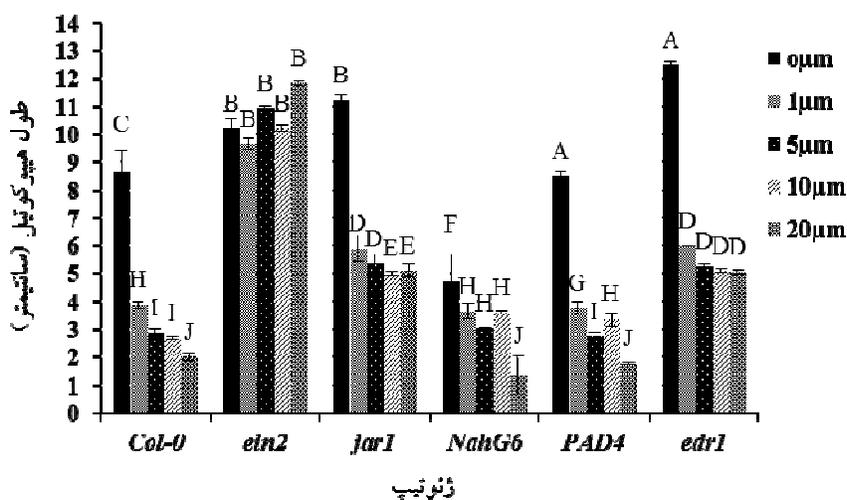
همان طور که در شکل های ۲ و ۳ مشاهده می شود روند تغییرات طول هیپوکوتیل و ریشه چه در موتانت های گروه Col-0 از روند مشابهی برخوردار نیست. این تغییرات در والد وحشی Col-0 با افزایش غلظت ACC به صورت پلکانی کاهش می یابد، در حالیکه در گیاهچه های *ein2* روندی کاملاً متفاوتی از والد وحشی یعنی روندی غیر کاهشی و نسبتاً ثابتی را دنبال میکند. اگر چه روند تغییرات فوق در دیگر موتانت ها کاهشی است ولی شیب تغییرات فوق از وضعیت مشابهی با والد وحشی برخوردار نیست. بنابراین علی رغم اینکه در مطالعه مقدماتی مشاهده گردید که موتانت های *pad4*، *NahG*، *jar1* و *edr1* در گروه چهارم از نظر واکنش سه گانه به اتیلن قرار دارند، ولی تجزیه واریانس داده های حاصل از مطالعه دقیق تر تأثیر غلظت های مختلف ACC بر دو صفت طول هیپوکوتیل و ریشه چه نشان می دهد (شکل ۲ و ۳) که میزان اثرگذاری ACC

به منظور بررسی دقیق تر تفاوت واکنش موتانت ها به اتیلن در گروه ژنوتیپی فوق، طول هیپوکوتیل و ریشه چه گیاهچه ها

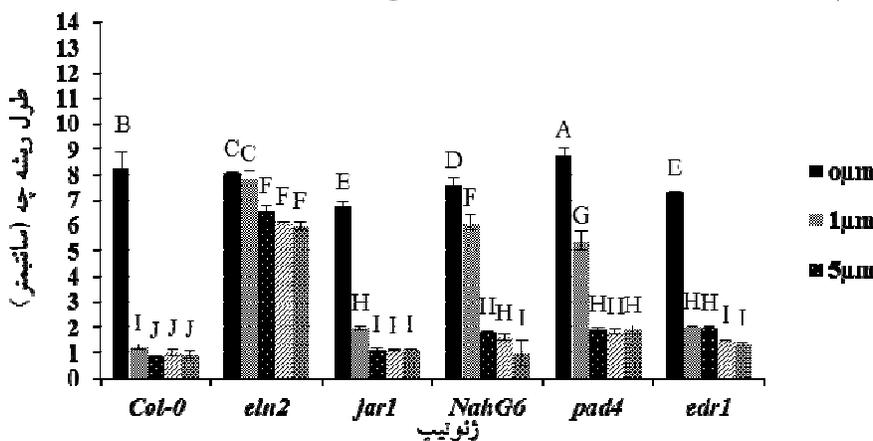
جدول ۲- تجزیه واریانس مربوط به اثر غلظت‌های مختلف ACC بر طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه ژنوتیپ‌های *NahG*، *jar1*، *ein2*، *col-0*، *edr1* و *pad4*

F		MS		SS		درجه آزادی	منبع تغییرات
طول ریشه‌چه	طول هیپوکوتیل	طول ریشه‌چه	طول هیپوکوتیل	طول ریشه‌چه	طول هیپوکوتیل		
۱۱۲/۳۲**	۱۶۸/۹۴**	۳۲/۳۲۴	۲۴/۶۶۵	۹۳۷/۴۲۲	۷۱۵/۲۹۶	۲۹	تیمار
۳۷۲/۶۹**	۲۹۴/۳۲**	۱۰۷/۲۵۳	۴۲/۹۶۹	۵۳۶/۲۶۷	۲۱۴/۸۴۸	۵	ژنوتیپ
**۲۴۷/۳۴	**۷۱۲/۰۰	۷۱/۱۷۸	۱۰۳/۹۴۹	۲۴۸/۷۱۴	۴۱۵/۷۹۷	۴	سطح ACC
۲۰/۲۳**	۲۸/۹۹**	۵/۸۲۱	۴/۲۳۲	۱۱۶/۴۳۹	۸۴/۶۵۰	۲۰	سطح ACC × ژنوتیپ
-	-	۰/۲۸۷	۰/۱۴۵	۱۷/۲۶۶	۸/۷۵۹	۶۰	خطا
-	-	-	-	۹۵۴/۶۸۸	۷۲۴/۰۵۶	۸۹	کل

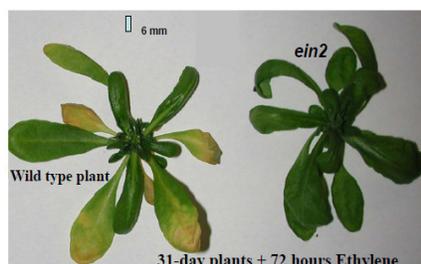
** به مفهوم معنی دار بودن تفاوت داده‌ها در سطح ۱٪



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های طول هیپوکوتیل در موتانت‌های مختلف گروه Col-0 در غلظت‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول از ACC. حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۱٪ می‌باشند.



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های طول ریشه‌چه در موتانت‌های مختلف گروه Col-0 در غلظت‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول از ACC. حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۱٪ می‌باشند.



شکل ۴- فنوتیپ گیاهان ۳۱ روزه موتانت *ein2* پس از ۷۲ ساعت تیمار با گاز اتیلن در مقایسه با گیاه وحشی

موتانت پرداخته می شود.

بررسی طول هیپوکوتیل و ریشه چه در موتانت *pad4*

مطابق با جدول ۱ فنوتیپ یکسانی در گیاهچه های موتانت *pad4* در مقایسه با ژنوتیپ مادری Col-0 در زمینه واکنش سه گانه مشاهده نمی شود. این تفاوت عمدتاً در قسمت چرخش در قلاب رأسی هیپوکوتیل مشاهده می شود، اما طول هیپوکوتیل و ریشه چه در موتانت *pad4* دارای تفاوت معنی داری در غلظت های مختلف از ACC این موتانت می باشد (جدول ۳)، ولی دارای تفاوت معنی داری با ژنوتیپ مادری نیست (شکل ۵ و ۶). همان طور که در جدول ۴ مشاهده می گردد نسبت تغییر طول هیپوکوتیل در گیاهچه های موتانت *pad4* (۰/۳۸) با نسبت فوق در گیاهچه های وحشی Col-0 (۰/۳) بسیار نزدیک می باشد. بنابراین موتانت *pad4* دارای علائم نسبتاً یکسان دوگانه با ژنوتیپ مادری بوده و احتمالاً می تواند از مسیر بیوستنز، درک و یا سیگنالینگ اتیلن نرمالی برخوردار باشد. ژن *PAD4* برای سنتز کامالکسین که یک نوع فایتوالکسین می باشد در واکنش به آلودگی های باکتریایی و ویروسی در گیاه لازم است. محصول ژن *PAD4* یک پروتئین مشابه با تری اسیل گلیسرول لیپاز است که در سیگنالینگ سالیسیلیک اسید به منظور افزایش قدرت دفاعی گیاه نقش مهمی دارد (Jirage et al., 1999). در موتانت *pad4* (*Phyto 4*) تخریب کننده سالیسیلیک اسید، بنام سالیسیلات هیدروکسیلاز، مقدار تجمع سالیسیلیک اسید در سلول ها کاهش یافته و به دنبال آن میزان کامالکسین که در واکنش های دفاعی گیاهان نقش دارد، در سلول کاهش می یابد (Jirage et al., 1999).

به صورت بروز واکنش سه گانه بسته به نوع موتاسیون متفاوت است، تا جایی که موتاسیون در ژنی همچون *EIN2* واکنش گیاهچه ها به غلظت های مختلف ACC را به حداقل می رساند. بررسی واکنش ۳ گانه در گیاهچه های موتانت ۵ روزه می تواند بعنوان شاخص قابل توجهی برای بررسی واکنش گیاهان بالغ به اتیلن محسوب گردد. زیرا همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، تیمار نمودن گیاهان بالغ ۳۱ روزه *ein2* با گاز اتیلن منجر به بروز واکنش مشابهی با گیاهچه های ۵ روزه در واکنش به اتیلن گردید. در این تصویر همانطور که مشاهده می شود تعدادی از برگ های گیاهان ۳۱ روزه والدینی در واکنش به ۷۲ ساعت تیمار گاز اتیلن زرد شده اند، در حالیکه در هیچ یک از برگ های گیاهان *ein2* علائمی از زردی مشاهده نمی شود. *EIN2* یکی از مهمترین اجزا در مسیر سیگنالینگ اتیلن و یک تنظیم کننده مثبت در مسیر انتقال پیام اتیلن است. جهش در *EIN2* موجب عدم حساسیت موتانت ایجاد شده در مقابل اتیلن می گردد. به دنبال اختلال در مسیر سیگنالینگ اتیلن، پیام اتیلن منتقل نشده و در نتیجه بیان ژن های مرتبط با و متاثر از اتیلن صورت نگرفته و به دنبال آن تأخیر در فرآیند پیری رخ می دهد (Alonso et al., 1999).

جهت بررسی دقیق تر تفاوت موتانت ها در زمینه واکنش به ACC، مقایسه میانگین صفات مورد توجه قرار گرفت. میانگین دو صفت طول هیپوکوتیل و ریشه چه برای کلیه موتانت ها در مقایسه با شاهد Col-0 به جز موتانت *pad4* دارای تفاوت معنی داری در سطوح مختلف ACC هستند (شکل ۵ و ۶). ذیلاً به بررسی تفکیکی تأثیر هر یک از موتاسیون های فوق بر صفات اندازه گیری شده در گیاهچه های

(Leaf Senescence) در مقایسه با گیاهان وحشی که فاقد موتاسیون *ein2* است می‌گردد (شکل ۴). همانطور که قبلاً ذکر شد، وظیفه اصلی ژن *EIN2* کد کردن یک پروتئین داخل غشایی می‌باشد، که تنظیم کننده مثبت در مسیر انتقال پیام اتیلن است. خصوصیت تأخیر پیری در گیاهان جهش یافته *ein2* با افزایش حساسیت به برخی پاتوژنها همراه است. در واقع کاهش حساسیت به اتیلن در برخی گیاهان منجر به افزایش امکان حمله پاتوژن‌ها می‌شود (Thommas *et al.*, 1999; Van *et al.*, 2006). احتمالاً این نتایج به دلیل تأثیر موتاسیون در مسیر بیوستتر و یا سیگنالینگ اتیلن در این موتانت می‌باشد. اما با توجه به جدول ۳ طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه در موتانت های *ein2* در غلظت‌های مختلف ACC هیچ تفاوت معنی‌داری را نشان نمی‌دهد و این بدان معنی است که گیاهچه‌های موتانت *ein2* به تیمار اتیلن، حساسیت و واکنشی ندارند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود فنوتیپ واکنش سه گانه در گیاهچه‌های موتانت *ein2* با علائم گروه موتانت‌های *ein* مشابه می‌باشد. در گیاهان موتانت، پروتئین EIN2 به عنوان مهمترین جزء در مسیر سیگنالینگ اتیلن دچار تغییر شده است و در نتیجه پیام اتیلن منتقل نمی‌شود و گیاه حساسیتی به حضور اتیلن نشان نخواهد داد. موتانت *ein2* یک فنوتیپ فاقد حساسیت به اتیلن (Ethylene insensitive phenotype) می‌باشد. EIN2 به عنوان یکی از اجزای مهم و ضروری در مسیر سیگنالینگ اتیلن، بین اجزای *CTR1* و *EIN3/EIL* قرار گرفته و تنظیم‌کننده مثبت در این مسیر می‌باشد (Alonso *et al.*, 1999). اتصال اتیلن به گیرنده‌های این هورمون موجب غیر فعال شدن گیرنده‌ها شده و غیر فعال شدن گیرنده‌ها منجر به غیر فعال شدن *CTR1* می‌گردد. *CTR1* تنظیم کننده منفی در مسیر سیگنالینگ اتیلن بوده و با اتصال اتیلن به گیرنده‌ها، *CTR1* غیر فعال می‌شود، سپس EIN2 به عنوان یکی از اجزای مهم در سیگنالینگ اتیلن، شروع به فعالیت می‌کند. EIN2 تنظیم کننده مثبت در این مسیر بوده و موجب فعال‌سازی یکسری از فاکتورهای رونویسی بنام *EIN3/EIL* شده و در نهایت موجب بیان ژن‌های مرتبط با اتیلن می‌گردد (Wang *et al.*, 2002). احتمالاً موتاسیون در جایگاه EIN2 مانع از انتقال پیام اتیلن به

(Kunkle and Brook, 2002). از آن جایی که برای سنتز کامالکسین به سالیسیلیک اسید نیاز می‌باشد، لذا احتمالاً میزان مقاومت گیاهچه‌های موتانت به دلیل کاهش میزان کامالکسین در مقابل حمله پاتوژن‌ها کاهش می‌یابد. مسیر سیگنالینگ هورمون سالیسیلیک اسید با هورمون اتیلن در گیاهان تداخل دارد (Kunkle and Brook, 2002; Leon-Reyer *et al.*, 2010). طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه در موتانت *pad4* دارای تفاوت معنی‌داری در غلظت‌های مختلف از ACC در مقایسه با ژنوتیپ مادری نیست (شکل ۵ و ۶). اما این موتانت در مقایسه با ژنوتیپ مادری و در حضور اتیلن فاقد چرخش در هیپوکوتیل می‌باشد (جدول ۱)، بنابراین احتمالاً سطوح سالیسیلیک اسید در شکل‌گیری قلاب رأسی توسط اتیلن نقش داشته است و کاهش سطح سالیسیلیک اسید در طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه تغییری به وجود نیاورده اما مانع از چرخش قلاب رأسی شده است. لذا احتمالاً موتاسیون *pad4* روی میزان فعالیت ژنهای موثر بر شکل‌گیری قلاب رأسی مؤثر است.

بررسی طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه در موتانت *ein2*:

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، فنوتیپ مشابهی در گیاهچه‌های اتیوله موتانت *ein2* و ژنوتیپ مادری Col-0 از نظر علائم سه‌گانه دیده نمی‌شود. زیرا برخلاف ژنوتیپ مادری، گیاهچه‌های موتانت *ein2* در حضور اتیلن دارای هیپوکوتیل و ریشه‌چه طویل و فاقد چرخش در قلاب رأسی می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۵ و ۶ طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه در غلظت‌های مختلف ACC در گیاهچه‌های موتانت *ein2* در مقایسه با ژنوتیپ Col-0 از تفاوت معنی‌داری برخوردار است، در حالیکه این تفاوت در مقایسه با خودش معنی‌دار نیست، یعنی در گیاهچه‌های این موتانت طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه در غلظت‌های مختلف ACC تقریباً یکسان می‌باشد (جدول ۳). همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد، نسبت تغییر طول هیپوکوتیل در گیاهچه‌های موتانت *ein2* (۰/۹۹) با نسبت فوق در گیاهچه‌های وحشی Col-0 (۰/۳) بسیار متفاوت می‌باشد. علاوه بر این، تیمار نمودن گیاهان بالغ ۳۱ روزه *ein2* با گاز اتیلن بطور چشمگیری منجر به تأخیر فرآیند پیری

جدول ۳- تجزیه واریانس طول هیپوکوتیل و ریشه چه در ژنوتیپ های Col-0، ein2، jar1، NahG، pad4 و edr1 در سطوح مختلف ACC به روش برش دهی

ژنوتیپ	درجه آزادی	SS		MS		F	
		طول هیپوکوتیل	طول ریشه چه	طول هیپوکوتیل	طول ریشه چه	طول هیپوکوتیل	طول ریشه چه
Col-0	۴	۸۶/۲۷۵	۱۲۵/۶۵۹	۲۱/۵۶۸	۳۱/۴۱۴	۷۴/۹۵**	۲۱۵/۱۷**
ein2	۴	۲/۰۴۴	۲/۸	۰/۵۱۱	۰/۷۴	۱/۷۸ ^{ns}	۱/۸ ^{ns}
jar1	۴	۸۴/۴۴۲	۷۰/۹۶۰	۲۱/۱۱۰	۱۷/۵۲	۷۳/۳۶**	۱۲۰/۰۳**
NahG	۴	۲۰/۴۷۹	۱۰۸/۰۹۷	۵/۱۱۹	۲۷/۰۲۴	۱۷/۷۹**	۱۸۵/۱۰**
pad4	۴	۸۳/۸۸۶	۱۰۹/۹۷	۲۰/۹۷۱	۲۷/۴۹۲	۷۲/۸۷**	۱۸۸/۳۱**
edr1	۴	۱۲۴/۰۲۵	۷۵/۶۴۶	۳۱/۰۰۶	۱۸/۹۱۱	۱۰۷/۴۷**	۱۲۹/۵۳**

** به مفهوم معنی دار بودن تفاوت داده ها در سطح ۱٪

گیاهان موتانت به علت افزایش القای سالیسیلیک اسید رخ داده است. واکنش دفاعی گیاهان علیه حمله میکروبی از طریق شبکه ی پیچیده ای از مسیرهای سیگنالینگ که شامل سیگنالینگ سالیسیلیک اسید، جاسمونیک اسید و اتیلن هستند، صورت می گیرد. این تداخل (Cross talk) موجب القا واکنش دفاعی گیاهان در ارتباط با مسیرهای سیگنالینگ مختلف می گردد (Tang et al., 2005; Kunkle and Brook, 2002). وجود تفاوت معنی دار در روند تغییر طول هیپوکوتیل و ریشه چه بین موتانت *edr1* و ژنوتیپ مادری Col-0 نشان داد که این موتاسیون بر مسیر بیوستتیز، درک یا انتقال پیام اتیلن نیز تأثیرگذار بوده و آنرا تغییر داده است. احتمالاً عملکرد ژن EDRI در مسیر تداخل بین سیگنالینگ اتیلن و سالیسیلیک اسید که در مرگ سلولی و پیری دخالت دارند، صورت می گیرد. به همین دلیل نیز تغییر در سطح سالیسیلیک اسید موجب تغییر در مسیر بیوستتیز اتیلن می شود. همچنین می توان نتیجه گرفت که احتمالاً افزایش در سطح سالیسیلیک اسید موجب ایجاد تغییر در مسیر بیوستتیز و سیگنالینگ اتیلن خواهد شد.

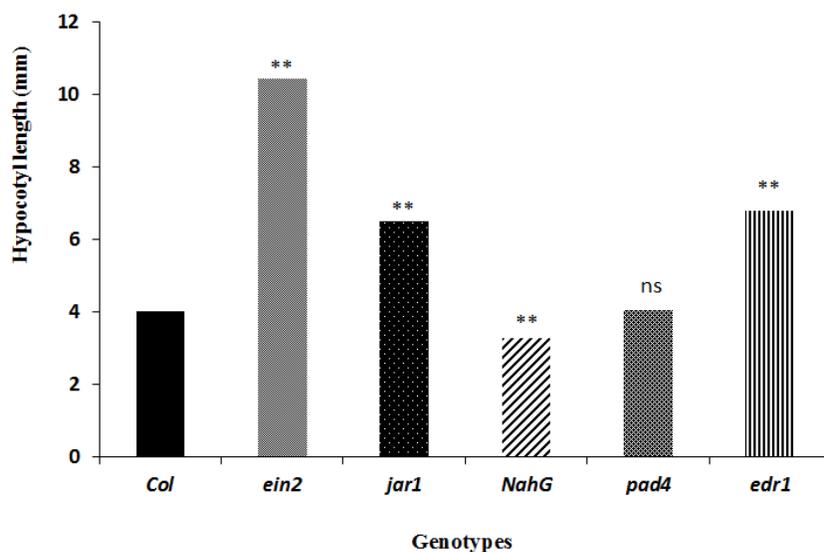
بررسی طول هیپوکوتیل و ریشه چه در موتانت *jar1*:

مطابق با جدول ۱ در موتانت *jar1* و ژنوتیپ مادری Col-0 از نظر علائم سه گانه، فنوتیپ یکسانی دیده نمی شود. مطابق با شکل ۲ و ۳ موتانت *jar1* از نظر طول هیپوکوتیل و ریشه چه دارای تفاوت معنی داری در سطوح مختلف ACC و همچنین با

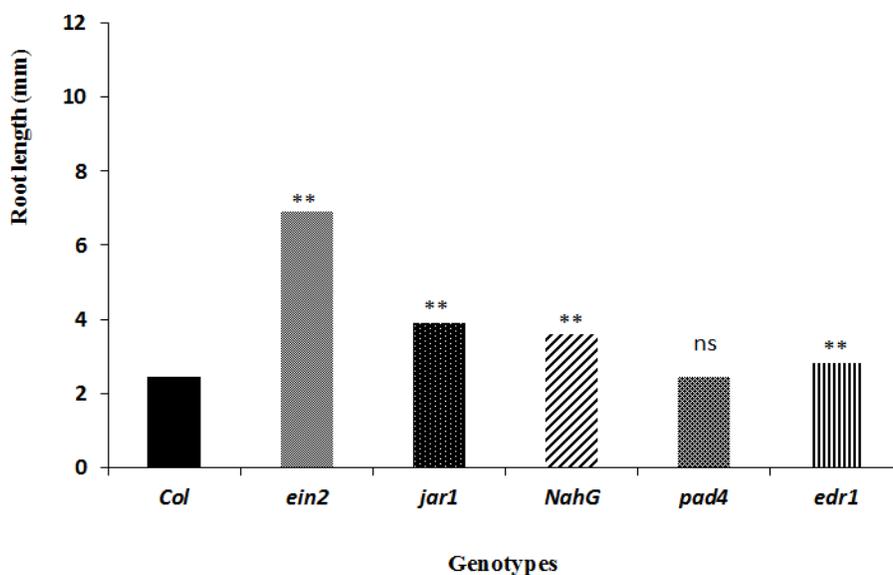
سایر اجزای مسیر انتقال پیام اتیلن شده و در نهایت منجر به عدم حساسیت در حضور تیمار اتیلن و اتیلن داخل سلولی می شود.

بررسی طول هیپوکوتیل و ریشه چه در موتانت *edr1*:

طبق جدول ۱ علائم کاملاً یکسانی در موتانت *edr1* و ژنوتیپ مادری Col-0 از نظر علائم سه گانه دیده نمی شود. زیرا موتانت *edr1* در حضور اتیلن فاقد چرخش در قلاب رأسی می باشد. مطابق با شکل ۲ و ۳ موتانت *edr1* از نظر طول هیپوکوتیل و ریشه چه دارای تفاوت معنی داری با خودش در سطوح مختلف ACC و با ژنوتیپ مادری Col-0 می باشد (شکل ۵ و ۶ - جدول ۳). همانطور که در جدول ۴ مشاهده می گردد، نسبت تغییر طول هیپوکوتیل در گیاهچه های موتانت *edr1* (۰/۴) با نسبت فوق در گیاهچه های وحشی Col-0 (۰/۳) متفاوت می باشد. بنابراین احتمالاً این موتانت از وضعیت متفاوتی در زمینه مسیر بیوستتیز، درک و سیگنالینگ اتیلن در مقایسه با ژنوتیپ مادری برخوردار است. ژن *EDRI* (ENHANCED DISEASE RESISTANCE1) یک پروتئین کیناز مشابه CTR1 را کد می کند (Tang et al., 2005). این کیناز تنظیم کننده منفی در فرایند مقاومت به بیماری و پیری القا شده توسط اتیلن است، لذا پیری در گیاهان موتانت *edr1* در واکنش به تیمار اتیلن تسریع و مقاومت در گیاه علیه بیماری سفیدک پودری افزایش می یابد (Dingzhong and Innes, 2002). افزایش مقاومت در



شکل ۵- مقایسه میانگین طول هیپوکوتیل در کلیه غلظت‌های مختلف ACC در هر یک از موتانت‌های *ein2*، *jar1*، *NahG*، *pad4* و *edr1* با شاهد *Col-0* با استفاده از آزمون LSD در سطح ۱٪ (** = تفاوت معنی‌دار ns = تفاوت بی‌معنی).



شکل ۶- مقایسه میانگین طول ریشه‌چه در کلیه غلظت‌های مختلف ACC در هر یک از موتانت‌های *ein2*، *jar1*، *NahG*، *pad4* و *edr1* با شاهد *Col-0* با استفاده از آزمون LSD در سطح ۱٪ (** = تفاوت معنی‌دار ns = تفاوت بی‌معنی).

معنای تأثیر موتاسیون بر مسیر بیوسنتز، درک یا سیگنالینگ اتیلن در گیاهچه‌های موتانت *jar1* باشد. پروتئین *Jar1* (*Acid response Jasmonic 1*) از جمله ژن‌های موثر بر واکنش گیاه به سیگنالینگ جاسمونیک است. میزان حساسیت گیاهچه‌های موتانت *jar1* به جاسمونیک اسید و متیل جاسمونیت به دلیل نقص آنزیمی *JAR1* کاهش یافته و در

ژنوتیپ مادری *Col-0* می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۳). همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد، نسبت تغییر طول هیپوکوتیل در گیاهچه‌های موتانت *jar1* (۰/۴۴) با نسبت فوق در گیاهچه‌های وحشی *Col-0* (۰/۳) متفاوت می‌باشد. در نتیجه احتمالاً این ژنوتیپ دچار نقص در یکی از مسیرهای بیوسنتز، درک یا سیگنالینگ اتیلن می‌باشد و این می‌تواند به

جدول ۴- نسبت تغییر طول هیپوکوتیل در گیاهچه های موتانت و والد حشی Col-0 (تیمار شده با ۱۰ میکرومولار ACC) به طول هیپوکوتیل در این گیاهچه در محیط غذایی فاقد ACC.

Mutant	ACC (0μM)	ACC (10μM)	Ratio
Col-0	۸/۶۶ + ۰/۲	۲/۶۶ + ۰/۳	۰/۳
<i>ein2</i>	۱۰/۲ + ۰/۴	۱۰/۱ + ۰/۳	۰/۹۹
<i>Jar1</i>	۱۱ + ۰/۳۵	۴/۹ + ۰/۲	۰/۴۴
<i>NahG</i>	۴/۷۲ + ۰/۷	۳/۶ + ۰/۲	۰/۷۶
<i>PAD4</i>	۸/۸۳ + ۰/۴	۳/۳۶ + ۰/۲	۰/۳۸
<i>edr1</i>	۱۲/۵ + ۰/۲	۵ + ۰/۲	۰/۴

بررسی طول هیپوکوتیل و ریشه چه در موتانت *NahG*:

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، در موتانت *NahG* و ژنوتیپ مادری Col-0 از نظر فنوتیپ واکنش سه گانه علائم یکسانی دیده نمی شود. مطابق با شکل ۲ و ۳ موتانت *NahG* از نظر طول هیپوکوتیل و ریشه چه دارای تفاوت معنی داری در سطوح مختلف ACC در مقایسه با خود و با ژنوتیپ مادری Col-0 میباشد (شکل های ۵ و ۶ و جدول ۳). همانطور که در جدول ۴ مشاهده میگردد، نسبت تغییر طول هیپوکوتیل در گیاهچه های موتانت *NahG* (۰/۷۶) با نسبت فوق در گیاهچه های وحشی Col-0 (۰/۳) بسیار متفاوت میباشد. در نتیجه احتمالاً این ژنوتیپ دچار نقص در یکی از مسیرهای بیوستنز، درک یا سیگنالینگ اتیلن می باشد. گیاهان ترانسژنیک *Arabidopsis* که دارای ژن *NahG* از منبع باکتریایی هستند در اثر بیان مضاعف این ژن، آنزیم سالیسیلات هیدروکسیلاز را با مقادیر بیشتری تولید می کنند. این آنزیم می تواند سالیسیلیک اسید را متابولیزه نماید. سالیسیلات هیدروکسیلاز مانع تجمع SA (سالیسیلیک اسید) در هنگام حمله ی پاتوژن شده و در نتیجه قدرت دفاعی گیاه را کاهش می دهد. این هورمون علاوه بر تأثیر در سیستم دفاعی گیاه، بیان برخی از ژن های مرتبط با پیری را نیز تنظیم می کند (Lawton et al, 1995). همانطور که قبلاً اشاره شد، اثر متقابل و تداخلی هورمون های سالیسیلیک اسید، جیبرلیک اسید و اتیلن موجب می شود که تغییر در سطح یکی از هورمون ها در مسیر انتقال پیام سایر هورمون ها نیز تغییر ایجاد شود. نکته قابل توجه در خصوص موتانت *NahG* اینست

نتیجه واکنش دفاعی در گیاهان موتانت علیه پاتوژن ها دچار ضعف می شود (Staswick and Tiryaki, 2004). بنابراین این موتانت در مقابل حمله پاتوژن ها حساسیت بیشتری دارد. از طرف دیگر مقدار این هورمون در گیاهان در هنگام پیری در برگ ها افزایش یافته و بیان ژن های مرتبط با فتوستنز را کاهش می دهد (He et al., 2002). از آنجایی که مسیر پیام رسانی سالیسیلیک اسید، جیبرلیک اسید و اتیلن در سیستم دفاعی گیاهان اثر متقابل و تداخلی بر هم دارند (Tang et al., 2005; Kunkle and Brook, 2002)، در گیاهچه های موتانت *jar1* نیز ایجاد موتاسیون و تغییر مقاومت در گیاهان موتانت علیه پاتوژن ها و کاهش مقدار جیبرلیک اسید فعال در گیاه، به مسیر بیوستنز، درک یا سیگنالینگ اتیلن آسیب وارد کرده است. احتمالاً موتانت هایی که در آنها سطح یکی از هورمون های اتیلن، سالیسیلیک اسید و جیبرلیک اسید دچار تغییر شده است، برای فعال سازی مسیر پیام رسانی سایر هورمون ها تغییر حساسیت می دهند. موتانت *edr1* و *jar1* به ترتیب در القای سالیسیلیک اسید و جاسمونیک اسید دچار اختلال و تغییر شده اند که این می تواند با توجه به وابستگی مسیر سیگنالینگ اتیلن به مسیر سیگنالینگ SA و JA در واکنش موتانت ها به اتیلن تغییر ایجاد کند. بنابراین می توان نتیجه گرفت برای داشتن مسیر بیوستنز، درک و انتقال پیام مناسب و فعال برای هورمون اتیلن در گیاهان، به فعالیت نرمال و صحیح مسیر انتقال پیام دو هورمون سالیسیلیک اسید و جیبرلیک اسید نیاز است (Wang et al., 2002; Kunkle and Brook, 2002).

منظور بررسی تأثیر فعالیت ژن‌های مختلف بر مسیر بیوستنز، درک و انتقال پیام اتیلن در گیاهچه‌های موتانت *jar1 ein2*، *NahG pad4* و *edr1* در حضور و عدم حضور اتیلن مورد بررسی و با واکنش گیاهچه های مادری *Col-0* مقایسه شد. در این گروه هیچ‌کدام از ژنوتیپ‌ها فنوتیپ سه‌گانه کاملاً یکسانی با ژنوتیپ مادری در حضور و عدم حضور تیمار اتیلن نشان ندادند و فقط ژنوتیپ *pad4* از نظر طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه تفاوتی با ژنوتیپ مادری خود نداشته است و سایر ژنوتیپ‌ها دارای تفاوتی معنی‌دار با ژنوتیپ مادری در این گروه بوده‌اند. لذا وقوع موتاسیون در ژنهای متفاوت در گیاهان جهش یافته مورد بررسی موجب ایجاد اثرات متفاوتی در زمینه واکنش گیاهان موتانت به اتیلن می‌گردد.

که بر خلاف موتانت *pad4* که با کاهش سطح سالیسیلیک اسید توسط آنزیم سالیسیلات هیدروکسیلاز، تفاوت معنی‌داری در این ژنوتیپ از نظر طول ریشه‌چه و هیپوکوتیل با ژنوتیپ مادری مشاهده نمی‌شود. در گیاهچه‌های موتانت *NahG* با وجود کاهش سطح سالیسیلیک اسید توسط آنزیم سالیسیلات هیدروکسیلاز، تفاوت معنی‌داری از نظر طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه با ژنوتیپ مادری نشان می‌دهد (شکل ۳ و ۴). تفاوت معنی‌دار طول هیپوکوتیل و ریشه‌چه در موتانت *NahG* با صفات فوق در ژنوتیپ مادری احتمالاً بعثت اثرات ورود ژن جدید بوده است.

نتیجه‌گیری:

در این تحقیق بررسی سه صفت طول هیپوکوتیل، طول ریشه‌چه و چرخش قلاب رأسی تحت عنوان واکنش سه‌گانه به

منابع:

- response of *Arabidopsis* insensitive to future suppression by salicylic acid. *Molecular Plant – Microbe Interactions* 23: 187-197.
- Li, H and Guo, H. (2007) Molecular basis of the ethylene signaling and response pathway in *Arabidopsis*. *Plant Growth Regulation* 26:106-117.
- Ma, B., M. Sui, H. Sun, K. Takada, H. Mori, H. Kamada and H. Ezora. (2006) Subcellular localization and membrane topology of the melon ethylene receptor CmERS1. *Plant Physiology* 141:587-597.
- Neljubow, D. N. (1901) Über die horizontale *Nutation* der Stengel von *Pisum sativum* und einiger anderer Pflanzen. *Beitrage und Botanik Zentralblatt* 10: 128-139.
- Olmedo, G., Goue, H., Gregory, B., Nourizadeh, S., Aguilar-Henonin, L., Li, H., An, F., Guzman, P. and Ecker, J. (2006) Ethylene-insensitive5 encodes a 5' → 3' exoribonuclease required for regulation of the EIN3- targeting F-box proteins EBF1/2. *PNAS* 36: 13286-13293.
- Omalley, RC., F. Rodriguez, J. Esch, B. Binder, P. ODonnel, H. Klee and A. Bleecker. (2005) Ethylene-binding activity, gene expression levels, and receptor system output for ethylene receptor family members from *Arabidopsis* and Tomato. *Plant Journal* 41:651-659
- Shirzadian-Khorramabad, R., Jing, H. C., Hille, J. and Dijkwel, P. P. (2010) Identification of *Arabidopsis* stay-green mutants with a functional ethylene-response pathway. In: *Agronomy Society of New Zealand Special Publication No. 13 / Grassland Research and Practice No. 14*: 119-130.
- Alonso, J., Hirayama, T., Roman, G., Nourizadeh S., and Ecker, J. R. (1999) EIN2, a bifunctional transducer of ethylene and stress responses in *Arabidopsis*. *Science* 284: 2148-2152.
- Dalcin, V., Rizzini, F., Botton, A., and Tonutti. P. (2006) The ethylene biosynthetic and signal transduction pathways are differently affected by 1-MCP in apple and peach fruit. *Postharvest Biology and Technology* 42: 125-133
- Guzman, P and Ecker, J. R. (1990) Exploiting the triple response of *arabidopsis* to identify ethylene-relatedmutants. *Plant Cell* 2: 513-523.
- He, Y., H. Fukushige, D. Hildebrand and Gan, S. (2002) Evidence supporting a role of jasmonic acid in *arabidopsis* leaf senescence. *Plant Physiology* 128: 876-884.
- Jirage, D., Tootle, T., Linea, T., Forest, L. N., Fart, B., Parker, J. and Ausuble, F. (1999) *Arabidopsis thaliana* PAD₄ encodes a lipase-like gene that is important for salicylic acid signaling. *PNAS* 96: 13583-13588.
- Kunkle, B and Brook, D. (2002) Cross talk between signaling pathways in pathogen defense. *Plant Biology* 5:325-331.
- Lawton, K., Waymann, K., Friedrich, L., Vernooji B., Uknes, S., and Ryals, J. (1995) Systemic acquired resistance in *Arabidopsis* requires salicylic acid but not ethylene. *Molecular Plant Microbe Interaction* 8:863-70.
- Leon-Reyer, A., Du, Y., Koorneef, A., Proietti, S., Korbes, A., Memelink, J., Pieters, C., and Ritsem, T. (2010) Ethylene signaling renders the jasmonate

- Thomma, B. P. H., Nelissen, I., Eggermont, K. and Broekaert, W. F. (1999) Deficiency in phytoalexin production causes enhanced susceptibility of *Arabidopsis thaliana* to the fungus *Alternaria brassicicola*. *Plant Journal* 19: 163-171.
- Wang, K., Li, H. and Ecker, J. (2002) Ethylene biosynthesis and signaling networks. *Plant Cell* S131-S151.
- Zhou, N., Tootle, T., Tsue, F., Klessing, D. and Glazbrook, j. (1998) PAD4 Functions upstream from salicylic acid to control defense responses in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 10: 1021-1030.
- Stepanova, A and Ecker, J. R. (2000) Ethylene signaling: from mutants to molecules. *Plant Biology* 3:353-360.
- Staswick, P. and Tiryaki, I. (2004) The oxylipin signal jasmonic acid is activated by an enzyme that conjugates it to isoleucine in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 16: 2117-2127.
- Tang, D., Christiansen, K. and Innes, R. (2005) Regulation of plant disease resistance, stress responses, cell death, and ethylene signaling in *Arabidopsis* by the EDR1 protein kinase. *Plant Physiology* 138: 1018-1026.
- Van loon, L., Geraats, P., and Linthorst, H. (2006) Ethylene as a modulator of disease resistance in plants. *Plant Science* 11: 184-191.