"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و یکم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸

مقاله مروری

نقش تنظیم‌کننده‌های رشد در افزایش عملکرد گیاهان زراعی در شرایط شور: از تئوری تا عمل

The role of plant growth regulators in enhancing crop yield under saline conditions: from theory to practice

هادی پیراسته انوشه[۱] و یحیی امام[۲]

چکیده

پیراسته انوشه، ه.، و ی. امام. ۱۳۹۸. نقش تنظیم‌کننده‌های رشد در افزایش عملکرد گیاهان زراعی در شرایط شور؛ از تئوری تا عمل. **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۱(۳): ۲۰۹-۱۸۸.**

تشدید روند شور شدن منابع آب و خاک، باعث افزایش توجه به پژوهش‌های مرتبط با راهکارهای بهبود عملکرد گیاهان زراعی در شرایط شور شده است. بر اساس گزارش‌های منتشر شده، سابقه پژوهش‌ها پیرامون شناخت جنبه‌های مختلف تنش شوری و روش‌های افزایش تحمل گیاهان به شوری در جهان به بیش از یک قرن می‌رسد. راهکارهای متفاوت و متعددی برای افزایش عملکرد گیاهان زراعی در شرایط شور پیشنهاد شده است که یکی از آنها استفاده از تنظیم کننده‌های رشد گیاهی است. استفاده از تنظیم کننده‌های رشد از دهه ۱۹۳۰ آغاز شده و فروش جهانی سالانه آن‌ها حدود ۱/۲ میلیارد دلار است. انواع تنظیم کننده‌های رشد حاوی حدود ٤٠ نوع ماده فعال هستند که به‌صورت منفرد یا ترکیبی به‌عنوان تنظیم‌کننده رشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین تنظیم کننده‌های رشد می‌توان به اکسین‌ها، سایتوکینین‌ها، جیبرلین‌ها، اتیلن، آبسیزیک اسید، براسینواستروئیدها، سالیسیلیک اسید، کلرمکوات کلراید، پاکلوبوترازول، جاسمونیک اسید، آسکوربیک اسید، تریاکونتانول، استریوگالاکتون‌ها، نیتریک اکسید، پلی‌آمین‌ها و هورمون‌های پپتیدی گیاهی اشاره کرد. گزارش‌های فراوانی در مورد افزایش کمیت و کیفیت محصول و بهبود تحمل به شوری در گیاهان زراعی در اثر مصرف تنظیم کننده‌های رشد وجود دارد، اما اغلب این پژوهش‌ها در محیط‌های کنترل شده (شرایط خارج از مزرعه) و به‌صورت یکساله، انجام‌شده است که همین موضوع باعث عدم کاربردی شدن نتایج اغلب این پژوهش‌ها شده است. در این مقاله اثر مصرف تنظیم‌کننده‌های رشد بر بهبود عملکرد گیاهان زراعی در شرایط شور، با تاکید بر شرایط مزرعه، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پرایمینگ بذر، تحمل، تنش شوری و هورمون‌های گیاهی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۳

۱- استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران (مکاتبه کننده) (پست الکترونیک: h.pirasteh.a@gmail.com)
۲- استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

مقدمه

تنش شوری، بیش از ۱۰۰ سال است که به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش تولید محصولات کشاورزی موضوع بسیاری از پژوهش‌های جهانی بوده و حدود ۵۰ سال است که در کشور ما نیز مورد توجه جدی پژوهشگران قرارگرفته است (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2015). کشور ایران از نظر اقلیمی در زمره مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارد. از ویژگی‌های این نوع مناطق می‌توان به تبخیر زیاد و اندک و پراکنده بودن بارش‌های جوی اشاره کرد که باعث تجمع نمک‌ها در قشر سطحی خاک‌ها می‌شود. این وضعیت به دلیل مدیریت نادرست آبیاری تشدید شده و باعث شور شدن خاک‌های زراعی کشور می‌شود (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017).

شوری رشد گیاهان را به دو صورت تحت تأثیر قرار می‌دهد. غلظت بالای نمک خاک از یک‌طرف باعث کاهش پتانسیل آب خاک شده (تنش اسمزی) و از طرف دیگر در گیاه ایجاد سمیت می‌کند (سمیت یونی) که باعث تغییرات بیوشیمیایی و پاسخ‌های فیزیولوژیک در گیاه می‌شود (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2017). مسمومیت یونی در اثر تجمع یون‌های خاص به‌ویژه سدیم، باعث اختلال در واکنش‌های متابولیک گیاه می‌شود. در شرایط تنش اسمزی گیاه در اثر تجمع ترکیبات اسمزی از جمله پرولین و کربوهیدرات‌های محلول (تنظیم اسمزی)، می‌تواند به جذب آب ادامه دهد (Ashraf *et al.*, 2010). بسیاری از اثرات فیزیولوژیک شوری در گیاه ممکن است در اثر تغییر در توازن هورمون‌های گیاهی بروز کند (Ashraf and Foolad, 2005).

با توجه به شدت شوری و عوامل اقلیمی، روش‌های مختلفی برای کشت و کار و تولید محصول در شرایط شور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورتی که خاک قلیایی نبوده و تنها شور باشد، از طریق آبشویی می‌توان شوری خاک را کاهش داده و گیاه مورد نظر و سازگار را کشت کرد. در صورتی که خاک قلیایی باشد ابتدا باید از طریق کاهش نمک‌های خاک و سپس آبشویی، به اصلاح این خاک‌ها اقدام کرد. اصلاح خاک‌های شوربه دلیل مشکل بودن، هزینه زیاد و کم بودن منابع آبی شیرین، بسیار پیچیده است (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014a). از سوی دیگر، در برخی گیاهان زراعی مانند گندم و جو به دلیل تنوع بالای ژنتیکی می‌توان از ارقام متحمل به شوری برای کشت استفاده کرد. مشکل استفاده از ارقام متحمل و سازگار، در دسترس نبودن ژرم پلاسم متنوع و کافی است (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017). در مورد بسیاری از گیاهان، نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که ارقام متحمل به شوری، الزاما ارقام مناسب و پرمحصول برای شرایط شور نمی‌باشند (Ranjbar *et al.*, 2018). بسته به شدت شوری می‌توان برخی گیاهان شوردوست نظیر سالیکورنیا (*Salicornia spp.*)، کینوا (*Chenopodium quinoa*)، کوشیا (*Bassia spp.*)، آتریپلکس (*Atriplex spp.*)، ارزن پادزهری (*Panicum antidotale*) را با هدف تولید علوفه، دانه یا روغن کشت کرد. در سطوح پایین شوری می‌توان از گیاهانی نظیر پسته (*Pistacia vera*) یا منداب (*Eruca sativa*) که تحمل نسبی به شوری دارند نیز استفاده کرد (Ranjbar *et al.*, 2018). کشت این گیاهان سازگار نیز به دلیل لزوم استفاده از ژنوتیپ‌های خاص که دارای سازگاری بالا با شرایط منطقه باشند و همچنین به دلیل وجود زه‌آب‌های بسیار شور، با محدودیت مواجه است. استفاده از روش‌هایی به‌زراعی مانند اصلاح روش کاشت، مبارزه با علف‌های هرز و سطوح بهینه کودهای شیمیایی نیز بسته به شرایط، تا حدودی می‌توانند به افزایش رشد و عملکرد گیاهان زراعی کمک کنند (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017).

یکی از راهکاری آسان، کم هزینه و زودبازده، استفاده ازتنظیم کننده‌های رشد برای بهبود تحمل و

افزایش تولید گیاهان زراعی در شرایط شور است (Ashraf *et al.*, 2010). در این مقاله اثر برخی از تنظیم‌کننده‌های رشد بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی در شرایط تنش شوری ارائه شده و سپس رهیافت‌های عملی برای استفاده از این ترکیبات مورد بررسی قرار گرفته است.

تنظیم کننده‌های رشد

به‌تازگی توجه به تنظیم کننده‌های رشد به عنوان یک روش کاربردی و سریع برای دست‌ورزی رشد گیاهان در شرایط تنش شوری افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین سازوکارهای احتمالی در فرآیند القای تحمل به شوری توسط تنظیم‌کننده‌های رشد، تاثیر آن‌ها بر تعادل هورمونی گیاه است. پنج دسته مهم از هورمون‌های گیاهی در گذشته شناسایی شده‌اند (جدول ۱) که به تدریج بر تعداد آن‌ها افزوده شده است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که تعادل هورمونی گیاه در شرایط تنش شوری به هم می‌خورد (Ashraf and Foolad, 2005; Hayat *et al.*, 2010). اثر منفی چنین تغییری، بیشتر به غلظت نسبی آن‌ها بستگی دارد تا به غلظت هر کدام از آن‌ها به تنهایی. کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد به‌طور شایان توجهی باعث ایجاد تعادل هورمونی در گیاهان در شرایط شور می‌شود (Ashraf *et al.*, 2010; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2013). استفاده سیستمی از تنظیم کننده‌های رشد از دهه ۱۹۳۰ میلادی آغاز شده و روز به روز بر اهمیت و مصرف آن‌ها افزوده می‌شود (Rademacher, 2015). میزان مصرف جهانی تنظیم کننده‌های رشد در سال ۲۰۰۳ میلادی نزدیک به ۱۶/۷ هزار تن ماده خالص بوده و در سال ۲۰۱۳ به ۴۲/۷ هزار تن ماده خالص افزایش یافته است و پیش بینی شده است که تا سال ۲۰۲۰ به بیش از ۵۵ هزار تن ماده مؤثر خواهد رسید (Moradi, 2016). آمار مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که ارزش بازار تنظیم کننده‌های رشد گیاهی حدود ۴/۲ میلیارد دلار و فروش سالانه آن‌ها حدود ۱/۲ میلیارد دلار بوده است (Rademacher, 2015). پیش‌بینی قیمت آتی این محصولات، ارزش آتی بازار را بیش از شش میلیارد دلار برآورد کرده است (Moradi, 2016).

در حدود ۴۰ ماده فعال وجود دارند که به صورت منفرد یا ترکیبی به عنوان تنظیم کننده رشد گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند(Rademacher, 2015). اکسین‌ها (Auxins; Aux)، سایتوکینین‌ها (Cytokinins; Cyt)، جیبرلین‌ها (Gibberellins; GAs)، اتیلن (Ethylene)، آبسیزیک اسید (Abscisic acid; ABA)، براسینواستروئیدها (Brassinosteroids; BRs)، سالیسیلیک‌اسید (Salicylic acid; SA)، کلرمکوات کلراید (Chlormequat chloride; CCC)، جاسمونیک اسید (Jasmonic acid; JA)، تریاکونتانول (Triacontanol)، آسکوربیک اسید (Ascorbic acid)، استریوگالاکتون‌ها (Strigolactones; SL)، نیتریک اکسید (Nitric oxide; NO) ، پلی‌آمین‌ها (Polyamines)

جدول ۱- دسته بندی هورمون‌های مهم گیاهی و اثر کلی آنها بر گیاهان

Table 1. Classification of the important plant hormones and their general effects on plants

		جوانه‌زنی Germination	فنولوژی Phenology	گلدهی Flowering	نمو Development	ریزش برگ و میوه Abscission	خواب بذر Seed dormancy
Gibberellins	جیبرلین‌ها	✓	✓	✓	✓	×	×
Auxins	اکسین‌ها	×	✓	✓	✓	✓	×
Cytokinins	سایتوکینین‌ها	✓	✓	✓	✓	×	×
Ethylene	اتیلن	×	×	✓	✓	✓	×
Abscisic acid	آبسیزیک اسید	✓	×	×	×	✓	✓

Bari and Jones, 2009; Rademacher, 2015; Sade *et al*., 2017

و هورمون‌های پپتیدی گیاهی (Peptide hormones)، تنظیم کننده‌های رشد شناخته‌شده‌ای هستند که باعث بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی می‌شوند. در ادامه این مقاله به معرفی اجمالی و مهم‌ترین اثرات این تنظیم کننده‌ها پرداخته شده است.

اکسین‌ها

اکسین‌ها اولین هورمون‌های گیاهی هستند که کشف شدند. از مهم‌ترین انواع اکسین‌ها ایندول استیک اسید (Indole acetic acid; IAA)، ایندول بوتیریک اسید (Indole butyric acid; IBA IBA)، نفتالن‌استیک اسید (Naphthalene acetic acid; NAA) و فنیل استیک اسید (Phenyl acetic acid; PAA) هستند (Bari and Jones, 2009). عمده‌ترین اثر اکسین‌ها تحریک رشد اولیه از طریق طویل شدن سلول و افزایش سرعت تقسیمات سلولی، تحریک غالبیت انتهایی به صورت رشد ناحیه نموی انتهایی گیاه و جلوگیری از رشد جوانه‌های جانبی و جهت‌دهی رشد اندام‌های گیاهی است (Moori *et al.*, 2012).

سایتوکینین‌ها

سایتوکینین‌ها گروهی از هورمون‌های گیاهی هستند که به طور ویژه در تحریک تقسیم سلولی گیاهان نقش مهمی را ایفا می‌کنند (Moori *et al.*, 2012). سایتوکینین‌هایی مانند زآتین (Zeatin)، بنزیل‌آمینوپورین (Benzyl aminopurine) و کاینتین (Kinetin) در فرآیندهایی نظیر بزرگ شدن سلول، اندام‌زایی و تمایز دخالت دارند. مهم‌ترین اثر سایتوکینین‌ها در گیاهان تحریک تقسیم سلولی در ریشه و ساقه، رشد ثانویه از طریق ضخیم شدن و کنترل شاخه دهی و همچنین تحریک رشد میوه می‌باشد (Bari and Jones, 2009).

جیبرلین‌ها

جیبرلین‌ها گروهی از هورمون‌ها هستند که عمدتا در برگ‌ها ، نوک ریشه و بذرهای در حال جوانه زنی ساخته می‌شوند و آزادانه در آوند آبکشی و چوبی انتقال می‌یابند. مهم‌ترین تاثیرات این دسته از هورمون‌ها شکستن خواب بذر و آغاز رشد ساقه از طریق طویل شدن سلول و تقسیم سلولی است (Bari and Jones, 2009). جیبرلیک اسید (GA_3) از شناخته شده‌ترین انواع این گروه هورمونی است (Peleg and Blumwald, 2011).

اتیلن

اتیلن که به نام هورمون پیری نیز شناخته می‌شود، یک هورمون گازی است که مانع از رشد ریشه و ساقه شده و پیری و ریزش برگ‌ها را تسریع کرده و نمو جوانه‌های جانبی را نیز به تأخیر می‌اندازد. اتیلن می‌تواند پس از خروج از گیاه، بر رشد و فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاهان مجاور نیز تأثیر بگذارد. مهم‌ترین نقش‌هایی که به اتیلن نسبت داده می‌شود، تحریک بلوغ و پیری، رسیدگی (در برخی از میوه‌ها)، ریزش برگ و مرگ گل‌ها می‌باشد (Davies, 2013).

آبسیزیک‌اسید

آبسیزیک اسید از مهم‌ترین بازدارنده‌های رشد گیاهی است و در فرآیندهای زیادی از جمله رکود بذر و جوانه و ریزش اندام‌های گیاهی نقش مهمی دارد. عوامل محیطی تنش‌زا مانند شوری، با افزایش آبسیزیک اسید و کاهش جیبرلین‌ها باعث القای خواب می‌شوند (Peleg and Blumwald, 2011). این هورمون به گونه‌ای فعال، در بازدارندگی رشد و نمو، تحریک مرگ برگ و خواب بذر، پاسخ گیاهان به تنش‌ها و کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها و تنظیم رطوبت نسبی گیاه نقش دارد (Davies, 2013).

براسینواستروئیدها

براسینواستروئیدها، نوعی از پلی‌هیدروکسی استروئیدها (Polyhydroxysteroids) بوده و تنها تنظیم‌کننده دارای ساختمان استروئیدی هستند (Ashraf *et al.*, 2010) که به عنوان ششمین دسته از هورمون‌ها هم معرفی شده‌اند. براسینولیدها (Brassinolid) اولین ترکیب از این گروه هورمونی

هستند که از گرده گیاه کلزا (*Brassica napus*) که توسط زنبورها جمع آوری شده بود استخراج شده و به همین دلیل واژه براسینو در ابتدای نام این گروه هورمونی قرار گرفت. اثرات متفاوتی از جمله تحریک طویل شدن و تقسیم سلولی، زمین گرایی، تحمل به تنش‌های محیطی و تمایز آوند چوبی، بازدارندگی رشد ریشه و ریزش برگ به براسینواستروئیدها نسبت داده شده‌اند (Bari and Jones, 2009).

سالیسیلیک اسید

سالیسیلیک اسید یکی از اسیدهای آلی است که کاربردهای وسیعی در داروسازی و صنعت دارد. سالیسیلیک اسید، سال‌ها به عنوان یک مولکول پیام‌رسان گیاهی شناخته می‌شد و بعدها نقش تنظیم کنندگی آن نیز مشخص شد. این تنظیم کننده در شرایط تنش شوری روی بسیاری از ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه اثر می‌گذارد (Peleg and Blumwald, 2011; Pirasteh-Anosheh and Emam, 2018b). نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که سالیسیلیک اسید با تاثیر بر ژن‌های گیاهی، طیف وسیعی از ویژگی‌ها مانند جوانه‌زنی بذر، رشد، عملکرد، اجزای عملکرد، فیزیولوژی و بیوشیمی گیاه را، به ویژه در شرایط تنش شوری، تحت تاثیر مثبت قرار می‌دهد (Ashraf *et al.*, 2010). نقش سالیسیلیک اسید در بهبود ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه مانند محتوای پروتئین‌های محلول، پرولین آزاد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان هورمون‌های گیاهی و در نتیجه افزایش عملکرد در شرایط تنش شوری در برخی از گیاهان زراعی مانند گندم و جو نشان داده شده است (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2017).

کلرمکوات کلراید

کلرمکوات کلراید (سایکوسل) یکی از مشتقات کولین است که از واکنش تری‌متیل آمین و یک آلیفاتیک هالید به نام ۱و۲- دی کلرو اتان تولید می‌شود. ماده تولید شده به شکل کریستال و قابل حل در آب بوده که از آن به عنوان کندکننده رشد گیاهی استفاده می‌شود (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2010). تاثیر تنظیم‌کنندگی رشد کلرمکوات کلراید نخستین بار در دهه ۱۹۶۰، در طیف وسیعی از گیاهان نشان داده شد و هدف اولیه از کاربرد آن افزایش تحمل به خوابیدگی بوته در گیاهان زراعی بود (Emam, 2011). نتایج پژوهش‌های بعدی نشان داد که کاربرد کلرمکوات کلراید حتی در شرایط عدم خوابیدگی هم باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2017). کلرمکوات کلراید با اختلال در ابتدای مسیر بیوسنتز جیبرلیک اسید مانع از فعالیت آنزیم انت کائورون سینتاز (Ent-kaurene synthase) شده (Adler and Wilcox, 1987) و باعث کاهش ارتفاع بوته می‌شود و به همین علت به عنوان تنظیم‌کننده ضد جیبرلینی نامیده می‌شود (Emam, 2011).

جاسمونیک اسید

جاسمونات‌ها از نظر بیوسنتزی، از لینولئیک اسید طی یک سری واکنش ساخته می‌شوند. این ترکیبات در بسیاری از گونه‌های گیاهی برای مقابله با تنش اسمزی وجود دارند (Saffari *et al.*, 2012; Vahabi *et al.*, 2016). جاسمونیک اسید با تغییر در بیوسنتز پروتئین، محتوای مالون دی‌آلدهید و فعالیت آنتی اکسیدان‌ها نقش حفاظتی در برابر تنش‌ها دارد (Yun-xia *et al.*, 2010). جاسمونیک اسید با تحریک تولید پروتئین‌های دفاعی ازگیاه در برابر تنش‌های شوری و خشکی محافظت می‌کند. بعلاوه جاسمونیک اسید بر جوانه زنی بذر، ذخیره پروتئین در بذر و رشد ریشه‌ها تاثیر می‌گذارد (Pakar *et al.*, 2016).

سدیم نیتروپراکساید

سدیم نیترو پراکساید با رها کردن نیتریک اکسید، نقش مهمی در تغییرات کمی و کیفی گیاهان زراعی دارد. نیتریک اکسید یک رادیکال گازی نسبتا پایدار

است که به عنوان مولکول پیام رسان در پاسخ های دفاعی و هورمونی گیاهان به تنش‌ها نقش دارد. جوانه زنی، گسترش ریشه، باز و بسته شدن روزنه‌ها، تثبیت نیتروژن و مرگ سلولی می‌توانند تحت تاثیر نیتریک اکسید واقع شوند. این ترکیب کارکردهای اندامک‌های سلولی گیاهان مانند سنتز ATP در کلروپلاست و میتوکندری را نیز تنظیم می‌کند (Delledonne *et al.*, 1998). سدیم پراکساید با جلوگیری از تخریب کلروفیل و پروتئین‌های محلول، به ویژه روبیسکو، پیری را در شاخه‌های جدا شده به تعویق می‌اندازد. نیتریک اکسید رها شده از سدیم نیترو پراکساید در کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها نقش دارد (Mata and Lamattina, 2001). یکی دیگر از کارکردهای سدیم نیترو پراکساید تحریک سیستم آنتی اکسیدانی گیاه برای مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش خسارت اکسیداتیو از طریق نیتریک اکسید است (Nasibi *et al.*, 2009).

سایر تنظیم کننده‌های رشدگیاهی

مالیک هیدرازاید (Maleic hydrazide) یکی از تنظیم کننده‌های رشد گیاهی است که از مدت‌ها قبل از آن برای جلوگیری یا تأخیر درجوانه‌زنی سیب‌زمینی و پیاز استفاده می‌شد. این ترکیب در دهه‌های ۴۰ و ۵۰ میلادی برای تأخیر در رشد چمن در زمین‌های گلف، منازل مسکونی و حاشیه بزر گراه‌ها در سطح وسیع مورد استفاده قرار می‌گرفت (Moradi, 2016). پلی‌آمین‌ها مانند پوترسین (Putrescine)، اسپرمیدین (Spermidine) و اسپرمین (Spermine) نیز که به تازگی نقش تنظیم کنندگی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته، مولکول‌هایی با وزن مولکولی پایین هستند. این مواد از طریق تاثیر بر پایداری غشای سلول‌ها و تقسیم میتوز و میوز، برای رشد و نمو گیاه ضروری هستند (Iqbal and Ashraf, 2005b; Ashraf and Foolad, 2005). هورمون‌های پپتیدی در پیام رسانی سلولی مطرح بوده و نقش مهمی در رشد و نمو گیاه از طریق کنترل گسترش و تقسیم سلولی و همچنین سازوکارهای دفاعی و خودناسازگاری گرده ایفا می‌کنند (Bari and Jones, 2009). تریاکونتانول (Triacontanol) یک الکل چرب است که به عنوان یک تحریک کننده رشد، به ویژه در تولید پاجوش‌های جدید در خانواده گل‌سرخیان نیز عمل می‌کند. این ماده در یونجه، موم زنبور عسل و برخی از کوتیکول‌های برگ‌های موم‌دار کشف شده است (Bari and Jones, 2009). استریوگالاکتون‌ها نیز در شاخه دهی و رشد گیاهان نقش دارند و سنتز آن‌ها توسط هورمون آبسیزیک اسید تنظیم می‌شود (Peleg and Blumwald, 2011).

پیش‌تیمار (پرایمینگ) بذر با تنظیم‌کننده‌های رشد

پیش‌تیمار یا پرایمینگ (Priming) روشی است که در آن بذر به مدت معینی درون یک محلول با پتانسیل مشخص قرار داده می‌شود. پتانسیل محلول به اندازه‌ای کم است که از جوانه‌زنی بذر جلوگیری می‌شود، لیکن، به اندازه‌ای است که فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی پیش جوانه زنی در بذر آغاز می‌شود (Bradford, 1986). در بذر غلات و برخی دیگر از گیاهان زراعی، تولید آنزیم آلفا آمیلاز در لایه آلورون توسط هورمون‌های جیبرلین و آبسیزیک اسید کنترل می‌شود (Sun and Gubler, 2004). سالیسیلیک اسید اثری مشابه اثر آبسیزیک اسید دارد و بازدارنده جیبرلین است، بنابراین، ممکن است در بعضی غلظت‌ها باعث کاهش جوانه‌زنی بذر شود. این کاهش ممکن است ناشی از مهار بیوسنتز اتیلن باشد، زیرا مشخص شده است که سالیسیلیک اسید نقش مهارکنندگی در بیوسنتز اتیلن دارد و این اثر را از طریق تأثیر بر آنزیم Aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase اعمال می‌نماید (Jafar *et al.*, 2012). پیش‌تیمار گیاه با تنظیم کننده‌های رشد، باعث افزایش میزان تقسیم سلولی مریستم راسی ریشه‌های اولیه و افزایش رشد طولی ریشه شده و در ضمن از اکسیداسیون اکسین

جلوگیری می‌کند (Fariduddin *et al.*, 2018).

پژوهش‌های متعددی در مورد تأثیر کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد به صورت پیش‌تیمار در جوانه‌زنی، رشد و عملکرد گیاهان در شرایط تنش شوری انجام شده است (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2011; Hashemi *et al.*, 2012; Jafar *et al.*, 2012; Hashemi *et al.*, 2015; Delaviz *et al.*, 2016; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016b; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016c; Pirasteh-Anosheh and Emam, 2017; Hashemi *et al.*, 2018a; Hashemi *et al.*, 2018c; Ranjbar *et al.*, 2019). فهرست مفصلی از پژوهش‌های انجام شده در مورد ازدیاد سرعت جوانه زنی بذر، رشد بهتر گیاهچه و در نتیجه افزایش عملکرد گیاهان زراعی در هر دو شرایط شور و غیرشور در بذرهای پیش تیمار شده با تنظیم کننده‌های رشد وجود دارد (Ashraf *et al.*, 2010; Hayat *et al.*, 2010; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014a; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016c; Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017). در ادامه چند مورد از پژوهش‌های انجام گرفته پیرامون پیش تیمار بذر با تنظیم کننده‌های رشد، با هدف بهبود رشد گیاهان زراعی، ارائه شده است.

جعفر و همکاران (Jafar *et al.*, 2012) اثر سه نوع پیش تیمار هورمونی (سالیسیلیک‌اسید، کاینتین و آسکوربیک اسید با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) را بر طیف وسیعی از صفات کمی و کیفی دو رقم گندم در شرایط شور مورد ارزیابی قرار دادند. پیش تیمار بذرهای گندم با آسکوربیک اسید بیشتر از دو هورمون دیگر باعث بهبود رشد، عملکرد و کیفیت هر دو رقم گندم در شرایط شور گردید. نتایج آزمایش افضل و همکاران (Afzal *et al.*, 2006) نیز نشان داد که اغلب تیمارهای هورمونی مورد استفاده (آبسیزیک اسید، سالیسیلیک‌اسید و آسکوربیک اسید)، باعث بهبود جوانه زنی بذور گندم در شرایط شور شدند. تیمار بذرهای گندم با محلول ۵۰ میلی‌گرم در لیتر آسکوربیک اسید و سالیسیلیک‌اسید نه‌تنها باعث افزایش جوانه زنی شد، بلکه زمان جوانه زنی را در شرایط شور نیز کاهش داد. تیمارهای فوق همچنین باعث رشد بیش‌تر طولی گیاهچه و وزن زیادتر آن در مقایسه با بذور تیمار نشده در شرایط شور شدند.

اقبال و اشرف (Iqbal and Ashraf, 2005a) در آزمایشی اثر پیش تیمار بذر گندم با هورمون‌های بنزیل آمینوپورین و کاینتین جهت افزایش تحمل به شوری، رشد، عملکرد و تغییرات بیوشیمیایی درون بذر را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش تیمار بذرها با کاینتین بیش‌ترین تأثیر را بر بهبود رشد و عملکرد دانه گندم داشت. آنها نتیجه‌گیری کردند که غلظت‌های متوسط کاینتین اثر معنی‌داری بر بهبود عملکرد دانه گندم در شرایط شور داشت، هر چند سازوکاری که در اثر آن تحمل به شوری گیاه با مصرف کاینتین افزایش می‌یابد، مشخص نشده است.

پیش‌تیمار بذر با سالیسیلیک‌اسید به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنظیم کننده‌های رشد برای شرایط تنش شوری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2015) نشان دادند که پیش تیمار بذر با سالیسیلیک اسید با غلظت ۱/۵ میلی مولار، باعث افزایش تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در جو گردید. ارتفاع بوته، سطح برگ و وزن خشک در طول فصل رشد نیز تحت اثر مثبت پیش تیمار سالیسیلیک اسید قرار گرفت. در پژوهش دیگری (Hashemi *et al.*, 2018a) نشان داده شد که پیش تیمار بذر جو با سالیسیلیک اسید بخشی از افزایش غلظت سدیم ریشه و شاخساره و فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، کاتالاز، آسکوربیک پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز و کاهش غلظت پتاسیم ریشه و شاخساره در اثر تنش شوری را جبران کرد. هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2018c) طی آزمایش دیگری گزارش کردند که پیش‌تیمار سالیسیلیک اسید، فنولوژی گیاه

جو را نیز تحت تاثیر قرار داد، به نحوی که فاصله زمانی کاشت تا مرحله غلاف رفتن (آبستنی)، کاشت تا گلدهی و کاشت تا رسیدگی را در هر دو شرایط شور و غیر شور افزایش داد.

نتایج آزمایش صفاری و همکاران (Saffari *et al.*, 2012) در کلزا نشان داد که پیش‌تیمار با متیل‌جاسمونات و سالیسیلیک‌اسید باعث بهبود جوانه‌زنی، افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه شده و افزایش میزان کلروفیل و بقای گیاهچه‌های کلزا شد. پیراسته انوشه و همکاران (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014b) با ارزیابی تأثیر پیش تیمار بذر با غلظت‌های متفاوت کلرمکوات کلراید بر جوانه‌زنی بذر، رشد و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی شش گیاه زراعی گندم، جو، ذرت، آفتابگردان، کلزا و گلرنگ در شرایط تنش اسمزی گزارش دادند که غلظت بهینه از کلرمکوات کلراید بخش قابل‌توجهی از اثرات منفی تنش بر جوانه زنی بذر، رشد گیاه، محتوای پرولین آزاد و شاخص کلروفیل را تعدیل کرد. در شرایط تنش شوری متوسط، پیش تیمار با کلرمکوات کلراید تأثیر مثبت بیشتری داشت. افزایش غلظت پیش تیمار با کلرمکوات کلراید (از ۲ به ۴ گرم ماده مؤثره در لیتر) با افزایش تأثیر مثبت آن همراه بود، با این حال تفاوت عمده‌ای بین پاسخ گیاهان زراعی به پیش تیمار مشاهده شد، به طوری که بیشترین و کمترین پاسخ به ترتیب مربوط به کلزا و آفتابگردان بود. هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2012) نیز گزارش دادند که پیش‌تیمار سایکوسل باعث بهبود جوانه‌زنی و افزایش رشد گیاهچه گلرنگ در شرایط تنش اسمزی گردید، که در تیمارهای بدون تنش و تنش ملایم، غلظت ۳/۵ گرم در لیتر و در تنش‌های متوسط غلظت ۲/۵ گرم در لیتر مناسب‌ترین تیمارها بودند.

علاوه بر گیاهان زراعی، گیاهان شورزی که دارای تحمل بالایی به شوری نیز هستند، نسبت به پیش تیمار با تنظیم کننده‌های رشد پاسخ مثبت می‌دهند (Ranjbar *et al.*, 2019). اگرچه علی‌رغم آنچه تصور می‌شود، گیاهان شورزی تحمل بسیار بالایی به شوری دارند، ولی این گیاهان در مرحله جوانه‌زنی، نسبت به تنش شوری حساس بوده و جوانه زنی مطلوب بذر آنها در شوری‌های بسیار پایین صورت می‌گیرد (Ranjbar *et al.*, 2019). نتایج پژوهش اونگار (Ungar, 1977) نشان داد که غلظت ۱۰ میلی مولار جیبرلیک اسید باعث افزایش میزان جوانه زنی بذرهای سالیکورنیا از ۵ درصد در تیمار شاهد تا ۴۲ درصد گردید. خان و وبر (Khan and Weber, 1986) نیز گزارش دادند که جوانه‌زنی در سالیکورنیا از ۵۵ درصد در تیمار ۲ درصد کلرید سدیم تا ۷۵ درصد در تیمار جیبرلیک اسید افزایش یافت، تیمار جیبرلیک اسید با غلظت یک میلی مولار نتایج رضایت بخش‌تری نسبت به غلظت ۰/۱ میلی مولار داشت. نجفی و همکاران (Nadjafi *et al.*, 2006) نیز نشان دادند که تیمار جیبرلیک اسید اثر معنی‌داری بر درصد و سرعت جوانه زنی بذر دو گونه باریجه (*Ferula gummosa*) و مریم نخودی (*Teucrium polium*) داشت. رنجبر و همکاران (Ranjbar *et al.*, 2019) گزارش کردند که پیش‌تیمارهای نیترات پتاسیم، کلرید سدیم، کلرید کلسیم و جیبرلیک‌اسید جوانه‌زنی بذور سالیکورنیا را افزایش می‌دهند و بیشترین تاثیر مربوط به غلظت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر جیبرلیک‌اسید بود. نتیاج این پژوهش نشان داد که پیش‌تیمار جیبرلیک اسید باعث افزایش آستانه تحمل به شوری سالیکورنیا در مرحله جوانه‌زنی می‌گردد؛ به طوری که در شرایط بدون پیش‌تیمار و پیش‌تیمار بذر سالیکورنیا با غلظت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم درلیتر، آستانه تحمل به شوری به ترتیب برابر با ۴/۱۵، ۹/۳۱ و ۶/۵۶ دسی زیمنس برمتر و آستانه کاهش ۵۰ درصد جوانه‌زنی ۲۰/۳۶، ۳۵/۹۷ و ۳۱/۳۹ دسی زیمنس بر متر بود.

اثر مثبت پیش تیمار بذر با سایر هورمون‌ها نیز بر جوانه زنی، رشد و عملکرد گندم در شرایط شور

گزارش شده است. در همین ارتباط اقبال و اشرف (Iqbal and Ashraf, 2005a) اثر مثبت کاینتین و اقبال و اشرف (Iqbal and Ashraf, 2010) اثر مثبت سه پلی‌آمین شامل اسپرمین، اسپرمیدین و پوترسین بر تحمل به شوری بوته‌های گندم را گزارش دادند.

محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد

علاوه بر روش پیش تیمار بذر، از محلول‌پاشی شاخساره‌ای برخی از تنظیم‌کننده‌های رشد نیز می‌توان با هدف افزایش رشد و عملکرد گندم در شرایط تنش شوری استفاده کرد. با وجود تفاوت‌های قابل توجه در سازوکار تاثیر تنظیم کننده‌های رشد، اغلب آن‌ها در غلظت‌های بهینه موجب رفع آسیب اکسایشی در شرایط تنش می‌شوند. اندازه‌گیری میزان پراکسیداسیون لیپیدها و قندهای احیا کننده در شرایط غیر شور و شور، نشان دهنده کاهش خسارات اکسیداتیو است (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2018b). مصرف خارجی تنظیم کننده‌های رشد بر سرعت تولید انواع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS; Reactive Oxygen Species) در شرایط شور تاثیرگذار است و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را تحریک کرده و از این طریق تحمل گیاه به شوری را بهبود می‌دهند (Ryu and Cho, 2015). افزایش میزان پروتئین‌ها، رنگیزه‌های فتوسنتزی و قندها نیز نشان دهنده نقش تنظیم کننده‌های رشد در افزایش تحمل گیاه در برابر تنش شوری می‌باشند (Sade *et al*., 2017). مهم‌ترین ساز و کارهای تاثیر هریک از تنظیم کننده‌های رشد در ادامه بحث شده است.

در محلول‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد، زمان مناسب برای مصرف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. هگازی و همکاران (Hegazi *et al*., 1995) گزارش کردند که عملکرد و اجزای عملکرد گندم در محلول پاشی با ایندول استیک اسید در شرایط شور افزایش می‌یابد. موری و همکاران (Moori *et al*., 2012) نیز گزارش کردند که محلول پاشی ایندول استیک اسید با غلظت‌های ۱۷۰ و ۳۴۰ میکرومولار تاثیری بر عملکرد گندم رقم یاواروس نداشت، در حالی که باعث افزایش عملکرد رقم شیراز در شرایط بدون تنش خشکی شد. بعلاوه، مشخص شده است که مصرف شاخساره‌ای جیبرلیک اسید باعث کاهش اثرات سوء تنش شوری از طریق ارتقای ظرفیت فتوسنتزی و رشد رویشی گندم می‌شود (Ashraf *et al*., 2002).

استفاده از کاینتین نیز به عنوان یکی از سایتوکینین‌های سنتزی، به دلیل نقش فعال آن در تحریک طویل شدن و تقسیم سلولی، به‌طور وسیعی در پژوهش‌ها مورد توجه قرارگرفته است. گزارش شده است که محلول‌پاشی شاخساره‌ای کاینتین روی بوته‌های گندم می‌تواند اثرات زیان آور شوری را از راه کاهش جذب یون‌های زیان‌آور سدیم و کلسیم و افزایش جذب یون پتاسیم تعدیل کند (Gadallah, 1999). محلول پاشی بنزیل‌آمینوپورین (BAP) (از خانواده سایتوکینین‌ها) با غلظت‌های ۵۰ و ۷۰ میکرومولار باعث افزایش عملکرد دانه گندم شد و با افزایش غلظت، اثر مثبت آن در شرایط عدم تنش بیشتر شد (Moori *et al*., 2012).

براسینواستروئیدها نیز از ترکیباتی هستند که به منظور افزایش تحمل به شوری در گیاهان زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که مصرف براسینواستروئیدها باعث افزایش فعالیت آنزیم آلفاآمیلاز و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز و کاتالاز و افزایش محتوای قند و پروتئین‌های محلول در بذرهای در حال جوانه‌زنی در شرایط شور می‌شوند. به‌علاوه، افزایش زیست توده، سطح برگ، سرعت فتوسنتز، کارایی فتوسیستم دو و افزایش رشد شاخساره و ریشه و افزایش تحمل به شوری در گندم نیز به براسینواستروئیدها نسبت داده شده است (Shahbaz and Ashraf, 2007; Shahbaz *et al*., 2008).

سالیسیلیک‌اسید یکی دیگر از هورمون‌های مهم گیاهی است که مصرف آن در شرایط شور با هدف بهبود عملکرد، در آزمایش‌های زیادی مورد توجه قرار گرفته است. محلول‌پاشی شاخساره‌ای سالیسیلیک‌اسید به‌طور قابل‌توجهی اثرات منفی کلرید سدیم در غلاتی مانند گندم و جو را کاهش داده و به افزایش قابل توجه عملکرد و اجزای عملکرد آنها منجر می‌شود (Ashraf *et al.*, 2010; Hayat *et al.*, 2010; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014a; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016c; Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017). در آزمایش‌هایی که در مورد محلول‌پاشی بوته‌های گندم با سالیسیلیک‌اسید در شرایط شوری انجام شده، دلایل متفاوتی برای القای تحمل به شوری ارائه شده است. به‌طورکلی افزایش توان بازیابی، تحریک تجمع پرولین، آبسیزیک اسید، اکسین و سایتوکینین، افزایش جذب و انتقال پتاسیم و کلسیم، کاهش جذب و انتقال سدیم و کلر و افزایش سرعت فتوسنتز از دلایل القای تحمل به شوری بدنبال مصرف سالیسیلیک‌اسید گزارش شده‌اند (Shakirova, 2007; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014c; Pirasteh-Anosheh and Emam, 2017; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2017). به‌علاوه، گزارش شده است که نقش سالیسیلیک اسید در کاهش خسارت اکسیداتیو ایجاد شده در اثر تنش شوری از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی (پراکسیداز، سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون رودوکتاز و آسوربیک پراکسیداز) از اهمیت شایان توجهی برخوردار است (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2018b). پیراسته انوشه و همکاران (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016c) با اندازه‌گیری غلظت یون‌های سدیم، پتاسیم، کلر، کلسیم و منیزیم در ریشه و شاخساره جو گزارش دادند که تحمل به شوری القاشده توسط سالیسیلیک اسید بیشتر در اثر تغییر تجمع یون‌ها در ریشه و شاخساره است تا غلظت آن‌ها، اگرچه غلظت یون‌ها، به ویژه سدیم، پتاسیم و کلر نیز اثر معنی‌داری داشتند. در دو آزمایش که تقریبا به طور همزمان و با شرایط یکسان با استفاده از سه تنظیم کننده رشد سالیسیلیک اسید، جاسمونیک اسید و کلرمکوات کلراید انجام شد، مشاهده شد که سالیسیلیک اسید در شرایط شور تاثیر بیشتری داشت، در حالی که تاثیر کلرمکوات کلراید بیشتر در شرایط تنش خشکی مشهود بود (Pakar *et al.*, 2016; Vahabi *et al.*, 2016). روند پر شدن دانه نیز به طور مثبت و معنی‌داری تحت تاثیر مصرف سالیسیلیک اسید قرار گرفت (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2018). کلرمکوات کلراید از پر مصرف‌ترین کندکننده‌های رشد، به ویژه در اروپا، است که به منظور جلوگیری از خوابیدگی بوته و کنترل رشد رویشی غلات به فراوانی مصرف می‌شود (Emam, 2011). نتایج یک آزمایش نشان داد که در دو آزمایش مزرعه‌ای و گلخانه‌ای، مصرف کلرمکوات کلراید با افزایش عملکرد و اجزای عملکرد، باعث بهبود تحمل به تنش در گندم شد. در شرایط مزرعه با افزایش غلظت کلرمکوات کلراید تا پنج گرم در لیتر، اثر مثبت آن بیشتر شد. با این وجود تاثیر کلرمکوات کلراید در شرایط بدون تنش و تنش ملایم بارزتر بود (Rokhafrooz *et al.*, 2016). بعلاوه افزایش رشد و صفات مورفوفیزیولوژیک (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2012a)، عملکرد و اجزای عملکرد (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2012b)، محتوای پرولین آزاد، پروتئین‌های محلول و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2012) با مصرف کلرمکوات کلراید در گندم در شرایط بدون تنش و تنش گزارش شده است. گزارش‌های مشابهی مبنی بر افزایش رشد (Bahrami *et al.*, 2014a)، عملکرد و اجزای عملکرد (Bahrami *et al.*, 2014b; Pakar *et al.*, 2016) در ارقام جو و کلزا (Emadi and Pirasteh-Anosheh, 2019) در تیمارهای محلول‌پاشی با کلرمکوات کلراید

وجود دارد. گزارش شده است که اگرچه مصرف کلرمکوات کلراید باعث کاهش ارتفاع بوته‌های جو در مراحل پیش از گلدهی شد، ولی ارتفاع بوته‌ها از گلدهی به بعد تفاوت معنی‌داری با بوته‌های شاهد نداشت (Shekoofa and Emam, 2008; Bahrami *et al.*, 2014a). افزایش طول ساقه در فاصله آبستنی تا گلدهی به افزایش تجمع پیش‌سازهای جیبرلین در انتهای دوره پنجه‌زنی نسبت داده شده است. بدین ترتیب از مرحله آبستنی به بعد که اثر بازدارندگی کلرمکوات کلراید کاهش می‌یابد، سنتز جیبرلین با استفاده از مقدار زیادی پیش‌ساز که بلافاصله پس از مصرف کلرمکوات کلراید تجمع می‌یابد، از سر گرفته شده و همین موضوع باعث طویل شدن سریع ساقه در این مرحله می‌گردد (Rajala and Peltonen-Sainio, 2001; Akinrinde, 2006).

پوشش‌دار کردن بذر با تنظیم کننده‌های رشد

به‌تازه‌گی روش دیگری برای استفاده از تنظیم کننده‌های رشد ابداع شده است. این روش که نسبت به روش‌های پیشین (پیش‌تیمار، محلول‌پاشی و استفاده در محیط کشت) جدیدتر محسوب می‌شود، پوشش‌دار کردن بذر با تنظیم کننده‌های رشد است. پوشش‌دار کردن بذر، با اهداف مختلفی مانند افزایش سرعت و میزان جوانه‌زنی یا ایجاد تأخیر در جوانه‌زنی، افزایش سرعت و توان استقرار گیاهچه، جلوگیری از زیان آفات و بیماری‌ها یا خورده شدن بذر توسط حشرات و جوندگان، حفظ رطوبت در اطراف بذر با استفاده از مواد جاذب رطوبت، افزایش عملکرد و بهبود تحمل به تنش انجام می‌گیرد (Mahdavi, 2014).

نتایج یک پژوهش (Dong *et al.*, 2019) نشان داد که پوشش‌دار کردن بذر بادام زمینی با سالیسیلیک‌اسید به‌صورت تولید ذرات کندرها (Slow release particles) باعث افزایش کمیت و کیفیت محصول شد. این روش مصرف باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های مختلف از جمله آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و آنزیم‌های H^+ ATPase و Fe^{3+} Chelate Reductase در گیاه شد. مهدوی (Mahdavi, 2014) نیز گزارش داد که نتایج پوشش‌دار کردن و حبه‌دار کردن بذر با جیبرلیک‌اسید، سالیسیلیک‌اسید و اتیلن اثر معنی‌داری بر بهبود ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاه در آزمایشگاه و گلخانه داشت. به‌طورکلی بذرهای پوشش‌دار شده با این مواد، به‌ویژه جیبرلیک‌اسید و اتیلن در مقایسه با بذرهای حبه‌دار شده، مناسب‌تر بود. نتایج آزمایش دیگری (Suo *et al.*, 2017) نشان داد که پوشش‌دار کردن بذر ذرت شیرین با تنظیم کننده‌های رشد 6-BA (6-benzylaminopurine)، نفتالن‌استیک اسید، براسینولید و جیرلیک‌اسید باعث بهبود قدرت رویش (ویگور) و جوانه زنی بذر و ظرفیت آنتی اکسیدانی گیاه گردید. اثر تیمارهای ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر جیرلیک‌اسید و ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم 6-BA بیشتر بود. در پژوهش‌های دیگری نیز پوشش‌دار کردن بذر با سالیسیلیک اسید و پاکلوبوترازول اثر مثبتی بر جوانه‌زنی و رشد گیاه ذرت داشت (Lan *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2013). علی‌رغم اینکه پوشش‌دار کردن بذر با موادآلی یا معدنی (به ویژه در گیاهان مرتعی) به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته، لیکن استفاده از تنظیم کننده‌های رشد برای پوشش دار کردن بذر بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بهبود توان بازیابی گیاه با استفاده از تنظیم کننده‌های رشد

یکی از رهیافت‌های مناسب در استفاده از تنظیم کننده‌های رشد که کمتر مورد توجه قرار گرفته است، تقویت توان بازیابی گیاهان در شرایط تنش است. توان بازیابی بالا در شرایط تنش شوری می‌تواند به بقای گیاه و استفاده پایدار از منابع آب شور کمک کند. یکی از راهکارهای مدیریت آب شور در مزرعه، استفاده دوره‌ای از آب شیرین و شور است. در این شرایط گیاهی که توان ذاتا بازیابی بالا داشته و یا با مصرف تنظیم کننده‌های رشد توان بازیابی آن بهبود یافته باشد، بهتر می‌تواند زنده مانده و رشد کند. بعلاوه در شرایطی

که از آب مازاد برای تولید محصول استفاده می‌شود و در فصولی که تراکم عملیات زراعی بالاست، به دلیل کاهش حجم آب مصرفی برای هر گیاه، شوری آب افزایش می‌یابد، ولی در زمان‌های دیگر که آب شیرین در دسترس می باشد، توان بازیابی گیاهان بهبود یافته و این موضوع می‌تواند به پایداری تولید کمک شایانی کند (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014c; Delaviz *et al.*, 2016; Hashemi *et al.*, 2018b).

علی‌رغم اهمیت موضوع بازیابی به کمک تنظیم کننده‌های رشد، در پژوهش‌های اندکی به آن پرداخته شده است. پیراسته انوشه و همکاران (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014c) گزارش دادند که بازیابی گیاه با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید باعث بهبود تجمع ماده خشک ساقه و ریشه، افزایش محتوای پرولین، کلروفیل و فتوسنتز گیاه جو شد. نتایج این آزمایش نشان داد که اگرچه در هیچیک از تیمارهای شوری (۳، ۶، ۹ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر)، بازیابی نتوانست تغییرات ایجاد شده ناشی از تنش را جبران کند، ولی تیمارهای سالیسیلیک اسید باعث جبران بخش زیادی از این تغییرات منفی گردید.

هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2018b) با مقایسه اثر محلول پاشی و پیش تیمار سالیسیلیک اسید بر توان بازیابی دو رقم جو گزارش دادند که بوته‌های بازیابی شده با محلول پاشی، وضعیت بهتری از نظر شاخص کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، غلظت کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئیدها داشته و میزان رشد آنها بیشتر بود. آنها نتیجه گیری کردند که جو رقم افضل نسبت به رقم ریحان توان بازیابی بیشتری داشته و واکنش بهتری به سالیسیلیک اسید نشان داد. دلاویز و همکاران (Delaviz *et al.*, 2016) نیز نشان دادند که بذرهای پیش تیمار شده (هیدروپرایمینگ) اسپرس (*Onobrychis sativa*) توان بازیابی بهتری داشتند. پیش‌تیمار بذرهای با غلاف و بدون غلاف به ترتیب تا اسیدیته ۷/۹ و ۸/۹ بخشی از اثرات منفی تنش قلیایی بازیابی شد؛ ولی با تشدید قلیاییت، توان بازیابی مشاهده نشد.

جنبه‌های کاربردی استفاده از تنظیم کننده‌های رشد

غلظت بهینه

غلظت محلول پاشی تنظیم کننده‌های رشد بسیار مهم است، به طوری که غلظت‌های زیادتر نه تنها اثر مثبتی ندارد، بلکه ممکن است باعث کاهش رشد و عملکرد هم بشود (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2018a). گزارش‌های مستندی در مورد اثر منفی غلظت‌های بالای سالیسیلیک‌اسید، براسینواستروئیدها یا اکسین‌ها وجود دارد (Ashraf *et al.*, 2010; Hayat *et al.*, 2010). سالیسیلیک‌اسید و اکسین در غلظت‌های بالا خاصیت علف‌کشی دارند، این دو ماده به‌ترتیب از خانواده‌های بنزویک اسید و فنوکسی استیک اسیدها هستند که از خانواده‌های شیمیایی مهم علف‌کش‌ها محسوب می‌شوند. در شرایط شور لازم است از تنظیم کننده‌ها در غلظت‌های کمتر استفاده شوند. نتایج یک آزمایش نشان داد که غلظت‌های ۱/۰ تا ۱/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید بیشترین اثر تعدیل‌کنندگی را داشته درحالی‌که غلظت دو میلی‌مولار در شرایط شور بر رشد و عملکرد دانه جو اثر منفی داشت (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2015). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که غلظت‌های بیشتر از ۱/۰۵ و ۰/۷۰ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید به ترتیب در شرایط غیرشور و شور بر عملکرد جو اثر منفی داشتند (Ranjbar *et al.*, 2017). غلظت‌های پایین‌تر تنظیم کننده‌های رشد به دلیل تحریک فعالیت‌های آنتی اکسیدانی، نقش تعدیل کنندگی اثرات تنش شوری را دارند، لیکن در غلظت‌های بالا، ممکن است خود به‌عنوان آنتی اکسیدان غیرآنزیمی عمل کرده و با آنزیم‌های آنتی اکسیدانی تداخل ایجاد کنند (Ashraf *et al.*, 2010; Hayat *et al.*, 2010; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016a). غلظت‌های مختلف سایر

جدول ۲- دامنه غلظت‌های مورد استفاده برای تنظیم کننده‌های رشد گیاهی

Table 2. Ranges of application concentration of plant growth regulators

PGR	تنظیم کننده رشد	دامنه غلظت Concentration range (µM)	PGR	تنظیم کننده رشد	دامنه غلظت Concentration range (µM)
Abscisic acid	آبسیزیک اسید	1300-2300	Indole acetic acid	ایندول استیک اسید	150-300
Brassinosteroids	براسینواستروئید	0.02-0.08	Indole butyric acid	ایندول بوتیریک اسید	150-300
Salicylic acid	سالیسیلیک اسید	1000-2000	Naphthalene acetic acid	نفتالن‌استیک اسید	150-300
Chlormequat chloride	کلرمکوات کلراید	15000-25000	Phenyl acetic acid	فنیل استیک اسید	200-350
Jasmonic acid	جاسمونیک اسید	100-500	Kinetin	کاینتین	50-500
Nitric oxide	نیتریک اکساید	100-300	Zeatin	زآتین	50-250
Strigolactones	استریوگالاکتون	1-10	Benzyl aminopurine	بنزیل‌آمینوپورین	50-150
Triacontanol	تریاکونتانول	10-20	Gibberellic acid	جیبرلیک اسید	1-3
			Ascorbic acid	آسکوربیک اسید	50-500

اعداد ارائه شده در این جدول دامنه غلظت‌های مورد استفاده برای تنظیم کننده‌های رشد هستند که در پژوهش‌های مختلف اثر مثبتی نشان داده‌اند و لزوما به معنی غلظت بهینه قطعی نمی‌باشند

The presented numbers in table are the range of PGRs concentrations that showed positive effects in different experiments and are not necessarily the optimum concentrations

تنظیم کننده‌های رشد مانند کلرمکوات کلراید (Bahrami *et al.*, 2014a; Rokhafrooz *et al.*, 2016)، جاسمونیک اسید (Pakar *et al.*, 2014; Vahabi *et al.*, 2016)، اکسین و سایتوکنین (Moori *et al.*, 2012) نیز اثرات متفاوتی دارند، بنابراین برای هر تنظیم کننده باید غلظت بهینه آن مشخص شده و مورد استفاده قرار گیرد. ژنوتیپ‌های مختلف هر گیاه نیز پاسخ‌های متفاوتی به تنظیم کننده‌های رشد دارند (Bahrami *et al.*, 2014b). به عنوان مثال، ارقام پابلند گندم و جو پاسخ بهتری به تنظیم کننده‌های کندکننده رشد نشان دادند (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2012a; Bahrami *et al.*, 2014a). دامنه غلظت‌های مورد استفاده برای هر تنظیم کننده رشد در جدول ۲ آورده شده است. هرچند این مقادیر غلظت بهینه قطعی نبوده و لازم است برای هر گیاه، ژنوتیپ، شرایط و ... بهینه سازی لازم انجام شود.

روش و زمان مصرف

تنظیم کننده‌های رشد به روش‌های مختلفی به‌کار برده می‌شوند. پیش تیمار بذر با هدف بهبود جوانه‌زنی، استقرار و رشد گیاهچه، استفاده در محلول غذایی در کشت هیدروپونیک و محلول‌پاشی شاخساره‌ای، با هدف بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی در شرایط شوری از روش‌های مصرف تنظیم کننده‌های رشد هستند. اشرف و همکاران (Ashraf *et al.*, 2010) در مورد روش استفاده از تنظیم کننده‌های رشد برای بهبود تحمل گیاه به شوری، استفاده از هر سه روش محلول‌پاشی، پیش‌تیمار بذر و محلول غذایی در محیط ریشه را امکان پذیر دانسته‌اند. به نظر ایشان، پیش تیمار بذر و محلول پاشی اثر بارزتری دارند. هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2018a; 2018b) نیز با ارزیابی زمان محلول پاشی بیان داشتند که پیش تیمار و محلول پاشی در مرحله استقرار بوته، تحمل به شوری بیشتری را در گیاه جو به دنبال دارد.

بر اساس نتایج یک آزمایش (Dong *et al.*, 2019)، از بین پنج روش استفاده از سالیسیلیک‌اسید شامل؛ اختلاط با خاک، ذرات کندرها (slow release particles)، پیش‌تیمار بذر، توام با آب آبیاری و محلول‌پاشی روی گیاه بادام زمینی، استفاده از روش ذرات کندرها، باعث افزایش ویژگی‌های رشد، عملکرد و کیفیت محصول شد. بعلاوه سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های H^+ ATPase، Fe^{3+} Chelate Reductase و محتوای آهن گیاه و کاهش اسیدیته خاک شد. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز نیز در اثر مصرف سالیسیلیک‌اسید افزایش یافتند. این پژوهشگران گزارش کردند که محلول‌پاشی و ذرات کندرها بیشترین کارایی را داشتند.

رنجبر و همکاران (Ranjbar *et al.*, 2017) نیز گزارش کردند که بهترین زمان مصرف تنظیم کننده‌ها در جو در مرحله برجستگی دوگانه است و تا دوبار محلول‌پاشی، اثرات مفیدی دارد، ولی افزایش دفعات محلول‌پاشی تاثیر مثبت بیشتری بر عملکرد نخواهد داشت. به نظر می‌رسد که تاخیر در محلول‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد با کاهش اثرات آن همراه باشد و این موضوع ممکن است مربوط به مرحله بحرانی تحمل به شوری در گیاهان زراعی باشد. حساس‌ترین مرحله رشدی گیاهان زراعی به شوری، مرحله استقرار گیاهچه است و اگر گیاهی این مرحله را با موفقیت سپری کند، تحمل به شوری آن در مراحل بعدی افزایش یافته و تولید قابل قبولی خواهد داشت، بنابراین چنانچه پیش تیمار بذر با تنظیم کننده‌های رشد بتواند به استقرار بهتر گیاهچه کمک کند، مناسب‌ترین زمان مصرف آن خواهد بود (Hayat *et al*., 2010; Hashemi *et al*., 2012; 2015; 2018a; Pirasteh-Anosheh *et al*., 2014a). در مجموع، به نظر می‌رسد که بهترین زمان تیمار با تنظیم کننده‌های رشد، تا پیش از وارد شدن گیاه به مرحله زایشی، با دو بار مصرف به فاصله ۱۵-۱۰ روز باشد. البته این توصیه کلی مربوط به گیاهان زراعی بوده و

ممکن است برای همه گیاهان صادق نباشد.

روش پیش‌تیمار (پرایمینگ) بذر

در روش پیش‌تیمار، بذرها در محلول‌های با غلظت مناسب (برای هر تنظیم کننده رشد) به مدت ۸ تا ۲۴ ساعت خیسانده می‌شوند. برای خیساندن هر مقدار بذر باید پنج برابر وزن آن محلول تهیه شود (Jafar *et al.*, 2012). برای حل کردن هر کدام از تنظیم کننده‌های رشد، روش خاصی وجود دارد. به‌عنوان مثال، سالیسیلیک اسید با اتانول (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014a) و یا کلرمکوات کلراید در آب گرم به راحتی حل می‌شوند (Rajala and Peltonen-Sainio, 2001). پس از تیمار، بذرها در معرض هوا در سایه قرار داده می‌شوند تا رطوبت سطحی آنها خشک شده و آماده کشت شوند (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017).

روش محلول‌پاشی

در روش محلول‌پاشی پس از تهیه محلول با غلظت مناسب برای هر کدام از تنظیم کننده‌های رشد، محلول آماده شده با استفاده از سم پاش (دستی، پشتی یا موتوری) روی شاخساره گیاه پاشیده می‌شود. امکان استفاده همزمان برخی از تنظیم کننده‌های رشد با علف‌کش‌ها نیز وجود دارد، لیکن بهتر است فاصله زمانی مناسب بین استفاده از آن‌ها رعایت شود (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017). در حین محلول‌پاشی باید دقت شود که محلول به طور مداوم هم زده شود تا ماده تنظیم کننده در ته مخزن محلول پاش رسوب نکند (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014a). میزان محلول مورد نیاز برای هر هکتار حدود ۶۰۰-۴۰۰ لیتر است (Pirasteh-Anosheh and Emam, 2012b) و محلول‌پاشی تا جایی ادامه می‌یابد که قطرات محلول روی شاخ و برگ گیاه قابل مشاهده باشد. بهتر است محلول‌پاشی در اوایل صبح یا اواخر روز که هوا ساکن و شدت تابش خورشید کمتر است انجام شود. این کار با هدف جلوگیری از تبخیر و کاهش هدررفت محلول انجام می‌شود.

ارزیابی اقتصادی

تنظیم کننده‌های رشد گیاهی، قیمت‌های متفاوتی دارند. سالیسیلیک‌اسید از ارزان‌ترین و آبسیزیک اسید از گران‌ترین تنظیم کننده‌های رشد به شمار می‌روند. تهیه ماده خالص برخی از تنظیم کننده‌های رشد آسان و برخی بسیار مشکل است، با این وجود با توجه به افزایش عملکرد قابل انتظار، به‌نظر می‌رسد که پیش‌تیمار (پرایمینگ) بذر یا محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد در تولید گیاهان زراعی مقرون به‌صرفه‌تر باشد. جعفر و همکاران (Jafar *et al.*, 2012) با ارزیابی اقتصادی استفاده از تنظیم‌کننده‌ها گزارش دادند که نسبت سود به هزینه در تیمارهای شاهد (بدون تیمار)، آسکوربیک‌اسید، سالیسیلیک‌اسید و کاینتین در گندم رقم SARC-1 به‌ترتیب ۱/۶۰، ۲/۱۲، ۲/۰۳ و ۰/۲۵ و در گندم رقم MH-97 به‌ترتیب ۱/۵۱، ۲/۰۳، ۱/۷۴ و ۰/۲۴ بود که این موضوع نشان‌دهنده سود بخش بودن همه تنظیم‌کننده‌های رشد، به‌جز کاینتین بوده است. نتایج ارزیابی دیگری نیز نشان داد که افزایش حتی ۱۰ درصد در عملکرد دانه گندم و جو در اثر پرایمینگ و محلول‌پاشی سالیسلیک‌اسید، سود قابل قبولی را نصیب کشاورزان می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی یک مزرعه ۱۰ هکتاری، سودی معادل ۵۰ میلیون ریال را خواهد داشت (Ranjbar and Pirasteh-Anosheh, 2017).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمایش‌های چند ساله پژوهشگران و بررسی‌های انجام شده میدانی، اثر مثبت تنظیم‌کننده‌های رشد بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی اثبات شده است. نکته مهمی که باید در استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد مورد توجه قرار گیرد، غلظت و زمان مصرف آن‌ها است که با توجه به نوع ماده تنظیم‌کننده و گونه گیاهی باید مشخص شود. مصرف فراتر از غلظت بهینه، در

مورد برخی از تنظیم‌کننده‌ها به طور قطع و در مورد برخی دیگر به احتمال زیاد، اثر منفی بر گیاه خواهد داشت. به نظر می‌رسد که غلظت مورد نیاز برای شرایط شور کمتر از شرایط غیرشور باشد. این موضوع احتمالا به دلیل حساسیت بیشتر گیاهان زراعی در اوایل فصل به تنش شوری است. مصرف تنظیم‌کننده‌های رشد در دو نوبت (اوایل فصل و پیش از شروع رشد زایشی) نیز با تأثیر بیشتری همراه است.

هرچند گزارش‌های فراوانی در مورد اثر تنظیم‌کننده‌های رشد بر گیاهان زراعی وجود دارد، ولی تعداد آزمایش‌های جامع که به‌صورت بلندمدت در مقیاس وسیع مزرعه‌ای روی این موضوع تمرکز کرده باشند، اندک است. تعداد زیادی از آزمایش‌ها جهت سهولت و یا به دلیل کمبود امکانات، در شرایط کنترل‌شده یا در مرحله جوانه‌زنی بذر انجام شده‌اند که نتایج آن‌ها ممکن است قابل اعتماد نباشد. بر این اساس، اگرچه در مواردی مقدار افزایش عملکرد تا ۷۰ درصد هم گزارش شده است، ولی با در نظر گرفتن شرایط مزرعه و متغیر بودن شوری خاک، به‌نظر می‌رسد که دستیابی به چنین موفقیت‌هایی دور از دسترس باشد. در صورت مهیا بودن کلیه امکانات و مصرف صحیح تنظیم‌کننده‌های رشد، حداکثر افزایش عملکرد قابل انتظار می‌تواند تا ۲۰ درصد باشد. در بین تنظیم‌کننده‌های رشد، اثر سالیسیلیک‌اسید و پلی‌آمین‌ها قابل اطمینان‌تر بوده و مصرف براسینواستروئیدها نیز امیدوارکننده به‌نظر می‌رسد. اظهارنظر در خصوص سایر تنظیم‌کننده‌های رشد، نیاز به انجام پژوهش‌های بلند مدت مزرعه‌ای تکمیلی دارد تا دستاوردهای آن‌ها بتواند به‌تدریج اعتماد کشاورزان را نسبت به مصرف آن‌ها جلب کند.

سپاسگزاری

بدینوسیله از آقای دکتر مسعود اصفهانی سردبیر محترم نشریه علوم زراعی ایران و داوران محترم ناشناس که در طی فرآیند داوری، مقاله را به دقت مورد بررسی قرار دادند و پیشنهادهای خوبی در راستای ارتقای کیفی مقاله داشتند تقدیر و تشکر می‌گردد.

منابع مورد استفاده

References

Adler, P. R. and G. E. Wilcox. 1987. Salt stress, mechanical stress, or chlormequat chloride effects on morphology and growth recovery of hydroponic tomato transplants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 112: 22-25.

Afzal, I., S. M. A. M. Basra, A. Farooq and A. Nawaz. 2006. Alleviation of salinity stress in spring wheat by hormonal priming with ABA, salicylic acid and ascorbic acid. Int. J. Agric. Biol. 8: 23-28.

Akinrinde, E. A. 2006. Growth regulator and nitrogen fertilization effects on performance and nitrogen use efficiency of tall and dwarf varieties of rice (*Oryza sativa*). Biotechnol. 5: 268-276.

Ashraf, M., F. Karim and E. Rasul. 2002. Interactive effects of gibberellic acid (GA_3) and salt stress on growth, ion accumulation and photosynthetic capacity of two spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salt tolerance. Plant Growth Regul. 36: 49-59.

Ashraf, M. and M. R. Foolad. 2005. Pre-sowing seed treatment. A shotgun approach to improve germination, plant growth and crop yield under saline and non-saline conditions. Adv. Agron. 88: 223-271.

Ashraf, M., N. A. Akram, R. N. Arteca and M. R. Foolad. 2010. The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. Crit. Rev. Plant Sci. 29: 162–190.

Bahrami, K, H. Pirasteh-Anosheh and Y. Emam. 2014a. Yield and growth parameters of barley cultivars as affected by foliar application of cycocel with different concentrations in Fars Province. Crop Physiol. J. 21-17-27. (In Persian with English abstract).

Bahrami, K, H. Pirasteh-Anosheh and Y. Emam. 2014b. Yield and yield components responses of barley cultivars to foliar application of cycocel. J. Crop Prod. Proces. 12: 27-36. (In Persian with English abstract).

Bari, R., and J. D. Jones. 2009. Role of plant hormones in plant defence responses. Plant Mol. Biol. 69(4): 473-488.

Bradford, K. J. 1986. Manipulation of seed water relations via osmotic priming to improve germination under stress conditions. Hort Sci. 21: 1105-1112.

Davies, P. J. 2013. Plant Hormones: Physiology, Biochemistry and Molecular Biology. Springer Science & Business Media.

Delaviz. M., H. Sadeghi, H. Pirasteh-Anosheh and G. Ranjbar. 2016. Effect of seed pre-treatment methods on alkali stress tolerance of sainfoin and its recovery in germination and early growth. Iran. Seed Res. J. 3(1): 99-107.

Delledonne, M., Y. Xia, R. A. Dixon and C. Lamb. 1998. Nitric oxide functions as a signal in plant disease resistance. Nature. 394: 585-588.

Dong, Y., Y. Wan, F. Liu and Y. Zhuge. 2019. Effects of exogenous SA supplied with different approaches on growth, chlorophyll content and antioxidant enzymes of peanut growing on calcareous soil. J. Plant Nutr. 42(16): 1869–1883.

Emadi, A. R. and H. Pirasteh-Anosheh. 2019. The effect of chlormequat chloride foliar application and different levels of nitrogen fertilizer on yield and yield components of rapeseed (*Brassica napus* L.). Plant Ecophysiol. (Accepted). (In Persian with English abstract).

Emam, Y. 2011. Cereal Crop Production. Shiraz University Press. 190 pp. (In Persian).

Fariduddin, Q., T. A. Khan, M. Yusuf, S. T. Aafaqee and R. R. A. E. Khalil. 2018. Ameliorative role of salicylic acid and spermidine in the presence of excess salt in Lycopersicon esculentum. Photosyn. 56(3): 750-762.

Gadallah, M. A. A. 1999. Effects of kinetin on growth, grain yield and some mineral elements in wheat plants growing under excess salinity and oxygen deficiency. Plant Growth Regul. 27: 63–74.

Hashemi, S. E., H. Pirasteh-Anosheh and Y. Emam. 2012. Role of cycocel in modulation of drought stress on germination and early growth of safflower. The 1st National Conference in Abiotic. Stress, 26-27 Oct., 2012, Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract).

Hashemi, S. E, Y. Emam and H. Pirasteh-Anosheh. 2015. The effect of time and type of salicylic acid application on growth trend, yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under salinity stress conditions. Crop Physiol. J. 24: 5-18. (In Persian with English abstract).

Hashemi S. E, Y. Emam and H. Pirasteh-Anosheh. 2018a. Ion content and antioxidant response of barley to different methods of salicylic acid application under salinity conditions. Plant Ecophysiol. 34: 1-11. (In Persian with English abstract).

Hashemi, S. E., H. Pirasteh-Anosheh and Y. Emam. 2018b. Recovery of negative effects of salt stress in two barley cultivars using salicylic acid. The 15th International Iranian Crop Sci. Congress, 4-6 Sep., Karaj, Iran.

Hashemi, S. E., H. Pirasteh-Anosheh and Y. Emam. 2018c. Responses of germination, early growth and phenology in barley to salicylic acid and salinity. Cereal Res. 7: 579-590. (In Persian with English abstract).

Hayat, Q., S. Hayat, M. Irfan and A. Ahmad. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: a review. Environ. Exp. Bot. 68: 14-25.

Hegazi, A. M., F. M. El-Gaaly and N. M. N. El-Din. 1995. Effect of some growth regulators on yield and yield components of wheat grown under saline conditions. Ann. Agric. Sci. 33: 709–717.

Iqbal, M., and M. Ashraf. 2005a. Presowing seed treatment with cytokinins and its effect on growth, photosynthetic rate, ionic levels and yield of two wheat cultivars differing in salt tolerance. J Integ. Plant Biol. 47: 1315–1325.

Iqbal, M. and M. Ashraf. 2005b. Changes in growth, photosynthetic capacity and ionic relations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) due to pre-sowing seed treatment with polyamines. Plant Growth Regul. 46: 19–30.

Iqbal, M., and M. Ashraf. 2010. Changes in hormonal balance: a possible mechanism of pre-sowing chilling-induced salt tolerance in spring wheat. J. Agron. Crop Sci. 196: 440–454.

Jafar, M. Z., M. Farooq, M. A. Cheema, I. Afzal, S. M. A. Basra, M. A. Wahid, T. Aziz and M. Shahid. 2012. Improving the performance of wheat by seed priming under saline conditions. J Agron. Crop Sci. 198: 38–45.

Khan, M. A. and D. J. Weber. 1986. Factors influencing seed germination in *Salicornia pacifica* var. *utahensis*. Am. J. Bot. 73: 1163–1167.

Lan, X. and X. Wang. 2008. Effects of paclobutrazol seed-coating on seed germination and seedling growth in maize under drought stress. J. Maize Sci. 16(2): 94-96.

Mahdavi, H. 2014. Evalution of seed coating and pelleting with different chemicals and plant growth promoting rihzobacteria on germination of sugar beet (*Beta vulgaris*). M.Sc. Thesis, Shahed University, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract).

Mata, C. G. and L. Lamattina. 2001. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress. Plant. Physiol. 126: 1196-1204.

Moori, S., Y. Emam, H. Karimzadeh and H. Pirasteh-Anosheh. 2012. Effect of foliar application of auxin and cytokynin on yield and biochemical properties of Shiraz and Yavarous wheat cultivars under late season drought stress. 12th Iran. Crop Sci. Congress, 4-6 September, Karaj. Iran. (In Persian with English abstract).

Moradi, F. 2016. Plant growth regulators past, present and future. Res. Achiev. Field Hortic. 5(2): 71-95.

Nadjafi, F., M. Bannayan, L. Tabrizi and M. Rastgoo. 2006. Seed germination and dormancy breaking techniques for *Ferula gummosa* and *Teucrium polium*. J. Arid Environ. 64(3): 542-547.

Nasibi, F., K. Manoochehri Kalantari and M. Khodashenas. 2009. The effect of sodium nitroprusside (SNP) pretreatment on some biochemical parameters in tomato seedlings (*Lycopersicun esculentum*) under drought

stress. J. Agric. Nat. Resour. Sci., 16: 1-14. (In Persian with English abstract).

Pakar, N., H. Pirasteh-Anosheh and Y. Emam. 2014. The effect of different concentrations of salicylic acid on barley qualitative and quantitative characteristics under salt stress conditions. J. Crop Prod. Proces. 14: 191-201.

Pakar, N., H. Pirasteh-Anosheh, Y. Emam and M. Pessarakli. 2016. Barley growth, yield, antioxidant enzymes and ion accumulation as affected by PGRs under salinity stress conditions. J. Plant Nutr. 39 (10): 1372-1379.

Peleg, Z., and E. Blumwald. 2011. Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. Curr. Opin. Plant Biol. 14(3): 290-295.

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2010. Effect of plant growth regulators on total protein, proline content and antioxidant enzymes in two wheat cultivars under drought stress conditions. The National Proteomics Congress. 28-29 October, Shiraz University. Shiraz, Iran.

Pirasteh-Anosheh, H., H. Sadeghi and Y. Emam. 2011. Chemical priming with urea and KNO_3 enhances maize hybrids (*Zea mays* L.) seed viability under abiotic stress. J. Crop Sci. Biotechnol., 14 (4): 289 – 295.

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2012a. Manipulation of morpho-physiological traits in bread and durum wheat by using PGRs at different water regimes. J. Crop Prod. Proc., 5: 29-45. (In Persian with English abstract).

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2012b. Yield and yield components responses of bread and durum wheat to PGRs under drought stress conditions in field and greenhouse. Environ. Str. Crop Sci. 5 (1): 1-18. (In Persian with English abstract).

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam, M. Ashraf and M. Foolad. 2012. Exogenous application of salicylic acid and chlormequat chloride alleviates negative effects of drought stress in wheat. Adv. Stud. Biol., 11 (4): 501-520.

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam and M. Pessarakli. 2013. Changes in endogenous hormonal status in corn (*Zea mays* L.) hybrids under drought stress. J. Plant Nutr. 36: 1695-1707.

Pirasteh-Anosheh, H., M. J. Rousta and Y. Emam. 2014a. Different methods of crops treatments with salicylic acid in salinity researches. Technical Bulletin. AREEO press, Tehran, Iran. (In Persian).

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam and M. Ashraf. 2014b. Impact of cycocel on seed germination and growth in some commercial crops under osmotic stress conditions. Archiv. Agron. Soil Sci. 60(9): 1277-1289.

Pirasteh-Anosheh, H., G. Ranjbar, Y. Emam and M. Ashraf. 2014c. Salicylic acid-induced recovery ability in salt-stressed *Hordeum vulgare* plants. Turk. J. Bot. 38: 112-121.

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam and A. R. Sepaskhah. 2015. Improving barley performance by proper foliar applied salicylic-acid under saline conditions. Int. J. Plant Prod. 9(3): 467-486.

Pirasteh-Anosheh, H., G. Ranjbar, H. Pakniyat and Y. Emam. 2016a. Physiological mechanisms of salt stress tolerance in plants; An overview. *In:* Azooz M. M. and P. Ahmad (Eds). Plant-Environment

Interaction: Responses and Approaches to Mitigate Stress. p. 141-160. John Wiley & Sons, London, UK.

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam and A. Khaliq. 2016b. Response of cereals to cycocel application: A review. Iran Agric. Res. 35(1): 1-12.

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam, M. J. Rousta and M. Ashraf. 2016c. Salicylic acid induced salinity tolerance through manipulation of ion distribution rather than ion accumulation. J. Plant Growth Regul. 36: 227–239.

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2017. Induced salinity tolerance and altered ion storage factor in *Hordeum vulgare* plants upon salicylic-acid priming. Iran Agric. Res. 36(1): 41-48.

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam, M. J. Rousta and S. E. Hashemi. 2017. Effect of salicylic acid on biochemical attributes and grain yield of barley (*Hordeum vulgare* L. *cv.* Nosrat) under saline conditions. Iran. J. Crop Sci. 18(3): 232-244. (In Persian with English abstract).

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2018a. Improved crop yield using plant growth regulators in saline conditions, theory or reality? The 2nd National Conference on Salinity Stress in Plants and Developing Strategies for Saline Agriculture. 5-6 Sep., Tabriz, Iran. (In Persian with English abstract).

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2018b. Modulation of oxidative damage due to salt stress using salicylic acid in *Hordeum vulgare*. Archiv. Agron. Soil Sci. 64 (9): 1268-1277.

Pirasteh-Anosheh, H., Y. Emam and M. Pessarakli. 2019. Grain filling pattern of *Hordeum vulgare* as affected by salicylic acid and salt stress.J. Plant Nutr. 42(3): 278-286.

Rademacher, W. 2015. Plant growth regulators: backgrounds and uses in plant production. J. Plant Growth Regul. 34(4): 845-872.

Rajala, A. and P. Peltonen-Sainio. 2001. Plant growth regulator effects on spring cereal root and shoot growth. Agron. J. 93: 936-943.

Ranjbar, G. and H. Pirasteh-Anosheh. 2015. A glance to the salinity research in Iran with emphasis on improvement of field crops production. Iran. J. Crop Sci. 17(2): 165-178. (In Persian with English abstract).

Ranjbar, G. and H. Pirasteh-Anosheh. 2017. Improving the yield of wheat and barley in saline conditions using salicylic acid foliar application. Extension Bulletin. AREEO press, Tehran, Iran. (In Persian).

Ranjbar, G., H. Pirasteh-Anosheh and N. Besharat. 2017. Determination of the optimum concentration and time of salicylic acid foliar application for improving barley growth under non-saline and saline conditions J. Crop Prod. Proces. 22: 61-72. (In Persian with English abstract).

Ranjbar, G., H. Pirasteh-Anosheh, M. H. Banakar and H. R. Miri. 2018. A review on halophytes researches in Iran: explanation of challenges and solutions. Plant Ecophysiol. 32(1): 117-129. (In Persian with English abstract).

Ranjbar, G., F. Dehghani, H. Pirasteh-Anosheh and M. H. Banakar. 2019. Improving salt tolerance threshold of *Salicornia bigelovii* at germination stage using gibberellic acid pretreatment at different levels of seawater salinity. Iran. J. Range Desert Res. 26(1): 62-72. (In Persian with English abstract).

Rokhafrooz, K., Y. Emam and H. Pirasteh-Anosheh. 2016. The Effect of chlormequat chloride on yield and

yield components of three wheat cultivars under drought stress conditions. J. Crop Prod. Proces. 20: 111-122. (In Persian with English abstract).

Ryu, H. and Y. G. Cho. 2015. Plant hormones in salt stress tolerance. J. Plant Biol. 58(3): 147-155.

Sade, N., M. del Mar Rubio-Wilhelmi, K. Umnajkitikorn and E. Blumwald. 2017. Stress-induced senescence and plant tolerance to abiotic stress. J. Exp. Bot., 69(4): 845-853.

Saffari, G., I. Alhadadi, S.M.J. Arvin, H. Irannejad, G. Akbari and A. Nemati Ghasemabadi. 2012. Effect of some growth regulators on seed germination characters and seedling primary growth of canola (*Brassica napus* L.). Iran. J. Seed Sci. Technol. 1(2): 185-192.

Shahbaz, M. and M. Ashraf. 2007. Influence of exogenous application of brassinosteroid on growth and mineral nutrients of wheat (*Triticum aestivum* L.) under saline conditions. Pak. J. Bot. 39: 513–522.

Shahbaz, M., M. Ashraf and H. R. Athar. 2008. Does exogenous application of 24-epibrassinolide ameliorate salt induced growth inhibition in wheat (*Triticum aestivum* L.)? Plant Growth Regul. 55: 51–64.

Shakirova, F. M. 2007. Role of hormonal system in the manifestation of growth promoting and anti-stress action of salicylic acid, *in:* Hayat S., A. Ahmad (Eds.), Salicylic Acid, A Plant Hormone. Springer, Dordrecht, Netherlands.

Shekoofa, A. and Y. Emam, Y. 2008. Effect of nitrogen fertilization and plant growth regulators (PGRs) on yield of wheat. J. Agric. Sci. Tech. 10: 101-108.

Sun, T.P. and F. Gubler. 2004. Molecular mechanism of gibberellin signaling in plants. Annu. Rev. Plant Biol., 55, 197-223.

Suo, H. C., W. Li, K. H. Wang, U. Ashraf, J. H. Liu, J. G. Hu, Z. J. Li, X. L. Zhang, J. Xie and J. R. Zheng. 2017. Plant growth regulators in seed coating agent affect seed germination and seedling growth of sweet corn. Appl. Ecol. Environ. Res. 15(4): 829-839.

Ungar, I. A., 1977. Salinity, temperature, and growth regulator effects on seed germination of *salicornia europaea* L. Aqu. Bot. 3: 329-335.

Vahabi, N., Y. Emam, and H. Pirasteh-Anosheh. 2016. Improving wheat growth and yield using chlormequat chloride, salicylic acid and jasmonic acid under water stress. Iran. J. Field Crops Res. 15(1): 124-135. (In Persian with English abstract).

Wang, X. L., X. Wang, H. Cao and W. W. Zhang. 2010. Effects of humic acid seed-coating on seed germination and seedling growth of maize in water stress. J. Maize Sci. 4: 96-98.

Yun-xia, G., Z. Li-jun, L. Feng-hai, C. Zhi-bin, W. Che, Y. Yun-Cong, H. Zhen-hai, Z. Jie and S. Zhen-sheng. **2010.** Relationship between jasmonic acid accumulation and senescence in drought-stress. Afric. J. Agric. Res. 5: 1978-1983.

Zhu, Y. L. and X. Wang. 2013. Effects of salicylic acid seed-coating on seed germination and seedling growth in maize under low temperature stress. J. Maize Sci. 21(4): 68-71.

The role of plant growth regulators in enhancing crop yield under saline conditions: from theory to practice

Pirasteh-Anosheh, H.[1] and Y. Emam[2]

ABSTRACT

Pirasteh-Anosheh, H. and Y. Emam. 2019. The role of plant growth regulators in enhancing crop yield under saline conditions: from theory to practice**. Iranian Journal of Crop Sciences. 21(3): 188-209. (In Persian).**

Intensified salinization of water and soil resources has promoted interest for research and approaches of improving crop yield under saline conditions. Reviewing the literature showed that the records on understanding of different aspects of salt stress and enhanced salinity tolerance in the world goes back to more than a century. Different approaches have been suggested to increase crop yield under saline conditions, among which one is using plant growth regulators (PGRs). Application of PGRs has begun since 1930s and their global annual sales are about US$ 1.2 billion. Nearly 40 active ingredients og PGRs are now in use, applied either as a single or combined treatments, among which the most important are auxins, cytokinins, gibberellins, ethylene, abscisic acid, brassinosteroids, salicylic acid, chlormequat chloride, paclobutrazol, jasmonic acid, ascorbic acid, triacontanol, strigolactones, nitric oxide, polyamines and plant peptide hormones. There have been large body of reports showing quantitative and quality improvement of crops as well as salinity tolerance as the consequences of PGRs application.However, most of these studies were conducted under controlled conditions (i.e. out of field conditions), as one season experiments, and this makes the results unreliable. In this paper, with having in mind the applicability for the field conditions, crop yield improvement as the result of using PGRs has been reviewed.

Key words: Phytohormones, Salinity stress, Seed priming and Stress tolerance.

Received: March, 2019 Accepted: September, 2018

1. Assistant Prof., National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran (Corresponding author) (Email: h.pirasteh.a@gmail.com)
2. Professor, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran