



## به‌زرعی کشاورزی

دوره ۲۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۳۹۹

صفحه‌های ۴۰۶-۳۸۵

### پاسخ‌های فیزیولوژیکی ارقام کنجد به کاربرد نانو منیزیم و پلیمر زیستی کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری

جابر خردادی ورامین<sup>۱</sup>، فرزاد فنودی<sup>۲\*</sup>، جعفر مسعود سینکی<sup>۲</sup>، شهرام رضوان<sup>۲</sup>، علی دماوندی<sup>۲</sup>  
۱. دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دامغان، ایران.  
۲. استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دامغان، ایران.  
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳

#### چکیده

به‌منظور بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی دو رقم کنجد به کاربرد نانو کود منیزیم و کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های آبیاری، آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل بر مبنای بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. قطع آبیاری به‌عنوان فاکتور اصلی (آبیاری نرمال، آبیاری تا ۵۰ درصد گلدهی و دانه‌بندی)، فاکتورهای فرعی شامل ارقام کنجد اولتان و دشتستان-۲، نانو منیزیم (محلول‌پاشی و عدم محلول‌پاشی) و کیتوزان (صفر، ۴/۸ و ۶/۴ گرم بر لیتر) بودند. بیش‌ترین عملکرد دانه در کاربرد ۶/۴ گرم در لیتر کیتوزان تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین ۱۲۳۵/۱ کیلوگرم در هکتار بود. بیش‌ترین محتوی کلروفیل کل در ژنوتیپ دشتستان-۲ تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین ۲۴/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد و کم‌ترین میانگین در هر دو ژنوتیپ در آبیاری تا ۶۵BBCH به‌ترتیب با میانگین ۱۷/۲۱ و ۱۷/۴۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر مشاهده شد. کاربرد نانو کود در ژنوتیپ اولتان تحت شرایط آبیاری تا ۶۵BBCH منجر به افزایش ۴۱/۱۱ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز در مقایسه با تیمار شاهد گردید. بیش‌ترین فعالیت آسکوربات پراکسیداز در تیمار عدم کاربرد کیتوزان تحت شرایط آبیاری تا ۶۵BBCH بود که افزایش ۵۵/۰۶ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد داشت. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که آبیاری تا ۶۵ BBCH منجر به کاهش عملکرد دانه شد که با محلول‌پاشی نانو کود منیزیم و کیتوزان اثرات منفی ناشی از تنش تعدیل (به‌ترتیب ۹/۹۳ و ۲۷/۴۶ درصد) شد. براساس نتایج تجزیه رگرسیونی چهار صفت، کلروفیل b، کلروفیل کل، پرولین و کاتالاز وارد مدل شدند که در مجموع ۴۲/۱۱ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توجیه نمودند. نتایج همبستگی ساده بین صفات و تجزیه رگرسیونی حاکی از اثرات غیرمستقیم صفات فیزیولوژیکی بر عملکرد دانه بودند و از بین پارامترهای مورد بررسی رنگی‌های فتوسنتزی از اهمیت بالایی در شرایط تنش برخوردار بودند.

**کلیدواژه‌ها:** پرولین، تجزیه رگرسیونی، دانه روغنی، رنگی‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی.

### Physiological Responses of Sesame Cultivars to the Application of Nano Magnesium and Chitosan Biopolymer under Different Irrigation Regimes

Jaber Khordadi Varamin<sup>1</sup>, Farzad Fanoody<sup>2\*</sup>, Jafar Masuod Sinaki<sup>2</sup>, Shahram Rezvan<sup>2</sup>, Ali Damavandi<sup>2</sup>

1. Ph.D. Candidate, Agronomy Department, Damghan branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

2. Assistant Professor, Agriculture Department, Damghan branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

Received: August 14, 2019

Accepted: December 24, 2019

#### Abstract

To investigate the physiological responses of sesame cultivars to the application of nano magnesium and chitosan biopolymer under different irrigation regimes, a split factorial based on randomized complete block design has been conducted with three replicates between 2017 and 2018. The irrigation cut-off, based on BBCH scale, has served as the main factor (normal irrigation, irrigation up to 50% flowering, and seed ripening), with the sub factors including Oltan and Dashtestan-2 sesame cultivars, and nano magnesium (application and non-application) and chitosan (control, 4.8, and 6.4 g.L<sup>-1</sup>). The highest mean grain yield belongs to the application of 6.4 g.L<sup>-1</sup> chitosan under normal irrigation with an average of 1235.1 kg.ha<sup>-1</sup>. Also, the highest total chlorophyll content is observed in Dashtestan-2 genotype under normal irrigation with a mean of 24.7 mg.g<sup>-1</sup> FW and the lowest mean have been obtained in both genotypes under irrigation up to 65 BBCH with a mean of 17.21 and 17.46 mg.g<sup>-1</sup> FW, respectively. Application of nano fertilizer in Oltan genotype under irrigation up to 65 BBCH increases the catalase activity by 41.11%, compared to the control treatment. The highest activity of ascorbate peroxidase has been achieved when not applying chitosan under irrigation conditions up to 65 BBCH. It has risen by 55.06%, compared to the control treatment. In general, the results show that irrigation up to 65 BBCH reduces grain yield, in turn alleviated by the negative effects of stress on magnesium and chitosan nanoparticles (9.93% and 27.46%, respectively). Based on the regression analysis results, four traits, namely chlorophyll b, total chlorophyll, proline, and catalase, enter the model that explains 42.11% of the total grain yield variations. Results of simple correlation between traits and regression analysis indicate the indirect effects of physiological traits on grain yield and among the studied parameters, photosynthetic pigments has been of high account in stress conditions.

**Keywords:** Antioxidant activity, grain yield, Oilseed, photosynthetic pigments, proline, regression analysis.

## ۱. مقدمه

دانه‌های روغنی بعد از غلات به‌عنوان دومین منبع تأمین انرژی در تغذیه انسان می‌باشند. کنجد (*Sesamum indicum L.*) از خانواده Pedaliacea و از قدیمی‌ترین گیاهان دانه روغنی و سازگار به نواحی گرم و نیمه‌گرم است که به‌عنوان ملکه دانه‌های روغنی شناخته می‌شود. دانه این گیاه حاوی ۵۸-۴۴ درصد روغن، ۲۵-۱۸ درصد پروتئین و ۱۳/۵ درصد کربوهیدرات و غنی از مواد معدنی و ویتامین‌ها می‌باشد (Roul et al., 2017).

با توجه به محدودیت‌های شدید منابع آبی در اکثر مناطق دنیا، تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین تنش تأثیرگذار بر گیاهان زراعی معرفی شده است. کنجد در مقایسه با بیش‌تر محصولات زراعی تابستانه مانند پنبه، ذرت، سورگوم، سویا و بادام‌زمینی آب کم‌تری مصرف می‌کند و جزو مقاوم‌ترین گیاهان به خشکی است. حداکثر نیاز آبی کنجد در مرحله گرده‌افشانی است و هر نوع کاهش دسترسی به آب در این مرحله شدید عملکرد دانه را به‌دنبال خواهد داشت (Chowdhury et al., 2009). آغاز گلدهی حساس‌ترین مرحله رشد گیاه کنجد به تنش خشکی محسوب شده و اثرات تنش آبی روی پارامترهای مختلف رشد گیاه کنجد با افزایش شدت تنش تشدید می‌گردد. کوتاه‌تر شدن زمان لازم برای رشد رویشی و زایشی گیاهان در شرایط تنش را می‌توان به کاهش فتوسنتز و کاهش تولید آسیمیلات کافی جهت رشد و نمو گیاه نسبت داد (Ali and El-Sadek, 2016). پژوهش‌ها نشان داد که تنش اسمزی مقدار کلروفیل گیاهان را کاهش می‌دهد و کاهش مقدار کلروفیل می‌تواند به‌علت افزایش تجزیه کلروفیل یا کاهش ساخت آن باشد. در آزمایش‌های متعددی تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید در گیاه کلزا شد، که کاهش میزان کلروفیل می‌تواند به‌واسطه کاهش سنتز کمپلکس پروتئین

محافظت‌کننده دستگاه فتوسنتزی و صدمه اکسیداتیو لیپیدها، رنگ دانه و پروتئین‌های کلروپلاست به‌همراه افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از در شرایط تنش خشکی باشد (Din et al., 2011).

گونه‌های فعال اکسیژن<sup>۱</sup> (ROS) رادیکال‌های آزاد و غیرآزاد مولکولی هستند که نتیجه انتقال الکترون در میتوکندری، کلروپلاست و سیتوسول بوده و منجر به شکل‌گیری سوپراکسیداز (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)، پراکسید هیدروژن (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)، رادیکال هیدروکسیل (HO<sup>-</sup>) و اکسیژن یگانه (IO<sub>2</sub>) می‌گردند. فعالیت ROSها تحت شرایط تنش ممکن است سبب بروز صدماتی همچون اکسید شدن لیپیدها، تغییر ساختمان پروتئین‌ها، غیرفعال شدن آنزیم‌ها، بی‌رنگ شدن و یا از بین رفتن رنگدانه‌هایی مانند کلروفیل می‌گردد. اولین سد دفاعی در مقابله با افزایش ROS در سلول‌های گیاهی را آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی تشکیل می‌دهند. بافت‌های گیاهان دارای آنزیم‌های حذف‌کننده ROS و شبکه‌ای از آنتی‌اکسیدان‌ها با وزن مولکولی کم مانند کاتالاز<sup>۲</sup> (CAT)، پراکسیداز<sup>۳</sup> (POX)، آسکوربات پراکسیداز<sup>۴</sup> (APX)، گلوکاتیون ردوکتاز<sup>۵</sup> (GR) و پلی‌فنل‌اکسیداز<sup>۶</sup> (PPO) هستند (Das & Roychoudhury, 2014). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش‌های محیطی در گیاهان دانه روغنی گزارش شده است (Dossa et al., 2017).

نانوتکنولوژی یک موضوع علمی امیدبخش است که توانایی ایجاد راه‌کارهای جدید در زمینه کشاورزی و بیوتکنولوژی را دارد. نانوکودها حامل‌های عناصر غذایی در ابعاد ۳۰ تا ۴۰ نانومتر هستند و توانایی حمل مناسب یون‌های

1. Reactive oxygen species
2. Catalase
3. Peroxidase
4. Ascorbate peroxidase
5. Glutathione reductase
6. Polyphenol oxidase

کاربرد نانوکود منیزیم و کیتوزان تحت شرایط محدودیت آبیاری و هم‌چنین تعیین شاخص‌ترین صفات فیزیولوژیکی مؤثر در ایجاد تحمل به خشکی در ارقام کنجد بود.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای مطالعه اثرات محلول‌پاشی نانوکود منیزیم و کیتوزان در شرایط محدودیت آبیاری بر شاخص‌های فیزیولوژیکی ارقام کنجد، آزمایشی به صورت اسپلیت فاکتوریل بر مبنای طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی واقع در ورامین انجام گرفت. این محل در عرض شمالی ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه و طول شرقی ۵۱ درجه و ۷۳ دقیقه با ارتفاع ۸۲۲ متر از سطح دریا قرار دارد. این منطقه در حاشیه دشت کویر قرار گرفته و دارای آب‌وهوای گرم و خشک است (شکل ۱). عوامل موردبررسی شامل قطع آبیاری براساس کدهی BBCH به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح آبیاری نرمال، آبیاری تا مرحله BBCH ۶۵ (۵۰ درصد گلدهی) و آبیاری تا مرحله BBCH ۷۵ (۵۰ درصد دانه‌بندی) و عوامل فرعی شامل دو رقم اولتان و دشتستان-۲، محلول‌پاشی نانومنیزیم شامل تیمار شاهد و محلول‌پاشی دو گرم بر لیتر در مرحله BBCH ۶۵ و محلول‌پاشی کیتوزان شامل تیمار شاهد، ۱/۸ و ۶/۴ گرم بر لیتر بودند. با توجه به اثرات منفی سطوح بالای کیتوزان، محلول‌پاشی کیتوزان سطح اول در طی یک مرحله (BBCH ۶۵) ولی محلول‌پاشی کیتوزان سطح دوم در طی دو مرحله (BBCH ۷۵ و ۶۵) صورت گرفت. محلول‌پاشی با استفاده از سم‌پاش دستی (۱۰ لیتری) بر مبنای یک لیتر برای هر کرت آزمایشی (به‌طوری‌که برگ‌های گیاه کاملاً خیس شدند) اعمال گردید. با توجه به اندازه کرت‌های آزمایشی، میزان مصرف نانوکود منیزیم ۲/۵ کیلوگرم در

غذایی را به‌علت سطح ویژه زیاد دارند (Subramanian et al., 2015). کمبود منیزیم از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای، تشکیل کلروفیل و تولید فتوآسیمیلات‌ها، باعث کاهش فعالیت آنزیم رویسکو در چرخه کالوین می‌شود. این عنصر نقش مهمی در حفظ انرژی دارد و به‌عنوان یک کوفاکتور برای بسیاری از آنزیم‌های مرتبط با هیدرولیز، پایداری ساختار و تجمع قندها بوده و هم‌چنین کنترل‌کننده pH است (Blasco et al., 2015).

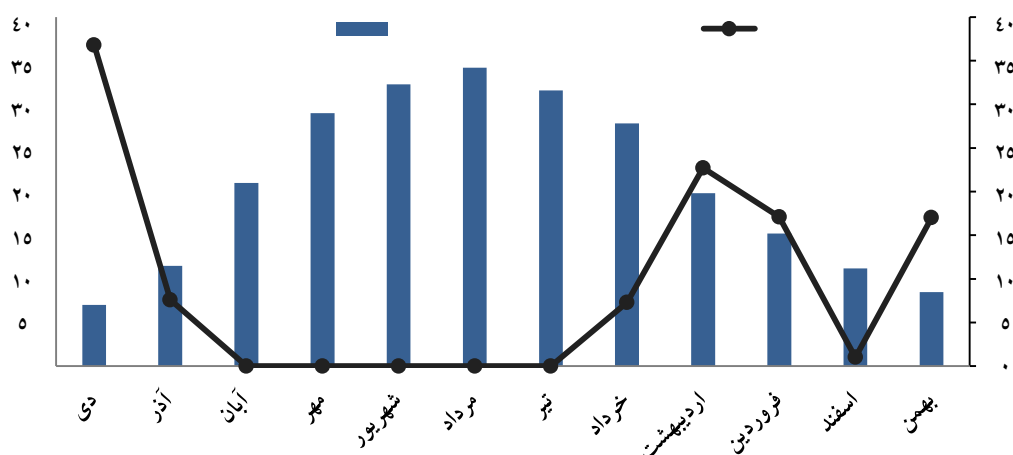
پلیمرهای مختلفی در زمینه کشاورزی به‌صورت طبیعی و مصنوعی مورد استفاده قرار گرفته است (Kashyap et al., 2015). کیتوزان ( $C_{11}H_{17}O_7N_2$ ) یک پلی‌ساکارید پلی‌کاتیونی، به‌عنوان یک پلیمر طبیعی و از آلکالین‌ان-دی‌اسیتیلن کیتین<sup>۱</sup> تولید می‌گردد و به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر روی زمین شناخته می‌شود که از دیواره سلولی برخی قارچ‌ها، حشرات و هم‌چنین برخی جلبک‌ها تولید می‌گردد. این ماده متعلق به خانواده گروه کربوهیدرات‌ها یکی از بهترین موادی است که می‌تواند رشد گیاهان را بهبود بخشد (Sheikha and AL-Malki, 2011). عمل کیتوزان بر روی رشد ناشناخته باقی مانده است، احتمالاً این ترکیب ممکن است سیگنالی را برای سنتز هورمون‌های گیاهی مانند جیبرلین القا کند و رشد و نمو گیاه توسط بعضی مسیرهای سیگنالینگ مربوط به بیوسنتز اکسین از طریق مسیر وابسته به تریپتوفان افزایش می‌یابد (Uthairatanakij et al., 2007). تأثیر مثبت محلول‌پاشی کیتوزان بر افزایش عملکرد و اجزای عملکرد کنجد توسط Alaviasl et al. (2016) مشاهده گردید. با توجه به کیفیت بالای گیاه کنجد، نبود اطلاعات کافی در مورد اثر نانوکودهای منیزیم و کیتوزان و مسأله کمبود آب در زراعت، هدف از اجرای پژوهش حاضر بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی دو رقم کنجد به

بود. فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف کشت ۱۰ سانتی متر لحاظ شد. بین کرت‌های اصلی ۱/۵ متر و بین تکرارها سه متر فاصله منظور گردید. عملیات تهیه زمین در بهار ۱۳۹۶ انجام گرفت. بذور کنگد دو رقم اولتان و دشتستان-۲ به صورت کشت دستی در عمق یک سانتی متر در تاریخ بیستم خردادماه صورت گرفت. مراحل کوددهی کرت‌های آزمایشی براساس سطوح تعیین شده، پس از انجام آزمون خاک بر مبنای ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره، پتاسیم از منبع فسفات پتاسیم و فسفر از منبع سوپر فسفات انجام شد (Mahdavi et al., 2018). آبیاری کرت‌ها به صورت جوی و پشته‌ای و تعیین زمان آبیاری با استفاده از تشک تبخیر کلاس A (در ۷۰ میلی متر تبخیر و تعرق گیاه) صورت گرفت (Mahdavi et al., 2018). نمونه برداری‌ها از گیاه در طی فصل رشد بعد از اعمال تیمارهای آبیاری و محلول پاشی (۷۲ ساعت بعد از مرحله BBCH ۷۵ معادل ۵۰ درصد گلدهی) به منظور اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی از برگ‌های جوان صورت گرفت (Aghighi Shahverdi et al., 2019; Alinejad et al., 2020).

هکتار و کیتوزان شش و هشت کیلوگرم در هکتار به ترتیب برای سطوح ۴/۸ و ۶/۴ گرم در لیتر محاسبه شد. BBCH مقیاسی است که به عنوان یک منبع برای گزارش‌دهی و آنالیز سیستم‌های IT در داده‌های رشته کشاورزی به کار می‌رود. مراحل فنولوژی گیاهان طبق کدهای BBCH در فصل خاص خود تعریف می‌شود (Koch et al., 2007). مراحل رشد فنولوژیکی گیاه کنگد با استفاده از معیار کدهای BBCH را شرح داده و به این نتیجه رسیدند که این نوع سیستم قادر به پاسخ به پرسش‌های بسیاری در مورد اثر عوامل مختلف در رشد است (Attibayeba et al., 2010).

قبل از کاشت، جهت تعیین وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک محل آزمایش نمونه‌گیری ترکیبی انجام و یک نمونه به آزمایشگاه خاک‌آزما نگین واقع در شهرستان ورامین منتقل گردید. طبق نتایج آزمون خاک، خاک مزرعه دارای بافت لومی و pH آن برابر ۷/۶۸ بوده است که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

هر کرت شامل چهار ردیف کشت به طول چهار متر



شکل ۱. میزان بارندگی و دما منطقه در سال ۱۳۹۶

جدول ۱. آزمون خاک محل آزمایش

عمق	pH	EC	OC	TNV	نیترژن	فسفر	پتاسیم	منیزیم	رس	سیلت	شن	بافت
(cm)	-	(dS/m)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-
۰-۳۰	۷/۶۸	۳/۳۸	۰/۵۵	۲۰/۵۸	۰/۰۵	۱۲	۲۸۴/۲	۳/۱۳	۱۹	۴۶	۳۵	لوم

میزان کربوهیدرات کل گیاه با استفاده از روش فنل اسید سولفوریک اندازه‌گیری شد (Irrigoyen et al., 1992). در این روش به ۰/۱ گرم از بافت خشک گیاهی به‌طور جداگانه ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد اضافه شدند. پس از یک هفته از محلول رویی نمونه‌ها یک میلی‌لیتر برداشته و به حجم دو میلی‌لیتر رسانیده شد. سپس یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد و پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به نمونه‌ها اضافه و توسط ورتکس به‌خوبی به‌هم زده شد. سپس لوله آزمایش به مدت ۲۰ دقیقه در حمام آب گرم قرار داده شد و بعد از این مدت در دمای آزمایشگاه سرد گردید و پس از آن میزان جذب به‌وسیله اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۸۵ نانومتر قرائت شد.

برای اندازه‌گیری کاتالاز محلول آزمایش شامل بافر فسفات پتاسیم (۲۵ میلی مول pH=۶/۷) و پراکسید هیدروژن به غلظت ۲۰ میلی مول بوده است. با افزودن ۵۰ میکرو لیتر از عصاره آنزیمی در حجم نهایی یک میلی‌لیتر مخلوط، واکنش شروع شده و تغییر جذب در ۲۴۰ نانومتر پس از یک دقیقه توسط اسپکتوفتومتر محاسبه شد (Aebi, 1984). مخلوط واکنشی که برای سنجش فعالیت این آنزیم استفاده شد شامل ۷۵۰ میکرو لیتر پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار محلول در فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار، ۷۵۰ میکرو لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار، ۷۵۰ میکرو لیتر آب دوبار تقطیر استریل شده و ۷۵۰ میکرو لیتر گلیکول ۱۰ میلی‌مولار محلول در آب دوبار تقطیر استریل شده بود. در این روش مخلوط واکنش فوق به اضافه ۲۰ میکرو لیتر از عصاره آنزیمی با

به‌منظور اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوستتزی، مقدار ۰/۲ گرم از ماده تر گیاهی را به‌همراه پنج میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد در هاون چینی مخلوط گردید. بعد از سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر اندازه‌گیری و در نهایت با استفاده از رابطه‌های (۱) تا (۳) مقدار کلروفیل a، b و کل محاسبه گردید.

رابطه (۱) Chlorophyll a =  

$$(19.3 \times A_{663} - 0.86 \times A_{645}) V / 100 W$$

رابطه (۲) Chlorophyll b =  

$$(19.3 \times A_{645} - 3.6 \times A_{663}) V / 100 W$$

رابطه (۳) Chlorophyll T = Chl a + Chl b  
 که در آن V = حجم محلول صاف‌شده، A = جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵، W = وزن تر نمونه برحسب گرم.

برای اندازه‌گیری پرولین از روش Bates et al. (1973) استفاده شد. ۰/۰۵ گرم ماده تر را در پنج میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک ساییده و صاف گردید. به دو میلی‌لیتر از عصاره صاف‌شده، دو میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک اضافه نموده و ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. به لوله‌های آزمایش چهار میلی‌لیتر تولوئن اضافه نموده و میزان جذب نمونه در طول موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت و با استفاده از منحنی استاندارد میزان پرولین محاسبه گردید.

مشاهده شد و کم‌ترین میانگین، در تیمار عدم کاربرد نانوکود در تنش شدید خشکی (آبیاری تا BBCH 65) با میانگین 67/9 کیلوگرم در هکتار به دست آمد (شکل A-2). در مقایسه میانگین تنش خشکی در کیتوزان، بیش‌ترین میانگین این صفت در ترکیب تیماری کاربرد 6/4 گرم در لیتر کیتوزان تحت شرایط آبیاری نرمال (عدم تنش) با میانگین 1295/5 کیلوگرم در هکتار بود و کم‌ترین میانگین در تیمار عدم کاربرد کیتوزان تحت شرایط تنش شدید خشکی (آبیاری تا BBCH 65) با میانگین 15/7 کیلوگرم در هکتار به دست آمد (شکل B-2). آبیاری نرمال در ژنوتیپ دشتستان-2 منجر به تولید بیش‌ترین میانگین این صفت (1188 کیلوگرم در هکتار) شد بود و تنش خشکی شدید (آبیاری تا BBCH 65) در ژنوتیپ اولتان، کم‌ترین میانگین (69/8 کیلوگرم در هکتار) را داشت (شکل C-2). در مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود منیزیم در کیتوزان، بیش‌ترین میانگین این صفت در ترکیب تیماری کاربرد نانوکود منیزیم به همراه 6/4 گرم در لیتر کیتوزان با میانگین 107/2 کیلوگرم در هکتار بود و کم‌ترین میانگین این صفت در عدم کاربرد نانوکود منیزیم و کیتوزان با میانگین 597/4 کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (شکل D-2).

به نظر می‌رسد تنش خشکی با اختلال در عمل روزنه‌ها و سیستم فتوسنتزی، تخریب پروتئین‌ها و آنزیم‌ها، کاهش سطح برگ و ریزش گل و میوه موجب کاهش عملکرد گیاهان می‌شود. در شرایط تنش شدید (قطع آبیاری در مرحله گلدهی) کاهش عملکرد دانه در هر بوته به علت کاهش مواد غذایی می‌باشد، که این کاهش می‌تواند به علت کاهش ارتفاع، رشد رویشی و در نهایت کاهش سهم فتوسنتزی گیاه و کم‌شدن سهم دانه در دریافت کربوهیدرات باشد. بیان شده است که چنانچه در زمان عبور از فاز رویشی به زایشی، گیاه با محدودیت

قرارگرفتن در دستگاه اسپکتروفتومتر فعالیت آنزیم پراکسیداز در طول موج 470 نانومتر و در مدت زمان واکنش 180 ثانیه اندازه‌گیری شد (Chance & Maehly, 1955). برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز 50 میکرولیتر عصاره آنزیمی و 37/5 میکرولیتر آسکوربات ریخته شد و 1/5 میکرولیتر آب اکسیژنه به آن اضافه شد و بلافاصله در دستگاه طیف‌سنج نوری با طول موج 290 نانومتر میزان تغییرات جذب آن در مدت یک دقیقه یادداشت گردید (Nakano and Asada, 1981).

نرمال‌سازی داده‌های به دست آمده با استفاده از آزمون‌های Shapiro-Wilk test و Kolmogorov-Smirnov و تجزیه واریانس آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه 9/2 انجام شد. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. همبستگی ساده (پیرسون) بین صفات به دست آمده از میانگین داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه 9/1 صورت گرفت. تجزیه رگرسیونی گام به گام که در آن عملکرد دانه (برداشت در سطح یک مترمربع از ردیف‌های کاشت وسط در تاریخ پنجم آبان‌ماه) به عنوان صفت وابسته و سایر صفات فیزیولوژیکی به عنوان صفات مستقل در نظر گرفته شد، با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه 19 انجام شد.

### 3. نتایج و بحث

اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود، تنش خشکی در کیتوزان، تنش خشکی در ژنوتیپ و نانوکود در کیتوزان بر عملکرد دانه معنی‌دار بودند (جدول 2). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود، بیش‌ترین میانگین این صفت در کاربرد نانوکود منیزیم تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین 1293/9 کیلوگرم در هکتار

فعال‌کردن و افزایش بیان ژن‌ها در مسیر بیوستز تولید کلروفیل به‌خوبی عمل کرده و میزان کلروفیل را افزایش داده است. علاوه بر این پژوهش‌گران اعلام کردند که کاربرد کیتوزان باعث کاهش اثر منفی تنش خشکی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی (از طریق افزایش تثبیت CO<sub>2</sub>) شده و موجب افزایش عملکرد می‌گردد (Alaviasl et al., 2016).

یکی از ویژگی‌های بارز نانو ذرات خاصیت سوپر پارامغناطیسی بوده که از این طریق می‌تواند جذب عناصر را بهبود ببخشد. به‌نظر پژوهش‌گران، منیزیم نقش مهمی در تقسیم‌بندی وزن خشک و کربوهیدرات‌ها بین بخش هوایی و ریشه‌ها بازی می‌کند. کمبود منیزیم باعث اختلال شدید در صادرات مواد فتوسنتزی توسط آوند آبکش از برگ‌ها است (Cakmak & Kirkby, 2008). افزایش ارتفاع بوته، وزن هزاردانه و عملکرد دانه با کمک عنصر منیزیم در گیاه گندم گزارش شده است (Hossain et al., 2011). علت افزایش عملکرد دانه با محلول‌پاشی منیزیم، به‌دلیل افزایش این ماده معدنی در گیاه تا سطح مناسب برای رشد می‌باشد (Hossain et al., 2011).

نتایج نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود و تنش خشکی در کیتوزان بر محتوی کلروفیل a معنی‌دار بودند (جدول ۲). اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود، بیش‌ترین محتوی کلروفیل a در ترکیب تیماری کاربرد نانوکود منیزیم تحت تیماری آبیاری نرمال با میانگین ۲۰/۵۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر به‌دست آمد و کم‌ترین میانگین در تیمار تنش خشکی تا ۶۵BBCH در هر دو تیمار کاربرد و عدم کاربرد نانوکود مشاهده شد (شکل ۳-A). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در کیتوزان بیش‌ترین میانگین این صفت در کاربرد ۶/۴ گرم بر لیتر کیتوزان تحت تیمار آبیاری تا ۷۵BBCH با میانگین ۲۰/۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر مشاهده شد و کم‌ترین میانگین در تیمار عدم کاربرد کیتوزان تحت تنش شدید

آبی مواجه شود این موضوع باعث کاهش فتوسنتز شده و با توجه به این‌که در آن زمان تعداد دانه و وزن دانه در حال شکل‌گیری است، این عمل باعث تسریع پیری و کاهش دوره پرشدن دانه‌ها و وزن دانه‌ها می‌گردد که در نهایت عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Doupis et al., 2013). نتایج حاصله با یافته‌های (Zarei et al., 2018) مبنی بر کاهش عملکرد ارقام کنجد در تأثیر تنش خشکی و واکنش متفاوت ارقام به تنش کم‌آبی مطابقت داشت.

استفاده از کیتوزان به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های کلیدی متابولیسم نیتروژن و همچنین کمک به بهبود حمل‌ونقل نیتروژن باعث افزایش رشد و نمو گیاه می‌شود. همچنین افزایش تحریک‌کنندگی کیتوزان بر رشد نیز گزارش شده است (Mondal et al., 2012) که هم‌راستا با یافته‌های پژوهش حاضر می‌باشد. اثر تحریک‌کنندگی کیتوزان بر رشد گیاه به‌دلیل افزایش جذب آب و عناصر ضروری و کاهش انباشت رادیکال‌های آزاد اکسیژن از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت می‌باشد. کیتوزان به‌عنوان یک محرک زیستی با عملکرد ضد تعرقی خود می‌تواند به بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش هدررفت آب از سطح برگ کمک کند که این عمل کیتوزان را می‌توان به دخالت آن در مسیرهای ABA نسبت داد. گزارش شد که محلول‌پاشی کیتوزان در رفع آسیب ناشی از تنش خشکی نقش داشته و از این طریق به‌طور مؤثری باعث افزایش عملکرد گلرنگ شد (Amiri et al., 2016). کاربرد کیتوزان در شرایط تنش متوسط عملکرد دانه را در گیاه کنجد و آفتابگردان افزایش داد (Alaviasl et al., 2016). شاید اثر تحریک‌کنندگی کیتوزان بر رشد گیاه و افزایش عملکرد تحت تأثیر کیتوزان به‌دلیل تأثیر آن بر تحریک فرآیندهای فیزیولوژیکی، بهبود رشد رویشی و افزایش تثبیت CO<sub>2</sub> باشد. نتایج ما نشان داد که محلول‌پاشی کیتوزان منجر به افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی گردید. به‌نظر می‌رسد الیسیاتور کیتوزان با

جداشدن زنجیره فیتولی از حلقه پورفیرین در اثر رادیکال‌های آزاد اکسیژن و یا آنزیم کلروفیلاز صورت می‌گیرد (Parvaiz & Satyawati, 2008).  
 منیزیم از عناصر پرمصرف و ضروری است که نقش مولکولی و فیزیولوژیکی عمده‌ای در گیاهان دارد و نقش کلیدی در فتوسنتز بازی می‌کند (Taha, 2016). این عنصر به‌طور مستقیم در متابولیسم و فتوسنتز گیاه نقش دارد. پانزده تا ۲۰ درصد از کل منیزیم در گیاه مربوط به مولکول کلروفیل است. افزایش میزان کلروفیل کل و کاروتنوئید با تغذیه برگی منیزیم در گیاه کدو (*Cucurbita pepo* L. توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش گردید (Taha, 2016).

خشکی (آبیاری تا ۶۵BBCH) با میانگین ۱۳/۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد (شکل B-۲).  
 دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت شرایط تنش از جمله شاخص‌های فیزیولوژیکی مقاومت به تنش است. کاهش میزان فتوسنتز منجر به کاهش رشد و نمو گیاه و در نهایت ریخت‌شناسی گیاه می‌شود. در این بررسی بر اثر قطع آبیاری و تنش خشکی، میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌شدت کاهش یافت.  
 به‌نظر می‌رسد این کاهش در اثر تنش خشکی، به‌علت افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن باشد، که این رادیکال‌های آزاد باعث پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه این رنگیزه‌ها می‌گردد. تخریب مولکولی کلروفیل به‌علت

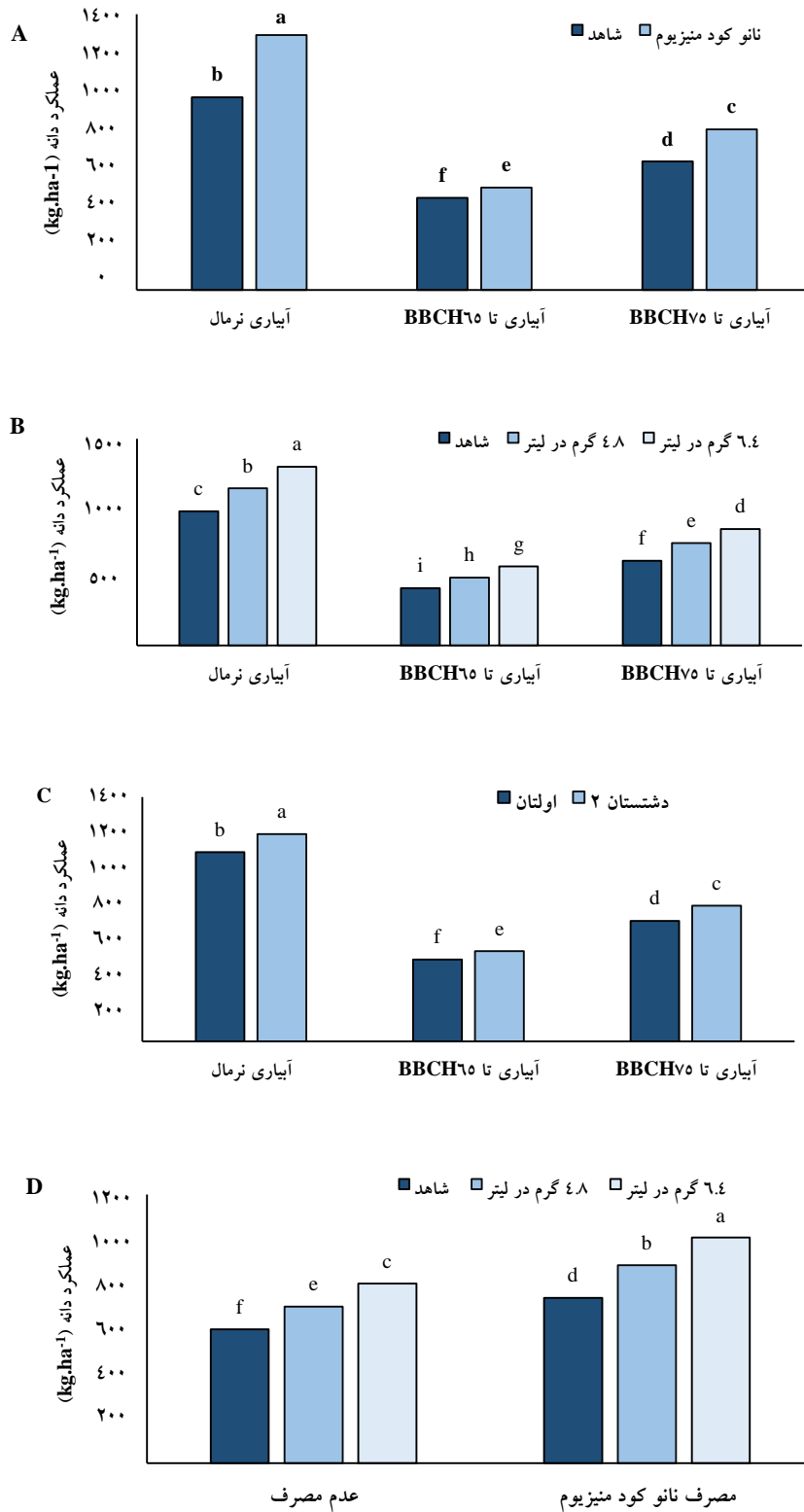
جدول ۲. تجزیه واریانس اثر نانو کود منیزیم و کیتوزان بر عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم کنگد تحت تنش خشکی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)								
		عملکرد دانه	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	پرولین	کربوهیدرات	کاتالاز	پراکسیداز	آسکوربات پراکسیداز
تکرار (r)	۲	۲۱۳۶۰/۶۳**	۹/۰۷*	۰/۵۶ns	۶/۰۸ns	۰/۰۱۱ns	۰/۳۲ns	۰/۱ns	۰/۶۷ns	۰/۳۳ns
تنش خشکی (T)	۲	۳۷۹۵۳۵/۷۲**	۱۵۴/۲۳**	۹۳/۴۹**	۴۷۵/۵۸**	۳/۲۱۸**	۱۸/۱۱**	۵۰/۰۹**	۶۸/۴۳**	۳۱۹/۵۲**
r (T)	۴	۶۸۷/۰۲	۴/۳۶	۱/۸۳	۷/۵۹	۰/۰۱۴	۰/۱۹	۰/۲۶	۲/۱۲	۲/۱۲
نانو منیزیم (N)	۱	۸۴۴۸۵۶/۷۱**	۵۲/۷۸**	۶/۳۸ns	۲۲/۴۵ns	۰/۱۲۵**	۰/۴۶ns	۰/۵۹ns	۰/۲۸ns	۰/۲۸ns
کیتوزان (C)	۲	۵۰۴۷۳۳/۴۶**	۲۹/۱۹**	۷۷**	۳۲/۳۶**	۰/۰۷۴**	۳/۰۶**	۰/۹۲**	۱۴/۴۱**	۳۳۵/۵**
ژنوتیپ (G)	۱	۱۶۹۹۸۱/۱۹**	۱۴/۹۹*	۱/۲۹ns	۷/۴۹ns	۰/۶۸۸**	۰/۶ns	۸۵/۴۷**	۱/۸۹**	۱۲/۴۸ns
TN	۲	۱۵۷۳۲۱/۴**	۱۹/۳۳**	۷/۰۹ns	۴/۵۲ns	۰/۴۲۲**	۱/۰۳*	۰/۴۲ns	۲/۴۲**	۱۴/۲۹ns
TC	۴	۲۰۴۸۴/۳۹**	۱۴/۷۴**	۳/۶ns	۸/۴۷ns	۰/۰۰۵ns	۱/۴**	۱/۵**	۱/۲**	۹۱**
TG	۲	۷۳۳۵**	۰/۹۷ns	۱۷/۱۵*	۲۶/۰۶*	۰/۰۹**	۰/۰۵ns	۱/۲۲**	۱/۲*	۹/۱۵ns
NC	۲	۹۴۷۸/۹۳**	۰/۷۲ns	۸/۷۱ns	۱۴/۱۲ns	۰/۰۰۱ns	۰/۱۳ns	۰/۶۵*	۰/۲۶ns	۲۲/۴۵ns
NG	۱	۳۹۲/۵۵ns	۸/۵۹ns	۱۹/۹۴ns	۵۴/۷**	۰/۰۰۲ns	۰/۲۷ns	۶/۸۹**	۱ns	۰/۰۲ns
CG	۲	۱۷۹۵/۶۸ns	۰/۵۵ns	۳/۱۴ns	۶/۰۵ns	۰/۰۰۶ns	۰/۰۱ns	۱۷/۴۳**	۰/۰۴ns	۸/۲۸ns
TNC	۴	۲۷۶۱/۸۸ns	۱/۹۳ns	۱۱/۲ns	۶/۷۸ns	۰/۰۰۷ns	۰/۳۷ns	۰/۳۳ns	۰/۲ns	۲۰/۵۴ns
TNG	۲	۲۸۲۶/۱۲ns	۰/۵۴ns	۰/۰۲ns	۰/۷۵ns	۰/۰۱۴ns	۰/۵۷ns	۱/۷۷**	۰/۷۹ns	۰/۲۸ns
TCG	۴	۱۴۷۸/۶ns	۱/۳۷ns	۲/۲۲ns	۵/۹ns	۰/۰۰۴ns	۰/۰۱ns	۰/۹۷**	۰/۲۷ns	۴/۳۱ns
NCG	۲	۲۰۸۱/۸ns	۲/۶۲ns	۲/۰۶ns	۶/۰۸ns	۰/۰۰۸ns	۰/۳۷ns	۱/۰۲**	۰/۵۶ns	۶/۹ns
TNCG	۴	۱۲۷/۳۱ns	۱/۳۴ns	۳/۲۹ns	۳/۴۲ns	۰/۰۰۱ns	۰/۱۳ns	۰/۴۴*	۰/۶۱ns	۱۲/۲۷ns
خطا	۶۶	۱۴۶۶/۳۱	۲/۶۲	۵/۱۸	۵/۹	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۲۶	۸/۹۲
ضریب تغییرات (%)		۴/۸۶	۹/۲۷	۲۹/۱۷	۹/۶۲	۸/۸۴	۴/۷۳	۱۳/۴۱	۱۹/۷۴	۱۶/۳۹

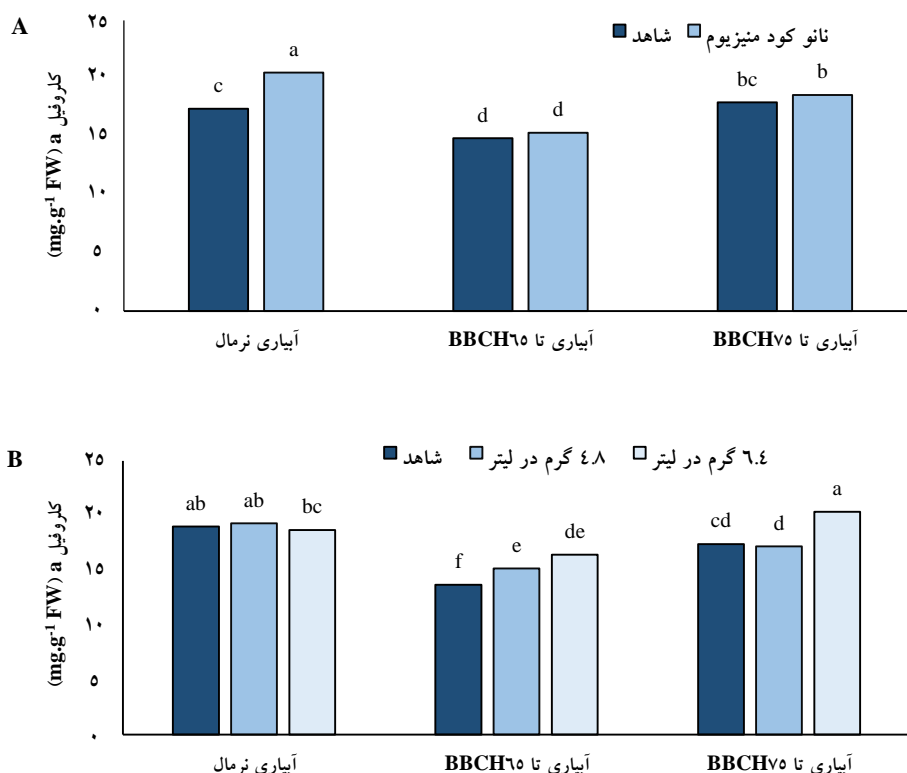
ns, \* و \*\* به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.



پاسخ‌های فیزیولوژیکی ارقام کنجد به کاربرد نانو منیزیم و پلیمر زیستی کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی در نانو کود (A)، خشکی در کیتوزان (B)، خشکی در ژنوتیپ (C) و نانو کود در کیتوزان (D) بر عملکرد دانه کنجد



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در نانوکود (A) و تنش خشکی در کیتوزان (B) بر کلروفیل a گیاه کنبجد

به دست آمد و کمترین میانگین در تنش شدید خشکی (آبیاری تا BBCH65) در هر دو ژنوتیپ مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد کاهش ۱۹/۲۲ و ۲۷/۰۷ درصدی داشتند (شکل A-۴). در مقایسه میانگین نانوکود در ژنوتیپ نیز، بیشترین میانگین این صفت در کاربرد و عدم کاربرد نانوکود در ژنوتیپ دشتستان ۲ و در شرایط کاربرد نانوکود در دشتستان ۲ مشاهده شد (شکل B-۴).

به نظر می‌رسد الیسیاتور کیتوزان با فعال کردن و افزایش بیان ژن‌ها در مسیر بیوسنتز تولید کلروفیل به خوبی عمل کرده و میزان کلروفیل را افزایش داده است. در تأیید این مطالب، نتایج پژوهش‌های متعددی افزایش کلروفیل a, b, کل و کاروتنوئید در گیاه مختلف با محلول‌پاشی کیتوزان مشاهده گردید (Pongprayoon et al., 2013). این پژوهش‌گران دلایل افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی را

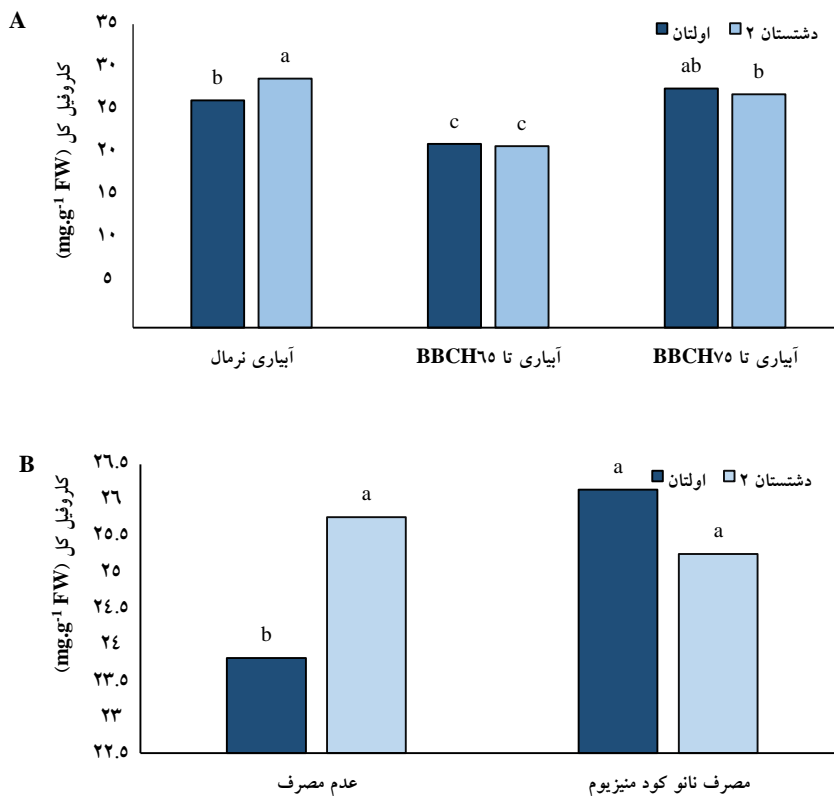
اثر کیتوزان و تنش خشکی در ژنوتیپ بر محتوی کلروفیل b معنی‌دار بودند (جدول ۲). کاربرد ۴/۸ گرم بر لیتر کیتوزان منجر به ایجاد بالاترین میانگین کلروفیل b شد و کاربرد ۶/۴ گرم بر لیتر کمترین میانگین این صفت را داشت. در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در ژنوتیپ، بیشترین میانگین این صفت در ژنوتیپ اولتان تحت شرایط آبیاری تا BBCH75 با میانگین ۹/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود و کمترین میانگین در رقم دشتستان ۲ تحت شرایط تنش شدید (آبیاری تا BBCH65) با میانگین ۵/۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر مشاهده شد (داده‌ها ارائه نشده است).

اثر تنش خشکی، کیتوزان، تنش خشکی در ژنوتیپ و نانوکود در ژنوتیپ بر محتوی کلروفیل کل معنی‌دار بودند (جدول ۲). بیشترین میانگین این صفت در ترکیب تیماری ژنوتیپ دشتستان ۲ تحت شرایط آبیاری نرمال

پاسخ‌های فیزیولوژیکی ارقام کنجد به کاربرد نانو منیزیم و پلیمر زیستی کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری

بر محتوی پرولین معنی‌دار بودند (جدول ۲). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود، بیش‌ترین محتوی پرولین در تیمار عدم کاربرد نانوکود منیزیم تحت شرایط تنش شدید (آبیاری تا ۶۵BBCH) با میانگین ۱/۶ میکرومول بر گرم وزن تر بود و کم‌ترین میانگین در تیمار عدم کاربرد نانوکود منیزیم تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین ۰/۸۲ میکرومول بر گرم وزن تر به‌دست آمد (شکل ۵-A). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در ژنوتیپ، آبیاری تا ۶۵BBCH در ژنوتیپ اولتان دارای بیش‌ترین محتوی پرولین با میانگین ۱/۶۶ میکرومول بر گرم وزن تر بود و کم‌ترین میانگین این صفت در تیمار آبیاری نرمال در هر دو ژنوتیپ دشتستان و اولتان مشاهده شد (شکل ۵-B).

افزایش فعالیت روبیسکو، کاهش فسفریلاسیون نوری و تغییر نسبت کلروفیل a به b در فتوسینتزم دو بیان داشتند. به‌طورکلی اولین واکنش گیاهان به کمبود منیزیم تأثیر بر میزان کلروفیل و فتوسنتز می‌باشد. در این رابطه کاهش غلظت کلروفیل کل در گونه‌های مختلف گیاهی در شرایط کمبود منیزیم توسط سایر پژوهش‌گران گزارش شده است (Ceppi *et al.*, 2012). کاهش در ظرفیت فتوسنتزی برگ‌ها در شرایط کمبود منیزیم، اساساً مربوط به کاهش هدایت روزنه‌ای یا افزایش مقاومت مزوفیل به  $CO_2$  و کاهش فعالیت آنزیم‌های درگیر در تثبیت  $CO_2$  و افزایش انباشت کربوهیدرات در برگ‌ها است (Yang *et al.*, 2012). اثر تنش خشکی، نانو منیزیم، کیتوزان، ژنوتیپ، و اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود و تنش خشکی در ژنوتیپ

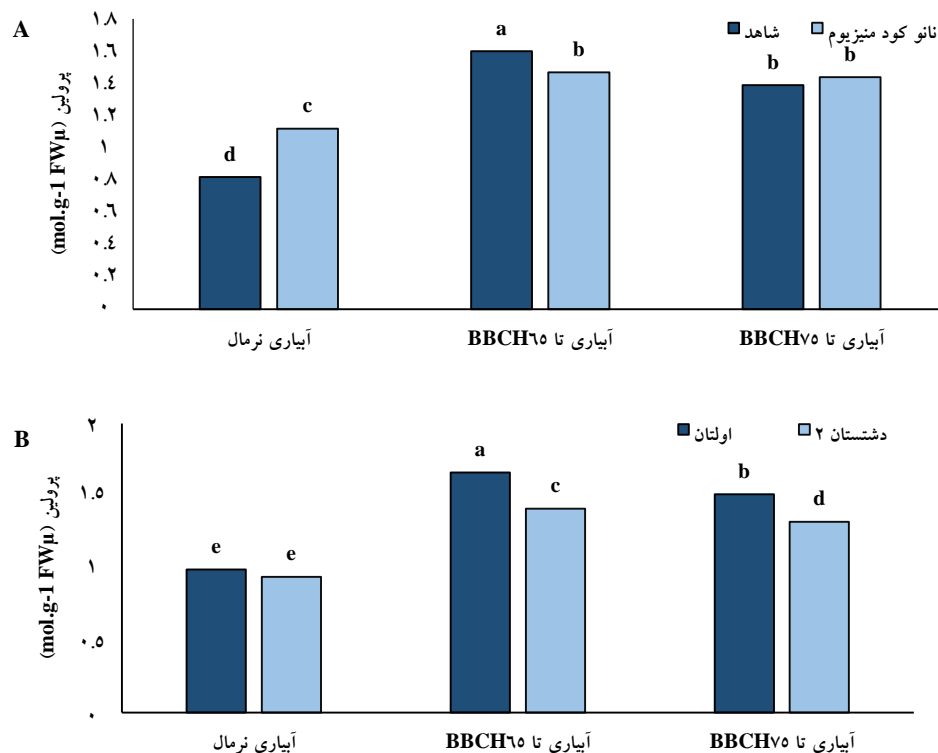


شکل ۴. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در ژنوتیپ (A) و نانوکود در ژنوتیپ (B) بر کلروفیل کل گیاه کنجد

تنش خشکی است. به نظر می‌رسد که تجمع پرولین در تنش‌های اسمزی نه تنها فعالیت‌های بیوشیمیایی را متوقف نمی‌کند، بلکه به‌عنوان یک محافظ اسمزی ایفای نقش می‌کند. پرولین دارای نقش محافظتی نیز می‌باشد، بدین صورت که در زمان تنش خشکی شدید از آسیب غشا و واسرشتگی (دنا تروه) پروتئین‌ها جلوگیری می‌کند و در زمان تغییر پتانسیل‌های اکسیداسیون- احیا مخزن  $NADP^+$  را بازسازی می‌کند (Liang *et al.*, 2013). تنش خشکی از دو راه باعث افزایش میزان پرولین می‌شود (۱) افزایش سنتز آنزیم‌هایی که تولید پرولین را تحریک می‌کنند، (۲) ممانعت از عمل آنزیم‌هایی که پرولین را تخریب می‌کنند. نتایج مشابهی درخصوص اثر کمبود آب در گیاهان کنجد و سیاه‌دانه نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش محتوای پرولین گردید (Dossa *et al.*, 2017).

افزایش مقدار پرولین به‌علت نقش این ماده در تنظیم و حفاظت اسمزی می‌باشد. در نتیجه هرچه مقدار این ماده بیش‌تر گردد تحمل گیاه در مقابل تنش‌های اسمزی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد تنش خشکی و کاهش آب در بافت‌های گیاهی سبب کاهش رشد، بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز، تحت تأثیر قرارگرفتن تنفس، تخریب پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و تجمع پرولین می‌شود. تداخل در متابولیسم سلولی گیاه با تجزیه پروتئین‌ها و هیدرات‌های کربن همراه خواهد بود. در این شرایط واکنش‌های هیدرولیتیکی افزایش یافته و پروتئین به اسیدهای آمینه تبدیل می‌شود (Sakata *et al.*, 2014).

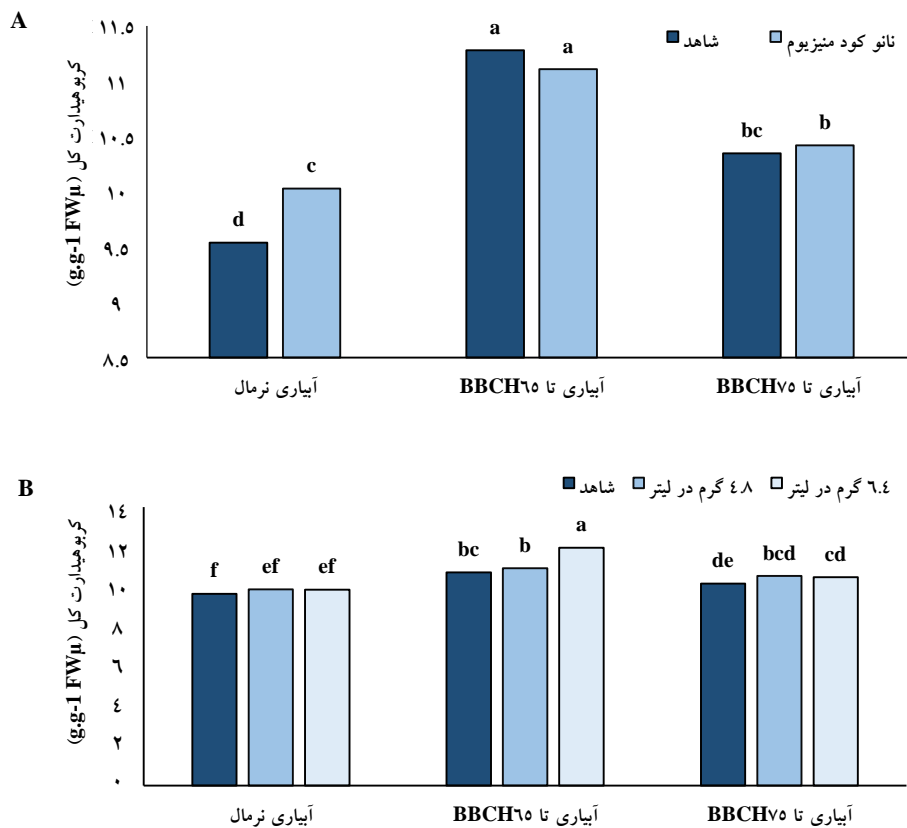
رقم دشتستان ۲ از میزان پرولین بیش‌تری نسبت به رقم اولتان در شرایط تنش برخوردار بود که این تفاوت در میزان پرولین بین دو رقم نشان‌دهنده پاسخ‌های متفاوت نسبت به



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در نانوکود منیزیم (A) و تنش خشکی در ژنوتیپ (B) بر محتوای پرولین گیاه کنجد

کیتوزان تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین ۹/۶۴ میکروگرم بر گرم وزن مشاهده شد (شکل B-۶). گیاهان و به‌خصوص آن‌هایی که در محیط‌های با تنش زیاد رشد می‌کنند، مجهز به سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدان آنزیمی و غیرآنزیمی هستند تا بتوانند گونه‌های اکسیژن فعال تولید شده را کنترل کنند اما با این حال با تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن ممکن است آسیب اکسیداتیو اتفاق بیفتد و دفاع آنتی‌اکسیدانی ناتوان باشد. در چنین شرایطی گیاه به‌منظور ادامه جذب آب از طریق تجمع ترکیبات اسمزی از جمله پرولین و کربوهیدرات‌های محلول، پتانسیل اسمزی خود را کاهش می‌دهد. قندهای محلول اسمولیت‌های مهمی هستند که افزایش آن در پاسخ به تنش مشاهده می‌گردد (Hernandez et al., 2004).

اثر تنش خشکی، کیتوزان، تنش خشکی در نانوکود منیزیم و تنش خشکی در کیتوزان بر محتوی کربوهیدرات کل معنی‌دار بودند (جدول ۲). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود منیزیم، بیش‌ترین میانگین این صفت در تیماری آبیاری تا BBCH۶۵ در هر دو تیمار کاربرد و عدم کاربرد نانوکود به‌ترتیب با میانگین ۱۱/۲۸ و ۱۱/۲۸ میکروگرم بر گرم وزن تر بود و کم‌ترین میانگین در تیمار عدم کاربرد نانوکود تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین ۹/۵۴ میکروگرم بر گرم وزن تر مشاهده شد (شکل A-۶). کاربرد ۶/۴ گرم بر لیتر کیتوزان تحت شرایط تنش شدید (آبیاری تا BBCH۶۵) منجر به ایجاد بیش‌ترین کربوهیدرات کل (۱۱/۹۵ میکروگرم بر گرم وزن تر) گردید و کم‌ترین میانگین در تیمار عدم کاربرد



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در نانوکود منیزیم (A) و تنش خشکی در کیتوزان (B) بر محتوی کربوهیدرات کل گیاه کنجد

اکسیداتیو و حفاظت از غشاهای کلروپلاستی، سلولی و حفاظت از ماکرومولکول‌هایی، نظیر پروتئین‌ها موجب افزایش میزان قندهای موجود در گیاهان می‌شود و قندها علاوه بر نقش‌های اصلی خود، در تنظیم اسمزی نیز به گیاهان کمک می‌کند (Kobayashi et al., 2013).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی، متقابل دوگانه و سه‌گانه و هم‌چنین اثر متقابل چهارگانه تنش خشکی در نانوکود منیزیم در کیتوزان در ژنوتیپ بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بودند (جدول ۲). بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز در ترکیب تیماری عدم کاربرد نانوکود منیزیم و کیتوزان و هم‌چنین کاربرد  $6/4$  گرم بر لیتر کیتوزان در ژنوتیپ اولتان تحت شرایط تنش شدید خشکی (آبیاری تا ۶۵BBCH) به ترتیب با میانگین  $5/34$  و  $5/33$  واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بود. هم‌چنین کاربرد نانوکود منیزیم به همراه  $6/4$  گرم بر لیتر در ژنوتیپ اولتان تحت شرایط تنش شدید خشکی با میانگین  $5/25$  واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه نیز بیش‌ترین فعالیت این آنزیم را نشان داد.

کم‌ترین فعالیت این آنزیم در عدم کاربرد نانوکود و کیتوزان و هم‌چنین کاربرد  $4/8$  گرم بر لیتر کیتوزان در ژنوتیپ اولتان تحت شرایط آبیاری نرمال به ترتیب با میانگین  $0/64$  و  $0/72$  واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه به دست آمد (جدول ۳).

کاتالاز یکی از آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی است که واکنش‌های زنجیره‌ای رادیکال‌های آزاد را متوقف و با حذف پراکسید هیدروژن از گیاهان در برابر تنش اکسیداتیو محافظت می‌کند. فعالیت آنزیم کاتالاز از این جهت افزایش یافت تا به عنوان اسمولیت سازگار و آنزیم ضد ROSها، ضمن محافظت از ماکرومولکول‌ها و غشاهای سلول، آسیب‌های ناشی از ROSها که در اثر تنش خشکی به وجود آمده را خنثی کنند (Chakraborty & Pradhan, 2012).

در بررسی‌های انجام‌شده روی گیاه نخود و گلرنگ افزایش قندهای محلول با محلول‌پاشی کیتوزان گزارش شده است. هم‌چنین محلول‌پاشی کیتوزان در شرایط تنش باعث افزایش قندهای محلول در گیاهچه‌های سویا گردید (Bistgani et al., 2017)، که همگی نتایج به دست‌آمده از پژوهش حاضر را تأیید می‌نمایند. پژوهش‌گران بر این باورند که افزایش محتوای قندهای محلول تحت تیمار کیتوزان احتمالاً به دلیل هیدرولیز نشاسته و افزایش قندهای محلول حاصل از آن است (Bistgani et al., 2017).

در مجموع افزایش قندهای محلول در طی تنش خشکی را می‌توان به این دلایل توجیه کرد ۱- تخریب کربوهیدرات‌های نامحلول که منجر به افزایش قندهای محلول می‌شود، ۲- سنتز این ترکیبات از مسیرهای غیرفتوستنتزی، ۳- متوقف‌شدن رشد. تنش آبی منجر به افزایش محتوای قندهای محلول در گونه‌های مختلف گیاهی گردید (Nohong & Nampo, 2015).

با استفاده از نانوذرات و نانوپودرها می‌توان کاربرد کودها را کنترل‌شده‌تر و آزادسازی عناصر را با تأخیر زمانی مطلوبی فراهم نمود (Naderi & Abedi, 2012). منیزیم نقش ویژه‌ای در فعال‌کردن آنزیم تجزیه‌کننده آدنوزین تری فسفات (ATP-as) دارد، این آنزیم انرژی لازم برای بارگیری ساکارز را تأمین می‌کند. کمبود این عنصر باعث کاهش میزان قندهای محلول، افزایش تولید ROS، کاهش در تعلق و تجمع قند و هم‌چنین کلرز را در پی دارد (Naderi & Abedi, 2012). در بررسی تأثیر محلول‌پاشی منیزیم روی برگ‌های گیاه سویا، منیزیم باعث افزایش قندهای محلول و پروتئین برگ‌ها شد (Kobayashi et al., 2013). غلظت بالای کربوهیدرات‌ها باعث کاهش خسارت‌های اکسیداتیو و حفظ ساختار پروتئین در طی کمبود آب محسوب می‌شود. به نظر می‌رسد که برخی از نانوکودها با افزایش رنگیزه‌های فتوستنتزی، کاهش تنش

پاسخ‌های فیزیولوژیکی ارقام کنگد به کاربرد نانو منیزیم و پلیمر زیستی کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل چهارگانه تنش خشکی در نانوکود منیزیم در کیتوزان در ژنوتیپ بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز

آبیاری	نانوکود منیزیم	کیتوزان	ژنوتیپ	کاتالاز (واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)
آبیاری نرمال	شاهد	شاهد	اولتان	o ۰/۶۴
			دشتستان ۲	no ۰/۸۷
	شاهد	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	o ۰/۷۲
			دشتستان ۲	mno ۱/۰۳
	مصرف نانوکود منیزیم	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	i-m ۱/۹۶
			دشتستان ۲	h-m ۲/۰۲
	شاهد	شاهد	اولتان	k-o ۱/۵۴
			دشتستان ۲	j-n ۱/۷۳
	مصرف نانوکود منیزیم	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	l-o ۱/۳۳
			دشتستان ۲	l-o ۱/۳۱
شاهد	۶/۴ گرم در لیتر	اولتان	i-n ۱/۸۲	
		دشتستان ۲	i-n ۱/۸۲	
آبیاری تا ۶۵ BBCH	شاهد	شاهد	اولتان	a ۵/۳۴
			دشتستان ۲	cd ۳/۹۸
	شاهد	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	cde ۳/۸۲
			دشتستان ۲	e-h ۲/۹۵
	مصرف نانوکود منیزیم	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	a ۵/۳۳
			دشتستان ۲	ab ۵/۰۶
	شاهد	شاهد	اولتان	c-f ۳/۴۵
			دشتستان ۲	cd ۴/۰۷
	مصرف نانوکود منیزیم	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	h-k ۲/۳۳
			دشتستان ۲	d-g ۳/۲۵
شاهد	۶/۴ گرم در لیتر	اولتان	a ۵/۲۵	
		دشتستان ۲	bc ۴/۲۴	
آبیاری تا ۷۵ BBCH	شاهد	شاهد	اولتان	f-i ۲/۸۱
			دشتستان ۲	i-n ۱/۸۲
	شاهد	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	h-l ۲/۰۸
			دشتستان ۲	l-o ۱/۳۱
	مصرف نانوکود منیزیم	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	d-g ۳/۱۷
			دشتستان ۲	f-j ۲/۷۲
	شاهد	شاهد	اولتان	f-k ۲/۵۳
			دشتستان ۲	h-l ۲/۰۵
	مصرف نانوکود منیزیم	۴/۸ گرم در لیتر	اولتان	i-m ۱/۹۵
			دشتستان ۲	l-o ۱/۲۱
شاهد	۶/۴ گرم در لیتر	اولتان	f-j ۲/۶۱	
		دشتستان ۲	g-k ۲/۴۸	

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشابه، از نظر آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت غیرمعنی‌دار دارند.

می‌کند کمبود اکسیژن حاصل از واکنش مهلر را نیز جبران می‌کند. بنابراین ارتباط بین تحمل به خشکی در اثر اعمال  $Mg^{2+}$  با فعالیت کاتالاز ممکن است علاوه بر نقش ضد اکسندگی آن، به نحوه عمل این آنزیم در کاهش تنفس نوری نیز مرتبط باشد. از آنجایی که تجزیه پروتئین و غشاهای سلولی موجب مرگ سلولی می‌گردد می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر افزایش غلظت  $Mg^{2+}$  منجر به حفاظت غشاهای پروتئین شده و در نتیجه مرگ سلول را به تأخیر می‌اندازد. منیزیم باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز گردید. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی با محلول‌پاشی منیزیم توسط سایر پژوهش‌گران مشاهده گردید (Djabou et al., 2018).

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی، کیتوزان، ژنوتیپ، تنش خشکی در نانوکود، تنش خشکی در کیتوزان و تنش خشکی در ژنوتیپ بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار بودند (جدول ۲). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود منیزیم، بیش‌ترین فعالیت در عدم کاربرد نانوکود تحت شرایط تنش شدید خشکی (آبیاری تا ۶۵BBCH) با میانگین ۴/۴۲ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه بود که در مقایسه با تیمار شاهد افزایش ۷۲/۶ درصدی گردید. کم‌ترین فعالیت در تیمار عدم کاربرد نانوکود تحت شرایط آبیاری نرمال با میانگین ۱/۲۱ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بود (شکل A-۷). کاربرد ۴/۸ گرم بر لیتر کیتوزان تحت شرایط تنش شدید خشکی با میانگین ۹/۰۹ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بیش‌ترین فعالیت این آنزیم را داشت که در مقایسه با تیمار شاهد افزایش ۸۶/۹ درصدی نشان داد و کم‌ترین میانگین در تیمار عدم کاربرد و کاربرد ۴/۸ گرم بر لیتر کیتوزان تحت شرایط آبیاری نرمال مشاهده شد (شکل B-۷). تنش خشکی شدید (آبیاری تا ۶۵BBCH) در هر دو ژنوتیپ دارای بیش‌ترین فعالیت این آنزیم بود و کم‌ترین

در این مطالعه بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز در رقم اولتان و شرایط تنش شدید به دست آمد. به نظر می‌رسد که ROSها به عنوان سیگنال‌های سلولی عمل کرده، باعث تحریک ساخت و یا افزایش مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله کاتالاز در گیاه کنگد شده و گیاه به این روش از خود حفاظت می‌کند. در این خصوص پژوهش‌گران در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در واریته‌های مقاوم به خشکی افزایش بیش‌تری نسبت به واریته‌های حساس دارند (Sun et al., 2013).

پژوهش‌گران توضیح دادند که محلول‌پاشی کیتوزان میزان پروتئین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را در گیاه کنگرفرنگی نسبت به شاهد به‌طور فراوانی افزایش داد (Saif Eldeen et al., 2014). نقش کیتوزان بر افزایش محتوای یونی ممکن است منجر به تأثیر پایداری غشای سلولی در خلال افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها و حفظ غشای سلولی از تنش اکسیداتیو شود که منجر به بهبود رشد گیاه می‌گردد (Saif Eldeen et al., 2014). رابطه مثبت بین محلول‌پاشی کیتوزان و افزایش محتوای پروتئین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مشاهده گردیده است (Sultana et al., 2017). کیتوزان مکانیسم‌های دفاعی چندین گونه گیاهی را تحریک کرده است. در مطالعات متعددی محلول‌پاشی کیتوزان باعث کاهش صدمات ناشی از تنش خشکی و افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان در گیاهان مختلف گردید (Aghighi Shahverdi et al., 2017; Zong et al., 2017).

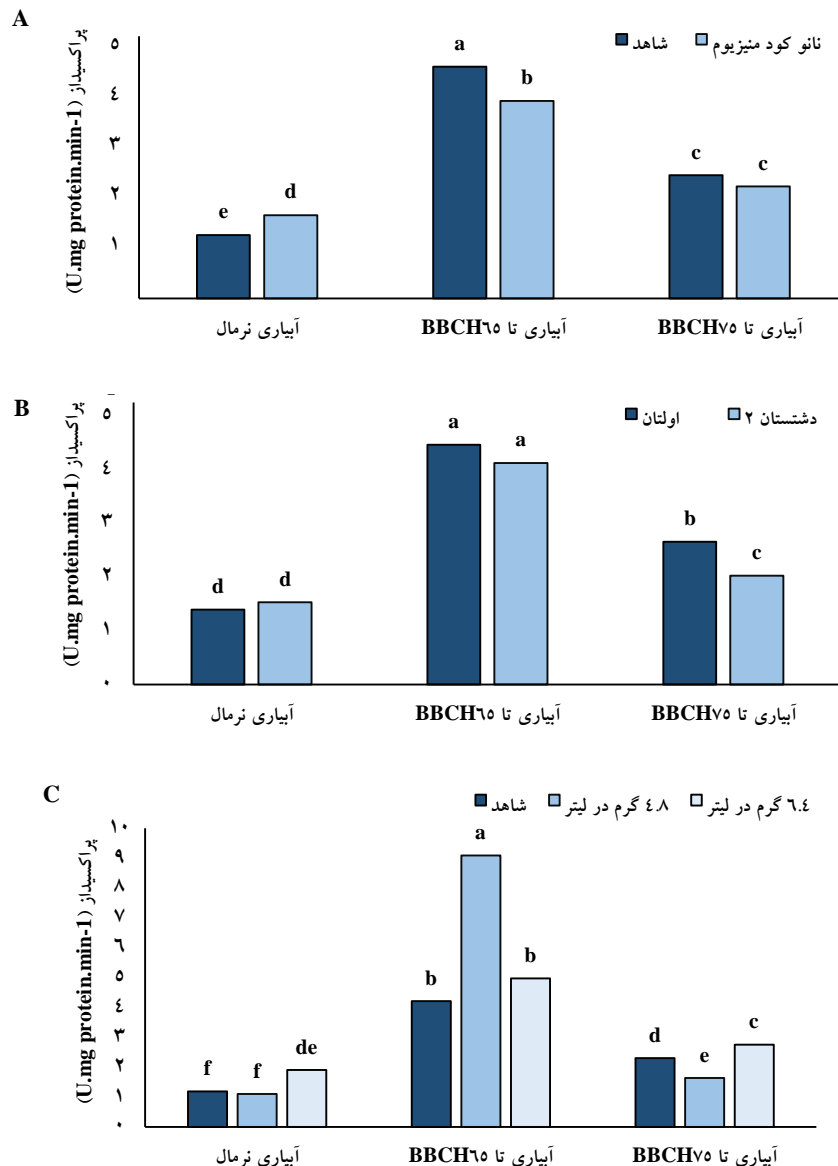
کاربرد منیزیم باعث افزایش محتوای پرولین و افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز و کاتالاز در گیاه کنگد گردید. آزمایشی روی گیاهچه‌های برنج نشان داد که میزان فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز در شرایط کمبود منیزیم از تیمار شاهد بیش‌تر بود (Chou et al., 2011). کاتالاز علاوه بر این که  $H_2O_2$  را از محیط حذف



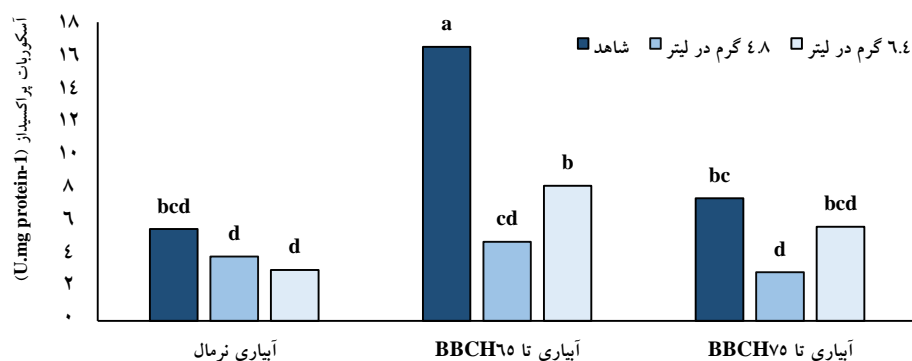
پاسخ‌های فیزیولوژیکی ارقام کنجد به کاربرد نانو منیزیم و پلیمر زیستی کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری

پروتئین‌های غنی از هیدروکسی، پرولین موجود در دیواره سلولی، اتصال عرضی پلی‌ساکاریدهای پکتیکی به وسیله اسیدهای فنولیک در دیواره سلولی و عمل چوبی شدن و چوب‌پنبه‌ای شدن مربوط دانست (Alban *et al.*, 2015). هم‌چنین افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در اثر کمبود آب در کلزا مشاهده شده است (Lotfi *et al.*, 2015).

فعالیت در تیمار آبیاری نرمال در هر دو ژنوتیپ مشاهده شد (شکل C-۷). آنزیم پراکسیداز به‌عنوان جمع‌کننده  $H_2O_2$  سبب افزایش تحمل به تنش اکسیداتیو می‌شود. افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ کنجد در این مطالعه را می‌توان به دخالت این آنزیم در تعدادی از فرآیندهای سلولی مانند سازوکار دفاعی میزبان، اتصال عرضی مونومرهای گلیکو،



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در ژنوتیپ (A)، تنش خشکی در ژنوتیپ (B) و تنش خشکی در کیتوزان (C) بر فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاه کنجد



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در کیتوزان بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گیاه کنجد

با صفات کلروفیل a، b و کل همبستگی مثبت و معنی دار و با صفات محتوی پرولین و فعالیت آنزیم کاتالاز همبستگی منفی و معنی دار داشت. کلروفیل کل با محتوی پرولین، کربوهیدرات کل، کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز همبستگی منفی و معنی دار نشان داد (جدول ۴).

به منظور تعیین اهمیت صفات فیزیولوژیکی در تغییرات مربوط به عملکرد دانه، تجزیه رگرسیون گام به گام که در آن عملکرد دانه به عنوان صفت وابسته و صفات کلروفیل a، b و کل، محتوی پرولین، کربوهیدرات و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که چهار صفت کلروفیل b، کلروفیل کل، پرولین و کاتالاز وارد مدل شدند که در مجموع ۴۲/۱۱ درصد از تغییرات دانه را توجیه نمودند (جدول ۵). نتایج حاصل از تجزیه رگرسیونی، هم راستا با یافته های تجزیه همبستگی بود. ضریب همبستگی پایین صفات وارد شده به مدل به عملکرد دانه تأییدی بر داده های حاصل است. به طور کلی، صفات فیزیولوژیکی اثر مستقیمی بر عملکرد دانه نداشته و بیش تر تغییرات حاصل از فرآیندهای فیزیولوژیکی به طور غیرمستقیم بر عملکرد دانه تأثیر داشتند. هم چنین از بین صفات فیزیولوژیکی، رنگیزه های فتوسنتزی از اهمیت بالایی تحت شرایط تنش برخوردار بودند.

مهارکردن اثرات مخرب تنش اکسیداتیو در درجه اول باید توسط افزایش میزان آنزیم های آنتی اکسیدان در بافت صورت گیرد. به نظر می رسد نقش کیتوزان در افزایش محتوی یونی ممکن است منجر به تأثیر پایداری غشای سلولی در خلال افزایش آنتی اکسیدان ها و حفظ آن از تنش اکسیداتیو شود. در آزمایشی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در شرایط قطع آبیاری در گیاه کنجد افزایش یافت (Dossa et al., 2017).

افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان و یا رونویسی آنها مانند کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز به وسیله تیمار کیتوزان مشاهده شدند که با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر مطابقت داشت. مکانیسم عمل کیتوزان ممکن است به واسطه حضور تعداد زیادی از هیدروکسیل و گروه آمینو اسیدها در واکنش به ROSها باشد (Povero et al., 2011).

کیتوزان می تواند با کلاته کردن یون های فلزی یا ترکیب شدن با لیپیدها، اکسیداسیون لیپیدها را کاهش دهد. در این پژوهش کیتوزان باعث افزایش فعالیت آنزیم آنتی اکسیدان گردید که پژوهش گران کاهش تولید رادیکال های آزاد و پراکسیداسیون لیپیدی در زمان تنش با محلول پاشی کیتوزان را گزارش نمودند (Malik & Ashraf, 2012).

بر اساس نتایج همبستگی ساده بین صفات، عملکرد دانه

پاسخ‌های فیزیولوژیکی ارقام کنجد به کاربرد نانو منیزیم و پلیمر زیستی کیتوزان تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری

جدول ۴. همبستگی ساده بین صفات مورد مطالعه در ارقام کنجد تحت تأثیر تنش خشکی و محلول‌پاشی نانوکود و کیتوزان

عملکرد دانه	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	پرولین	کربوهیدرات کل	کاتالاز	پراکسیداز
کلروفیل a	۰/۳۶*						
کلروفیل b	۰/۴۰*	۰/۰۶ns					
کلروفیل کل	۰/۴۶*	۰/۷۱**	۰/۷۵**				
پرولین	۰/۰۵۴**	۰/۳۲*	۰/۲۰ns	۰/۳۶*			
کربوهیدرات کل	۰/۰۲۳ ns	۰/۲۹ns	۰/۳۴*	۰/۴۴*	۰/۶۳**		
کاتالاز	۰/۰۵۱**	۰/۳۶*	۰/۱۶ ns	۰/۳۵*	۰/۶۹**	۰/۴۱*	
پراکسیداز	۰/۰۲۵ ns	۰/۴۳*	۰/۵۱**	۰/۶۵**	۰/۶۱**	۰/۵۳**	
آسکوربات پراکسیداز	۰/۰۲۸ ns	۰/۳۹*	۰/۳۳*	۰/۴۹**	۰/۲۹ns	۰/۲۲ns	۰/۵۳**

ns و \*\* به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۵. مراحل رگرسیون گام به گام برای عملکرد دانه به‌عنوان متغیر وابسته و سایر صفات به‌عنوان متغیر مستقل

صفات وارد شده به مدل	ضرایب	SE Coef	T-Value	P-Value
عدد ثابت	۱۳۷۷	۲۶۰	۵/۲۹	۰/۰۰۰
کلروفیل b	-۴۱/۰	۱۲/۳	-۳/۳۳	۰/۰۰۱
کلروفیل کل	۱۷/۲۵	۹/۹۷	۱/۷۳	۰/۰۸۷
پرولین	-۴۴/۶	۱۱۵	-۳/۸۷	۰/۰۰۰
کاتالاز	-۵۰/۸	۲۰/۵	-۲/۴۸	۰/۰۱۵

R-Sq(adj)= 42.11%

Y= 1377 -41.0 X1 + 17.25 X2 -44.6 X3 -50.8 X4

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده حاکی از اثر معنی‌دار تنش خشکی و محلول‌پاشی کیتوزان و نانوکود منیزیم بر عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی دو رقم کنجد بود. تنش خشکی شدید (آبیاری تا ۶۵BBCH) منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه شد، ولی محلول‌پاشی نانوکود منیزیم و الیسیتور کیتوزان با بهبود پارامترهای فیزیولوژیکی به‌صورت غیرمستقیم منجر به تعدیل اثرات منفی تنش گردید. نتایج نشان داد که از پارامترهای فیزیولوژیکی مورد مطالعه، نقش رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش برای تولید عملکرد دانه بسیار مهم بوده و شاخص‌تر از سایر پارامترهاست که اهمیت آن در ژنوتیپ متحمل‌تر بسیار برجسته می‌باشد.

#### ۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۶. منابع

- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods Enzymol*, 105, 121-126.
- Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H., & Mousavi, S. E. (2017). Effect of chitosan on seed germination and biochemical traits of milk thistle (*Silybum marianum*) seedling under salt stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 3(2), 105-118. (In Persian)
- Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H., & Tabatabaei, S. J. (2019). Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) responses to NaCl stress: Growth, photosynthetic pigments, diterpene glycosides and ion content in root and shoot. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 355-360.

- Alinejad, S., Sarabi, V., Sadeghi Bakhtvari, A. R., & Hashempour, H. (2020). Variation in physiological traits, yield and secondary metabolites of jimsonweed (*Datura stramonium* L.) under different irrigation regimes and nutrition systems. *Industrial Crops and Productions*, 143, 1-8.
- Alaviasl, S. A., Mansourifar, S., Modaresanavi, S. A. M., Asilan, K., Tabatabaei, S. A., & Moradi Ghahridjani, M. (2016). Effect of chitosan and zeolite on growth and yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) under different irrigation conditions in Yazd. *Environmental Stresses in Crop Science*, 9(2), 163-172. (In Persian).
- Alban, M. K. A., Spshara, S. E., Hebbbar, K. B., Mathias, T. G., & Severin, A. (2015). Potential of antioxidant enzymes in depicting drought tolerance in COCOA (*Theobroma cacao* L.) genotypes at young Age. *African Journal of Science and Research*, 4(5), 18-23.
- Ali, M. B., & El-Sadek, A. N. (2016). Evaluation of drought tolerance indices for wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigated and rainfed conditions. *Communications in Biometry and Crop Science*, 11(1), 77-89.
- Amiri, A., Sirosmehr, A., & Esmaeilzadeh Behabadi, S. (2016). Effect of foliar application of salicylic acid and chitosan on yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Plant Researches*, 28(4), 712-725. (In Persian).
- Attibayéba, Nsika-Mikoko, E., Kounkou, N., Sérina, J., Galet, J., Dianga, C., & Mandoukou-Yembi, F. (2010). Description of different growth stages of (*Sesamum indicum* L.) using the extended BBCH scale. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9(3), 235-239.
- Bates, L. S., Waldern, R. P., & Teave, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Bistgani, Z. E., Siadat, S. A., Bakhshandeh, A., Pirbalouti, A. G., & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of thymus daenesis Celak. *The Crop Journal*, 5(5), 407-415.
- Blasco, B., Graham, N. S., & Broadley, M. R. (2015). Antioxidant metabolism in *Brassica rapa* exposed to different external Zn, Ca, and Mg supply. *Journal of Plant Physiology*, 176, 16-24.
- Cakmak, I., & Kirkby, E. A., (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photo oxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 133, 692-704.
- Ceppi, M. G., Oukarroum, A., Cicek, N., Strasser, R. J., & Schansker, G. (2012). The IP amplitude of the fluorescence rise OJIP is sensitive to changes in the photosystem I content of leaves: a study on plants exposed to magnesium and sulfate deficiencies, drought stress and salt stress. *Physiologia Plantarum*, 144(3), 277-288.
- Chakraborty, U., & Pradhan, B. (2012). Oxidative stress in five wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) exposed to water stress and study of their antioxidant enzyme defense system, water stress responsive metabolites and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> accumulation. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 24(2), 117-130.
- Chance, B., & Maehly, A. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods Enzymology*, 2, 764-817.
- Chou, T. S., Chao, Y. Y., Hung, W. D., Hong, Y. C., & Kao, C. H. (2011). Effect of magnesium deficiency on antioxidant status and cadmium toxicity in rice seedlings. *Plant Physiology*, 168(10), 1021-1030.
- Chowdhury, S., Datte, A. K., Saha, A., & Maity, S. (2009). Radiation induced two oil rich mutants in sesame. *Indian Journal Science Technology*, 2(7), 51-51.
- Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-Scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 53.
- Din, J., Khan, S. U., Ali, I., & Gurmani, A. R. (2011). Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 21(1), 78-82.
- Djabou, A. S. M., Qin, Y., Thaddee, B., Figueiredo, P. G., Feifei, A., Carvalho, L. J. C. B., Omokolo, D. N., Li, K., Niemenak, N., & Chen, S. (2018). Effects of calcium and magnesium fertilization on antioxidant activities during cassava postharvest physiological deterioration. *Crop Science*, 57, 1385-1392.
- Dossa, K., Yehouessi, L. W., Ngue, B. C. L. L., Diof, D., Liao, B., Zhang, X., Cisse, N., Bell, J. M. (2017). Comprehensive screening of some west and central African sesame genotypes for drought resistance probing by agromorphological, physiological, biochemical and seed quality traits. *Agronomy*, 7(4), 83.
- Doupis, G., Bertaki, M., Psarras, G., Kasapakis, I., & Chartzoulakis, K. (2013). Water relations, physiological behavior and antioxidant defense mechanism of olive plants subjected to different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, 153, 150-156.
- Hernandez, I., Alegre, L., & Munne-Bosch, S. (2004). Drought-induced changes in flavonoids and other low molecular weight antioxidants in *Cistus clusii* grown under Mediterranean field conditions. *Tree Physiology*, 24, 1303-1311.

- Hossain, A., Sarker, M. A. Z., Hakim, M. A., Islam, M. T., & Ali, M. E. (2011). Effect of lime, magnesium and boron on Wheat (*Triticum aestivum* L.) and their residual effects on Mungbean (*Vigna radiate* L.). *Journal of Agricultural Research Innovation and Technology*, 1(1-2), 9-15.
- Irrigoyen, J. H., Emerich, D. W., & Sanchez Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentration of proline and total msoluble sugars in nodulated alfalfa (*medicago*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55-66.
- Kashyap, P. L., Xiang, X., & Heiden, P. (2015). Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 36-51.
- Kobayashi, N. I., Saito, T., Iwata, N., Ohmae, Y., Iwata, R., Tanoi, K., & Nakanishi, T. M. (2013). Leaf senescence in rice due to magnesium deficiency mediated defect in transpiration rate before sugar accumulation and chlorosis. *Journal of Physiologia Plantarum*, 148(4), 490-501.
- Koch, E., Dittmann, E., Lipa, W., Menzel, A., Necovar, J., Van Vlieth, A., & Zach, S. (2007). COST Action 725. Applications: Overview and erste ergebnisse. Proceedings of the Meteorologentagung, DACH 2007 Hamburg, 10-14 September. COST 725, <http://top-share.wur.nl/cost725>.
- Liang, X., Zhang, L., Natarajan, S. K., & Becker, D. F. (2013). Proline mechanisms of stress survival. *Journal of Antioxidants and Redox Signaling*, 19, 998-1011.
- Lotfi, R., Pesarakli, M., Gharavi-Kouchebagh, P., & Khoshvaghti, H. (2015). Physiological responses of *Brassica napus* to fulvic acid under water stress: Chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activity. *The Crop Journal*, 3(5), 434-439.
- Mahdavi, A., Sinaki, J. M., Amini Dehaghi, M., Rezvan, S., & Damacandi, A. (2018). Effect of nano, chemical, and biological fertilizers on the yield and quality of sesame seeds under different irrigation regimes. *Journal of Crops Improvement*, 20(1), 263-281.
- Malik, S., & Ashraf, M. (2012). Exogenous application of ascorbic acid stimulates growth and photosynthesis of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought. *Soil and Environment*, 31(1), 72-77.
- Mondal, M. M., Malek, M. A., Puteh, A. B., Ismail, M. R., & Ashrafuzzaman, M. (2012). Effect of foliar application of chitosan on growth and yield in okra. *Australian Journal of Crop Science*, 6(5), 918-921.
- Naderi, M. R., & Abedi, A. (2012). Application of nanotechnology in agriculture and refinement of environmental pollutants. *Nanotechnology Journal*, 11(1), 18-26.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascarbate specific peroxidases in spinach Chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, 22, 867-880.
- Nohong, B., & Nompo, S. (2015). Effcet of water stress on growth, yield, proline and soluble sugars contents of signal grass and Napier grass species. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 9(5), 14-21.
- Parvaiz, A., & Satyawati, S. (2008). Salt stress and phyto-biochemical of plants. A review. *Journal of Plant Soil and Environment*, 54(3), 89-99.
- Pongprayoon, W., Roytrakul, S., Pichyangkura, R., & Chadchawan, S. (2013). The role of hydrogen peroxide in chitosan induced resistance to osmotic stress in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Growth Regulation*, 70(2), 159-173.
- Povero, G., Loreti, E., Pucciariello, C., Santaniello, A., Tommaso, D. D., Tommaso, G. D., Kapetis, D., Zolezzi, F., Piaggese, A., & Perata, P. (2011). Transcript profile of chitosan-treated Arabidopsis seedling. *Journal of Plant Research*, 124, 619-629.
- Roul, B., Mishra, B. K., & Prusty, N. (2017). Natural effect of micronutrient on growth and growth parameter of sesame oilseed crop. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(5): 1926-1928.
- Saif Eldeen, U. M., Shokr, M. M. B., & EL Shotoury, R. S. (2014). Effects of foliar spry with seaweeds extract and chitosan on earliness and productivity of globe artichoke. *Plant Production*, 5(7): 1197-1207.
- Sakata, Y., Komatsu, K., & Takezawa, D. (2014). ABA as a universal plant Hormone. *Progress in Botany*, 75, 57-96.
- Sheikha, S. A. A. K., & AL-Malki, F. M. A. (2011). Growth and chlorophyll response of Bean plants to the chitosan application. *European Journal of Scientific Research*, 50(1), 124-134.
- Subramanian, K.S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M., & Sharmila Rahale, C. (2015). Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. *Nanotechnologies in Food and Agriculture*, 12, 69-80.
- Sultana, S., Islam, M., Khatun, M. A., Hassain, M. A., & Huque, R. (2017). Effect of foliar application of oligo-chitosan on growth, yield and quality of Tomato and Eggplant. *Asian Journal of Agriculture Research*, 11(2), 36-42.

- Sun, J., Gu, J., Zeng, J., Han, S., Song, A., Chen, F., Fang, W., Jiang, J., & Chen, S. (2013). Changes in leaf morphology, antioxidant activity and photosynthesis capacity in two different drought-tolerant cultivars of chrysanthemum during and after water stress. *Scientia Horticulturae*, 161, 249-258.
- Taha, R. S. (2016). Magnesium and phosphorien application improve the efficiency of growth and productivity of squash (*Cucurbita pepo* L.) plants grown on a sandy calcareous soil. *Journal of Advanced Botany and Zoology*, 4(1), 1-6.
- Yang, G. H., Yang, L. T., Jiang, H. X., Li, Y., Wang, P., & Chen, L. S. (2012). Physiological impacts of magnesium-deficiency in Citrus seedlings: photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates. *Trees-Structure and Function*, 26(4), 1237-1250.
- Zarei, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., & Damavandi, A. (2018). Changes in physiological traits and fatty acid composition in Sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars under various foliar application and drought stress condition. *Applied Ecology and Environment Research*, 16(5), 6927-6944.
- Zong, H., Liu, S., Xing, R., Chen, X., & Li, P. (2017). Protective effect of chitosan on photosynthesis and antioxidative defense system in edible rape (*Brassica rapa* L.) in the presence of cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 138, 271-278.