بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده کشاورزی

رساله دکتری مهندسی زراعت

# اثرات مصرف بیوچار بر حاصلخیزی خاک، تحمل به خشکی، رشد و مواد موثره گیاه دارویی سیاه دانه


نگارنده: فاطمه عباس‌پور

**اساتید راهنما**

دکتر حمیدرضا اصغری

دکتر پرویز رضوانی‌مقدم

**اساتید مشاور**

دکتر حمید عباسدخت

دکتر جواد شباهنگ

دکتر عادل بیگ بابایی


مهر ۱۳۹۷

شماره: ۴۹۴۳ / د
تاریخ: ۱۳۹۷/۸/۰۵
ویرایش:

**باسمه تعالی**

دانشگاه صنعتی شاهرود
**مدیریت تحصیلات تکمیلی**

## فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود خانم فاطمه عباس پور دانشجوی دکتری رشته مهندسی کشاورزی- اکولوژی گیاهان زراعی به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۹۸۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۷/۷/۸ از رساله **نظری / عملی** خود با عنوان : **اثرات مصرف بیوچار بر حاصلخیزی خاک، تحمل به خشکی، رشد و مواد موثره گیاه دارویی سیاه دانه** دفاع و با اخذ نمره ......۱۹/۲۰...... به درجه : ......عالی...... نائل گردید.

| | |
|---|---|
| الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ | ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ |
| ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹– ۱۵ | د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد |
| ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد | |

| ردیف | هیئت داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---|---|---|---|---|
| ۱- | دکترحمیدرضا اصغری | استاد راهنما | دانشیار | |
| ۲- | دکتر پرویز رضوانی مقدم | استاد راهنما | استاد | |
| ۳- | دکتر حمید عباسدخت | استاد مشاور | دانشیار | |
| ۴- | دکتر جواد شباهنگ | استاد مشاور | استادیار | |
| ۵- | دکتر عادل بیگ بابایی | استاد مشاور | استادیار | |
| ۶- | دکتر محمدرضا عامریان | استاد مدعو داخلی | دانشیار | |
| ۷- | دکتر احمد غلامی | استاد مدعو داخلی | دانشیار | |
| ۸- | دکتر خدایار همتی | استاد مدعو خارجی | دانشیار | |
| ۹- | دکتر حسن مکاریان | سرپرست ( نماینده ) تحصیلات تکمیلی دانشکده | دانشیار | |

---

**مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:**

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم فاطمه عباس پور بعمل آید.

**نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده : دکتر محمدرضا عامریان**

**تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:**

تقدیم به یگانه یاوران زندگیم

مادر مهربانم

پدر بزرگوارم

همسر عزیزم

تقدیم به فرزندان دلبندم

زهرا و زینب

## تشکر و قدردانی

حمد و سپاس یکتای بی همتا را که لطفش بر ما عیان است، ادای شکرش را هیچ زبان و دریای فضلش را هیچ کران نیست و اگر در این وادی هستیم، همه محبت اوست.

سپاس بیکران بر همدلی، همراهی و همگامی مادر دلسوز، مهربان و پدر بزرگوارم که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم و تکیه گاه مشکلاتم بودند و تشکر و قدردانی ویژه از همسرم که در تمامی مراحل اجرا و تدوین این اثر از حمایتهای همه جانبه ایشان برخوردار بودم.

سپاس و قدردانی خویش را از زحمات اساتید محترم و گرانقدرم جناب آقای دکتر حمیدرضا اصغری و جناب آقای دکتر پرویز رضوانی مقدم که با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند، ابراز می دارم

از زحمات بی دریغ و مشاورت های ارزشمند اساتید گرامی جناب آقای دکتر حمید عباسدخت، جناب آقای دکتر جواد شباهنگ و جناب آقای دکتر عادل بیک بابایی که با نظرات شیوا و راه گشایشان بر غنای علمی این تحقیق افزودند، تشکر و قدردانی می نمایم.

از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر محمدرضا عامریان، جناب آقای دکتر احمد غلامی و جناب آقای دکتر خدایار همتی که با لطف بی دریغ شان زحمت داوری این رساله را متقبل شدند، همچنین از جناب آقای دکتر حسن مکاریان که زحمت هدایت جلسه دفاع از رساله را بر عهده گرفتند، سپاسگزارم.

از کارشناسان محترم موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی و پرسنل مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد بویژه جناب آقای مهندس سید جلیل داورپناه به خاطر کمک های بی دریغ شان صمیمانه سپاسگزاری می کنم.

از مساعدتهای بی دریغ دوست خوبم خانم دکتر عصمت محمدی صمیمانه قدردانی می نمایم.

# تعهدنامه

اینجانب **فاطمه عباس پور** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی کشاورزی- اکولوژی گیاهان زراعی** دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله **اثرات مصرف بیوچار بر حاصلخیزی خاک، تحمل به خشکی، رشد و مواد موثره گیاه دارویی سیاه دانه** تحت راهنمائی **دکتر حمیدرضا اصغری و دکتر پرویز رضوانی مقدم** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

**تاریخ مهرماه ۱۳۹۷**

**امضای دانشجو**

## مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

# چکیده

با توجه به کمبود آب در کشور و اهمیت آن در تولید گیاهان دارویی، اعمال روش‌های مدیریتی که با حداقل آبیاری عملکرد مناسبی تولید کند، ضروری به نظر می‌رسد. به‌منظور بررسی اثرات مصرف بیوچار بر حاصلخیزی خاک، تحمل به خشکی، رشد و مواد موثره گیاه دارویی سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) آزمایشی به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا گردید. تیمارها شامل آبیاری به عنوان عامل اصلی در سه سطح ۱۰۰درصد ($I_1$)،۷۰درصد ($I_2$) و ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) و کرت‌های فرعی شامل فاکتور بیوچار در سه سطح صفر ($B_1$)، ۱۰ ($B_2$) و ۲۰ تن در هکتار بیوچار ($B_3$)؛ و کود شیمیایی در دو سطح شامل بدون مصرف کود ($F_1$) و مصرف کود ($F_2$) که شامل مصرف کودشیمیایی فسفر($P_2O_5$) به‌میزان ۷۵ کیلوگرم در هکتار، پتاسیم ($K_2SO_4$) به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و نیتروژن به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره بود. نتایج نشان داد که بیوچار بر هدایت الکتریکی و فسفر قابل دسترس خاک فقط در سال اول تاثیر معنی‌دار داشت ولی درصد رطوبت اشباع خاک، درصد کربن آلی، درصد نیتروژن کل، پتاسیم و تنفس میکروبی خاک در هر دو سال تحت تاثیر بیوچار قرار گرفتند و تاثیر تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار بر خصوصیات مذکور، بیشتر از سایر تیمارها بود. تیمار آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیشترین تاثیر را بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه داشت. کاربرد بیوچار در هیچ یک از دو سال بر ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد فولیکول در بوته، وزن هزار دانه و شاخص برداشت موثر نبود. بیوچار در سال اول فقط بر تعداد دانه و وزن دانه‌ها در بوته موثر بود ولی در سال دوم تاثیر بیوچار بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود و تاثیر ۱۰ تن در هکتار بیوچار بیشتر از سایر تیمارهای مورد مطالعه بود. کاربرد کودشیمیایی نیز بجز وزن هزار

دانه بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه تاثیر معنی‌داری داشت. آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی موجب افزایش درصد پروتئین و درصد اسانس دانه شد ولی این تیمار درصد روغن دانه و مواد موثره تیموکینون و پی‌سایمن را کاهش داد. تاثیر کاربرد بیوچار بر خصوصیات کیفی سیاه دانه نیز در سال دوم بیشتر از سال اول بود. کاربرد بیوچار موجب افزایش ماده موثره تیموکینون در دانه شد. اثرات متقابل دوگانه بیوچار و کودشیمیایی حاکی از تاثیر بیشتر کاربرد بیوچار به‌همراه کودشیمیایی بر صفات کمی و کیفی مورد مطالعه بود. در بین اثرات متقابل سه‌گانه تاثیر تیمار ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه بیشتر از سایر تیمارها بود به‌طوریکه عملکرد دانه این تیمار ۱۲۵۷کیلوگرم در هکتار و عملکرد بیولوژیک آن ۵۱۱۶ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. به‌نظر می‌رسد استفاده از بیوچار به‌دلیل منافذ و سطح ویژه بالا و توانایی آن در نگهداری آب می‌تواند علاوه بر بهبود خصوصیات خاک، جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش داده و با تاثیر بهینه بر عملکرد کمی و کیفی گیاه، میزان آب مصرفی در سیاه دانه را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود. به‌این ترتیب با مصرف بیوچار می‌توان آبیاری را بر اساس۷۰ درصد نیاز آبی گیاه انجام داد که این امر به افزایش ذخیره آب در کشاورزی مناطق خشک و نیمه خشک نیز کمک می‌کند.

**کلمات کلیدی**: آبشویی، عملکرد دانه، کودشیمیایی، نیاز آبی

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

عباس‌پور ف. اصغری ح. ر. رضوانی‌مقدم پ. عباسدخت ح. شباهنگ ج. و بیگ‌بابایی ع، (۱۳۹۶) " تأثیر کاربرد بیوچار بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط کم آبیاری " **دوماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران**، جلد ۳۳، شماره ۵: ص ۸۵۲-۸۳۷.

عباس‌پور ف. اصغری ح. ر. رضوانی‌مقدم پ. عباسدخت ح. شباهنگ ج. و بیگ‌بابایی ع، (۱۳۹۷) "تاثیر بیوچار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاه دانه (*Nigella sativa* L.)" پذیرش برای چاپ در **نشریه پژوهشهای زراعی ایران**.

عباس‌پور ف. اصغری ح. ر. رضوانی‌مقدم پ. عباسدخت ح. شباهنگ ج. و بیگ‌بابایی ع، (۱۳۹۷) "اثر بیوچار و کود شیمیایی بر برخی ویژگیهای خاک و عملکرد و صفات کیفی سیاه دانه(*Nigella sativa* L.) در شرایط کمبود آب" پذیرش برای چاپ در **نشریه پژوهش آب در کشاورزی**.

عباس‌پور ف. اصغری ح. ر. رضوانی‌مقدم پ. عباسدخت ح. شباهنگ ج. و بیگ‌بابایی ع، (۱۳۹۶)" تاثیر کاربرد بیوچار در بهبود برخی ویژگیهای خاک و رشد گیاه دارویی سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط تنش آبی" اولین کنفرانس بین المللی علوم کشاورزی، گیاهان دارویی و طب سنتی، دانشگاه پیام نور خراسان رضوی.

عباس‌پور ف. اصغری ح. ر. رضوانی‌مقدم پ. عباسدخت ح. شباهنگ ج. و بیگ‌بابایی ع، (۱۳۹۶) " تاثیر بیوچار و کودهای شیمیایی بر برخی خصوصیات خاک و صفات کیفی سیاه دانه (*Nigella sativa* L.)" هشتمین همایش ملی گیاهان دارویی و کشاورزی پایدار، مرکز تحقیقات، آموزش منابع طبیعی و کشاورزی استان همدان.

عباس‌پور ف. اصغری ح. ر. رضوانی‌مقدم پ. عباسدخت ح. شباهنگ ج. و بیگ‌بابایی ع، (۱۳۹۷) "اثرات کاربرد بیوچار و کود شیمیایی بر کارایی جذب و مصرف نیتروژن سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) در رژیمهای مختلف آبیاری " همایش توسعه همکاریهای علمی منطقه‌ای علوم صنایع غذایی و کشاورزی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی خراسان رضوی.

# فهرست مطالب

**فصل اول مقدمه و کلیات ---------------------------------------------------------------- ۱**

۱-مقدمه و کلیات -------------------------------------------------------------------------------- ۲

۱-۱-مقدمه ------------------------------------------------------------------------------------- ۲

۱-۲- سیاه دانه --------------------------------------------------------------------------------- ۵

۱-۲-۱- خصوصیات گیاه شناسی سیاه دانه -------------------------------------------------------- ۵

۱-۲-۲- ترکیبات تشکیل دهنده بذر سیاه دانه-------------------------------------------------------- ۶

۱-۲-۳- کاربردها و خواص دارویی سیاه دانه -------------------------------------------------------- ۸

**فصل دوم بررسی منابع---------------------------------------------------------------------- ۹**

۲- بررسی منابع-------------------------------------------------------------------------------- ۱۰

۲-۱- تاثیر کم آبی بر گیاهان دارویی و سیاه دانه ----------------------------------------------- ۱۰

۲-۲- تاثیر تغذیه در مقاومت گیاهان دارویی به تنش کم آبی ------------------------------------- ۱۱

۲-۳- مواد آلی خاک و تلفات کربن ----------------------------------------------------------- ۱۲

۲-۴- بیوچار ------------------------------------------------------------------------------------ ۱۳

۲-۴-۱-تاریخچه بیوچار ---------------------------------------------------------------------- ۱۳

۲-۴-۲- روش تولید بیوچار---------------------------------------------------------------------- ۱۳

۲-۴-۳-خصوصیات بیوچار --------------------------------------------------------------------- ۱۴

۲-۴-۳-۱- خصوصیات فیزیکی-------------------------------------------------------------------- ۱۵

۲-۴-۳-۱-۱- سطح ویژه و منافذ بیوچار-------------------------------------------------------- ۱۵

۲-۴-۳-۱-۲- عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف در بیوچار ------------------------------------- ۱۶

۲-۴-۳-۲- خصوصیات شیمیایی ------------------------------------------------------------------ ۱۷

۲-۴-۳-۲-۱- pH ------------------------------------------------------------------------------ ۱۷

۲-۴-۳-۲-۲- ظرفیت تبادل کاتیونی ----------------------------------------------------------- ۱۷

۲-۴-۴- تاثیر بیوچار بر خصوصیات خاک-------------------------------------------------------- ۱۸

۲-۴-۴-۱- تاثیر بر تراکم حجمی و دانه‌بندی خاک ---------------------------------------------- ۱۸

۲-۴-۴-۲- تاثیر بر رطوبت خاک ---------------------------------------------------------------- ۱۹

۲-۴-۴-۳-تاثیر بر فراهمی عناصر غذایی خاک-------------------------------------------------- ۲۰

۲-۴-۴-۴- تاثیر بیوچار بر pH خاک -------------------------------------------------------------- ۲۱

۲-۴-۴-۵- تاثیر بر ظرفیت کاتیونی خاک ---------- ۲۲
۲-۴-۴-۶- تاثیر بیوچار بر تحرک نیتروژن در خاک ---------- ۲۳
۲-۴-۴-۷- تاثیر بیوچار بر فسفر خاک ---------- ۲۴
۲-۴-۴-۸-تاثیر بیوچار بر خصوصیات بیولوژیکی خاک ---------- ۲۵
۲-۴-۴-۸-۱-تاثیر بر میکروارگانیسمهای خاکزی ---------- ۲۶
۲-۴-۴-۸-۲-تاثیر بر جانداران متوسط و بزرگ ---------- ۲۶
۲-۴-۵-تاثیر بیوچار بر رشد گیاهان ---------- ۲۷
۲-۴-۶-تاثیر بیوچار بر دستیابی گیاهان به عناصر غذایی ---------- ۲۸
۲-۴-۷-تاثیر بیوچار بر کارایی مصرف نیتروژن ---------- ۲۹
۲-۴-۸-بیوچار و اکوفیزیولوژی گیاهان ---------- ۳۱
۲-۴-۹-تاثیر بیوچار بر معدنی شدن مواد آلی ---------- ۳۲
۲-۴-۱۰-بیوچار و تنش خشکی ---------- ۳۲
۲-۴-۱۱-تاثیر بیوچار بر آلایندههای خاک ---------- ۳۴
۲-۴-۱۲-کاربرد بیوچار برای مدیریت بقایای کشاورزی ---------- ۳۴
۲-۴-۱۳-تاثیر بیوچار بر توازن گازهای گلخانهای ---------- ۳۵
۲-۴-۱۴-مقادیر مصرف بیوچار ---------- ۳۷
**فصل سوم مواد و روش‌ها ---------- ۳۹**
۳- مواد و روشها ---------- ۴۰
۳-۱- موقعیت و تیمارهای مورد مطالعه در آزمایش ---------- ۴۰
۳-۲-آماده سازی زمین، کاشت و داشت ---------- ۴۰
۳-۲-۱- نحوه‌ی آبیاری ---------- ۴۲
۳-۳- عملیات برداشت ---------- ۴۴
۳-۴- محاسبه‌ی شاخص‌های مرتبط با خاک در مرحله رسیدگی سیاه دانه ---------- ۴۴
۳-۴-۱- شاخص‌های مرتبط با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ---------- ۴۴
۳-۴-۲-شاخص‌های مرتبط با خصوصیات بیولوژیکی خاک ---------- ۴۵
۳-۵- محاسبه‌ی درصد روغن و اسیدهای چرب تشکیل دهنده‌ی آن ---------- ۴۷
۳-۶- محاسبه‌ی درصد اسانس و اجزای تشکیل دهنده آن ---------- ۴۹
۳-۷- محاسبه‌ی شاخص‌های کارایی نیتروژن ---------- ۵۰
۳-۸- محاسبه پروتئین دانه ---------- ۵۰

۳-۹- تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشی ---------- ۵۱
**فصل چهارم نتایج و بحث ---------- ۵۳**
۴- نتایج و بحث ---------- ۵۴
۴-۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک ---------- ۵۴
۴-۱-۱- pH خاک ---------- ۵۴
۴-۱-۲- هدایت الکتریکی ---------- ۵۶
۴-۱-۳- درصد رطوبت اشباع خاک ---------- ۵۹
۴-۱-۴- درصد کربن آلی خاک ---------- ۶۰
۴-۱-۵-درصد نیتروژن کل ---------- ۶۲
۴-۱-۶- پتاسیم خاک ---------- ۶۴
۴-۱-۷- فسفر قابل دسترس خاک ---------- ۶۶
۴-۲- ویژگی های بیولوژیکی خاک ---------- ۶۸
۴-۲-۱- تنفس میکروبی خاک ---------- ۶۸
۴-۲-۲- کربن زیست توده میکروبی ---------- ۷۲
۴-۳- ویژگی های مرتبط باگیاه ---------- ۷۳
۴-۳-۱- ویژگیهای کمی ---------- ۷۳
۴-۳-۱-۱- ارتفاع بوته ---------- ۷۳
۴-۳-۱-۲- تعداد شاخه های فرعی ---------- ۷۶
۴-۳-۱-۳- تعداد فولیکول در بوته ---------- ۷۷
۴-۳-۱-۴- تعداد دانه در بوته ---------- ۷۹
۴-۳-۱-۵-وزن دانه‌ها در بوته ---------- ۸۱
۴-۳-۱-۶- وزن هزار دانه ---------- ۸۳
۴-۳-۱-۷- عملکرد دانه ---------- ۸۴
۴-۳-۱-۸- عملکرد بیولوژیک ---------- ۸۹
۴-۳-۱-۹- شاخص برداشت ---------- ۹۱
۴-۳-۱-۱۰-کارایی مصرف آب (بر اساس عملکرد دانه) ---------- ۹۲
۴-۳-۲- ویژگیهای کیفی ---------- ۹۶
۴-۳-۲-۱- محتوی نیتروژن دانه ---------- ۹۶
۴-۳-۲-۲- محتوی نیتروژن زیست توده ---------- ۱۰۰

۴-۳-۲-۳- پروتئین دانه ---------- ۱۰۱
۴-۳-۲-۴- عملکرد پروتئین ---------- ۱۰۳
۴-۳-۲-۵- کارایی مصرف نیتروژن ---------- ۱۰۴
۴-۳-۲-۶- کارایی جذب نیتروژن ---------- ۱۰۷
۴-۳-۲-۷-درصد روغن دانه ---------- ۱۱۱
۴-۳-۲-۸-عملکرد روغن ---------- ۱۱۴
۴-۳-۲-۹-درصد اسیدهای چرب ---------- ۱۱۵
۴-۳-۲-۱۰- درصد اسانس ---------- ۱۲۳
۴-۳-۲-۱۱- عملکرد اسانس ---------- ۱۲۴
۴-۳-۲-۱۲- ترکیبات تشکیل دهنده اسانس ---------- ۱۲۶
۴-۴- نتیجه گیری ---------- ۱۲۷
۴-۵- پیشنهادات ---------- ۱۲۸
مراجع ---------- ۱۸۸

## فهرست اشکال

شکل۴-۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر pH خاک حاصل از تجزیه مرکب ---------------------۵۵
شکل۴-۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر هدایت الکتریکی خاک حاصل از تجزیه مرکب---------------۵۸
شکل۴-۳- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بر هدایت الکتریکی خاک حاصل از تجزیه مرکب ---------۵۹
شکل۴-۴- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر پتاسیم خاک حاصل از تجزیه مرکب -------------------------۶۵
شکل۴-۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر فسفر قابل دسترس خاک حاصل از تجزیه مرکب -------------۶۸
شکل ۴- ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر تنفس میکروبی خاک حاصل از تجزیه مرکب ---------------۷۱
شکل۴-۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر تنفس میکروبی خاک حاصل از تجزیه مرکب-----------۷۱
شکل۴-۸- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر ارتفاع بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب---------------۷۵
شکل۴-۹- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بر ارتفاع بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب --------۷۶
شکل۴-۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر تعداد دانه در بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ۸۱
شکل۴-۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر تعداد دانه در بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ۸۳
شکل۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برعملکرددانه در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب -------------۸۸
شکل۴-۱۳- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار×کودشیمیایی برعملکرددانه در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب---------۸۸
شکل۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی برعملکردبیولوژیک در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب -۹۱
شکل۴-۱۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برکارایی مصرف آب در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب-------۹۵
شکل۴-۱۶- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی برکارایی مصرف آب در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب-۹۶
شکل۴-۱۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برمحتوی نیتروژن دانه سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب -------۹۹
شکل۴-۱۸- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی برمحتوی نیتروژن دانه سیاه دانه حاصل ازتجزیه مرکب--۹۹
شکل۴-۱۹-مقایسه میانگین اثرمتقابل آبیاری×کودشیمیایی محتوی نیتروژن زیست‌توده سیاه دانه حاصل ازتجزیه مرکب
------------------------------------------------------------------------------------------------------------- ۱۰۱
شکل۴-۲۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برکارایی مصرف نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب --- ۱۰۶
شکل۴-۲۱- مقایسه میانگین اثرمتقابل بیوچار ×کودشیمیایی برکارایی مصرف نیتروژن سیاه دانه حاصل ازتجزیه مرکب ۱۰۷
شکل۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری ×بیوچار برکارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ----- ۱۰۹
شکل۴-۲۳- مقایسه میانگین اثرمتقابل آبیاری ×کودشیمیایی برکارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ۱۱۰
شکل۴-۲۴- مقایسه میانگین اثرمتقابل بیوچار × کودشیمیایی برکارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل ازتجزیه مرکب ۱۱۰
شکل۴-۲۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد روغن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ------------ ۱۱۳
شکل۴-۲۶- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بردرصد روغن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ------- ۱۱۴
شکل۴-۲۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیدمریستیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ---- ۱۱۸
شکل۴-۲۸- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری ×کودشیمیایی بردرصد اسیدمریستیک سیاه دانه حاصل ازتجزیه مرکب ۱۱۹

شکل۴-۲۹- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیدپالمیتیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب----- ۱۱۹
شکل۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی براسیدپالمیتیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ----- ۱۲۰
شکل۴-۳۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیداستئاریک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب----- ۱۲۰
شکل۴-۳۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی براسیداستئاریک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب----- ۱۲۱
شکل۴-۳۳- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیداولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ------- ۱۲۱
شکل۴-۳۴- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بردرصد اسید اولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ۱۲۲
شکل۴-۳۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیدلینولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب----- ۱۲۲
شکل۴-۳۶- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی براسیدلینولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب ----- ۱۲۳
شکل۴-۳۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر عملکرد اسانس سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب----------- ۱۲۵

فهرست جداول

جدول۳-۱- برخی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک موردآزمایش---------------------------------------------۴۲
جدول ۳-۲- برخی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد استفاده ---------------------------------------------۴۲
جدول۳-۳- میانگین آمار درازمدت هواشناسی ایستگاه سینوپتیک مشهد در طول دوره رشدی سیاه دانه---------------۴۳
جدول۳-۴- متوسط دما و مجموع بارش ماهانه در طی فصل رشد سیاه دانه در سالهای مورد آزمایش ----------------۴۳
جدول ۴-۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------------------------------ ۱۳۰
جدول۴-۲- مقایسه میانگین اثر ساده بیوچار و کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش--------- ۱۳۲
جدول۴-۳الف- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------------------------------------ ۱۳۴
جدول۴-۳ب- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×بیوچار بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش---- ۱۳۵
جدول۴-۴-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری× بیوچار×کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------------------------------ ۱۳۶
جدول ۴-۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش --------- ۱۳۷
جدول۴-۶- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات خاک حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ------ ۱۳۹
جدول ۴-۷- ضرایب همبستگی ساده صفات مرتبط با خاک، عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه --------------------- ۱۴۰
جدول ۴-۸- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات بیولوژیکی خاک در سال اول و دوم آزمایش--------------------------------------------------------------------------------------------- ۱۴۱
جدول۴-۹- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری و بیوچار بر خصوصیات بیولوژیکی خاک در سال اول و دوم آزمایش ----- ۱۴۱
جدول۴-۱۰ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×بیوچار بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش --- ۱۴۲
جدول ۴-۱۱- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات بیولوژیکی خاک در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------------------------------------۱۴۳
جدول۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری و بیوچار بر خصوصیات بیولوژیکی خاک حاصل از تجزیه مرکب-------- ۱۴۴
جدول ۴-۱۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش---------------------------------------------------------------------- ۱۴۵
جدول۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------- ۱۴۷
جدول۴-۱۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------- ۱۴۹
جدول۴-۱۶-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد دانه و بیولوژیک در سال اول و دوم آزمایش------------------------------------------------------------------------------------------------- ۱۵۱

جدول ۴-۱۷- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش---------------------------------------------------------------------------------------- ۱۵۳
جدول۴-۱۸- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ------------------------------------------------------------------------------------ ۱۵۵
جدول۴-۱۹-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای‌عملکرد و کارایی‌مصرف‌آب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله------------------------------------------------------------- ۱۵۶
جدول ۴-۲۰- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر محتوی نیتروژن دانه و زیست‌توده، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش------------------------------------------------ ۱۵۷
جدول ۴-۲۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر کارایی مصرف و جذب نیتروژن در سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------------ ۱۵۸
جدول۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه و زیست‌توده، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین سیاه دانه در سال اول و دوم ------------------------------------------------------------------ ۱۵۹
جدول۴-۲۳- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر کارایی مصرف و جذب نیتروژن سیاه دانه در سال اول و دوم ---------------------------------------------------------------------------------------------------------- ۱۶۰
جدول۴-۲۴ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × کودشیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه، محتوی نیتروژن زیست‌توده و کارایی جذب نیتروژن در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------- ۱۶۱
جدول ۴-۲۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر محتوی نیتروژن دانه و زیست‌توده، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش------------------------------------------------------------------ ۱۶۲
جدول ۴-۲۶- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر کارایی مصرف و جذب نیتروژن در سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------------------------------------------------------------------------------------------------------- ۱۶۳
جدول۴-۲۷- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر محتوی نیتروژن دانه، محتوی نیتروژن زیست توده، عملکرد پروتئین، کارایی مصرف و کارایی جذب نیتروژن در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ---------------- ۱۶۴
جدول۴-۲۸-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی محتوی نیتروژن دانه، عملکرد پروتئین، کارایی مصرف و کارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ----------------------------------------- ۱۶۵
جدول ۴-۲۹- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش----------------------------------------------------------------------- ۱۶۶
جدول۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم ---------------------------------------------------------------------------------------------- ۱۶۸
جدول۴-۳۱ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ------------------------------------------------------------------------------------ ۱۷۰

جدول۴-۳۲ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × کودشیمیایی بر اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۷۲
جدول۴-۳۳ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر درصد روغن، سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۷۳
جدول۴-۳۴-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۷۴
جدول ۴-۳۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۷۶
جدول۴-۳۶- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر درصد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ---------- ۱۷۸
جدول۴-۳۷-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر درصد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ---------- ۱۷۹
جدول ۴-۳۸- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد اسانس، عملکرد اسانس، درصد تیموکینون و درصد سایمن در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۸۱
جدول۴-۳۹- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم ---------- ۱۸۲
جدول۴-۴۰ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار بر درصد اسانس، عملکرد اسانس ودرصد تیموکینون سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش---------- ۱۸۳
جدول۴-۴۱ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر درصد تیموکینون و درصد پیسایمن سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۸۴
جدول ۴-۴۲- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد اسانس، عملکرد اسانس، درصدتیموکینون و درصدسایمن در سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش ---------- ۱۸۵
جدول۴-۴۳- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر عملکرد اسانس سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله ---------- ۱۸۶
جدول۴-۴۴- میانگین اجزای شناسایی شده در اسانس سیاه دانه در طی دو سال آزمایش ---------- ۱۸۷

# فصل اول

# مقدمه و کلیات

## ۱-مقدمه و کلیات

### ۱-۱-مقدمه

برای دستیابی به سیستم‌های زراعی پایدار، سلامت خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گیاهان عناصر غذایی خود را از موادآلی یا مواد معدنی موجود در خاک‌ها بدست می‌آورند. کشاورزی مدرن از طریق برداشت‌های مکرر محصول باعث کاهش موادآلی خاک می‌شود. استفاده از کودهای شیمیایی که با صنعتی شدن کشاورزی رواج یافت، عملکرد گیاهان زراعی را به دو یا سه برابر افزایش داد ولی با افزایش مصرف کودهای شیمیایی به‌تدریج کیفیت خاک‌های زراعی کاهش یافت و به مرور زمان استفاده از کودهای شیمیایی برای حصول همان مقدار عملکرد افزایش یافت. از طرف دیگر، مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن باعث تخریب خاک و مشکلات زیست محیطی در طی زمان شد (ویدوواتی و همکاران، ۲۰۱۲). تا اواخر دهه ۱۹۹۰، حاصلخیزی خاک از طریق دوره‌های آیش، تناوب زراعی و کودهای دامی حفظ می‌شد ولی با افزایش تقاضا برای غذا و کمبود زمین‌های زراعی، این عملیات‌ها با کودهای شیمیایی و روش‌های ناپایدار جایگزین شد. زمین‌های زراعی به‌دلیل عدم مصرف صحیح نهاده‌های شیمیایی و یا عدم دانش کافی کشاورزان برای اجرای عملیات‌های مناسب، حاصلخیزی خود را از دست داده و مستعد فرسایش شدند. استفاده از این کودها که اساس آنها را سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌دهد باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای و از طرفی تخلیه عناصر غذایی طبیعی و معدنی در خاک‌های سالم گردیده است. رشد فزاینده جمعیت به‌همراه شور شدن خاک‌ها، فرسایش، کاهش مواد آلی، خشکی و کمبود آب در خاک لزوم گسترش راه‌حل‌های نوین برای نیازهای آینده غذا و انرژی را نشان می‌دهد (کامان و همکاران، ۲۰۱۱).

کمبود آب بویژه درمناطق خشک و نیمه‌خشک یک فاکتور محدودکننده مهم برای کشاورزی است. در آینده‌ای نه چندان دور گرمایش جهانی و وقوع خشکسالی‌ها باعث تشدید کمبود آب خواهد شد. در این

راستا شناخت روشهایی برای مقابله با کم آبی برای تولید محصول با کیفیت و کمیت بالا و حفاظت ازمنابع آبی ضروری است. از طرفی تخلیه خاک از عناصرغذایی و مواد آلی به‌دلیل حذف بقایا و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی  اثرات مخربی را بر ظرفیت نگهداری آب خاک و توانایی گیاهان برای سازگاری با تغییرات آب و هوایی داشته است (گلزردی، ۱۳۹۵).

اگرچه راهکارهای متعددی ازجمله استفاده از روش‌های مدیریتی نظیر تناوب، دوره‌های آیش ،گیاهان تثبیت کننده نیتروژن برای مقابله با این مشکلات پیشنهاد شده است، ولی هیچ راه‌حل واحدی به‌تنهایی کارساز نبوده است (کاروایهو و همکاران، ۲۰۱۴). یک تکنولوژی معمول برای افزایش حاصلخیزی خاک، مدیریت تلفیقی گیاهان زراعی است که شامل استفاده از انواع کودهای دامی یا آلی در خاک است. استفاده از مواد آلی به‌دلیل تجزیه سریع باید در مقادیر بالا و تکرار سالیانه باشد که علاوه بر هزینه‌های بالا، تجزیه سریع و معدنی شدن موادآلی، تاثیر معنی‌داری نیز بر گرمایش جهانی دارد (سیکا، ۲۰۱۲).

اساس تمامی عوامل مذکور از قبیل تغییرات آب و هوایی، تولیدات کشاورزی و اکوسیستم‌ها را کربن تشکیل می‌دهد که در واقع اسکلت حیات و انرژی است. مصرف سوخت‌های فسیلی و پاکسازی زمین از پوشش گیاهی مقادیر عظیمی از کربن را به جو زمین وارد کرده است . به‌علاوه تقاضا برای تولیدات جانوری و گیاهی بر افزایش بیشتر این عنصر در اتمسفر دامن زده است. با درک این مشکل تلاش برای استفاده از مواد آلی پایدار نظیر کربن سیاه که به بیوچار معروف است از طریق انجام تحقیقات گسترده افزایش یافته است. بیوچارحاوی مقادیر بالایی از کربن بیولوژیک به فرم پایدار است. این ماده مزایای کودهای آلی را دارا بوده و  در جهت اصلاح خاک‌هایی با عناصر غذایی کم بکار می‌رود. بیوچار یک ماده زیستی گرماکافت شده است. گرماکافت فرایند سوختن مواد آلی در حضور اکسیژن کم یا شرایط بدون اکسیژن است که منجر به تشکیل زغال غنی از کربن می شود که بسیار مقاوم به تجزیه است (هاوارد، ۲۰۱۱؛ فیاز و همکاران، ۲۰۱۴ ؛ زیلی۲۰۱۲) .

بیوچار می‌تواند برای قرنهای متمادی در خاک باقی بماند و پتانسیل بالایی برای بهبود تولیدات کشاورزی داشته باشد. بیوچار ساختار خاک را از طریق تغییرات در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تغییر می-دهد. از اثرات بیوچار بر خصوصیات فیزیکی خاک می‌توان به کاهش تراکم حجمی و افزایش هوادهی خاک اشاره کرد. بیوچار می‌تواند سختی خاک را کاهش داده و به احیای خاک‌های تخریب شده کمک کند. افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در اثر مصرف بیوچار را می‌توان به سطح ویژه بالاتر آن نسبت داد. به‌دلیل توانایی بالای این ماده در جذب و نگهداری عناصر غذایی و کودهای شیمیایی حتی نگهداری عناصری مانند فسفر و نیتروژن و جلوگیری از آبشویی آنها باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود (برک و همکاران، ۲۰۱۱). این ماده به‌دلیل سطح ویژه بالا و منافذ بسیار پیچیده یک زیستگاه امن برای میکروارگانیسم‌ها و قارچ‌ها می‌باشد. بیوچار بسیار پایدارتر از مواد آلی دیگری است که در خاک مصرف می‌شود. به‌دلیل دوام بسیار بالای آن در خاک (بیش از ۲۵۰۰ سال) تمام مزایای مربوط به کودهای آلی از قبیل نگهداری عناصر ، حفظ آب و حاصلخیزی خاک را به‌تنهایی دارا می‌باشد (گلازر و همکاران، ۲۰۰۲ ؛کادوتا و نیمی، ۲۰۰۴ ؛ روندون و همکاران، ۲۰۰۷ ؛الاد و گرابل، ۲۰۱۲). به‌نظر می‌رسد مصرف بیوچار همراه با کودهای معدنی باعث بهبود عملکرد از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شود (فیاز و همکاران، ۲۰۱۴؛ نایگوسی و همکاران ۲۰۱۲؛ سودربرگ، ۲۰۱۳).

سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) یک گیاه دارویی دو لپه، علفی و یکساله که متعلق به خانواده آلاله می‌باشد که به دو صورت وحشی و زراعی در ایران دیده می‌شود. این گیاه همچنین به‌عنوان گیاهی روغنی و ادویه‌ای و نیز به‌عنوان گیاهی که دارای مواد آنتی اکسیدانت و نیز مواد معدنی مانند آهن و کلسیم است، مورد استفاده قرار می‌گیرد (آخوندیان و همکاران، ۲۰۰۷).

با توجه به اینکه رویکرد جهانی به سمت داروهای گیاهی و فاصله گرفتن از داروهای شیمیائی است، توجه بیش از پیش به گیاهان دارویی را ایجاب می‌نماید. حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه با توجه به اصول

کشاورزی اکولوژیک نقش مهمی در بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی دارد. از آنجاییکه استفاده از کودهای شیمیایی علاوه بر تحمیل هزینه‌های بالا، صدمات اکولوژیکی نامناسبی بر محیط زیست دارد، برای بهبود رشد گیاهان دارویی و پایداری سیستم‌های کشاورزی نیاز به ورودی‌ها و منابع جدید است. نتایج مربوط به مطالعات بیوچار به‌دلیل مقادیر مختلف بیوچار، انواع مختلف آن، دماهای متفاوت تهیه آن و نوع خاک بسیار متنوع می‌باشد (تیت، ۲۰۱۴). همچنین اطلاعات موجود در کشور در زمینه اثرات بیوچار بر گیاهان دارویی بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار کم است.

بر اساس توضیحات ذکر شده، این تحقیق به‌منظور دستیابی به اهداف زیر اجرا شد:

۱- تأثیر بیوچار بر خصوصیات شیمیایی و اکولوژیکی خاک، جذب عناصر و رشد گیاه سیاه دانه

۲- تعیین سطوح مناسب از بیوچار در خاک‌های لوم (خاک منطقه مورد مطالعه) برای دستیابی به حاصلخیزی خاک و حداکثر رشد گیاه

۳- تعیین پتانسیل بیوچار در افزایش مقاومت گیاه سیاه دانه به کمبود آب و افزایش کارایی مصرف آب

۴- تعیین تأثیر کاربرد تلفیقی بیوچار و کود شیمیایی بر میزان عملکرد و اجزای عملکرد و مواد موثره گیاه سیاه دانه در شرایط خشکی

## ۱-۲- سیاه دانه

### ۱-۲-۱- خصوصیات گیاه‌شناسی سیاه دانه

سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) گیاهی است که به خانواده آلاله (Ranunculaceae) تعلق دارد. مبدا این گیاه نواحی مدیترانه‌ای و غرب آسیا می‌باشد و گونه‌های این جنس بیشتر در جنوب اروپا، شمال آفریقا و جنوب غربی آسیا پراکنش یافته‌اند (اسدادی و همکاران، ۲۰۱۴). این گیاه در بسیاری از کشورهای جهان مانند نواحی مدیترانه‌ای خاورمیانه، کشورهای اروپای جنوبی، هند، پاکستان، ترکیه، سوریه و ایران

کشت می‌شود (احمد و همکاران، ۲۰۱۳؛ مظفری و همکاران، ۲۰۰۰). گونه‌های این جنس گیاهانی یک ساله، علفی و دولپه با دوره رویشی کوتاه هستند. ارتفاع بوته سیاه دانه بین ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر می‌باشد. این گیاه پوشیده از کرکهای ظریف با برگهای سبز مایل به خاکستری و منقسم بـه تقسـیمات باریـک نخـی شکل می‌باشد. گل‌های این گیاه به رنگ سفید مایل به آبی با تعداد متغیری کاسبرگ می‌باشد. میوه های منفرد این گیاه پس از متصل شدن به یکدیگر ساختاری شبیه کپسول به خود گرفته و فولیکول نامیده می‌شود. بذرهای این گیاه بیضی شکل، مثـلثـی و به رنگ سیاه در ابعاد ۲-۱ میلیمتر و وزن هزار دانه آن ۳/۵-۲ گرم می‌باشد (دانتونو و همکاران۲۰۰۲؛ مهتا و همکاران، ۲۰۰۹؛ داس و همکاران، ۱۹۹۲).

## ۱-۲-۲- ترکیبات تشکیل دهنده بذر سیاه دانه

بذر سیاه دانه دارای۷/۴-۵/۵ درصد رطوبت، ۲۷-۲۰درصد پروتئین، ۳۳/۲-۲۳/۵درصد کربوهیدرات، ۲/۵-۰/۴درصد اسانس (روغن فرار) و ۳۸-۳۴ درصد روغن می باشد (چیخ روحو و همکاران، ۲۰۰۷).

بذر سیاه دانه دارای ترکیب متعادلی از اسیدهای آمینه در ساختار پروتئین خود می‌باشد و آمینواسیدهایی مثل آلبومین، گلوبولین، لیزین، لوسین، ایزولوسین، والین، گلیسین، آلانین، آسپارتیک اسید، سرین، تیروزین، تریپتوفان، سیستئین، گلوتامیک اسید، پرولین، آرژنین و فنیل آلانین از جمله مهمترین اسیدهای آمینه به شمار می‌روند. دانه همچنین محتوی رزین، تانن، اسیدهای آلی، آلکالوئیدها، چربی، فیبر و ویتامین‌هایی مثل آسکوربیک اسید، نیاسین، پیریدوکسین و اسید فولیک است. در بین مواد معدنی پتاسیم، کلسیم، فسفر و منیزیم در دانه غالب هستند، در حالی‌که سدیم، آهن، منگنز، روی و مس نیز در مقادیر قابل توجه وجود دارند. بیشتر مواد معدنی در مقادیر کم برای بدن لازم هستند. این عناصر به‌عنوان کوفاکتور در فعالیت آنزیم‌های مختلف نقش ایفا می‌کنند (آتا، ۲۰۰۳؛ چیخ روحو و همکاران، ۲۰۰۷). روغن سیاه دانه از نظر اسیدهای چرب غیراشباع غنی می‌باشد و حدود ۸۰ درصد

اسیدهای چرب را تشکیل می‌دهند. اسید لینولئیک (۶۰-۵۰ درصد) و اسید اولئیک (۲۰درصد) مهمترین اسیدهای چرب غیر اشباع هستند. اسیدهای چرب اشباع کمتر از۳۰ درصد اسیدهای چرب سیاه دانه را تشکیل می‌دهند. اسید پالمیتیک و استئاریک مهم‌ترین اسیدهای چرب اشباع در سیاه دانه می‌باشند (احمد و همکاران، ۲۰۱۳؛ نیکاور و همکاران، ۲۰۰۳؛ اسدادی و همکاران، ۲۰۱۴). میزان اسانس سیاه‌دانه در مناطق مختلف یکسان نیست و بر اساس ارتفاع و شرایط جغرافیایی تغییر می‌کند و میزان ترکیبات اسانس نیز بسته به شرایط منطقه مورد کشت و روش استخراج متغیر می‌باشد. ترکیبات فعال زیادی بسته به رقم سیاه دانه در آن شناسایی شده است. نیکاور و همکاران (۲۰۰۳) ۳۲ ترکیب شامل۸۶/۷ درصد کل اجزا را در اسانس سیاه دانه شناسایی کردند. در تحقیقات دیگری به طیف وسیع‌تری از ترکیبات اسانس (۴۰-۸۴ ترکیب) اشاره شده است (جرا حرزاله و همکاران، ۲۰۱۱). مهم‌ترین ترکیبات اسانس سیاه دانه تیموکینون[1] (۴۸-۳۰ درصد)، تیموهیدروکینون[2]، دی‌تیموکینون[3]، پی‌سایمن[4] (۱۵-۷ درصد) و کارواکرول[5] (۱۲-۶ درصد) است. در بذر سیاه دانه ترکیبات دیگری در مقادیر کمتر وجود دارد که از آن جمله می‌توان به آلکالوئیدها اشاره کرد. نیجلامین[6] از جمله آلکالوئیدهای موجود در سیاه دانه است. کارون، لیمونن و سیترونلول نیز از دیگر ترکیبات موجود در بذر سیاه دانه است. بیشترین ویژگی‌های دارویی سیاه دانه مربوط به ترکیبات کینونی است که فراوانترین آنها تیموکینون می‌باشد (ضیایی و همکاران،۱۳۹۱؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۳).

---

[1] Thymoquinone
[2] Thymohydroquinone
[3] Dithymohydroquinine
[4] P-cymenene
[5] Carvocrol
[6] Nigellamine

### ۱-۲-۳- کاربردها و خواص دارویی سیاه دانه

احتمالا کاربرد دارویی سیاه دانه به بیش از سه هزار سال پیش و به مصر باستان باز می‌گردد (پادهی و همکاران، ۲۰۰۸). در طول هزاران سال در نواحی مدیترانه ای و کشورهای خاور دور از سیاه دانه به عنوان یک گیاه ادویه‌ای و نگهدارنده مواد غذایی استفاده می‌شده است. دانه‌ها و روغن این گیاه خواص دارویی داشته و در طب سنتی اسلامی داروی مهمی تلقی شده و برای رفع ناراحتی‌های مختلف زیادی توصیه شده است. پیامبر اسلام نیز بیان نموده است که سیاه دانه، می‌تواند هر بیماری را به جز مرگ التیام دهد. ابوعلی سینا در کتاب قانون، سیاه دانه را به‌عنوان دانه‌ای معرفی می‌کند که دارای فواید زیاد بوده، انرژی بدن را تحریک کرده و به بازگشت بدن از خستگی و افسردگی و چاقی کمک می‌نماید (ظفر و همکاران، ۲۰۱۶). دانه‌های سیاه دانه به‌دلیل دارا بودن ترکیبات آروماتیک و فسفولیپید، ویژگی‌های دارویی زیادی دارد و برای اهداف چندگانه جدید در صنعت از جمله صنایع غذایی، آرایشی و دارویی استفاده می‌شود. اثرات ضد التهابی، ضد میکروبی و ضد انگلی، ضد تشنج، ضد قارچی، ضد دیابتی، ضد سرطانی، تقویت کننده سیستم ایمنی و خاصیت آنتی‌هیستامینی روغن و عصاره دانه این گیاه باعث شده است که از دانه‌های این گیاه در پزشکی و به منظور درمان بیماری‌های زیادی مانند دردهای مفاصل، روماتیسم، دیابت، تب، آنفولانزا، بیماری‌های ریه و کلسترول بالا مورد استفاده قرار گیرد (ظفر و همکاران،۲۰۱۶ ؛ علی و بلوندن، ۲۰۰۳؛ ضیایی و همکاران،۱۳۹۱). دانه‌های این گیاه همچنین در درمان بیماری‌هایی مانند ایدز که در ارتباط با سیستم ایمنی بدن است، موثر می‌باشد. بیشتر اثرات درمانی سیاه دانه به تیموکینون نسبت داده می‌شود. همچنین اثرات ضد سرطانی سیاه دانه به‌دلیل وجود مواد آنتی-اکسیدان در این گیاه می‌باشد. در بسیاری از بیماری‌ها مانند سیروز کبدی یا آسیب‌های کبدی ناشی از عفونت و موادشیمیایی که رادیکال آزاد تولید می‌شود، عمل آنتی‌اکسیدانی سیاه‌دانه می‌تواند بسیار مفید واقع شود (اونیفاد و همکاران، ۲۰۱۳).

# فصل دوم

# بررسی منابع

# ۲- بررسی منابع

## ۲-۱- تاثیر کم آبی بر گیاهان دارویی و سیاه دانه

آب یکی از مهم‌ترین فاکتورهای محیطی در تولید گیاهان محسوب می‌شود و کمبود آن آسیب جدی به رشد و نمو گیاهان دارویی وارد می‌کند. الگوی بارشی نامنظم در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران این گیاهان را بیشتر در معرض تنش خشکی قرار می‌دهد. در اغلب موارد دمای هوای بالا و تغذیه نامناسب نیز این اثرات خشکی را تشدید می‌کند. تقریبا تمام فرایندهای گیاه به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با ذخیره آبی گیاه مرتبط هستند. تنش خشکی به سه روش باعث کاهش عملکرد در گیاهان دارویی و معطر می‌شود: ۱- کاهش فتوسنتز و جذب انرژی نورانی در گیاه، به‌دلیل کاهش کانوپی گیاهی از طریق پژمرده و لوله شدن و کم شدن سطح برگ‌ها ۲- کاهش ماده خشک تولیدی به ازای تشعشعات فعال فتوسنتزی جذب شده ۳- کاهش شاخص برداشت (شرفزاده و زارع، ۲۰۱۱). کمبود آب علاوه بر خصوصیات مرفولوژیک بر زیست توده گیاه نیز تاثیر می‌گذارد (حاج سید هادی و همکاران، ۲۰۱۶). آزمایش‌های انجام شده بر روی گیاه دارویی نعناع ژاپنی (*Mentha arvensis*) کاهش وزن تر و خشک را با افزایش کمبود آب در این گیاهان نشان داد (میرسا و همکاران، ۲۰۰۰). در تحقیق انجام شده بر روی گیاه دارویی آویشن (*Thymus vulgaris*) افزایش فواصل آبیاری منجر به کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک و وزن تر و برعکس افزایش درصد تیمول در اسانس تولیدی شد (عزیز و همکاران، ۲۰۰۸). کاهش سطح برگ و دوام آن به دلیل پیری زودرس برگ‌ها بر اثر تنش رطوبتی در گیاه سیاه دانه گزارش شده است (قربانلی و همکاران، ۱۳۷۸). بررسی‌ها درباره تاثیر تنش خشکی بر رشد و نمو گیاه سیاه دانه، نشان داد که کمبود آب منجر به کاهش ارتفاع بوته، شاخ و برگ، تعداد کپسول و در نهایت تعداد دانه و عملکرد شد (حیدری و جهان‌تیغی، ۱۳۹۱). مظفری و همکاران (۲۰۰۰) به افزایش درصد روغن دانه و کاهش عملکرد

روغن سیاه دانه به‌دلیل کاهش عملکرد دانه در اثر تنش آبی اشاره کرده و دلیل این امر را کـاهش سـطح برگ و مواد فتوسنتزی در اثر تنش خشکی عنوان کردند. نوروزپـور و رضوانی مقدم (۱۳۸۵) تأثیر فواصل آبیاری را بـر عملکـرد دانـه و درصد اسانس سیاه‌دانه گزارش نمودند.

## ۲-۲- تاثیر تغذیه در مقاومت گیاهان دارویی به تنش کم آبی

بهبود تغذیه گیاه در شرایط تنش نقش موثری در افزایش مقاومت و عملکرد درگیاهان دارویی دارد. گیاهی که خوب تغذیه شده و به مقدار کافی عناصرغذایی را دریافت کرده باشد، مقاومت بهتری به خشکی خواهد داشت و در این راستا کمیت و کیفیت محصول نیز تحت تأثیر قرارخواهد گرفت (محمدخانی و حیدری، ۲۰۰۷). مطالعات زیادی نشان می‌دهد که عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و کلسیم اثرات زیان‌آور تنش خشکی را در گیاهان دارویی کاهش می‌دهد. کاربرد کودشیمیایی نیتروژن در شرایط تنش آبی درصد اسانس، عملکرددانه، قطر طبق، وزن هزار دانه و تعداد دانه‌ها را در گیاه دارویی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) به‌طور معنی‌داری افزایش داد. کاربرد کودشیمیایی نیتروژن در شرایط تنش آبی موجب بهبود فتوسنتز و افزایش تولید کلروفیل و همچنین افزایش تعداد ریشه در گیاه گردید در نتیجه کاربرد عناصر غذایی در شرایط تنش آبی در بهبود عملکرد گیاهان دارویی بسیار مهم ارزیابی شد. (رحمانی و همکاران، ۲۰۰۹). فسفر در شرایط کمبود آب باعث افزایش هدایت روزنه‌ای (بروک و همکاران،۲۰۰۰) و افزایش قدرت نگهداری آب گیاه (ساوان و همکاران، ۲۰۰۰) می‌شود. گراسیانو و همکاران (۲۰۰۵) با کاربرد کودشیمیایی نیتروژن و فسفر در شرایط تنش آبی افزایش رشد را در گیاه اکالیپتوس (*Eucalyptus grandis*) گزارش کردند. در آزمایشی که توسط جلیل و همکاران (۲۰۰۷) بر روی گیاه دارویی گل پریوش (*Catharanthus roseus*) انجام شد، کاربرد کلسیم به‌صورت کلرید کلسیم باعث افزایش مقاومت گیاه نسبت به تنش اکسیداتیو و افزایش میزان آلکالوئید و بهبود رشد ساقه‌ها و

ریشه‌ها در مقایسه با تیمار شاهد شد. بنابراین به‌نظر می‌رسدکاربرد مقادیر مناسب از عناصر معدنی به کاهش اثرات تنش آبی در گیاهان معطر و دارویی کمک می‌کند.

### ۲-۳- مواد آلی خاک و تلفات کربن

مواد آلی خاک که ترکیب پیچیده‌ای از کربن و سایر عناصر نظیر نیتروژن، فسفر و گوگرد است، انرژی لازم برای میکروارگانیسم‌های خاک را فراهم کرده و به تغذیه گیاهان، تسهیل در فرایند خاک‌ورزی، بهبود ساختمان، دانه‌بندی خاک و مقاومت در برابر فرسایش کمک می‌کند. مواد آلی خاک از تجزیه بقایای گیاهی و جانوری توسط میکروارگانیسم‌های خاکزی تشکیل می‌شود. مواد آلی خاک یکی از منابع بسیارمهم چرخه سریع کربن در اکوسیستم‌های خشکی است. به‌همین دلیل ماده آلی خاک می‌تواند به عنوان منبع یا مخزن مهم گازهای گلخانه‌ای باشد. زمین‌های زراعی بویژه مناطقی که از اکوسیستم‌های طبیعی به زراعی تبدیل شده‌اند، مقادیر زیادی از کربن موجود در موادآلی خاک را به‌صورت دی-اکسیدکربن منتشر می‌کنند. علاوه بر آن، روشهای نوین زراعی نظیر شخم بی‌رویه، عدم استفاده از تناوبهای گرامینه و لگوم‌ها و عدم استفاده از کودهای حیوانی باعث تبدیل اکوسیستم‌های طبیعی به زمین‌های زراعی شده و منجر به تلفات کربن از خاک گردیده است. برای جبران این نقیصه کاربرد کودهای دامی، کمپوست و کلش حاصل از گیاهان روش‌های مرسوم در سیستم‌های زراعی هستند ولی متاسفانه نیمه عمر این ترکیبات کربنی در خاک بسیار کوتاه است و به همین دلیل نیاز به تکرار مصرف این ترکیبات است که موجب اتلاف وقت و سرمایه می‌شود. مطالعاتی که در خاکهای آمازون انجام شد، نشان داد که زغال چوب بکار رفته در تمدن‌های کهن که برای اهداف کشاورزی به خاک افزوده شده است، با گذشت چندین قرن هنوز در خاک باقی مانده و موجب حاصلخیزی مزارع این منطقه شده است (فردو، ۲۰۱۳؛ سوحی و همکاران، ۲۰۱۰).

## ۲-۴- بیوچار

### ۲-۴-۱-تاریخچه بیوچار

بیوچار واژه جدیدی است، اگرچه ماده‌ای جدید نیست. در خاکهای مناطق مختلف جهان که در معرض وقایع طبیعی نظیر آتش سوزی جنگل‌ها و مراتع قرار گرفته‌اند، به‌طور طبیعی بیوچار دیده می‌شود. تاریخچه استفاده از بیوچار برای افزایش حاصلخیزی خاک به دو هزار سال قبل برمی‌گردد. در زمین‌های سیاه حوزه آبخیز آمازون شواهدی از استعمال گسترده بیوچار در خاک‌هایی موسوم به ترا پرتا[7] وجود دارد که توسط اقوام بومی برای افزایش حاصلخیزی خاک به کار می‌رفته است. این خاک‌ها از نظر مواد آلی چهار برابر غنی‌تر از خاکهای نواحی دیگر بوده‌اند به‌طوری که در این خاک‌ها چندین بار کاشت و برداشت در سال بدون افزودن کود انجام می‌شده است. این خاک‌ها از تنوع موجودات خاکزی بالاتری برخوردار بوده و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و قدرت نگهداری فسفر بالایی داشته‌اند (ولف، ۲۰۰۸؛ شوتن،۲۰۱۰؛ کامان وهمکاران، ۲۰۱۱ ).

### ۲-۴-۲- روش تولید بیوچار

بیوچار از دامنه وسیعی از مواد اولیه نظیر چوب، بقایای محصولات کشاورزی و کود دامی قابل تهیه است. روش‌های مختلفی برای تولید بیوچار وجود دارد. نوع ماده آلی یا کاه وکلشی که استفاده می‌شود و دمایی که بیوچار در آن تولید می‌شود، در کیفیت بیوچار به‌عنوان ماده آلی خاک موثر است. بیوچار یک ماده زیستی گرماکافت (پیرولیز[8]) شده است. گرماکافت فرایند سوختن مواد آلی در حضور اکسیژن کم یا شرایط بدون اکسیژن است که منجر به تشکیل زغال غنی از کربن می‌شود که بسیار مقاوم به تجزیه است (هاوارد، ۲۰۱۱؛ فیاز و همکاران، ۲۰۱۴ ؛ زیلی، ۲۰۱۲). در فرایند گرماکافت سه محصول جامد، مایع و

---

7 terra preta
8 Pyrolysis

گاز تولید می‌شود. محصول جامد گرماکافت همان بیوچار است که به میزان ۶۰-۹۰ درصد کربن دارد. محصول مایع گرماکافت روغن زیستی یا بیواویل[9] نامیده می‌شود و بخش گازی گرماکافت گاز سنتزی است که به اختصار سینگاز[10] نامیده می‌شود. از محصولات مایع و گازی گرماکافت برای تولید برق و گرما استفاده می‌شود. مقدار هر یک از این محصولات به دمای گرماکافت، مدت زمان گرماکافت و نوع مواد اولیه بستگی دارد. سه نوع گرماکافت کند، سریع و خیلی سریع وجود دارد. در گرماکافت کند درجه حرارت کمتر و حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد است و کربن بیشتری نسبت به محصولات گازی و مایع تشکیل می‌شود. قسمت عمده بیوچار در گرماکافت کند تولید می‌شود. کربن آلی بیوچار ساختار آروماتیکی داشته و در برابر تجزیه‌های زیستی و غیر زیستی مقاومت بسیار زیادی دارد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). با افزایش دما، درصد بیوچار و درصدکربن آن کاهش یافته ولی درصد آروماتیک بودن کربن افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت و پایداری زیستی بیوچار می‌شود. در گرماکافت سریع دما حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد و محصول اصلی مایع (روغن زیستی) است. در گرماکافت بسیار سریع واکنش در چند ثانیه و دمای بالای ۸۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود و محصول اصلی گاز (سینگاز) است (سیکا، ۲۰۱۲؛ ورهیجن و همکاران، ۲۰۱۰؛ فیلیبرتو، ۲۰۱۳؛ سوهی و همکاران، ۲۰۱۰؛ زیلی، ۲۰۱۲) .

### ۲-۴-۳-خصوصیات بیوچار

شناخت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به کشاورزان در تشخیص نوع بیوچار مناسب با خاک مورد نظر کمک می‌کند. نوع زیست‌توده مصرفی برای تهیه بیوچار و شرایط تهیه و دمای پیرولیز در خصوصیات فیزیکوشیمیایی بیوچار موثر است. افزودن بیوچار به خاک ترکیبات کربنی خاک را افزایش داده و به‌عنوان مخزنی برای ذخایر طولانی مدت کربن به‌دلیل دوام بالای آن در خاک (۱۰۰ تا۱۰۰۰ سال) است. تنوع

[9] Bio oil
[10] Syngas

زیادی در خصوصیات بیوچارهای مختلف وجود دارد. اثرات مفید بیوچار به ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه و منافذ بالا، اسیدیته خنثی و قلیایی، تراکم حجمی کم، محتوای عناصر معدنی، ثبات و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا بستگی دارد (پوخرینگر، ۲۰۱۶).

### ۲-۴-۳-۱- خصوصیات فیزیکی

#### ۲-۴-۳-۱-۱- سطح ویژه و منافذ بیوچار

خصوصیات فیزیکی بیوچار به نوع ماده اولیه و شرایط تهیه آن بستگی دارد. در اثر گرماکافت زیست توده، اسکلت کربنی تشکیل می‌شود که بدلیل دارا بودن منافذ زیاد، ساختار اسفنجی به بیوچار می‌دهد. دمای گرماکافت بالاتر از ۳۳۰ درجه سانتیگراد باعث افزایش تعداد منافذ ریز و کاهش اندازه ذرات بیوچار می‌شود (فردو، ۲۰۱۳). منافذ بیوچار شامل سه دسته منافذ درشت (بیشتر از۵۰ میکرون)، منافذ متوسط (۲-۵۰ میکرون) و منافذ ریز (کمتر از ۲ میکرون) هستند. منافذ ریز، سطح بیوچار را افزایش داده و باعث نگهداری آب می‌شوند. منافذ بیوچار موجب کاهش تراکم حجمی می‌شوند و اگر در غلظت مناسب به خاک افزوده شوند باعث کاهش تراکم حجمی خاک می‌شوند. اگر بیوچار حاوی درصد بالایی خاکستر باشد، منافذ بیوچار با گذشت زمان و با آبشویی خاکستر موجود در منافذ آن افزایش می‌یابد. وجود درصد بالای خاکستر در بیوچار موجب کاهش استحکام ساختار بیوچار می‌شود (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). سطح ویژه بالای بیوچار باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و جذب عناصر غذایی شده و همچنین در کنترل آلودگی موثر است. میزان آب جذب شده به طور مستقیم به سطح ویژه بیوچار بستگی دارد و به همین دلیل کاربرد بیوچار در خاک موجب جذب مقادیر زیادی آب می‌شود. اگرچه مطابق گزارشات سوحی و همکاران (۲۰۰۹) سطح بیوچاری که در دمای پایین تهیه شده باشد، آبگریز بوده و ظرفیت نگهداری آب پایینی خواهد داشت. با افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل افزایش سطح ویژه خاک، در خاک‌های رسی از

تجمع زیاد آب جلوگیری شده و هوادهی خاکهای رسی افزایش می‌یابد و در خاکهای شنی نیز ظرفیت نگهداری آب بیشتر شده و از هدر رفت آب جلوگیری می‌شود (کاترین، ۲۰۱۶؛ ملاز، ۲۰۱۴). استعمال بیوچار در خاک به‌دلیل دارا بودن منافذ فراوان ، سطح ویژه خاک را افزایش می‌دهد و در نتیجه نگهداری آب در خاک را بهبود می‌بخشد. افزایش سطح ویژه خاک بر فعالیت میکروارگانیسم ها نیز موثر است (هینا، ۲۰۱۳).

### ۲-۴-۳-۱-۲- عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف در بیوچار

مقادیر عناصر غذایی موجود در بیوچار به نوع مواد اولیه و شرایط تهیه آن بستگی دارد. برای مثال بیوچاری که از مواد اولیه حاوی پتاسیم بالا تهیه می‌شود (مانند کود دامی) دارای محتوی پتاسیم بالاتری نسبت به بیوچاری که از بقایای چوب (حاوی کربن بالا) تهیه می‌شود، خواهد بود. در بیوچارهایی که در دماهای بالاتر تولید می‌شوند، میزان کربن کمتر از بیوچارهای تولید شده در دماهای پایین است. همچنین محتوی کربن در بیوچار به نوع ماده اولیه و زیست توده نیز بستگی دارد. به‌عنوان مثال در بیوچار تولید شده از کود دامی میزان کربن پایین‌تر و میزان مواد معدنی بالاتر است و نسبت C به N کمتری دارد در صورتی‌که بیوچار تولید شده از چوب گردو دارای نسبت C به N همچنین نسبت C بهP بالاتری است. کربن موجود در بیوچار نسبت به اکسیداسیون پایدار بوده و در نتیجه از تشکیل دی اکسید کربن و آزادسازی آن جلوگیری می کند (کاترین، ۲۰۱۶).

بر اساس گزارش‌های لهمان و جوزف (۲۰۰۹) بیوچار تهیه شده از لجن فاضلاب حاوی نیتروژن معدنی پایین و در مقابل نیتروژن کل بالایی است. مقدار فسفر موجود در بیوچارها بسیار متغیر است و بیوچارهای با منشا جانوری مانند فضولات پرندگان و لجن فاضلاب فسفر بیشتری نسبت به بیوچارهایی با منشا گیاهی دارند (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹).

### ۲-۴-۳-۲- خصوصیات شیمیایی

#### ۲-۴-۳-۲-۱- pH

خصوصیات شیمیایی بیوچار به زیست توده مورد استفاده، دمای پیرولیز و مدت زمان تهیه آن بستگی دارد. با افزایش دمای گرماکافت در فرایند تهیه بیوچار میزان pH افزایش می‌یابد. این امر به دلیل تجمع اکسید فلزات قلیایی در سطح بیوچار است (گونداله و دلوکا، ۲۰۰۶). اگرچه میزان اسیدیته بیوچار اغلب خنثی یا بالاتر از ۷ بوده و کمتر تغییر می‌کند ولی بیوچارهای تهیه شده در دماهای بالاتر و با منشاء حیوانی pH قلیایی‌تری دارند (زیلی، ۲۰۱۲؛ کاترین، ۲۰۱۶). ساختار شیمیایی پیچیده بیوچار باعث افزایش سطح ویژه می‌شود و به همین دلیل بیوچار با ترکیبات آلی و غیرآلی فراوانی واکنش نشان می-دهد. در طی فرایند گرماکافت در زیست توده پیوندهای شیمیایی شکسته شده و مجددا پیوندهای جدیدی تشکیل می‌شود که باعث ایجاد گروه‌های مختلفی از جمله گروه‌های هیدروکسیل، آمینو، کتون، استر، نیترو و کربوکسیل در سطح منافذ و بین صفحه‌های ساختار کربنی بیوچار ایجاد می‌شود. بعضی از این گروه‌ها دهنده و برخی گیرنده الکترون هستند که باعث ایجاد خواص خنثی تا بازی و آب‌دوست تا آب‌گریز در بیوچار می‌شوند (کاترین، ۲۰۱۶؛ ملاز، ۲۰۱۴). pH بیوچار با گذشت زمان به‌دلیل اکسیداسیون سطحی آن در خاک افزایش می‌یابد. بیوچار در خاک همانند یک عامل آهکی عمل کرده و با افزایش pH خاک موجب افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاهان می‌شود (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹).

#### ۲-۴-۳-۲-۲- ظرفیت تبادل کاتیونی

ظرفیت تبادل کاتیونی، توانایی ماده در اتصال بارهای مثبت به بارهای منفی درسطح موادی مانند رس یا مواد آلی مانند بیوچار است. بیوچار به مقادیر مواد معدنی موجود در ماده اولیه آن و دمای گرماکافت در زمان تهیه بیوچار بستگی دارد. گرماکافت آهسته بیوچار به‌دلیل تشکیل گروه‌های اکسیژنی بیشتر، از

ظرفیت کاتیونی بالاتری برخوردار است (پوخرینگر، ۲۰۱۶). ظرفیت تبادل کاتیونی در بیوچار از مقادیر بسیارکم تا ۴۰ سانتی‌مول بار در گرم را شامل می‌شود. با افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل فرایند اکسیداسیونی در خاک ظرفیت تبادل کاتیونی آن افزایش می‌یابد. اکسیداسیون سطحی به‌دلیل واکنش بین آب، اکسیژن و عوامل متعدد موجود در خاک اتفاق می‌افتد (ورهیجن و همکاران، ۲۰۱۰).

### ۲-۴-۴- تاثیر بیوچار بر خصوصیات خاک

افزودن بیوچار به خاک خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن نظیر نگهداری آب خاک، دانه‌بندی، تراکم حجمی، دمای خاک، pH و ظرفیت تبادل کاتیونی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این خصوصیات دسترسی گیاهان به آب خاک را تسهیل کرده و فرسایش را کاهش می‌دهند.

### ۲-۴-۴-۱- تاثیر بر تراکم حجمی و دانه‌بندی خاک

تراکم حجمی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که نفوذ آب، هوادهی و رشد گیاهان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بیوچار تراکم حجمی کمی دارد (۰/۴۳-۰/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و به دلیل همین ساختار متخلخل می‌تواند تراکم حجمی خاک را کاهش دهد. با کاربرد بیوچار در خاک‌های دارای استحکام بالا، مقاومت خاک کم شده و انجام عملیات‌های کشاورزی نظیر شخم با سهولت انجام می‌شود (زیلی، ۲۰۱۲). تامئورگ و همکاران (۲۰۱۴) در سال اول پس از کاربرد بیوچار به افزایش محتوای آب قابل دسترس در ۲۰ سانتی‌متری خاک سطحی و به کاهش تراکم حجمی خاک در در سال دوم اشاره کردند. البته در مواردی نیز بیوچار باعث افزایش تراکم حجمی خاک شده است. درصورتی‌که بیوچار مصرفی مقاومت مکانیکی کمی داشته باشد، پس از افزوده شدن به خاک سریع‌تر تبدیل به ذرات کوچکتر شده و منافذ خاک را پر کرده و در نتیجه تراکم حجمی خاک افزایش می‌یابد (زیلی، ۲۰۱۲؛ هینا، ۲۰۱۳؛

ورهیجن، ۲۰۱۰). در کشاورزی، با اندکی تغییرات در تراکم حجمی خاک می‌توان مزایای زراعی زیادی را به‌دست آورد.

عوامل مهمی که بر خاکدانه‌ها و استحکام آنها موثرند عبارتند از: جانوران خاکزی بویژه کرمهای خاکزی، میکروارگانیسم‌ها از قبیل باکتریها و قارچها، عوامل پیوند دهنده غیر آلی مانند اکسیدها و کلسیم و ویژگی‌های محیطی نظیر یخ بستن و آب شدن. افزودن بیوچار به خاک موجب تحریک فعالیت میکروبی بویژه باکتریهای ریزوسفری و قارچهای میکوریزا می‌شود که این میکروارگانیسم‌ها با ریشه ارتباط مستقیم داشته و در گسترش ریشه‌ها موثرند (زیلی، ۲۰۱۲). از طرفی کربن آلی موجود در بیوچار در دانه‌بندی و ثبات ساختار خاک موثر است. بهبود ساختار خاک بر قدرت نگهداری آب خاک و کاهش آبشویی و فرسایش تاثیر می‌گذارد. اثرات بیوچار بر دانه‌بندی خاک به خصوصیات بارهای سطحی آن نیز بستگی دارد. تاثیر بیوچار بر بهبود ساختار و دانه‌بندی خاک با گذشت زمان افزایش می‌یابد (گونزی و همکاران، ۲۰۱۵؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۶).

### ۲-۴-۴-۲- تاثیر بر رطوبت خاک

میزان رطوبت موجود در خاک به توزیع منافذ خاک که تحت تاثیر بافت، خصوصیات ساختاری خاک (دانه‌بندی) و مواد آلی خاک بستگی دارد. بیوچار به‌دلیل دارا بودن منافذ فراوان در سطح خود، سطح ویژه بالایی داشته و باعث افزایش ظرفیت نگه‌داری آب در خاک می‌شود. تاثیر بیوچار بر محتوای رطوبتی خاک می‌تواند به‌طور غیرمستقیم از طریق بهبود دانه‌بندی یا ساختار خاک باشد. این تاثیر بر دانه‌بندی خاک در اثر فعل و انفعال بین بیوچار، مواد آلی و معدنی و میکروارگانیسم‌های خاک صورت می‌گیرد. البته مزیت کاربرد بیوچار برای صرفه‌جویی آب در کشاورزی به نسبت منافذ ریز، متوسط و بزرگ در ناحیه ریشه دارد. خاکهای شنی ظرفیت نگهداری آب پایینی دارند که این امر به‌دلیل وجود منافذ بزرگ، ماده آلی بسیار کم

و عدم وجود رس در این خاک‌ها است، در نتیجه آب در این خاک‌ها فقط از طریق نیروی کاپیلاری منتقل می‌شود و جذب سطحی آب که در خاکهای رسی اتفاق می‌افتد در این خاکها دیده نمی‌شود. با کاربرد بیوچار در خاکهای شنی منافذ ریز تشکیل می‌شود و آب و عناصر غذایی در منافذ ریز بیوچار ذخیره شده و در خاک‌های خشک و پتانسیل ماتریک بالا در دسترس گیاه قرار گرفته و مقاومت گیاه به خشکی افزایش می‌یابد. در خاک‌های لومی، بیوچار تاثیری بر میزان رطوبت قابل دسترس خاک نداشته است و خاک‌های رسی نفوذپذیری کمی دارند که موجب غرقابی شدن خاک و مقاومت در برابر رشد ریشه شده و در نهایت منجر به کاهش عملکرد می‌شود. بیوچار در خاک‌های رسی، منافذ ریز را به منافذ متوسط و بزرگ تغییر داده و با افزایش هدایت هیدرولیکی خاک تهویه و رطوبت خاک بهبود می‌یابد (زیلی، ۲۰۱۲). بنابراین با ترکیب کردن بیوچار و خاک، دانه‌بندی خاک طی زمان بهبود می‌یابد. به‌نظر می‌رسد افزایش رطوبت قابل دسترس خاک در اثر افزودن بیوچار می‌تواند میزان آب مورد نیاز برای آبیاری یا تعداد دفعات آن‌را کاهش دهد (ورهیجن و همکاران،۲۰۱۰). چان و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که افزایش ظرفیت زراعی و قدرت نگهداری آب در خاک با افزایش مقادیر بیوچار افزایش می‌یابد و بیشترین نتایج در کاربرد ۵۰ و ۱۰۰تن در هکتار بیوچار به‌دست آمد. البته اثرات مثبت یا منفی بیوچار بر ظرفیت نگهداری آب خاک و تاثیر آن بر دفعات آبیاری هنوز به‌درستی شناخته نشده و نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

### ۲-۴-۳-تاثیر بر فراهمی عناصر غذایی خاک

بیوچار علاوه بر تاثیر مستقیم بر تامین عناصر غذایی گیاهان، به‌طور غیرمستقیم نیز از طریق افزایش کارایی مصرف کودهای شیمیایی، نگه‌داری عناصر غذایی، تاثیر بر پویایی میکروارگانیسم‌های خاکزی و افزایش تجزیه مواد آلی بر بهبود کیفیت خاک موثر است. میزان عناصر غذایی موجود در بیوچار بسته به نوع ماده اولیه آن متفاوت است (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹؛ سوحی و همکاران، ۲۰۰۹). نگهداری عناصر

غذایی توسط نیروی کاپیلاری و از طریق جذب آنها از آب موجود در منافذ ریز بیوچار انجام می‌شود. ذرات بیوچار همانند خاک رس عمل کرده و حجم زیادی از آب را حتی در خاک‌هایی با پتانسیل ماتریک بالا نگهداری می‌کند. در نتیجه عناصر موجود در این آب در نزدیک خاک سطحی نگهداری شده و برای گیاهان قابل دسترس خواهد بود (ماژور و همکاران، ۲۰۰۹). افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در اثر کاربرد بیوچار نیز در نگهداری عناصر غذایی و کودها موثر است. با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کودهای مصرف شده در خاک جذب قسمتهای سطحی بیوچار شده و این امر موجب تسهیل دسترسی گیاهان به عناصر غذایی می‌شود (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹؛ ماژور و همکاران، ۲۰۰۹).

بیوچار نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف کود دارد. مطابق گزارش‌های سوحی و همکاران (۲۰۰۹) زمانی‌که کود به همراه بیوچار در خاک استفاده می‌شود، با کاربرد کود کمتری می‌توان به همان میزان عملکرد دست یافت. آسای و همکاران (۲۰۰۹) عملکرد کمتری را در کاربرد بیوچار به تنهایی در مقایسه با کاربرد هم‌زمان بیوچار با کود گزارش کرده و دلیل این امر را جذب عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی آنها در کاربرد توام کود با بیوچار عنوان نمودند.

### ۲-۴-۴-۴- تاثیر بیوچار بر pH خاک

pH بیوچار اغلب خنثی تا قلیایی است و افزودن آن به خاک می‌تواند باعث خنثی شدن pH خاک شود (هائوجین و شنگ‌ونگ، ۲۰۱۳). اهمیت اثرات آهکی بیوچار در خاک‌های اسیدی بویژه در خاک‌هایی که دچار سمیت عناصر فلزی یا کمبود عناصر غذایی هستند، مشهود است (پوخرینگر، ۲۰۱۶). کاستالدی و همکاران (۲۰۱۱) به افزایش pH خاک از ۵/۲ به۶/۷ در آزمایش‌های خود اشاره کردند. افزودن بیوچار به خاک به دلیل خواص قلیایی آن ضمن بهبود رشد گیاهان، هزینه‌های مربوط به آهک‌پاشی را نیز کاهش می‌دهد (هینا، ۲۰۱۳). کارر و همکاران(۲۰۱۳) در آزمایش‌های خود بر روی تاثیر بیوچار بر انواع خاک‌ها،

افزایش pH خاک را فقط در خاک‌هایی که اسیدی بودند، مشاهده کردند و در خاک‌هایی با pH بالا و خواص قلیایی بیوچار تاثیری بر تغییر pH خاک نداشت. افزایش pH در خاک‌های شنی و لومی در اثر کاربرد بیوچار بیشتر از خاک‌های رسی است. خاصیت خنثی‌کنندگی رس که دارای بافت ریز است نسبت به خاک‌هایی با بافت درشت بیشتر است و نیاز به مقادیر بالاتری از بیوچار برای مشاهده اثرات قلیایی و خنثی‌کنندگی آن دارند (دوگریز، ۲۰۱۰).

### ۲-۴-۴-۵- تاثیر بر ظرفیت کاتیونی خاک

ساختار بیوچار حلقوی است و در نتیجه گروه‌های مختلفی با بار منفی می‌توانند به سطح بیوچار متصل شده و با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از آبشویی کاتیون‌های عناصر غذایی ضروری جلوگیری کرده و دستیابی گیاهان به این عناصر غذایی را تسهیل کنند (هینا، ۲۰۱۳). گلاسر و همکاران (۲۰۰۳) تشکیل گروه‌های کربوکسیل را دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا در بیوچار عنوان کردند. تشکیل این گروه‌های کربوکسیل به‌همراه سایر گروه‌های با بار منفی عاملی برای اکسیداسیون سطحی ذرات بیوچار بوده و علاوه بر آن به‌محض مخلوط کردن بیوچار با خاک، موجب جذب مواد آلی اکسیده شده در سطح بیوچار می‌شوند. به‌همین دلیل با گذشت زمان ظرفیت تبادل کاتیونی در بیوچار افزایش می‌یابد. در آزمایشی افزودن بیوچار تهیه شده از اوکالیپتوس باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در خاکهای تخریب شده گردید (کیمیتو و همکاران، ۲۰۰۸). ظرفیت تبادل کاتیونی بیوچار نقش مهمی را در نگهداری عناصر غذایی و دستیابی گیاهان به این عناصر بویژه در خاک‌های کم‌حاصلخیز ایفا می‌کند. ظرفیت تبادلی در بیوچار موجب تشکیل کمپلکس بین مواد آلی و معدنی با بیوچار شده و به افزایش دانه‌بندی در خاک کمک می‌کند (چنگ و همکاران، ۲۰۰۶). بررسی‌های دیگری نشان داد که کاربرد بیوچار در کوتاه مدت تاثیری بر

افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک نداشت و نیاز به زمان بیشتری برای ایجاد اثر متقابل بین خاک و بیوچار و بروز اثرات مثبت آن لازم است (نواک و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۲-۴-۴-۶- تاثیر بیوچار بر تحرک نیتروژن در خاک

نیتروژن یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاهان است که به چهار شکل عمده در خاک وجود دارد که عبارتند از : ماده آلی خاک (هوموس و بقایای گیاهی)، میکروب‌ها و دیگر ارگانیسم‌های خاکزی، یون‌های آمونیوم که توسط مواد آلی و رس حمل می‌شوند، یونهای $NO^{3-}$ و $NH^{4+}$ و میزان کمتری نیتریت ($NO^{2-}$) که در محلول خاک وجود دارد. بیوچار به طور مستقیم و غیرمستقیم بر همه اشکال نیتروژن موثر است (پان و همکاران،۲۰۱۳). به‌دلیل وجود نسبت بالایی از C به N در بیوچار، غیر متحرک شدن نیتروژن با افزودن بیوچار به خاک دور از انتظار نیست (زنگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ برون و همکاران، ۲۰۱۲)، هرچند وجود کربن پایدار در ساختار بیوچار ممکن است غیر متحرک شدن نیتروژن را محدود کند (چان و خو، ۲۰۰۹). میزان تاثیر بیوچار بر افزایش یا کاهش معدنی شدن نیتروژن به دمای گرماکافت، نوع ماده اولیه، خصوصیات فیزیکوشیمیایی بیوچار و خاک مورد آزمایش بستگی دارد. بیوچار تولید شده در شرایط گرماکافت سریع و دمای پایین، حاوی ترکیبات کربنی قابل دسترس برای جمعیت میکروبی خاک است و غیر متحرک شدن نیتروژن را افزایش می‌دهد. درحالی‌که گرماکافت کند و دمای بالا حاوی ترکیبات کربنی فرار و قابل دسترس کمتری است (برون و همکاران، ۲۰۱۲). کلوف و همکاران (۲۰۱۳) بر انجام مطالعات دراز مدت در رابطه با تاثیر بیوچار بر معدنی شدن نیتروژن خاک تاکید کرده و عنوان کردند که اکثر مطالعات مرتبط با بیوچار کوتاه مدت بوده و غیر متحرک شدن نیتروژن ممکن است در نتیجه وجود یا افزوده شدن کربن ناپایدار به آن اتفاق بیفتد. آملوت و همکاران (۲۰۱۵) افزایش معدنی شدن نیتروژن در خاک‌های حاوی بیوچار حاصل از کود دامی که ماده آلی بالایی داشت را گزارش کردند. البته گزارش-

هایی مبنی بر کاهش معدنی شدن نیتروژن با افزودن بیوچار چوب در خاک‌های لوم رسی وجود دارد (پرایوگو و همکاران، ۲۰۱۴؛ دمپستر و همکاران، ۲۰۱۲). چان و همکاران (۲۰۰۷) جذب نیتروژن توسط بیوچار را در مصرف مقادیر بالای آن گزارش کردند.

### ۲-۴-۴-۷- تاثیر بیوچار بر فسفر خاک

فسفر یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاهان است که در سال‌های اخیر مصرف کودهای شیمیایی فسفره بیش از حد نیاز گیاه موجب افزایش غلظت فسفر در خاک شده است و در اثر پدیده‌هایی نظیر آبشویی، رواناب و فرسایش در آب‌های سطحی و زیرزمینی منجر به پدیده اوتریفیکاسیون[11] شده است. بنابراین بررسی روش‌های جدید که بتواند فسفر را به شکل قابل دسترس برای گیاهان فراهم آورده و آسیب کمتری برای محیط زیست داشته باشد، ضروری است. فسفر معدنی بسیار غیرفعال بوده به سرعت از دسترس گیاه خارج می‌شود. حلالیت فسفر معدنی به عواملی مانند pH خاک و غلظت عناصری نظیر آلومینیوم، آهن، کلسیم و منیزیم بستگی دارد. درخاک‌های اسیدی با pH کمتر از۵، فسفر جذب عناصر آلومینیوم و آهن شده و به فرم غیرفعال درمی‌آید (کاترین، ۲۰۱۶). بیوچار توانایی بالایی در جذب فسفر معدنی که توسط گیاه جذب نمی‌شود را دارد. بیوچار با افزایش میزان pH خاک بر حلالیت فسفر تاثیر می‌گذارد. بیوچار با جذب و نگهداری عناصر غذایی بویژه در خاک‌های شنی از هدررفت فسفر جلوگیری می‌کند و در نتیجه با افزایش کاربرد بیوچار میزان فسفر خاک افزایش می‌یابد. بیوچار با توانایی بی‌نظیر در جذب و نگهداری عناصر غذایی، علاوه بر بهبود رشد گیاهان، به کاهش آلودگی ناشی از افزودن عناصر غذایی به خاک نیز جلوگیری می‌کند (کولیسون و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای بر روی ترب (*Raphanus sativus* L.) افزایش ماده خشک و عملکرد ترب در تیمارهای کاربرد بیش از ۵۰ تن در هکتار بیوچار و بدون کودشیمیایی نیتروژن مشاهده شد. این امر به‌دلیل میزان بالایی از فسفر قابل

[11] Eutrophication

دسترس در بیوچار و عدم محدودیت فسفر برای گیاه بود (چان و همکاران، ۲۰۰۷). گزارشاتی مبنی بر تاثیر بیوچار بر افزایش فسفر و پتاسیم در سال اول آزمایش وجود دارد در حالیکه در سال دوم این اثرات کاهش می‌یابد. بیوچار تازه مصرف شده در خاک حاوی مقادیر بالایی از فسفر و پتاسیم محلول و قابل دسترس گیاه است ولی ممکن است به سرعت به شکل غیر متحرک تبدیل شود و یا در اثر جذب توسط گیاه و آبشویی مقدار آن کاهش یابد (کارر و همکاران، ۲۰۱۳).

### ۲-۴-۴-۸-تاثیر بیوچار بر خصوصیات بیولوژیکی خاک

وجود جانداران خاک‌زی در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است و نقش مهمی را در سرویس‌های اکوسیستمی ایفا می‌کنند. بنابراین اطلاع از رابطه بین بیوچار افزوده شده به خاک و این موجودات ضروری است. خاک یک زیستگاه پویا و پیچیده برای ارگانیسم‌ها است و به دلیل ناهمگنی بالایی که دارد حاوی نیچ‌های بسیار متفاوتی می‌باشد. در مقیاس میکروسکوپی خاک یک زیستگاه وابسته به آب است که منافذ ریز آن بجز در مواقع خشکی شدید، حاوی مقادیر زیادی آب است که این امر برای حضور و فعالیت بسیاری از گونه‌های میکروبی ضروری است. با افزودن بیوچار به خاک قدرت نگهداری آب خاک افزایش می‌یابد که تاثیر مثبت بر فعالیت‌های موجودات خاک‌زی و سرویس‌های اکوسیستمی مرتبط با آنها می‌گذارد. از طرفی موجودات خاکزی برای حفظ بقا و جلوگیری از شکار شدن، از جوامع، شبکه‌های غذایی و پناهگاه‌های متفاوتی استفاده می‌کنند. بیوچار با دارا بودن منافذ فراوان می‌تواند به‌عنوان پناهگاه برای موجودات کوچکی که در منافذ ریز آن زندگی می‌کنند، باشد و در نتیجه موجودات بزرگتر قادر به شکار آنها نخواهند بود (ورهیجن و همکاران، ۲۰۱۰).

### ۲-۴-۴-۸-۱-تاثیر بر میکروارگانیسم‌های خاکزی

بین تنوع زیستی و مواد آلی خاک همبستگی بالایی وجود دارد. شواهد زیادی وجود دارد که بیوچار بر جمعیت میکروبی خاک تاثیر می‌گذارد. زمانی‌که بیوچار به خاک افزوده می‌شود، زیست‌توده میکروبی و تنفس خاک افزایش می‌یابد (استینر و همکاران، ۲۰۰۸). بیوچار علاوه بر افزایش زیست‌توده میکروبی و تنفس خاک بر تثبیت بیولوژیک نیتروژن نیز موثر است. آزمایش‌های راندون و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که کاربرد بیوچار در زراعت لوبیا سبز (*Phaseolus vulgaris*) توانست تثبیت نیتروژن در این گیاه را افزایش داده و موجب افزایش عملکرد شود. از آنجاییکه باکتریهای ریزوبیوم در شرایط خنثی بیشترین فعالیت را دارند، کاربرد بیوچار در خاکهای اسیدی به افزایش باکتریهای ریزوبیوم کمک می‌کند.

### ۲-۴-۴-۸-۲-تاثیر بر جانداران متوسط و بزرگ

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بیوچارها بر اساس نوع ماده اولیه و شرایط تولید آنها اثرات متفاوتی را بر جانداران خاکزی دارند. لایش و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که کاربرد مقادیر بالاتر از ۶۷ تن در هکتار بیوچار که از کود طیور تهیه شده بود بر جمعیت کرمهای خاکی تاثیر منفی داشت. آنها دلیل این امر را افزایش pH و شوری خاک و در نتیجه ایجاد شرایط نامناسب برای بقای کرمهای خاکی عنوان کردند. در این تحقیق فعالیت کرمهای خاکی در خاکهایی که از بیوچار چوب کاج استفاده شده بود، بیشتر از بیوچار کود طیور بود. از آنجاییکه بیوچار مانند سایر ذرات خاک مورد تغذیه کرمهای خاکی قرار می‌گیرد، در آزمایشی که توسط پانگ و همکاران (۲۰۰۶) انجام شد، کرمهای خاکی به بیوچار مخلوط شده با خاک علاقه بیشتری نسبت به کاربرد بیوچار یا خاک تنها نشان دادند. مطالعاتی در زمینه تاثیر بیوچار بر سایر جانداران خاکزی از قبیل بندپایان کوچک انجام نگرفته است. تاثیر بیوچار بر سایر بی‌مهرگان خاکزی به موقعیت قرارگیری میکروارگانیسم‌ها در خاک بستگی دارد. اگر زیست‌توده میکروبی در فضاهای درون

بیوچار افزایش یابد، جمعیت میکروبی در این فضاها بیشتر شده و دسترسی بی‌مهرگان به این میکروارگانیسم‌ها دشوار شده و درنتیجه جمعیت آنها کاهش می‌یابد و در مقابل، افزایش زیست‌توده میکروبی در خارج از ذرات بیوچار و درون خاک، موجب تسهیل در دسترسی بی‌مهرگان به میکروارگانیسم‌ها و افزایش جمعیت آنها می‌شود (ورهیجن،۲۰۱۰).

### ۲-۴-۵-تاثیر بیوچار بر رشد گیاهان

اکثر نتایج گزارش شده در رابطه با تاثیر بیوچار بر رشد و عملکرد گیاهان مربوط به مناطق گرمسیری است و مطالعات در مناطق معتدله بسیار کم و در سالهای اخیر صورت گرفته است. نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده در رابطه با بیوچار بسته به شرایط محیطی (نوع خاک، رطوبت)، نوع گیاه، نوع بیوچار مورد استفاده و سیستم‌های کشاورزی، بسیار متنوع است. در بررسی‌های انجام شده بر روی نتایج ۹ آزمایش که توسط ورهیجن و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد، عملکرد گیاه با کاربرد۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰تن در هکتار بیوچار نسبت به تیمارهای بدون کاربرد بیوچار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش عملکرد دانه و زیست توده در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (حیدر و همکاران، ۲۰۱۵؛ کامان و همکاران، ۲۰۱۱؛ کورنلیسن و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از بیوچار چوب چنار در خاک‌های نواحی معتدله موجب افزایش ۱۰ درصدی عملکرد دانه جو (*Hordeum vulgare*) در مقایسه با تیمار شاهد شد (کارر و همکاران، ۲۰۱۳). البته در مطالعات متعدد دیگری نیز بر عدم تاثیر بیوچار بر تولید گیاهان زراعی اشاره شده است (جین و ونگ،۲۰۱۳). کاربرد بیوچار ممکن است تاثیر منفی بر تولید و عملکرد گیاهان داشته باشد (آسای و همکاران، ۲۰۰۹). افزودن بیوچار حاصل از کلش برنج به خاک شنی، عملکرد دانه برنج (*Oryza sativa*) را بین ۲۷ تا ۳۵ درصد کاهش داد (لی و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر موارد فوق برخی محققین نتایج پیچیده‌ای را از تاثیر بیوچار بر تولید گیاهان گزارش کرده‌اند که از آن جمله به موارد زیر

می‌توان اشاره کرد: ا- افزایش در مقدار بیوچار با کاهش عملکرد همراه بوده است (آسای و همکاران، ۲۰۰۹) ۲- مشاهده اثرات منفی بیوچار بر عملکرد بعد از سال اول (برچارد و همکاران، ۲۰۱۴) ۳- از بین رفتن اثرات منفی بیوچار بعد از سال اول (گاسکین و همکاران، ۲۰۱۰) ۴-کاهش عملکرد با مصرف مقادیر کم بیوچار و افزایش عملکرد با افزایش مقدار مصرف آن (چان و همکاران، ۲۰۰۷). بسیاری از این اثرات پیچیده بیوچار به تاثیر آن بر عناصرغذایی خاک، گیاه و همچنین بر همکنش آن با آب مربوط می‌شود که منجر به نتایج متفاوت می‌شود.

### ۲-۴-۶-تاثیر بیوچار بر دستیابی گیاهان به عناصر غذایی

بیوچار به دلایل متعدد توانایی بالقوه‌ای در تغذیه و جذب عناصر غذایی توسط گیاهان دارد. بیوچار تازه تهیه شده حاوی مقادیری عناصر غذایی است. موخرجی و زیمرمن (۲۰۱۳) آزادسازی ۶۳۵-۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن و ۱۶۶۴- ۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر را از بیوچار در مطالعات خود گزارش کردند. البته میزان عناصر غذایی بیوچار بسته به دمای گرماکافت و نوع ماده اولیه متفاوت است و ممکن است مقادیر عناصر غذایی موجود در بیوچار برای رشد گیاه کافی نباشد (حیدر، ۲۰۱۶). خصوصیات فیزیکوشیمیایی بیوچار نقش مهمی را در تغییر خصوصیات خاک و افزایش حاصلخیزی آن دارد. ساختار اسفنجی شکل بیوچار توانایی بالایی در نگهداری آب خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب دارد. علاوه بر آن بیوچار با تغییر pH خاک بر افزایش یا کاهش عناصر غذایی خاک موثر است. تاثیر بیوچار بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز بر دسترسی گیاهان به عناصر غذایی موثر است. بیوچار با کاهش آبشویی عناصر غذایی بویژه فرم نیتراتی نیتروژن، دستیابی گیاهان به نیتروژن را افزایش می‌دهد (حیدر و همکاران، ۲۰۱۶؛ لایرد و همکاران، ۲۰۱۰). البته تاثیر بیوچار بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و بهبود حاصلخیزی و جذب عناصر توسط گیاهان لزوما در مورد همه انواع بیوچارها صادق نیست. بیوچار با

افزایش pH خاک موجب افزایش جذب عناصری مانند فسفر، پتاسیم و کلسیم و کاهش آلومنیوم آزاد در خاک می‌شود (چان و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعات متعددی وجود دارد که به کاهش نیتروژن قابل دسترس برای گیاهان و غیرمتحرک شدن نیتروژن در اثر کاربرد بیوچار در خاک اشاره شده است (ماژور و همکاران، ۲۰۱۲؛ حیدر و همکاران، ۲۰۱۵؛ دونگ و همکاران، ۲۰۱۴). دماهای بالا (بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد) موجب غیرمتحرک شدن بیشتر نیتروژن می‌شود (حیدر، ۲۰۱۶).

**۲-۴-۷-تاثیر بیوچار بر کارایی مصرف نیتروژن**

با وجود مزایای بی‌شمار کودهای نیتروژن‌دار در افزایش رشد، تولید و عملکرد گیاهان زراعی، مصرف بیش از حد آنها از طریق آبشویی و فرسایش، می‌تواند موجب افزایش آلودگی آبهای زیرزمینی و سطحی و افزایش هزینه گردد. بنابراین، مدیریت صحیح حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه علاوه بر کاهش آلودگی‌های نیتراتی و حفظ تنوع زیستی با اجتناب از کاربرد غیرضروری و بی رویه عناصر غذایی، هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند و کارآیی مصرف نهاده ها را افزایش می‌دهد (هیچیل و بارنز، ۱۹۸۴). طبق تعریف کارایی مصرف نیتروژن در واقع نشان دهنده توانایی گیاه در تولید عملکرد دانه و یا بیولوژیک به ازای هر واحد نیتروژن مصرف شده می‌باشد. علاوه بر توانایی گیاه در جذب نیتروژن از خاک، کارایی مصرف نیتروژن می‌تواند تحت تأثیر میزان تخصیص نیتروژن جذب شده به اندام اقتصادی و نیز نوع منبع تأمین کننده این عنصر قرار گیرد (سالواگیوتی و همکاران، ۲۰۰۹). هاگینز و پال (۱۹۹۳) اظهار داشتند اگر خاک به لحاظ نیتروژن آلی و بیوماس میکروبی غنی باشد بدون کاربرد کود نیتروژن عملکرد بالایی به دست می‌آید، یا با مصرف مقدار اندکی کود شیمیایی نیتروژن، کارآیی بالایی در مصرف نیتروژن مشاهده خواهد شد. در این حالت کاربرد بیشتر کود شیمیایی نیتروژن منجر به کاهش در میزان کارآیی مصرف نیتروژن می‌شود. در حقیقت علت این پدیده به این دلیل نیست که گیاه زراعی کود نیتروژن را با کارآیی کمتری مصرف می-

کند، بلکه علت این است که نقش نیتروژن آلی در حصول عملکرد دانه کم‌رنگ دیده شده است. کاربرد روش‌های مدیریتی نوین می‌تواند موجب بهبود رشد گیاه و کاهش تلفات نیتروژن و در نتیجه افزایش کارایی مصرف نیتروژن شده و آزادسازی گاز $N_2O$ را کاهش دهد. به‌نظر می‌رسد بیوچار با داشتن خواص فیزیکی و شیمیایی در ساختار خود نظیر نگه‌داری آب و عناصر غذایی، تنظیم pH خاک و کاهش آبشویی عناصر غذایی بتواند در افزایش کارایی عناصر غذایی و بویژه نیتروژن نقش موثری داشته باشد. از آنجاییکه گیاهان نیتروژن را در درجه اول به شکل نیترات جذب می‌کنند، افزایش جذب آن توسط یونهای بازی موجود در سطح بیوچار از اهمیت بالایی برخوردار است. نیترات و آمونیوم فرمهای معدنی نیتروژن هستند که به نسبت کم در بیوچار وجود دارند و به آهستگی در خاک آزاد شده نقش منبع کودی در خاک را ایفا می‌کند (چان و خو، ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای که برای مقایسه قدرت نگهداری نیتروژن در کمپوست و بیوچار انجام گرفت، بیوچار کارایی مصرف کود نیتروژن معدنی را بیشتر از کمپوست افزایش داد و کاربرد کودشیمیایی با مصرف بیوچار کاهش یافت (استینر و همکاران، ۲۰۰۸). در حال حاضر تحقیقات کمی بر روی تاثیر بیوچار بر افزایش کارایی مصرف نیتروژن انجام شده است ولی گزارشات موجود بیانگر تاثیر مثبت بیوچار بر افزایش کارایی مصرف نیتروژن و افزایش عملکرد بوده است (زو و همکاران، ۲۰۱۵؛ بو و همکاران، ۲۰۱۷). این اثرات مثبت به تاثیر بیوچار بر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و نگه‌داری بیشتر عناصر غذایی و دسترسی بهتر گیاه به این عناصر به‌ویژه نیتروژن مربوط می‌شود (زو و همکاران، ۲۰۱۵). برخی از محققان افزایش مقدار زیست توده زیرزمینی نسبت به زیست توده بخش هوایی و کاهش مقاومت خاک در اثر کاربرد بیوچار را عامل افزایش جذب نیتروژن و افزایش کارایی مصرف آن عنوان کردند (کامان و همکاران، ۲۰۱۱). کاهش یونهای آلومنیوم و افزایش pH خاک نیز از دیگر عوامل موثر بر افزایش کارایی مصرف نیتروژن در اثر کاربرد بیوچار عنوان شده است (زو و همکاران، ۲۰۱۴).

## ۲-۴-۸-بیوچار و اکوفیزیولوژی گیاهان

تحقیقات بسیار کمی در رابطه با تاثیر بیوچار بر پارامترهای اکوفیزیولوژی وجود دارد و بیشتر مطالعات بر روی عملکرد گیاهان زراعی انجام شده است. ارزیابی پاسخ‌های اکوفیزیولوژیکی گیاهان به شناخت تاثیر بیوچار بر سطح مشترک خاک و گیاه کمک می‌کند. اختر و همکاران (۲۰۱۴) به بهبود خصوصیات فیزیولوژی، عملکرد و کیفیت گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) در شرایط کم‌آبیاری، با کاربرد بیوچار اشاره کردند. کاربرد بیوچار حاصل از کلش برنج به‌همراه فسفر در خاک لوم سیلت در شرایط روزها و شبهای با دمای بالا، کارایی فتوسنتزی و کارایی مصرف آب در برنج را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (فهد و همکاران، ۲۰۱۶). تاثیر بیوچار بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه علاوه بر اثر متقابل بین آب خاک و گیاه، از طریق افزایش یا کاهش عناصر غذایی نیز صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال بیوچار با جذب سدیم خاک در سطح خود، در زراعت گندم (*Triticum aestivum*) توانست از شوری خاک بکاهد (اختر و همکاران، ۲۰۱۵). به‌دلیل تفاوت در ماده اولیه بیوچارها و طرز تهیه آنها، گزارشات منفی از تاثیر بیوچار بر فیزیولوژی گیاه نیز وجود دارد. در کاربرد بیوچاری که از خاک اره نوعی راش (*Fagus grandifolia*) در دمای ۳۷۰ درجه‌سانتیگراد تهیه شده بود، تاثیری در کارایی مصرف آب، کربن فتوسنتزی و کلروفیل در دو گیاه گاوپنبه (*Abutilon theophrasti*) و نعناع چمنی (*Prunella vulgaris*) مشاهده نشد (توماس و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین افزایش در فعالیت آنتی‌اکسیدانهایی نظیر کاتالاز و پراکسیدازها در آزمایشات مشاهده شده است (ونگ و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین تاثیر بیوچار بر فیزیولوژی گیاه بسته به نوع بیوچار، خاک مورد استفاده، رطوبت خاک، گونه‌ی گیاهی، عناصر غذایی موجود در خاک و جمعیت میکروبی متفاوت خواهد بود.

## ۲-۴-۹-تاثیر بیوچار بر معدنی شدن مواد آلی

یک مشکل عمده در مناطق خشک و نیمه خشک آبشویی عناصر غذایی در اثر بارندگی یا آبیاری است. افزودن بیوچار به خاک در این مناطق می‌تواند از آبشویی عناصر غذایی جلوگیری کند. از طرفی میزان مواد آلی خاک در این خاک‌ها بسیار پایین است و کاربرد بیوچار می‌تواند معدنی شدن مواد آلی خاک را کاهش دهد. روشی که بیوچار قادر به کاهش معدنی شدن مواد آلی است به خصوصیات جذبی آن که بتواند در برابر دستیابی میکروارگانیسم‌ها به عناصر غذایی خاک مقاومت کند، بستگی دارد. از طرفی بیوچار با داشتن نسبت C بهN بالا موجب غیر متحرک شدن نیتروژن می‌شود که در نتیجه از معدنی شدن مواد آلی جلوگیری کرده و به ترسیب کربن در خاک کمک می‌کند.

استفاده مداوم و منظم بیوچار همانند کودهای شیمیایی در خاک ضروری نیست. در یک آزمایش گلدانی که توسط چان و همکاران (۲۰۰۷) انجام شد با مصرف همزمان بیوچار و کودشیمیایی، افزایش معنی‌داری در ماده خشک ترب مشاهده شد. چان و خو (۲۰۰۹) گزارش کردند که کاربرد بیوچار موجب افزایش کارایی مصرف کود شد.

## ۲-۴-۱۰-بیوچار و تنش خشکی

تنش خشکی، از مهمترین فاکتورهای غیر زیستی محدودکنندی رشد و عملکرد گیاهان محسوب می-شود. تنش خشکی منجر به کاهش محتوی آب گیاه، کاهش پتانسیل آب برگ، بستن روزنه‌ها و کاهش رشد و بزرگ شدن سلول‌ها می‌شود. در شرایط خشکی بسیار شدید فتوسنتز و متابولیسم گیاه متوقف شده و در نهایت موجب مرگ گیاه می‌شود (مانان و همکاران، ۲۰۱۶). اثرات مثبت بیوچار بر رشد و نمو گیاهان در شرایط کمبود آب در مطالعات مختلفی گزارش شده است (ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۵؛ اختر و همکاران، ۲۰۱۴). کاربرد بیوچار رشد و زیست‌توده گیاهان در معرض تنش را افزایش داده است. به‌عنوان

مثال افزایش ارتفاع و سطح برگ در گیاهان بامیه (*Abelmoschus esculentus* L.) (بتول و همکاران، ۲۰۱۵) و ذرت (*Zea mays* L.) (حیدر و همکاران، ۲۰۱۵) با کاربرد بیوچار در شرایط تنش خشکی گزارش شده است. همچنین بیوچار موجب افزایش زیست توده گندم در شرایط آب و هوای نیمه خشک گردید (اولمو و همکاران، ۲۰۱۴). اختر و همکاران (۲۰۱۴) با کاربرد بیوچار افزایش معنی‌داری را در محتوی کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، میزان فتوسنتز، کارایی مصرف آب، محتوی آب نسبی و افزایش تراکم روزنه‌ها در برگهای گوجه‌فرنگی در شرایط تنش آبی گزارش کردند. کامان و همکاران (۲۰۱۱) با کاربرد بیوچار در شرایط تنش خشکی، افزایش در کارایی مصرف آب را در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) گزارش کردند. از طرفی بیوچار در شرایط تنش آبی از طریق تاثیر بر خصوصیات خاک می‌تواند بر رشد گیاهان تاثیر بگذارد. کاهش در تراکم حجمی خاک و افزایش در ظرفیت نگهداری آب در دامنه وسیعی از خاکها با بافتهای متفاوت گزارش شده است (جفری و همکاران، ۲۰۱۵؛ ایگالاویسانا و همکاران، ۲۰۱۷). با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک در اثر کاربرد بیوچار، نیروی مویینگی آب خاک افزایش یافته و در نتیجه فعالیت میکروبی خاک، دستیابی به عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن و فسفر و عملکرد گیاه افزایش می‌یابد (بایدرمن و هارپول، ۲۰۱۳). کاربرد بیوچار در خاک‌های رس شنی موجب استحکام خاکدانه‌ها شد که این امر بر نگهداری آب خاک در شرایط کمبود آب موثر است (بایامونت و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای که در مورد تاثیر بیوچار حاصل از بقایای درخت کاج بر روی گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) و علف پنجه‌مرغی (*Cynodon dactylon*) در خاک شن لومی آهکی انجام گرفت، در سال اول آزمایش با افزودن مقادیر بالای بیوچار (۴ درصد) رشد کاهو کاهش یافت ولی در سال دوم و سوم آزمایش بدون افزودن بیوچار مجدد، رشد کاهو افزایش یافت. برخلاف کاهو عملکرد و زیست توده علف پنجه‌مرغی با اعمال تنش خشکی در تیمارهای حاوی بیوچار در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. در این تحقیق کاهش رشد و عملکرد کاهو به افزایش pH خاک توسط بیوچار نسبت داده شد و با گذشت زمان و با برهم

کنش بین بیوچار و خاک و تنظیم pH خاک رشد کاهو افزایش یافت. در علف گرمسیری پنجه‌مرغی افزودن بیوچار موجب بهبود عملکرد این گیاه در شرایط تنش خشکی گردید (آرتیولا و همکاران، ۲۰۱۲).

### ۲-۴-۱۱-تاثیر بیوچار بر آلاینده‌های خاک

در سالهای اخیر قدرت جذب سطحی بیوچار علاوه بر تاثیر بر خصوصیات جذبی خاک، بر جذب مواد سمی موجود در خاک و همچنین کاهش آلاینده‌های محیطی نیز مورد توجه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که یونهای فلزات سنگین بر روی مکان‌های خاصی از بیوچار که دارای گروه‌های کربوکسیل اسیدی هستند، جذب می‌شوند. در مکانیسم جذب عناصر سنگین توسط بیوچار فرایند جایگزینی فلزات سنگین با یون‌های موجود در بیوچار از قبیل کلسیم، پتاسیم، منیزیم و منگنز مشاهده شد که این امر تاثیر مواد معدنی موجود در بیوچار در کاهش آلودگی‌های خاک را نشان می‌دهد. بیوچار از تحرک و ایجاد سمیت توسط فلزات سنگین جلوگیری می‌کند (وینگیت، ۲۰۰۸). از خاصیت جذب سطحی بیوچار همچنین می‌توان در کنترل آلودگی ناشی از فاضلاب‌ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی نظیر فنل‌ها و آفت-کش‌ها که دوام بالایی در خاک دارند، بهره برد. در بررسی‌های انجام شده، بیوچار حاصل از کلش محصولات زراعی توانست سولفات، بنزن و نیتروبنزن را از خاک مورد مطالعه جذب کند (چان و همکاران، ۲۰۰۴). بیوچار حاصل از گیاه بامبو (*Bambusa vulgaris*) در جذب نیترات از آب آشامیدنی موثر بود (میزوتا و همکاران، ۲۰۰۴).

### ۲-۴-۱۲-کاربرد بیوچار برای مدیریت بقایای کشاورزی

بقایای دامی و محصولات کشاورزی از آلاینده‌های مهم خاک و آب‌های سطحی به‌شمار می‌روند. این ضایعات همانند سایر فراوده‌های جانبی منابع مفیدی برای تولید انرژی‌های زیستی به‌شمار می‌آیند. کاربرد این ضایعات آلی علاوه بر تولید انرژی موجب کاهش حجم آنها در طبیعت شده و علاوه بر مزایای اقتصادی

از طریق کاهش انتشار متان از خاک، کاهش مصرف انرژی‌های صنعتی، بازیافت انرژی از بقایا و افزایش ترسیب کربن به کاهش اثرات گلخانه‌ای و تغییر اقلیم کمک می‌کنند. مزیت دیگر بیوچار حاصل از بقایای کشاورزی این است که برخلاف کاربرد مستقیم کودهای دامی و بقایای زراعی به‌دلیل فرایند گرماکافت و دماهای بالای ۳۵۰ درجه سانتیگراد، عوامل بیماری‌زا در آن از بین رفته است (لهمان و همکاران، ۲۰۰۹).

## ۲-۴-۱۳-تاثیر بیوچار بر توازن گازهای گلخانه‌ای

با توجه به اینکه خاکها و بویژه مواد آلی موجود در آنها از مهم‌ترین ذخایر کربن اکوسیستم‌های خشکی هستند، به‌همین دلیل نقش مهمی در انتشار گاز دی اکسید کربن دارند. مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات اندک در مواد آلی خاک می‌تواند منجر به اثرات عمده در غلظت گاز دی‌اکسیدکربن اتمسفری شود (کریشبام، ۲۰۰۰). دو روش برای افزایش مخازن کربنی خاک، افزایش ورودی مواد آلی و کاهش تجزیه‌ی آنها به‌منظور افزایش کربن خاک است. موادی نظیر کودهای دامی و بقایای گیاهی به‌دلیل تجزیه سریع آنها توسط میکروارگانیسم‌های خاک، به عنوان ذخایر کربنی پایدار در خاک به‌شمار نمی‌رود. بیوچار با داشتن ساختاری مقاوم در برابر تجزیه میکروارگانیسم‌ها و انتشار گازها می‌تواند در ترسیب کربن نقش موثری داشته باشد. بسته به نوع بیوچار، بافت خاک و شرایط محیطی، کاربرد بیوچار می‌تواند موجب افزایش یا کاهش در فرایند معدنی شدن مواد آلی خاک شود. به‌عنوان مثال بیوچار ممکن است دارای ترکیبات غنی از انرژی و قابل تجزیه باشد که با افزودن به خاک به‌طور مستقیم موجب رشد جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیمهای خاک شده و معدنی شدن موادآلی خاک را تسریع کند (ویتمن و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی بیوچار به‌طور غیر مستقیم با تاثیر بر pH و عناصرغذایی خاک و ایجاد تغییرات در زیستگاه میکروارگانیسم‌ها و جانداران خاک‌زی بر معدنی شدن مواد آلی موثر است (موخرجی و زیمرمن، ۲۰۱۳). بیوچار همچنین با داشتن ویژگیهای منحصر به فرد قادر به کاهش معدنی شدن مواد آلی خاک

است. برای مثال موادآلی ناپایدار به سطح یا درون منافذ بیوچار جذب شده و دسترسی میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آنها کاهش می‌یابد (کاسوزی و همکاران، ۲۰۱۰). در برخی مطالعات به تاثیر برخی آنزیم‌های جذب شده در سطح بیوچار بر کاهش معدنی شدن مواد آلی (زیمرمن و ژئو، ۲۰۱۳)، پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت آنها در برابر دستیابی میکروارگانیسم‌ها به تجزیه مواد آلی (برودووسکی و همکاران، ۲۰۰۶) و کاهش عناصر غذایی در اثر جذب سطحی بیوچار و کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌ها (حیدر، ۲۰۱۶) اشاره شده است.

اکسید نیتروژن از دیگر گازهای مهم گلخانه‌ای است. کشاورزی فشرده با تولید و کاربرد کودهای شیمیایی و مصرف سوخت‌های فسیلی در این بخش، بزرگترین منبع اکسید نیتروژن اتمسفری است. کاربرد بیوچار با کاهش معدنی شدن نیتروژن موجب کاهش دسترسی به نیتروژن برای نیتروژن‌دهی (دنیتریفیکاسیون[۱۲]) و درنتیجه کاهش انتشار اکسید نیتروژن به اتمسفر می‌شود (لهمان و همکاران، ۲۰۰۶). متان نیز بعد از اکسید نیتروژن مهمترین گاز گلخانه‌ای به‌شمار می‌رود. کاربرد بیوچار در خاک‌ها با تاثیر بر منافذ خاک، افزایش هوادهی خاکها، کاهش تراکم حجمی و افزایش ظرفیت نگهداری آب، موجب افزایش مصرف متان در خاک و جلوگیری از انتشار آن می‌شود (ون زویتن و همکاران، ۲۰۱۵). از مزایای دیگر تاثیر کاربرد بیوچار بر کاهش غیرمستقیم انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌توان به تاثیر بیوچار بر افزایش کارایی مصرف کودهای شیمیایی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای $CO_2$ و $N_2O$ حاصل از تولید کودهای شیمیایی یا مصرف آنها، کاهش هزینه‌های آبیاری در اثر بهبود ظرفیت نگهداری آب خاک، کاهش انرژی مورد نیاز برای شخم به‌دلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک اشاره کرد (سوحی و همکاران، ۲۰۱۰).

---

[12] Denitrification

## ۲-۴-۱۴-مقادیر مصرف بیوچار

با توجه به تنوع نوع خاک، نوع محصول و همچنین تنوع در ماده اولیه بیوچار که موجب تنوع زیاد در ویژگی بیوچارهای متفاوت می‌شود، مقادیر توصیه شده بیوچار در تحقیقات بسیار متغیر می‌باشد. بیوچار به‌دلیل داشتن ساختار سخت، در برابر تجزیه بسیار مقاوم است و با یک‌بارکاربرد بیوچار در خاک زراعی اثرات مثبت آن برای سال‌های متمادی در خاک باقی می‌ماند که این امر در مورد کمپوست، کودهای دامی و کودهای شیمیایی صادق نیست (فیلیبرتو و گانت، ۲۰۱۳). بررسی‌ها نشان می‌دهد که اثرات مثبت از قبیل pH و ظرفیت تبادل کاتیونی در بیوچار با گذشت زمان بهبود می‌یابد (ماژور و همکاران، ۲۰۱۰). لیو و همکاران (۲۰۱۳) داده‌های حاصل از ۵۹ آزمایش گلدانی و ۵۷ آزمایش مزرعه‌ای را در ۲۱ کشور مورد مطالعه قرار داده و افزایش عملکرد در این آزمایش‌ها را به طور متوسط ۱۱ درصد عنوان کردند. آنها بهترین تاثیر بیوچار در افزایش عملکرد را در مقادیر کمتر از ۳۰تن در هکتار گزارش کردند. در این مطالعه میزان افزایش عملکرد در اثر کاربرد بیوچار در گیاهان مختلف متفاوت بود. میزان افزایش در گیاهان لگومینه ۳۰ درصد، سبزیجات ۲۹ درصد، ذرت ۸ درصد، گندم ۱۱ و برنج ۷ درصد بود. لهمان و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که کاربرد بیوچار در مقادیر بیشتر از ۵۵ تن در هکتار موجب کاهش عملکرد شد. بایدرمن و هارپور (۲۰۱۳) نیز به کاهش عملکرد در کاربرد مقادیر بالای بیوچار اشاره کردند. آسای و همکاران (۲۰۰۹) افزایش عملکرد برنج را در مصرف ۴ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با ۸ و ۱۶ تن در هکتار بیوچار گزارش کردند. دلایل این کاهش عملکرد در مقادیر بالای بیوچار هنوز مشخص نیست. به نظر می‌رسد مصرف به موقع ۲۵ تن در هکتار بیوچار برای دستیابی به عملکرد قابل قبول مناسب باشد. در مطالعات دیگر افزودن بیوچار به مقدار ۲۰درصد حجم خاک مناسب گزارش شده است

(ماگوار و آگبلیور، ۲۰۱۰). هرچند به نظر می‌رسد مصرف بیوچار بدون افزودن کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم کارایی بالایی در افزایش عملکرد نداشته باشد (فیلیبرتو و گانت، ۲۰۱۳).

# فصل سوم

# مواد و روش‌ها

## ۳- مواد و روش‌ها

### ۳-۱- موقعیت و تیمارهای مورد مطالعه در آزمایش

این آزمایش در دو سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد (طول جغرافیایی۵۹ درجه و ۲۸دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) به اجرا در آمد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات  فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار و ۱۸ تیمار انجام شد. کرت‌های اصلی شامل سطوح آبیاری در سه سطح شامل آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ($I_1$)، آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ($I_2$) و آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی ($I_3$) وکرت‌های فرعی شامل بیوچار در سه سطح شامل بدون بیوچار ($B_1$)، ۱۰ تن در هکتار بیوچار ($B_2$) و ۲۰ تن در هکتار بیوچار ($B_3$) (که فقط در سال اول بکار برده شد) و کود شیمیایی در دو سطح شامل بدون مصرف کود ($F_1$) و با مصرف کود شیمیایی ($F_2$) بود. میزان مصرف کودشیمیایی بر اساس آزمایشات خاک ۷۵کیلوگرم در هکتار فسفر ($P_2O_5$) از منبع سوپر فسفات تریپل، ۱۰۰کیلوگرم در هکتارپتاسیم ($K_2SO_4$) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتارنیتروژن (اوره) در هر دو سال بود.

### ۳-۲-آماده سازی زمین، کاشت و داشت

مراحل آماده سازی زمین در بهمن ماه سال ۱۳۹۴ انجام گرفت. زمین مورد نظر در سال پیش از اجرا به صورت آیش بود. قبل از انجام آزمایش، از خاک این زمین در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری نمونه برداری تصادفی انجام شد که نتایج تجزیه آن در جدول ۳-۱ آمده است. پس از عملیات شخم و تسطیح، کرت-

هایی به ابعاد ۳×۲متر (۶ متر مربع) ایجاد شد. فاصله بین کرت‌ها از یکدیگر ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر یک متر در نظر گرفته شد.

بیوچار از ضایعات چوب درخت گردو تهیه شد (موکوم و همکاران، ۲۰۱۲). برای این منظور از کوره گازسوز به حجم دو تن با جداره داخلی فلزی که فضای آن کاملا بسته، بدون درز و ایزوله بود، استفاده شد تا اکسیژن وارد کوره نشود. دمای کوره بین۴۰۰ درجه‌سانتی‌گراد (شروع احتراق) تا ۶۵۰ درجه‌سانتی‌گراد (حداکثر دمای احتراق) بود (روزیتو و همکاران، ۲۰۱۷). تجزیه شیمیایی بیوچار از طریق آزمایش مشخص شد (جدول۳-۲). قبل از مخلوط کردن بیوچار با خاک، بیوچار به قطعات ۱۰-۵ میلی‌متری خرد و شکسته شد (فیاز و همکاران، ۲۰۱۴؛ سودربرگ، ۲۰۱۳). بیوچار و کود شیمیایی فسفر و پتاسیم در بهمن ماه سال ۱۳۹۴ قبل از کاشت در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شد (پوخرینگر، ۲۰۱۶). بیوچار فقط در سال اول مورد استفاده قرار گرفت (کارر و همکاران، ۲۰۱۳) ولی کودشیمیایی در هر دو سال به خاک مورد مطالعه افزوده شد.

عملیات کاشت سیاه دانه (توده سمیرم اصفهان) در تاریخ نوزدهم فروردین ماه سال‌های ۱۳۹۵و ۱۳۹۶ به‌صورت دستی در عمق ۲ سانتی‌متری انجام گرفت. هر کرت شامل ۸ ردیف به فاصله ۲۵ سانتی‌متر بود. جهت سهولت جوانه‌زنی روی بذرها ماسه ریخته و بلافاصله بعد از اتمام کاشت آبیاری مزرعه انجام شد. بذرها در تاریخ سی و یکم فروردین‌ماه به‌طور کامل سبز شدند. در سال دوم آزمایش و در مرحله دو برگی پوسیدگی پیتیومی ریشه در برخی کرت‌ها مشاهده شد که از قارچ‌کش پریویکور انرژی برای مبارزه استفاده شد. گیاهچه‌های سیاه دانه دردو مرحله چهار و هشت برگی برای رسیدن به تراکم مورد نظر (۲۰۰ بوته در مترمربع) با فاصله روی ردیف دو سانتی‌متر تنک شدند. کود نیتروژن در دو مرحله یکی بعد از تنک و دیگری پیش از مرحله گلدهی به صورت سرک به تیمارهای مورد نظر اضافه شد. از وجین دستی برای کنترل علف‌های هرز استفاده شد. وجین علف‌های هرز در طی فصل رشد در سه مرحله انجام شد.

جدول۳-۱- برخی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک موردآزمایش

| pH | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس‌بر متر) | درصد رطوبت اشباع خاک (درصد) | نیتروژن کل (درصد) | آلی کربن (درصد) | پتاسیم قابل‌جذب (میلی‌گرم‌برکیلوگرم) | فسفر قابل‌دسترس ( میلی‌گرم‌برکیلوگرم ) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۷/۶۵ | ۱/۶ | ۴۰/۱۶ | ۰/۰۶ | ۰/۶ | ۱۵۰ | ۱۲ |

ادامه‌جدول۳-۱- برخی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک موردآزمایش

| کل مواد خنثی‌شونده (درصد) | ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم) | جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب) | شن (درصد) | سیلت (درصد) | رس (درصد) | بافت |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۶/۵ | ۸/۹ | ۱/۴ | ۳۸ | ۴۱ | ۲۱ | لومی |

جدول ۳-۲- برخی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد استفاده

| pH | هدایت الکتریکی دسی‌زیمنس‌بر ) (متر | ظرفیت تبادل کاتیونی سانتی‌مول بر ) (کیلوگرم | کربن (درصد) | نیتروژن کل (درصد) | فسفر (درصد) | پتاسیم (درصد) | خاکستر (درصد) | موادآلی فرار و رطوبت (درصد) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۹/۷ | ۱/۷۲ | ۲۶ | ۴۵/۴۴ | ۱/۲۷ | ۰/۰۱ | ۰/۲۱ | ۷/۶ | ۴۶/۹۵ |

### ۳-۲-۱- نحوه‌ی آبیاری

داده‌های مورد نیاز این پژوهش برای تعیین نیاز آبی شامل بارش، دماهای حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی ازطریق آمار درازمدت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشهد جمع‌آوری شد (جدول۳-۳). با استفاده از اطلاعات فوق، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو که در برنامه کراپ وات جایگذاری شده است، محاسبه شد. برنامه کراپ وات یک نرم‌افزار مناسب برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری است و به‌وسیله فائو ارائه شده است. نیاز آبی گیاه سیاه دانه بر

اساس حاصل ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی سیاه دانه (قمرنیا و همکاران، ۲۰۱۴) توسط نرم افزار آبیاری کراپ وات، تعیین شد. مقدار نیاز آبی محاسبه شده در نرم‌افزار کراپ‌وات برای تیمار شاهد ۷۴۲/۹ میلی‌متر برآورد شد. نیاز آبی سایر تیمارها ( تیمارهای تنش آبی) بر اساس نیاز آبی تیمار شاهد و درصد تنش آبی (۷۰ و ۴۰ درصد) برآورد و توزیع شد. آبیاری به روش قطره‌ای و به صورت هفتگی انجام گرفت و برای اجرای مقدار آب تیمارهای آبیاری از کنتور حجمی با دقت۰/۰۰۰۱ مترمکعب استفاده شد. زمان اعمال تیمارهای آبیاری پس از توسعه کامل گیاه و قبل از شروع مرحله زایشی بود. دلیل انتخاب این زمان برای اعمال تنش، افزایش نیاز آبی گیاه در این مرحله و همچنین سپری شدن دوره بارندگی بود. اعمال تیمارهای تنش آبی تا مرحله‌ی رسیدگی فیزیولوژیک ادامه پیدا کرد.

جدول۳-۳- میانگین آمار درازمدت هواشناسی ایستگاه سینوپتیک مشهد در طول دوره رشدی سیاه دانه

| ماه | حداقل دما ( درجه‌سانتی‌گراد ) | حداکثر دما (درجه‌سانتی‌گراد) | رطوبت (درصد) | سرعت باد (متر بر ثانیه) | متوسط ساعات آفتابی (ساعت) | بارندگی (میلی‌متر) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| فروردین | ۸/۸ | ۲۱/۷ | ۶۰ | ۲۰۷ | ۶/۸ | ۴۶/۲ |
| اردیبهشت | ۱۲/۷ | ۲۷/۱ | ۵۰ | ۱۹۹ | ۹/۳ | ۲۷/۲ |
| خرداد | ۱۶/۹ | ۳۲/۷ | ۳۸ | ۲۳۳ | ۱۱/۴ | ۴ |
| تیر | ۱۹ | ۳۴/۷ | ۳۵ | ۲۵۱ | ۱۲/۳ | ۱/۲ |

جدول۳-۴- متوسط دما و مجموع بارش ماهانه در طی فصل رشد سیاه دانه در سال‌های مورد آزمایش

| ماه | متوسط دما ( درجه‌سانتی‌گراد ) | | متوسط بارش (میلی‌متر) | |
|---|---|---|---|---|
| | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| فروردین | ۱۵ | ۱۵/۴ | ۸۷/۸ | ۴۳/۶ |
| اردیبهشت | ۲۳ | ۲۴/۲ | ۴۴/۶ | ۱۹/۳ |
| خرداد | ۲۶/۷ | ۲۷/۷ | ۴/۶ | ۱/۸ |
| تیر | ۲۸/۸ | ۲۹ | ۵/۵ | ۰/۹ |

## ۳-۳- عملیات برداشت

عملیات برداشت با مشاهده زرد شدن بوته‌ها و فولیکول‌ها در تاریخ چهارم و پنجم مردادماه سال۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ انجام گرفت. قبل از برداشت و با رعایت اثر حاشیه، تعداد ده بوته به طور تصادفی از هر کرت برداشت و ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد فولیکول در بوته، تعداد دانه در هر فولیکول، تعداد دانه در بوته، وزن دانه در بوته تعیین شد.

عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، وزن هزار دانه و شاخص برداشت نیز در کل مساحت هر کرت و با رعایت اثر حاشیه‌ای که شامل حذف ردیف‌های کناری و ۵۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت بود، اندازه‌گیری شد.

کارایی مصرف آب به صورت عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) به ازای میزان آب مصرفی (مترمکعب درهکتار) محاسبه گردید.

معادله۳-۱:

(میزان آب مصرفی / عملکرد دانه) = کارایی مصرف آب(کیلوگرم بر مترمکعب)

## ۳-۴- محاسبه‌ی شاخص‌های مرتبط با خاک در مرحله رسیدگی سیاه دانه

### ۳-۴-۱- شاخص‌های مرتبط با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

همزمان با عملیات برداشت، شاخص‌های مورد مطالعه در خاک تعیین شد. برای این منظور از سه نقطه‌ی هر کرت آزمایشی در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. هر سه نمونه باهم مخلوط و یک نمونه واحد تهیه و درکیسه پلاستیکی بسته‌بندی و به آزمایشگاه ارسال شد (چاودهری و همکاران، ۲۰۱۶). خاک‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن شامل بافت به روش هیدرومتر (گی و بـودر، ۱۹۸۶)، pH با استفاده از دستگاه pH متر در گل اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت سنج، درصـد رطوبـت اشـباع خاک با استفاده از گل اشباع در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، درصد کل مواد خنثـی شـونده (آهـک) بـه روش خنثی سازی با اسـید کلریـدریک (ریچاردز، ۱۹۵۴) ، نیتـروژن کـل بـا روش کجلدال (AOAC، ۲۰۰۰)، فـسفر قابـل جذب با روش اولـسن (گوپتـا، ۲۰۰۰)، پتاسـیم بـا روش استات آمونیم (کلوت، ۱۹۸۶) و کربن آلی خاک بـا روش والکلی و بلک (۱۹۳۴) انـدازه‌گیـری شـد.

### ۳-۴-۲-شاخص‌های مرتبط با خصوصیات بیولوژیکی خاک

نمونه‌برداری برای تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک جداگانه قبل از برداشت و در شرایطی که خاک مزرعه از نظر رطوبتی در حد ظرفیت زراعی بود، انجام گرفت. نمونه‌های برداشت شده در ظروف حاوی یخ قرار داده شد و سریعا به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش در دمای چهار درجه‌ی سانتی‌گراد در یخچال نگه‌داری شد (هرزتک و همکاران، ۲۰۱۷).

به‌منظور اندازه‌گیری تنفس پایه به روش ایزرمایر (۱۹۵۲)، ۵۰ گرم خاک با رطوبت ۵۰ درصد ظرفیـت نگهداری آب درون بشرهای کوچک ریخته شد. ۱۰۰ میلی‌لیتر محلـول سـود بـا غلظـت ۰/۰۵ نرمال به‌همراه ۱۰ میلی‌لیتر محلول کلروباریوم با غلظت ۰/۰۵ نرمال در یک ظرف ریخته شد. سپس بشرهای حاوی خاک داخل ظرف محلول قـرار داده شـد. درب ظرف بسته شد و برای اطمینان از عدم تبادل هوا بـین ظـرف و محیط خارج، اطراف درب آن کاملاً با پارافیلم پوشانده شـد. همزمـان برای کاهش خطای آزمایش، نمونه شاهد نیـز تهیـه شـد. نمونـه شاهد، حاوی محلول سود و کلروربـاریوم بـود و هـیچ نمونـه خاکی درون آن قرار نگرفت. نمونه‌های تهیه شده حداقل بـه‌مـدت سه روز به همین صورت نگهداری شدند. پس از سه روز، برای تعیـین میزان محلول سود و کلروباریوم باقیمانده در ظروف، عمل

تیتراسیون با اسید کلریدریک ۰/۰۵ نرمال انجام و میزان اسید مصرف شده یادداشت شد. اسید مصرفی کمتر، نشان‌دهنده‌ی مصرف شدن بیشتر محلول در طی سه روز و در نتیجه تنفس میکروبی بیشتر است. پس از تیتراسیون، برای محاسبه‌ی حجم دی‌اکسیدکربن خارج شده از خاک، از رابطه زیراستفاده شد:

معادله۳-۲:

$$CO_2= (V_0- V) \times N\times 22$$

که در آن $V_0$، حجم اسید مصرف شده برای تیتراسیون نمونه شاهد،V حجم اسید مصرف شده برای تیتراسیون نمونه موردنظر و N نرمالیته اسید را نشان می‌دهد. سپس حجم $CO_2$ به‌دست آمده، برتعداد روزی که نمونه‌های خاک در ظروف تنفس قرار داشتند و همچنین بر وزن خاک خشک موجود در ظرف، تقسیم شد تا میزان تنفس میکروبی به ازای یک گرم خاک خشک در یک روز به‌دست آید.

میزان کربن زیست توده‌ی میکروبی به روش تدخین - انکوباسیون (هاروات و پال ۱۹۹۴) در ۱۰۰ گرم خاک تعیین شد و بر حسب میلی‌گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک گزارش گردید. در این روش کربن زیست توده میکروبی از اختلاف تنفس خاک تدخین شده با کلروفرم و تدخین نشده در طول سه روز انکوباسیون به دست آمد. دو سری نمونه ۴۰ گرمی وزن و در داخل بشرهای تخت ریخته شد. یک سری از خاکهای ۴۰ گرمی به مدت ۲۴ ساعت با بخار کلروفرم در دسیکاتور شیردار تدخین گردید و پس از افزودن ۰/۵گرم خاک تدخین نشده، به مدت سه روز در انکوباتور با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت خاک در حد ۶۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری گردید. یک ویال حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر سود ۰/۰۵نرمال در کنار بشرها داخل جار تنفسی

قـرار داده شـد. در انتهای دوره انکوباسـیون بـا افـزودن ۱۰ میلی‌لیتر محلـول کلریـد بـاریم ۰/۵مـولار و چند قطره معرف فنل‌فتالئین بـه محلـول سـود، یـون بیکربنات تولید شده طی دوره انکوباسیون رسوب داده و سود باقیمانده با اسید کلریـدریک ۰/۰۵ نرمـال تیتـر شد و مقدار گاز دی‌اکسیدکربن آزاد شده طی این مـدت محاسبه گردید. همزمان بـرای هـر نمونـه تـدخین شـده نمونه‌های خاک ۴۰ گرمی که تدخین نـشده بـود نیـز بـه عنوان شاهد در همان شرایط نگهداری و مقدار دی‌اکسیدکربن تولید شده به همان روش اندازه‌گیـری گردیـد. اخـتلاف مقادیر کربن به دست آمده برای دو نمونه تـدخین شـده و تدخین نشده به عنوان مقدار کربن آزاد شده از تجزیه اجـساد جامعـه میکروبـی کـشته شـده بـر اثـر تـدخین می‌باشد.

## ۳-۵- محاسبه‌ی درصد روغن و اسیدهای چرب تشکیل دهنده‌ی آن

برای اندازه‌گیری درصد روغن از روش سوکسله استفاده شد. ۲۵ گرم از دانه‌های سیاه دانه خرد و آسیاب شد و با حلال هگزان نرمال به مدت چهار ساعت روغن‌گیری انجام شد (مجاب و همکاران، ۱۳۸۲). جداسازی حلال موجود در نمونه‌های روغن حاصل با استفاده از دستگاه روتاری صورت گرفت. پس از توزین توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، مقدار روغن نمونه هر کرت بر اساس ماده خشک، به صورت درصد ، با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید

معادله ۳-۳:

درصد روغن = (وزن بالن با روغن – وزن بالن خالی / وزن دانه های سیاه دانه) × ۱۰۰

از حاصلضرب درصد روغن در عملکرد دانه، عملکرد روغن بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

از آنجاییکه وجود حرارت بالا در حین استخراج روغن ممکن است سبب تخریب یا تغییر اسیدهای چرب شود، از روش استخراج با حلال هگزان برای اسیدهای چرب استفاده شد. ۵۰ گرم بذر سیاه دانه پس از آسیاب کردن، به نسبت یک به چهار با هگزان نرمال مخلوط و به مدت ۴۸ ساعت روی دستگاه شیکر (۱۶۰ دور در دقیقه) قرار داده شد. سپس روغن استخراج شده با استفاده از کاغذ صافی واتمن از مواد جامد گیاهی جدا گردید. به منظور حـذف حـلال، از دستگاه روتاری تحت عملیات تقطیر در خـلأ استفاده شد (فرهوش و همکاران، ۲۰۰۹) و روغن حاصل در شیشه‌های تیره‌رنـگ در یخچال نگهداری شد.

برای آماده سازی نمونه‌ها جهت تزریق به دستگاه جی‌سی، ۱۵ قطره از روغن هر یک از نمونه‌ها در یک لوله آزمایش ریخته و به آن دو میلی‌لیتر پتاس متانولی دو مولار و هفت میلی‌لیتر هپتان اضافه شد. درب لوله آزمایش بسته و چند ثانیه با دستگاه شیکر لوله تکان داده شد و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از برداشتن فاز رویی محلول، هر یک از نمونه‌ها به دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) تزریق شد. دمای اولیه ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود که دو دقیقه در این دما نگه داشته شد و سپس با سرعت ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه به دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد رسید و به مدت هفت دقیقه در این دما نگه داشته شد و بعد با سرعت دو درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید و تا پایان در همین دما باقی ماند. مدت زمان توقف در دمای نهایی ۲۵ دقیقه بود. دمای محفظه تزریق ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد، دمای آشکارساز ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان گاز حامل (هلیوم) ۴ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. تزریق به میزان یک میکرولیتر به روش اسپلیت انجام گرفت. با مقایسه پیک نمونه‌ها و بر اساس زمان بازداری پیک‌ها، نوع اسیدهای چرب شناسایی و مقادیر هر یک از آنها (بر حسب درصد از کل اسید چرب) از محاسبه‌ی سطح زیر منحنی پیک‌های حاصله تعیین شد (متاعوس و اوزکن، ۲۰۱۱).

## ۳-۶- محاسبه‌ی درصد اسانس و اجزای تشکیل دهنده آن

استخراج اسانس به روش تقطیر با آب و با استفاده از دستگاه کلونجر انجام گرفت. برای این منظور ۱۰۰ گرم از بذرهای خرد شده گرم گیاه خشک شده را در بالن ۲۰۰۰ میلی‌لیتری ریخته و به آن حدود ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده و عمل استخراج و اسانس‌گیری انجام شد. زمان لازم برای استخراج در حدود ۴ساعت درنظر گرفته شد. در این مدت ترکیبات فرار همراه با بخار آب خارج شده و پس از سرد شدن به صورت لایه‌ی متمایز بر روی سطح آب در لوله‌ی مدرج دستگاه کلونجر قابل مشاهده بودند. اسانس در ظرف جداگانه‌ای جمع‌آوری و توسط سولفات سدیم بدون آب آبگیری و درصد اسانس محاسبه شد (صمصام شریعت، ۱۳۷۱).

از حاصلضرب درصد اسانس در عملکرد دانه، عملکرد اسانس برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

به‌منظور تعیین اجزای موجود در اسانس سیاه دانه از روش استخراج با حلال هگزان استفاده شد. این روش برای ترکیبات فرار و غیر مقاوم به گرما استفاده می‌شود (هادی و همکاران، ۲۰۱۶). اسانس حاصله توسط هگزان نرمال به نسبت ۵ به ۱۰۰ رقیق شد و شناسایی ترکیبات متشکله آن توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی با طیف سنج جرمی (GC-MAS) انجام شد.  دمای محفظه‌ی تزریق ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، دمای آون ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود که به مدت سه دقیقه در این دما نگه داشته شد و بعد با سرعت ۱۲ درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه به دمای ۲۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسید. مدت زمان توقف در دمای نهایی ۲۰ دقیقه بود. میزان تزریق یک میکرولیتر و روش تزریق به صورت اسپلیت (Split) بود. با مقایسه پیک نمونه‌ها و بر اساس زمان بازداری پیک‌ها، درصد نسبی اجزای اسانس شناسایی شد (آدامز، ۱۹۹۵).

## ۳-۷- محاسبه‌ی شاخص‌های کارایی نیتروژن

به‌منظور اندازه‌گیری نیتروژن درمرحله رسیدگی دانه به تفکیک اندام ( برگ ، ساقه و دانه) نمونه‌برداری و درصد نیتروژن با روش کجلدال (شارپ و همکاران، ۲۰۰۱) اندازه‌گیری شد. از حاصلضرب مقدار نیتروژن موجود در هر نمونه (بر حسب گرم در متر مربع) و وزن خشک آن نمونه (برحسب گرم در متر مربع) مقدار نیتروژن موجود در واحد سطح (گرم در متر مربع) محاسبه شد.

برای محاسبه کارایی مصرف نیتروژن، علاوه بر میزان نیتروژن کود و بیوچارمصرفی، میزان نیتروژن موجود در خاک نیز در نظر گرفته شد که برای این منظور عمق خاک حاصلخیز برای ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد و با توجه به درصد نیتروژن و وزن مخصوص ظاهری خاک (جدول۳-۱) میزان نیتروژن محاسبه شد. کارایی جذب نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن، بر اساس معادلات ۳ و ۴ تعیین شد (هاگینز و پان، ۱۹۹۳)

معادله ۳-۳ :

(میزان نیتروژن خاک / میزان نیتروژن زیست توده) = کارایی جذب نیتروژن (کیلوگرم در کیلوگرم)

معادله ۳-۴:

(میزان نیتروژن خاک / عملکرد دانه) = کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم در کیلوگرم)

## ۳-۸- محاسبه پروتئین دانه

با اندازه گیری میـزان نیتـروژن دانه، میزان پروتئین دانه از حاصل ضرب درصد نیتـروژن در عدد ۶/۲۵ به دست آمد. (میریل و وات، ۱۹۹۵).

از حاصلضرب درصد پروتئین در عملکرد دانه، عملکرد پروتئین بر حسب کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد.

## ۳-۹- تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشی

ابتدا تجزیه واریانس ساده برای هر سال جداگانه انجام شد. با توجه به ساختار آروماتیکی بیوچار و دوام بالای بیوچار در برابر تجزیه‌های خاک و به منظور بررسی اثرات ناشی از افزودن بیوچار و اثر متقابل آن با سال بر خصوصیات خاک و گیاه، پس از آزمون همگن بودن واریانس خطای دو سال برای هرصفت (آزمون بارتلت) با استفاده از نرم‌افزار SPSS و اطمینان از یکنواختی داده ها تجزیه مرکب انجام شد (تیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ زریهان و هایل، ۲۰۱۷) . تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از تمامی آزمایشات با استفاده از نرم افزارهای MSTAT-C و SAS 9.4 انجام گرفت. میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد مورد مقایسه آماری قرار گرفتند. جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

# فصل چهارم

# نتایج و بحث

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک

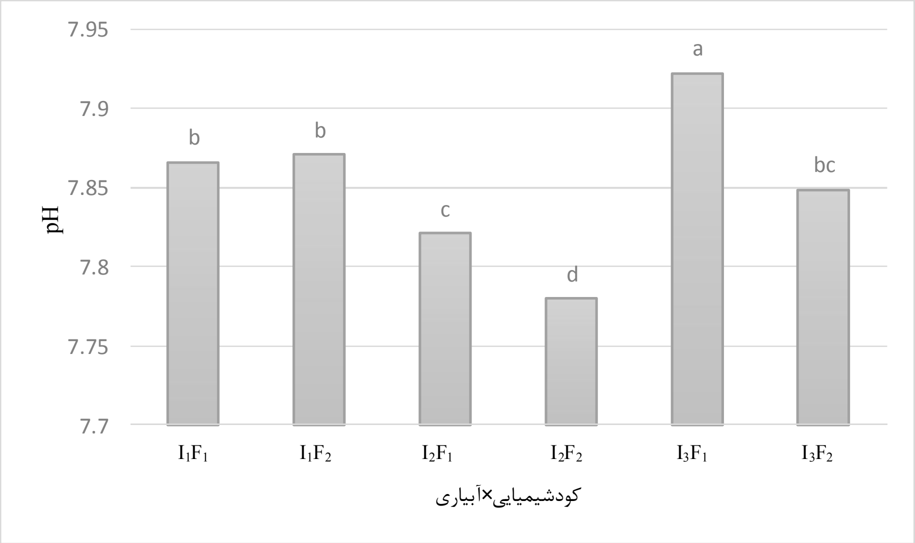
#### ۴-۱-۱- pH خاک

تغییرpH خاک در نتیجه افزودن بقایای آلی به آن، بستگی به ویژگی ترکیبات آلی و همچنین ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. در خاک‌هایی با pH پایین، افزودن بیوچار موجب افزایش pH خاک می‌شود و آهکی شدن خاک به جذب بهتر عناصر غذایی و در نتیجه رشد بهینه گیاه کمک می‌کند (کارر و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در هر دو سال نشان داد که pH خاک تحت تاثیر آبیاری و بیوچار قرار نگرفت (جدول۴-۱). به‌نظر می‌رسد که وجود آهک بالا و pH خنثی در خاک مورد مطالعه مانع از تاثیر بیوچار بر pH خاک در دو سال شد. این نتایج موافق با یافته‌های آکوم و همکاران (۲۰۱۵) و جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) بود. جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) علت عدم تغییر در pH خاک را با افزودن بیوچار به قلیایی بودن خاک مورد آزمایش و درصد بالای رس در آن نسبت دادند. لنز و ایپولیتو (۲۰۱۲) نیز به عدم تاثیر بیوچار بر pH خاک اشاره کرده و دلیل این امر را pH خنثی و آهکی بودن خاک مورد آزمایش عنوان کردند. کود شیمیایی در هر دو سال و اثر متقابل کود شیمیایی × آبیاری در سال اول تاثیر معنی‌داری بر pH خاک داشتند (جدول۴-۱) و در بین اثرات متقابل آبیاری × کودشیمیایی بیشترین pH خاک مربوط به تیمار $I_3F_1$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + بدون مصرف کودشیمیایی) بود (جدول ۴-۳الف).

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن اثر سال بر pH خاک را نشان داد (جدول۴-۵). اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر pH خاک معنی‌دار بود و بیشترین pH خاک مربوط به تیمار $I_3F_1$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + بدون مصرف کودشیمیایی) بود (شکل۴-۱). این امر با کاهش آبشویی و تجمع

املاح و نمک‌های قلیایی در تیمار تحت تنش آبی مرتبط بود. عشقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) نیز به افزایش pH خاک با افزایش تنش آبیاری اشاره کردند.

علت اصلی افزایش pH خاک با کاربرد بیوچار در سال دوم مربوط به کربناتهای عناصر قلیایی موجود در آن می‌باشد (سونگ و گوا، ۲۰۱۲). پس از کاربرد بیوچار در خاک و با گذشت زمان، به دلیل نسبت بالای C به N در بیوچار، معدنی شدن نیتروژن اتفاق می‌افتد و ترکیبات آلی، یون‌های OH تولید می‌کنند که این امر به افزایش pH خاک کمک می‌کند. کاهش یون‌هایی نظیر $H^+$ و $AL^{3+}$ در اثر ترکیبات آلی موجود در بیوچار و افزایش یون‌های $K^+$، $Ca^{++}$ و $Mg^{++}$ از دیگر دلایل افزایش pH خاک گزارش شده است (کارمو و همکاران، ۲۰۱۶).




شکل۴-۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر pH خاک حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

### ۴-۱-۲- هدایت الکتریکی

بیوچار در سال اول بر هدایت الکتریکی خاک در سطح احتمال ۵ درصد تاثیر معنی‌داری داشت ولی تاثیر بیوچار در سال دوم معنی‌دار نشد (جدول۴-۱). اثر متقابل آبیاری × بیوچار و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی در هر دو سال معنی‌دار بود (جدول۴-۱). در سال اول بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار مربوط به تیمار $I_3B_3$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) و اثر متقابل سه‌گانه مربوط به تیمار $I_3B_3F_2$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بود. در سال دوم بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار مربوط به تیمار $I_2B_2$ (آبیاری بر اساس۷۰درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) و بیشترین اثر متقابل سه‌گانه مربوط به تیمار $I_2B_2F_2$ (آبیاری بر اساس۷۰درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بود (جدول‌های ۴-۳ب و ۴-۴).

جدول تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال، بیوچار و کودشیمیایی بر هدایت الکتریکی خاک را نشان داد (جدول۴-۵). تجزیه مرکب داده‌ها بیانگر معنی‌دار بودن اثرات متقابل آبیاری × بیوچار، بیوچار × کودشیمیایی و اثرات سه‌گانه آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی بود.

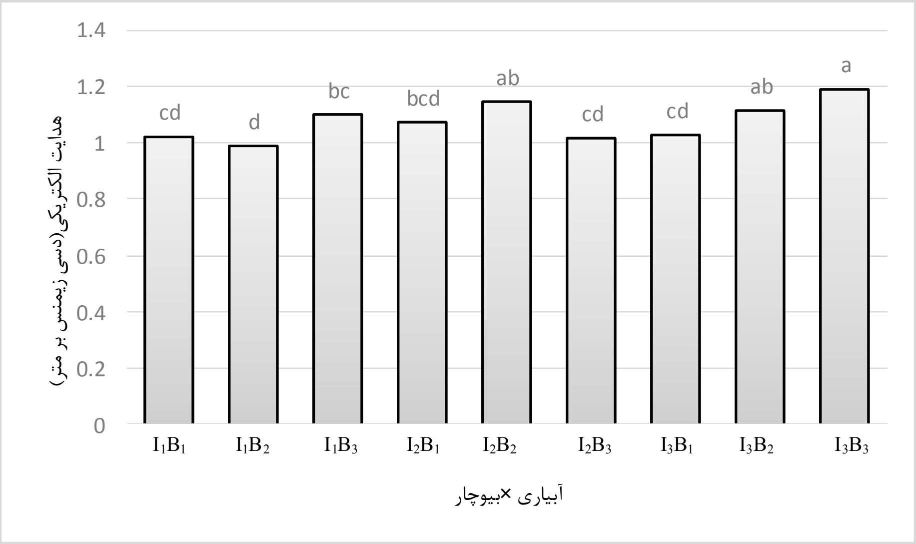
بیشترین اثرات متقابل آبیاری × بیوچار مربوط به تیمار $I_3B_3$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) با ۱/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. افزایش هدایت الکتریکی خاک پس از کاربرد بیوچار با گذشت زمان در تحقیقات دیگری نیز گزارش شده است (زلفی باوریانی و همکاران، ۱۳۹۵). افزایش تنش آبیاری نیز موجب افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌شود، بطوری‌که در تیمار $I_3B_3$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) بیشترین افزایش هدایت الکتریکی مشاهده شد (شکل۴-۲). این امر با تجمع املاح موجود در بیوچار و عدم آبشویی آنها در تیمار تحت تنش آبی مرتبط

بود. افزایش هدایت الکتریکی خاک با کاهش میزان آب آبیاری در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (عشقی زاده و همکاران، ۱۳۹۴).

کاربرد کودشیمیایی به‌همراه بیوچار نیز موجب افزایش هدایت الکتریکی خاک شد (جدول۴-۵) و بیشترین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی مربوط به تیمار $B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کودشیمیایی ) با ۱/۱۶ دسی‌زیمنس بر متر بود (شکل ۴-۳) که بیانگر افزایش هدایت الکتریکی خاک با افزایش سطوح بیوچار و مصرف کودشیمیایی بود. افزایش هدایت الکتریکی خاک با افزایش مصرف بیوچار به میزان بالای خاکستر و املاح موجود در آن و همچنین تاثیر بیوچار بر ترکیبات خاک و آزادسازی عناصر محلول موجود در بیوچار مصرفی نسبت داده می‌شود (چاودهری و همکاران، ۲۰۱۶). رسولی (۱۳۸۱) به افزایش هدایت الکتریکی با کاربرد کمپوست و کودهای دامی در آزمایش‌های خود اشاره کرد. نایگوسی و همکاران (۲۰۱۲) و کارر و همکاران (۲۰۱۳) نیز به افزایش هدایت الکتریکی خاک در مطالعات خود با افزایش مقادیر بیوچار اشاره کردند. نجفی‌قیری و بوستانی (۱۳۹۶) در بررسی تاثیر انواع بیوچارهای تهیه شده از بقایای گیاهی بر خصوصیات خاک، به افزایش هدایت الکتریکی خاک در خاکهای تیمار شده اشاره کرده و عنوان داشتند که تبدیل بقایای گیاهی به بیوچار سبب آزادسازی عناصر قلیایی موجود در آن‌ها شده و این امر می‌تواند سبب شوری خاک‌های تیمار شده با بیوچار شود. ولی گزارشات دیگری نیز حاکی از کاهش هدایت الکتریکی خاک با کاربرد بیوچار بوده است (چاودهری و همکاران، ۲۰۱۶).

تیمارهای حاوی بیوچار بدلیل جذب بهتر عناصر غذایی باعث جذب کمتر عناصر توسط سطوح آزاد ذرات خاک شده و حلالیت عناصر را افزایش می‌دهند که این امر سبب افزایش هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمار شاهد می‌شود (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱). از طرفی بیوچار دارای مقادیر بالایی از کاتیون-های محلول در آب نظیر پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم و غیره است که با افزودن آن به خاک، این

کاتیون‌ها آزاد شده و هدایت الکتریکی خاک افزایش می‌یابد (سونگ و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌تواند منجر به افزایش شوری خاک شده و اثرات منفی بر رشد و عملکرد گیاه داشته باشد. البته به‌دلیل آنکه آستانه شوری جهت کاهش رشد و عملکرد سیاه دانه، دو دسی زیمنس بر متر تعیین شده است (قمرنیا و همکاران، ۲۰۱۲)، به‌نظر می‌رسید افزایش نسبی هدایت الکتریکی در این آزمایش تاثیر منفی بر رشد و عملکرد سیاه دانه نداشته است.

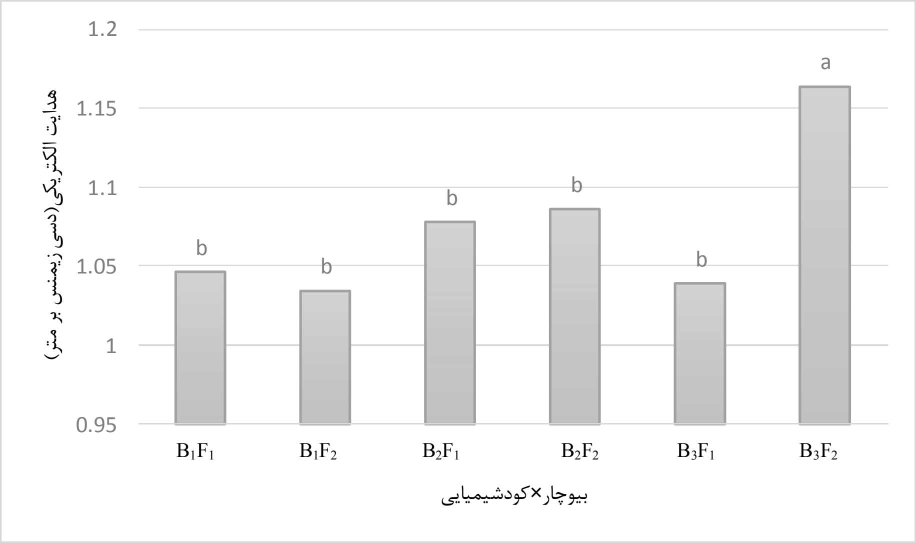



شکل۴-۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر هدایت الکتریکی خاک حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$۲۰ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۳- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بر هدایت الکتریکی خاک حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$۲۰ تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۱-۳- درصد رطوبت اشباع خاک

در هر دو سال آزمایش کاربرد بیوچار بر درصد رطوبت اشباع خاک موثر بود. اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی بر درصد رطوبت اشباع خاک در سال دوم معنی‌دار بود. بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی مربوط به تیمار $I_2B_3F_1$ (آبیاری بر اساس۷۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + بدون مصرف کود شیمیایی) بود (۳۹/۹۴ درصد) (جدول ۴-۴). با افزایش مواد آلی در خاک ظرفیت نگهداری آب و به تبع آن درصد رطوبت اشباع در خاک افزایش می‌یابد (زیبارت و همکاران، ۱۹۹۹). ساختار مولکولی گسترده کربن‌های آروماتیک بیوچار باعث پایداری زیاد آن در خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک می‌شود (سوهی و همکاران، ۲۰۱۰ ). در مطالعات متعددی به تاثیر کودهای دامی و کمپوست در افزایش درصد رطوبت اشباع خاک اشاره شده است (مرادنیا و

همکاران،۱۳۹۶؛ دیانت و موسوی، ۱۳۹۵). افزایش درصد رطوبت اشباع خاک در اثر افزودن بیوچار به خاک توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است (دوملو کاروالهو و همکاران،۲۰۱۴). هائوجین و شنگ ونگ (۲۰۱۳) نیز به افزایش معنی‌دار درصد اشباع خاک در تیمار ۵ درصد مصرف بیوچار در مقایسه با تیمار۲/۵ درصد و شاهد اشاره کردند. افزایش درصد رطوبت اشباع خاک به منافذ بالای بیوچار نسبت داده می‌شود که این منافذ به تجمع عناصر غذایی و افزایش میزان نگهداری آب کمک می‌کند (هائوجین و شنگ ونگ، ۲۰۱۳).

### ۴-۱-۴- درصد کربن آلی خاک

سه مؤلفه مهم کنترل کننده میزان کربن آلی خاک شامل اقلیم (دما و میزان رطوبت)، عوامل بیولوژیکی (ترکیب گیاهی و اضافه شدن بقایای گیاهی) و ویژگیهای فیزیکوشیمیایی خاک نظیر ساختار، بافت، میزان رس، هدایت الکتریکی و pH می‌باشد (شیدای‌کرکج و همکاران، ۱۳۹۶). در مناطق نیمه-خشک با توجه به کم بودن برگشت میزان لاشبرگ و بالا بودن دما، کربن آلی خاک بیشتر توسط ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک کنترل می‌شود.

نتایج جدول تجزیه واریانس حاکی از عدم تاثیر معنی‌دار آبیاری بر کربن آلی خاک بود ولی تاثیر بیوچار در هر دو سال و کودشیمیایی در سال دوم بر درصد کربن آلی موثر بود (جدول۴-۱). هیچ یک از اثرات متقابل تیمارها معنی‌دار نبود. جدول مقایسه میانگین داده‌ها در هر دو سال نشان داد که کاربرد ۲۰تن در هکتار بیوچار بیشترین تاثیر را بر درصد کربن آلی خاک داشت (به‌ترتیب ۰/۹ و ۰/۶۱۳ در سال اول و دوم) (جدول ۴-۲).

تجزیه مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن سال، بیوچار و کودشیمیایی را بر درصد کربن آلی خاک نشان داد (جدول۴-۵). درصد کربن آلی خاک در سال دوم نسبت به سال اول کاهش معنی‌داری نشان داد

(جدول۴-۶). نتایج آزمون همبستگی بین پارامترها نشان دهنده بیشترین رابطه معنی‌دار کربن آلی با پارامتر درصد رطوبت اشباع خاک با میزان همبستگی مثبت ($r = ۰/۶۱^{**}$) بود (جدول۴-۷). افزایش توان حفظ رطوبت خاک سبب ایجاد شرایط مساعد برای رشد گیاهی و افزایش ذخیره تولید لاشبرگ و ذخیره کربن در خاک محیط می‌گردد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین احتمالاً رژیم آبی خاک به عنوان یک ابزار کلیدی تعیین کننده کربن محسوب می‌شود. افزایش میزان pH خاک از طیف خنثی به سمت قلیایی و همچنین افزایش هدایت الکتریکی خاک در کاهش میزان کربن آلی خاک در سال دوم موثر بود. همبستگی منفی و معنی‌دار بین pH خاک و هدایت الکتریکی با کربن آلی نیز موید این موضوع است (جدول۴-۷). pH خاک توسط عمل تنظیم فعالیت میکروبی خاک، میزان کربن آن را تحت تأثیر قرار می-دهد و مقادیر بالای pH احتمالاً به دلیل تسریع تجزیه کربن خاک یک اثر منفی بر میزان کربن خاک دارد (متولی، ۱۹۹۵). از طرفی در بیوچارهایی که در دمای پایین تهیه می‌شوند، علاوه بر ساختار سخت کربنی، مقادیر نسبتا بالایی ترکیبات فرار نیز در آن وجود دارد که کربن ناپایدار نیز از جمله این ترکیبات فرار است و موجب کاهش کربن آلی خاک در کوتاه مدت می‌شود ولی تاثیر این کربن ناپایدار بر تجزیه بیوچار بسیار کم و حدود ۲/۲ درصد در طی دو سال در آزمایش‌های مزرعه‌ای گزارش شده است (هارینگ و همکاران، ۲۰۱۷). وجود ترکیبات فرار و کربن ناپایدار نسبتا بالا در بیوچار مورد آزمایش (۴۶/۹۵، جدول ۳-۲) می‌تواند از دلایل کاهش کربن آلی خاک در کوتاه‌مدت باشد و در نتیجه در سال دوم کاهش کربن آلی در مقایسه با سال اول مشاهده شد (جدول ۴-۶). البته میزان تجزیه بیوچار بسته به نوع ماده اولیه و خاک مورد آزمایش متفاوت است. در خاک‌های لومی میزان تجزیه کربن آلی بیوچار کمتر از خاک‌های شنی است. در خاک‌های شنی به‌دلیل وجود کربن آلی اولیه کم، با کاربرد بیوچار رقابت میکروبی برای منابع محدود، شدیدتر از خاک‌های لومی خواهد بود و در نتیجه تنفس میکروبی و تجزیه کربن آلی با سرعت بیشتری انجام می‌شود (شولز و همکاران، ۲۰۱۳). بیشترین افزایش کربن آلی خاک در تیمار ۲۰

تن در هکتار بیوچار مشاهده شد (جدول۴-۶). علت افزایش میزان کربن آلی خاک با افزایش مصرف بیوچار به وجود درصد بالایی از کربن آلی در بیوچار مصرفی مربوط است. آزمایشات متعددی بیانگر تاثیر مثبت بیوچار برمیزان کربن آلی خاک است (آکوم و همکاران، ۲۰۱۵؛ هائوجین و شنگ ونگ، ۲۰۱۳؛ نایگوسی و همکاران، ۲۰۱۲). با توجه به این که خاکهای کنونی در مقایسه با چند دهه قبل از کربن کمتری برخوردار است. افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل محتوی کربنی بالای آن، می‌تواند منبع بسیار مناسبی برای جبران کمبود کربن خاک باشد (فردو، ۲۰۱۳). با افزایش مقدار بیوچار در خاک فعالیت میکروبی افزایش یافته و تجزیه کربن آلی تسریع شده و در نتیجه ذخایر کربنی خاک بهبود می‌یابد (نجوکو و همکاران، ۲۰۱۶).

### ۴-۱-۵-درصد نیتروژن کل

جدول تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر معنی‌دار کاربرد بیوچار بر درصد نیتروژن کل خاک را در هر دو سال نشان داد و اثر متقابل تیمارها در هیچ یک از سال‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۴-۱). کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار بیشترین تاثیر را بر درصد نیتروژن خاک (به‌ترتیب ۰/۰۸۹ و ۰/۰۶ درصد در دو سال) در مقایسه با تیمار شاهد داشت (جدول۴-۲).

تجزیه مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن اثر سال بر درصد نیتروژن کل خاک را نشان داد (جدول۴-۵). در سال دوم درصد نیتروژن کل در مقایسه با سال اول کاهش معنی‌داری را نشان داد (جدول۴-۶). در تحقیقات مختلف دلایل متعددی برای کاهش نیتروژن خاک در سال دوم گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به آبشویی، جذب توسط گیاهان و معدنی شدن نیتروژن به دلیل نسبت بالای C به N در بیوچار اشاره کرد (کارر و همکاران، ۲۰۱۳؛ تیان و همکاران،۲۰۱۸) . وجود همبستگی بسیار بالا و معنی-دار بین نیتروژن و کربن آلی خاک ($r = ۰/۹۳^{**}$) نشان می‌دهد که کاهش نیتروژن خاک با کاهش کربن

آلی در سال دوم مرتبط بوده است (جدول۴-۷). اوگانتانده و همکاران (۲۰۰۴) نیز به کاهش نیتروژن و کربن آلی خاک در آزمایشات مرتبط با بیوچار اشاره کرده و دلیل آن را همبستگی بالای این دو صفت با هم عنوان کردند. تاثیر بیوچار بر نیتروژن کل خاک معنی‌دار بود (جدول ۴-۵) و بیشترین تاثیر بیوچار بر نیتروژن خاک مربوط به تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار با ۰/۰۷ درصد نیتروژن بود (جدول ۴-۶). افزایش نیتروژن خاک در اثر افزودن بیوچار توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است (نایگوسی و همکاران،۲۰۱۲؛ جمال و ابیبه،۲۰۱۶؛ ویدواتی، ۲۰۱۲). ولی محققان دیگری نیز به کاهش نیتروژن خاک در نتیجه کاربرد بیوچار اشاره کردند. علی و همکاران (۲۰۱۵) دلیل کاهش نیتروژن در اثر کاربرد بیوچار را به وابسته بودن غلظت نیتروژن خاک به نسبت C بهN مواد آلی موجود در خاک عنوان کردند، افزودن موادی با نسبت C به N بالا به خاک نیتروژن معدنی را غیر متحرک می‌کند. به همین دلیل با افزودن بیوچار به خاک انتظار می‌رود نیتروژن غیرفعال شده و کمبود نیتروژن در خاک مشاهده شود. کاربرد بیوچار به همراه کودهای شیمیایی معدنی شدن نیتروژن را با کاهش نسبت C بهN تسهیل کرده و نیتروژن کل خاک بهبود می‌یابد. اگرچه اثر متقابل بیوچار با کودشیمیایی در این آزمایش معنی‌دار نبود، ولی مطابق گزارشهای ویدواتی و همکاران (۲۰۱۱) و آکوم و همکاران (۲۰۱۵) بیوچار به‌دلیل داشتن ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالا و نیز داشتن بارهای منفی در سطح خود به نگهداری عناصر غذایی موجود درکودهای شیمیایی کمک کرده و از آبشویی آنها جلوگیری می‌کند. اگرچه مکانیسم اصلی چگونگی تاثیر بیوچار بر نیتروژن خاک هنوز ناشناخته است ولی برخی خصوصیات آن نظیر ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و تاثیر بر pH خاک و در نتیجه جذب مستقیم $NH^{4+}$ و $NO^{3-}$، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش آبشویی نیتروژن و غیر متحرک شدن نیتروژن بویژه در بیوچارهایی که در دماهای پایین تهیه شده و حاوی کربن ناپایدار هستند، در نگهداری نیتروژن خاک موثر هستند (نواک و همکاران، ۲۰۰۹).

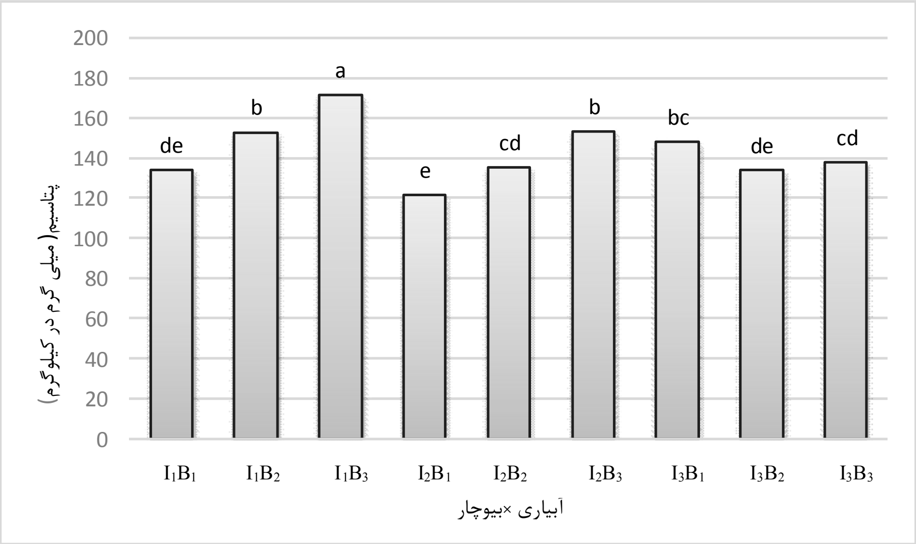
### ۴-۱-۶- پتاسیم خاک

بر اساس جدول تجزیه واریانس داده‌ها، تاثیر تیمار آبیاری بر پتاسیم خاک در سال دوم معنی‌دار شد. بیوچار در هر دو سال و کود شیمیایی در سال دوم بر پتاسیم خاک تاثیر معنی‌داری داشتند (جدول۴-۱). اثر متقابل آبیاری × بیوچار نیز در دو سال مورد مطالعه معنی‌دار بود و مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین تاثیر مربوط به تیمار$I_1B_3$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) بود (جدول‌های۴-۱ و ۴-۳ب). افزایش میزان پتاسیم خاک با کاربرد بیوچار در مطالعات پاندیت و همکاران (۲۰۱۸) و فالویه و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش شده است.

تجزیه مرکب داده‌ها بیانگر تاثیر معنی‌دار سال بر پتاسیم خاک بود و میزان پتاسیم خاک در سال دوم در مقایسه با سال اول به طور معنی‌داری کاهش نشان داد (جدول‌های ۴-۵ و ۴-۶). کاهش پتاسیم خاک در سال دوم نسبت به سال اول در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (کارر و همکاران، ۲۰۱۳). ماژور و همکاران (۲۰۱۰) نیز به کاهش میزان پتاسیم در طی چهار سال آزمایش بر روی بیوچار اشاره کرده و بیشترین مقدار پتاسیم خاک را در سال اول بعد از کاربرد بیوچار عنوان کردند. کارر و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که وجود مقادیر بالایی از پتاسیم محلول در بیوچار تازه مصرف شده در خاک، موجب افزایش پتاسیم خاک و ایجاد منبع قابل دسترس غنی از پتاسیم برای گیاهان می‌شود ولی پس از مدت کوتاهی به دلایل مختلف از جمله مصرف گیاهان از میزان پتاسیم در خاک کاسته می‌شود.

بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر تیمارهای آبیاری، بیوچار، کود شیمیایی و اثر متقابل آبیاری× بیوچار نیز بر پتاسیم خاک معنی‌دار بود (جدول ۴-۵). بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار را مربوط به تیمار$I_1B_3$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) بود (شکل۴-۴). در شرایط آبیاری کامل، یون‌های یک ظرفیتی مانند پتاسیم در محلول خاک به طور نسبی بیشتر از یون‌های

دوظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابد ولی در شرایط تنش، کلوئیدهای رس با قدرت بیشتری یونهای یک ظرفیتی پتاسیم را به سطح خود جذب کرده و مانع از جداشدن این یون‌ها می‌شوند (کافی و همکاران، ۱۳۸۸). از طرفی ظرفیت کاتیونی بالای بیوچار نیز آبشویی عناصر غذایی نظیر پتاسیم را کاهش می‌دهد و باعث دسترسی بهتر گیاه به این عناصر می‌شود (سوکارتنو و همکاران، ۲۰۱۱). به‌علاوه به‌دلیل وجود پتاسیم بالا در خاکستر بیوچار، افزودن این ماده به خاک موجب افزایش پتاسیم خاک در کوتاه‌مدت می‌شود (لایرد و همکاران، ۲۰۱۰؛ پوخرینگر، ۲۰۱۶).




شکل۴-۴- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر پتاسیم خاک حاصل از تجزیه مرکب
حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است
$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی
$B_1$ : بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

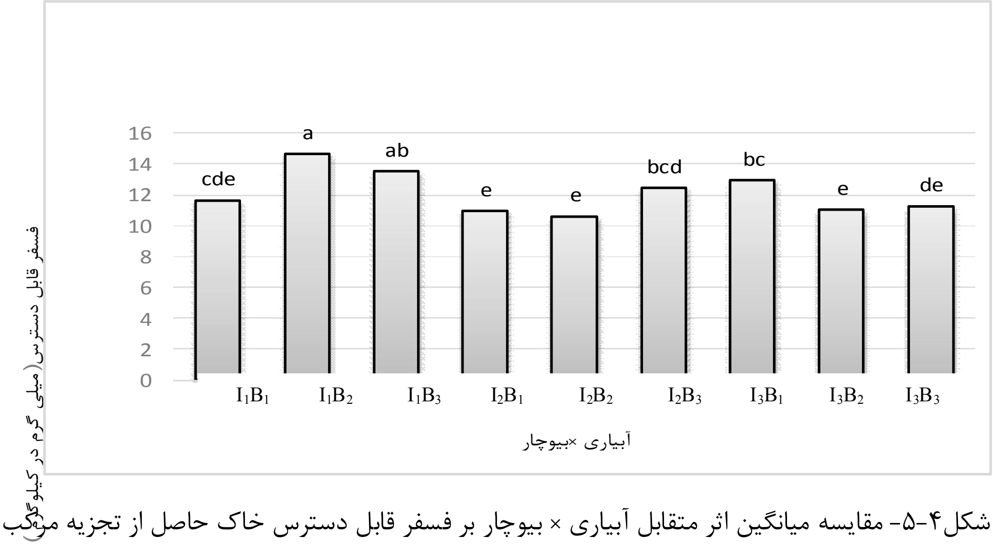
### ۴-۱-۷- فسفر قابل دسترس خاک

تاثیر آبیاری بر فسفر قابل دسترس خاک در هر دو سال معنی‌دار بود ولی تاثیر بیوچار بر فسفر قابل دسترس خاک فقط در سال اول معنی‌دار و در سال دوم غیرمعنی‌دار بود (جدول۴-۱). کودشیمیایی در هر دو سال بر درصد فسفر قابل دسترس خاک تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۴-۱). اثر متقابل آبیاری × بیوچار در هر دو سال معنی‌دار بود و بیشترین اثر متقابل مربوط به تیمار $I_1B_2$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) در هر دو سال بود. در سال دوم تیمار $I_1B_3$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) هم از فسفر قابل دسترس بالایی برخوردار بود (جدول‌های۴-۱ و۴-۳ب). اثر متقابل بیوچار×کودشیمیایی فقط در سال اول معنی‌دار شد (جدول۴-۱) و بیشترین تاثیر مربوط به تیمارهای $I_3F_2$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) و $I_1F_2$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) بود (جدول۴-۳الف). اثر متقابل آبیاری × بیوچار× کودشیمیایی نیز در هر دو سال معنی‌دار شد ولی روند متفاوتی در دو سال آزمایش بین اثر متقابل این دو تیمار بر فسفر قابل دسترس خاک مشاهده شد. در سال اول تیمار $I_3B_1F_2$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + بدون بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) و در سال دوم تیمار $I_1B_2F_2$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی ) بیشترین تاثیر را بر فسفر قابل دسترس خاک داشتند (جدول۴-۴). فوستر و همکاران (۲۰۱۶) نیز فسفر قابل دسترس بیشتری را در تیمارهای تحت تنش نسبت به تیمار آبیاری کامل مشاهده کردند.

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال، آبیاری و کود شیمیایی را بر فسفر قابل دسترس خاک نشان داد (جدول ۴-۵). میزان فسفر خاک در سال دوم آزمایش در مقایسه با سال اول کاهش معنی‌داری را نشان داد (جدول۴-۶). کاهش میزان فسفر قابل دسترس خاک در سال‌های بعد از کاربرد بیوچار در

مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (کارر و همکاران، ۲۰۱۳؛ تیان و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجاییکه pH خاک یکی از عواملی است که بر بهره‌وری فسفر تاثیر می‌گذارد، به‌نظر می‌رسد افزایش pH خاک در سال دوم بر کاهش فسفر قابل دسترس خاک موثر بوده است. در pH بالاتر از ۷ یونهای کلسیم و منیزیم و همچنین حضور کربناتهای این فلزات در خاک سبب رسوب فسفر افزوده شده می‌شود و قابلیت جذب آن دوباره کاهش می‌یابد (تیان و همکاران، ۲۰۱۸). همبستگی منفی و معنی‌دار بین فسفر و pH خاک ($r = -۰/۳۳^{**}$) نیز بیانگر این امر بود که با افزایش pH خاک، از میزان فسفر قابل دسترس در خاک کاسته می‌شود (جدول ۴-۷). از طرفی جذب سریع فسفر توسط گیاه یا تعادل در فسفر ورودی ناشی از کودشیمیایی با معدنی شدن آن توسط میکروارگانیسمهای خاک می‌تواند از دلایل دیگر عدم تاثیر بیوچار بر فسفر خاک در سال دوم باشد که این نتایج همسو با گزارشات فوستر و همکاران (۲۰۱۶) بود.

تجزیه مرکب داده‌ها بیانگر معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری × بیوچار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $I_1B_2$ (آبیاری بر اساس۱۰۰درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) بود (شکل ۴-۵). آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی با افزایش رطوبت خاک منجر به افزایش انحلال فسفر در خاک شده و موجب رشد و توسعه بهینه ریشه می‌شود (میسرا، ۲۰۰۳). از طرفی بیوچار به‌دلیل دارا بودن عناصر غذایی می‌تواند منبعی مستقیم برای عناصر غذایی از جمله فسفر باشد. بیوچار می‌تواند از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تغییر در خصوصیات خاک به افزایش حلالیت فسفر کمک کند (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). تاثیر بیوچار بر فسفر خاک به خصوصیات خاک مورد استفاده نیز بستگی دارد. در یک تحقیق بیوچار بدون استفاده از کود شیمیایی باعث کاهش فسفر خاک شد، این امر به‌دلیل قلیایی شدن خاک و جذب فسفر توسط بیوچار عنوان شد (نلسون و همکاران، ۲۰۱۱). ولی محققان دیگری به افزایش فسفر قابل دسترس در خاک‌های اسیدی حاوی بیوچار اشاره کردند و دلیل این افزایش را بهبود pH خاک و در نتیجه کاهش فعالیت یونهای آلومینیوم و آهن بیان کردند (دومه و همکاران، ۲۰۱۶).




شکل۴-۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر فسفر قابل دسترس خاک حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$۲۰ تن در هکتار بیوچار

## ۴-۲- ویژگیهای بیولوژیکی خاک

### ۴-۲-۱- تنفس میکروبی خاک

تنفس میکروبی خاک در ارزیابی کیفیت خاک کاربرد دارد و نشانگر فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌های خاک است که به شرایط فیزیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها و فاکتورهای محیطی بستگی دارد. فاکتورهای متعددی تنفس میکروبی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند که از آن جمله می‌توان به میزان رطوبت، pH ، دما و نسبت عناصر کربن و نیتروژن در خاک اشاره کرد. همبستگی مثبت و معنی‌دار تنفس میکروبی با کربن آلی ($r = ۰/۵۴^{**}$)، نیتروژن ($r = ۰/۵۶^{**}$)، فسفر ($r = ۰/۴۲^{**}$) و پتاسیم ($r = ۰/۳۶^{**}$) در این آزمایش بیانگر وابستگی تنفس میکروبی به کربن آلی و عناصر غذایی خاک بود (جدول۴-۷). این نتایج با گزارشات ساگار و همکاران (۲۰۰۶) هماهنگی دارد. این محققان در مطالعه تغییرات تنفس میکروبی، کربن آلی و نیتروژن کل در کشت ۲۵ ساله درختان صنوبر، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین

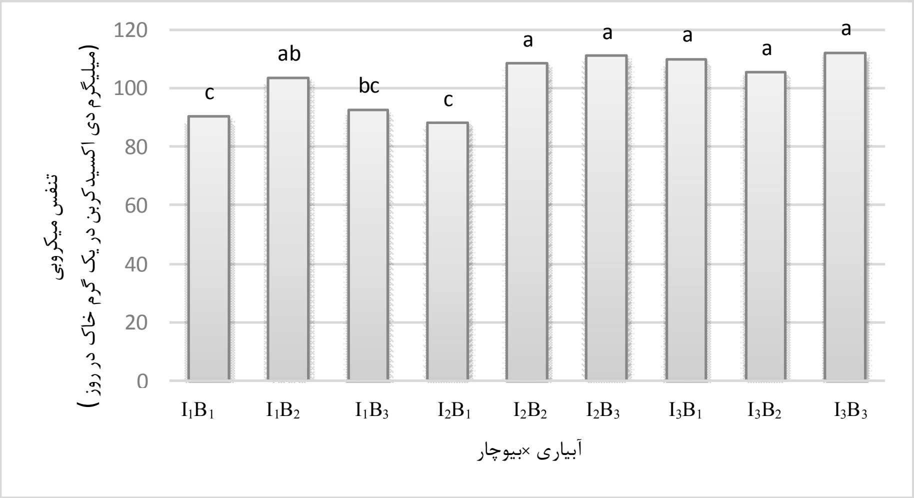
این سه صفت مشاهده کردند به طوری‌که با افزایش کربن آلی و نیتروژن خاک، میزان تنفس میکروبی خاک هم افزایش یافت. تجزیه واریانس داده‌های دو سال آزمایش تاثیر معنی‌دار آبیاری و بیوچار بر تنفس میکروبی خاک را نشان داد (جدول۴-۸). اثرات متقابل آبیاری × بیوچار در هر دو سال بر تنفس میکروبی خاک معنی‌دار شد و بیشترین تاثیر در سال اول مربوط به تیمار $I_3B_3$ (آبیاری بر اساس۴۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) و در سال دوم مربوط به تیمار $I_2B_2$ (آبیاری بر اساس۷۰درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) بود (جدول ۴-۱۰). اثرات متقابل آبیاری × کودشیمیایی فقط در سال اول بر تنفس میکروبی خاک معنی‌دار شد (جدول۴-۸).

نتایج حاصل از تجزیه مرکب داده‌ها بیانگر تاثیر معنی‌دار آبیاری و بیوچار بر تنفس میکروبی خاک بود. تجزیه مرکب داده‌های دو سال نیز معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری × بیوچار و آبیاری × کودشیمیایی را بر تنفس میکروبی خاک نشان داد ( جدول۴-۱۱ و شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷). بررسی این اثرات متقابل بیانگر تاثیر بیشتر تیمار آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی بود. در اکثر مطالعات به کاهش تنفس میکروبی خاک با کاهش آبیاری و کاهش رطوبت خاک اشاره شده است (بورکن، ۲۰۰۶؛ سوسلا، ۲۰۱۲) ولی زنگ و همکاران (۲۰۱۵) به افزایش تنفس در تیمارهای تحت تنش آبی اشاره کرده و دلیل آن را افزایش دمای خاک و افزایش تجزیه میکروبی عنوان کردند. به‌نظر می‌رسد در تحقیق حاضر نیز کاهش رطوبت خاک در تیمارهای آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی منجر به افزایش دمای خاک در این تیمارها شده و درنتیجه با افزایش دما، تنفس میکروبی خاک در این تیمارها افزایش یافته است. لو و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی تاثیر بیوچار بر تنفس ذرت در طی پنج سال به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های تیمار شده با بیوچار، تنفس میکروبی خاک بیشتر از سایر خاک‌ها تحت تاثیر دما قرار گرفت.

تجزیه مرکب داده‌ها بیانگر تاثیر معنی‌دار سال بر تنفس میکروبی خاک بود. تنفس میکروبی خاک در سال دوم آزمایش در مقایسه با سال اول به طور معنی‌داری کاهش نشان داد (جدول‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲). در تحقیقات مختلف به افزایش، کاهش و یا عدم تغییر تنفس خاک با کاربرد بیوچار اشاره شده است و دلیل این تفاوت در نتایج به نوع بیوچار، نوع خاک، دما و رطوبت خاک بستگی دارد (لو و همکاران، ۲۰۱۴). بطوریکه بیوچار تهیه شده در دماهای پایین در مقایسه با دماهای بالا باعث افزایش بیشتر تنفس میکروبی خاک می‌شود (زنگ، ۲۰۱۴). نویس و همکاران (۲۰۱۵) به عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بعد از دو سال بررسی در جنگل‌های معتدله اشاره کرده و افزایش تنفس خاک در کوتاه مدت را به وجود ترکیبات فرار و کربن ناپایدار در بیوچار نسبت دادند. بیوچارهای تولید شده دردماهای پایین به‌دلیل تجزیه سریع ترکیبات ناپایدار موجود در بیوچار، باعث افزایش معدنی شدن کربن در کوتاه مدت می‌شوند (سونگ و همکاران، ۲۰۱۶) و از آنجایی‌که افزایش تنفس میکروبی خاک به میزان کربن آلی در خاک بستگی دارد، تجزیه ترکیبات ناپایدار موجب افزایش تنفس در سال اول گردید. همبستگی مثبت و معنی‌دار تنفس میکروبی با کربن آلی خاک ($r = ۰/۵۰^{**}$) نیز موید این مطلب بود (جدول۴-۷). هرزتک و همکاران (۲۰۱۷) نیز در آزمایشات خود بیشترین تنفس خاک را در تیمارهای حاوی بیوچار و کمترین آن را در تیمار حاوی کود معدنی گزارش کردند. بیشتر بودن تنفس در خاکهای حاوی بیوچار به تجزیه بیشتر مواد آلی در آنها نسبت داده می‌شود و پایین بودن تنفس میکروبی در تیمارهای حاوی کود معدنی به مقدار کم زیست توده موجود در خاک و پایین بودن نسبت C به N مربوط می‌شود.

گزارشات متعددی در رابطه با کاهش تنفس میکروبی خاک با گذشت زمان وجود دارد (سونگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ شن و همکاران، ۲۰۱۷؛ نویس وهمکاران، ۲۰۱۵). افزایش اولیه تنفس میکروبی به مقادیر بالای کربن آلی فرار در بیوچار مصرفی نسبت داده می‌شود. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیوچارهای تهیه شده در دمای پایین دارای مقادیر فراوانی کربن آلی فرار هستند که تجزیه سریع آن‌ها در

خاک منجر به افزایش معدنی شدن کربن و در نتیجه افزایش تنفس میکروبی خاک درکوتاه مدت می‌شود (فانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ سونگ و همکاران، ۲۰۱۶).

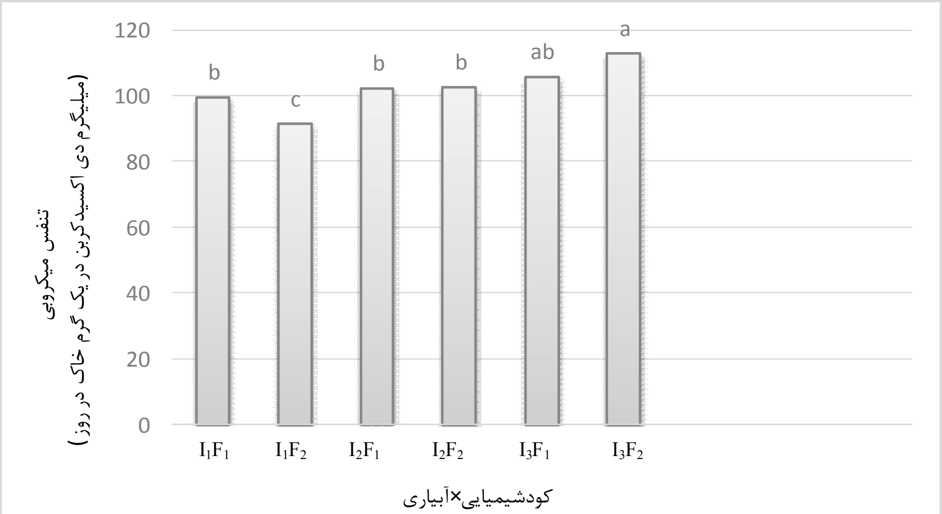



شکل ۴- ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر تنفس میکروبی خاک حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ./است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، ۲۰$B_3$ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر تنفس میکروبی خاک حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ./است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

### ۴-۲-۲- کربن زیست توده میکروبی

کربن زیست توده میکروبی نشانگر حضور فعال میکروارگانیسم‌های مختلف و تجزیه مواد آلی در اکوسیستم‌ها است و در آزادسازی عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک نقش به‌سزایی دارد. درتحقیق حاضر تاثیرآبیاری و بیوچار در هیچ یک از سال‌ها بر کربن زیست توده میکروبی معنی‌دار نبود (جدول۴-۸). عدم تاثیر بیوچار بر کربن زیست توده میکروبی در تحقیقات دیگری نیز گزارش شده است (زاوالونی و همکاران، ۲۰۱۱). اثر متقابل آبیاری × بیوچار فقط در سال اول بر کربن زیست توده میکروبی معنی‌دار بود و بیشترین کربن زیست توده میکروبی مربوط به تیمار $I_1B_3$ ( آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی+ مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار) با ۴۱/۵۴ میلی‌گرم کربن در صد گرم خاک بود (جدول۴-۱۰). در مطالعات زنگ و همکاران (۲۰۱۴) نیز تیمارهای حاوی مقادیر بالاتر بیوچار بیشترین کربن بیوماس میکروبی را در مقایسه با تیمارهای حاوی مقادیر کمتر بیوچار دارا بودند. اثرات متقابل آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی نیز فقط در سال اول بر کربن زیست توده میکروبی معنی‌دار بود (جدول۴-۸). به نظر می‌رسد وجود کربن ناپایدار موجود در بیوچار عامل افزایش کربن زیست توده میکروبی در سال اول باشد (زنگ و همکاران، ۲۰۱۴). تاثیر بیوچار بر کربن زیست توده میکروبی به‌دلیل گزارش‌های متفاوت در مقالات هنوز ناشناخته است (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱). این تفاوتها در نتایج، با نوع و مقادیر بیوچار مصرفی و نوع خاک مرتبط است. برخی از محققان به افزایش کربن زیست توده میکروبی با افزایش مصرف بیوچار اشاره کردند (دمیزیه و زنگ، ۲۰۱۵) ولی محققان دیگری نیزکاهش کربن زیست توده میکروبی را در آزمایش‌های خود عنوان کردند (دمپستر و همکاران، ۲۰۱۰). تغییرات در کربن زیست توده میکروبی خاک با توانایی بیوچار در بهبود pH و آب خاک، دسترسی بهتر به عناصر غذایی و جذب ترکیبات سمی مرتبط است به‌علاوه منافذ بیوچار می‌تواند از شکارشدن میکروارگانیسم‌ها جلوگیری کرده و به ذخیره کربن و عناصر معدنی کمک کند (زنگ، ۲۰۱۴).

## ۴-۳- ویژگی‌های مرتبط باگیاه

### ۴-۳-۱- ویژگیهای کمی

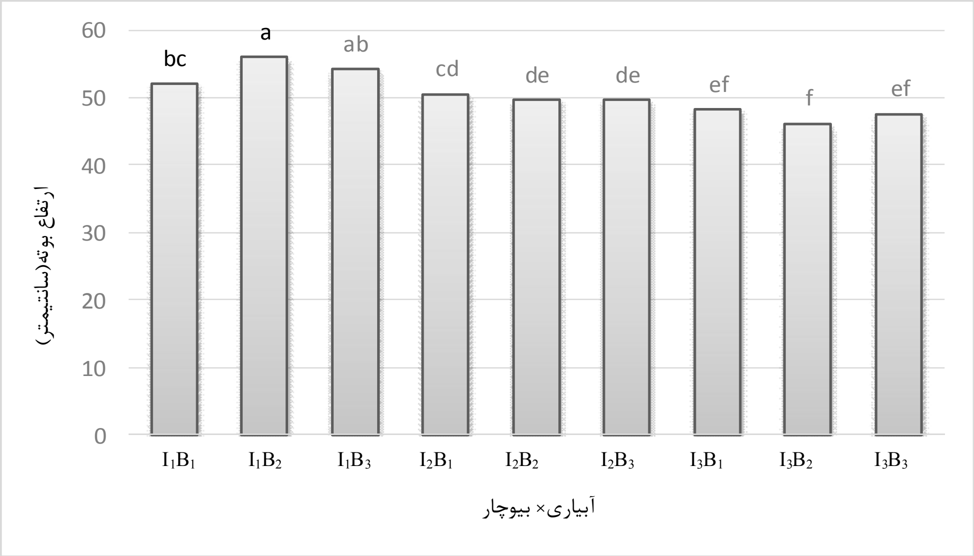
#### ۴-۳-۱-۱- ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اعمال تیمارهای آبیاری در هر دو سال زراعی در سطح احتمال ۵ درصد تاثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته در سیاه دانه داشت (جدول۴-۱۳). مقایسه میانگین داده‌ها تاثیر بیشتر تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی را بر ارتفاع بوته در هر دو سال نشان داد (به‌ترتیب ۵۵/۴۷ و ۵۲/۵۶ سانتی‌متر در سال اول و دوم)(جدول۴-۱۴). ارتفاع بوته در تیمار آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی به طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی بود. تیمار بیوچار در هیچ یک از سال‌ها تاثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته نداشت ولی مصرف کود شیمیایی در مقایسه با عدم مصرف آن تاثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته در هر دو سال داشت (جدول‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴). هیچ‌کدام از اثر متقابل بین تیمارها بر ارتفاع بوته در سال اول معنی‌دار نشد ولی اثر متقابل بیوچار× کودشیمیایی در سال دوم بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول۴-۱۳) و بیشترین تاثیر مربوط به تیمارهای $B_1F_2$ (بدون مصرف بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بود (جدول۴-۱۵).

بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر سال بر ارتفاع بوته معنی‌دار شد (جدول۴-۱۷). تیان و همکاران (۲۰۱۸) نیز به تاثیر معنی‌دار سال در آزمایشات مرتبط با تاثیر بیوچار بر گیاه پنبه (*Gossypium herbaceum*) اشاره کردند. تاثیر آبیاری و کود شیمیایی بر ارتفاع بوته معنی‌دار شد (۴-۱۷). سیاه دانه گیاهی یکساله با دوره رویشی کوتاه و نیز عادت رشدی محدود است. به‌نظر می‌رسد که این ویژگی رشد محدود بودن سیاه دانه در عدم تاثیر بیوچار بر خصوصیات رویشی این گیاه موثر است. تجزیه

مرکب داده‌ها بیانگر معنی‌دار بودن اثرات متقابل آبیاری × بیوچار بود (جدول۴-۱۷). تیمار $I_1B_2$ (آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی+ ۱۰ تن در هکتار بیوچار) با ۵۵/۹ سانتی‌متر بیشترین ارتفاع بوته را داشت (شکل۴-۸) و با افزایش تنش آبی در تیمارهای آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی ارتفاع بوته کاهش یافت. این امر مربوط به کاهش فشار تورژسانس و کاهش تقسیم و بزرگ شدن سلولی نسبت به شرایط بدون تنش است. به‌علاوه در شرایط کم‌آبی، جذب مواد و عناصر غذایی نیزکاهش یافته، بنابراین رشد و توسعه برگ‌ها محدود می‌گردد که منجر کاهش جذب نور شده و ظرفیت کل فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد و بدیهی است که با محدود شدن فراورده‌های فتوسنتزی در شرایط کمبود آب، رشد گیاه کم می‌شود. ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۷) نیز به کاهش ارتفاع بوته و رشد رویشی در گیاه همیشه بهار (*Calendula afficinalis* L.) اشاره کرده و دلیل آن را کاهش محتوی آب و آماس سلول‌ها عنوان کردند. اثر متقابل بیوچار× کودشیمیایی نیز معنی‌دار بود و تیمارهای حاوی بیوچار به همراه مصرف کودشیمیایی از ارتفاع بوته بیشتری برخوردار بودند و بیشترین تاثیر مربوط به ۱۰تیمار تن در هکتار بیوچار به‌همراه مصرف کودشیمیایی بود (شکل ۴-۹). این افزایش، تاثیر مثبت کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژنی را بر رشد رویشی گیاهان نشان می‌دهد. معنی‌دار بودن اثر متقابل بیوچار با تیمار کودشیمیایی و آبیاری نشانگر تاثیر بیوچار در بهبود جذب آب و کود شیمیایی در اطراف ریشه گیاه و دسترسی بهینه گیاه به آب و عناصر غذایی و افزایش ارتفاع می‌باشد. کارر و همکاران (۲۰۱۳) کاهش رشد گیاهان ذرت و گندم را در تیمارهای حاوی بیوچار بدون کاربرد کود شیمیایی نیتروژن و بیشترین رشد را در تیمارهای حاوی مقدار متوسطی از بیوچار به همراه کود نیتروژن گزارش کردند. بیوچار اگرچه ممکن است حاوی مقادیر بالایی از عناصر غذایی باشد ولی دسترسی گیاهان به این مواد غذایی بویژه در کوتاه مدت مشکل است ولی کاربرد کودهای شیمیایی به همراه بیوچار با کاهش آبشویی این عناصر، به دسترسی بهتر گیاه به آنها کمک می‌کند. آکوم و همکاران (۲۰۱۵) با کاربرد سطوح مختلف بیوچار و کودهای شیمیایی NPK تفاوت معنی-

داری را بر ارتفاع بوته در گیاه یام (*Dioscorea rotundata Poir*) مشاهده نکردند. جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) نیز عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بر ارتفاع بوته گندم را در آزمایش‌های خود گزارش کردند. البته گزارشات دیگری نیز مبنی بر تاثیر مثبت بیوچار بر افزایش ارتفاع بوته وجود دارد. بدری و سلیم (۲۰۱۶) افزایش ارتفاع بوته را در گندم با کاربرد بیوچار گزارش کردند. کارتر و همکاران (۲۰۱۳) نیز به افزایش ارتفاع کاهو (*Lactuca sativa*) با کاربرد سطوح مختلف بیوچار در مقایسه با عدم کاربرد آن اشاره کردند.

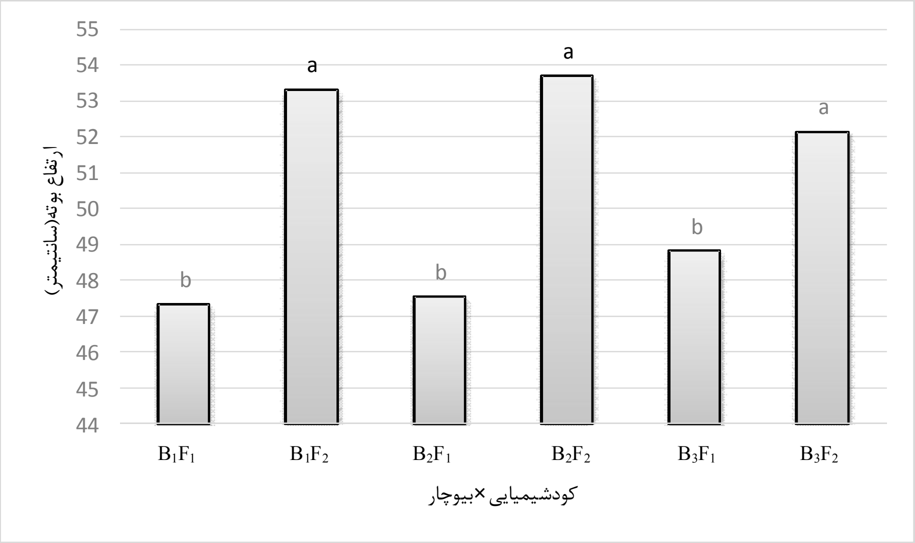



شکل۴-۸- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر ارتفاع بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، ۲۰$B_3$ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۹- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بر ارتفاع بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۱-۲- تعداد شاخه‌های فرعی

سیاه‌دانه گیاهی گل انتهایی و رشد محدود است و گل و میوه فقط در انتهای هر شاخه تشکیل می‌شود، بنابراین هر تغییری در تعداد شاخه‌های گل دهنده در نهایت بر تعداد فولیکول و تعداد دانه‌ها در بوته تاثیر خواهد گذاشت. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر معنی‌دار آبیاری و کودشیمیایی بر تعداد شاخه‌های فرعی را در هر دو سال نشان داد ولی کاربرد بیوچار تاثیری بر تعداد شاخه‌های فرعی نداشت و اثر متقابل آبیاری و کودشیمیایی، در سال اول بر تعداد شاخه‌های فرعی معنی‌دار بود (جدول۴-۱۳)

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر تعداد شاخه‌های فرعی را نشان داد (جدول۴-۱۷). در سال اول تعداد شاخه‌های فرعی بیشتری (۲۴/۳ عدد) نسبت به سال دوم (۱۴/۳ عدد) تولید شد (جدول۴-۱۸). کاهش تعداد شاخه‌های فرعی در سال دوم را می‌توان به شرایط محیطی نامناسب حاکم بر مزرعه نظیر دمای بالاتر (جدول ۳-۴)، افزایش pH، هدایت الکتریکی و همچنین کاهش عناصر غذایی نیتروژن، فسفر

و پتاسیم در فصل زراعی دوم در مقایسه با سال اول نسبت داد. همبستگی منفی و معنی‌دار بین تعداد شاخه‌های فرعی با pH (**r =-۰/۴۶) و هدایت الکتریکی (**r =-۰/۴۴) و همبستگی مثبت و معنی‌دار شاخه‌های فرعی با نیتروژن (**r =۰/۴۰)، فسفر (**r =۰/۵۸) و پتاسیم (**r =۰/۳۸) نیز موید این موضوع بود (جدول۴-۷ ). تاثیر آبیاری و کود شیمیایی بر تعداد شاخه‌های فرعی معنی‌دار بود ولی بیوچار تاثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول ۴-۱۷). تنش آبیاری موجب کاهش تعداد شاخه‌های فرعی شد (جدول۴-۱۸). تعداد کمتر شاخه‌های فرعی در گیاه در صورت ایجاد تنش رطوبتی را می‌توان به اختلال در فتوسنتز به واسطه کمبود آب و کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت ارائه به بخش‌های در حال رشد گیاه و نهایتاً عدم دستیابی گیاه به پتانسیل ژنتیکی از نظر تعداد شاخه فرعی در بوته نسبت داد (صادقی-نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). کاربرد کودشیمیایی در مقایسه با عدم کاربرد آن تعداد شاخه‌های فرعی را افزایش داد (جدول۴-۱۸). کودهای شیمیایی و به‌ویژه نیتروژن نقش مؤثری در افزایش فرآورده‌های فتوسنتزی و نمو یاخته‌های جدید دارند و باعث افزایش رشد رویشی و تعداد شاخساره‌های فرعی در گیاه می‌شود (امیدبیگی، ۱۳۸۶). مشابه این تحقیق، عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بر تعداد شاخه‌های فرعی گیاه در آزمایشات تیان و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است. آنها با بررسی سه ساله بر روی تاثیر بیوچار بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه پنبه، عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بر تعداد شاخه‌های گیاه پنبه را گزارش کردند.

### ۴-۳-۱-۳- تعداد فولیکول در بوته

تعداد فولیکول در بوته در سال اول تحت تاثیر تیمار آبیاری قرار گرفت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار نبود (جدول۴-۱۳). بیشترین تعداد فولیکول در بوته در سال اول مربوط به تیمار آبیاری بر اساس۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب با مقادیر۲۳/۱۶ و۱۹/۰۲عدد فولیکول بود (جدول۴-۱۴). سطوح

مختلف بیوچار در هیچ یک از سال‌ها تاثیر معنی‌داری بر تعداد فولیکول در بوته نداشتند ولی کود شیمیایی در هر دو سال در سطح احتمال ۱ درصد بر تعداد فولیکول در بوته تاثیر معنی‌داری داشت (۴-۱۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که مصرف کود شیمیایی در مقایسه با عدم مصرف آن تعداد فولیکول در بوته را ۲۴/۰۴ درصد در سال اول و ۲۷/۲۸ درصد در سال دوم افزایش داد (جدول۴-۱۴).

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال، آبیاری و کودشیمیایی را بر تعداد فولیکول در بوته نشان داد (جدول۴-۱۷). تعداد فولیکول در بوته در سال دوم به طور معنی‌داری کمتر از سال اول بود (جدول ۴-۱۸). این کاهش با شرایط محیطی نامساعد حاکم بر مزرعه نظیر دمای بالا (جدول ۳-۴) و افزایش pH، هدایت الکتریکی و همچنین کاهش عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و کاهش شاخه‌های فرعی گیاه مرتبط بود. با توجه به اینکه سیاه‌دانه گیاهی است گل انتهایی و رشد محدود و گل و میوه فقط در انتهای هر شاخه تشکیل می‌شود، بنابراین تعداد فولیکول در گیاه از تعداد شاخه‌های گل دهنده تبعیت می‌کند. در نتیجه کاهش تعداد شاخه فرعی نتیجه‌ای جز کاهش تعداد فولیکول در بوته ندارد (نوروزپور و رضوانی‌مقدم، ۱۳۸۴). همبستگی بسیار بالا و معنی‌دار بین تعداد شاخه‌های فرعی و تعداد فولیکول در بوته ($r = ۰/۹۲^{**}$) نیز بیانگر این موضوع بود (جدول۴-۷). تعداد فولیکول در بوته در تیمار آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود (جدول ۴-۱۸). افزایش تنش خشکی در سیاه دانه سبب افزایش سرعت گذر از مرحله رویشی به زایشی می‌شود که این امر کمتر شدن تعداد شاخه‌های فرعی و تعداد فولیکول تولیدی در بوته را به‌همراه خواهد داشت (مظفری و همکاران، ۲۰۰۰). علاوه بر آن تنش آبیاری می‌تواند منجر به عدم تلقیح و ریزش تعدادی از گل‌ها در گیاه شود. تعداد فولیکول در بوته علاوه بر اثر مستقیم، به‌طور غیرمستقیم از طریق تعداد دانه در بوته بر عملکرد تاثیر می‌گذارد. تعداد فولیکول از یکطرف در برگیرنده تعداد دانه بوده و از طرف دیگر تامین کننده مواد فتوسنتزی مورد نیاز برای دانه‌ها می‌باشد. لذا با توجه به همبستگی مثبت بین تعداد

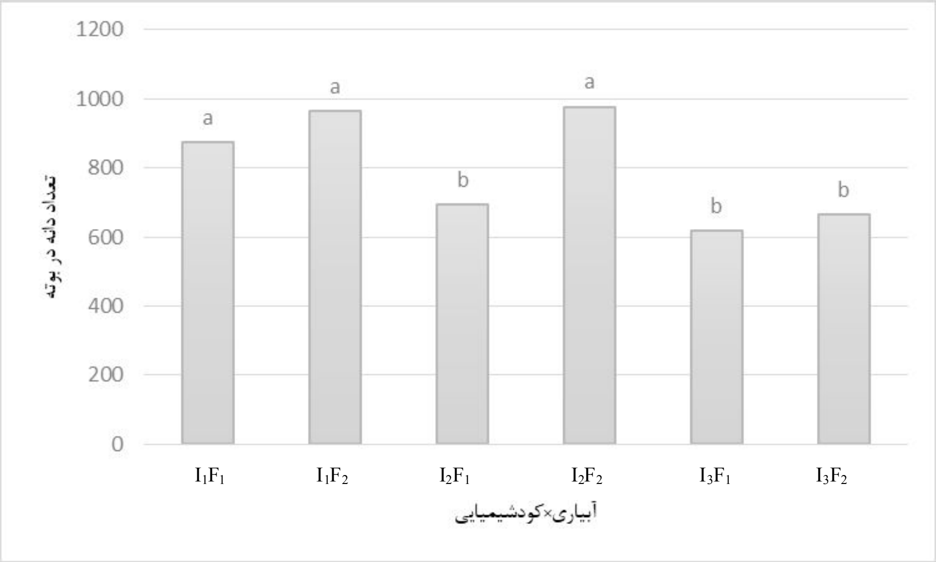
فولیکول بـا عملکرد دانه ($r = ۰/۴۸^{**}$)، تعداد فولیکول بیشتر و بـه تبـع آن افـزایش تعداد دانه در بوته منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود (جدول۴-۷). بیوچار تاثیر معنی‌داری بر تعداد فولیکول در بوته نداشت (۴-۱۷). ابراهیم و همکاران (۲۰۱۵) نیز با اعمال دو سطح تیمار آبیاری و چهارسطح بیوچار بر روی گندم اثر معنی‌داری بر تعداد سنبلچه در سنبله، ارتفاع بوته و طول سنبله مشاهده نکردند ولی راب و همکاران (۲۰۱۶) به تاثیر معنی‌دار بیوچار بر تعداد غلاف در لوبیای بالدار (*Vigna radiate*) اشاره کردند.

### ۴-۳-۱-۴- تعداد دانه در بوته

اثر آبیاری بر تعداد دانه در بوته در سال اول آزمایش معنی‌دار بود ولی در سال دوم آبیاری تاثیر معنی-داری بر این صفت نداشت (جدول۴-۱۳). بیوچار و کود شیمیایی در هر دو سال در سطح احتمال ۵ درصد بر تعداد دانه در بوته تاثیر معنی‌داری داشتند (جدول۴-۱۳). اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی فقط در سال اول معنی‌دار بود. اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی نیز در سال دوم معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $B_2F_2$ ( ۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) با ۶۳۰ عدد دانه در بوته بود (جدول۴-۱۵).

تجزیه مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن تاثیر سال بر تعداد دانه در بوته را نشان داد (جدول۴-۱۷). آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی نیز تاثیر معنی‌داری بر تعداد دانه در بوته داشتند (جدول ۴-۱۷). اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی بر تعداد دانه در بوته معنی‌دار بود و تیمارهای $I_2F_2$ ( آبیاری ۷۰ درصد نیاز آبی+ مصرف کود شیمیایی) و $I_1F_2$ ( آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی+ مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب با داشتن ۹۷۷ و ۹۶۵ دانه در بوته بیشترین تاثیر را داشتند (جدول ۴-۱۷ و شکل۴-۱۰). بالاتر بودن تعداد دانه در بوته در تیمارهای حاوی کودشیمیایی و آبیاری بر اساس ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی، می‌تواند به‌دلیل فراهمی آب و عناصر غذایی کافی و ایجاد شرایط مناسب برای فتوسنتز و تولید مواد لازم برای رشد تمامی دانه‌ها باشد.

اثرات متقابل سه‌گانه  آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی بر تعداد دانه در بوته معنی‌دار بود و بررسی تیمارها نشان داد که با وجود شرایط نامناسب محیطی و کاهش عناصر غذایی خاک و همین طور افزایش هدایت الکتریکی و شوری در سال زراعی دوم نسبت به سال زراعی اول، تیمارهای حاوی ۱۰ تن در هکتار بیوچار از کارایی بالاتری در هر دو سال برخوردار بودند. این امر به‌دلیل توانایی بیوچار در جذب و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی آنها و در نتیجه دسترسی بهتر گیاه به مواد غذایی و رشد بهینه آن می‌باشد. از طرفی بالاتر بودن تعداد دانه در بوته در تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار نشان می‌دهد که کاربرد مقدار متوسطی از بیوچار بدلیل ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاه، بهتر از مقادیر بالای آن بوده است. محققان دیگری نیز به تاثیر بهتر مقدار متعادلی از بیوچار در مقایسه با مقادیر پایین و بالای آن اشاره کردند. تنظیم میزان pH و هدایت الکتریکی خاک در حد متعادل و در نتیجه رشد بهتر گیاه در تیمارهای مقدار متوسط بیوچار از دلایل بهتر بودن این تیمار نسبت به مصارف بالای بیوچار عنوان شده است (دیسپنزا و همکاران، ۲۰۱۶؛ جمال و ابیبه، ۲۰۱۶). تیمارهای $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۱۰۸۲ عدد و $I_1B_2F_2$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۱۰۲۰ عدد بیشترین تاثیر را بر تعداد دانه در بوته داشتند (جدول۴-۱۹). تعداد دانه در بوته، در حقیقت ظرفیت مخزن گیاه را تعیین می‌کند و هر چه تعداد دانه بیشتر باشد، گیاه دارای مخزن بزرگتری برای دریافت مواد فتوسنتزی بوده و در نهایت افزایش این صفت منجر به افزایش عملکرد دانه خواهد شد. بنابراین، با توجه به همبستگی مثبت بین تعداد دانه با عملکرد دانه ($r = ۰/۵۶^{**}$) افزایش تعداد دانه باعث افزایش عملکرد آن می‌شود (جدول۴-۷).




شکل۴-۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر تعداد دانه در بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

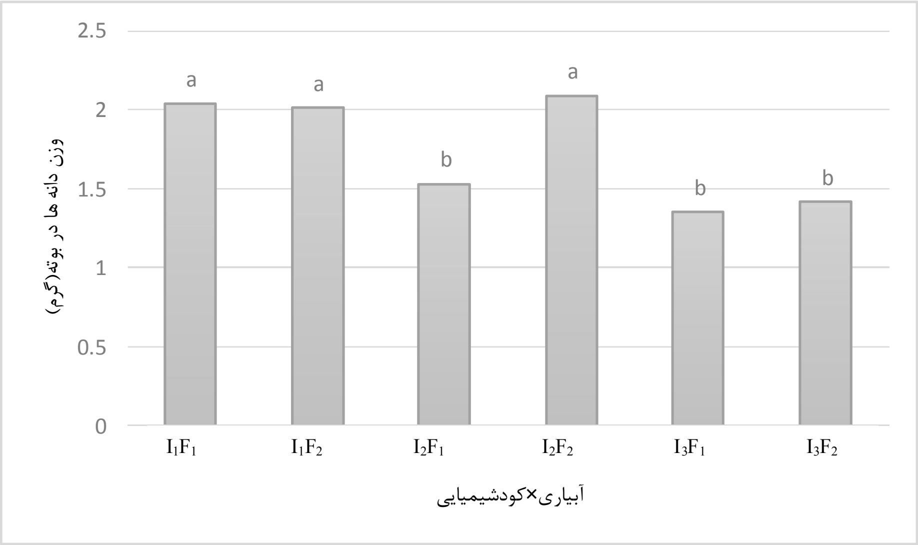
### ۴-۳-۱-۵-وزن دانه‌ها در بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وزن دانه‌ها در هر دو سال تحت تاثیر تیمار آبیاری و بیوچار قرارگرفت (جدول ۴-۱۳). جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کاربرد کود شیمیایی فقط در سال اول بر وزن دانه در بوته تاثیر معنی‌دار داشت و اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری× بیوچار × کود شیمیایی نیز فقط در سال اول معنی‌دار بود (جدول۴-۱۳). نتایج مربوط به اثر متقابل سه‌گانه ، تاثیر بیشتر تیمارهای $I_1B_1F_2$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۳/۳۲ گرم و $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۳/۱۹ گرم را در سال اول نشان داد (جدول۴-۱۶). اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی فقط در سال دوم

بر وزن دانه در بوته تاثیر معنی‌داری داشت  و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار$B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بود (جدول‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۵).

بر اساس تجزیه مرکب داده‌ها، تاثیر سال بر وزن دانه‌ها در بوته معنی‌دار بود (جدول۴-۱۷). وزن دانه‌ها در هر بوته به‌طور متوسط در سال اول ۲/۳۳ گرم و در سال دوم ۱/۱۴گرم بود (جدول۴-۱۸). تاثیر آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی بر وزن دانه‌ها در بوته معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۷). اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی معنی‌دار شد و تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی از بیشترین وزن دانه در بوته برخوردار بود (جدول ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۱) و با افزایش تنش آبیاری به‌میزان ۴۰ درصد نیاز آبی کاهش وزن دانه‌ها در هر بوته مشاهده شد. با محدود شدن آبیاری در مرحله زایشی به‌دلیل کاهش طول دوره پر شدن دانه، گیاه با محدودیت منبع مواجه شده و مواد کمتری به دانه‌ها منتقل می‌شود. بنابراین هرگونه تنش آبی در این مرحله می‌تواند بر روابط منبع و مخزن تاثیر منفی بگذارد. از این رو کاهش تامین مواد پرورده در این دوره، سبب محدود شدن گنجایش ذخیره دانه و کاهش وزن دانه خواهد شد (رضایی چیانه و همکاران، ۱۳۹۱). اثر متقابل سه‌گانه  آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی معنی‌دار بود و در بین تیمارهای اثرات متقابل سه‌گانه ، تیمارهای $I_1B_1F_2$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوچار + مصرف کود شیمیایی)، $I_1B_3F_1$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + بدون مصرف کود شیمیایی) و $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی)(جدول‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۹) از وضعیت مطلوب‌تری نسبت به سایر تیمارها در وزن دانه در بوته برخوردار بودند. با توجه به وزن بیشتر دانه در بوته در تیمار $I_2B_2F_2$ می‌توان اظهار داشت که استفاده از کود شیمیایی و بیوچار به‌همراه آبیاری مناسب، باعث فراهم شدن آب و مواد غذایی و توسعه بهتر ریشه شده و در نتیجه گیاه در انتهای دوره رشد خود (پرشدن دانه‌ها) با شرایط مطلوبی مواجه گردیده و همین عامل موجب افزایش وزن دانه ها در بوته شده است. ابراهیم و همکاران (۲۰۱۵) نیز نتایج مشابهی را در رابطه با تاثیر بیوچار و آبیاری بر

وزن دانه در سنبله گندم گزارش کردند. عارف و همکاران (۲۰۱۲) نیز افزایش وزن دانه در ذرت را در تیمارهای حاوی بیوچار و کود دامی گزارش کرده و دلیل این امر را کاهش تبخیر آب و نگهداری رطوبت در محیط ریشه به‌دلیل منافذ زیاد بیوچار و یا بهبود بافت خاک در اثر کاربرد مواد آلی و در نتیجه رشد بهتر ریشه و جذب بهینه مواد غذایی عنوان کردند. کاربرد بیوچار، ضمن تامین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، به‌دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، از طریق افزایش عرضه مواد غذایی منجر به بهبود وزن دانه در بوته گردید.




شکل۴-۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر تعداد دانه در بوته در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

### ۴-۳-۱-۶- وزن هزار دانه

تجزیه واریانس داده‌ها در دو سال نشان داد که فقط کود شیمیایی بر وزن هزاردانه تاثیر معنی‌داری داشت و آبیاری و بیوچار بر وزن هزار دانه موثر نبود (جدول۴-۱۳). کاربرد کود شیمیایی در مقایسه با

عدم کاربرد آن وزن هزار دانه را افزایش داد (جدول ۴-۱۴). در رابطه با تاثیر کودهای شیمیایی بر افزایش وزن هزار دانه در سیاه دانه گزارشات متفاوتی وجود دارد. حیدری و جهان تیغی (۱۳۹۱) به تاثیر افزایشی کودهای نیتروژنی بر وزن هزار دانه در سیاه دانه اشاره کردند. موسی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که اثر تیمارهای مربوط به عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی اوره در مراحل مختلف رشد سیاه دانه و نیز تراکم مختلف کاشت بر وزن هزار دانه سیاه دانه معنی‌دار نبود. کاربرد بیوچار بر وزن هزار دانه تاثیر معنی‌داری نداشت. رضوانی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۳الف) نیز به عدم تاثیر کودهای آلی بر وزن هزار دانه سیاه دانه اشاره کرده و دلیل آن را عدم وابستگی این صفت به عوامل محیطی عنوان کردند. این نتایج متفاوت با گزارشات چاودهری و همکاران (۲۰۱۶) بود که به افزایش وزن هزار دانه در گندم با مصرف بیوچار اشاره کردند. عارف و همکاران (۲۰۱۲) نیز بیشترین افزایش وزن هزار دانه در ذرت را با کاربرد بیوچار به‌همراه کودهای شیمیایی گزارش کردند.

### ۴-۳-۱-۷- عملکرد دانه

جدول تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر معنی‌دار آبیاری بر عملکرد دانه را در هر دو سال نشان داد (جدول۴-۱۳). بیوچار در سال اول تاثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه نداشت ولی در سال دوم تاثیر بیوچار بر عملکرد دانه معنی‌دار شد و تاثیر کود شیمیایی بر عملکرد دانه فقط در سال اول معنی‌دار بود (جدول۴-۱۳). اثر متقابل کود شیمیایی × بیوچار فقط در سال اول معنی‌دار شد و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار$B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) و $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب با ۱۲۲۶ و ۱۱۸۳ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴-۱۵). اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی در هر دو سال معنی‌دار شد (جدول۴-۱۳) و بیشترین تاثیر مربوط به

تیمار $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) با مقدار ۱۳۵۶ و ۱۱۵۸ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه به‌ترتیب در سال اول و دوم بود (جدول۴-۱۶).

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر عملکرد دانه را نشان داد (جدول ۴-۱۷). عملکرد دانه در سال اول ۱۰۸۹کیلوگرم در هکتار و در سال دوم ۹۴۵ کیلوگرم در هکتار بود (جدول۴-۱۸). کاهش عملکرد در سال دوم را می‌توان به شرایط نامساعد محیطی در سال دوم و همچنین کاهش عناصر غذایی و کربن آلی در سال دوم نسبت داد. این عوامل با تاثیر بر اجزای عملکرد نظیر تعداد دانه در بوته و وزن دانه‌ها در بوته در نهایت بر عملکرد دانه تاثیر می‌گذارد بطوری‌که همبستگی مثبت و معنی‌دار بین تعداد دانه در بوته و وزن دانه‌ها در بوته با عملکرد دانه (به‌ترتیب $^{**}$۰/۵۶ و $^{**}$۰/۵۸= r) موید این موضوع بود (جدول۴-۷).

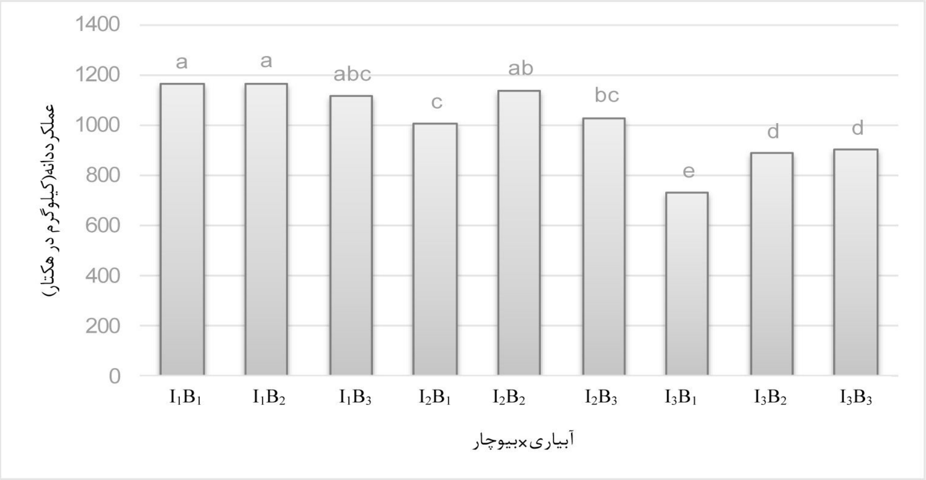
بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها تیمارهای آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی بر عملکرد دانه تاثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۴-۱۷). اثر متقابل آبیاری × بیوچار معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $I_1B_1$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون مصرف بیوچار ) با ۱۱۶۳ کیلوگرم در هکتار و $I_1B_2$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) با ۱۱۶۸ کیلوگرم در هکتار بر عملکرد دانه بود (جدول ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۲). از آنجایی که در هریک از مراحل رشدی سیاه دانه بخش-های خاصی از اجزاء عملکرد دانه شکل می‌گیرند، لذا تاثیر تیمارهای آبیاری و کودی بر هر کدام از اجزاء عملکرد، در عملکرد نهایی دانه موثر خواهد بود. کاهش عملکرد در تیمارهای تحت تنش آبی با کم شدن رشد رویشی و سطح فتوسنتز کننده، کاهش فتوسنتز و تولید مـواد فتوسنتزی، کاهش تخصیص مواد به انـدام‌هـای زایشـی گیاه مرتبط بود. در مراحل زایشی نیز تنش آبی منجر به کاهش ظرفیت مخزن در گیاه شده و در نتیجه افت عملکرد در گیاه را در پی دارد (شعبان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

اثر متقابل کود شیمیایی × بیوچار معنی‌دار شد و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $B_2F_2$ (۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) با ۱۱۱۶ کیلوگرم در هکتار و $B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) با ۱۰۷۹ کیلوگرم در هکتار را نسبت به سایر تیمارها نشان داد (جدول ۴-۱۷ و شکل۴-۱۳). اثرمتقابل بیوچار با کود شیمیایی نشان داد که کاربرد بیوچار به‌همراه کود شیمیایی اثرات بهتری نسبت به مصرف هر یک از این دو ماده به تنهایی داشت. مطالعات مختلفی تاثیر مضاعف بیوچار در ترکیب با کودهای آلی و معدنی را نشان داده است. افزایش عملکرد در تیمارهای حاوی بیوچار و کود می‌تواند به‌دلیل تاثیر بیوچار در نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی نیترات و در نتیجه دسترسی بهتر گیاه به عناصر غذایی باشد. به‌طوری که مصرف هم‌زمان بیوچار و کود شیمیایی بهتر از مصرف هر کدام از این مواد به‌تنهایی بود. کودهای شیمیایی بویژه نیتروژن با تأثیری که بر رشد و توسعه اندام هایی رویشی از طریق سنتز پروتئین‌ها، گسترش سطح برگ‌ها و نیز دوام اندام‌های فتوسنتز کننده دارند، می‌توانند در افزایش عملکرد دانه درگیاهان روغنی نقش موثری داشته باشند، به‌علاوه بیوچار با بهینه کردن pH خاک شرایط مناسبی را برای جذب عناصر غذایی کودهای شیمیایی فراهم می‌کند (عارف و همکاران، ۲۰۱۲؛ گوکیلا و باسکار، ۲۰۱۵؛ چاودهری، ۲۰۱۶).

اثر متقابل سه گانه کود × بیوچار × آبیاری نیز معنی‌دار بود و تیمار $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با مقدار ۱۲۵۷ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشت (جداول۴-۱۷و۴-۱۹). این تیمار با تعداد مناسب وزن دانه در بوته و به‌خصوص داشتن بیشترین تعداد دانه در بوته بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. همچنین بالا بودن عملکرد در تیمار $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) و سایر تیمارهای حاوی بیوچار تاثیر بیوچار در کاهش میزان آب مصرفی را نشان داد. بدین ترتیب گیاه در شرایط تنش خشکی متوسط نسبت به شرایط آبیاری مناسب توانست از طریق کود شیمیایی و بیوچار، شرایط کمبود آب قابل

دسترس را به خوبی و بدون کاهش عملکرد تحمل نماید. بیوچار با داشتن منافذ فراوان در سطح خود به نگه‌داری بهتر آب کمک می‌کند، به‌این ترتیب می‌توان با استفاده از بیوچار به جای ۱۰۰درصد آبیاری از۷۰درصد آب موردنیاز برای کشت سیاه دانه استفاده کرد. تیمارهای حاوی ۲۰ تن در هکتار بیوچار نیز باعث افزایش عملکرد دانه در مقایسه با تیمار شاهد شد ولی در مقایسه با تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار از کارایی کمتری برخوردار بود (جدول۴-۱۹). راب و همکاران (۲۰۱۶) به تاثیر معنی‌دار بیوچار بر عملکرد دانه در لوبیای بالدار اشاره کرده و بیشترین عملکرد را در تیمارهایی با مصرف ۲۵ تن در هکتار بیوچار گزارش کردند در حالیکه با افزایش بیوچار به مقادیر ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار میزان عملکرد دانه کاهش یافت. آنها دلیل این امر را افزایش بیشتر نسبتC به N در تیمارهایی با میزان مصرف بیوچار بالاتر و غیر متحرک شدن نیتروژن و آمونیوم عنوان کردند. بایدرمن و هارپور (۲۰۱۳) نیز تاثیر مثبت بیوچار بر عملکرد دانه را گزارش کردند. جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) نیز به افزایش عملکرد گندم در تیمارهای حاوی بیوچار اشاره کرده و دلیل این امر را نگه‌داری بهتر آب و عناصر غذایی توسط بیوچار و تغذیه بهتر گیاه عنوان کردند. کراسکا و همکاران (۲۰۱۶) به کاهش عملکرد دانه در گیاه چاودار (*Secale cereale* L.) با کاربرد ۳۰ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با ۲۰ تن در هکتار بیوچار اشاره کردند. روزیتو و همکاران (۲۰۱۷) به کاهش عملکرد در گندم بهاره (*Triticum aestivum* L.) با کاربرد مقادیر ۱۰ درصد بیوچار در مقایسه با ۵ و ۵/۵ درصد بیوچار اشاره کردند. کارر و همکاران (۲۰۱۳) نیز کاهش عملکرد را در تیمارهای حاوی ۷۵ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با ۵۰ تن در هکتار بیوچار گزارش کردند. علیرغم تاثیر مثبت بیوچار در اصلاح خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی در خاک، به‌نظر می‌رسد مصرف مقادیر بالای بیوچار به‌دلیل قدرت جذب بسیار قوی آن می‌تواند منجر به عدم توازن یون‌های خاک و اثرات منفی بر دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی داشته باشد (روزیتو و همکاران، ۲۰۱۸). آپادی (۲۰۱۵) دلیل کاهش عملکرد در تیمارهای حاوی ۳۰ تن در هکتار

بیوچار را در مقایسه با ۱۰ و۲۰ تن در هکتار بیوچار افزایش هدایت الکتریکی خاک در این تیمار و در نتیجه افزایش شوری خاک عنوان کرد.

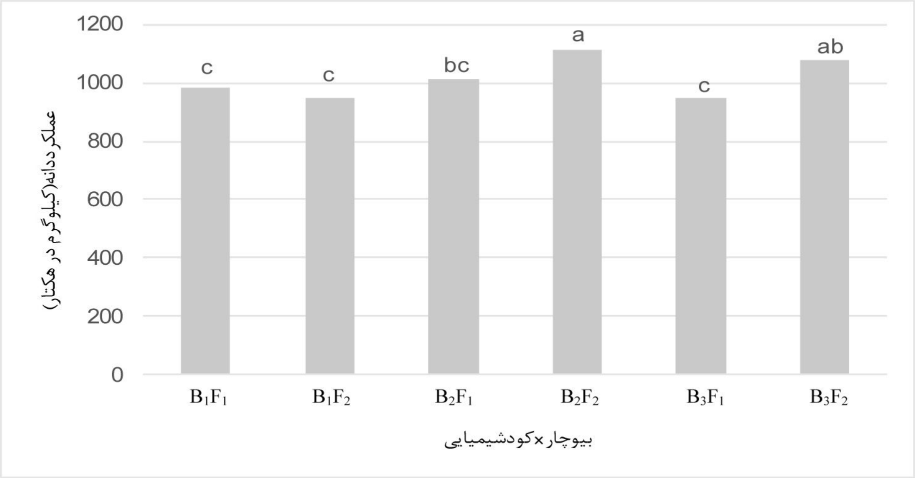



شکل۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برعملکرددانه در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۱۳- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار×کودشیمیایی برعملکرددانه در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۱-۸- عملکرد بیولوژیک

تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر معنی‌دار آبیاری بر عملکرد بیولوژیک را در هر دو سال نشان داد. بیوچار در سال اول تاثیر معنی‌داری بر عملکرد بیولوژیک نداشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار شد (جدول۴-۱۳). کود شیمیایی در هر دو سال تاثیر معنی‌داری بر عملکرد بیولوژیک داشت (جدول۴-۱۳). اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی در هر دو سال معنی‌دار شد (جدول ۴-۱۳) ولی اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی فقط در سال دوم آزمایش معنی‌دار بود و مقایسه میانگین داده‌ها (جدول۴-۱۵) تاثیر بیشتر تیمار $B_2F_2$ (۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) با ۴۳۳۱ کیلوگرم در هکتار و $B_1F_2$ (بدون مصرف بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) با ۴۲۱۱ کیلوگرم در هکتار را نسبت به سایر نشان داد. اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی نیز در هر دو سال معنی‌دار شد (جدول ۴-۱۳) و مقایسه میانگین داده‌ها تاثیر بیشتر تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی به همراه کاربرد بیوچار و کودشیمیایی بر عملکرد بیولوژیک را نشان داد (جدول ۴-۱۶).

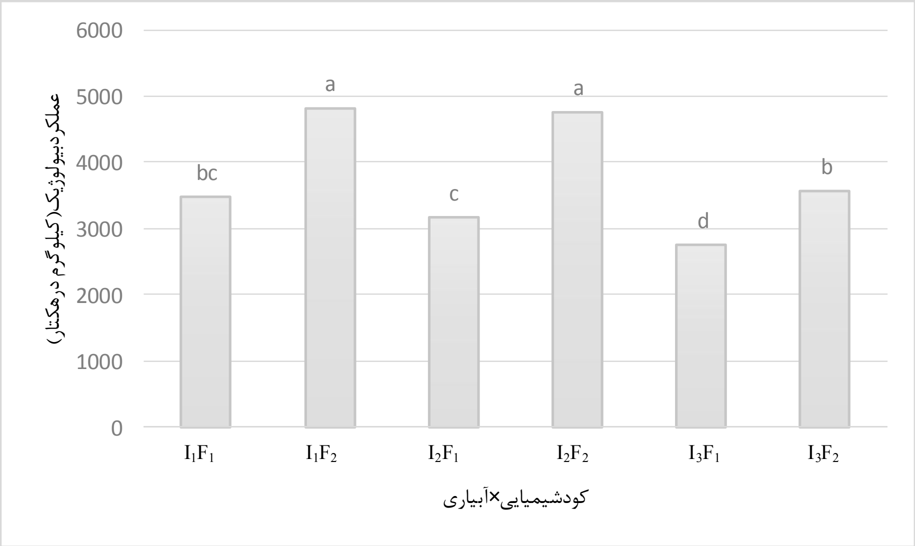
نتایج تجزیه مرکب نشان داد که تاثیر سال بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود و میزان عملکرد بیولوژیک در سال اول بیشتر از سال دوم بود (جدول‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸). تاثیر تیمار آبیاری بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود. تجزیه مرکب داده‌ها عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بر عملکرد بیولوژیک را نشان داد ولی کاربرد کود شیمیایی بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۷). اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی معنی‌دار بود و بیشترین مقادیر در تیمار$I_1F_2$ ( آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی+ مصرف کود شیمیایی) و $I_2F_2$ ( آبیاری ۷۰ درصد نیاز آبی+ مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب۴۸۱۳ و ۴۷۵۱ کیلوگرم بر هکتار بود (شکل ۴-۱۴). بالاتر بودن عملکرد بیولوژیک در تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی به همراه مصرف کود شیمیایی بیانگر تاثیر فراهمی آب و عناصر غذایی کافی در رشد و نمو دانه‌ها و اندام‌های هوایی

است. از طرفی کاهش زیست توده تولیدی در تیمارهای تنش آبی می‌تواند مربوط به کاهش ارتفاع گیاه، کاهش شاخه‌های جانبی در بوته، کاهش سطح برگ تولیدی و افزایش اختصاص مواد فتوسنتزی به ریشه نسبت به بخش هوایی گیاه باشد. یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش تورژسانس و در نتیجه کاهش رشد و توسعه سلول‌ها خصوصاً در ساقه و برگ‌هاست. با کاهش رشد سلول، اندازه اندام محدود می‌شود و به همین دلیل است که اولین اثر محسوس کم‌آبی بر گیاهان را می‌توان از روی اندازه کوچک‌تر برگ‌ها یا ارتفاع گیاهان تشخیص داد. به‌علاوه در شرایط کم‌آبی، جذب مواد و عناصر غذایی نیز کاهش یافته و بنابراین رشد و توسعه برگ‌ها محدود می‌گردد. در نتیجه ظرفیت کل فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد و بدیهی است که با محدود شدن فرآورده‌های فتوسنتزی در شرایط کمبود آب، رشد گیاه و نهایتاً عملکرد دانه و بیولوژیک آن دچار نقصان می‌شود (اشرف و فولاد، ۲۰۰۷). همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد بیولوژیک با ارتفاع بوته ($r = ۰/۷۳^{**}$)، تعداد شاخه‌های فرعی ($r = ۰/۶۶^{**}$)، تعداد فولیکول ($r = ۰/۵۵^{**}$)، تعداد دانه در بوته ($r = ۰/۵۱^{**}$) و وزن دانه در بوته ($r = ۰/۴۹^{**}$) بیانگر این موضوع بود (جدول ۴-۷).

اثرمتقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول۴-۱۷). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه ، نشان دهنده تاثیر بالاتر تیمارهای$I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی)، $I_1B_2F_2$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) بر عملکرد بیولوژیک بود (به‌ترتیب۵۱۱۶ و ۴۹۵۵ کیلوگرم بر هکتار) (جدول۴-۱۹). عملکرد بیولوژیک بالا در این تیمارها با عملکرد دانه و وزن خشک بالا در این تیمارها مرتبط بود. کاربرد توام کودشیمیایی و بیوچار به‌همراه آبیاری مناسب، به‌دلیل فراهمی بهتر آب و عناصر غذایی بویژه نیتروژن سبب تحریک رشد رویشی و زایشی و بهبود وزن خشک گیاه و متعاقب آن افزایش عملکرد

بیولوژیک گردید. عارف و همکاران (۲۰۱۲) نیز بالاترین عملکرد بیولوژیک را در تیمار بیوچار به‌همراه کودشیمیایی و کمترین عملکردبیولوژیک را در تیمار بیوچار تنها گزارش کردند.

بالا بودن عملکرد دانه و بیولوژیک در تیمار $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) نشان می‌دهد که آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی به همراه بیوچار، ضمن کاهش تنش آبی، به توزیع متوازن مواد غذایی در اطراف ریشه گیاه نیز کمک می‌کند، درحالیکه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی احتمال آبشویی عناصر غذایی بویژه در تیمارهای بدون بیوچار بالاتر است (چاودهری و همکاران، ۲۰۱۶).




شکل۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی برعملکردبیولوژیک در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

### ۴-۳-۱-۹- شاخص برداشت

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از دو سال عدم تاثیرمعنی‌دار آبیاری و بیوچار را بر شاخص برداشت نشان داد ولی کود شیمیایی در هر دو سال در سطح احتمال ۱ درصد تاثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت

داشت (جدول۴-۱۳). اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی فقط در سال اول معنی‌دار شد و تیمار $B_1F_2$ (بدون مصرف بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) بیشترین مقدار شاخص برداشت را داشت ( ۳۲/۸ )(جدول ۴-۱۵) ولی اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی در هر دو سال معنی‌دار شد (جدول۴-۱۳) و تیمار $I_3B_1F_2$ (۴۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) در سال اول و $I_2B_2F_1$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + بدون مصرف کود شیمیایی) در سال دوم بیشترین تاثیر را بر شاخص برداشت داشتند (جدول۴-۱۶).

سارا و همکاران (۲۰۱۸) به عدم تاثیر بیوچار بر شاخص برداشت گیاه ذرت اشاره کردند. سای و همکاران (۲۰۱۸) نیز عدم تاثیر بیوچار حاصل از کلش برنج را بر شاخص برداشت برنج گزارش کردند. برخلاف گزارشات فوق راب و همکاران (۲۰۱۶) افزایش شاخص برداشت را با افزایش مقادیر بیوچار در آزمایشات خود گزارش کردند. در این آزمایش، با کاربرد کود شیمیایی، افزایش عملکرد بیولوژیک مشاهده شد که این امر می‌تواند علت پایین بودن شاخص برداشت در تیمارهای مصرف کودی باشد. همبستگی منفی بین عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت نیز این موضوع را تایید می‌کند (جدول۴-۷). اصفهانی و همکاران (۱۳۸۴) نیز به کاهش شاخص برداشت در مقادیر بالاتر کودی اشاره کردند.

### **۴-۳-۱-۱۰-کارایی مصرف آب (بر اساس عملکرد دانه)**

آبیاری در سال اول تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب نداشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار شد. کاربرد بیوچار در سال اول معنی‌دار نبود ولی در سال دوم تیمارهای حاوی بیوچار بیشترین تاثیر را بر کارایی مصرف آب داشتند (جدول‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴). کود شیمیایی در هیچ یک از سال‌ها تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب نداشت. در سال اول اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر کارایی مصرف آب معنی‌دار بود (جدول۴-۱۳). در بین

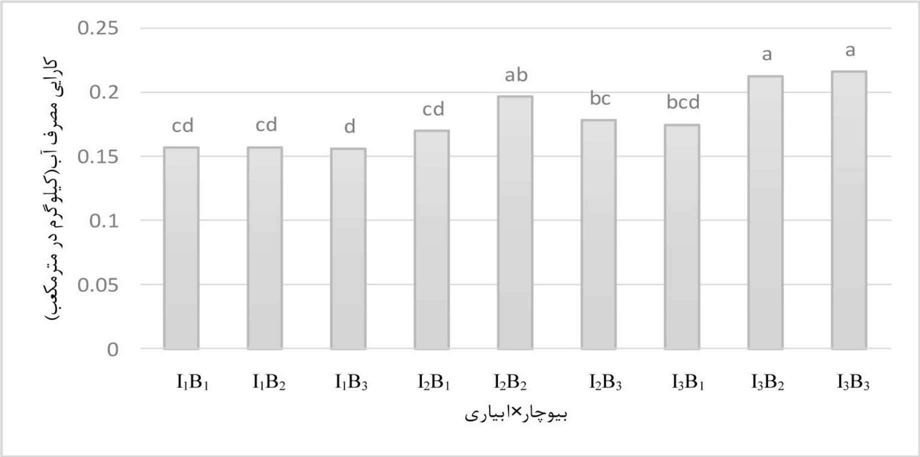
تیمارهای مربوط به اثرات متقابل بیوچار × کودشیمیایی، تیمار$B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) و $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) نیز بیشترین مقدار کارایی مصرف آب را داشتند (جدول۴-۱۵ ). مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نشان داد که تیمارهای $I_3B_3F_2$ (۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) و $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بیشترین کارایی مصرف آب را داشتند (به-ترتیب۰/۲۸ و ۰/۲۳کیلوگرم در متر مکعب) (جدول۴-۱۶). در سال دوم اثر متقابل آبیاری × بیوچار، بیوچار × کود شیمیایی و آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر کارایی مصرف آب معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۳). در بین تیمارهای مربوط به اثرات متقابل بیوچار× کود شیمیایی، تیمار$B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر کارایی مصرف آب داشت (جدول ۴-۱۵). مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه در سال دوم نیز تاثیر بیشتر تیمارهای $I_3B_2F_2$ (۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_3B_3F_1$ (۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) را بر کارایی مصرف آب نشان داد (جدول ۴-۱۶).

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر کارایی مصرف آب را نشان داد. کارایی مصرف آب در سال اول۰/۲۲ کیلوگرم در مترمکعب و در سال دوم ۰/۱۶ کیلوگرم در مترمکعب برآورد شد (جدول۴-۱۸). آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب داشتند (جدول ۴-۱۷). اثر متقابل آبیاری × بیوچار بر کارایی مصرف آب معنی‌دار بود و در بین تیمارهای مربوطه ، تیمار $I_3B_2$(آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار ) و تیمار$I_3B_3$ (آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار ) بیشترین تاثیر را بر کارایی مصرف آب داشتند (شکل ۴-۱۵). افزایش کارایی مصرف آب در تیمارهای تحت تنش آبی بیانگر این مطلب است که بـه طـور نسبی، در شرایط زراعی، افزایش کمبود آب سـبب افـزایش رانـدمان مصرف آب می‌شود، به‌عبارت دیگر در شرایط نزدیک به تنش

کامل کمبود آب، گیاه در مقایسه با شرایط رطوبتی مطلوب، نسبت به میزان آب مصرف شده محصول بیشتری تولید می‌کند (شبیری و همکاران، ۱۳۸۵). افزایش کارآیی مصرف آب درآفتابگردان ( *Helianthus annuus*) در شرایط تنش کمبود آب نسبت به آبیاری کامل توسط فلنت و همکاران (۱۹۹۶) گزارش شده است. از طرفی بالاتر بودن کارایی مصرف آب در تیمارهای تحت تنش و مصرف بیوچار در مقایسه با تیمار عدم کاربرد بیوچار، توانایی بیوچار در افزایش ظرفیت نگه‌داری آب را نشان می‌دهد. ظرفیت نگهداری آب بالای بیوچار به قدرت جذب زیاد و ساختار ویژه منافذ آن مربوط می‌شود. اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی معنی‌دار بود و در بین اثرات متقابل بیوچار × کود شیمیایی بیشترین تاثیر بر کارایی مصرف آب مربوط به تیمارهای$B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) و $B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) بود (شکل ۴-۱۶). افزودن بیوچار به خاک موجب بهبود دسترسی گیاهان به عناصر غذایی و در نتیجه افزایش فتوسنتز، ماده خشک گیاه و در نهایت افزایش کارایی مصرف آب می‌شود (جیانلین و همکاران، ۲۰۰۸؛ مونی، ۲۰۱۶). اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر کارایی مصرف آب نیز معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۷). مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نیز تاثیر بیشتر تیمارهای تحت تنش و کاربرد بیوچار را بر کارایی مصرف آب نشان داد (جدول۴-۱۹). بالا بودن کارایی مصرف آب در تیمار $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با بالا بودن عملکرد و همچنین کاهش میزان آب مصرفی در این تیمارها مرتبط است. با توجه به عملکرد بالا و نیز مصرف آب کم در این تیمار می‌توان به جای آبیاری ۱۰۰درصد از ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه برای حصول همان میزان عملکرد استفاده کرده به‌این ترتیب می‌توان در میزان آب مصرفی صرفه‌جویی کرد.

بیوچار با بهبود ویژگیهای فیزیکوشیمیایی خاک و افزایش منافذ آن به نگهداری آب قابل دسترس برای گیاهان و افزایش ظرفیت نگهداری آب کمک می‌کند. البته بسته به نوع بیوچار و مقدار مصرف آن در

خاک‌ها در مواقعی نیز جذب بیش از حد آب در منافذ بسیار ریز بیوچار منجر به کاهش آب قابل دسترس گیاهان شده و ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد (اسپراتی و همکاران، ۲۰۱۸). اختر و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که درگیاه گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) کاربرد بیوچار باعث مقاومت این گیاه به تنش خشکی گردید و عملکرد گیاهان تحت تنش تیمار شده با بیوچار به‌دلیل افزایش کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب در این تیمارها افزایش یافت. در تحقیقی دیگر استفاده از مخلوط بیوچار و کمپوست بیشترین افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد را موجب شد (ابوبکری و همکاران، ۲۰۱۵). مونی (۲۰۱۶) افزایش کارایی مصرف آب را در گیاه ذرت با کاربرد بیوچار گزارش کرد و این افزایش را با توانایی بیوچار در افزایش ظرفیت نگه‌داری آب مرتبط دانست. بتول و همکاران (۲۰۱۵) نیز با کاربرد سه سطح بیوچار (صفر، یک و سه درصد) و دو سطح آبیاری (۱۰۰ و ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای) در گیاه بامیه (*Abelmoschus esculentus*)، بیشترین کارایی مصرف آب را در مصرف یک درصد بیوچار و آبیاری بر اساس ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای مشاهده کردند.




شکل۴-۱۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برکارایی مصرف آب در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰ تن در هکتار بیوچار

شکل۴-۱۶- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی برکارایی مصرف آب در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب
حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است
$B_1$، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار
$F_1$، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۲- ویژگی‌های کیفی

### ۴-۳-۲-۱- محتوی نیتروژن دانه

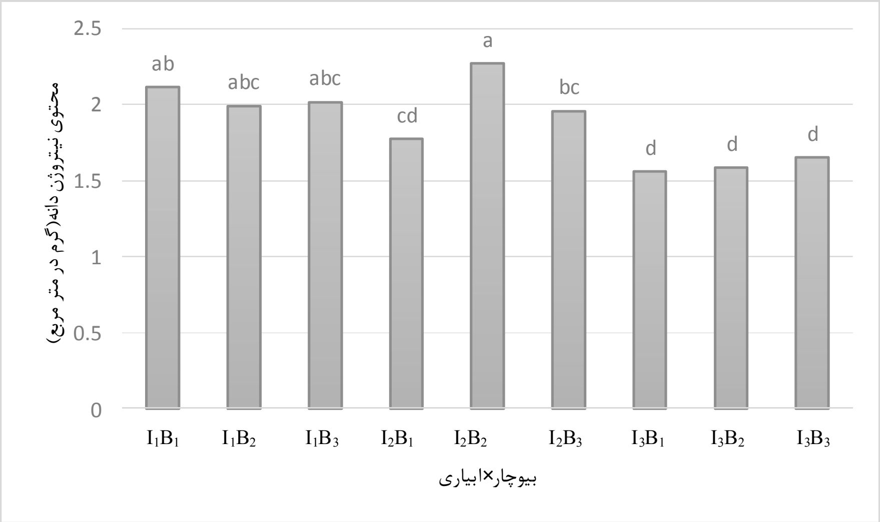
جدول تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر معنی‌دار آبیاری بر محتوی نیتروژن دانه را در سال اول نشان داد ولی در سال دوم آبیاری تاثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت (جدول۴-۲۰). تاثیر بیوچار بر محتوی نیتروژن دانه در هیچ‌یک از سال‌ها معنی‌دار نبود ولی کود شیمیایی در هر دو سال تاثیر معنی‌داری بر محتوی نیتروژن دانه داشت و مقایسه میانگین داده‌ها نشانگر تاثیر بیشتر تیمارهای کودی در مقایسه با تیمار عدم مصرف کود داشت (جدول‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۲). در سال اول اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی و در سال دوم اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه معنی‌دار بود (جدول۴-۲۰).

بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر سال بر محتوی نیتروژن دانه معنی‌دار بود و در سال اول میانگین محتوی نیتروژن دانه بیشتر از سال دوم بود (جدول‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۷). آبیاری و کود شیمیایی

تاثیر معنی‌داری بر محتوی نیتروژنی دانه داشتند ولی تاثیر بیوچار بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول۴-۲۵). بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها اثرات متقابل آبیاری × بیوچار معنی‌دار بود و مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری × بیوچار تاثیر بیشتر تیمار $I_2B_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰تن در هکتار بیوچار) بر محتوی نیتروژن دانه نشان داد (جدول۴-۲۵ و شکل ۴-۱۷). افزایش محتوی نیتروژن دانه در تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی را می‌توان در ارتباط با تحریک سطح فتوسنتزکننده و رشد رویشی سیاه‌دانه و در نتیجه جذب نیتروژن دانست. به‌طوری‌که این تحریک منجر به افزایش وزن خشک دانه و در نهایت افزایش محتوی نیتروژن دانه در این گیاه در واحد سطح شد. روزیتو و همکاران (۲۰۱۷) بیشترین درصد نیتروژن دانه را در کاربرد مقدار متوسطی از بیوچار به همراه لجن فاضلاب گزارش کردند و با افزایش میزان بیوچار کاهش در عملکرد و درصد نیتروژن دانه را مشاهده کردند. اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی معنی‌دار بود و در بین اثرات متقابل بیوچار × کود شیمیایی نیز بیشترین تاثیر مربوط به تیمارهای $B_2F_2$ (۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) و $B_3F_2$ (۲۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) بود (جدول۴-۲۵ و شکل۴-۱۸). مصرف تلفیقی کود شیمیایی به همراه بیوچار، به‌دلیل توانایی بیوچار در کاهش آبشویی نیتروژن از هدررویی آن جلوگیری کرده و نیتروژن بیشتری را در اختیار گیاه قرار می‌دهد. رضائی چیانه و همکاران (۱۳۹۴) نیز در آزمایشات خود به تاثیر بیشتر کودهای تلفیقی در افزایش میزان نیتروژن و پروتئین دانه نخود ( *Cicer arietinum* L.) اشاره کردند. چان و همکاران (۲۰۰۸) تاثیر افزایشی بیوچار حاصل از کود مرغی را بر محتوی نیتروژن گیاه ترب (*Raphanus sativus*) گزارش کردند در حالیکه در آزمایشات قبلی که توسط چان و همکاران (۲۰۰۷) انجام شده بود، بیوچار حاصل از بقایای گیاهی تاثیری بر عملکرد و غلظت نیتروژن گیاه نداشت. آنها دلیل این امر را وجود درصد بالایی از نیتروژن در بیوچار کود مرغی در مقایسه با بیوچار حاصل از بقایای گیاهی عنوان کردند. علیرغم این گزارشات، سارا و همکاران (۲۰۱۸) به عدم تاثیر بیوچار بر محتوی

نیتروژن دانه در گیاه ذرت اشاره کردند. تاثیر مثبت کاربرد کود شیمیایی بر افزایش محتوی نیتروژن دانه در این آزمایش همسو با گزارشات چان و همکاران (۲۰۰۸) بود. وکوویک و همکاران (۲۰۰۸) نیز گزارش کردند که با افزایش میزان نیتروژن در خاک محتوی کل نیتروژن در دانه گندم به طور معنی داری رو به افزایش گذاشت.

اثرات متقابل آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه معنی‌دار بود (جدول ۴-۲۵). در بین اثرات متقابل سه‌گانه ، تیمارهای $I_1B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_2B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۲/۴ گرم بر متر مربع بیشترین تاثیر را بر محتوی نیتروژن دانه داشتند (جدول۴-۲۸). به‌دلیل دارا بودن مقادیر بالای نسبت C بهN در بیوچار، انتظار می‌رود که با کاربرد بیوچار میزان نیتروژن موجود در خاک به شکل غیر متحرک تبدیل شده و کمبود نیتروژن در خاک به‌وجود بیاید. کاربرد نیتروژن به‌صورت کود شیمیایی میزان معدنی شدن نیتروژن را از طریق کاهش نسبت C به N افزایش می‌دهد و از طرفی بیوچار با کاهش آبشویی نیتروژن معدنی کارایی مصرف کود را افزایش می‌دهد. به‌همین دلیل کاربرد تلفیقی بیوچار به‌همراه کود شیمیایی موجب جذب بهتر آن توسط گیاه و افزایش درصد نیتروژن و ماده خشک و در نهایت افزایش محتوی نیتروژنی گیاه می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۱۵).

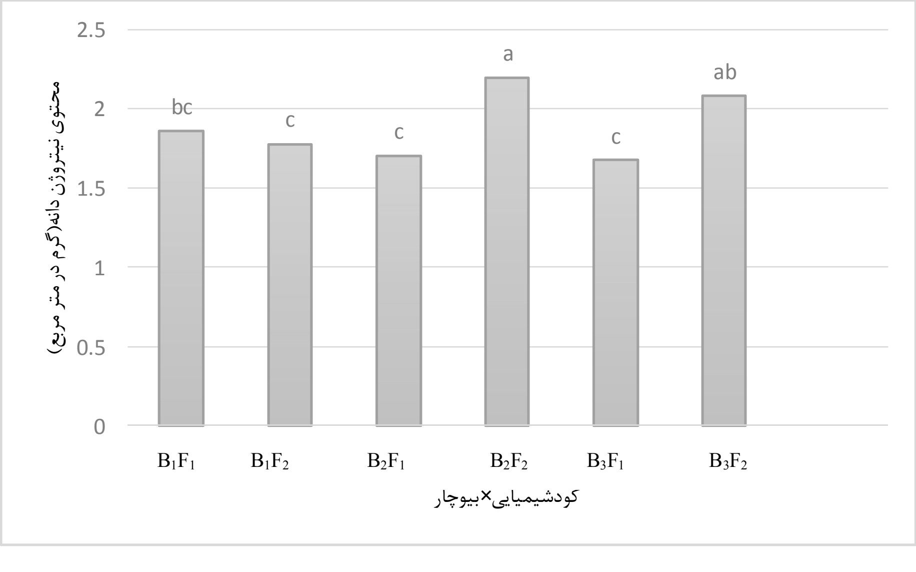



شکل۴-۱۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برمحتوی نیتروژن دانه سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۱۸- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰ تن در هکتار بیوچار

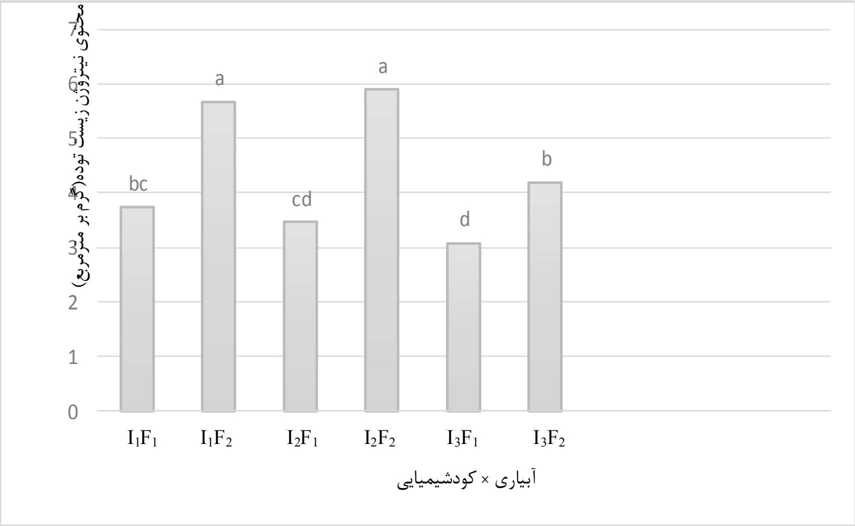
$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۲-۲- محتوی نیتروژن زیست توده

آبیاری و کود شیمیایی در هر دو سال در سطح احتمال ۵ درصد بر محتوی نیتروژن زیست توده تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۴-۲۰). تاثیر بیوچار بر محتوی نیتروژن زیست توده در سال اول معنی‌دار نبود ولی در سال دوم تاثیر بیوچار بر این صفت معنی‌دار شد (جدول۴-۲۰). اثرات متقابل آبیاری × کود شیمیایی در هر دو سال معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار$I_2F_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) در هر دو سال بود (جدول‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۴).

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر محتوی نیتروژن زیست‌توده را نشان داد (جدول۴-۲۵). آبیاری و کود شیمیایی بر محتوی نیتروژن زیست توده تاثیر معنی‌داری داشتند (جدول۴-۲۵). تاثیر بیوچار بر محتوی نیتروژن زیست توده معنی‌دار شد و کاربرد ۲۰ و ۱۰ تن در هکتار بیوچار به‌ترتیب با ۴/۵ و ۴/۴ گرم نیتروژن در متر مربع از تاثیر بیشتری نسبت به تیمار شاهد برخوردار بودند (جدول۴-۲۷). به نظر می‌رسد که آبشویی کمتر نیتروژن در تیمارهای حاوی بیوچار و در نتیجه افزایش فراهمی این عنصر در خاک، در نهایت تحریک فتوسنتز و افزایش رشد و زیست توده گیاه را به دنبال داشته است و همین امر می‌تواند علت افزایش محتوی نیتروژن زیست توده سیاه دانه در تیمارهای مصرف بیوچار باشد. اثرات متقابل آبیاری × کود شیمیایی بر میزان نیتروژن زیست توده معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمارهای$I_1F_2$ (آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) و $I_2F_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) بود و با افزایش تنش آبی به میزان آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی از محتوی نیتروژنی زیست توده کاسته شد (شکل۴-۱۹). بطور کلی گزارش‌های موجود در زمینهٔ اثر تنش خشکی بر میزان عناصر غذایی اندام‌های هوایی در گونه‌های گیاهی متفاوت است. کاهش میزان نیتروژن در شرایط کم‌آبی (الم، ۱۹۹۹) و افزایش آن تحت تنش خشکی (عبدالرحمان و

همکاران، ۱۹۷۱) گزارش شده است. افزایش محتوی نیتروژن زیست توده در این تیمارها با تاثیر آبیاری بهینه و کاربرد کودشیمیایی بر افزایش این صفت مرتبط بود (جدول۴-۲۷). از آنجایی که نیتروژن از عناصر اصلی تشکیل دهنده اسیدهای نوکلئیک بوده و این اسیدها نقش مهمی در میزان مواد انتقال یافته به دانه ها به عهده دارند، افزایش جذب نیتروژن می‌تواند بر عملکرد نهایی سیاه‌دانه تأثیر مستقیمی را اعمال کند (رضوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۳ب).




شکل۴-۱۹- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری×کودشیمیایی برمحتوی نیتروژن زیست‌توده سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: ۲۰ آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۲-۳- پروتئین دانه

بر اساس جدول تجزیه واریانس داده‌ها ، آبیاری در سال اول بر درصد پروتئین دانه تاثیر معنی‌داری داشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار نبود (جدول۴-۲۰). کاربرد بیوچار و کود شیمیایی در هر دو

سال بر درصد پروتئین دانه تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۴-۲۰). کاربرد کود شیمیایی در مقایسه با عدم کاربرد آن موجب افزایش معنی‌داری بر درصد پروتئین دانه شد (جدول۴-۲۲). حیدری و جهان‌تیغی (۱۳۹۲) نیز به تاثیر نیتروژن در افزایش پروتئین دانه اشاره کردند. نیتـروژن نقش اساسی در ساختمان کلروفیـل دارا بـوده و مهمتـرین عنصر در سنتز پروتئین‌ها می‌باشد و افزایش آن در شرایط مطلوب تا حد مشخصی، موجب افزایش میزان پروتئین می‌گردد.

اثرات متقابل آبیاری × بیوچار و اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر درصد پروتئین دانه فقط در سال اول معنی‌دار بود (جدول۴-۲۰). بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار مربوط به تیمارهای$I_3B_1$ (آبیاری براساس ۴۰ درصد نیاز آبی + بدون مصرف بیوچار) و $I_2B_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) بود. در مطالعات متعددی تاثیر تنش کم‌آبی بر افزایش پروتئین دانه گزارش شده است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۰؛ صنوبر و همکاران، ۱۳۸۹). در مرحله پر شدن دانه، ابتدا پروتئین و بعـد از آن کربوهیـدراتهـا در دانـه ذخیـره مـی‌شـوند، بنابراین هر چه طول دوره پر شدن دانه در اثر کمبـود آب کوتـاه‌تـر شـود، باعـث کوتـاه‌تـر شـدن دوره ذخیـره کربوهیدراتها شـده و اثـر کمتـری بـر ذخیـره ترکیبـات نیتروژنی دارد. به همین دلیل کمبود آب محتـوای نشاسـته دانه را کاهش و محتوای پروتئین دانه را افزایش می‌دهد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۰). بدر و همکاران (۲۰۱۵) به افزایش پروتئین دانه گندم در تیمارهای حاوی بیوچار اشاره کرده و دلیل این امر را تاثیر مستقیم بیوچار بر فراهم سازی عناصر غذایی برای رشد گیاه و تاثیر غیرمستقیم آن بر اصلاح کیفیت خاک عنوان کردند. حافظ و همکاران (۲۰۱۷) نیز افزایش درصد پروتئین در بذرهای سویای کشت شده در خاک حاوی بیوچار را گزارش کردند. بیوچار بدلیل داشتن منافذ ریز فراوان و سطح ویژه بالا به نگهداری عناصر غذایی در خاک کمک کرده و از آبشویی نیترات جلوگیری می‌کند. حفظ عناصر غذایی در خاک، دسترسی ریشه به آنها و همچنین جذب نیترات توسط گیاه را بهبود می‌بخشد و این امر باعث تنظیم متابولیسم گیاه و افزایش

میزان نیتروژن و پروتئین بذرها می‌شود. استفاده از کود شیمیایی نیز در مقایسه با عدم کاربرد آن باعث افزایش پروتئین دانه شد.

### ۴-۳-۲-۴- عملکرد پروتئین

آبیاری در سال اول بر عملکرد پروتئین دانه موثر بود ولی در در سال دوم آبیاری بر عملکرد پروتئین دانه تاثیر معنی‌داری نداشت (جدول۴-۲۰). بیوچار در سال اول تاثیر معنی‌داری بر عملکرد پروتئین نداشت ولی در سال دوم تاثیر این تیمار معنی‌دار شد و بیشترین تاثیر مربوط به کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود (جدول‌های۴-۲۰ و ۴-۲۲). کاربرد کودشیمیایی نیز در هر دو سال معنی‌دار شد (جدول۴-۲۰). اثرات متقابل بیوچار × کودشیمیایی و اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی بر درصد پروتئین دانه فقط در سال اول معنی‌دار بود.

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر عملکرد پروتئین دانه را نشان داد (جدول۴-۲۵ ). عملکرد پروتئین دانه در سال اول (۱۲۲ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از سال دوم (۱۰۶ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول۴-۲۷). بالا بودن عملکرد پروتئین در سال اول با بالا بودن عملکرد دانه در این سال مرتبط بود. اثرات آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی بر عملکرد پروتئین دانه معنی‌دار بود (جدول ۴-۲۵). تجزیه مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی را نشان داد و تیمارهای $I_1B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_2B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۱۴۳ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد پروتئین دانه را داشتند (جدول۴-۲۸) و با افزایش تنش آبی به میزان ۴۰ درصد نیاز آبی، عملکرد پروتئین کم شد. عملکرد پروتئین بالا در این دو تیمار با بالا بودن عملکرد و محتوی نیتروژنی دانه در آن‌ها مرتبط بود. روزیتو و همکاران (۲۰۱۸) بیشترین مقدار

پروتئین و عملکرد دانه گندم را در کاربرد ۵ درصد بیوچار به همراه لجن فاضلاب گزارش کردند در حالی-که کاربرد ۱۰ درصد بیوچار به‌همراه لجن فاضلاب موجب کاهش این صفات در آزمایشات آنها شد. توانایی بیوچار در نگه‌داری نیتروژن خاک و جلوگیری از آبشویی آن و نیز کاهش تلفات نیتروژن به صورت آمونیوم از دلایل تاثیر بیوچار بر افزایش محتوی پروتئینی دانه‌ها گزارش شده است.

علی و همکاران (۲۰۱۵) نیز افزایش جذب نیتروژن و تولید عملکرد دانه و پروتئین بالاتری را در تیمارهای حاوی بیوچار و کود شیمیایی گزارش کردند و دلیل این امر را تاثیر مثبت بیوچار در نگهداری و حفظ عناصر غذایی خاک و بهبود کارایی مصرف کودهای شیمیایی، بویژه در خاکهای مستعد آبشویی نیتروژن عنوان کردند.

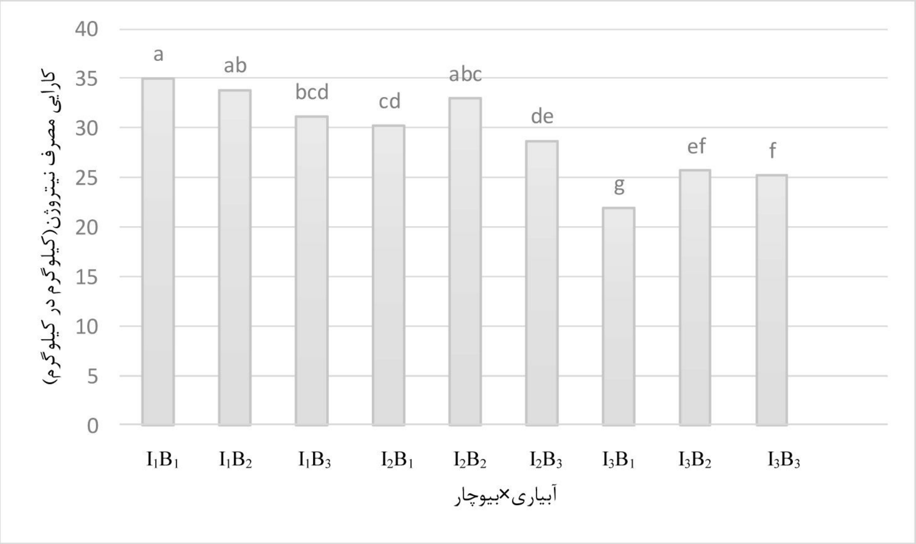
### ۴-۳-۲-۵- کارایی مصرف نیتروژن

آبیاری در هر دو سال بر کارایی مصرف نیتروژن تاثیر معنی‌داری داشت (جدول۴-۲۱). بیوچار در سال اول تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف نیتروژن نداشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار شد (جدول ۴-۲۱). کود شیمیایی در هیچ یک از سال‌ها تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف نیتروژن نداشت (جدول۴-۲۱). اثر متقابل بیوچار ×کود شیمیایی در سال اول معنی‌دار بود. اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی در هر دو سال معنی‌دار بود (جدول۴-۲۱).

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر کارایی مصرف نیتروژن را نشان داد (جدول۴-۲۶). تیمارهای آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی نیز تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف نیتروژن داشتند (جدول ۴-۲۶). اثر متقابل آبیاری × بیوچار معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $I_1B_1$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون مصرف بیوچار ) با ۳۵/۱ کیلوگرم در کیلوگرم بود (شکل۴-۲۰). حمزه‌ئی و همکاران (۱۳۹۴) به تاثیر آبیاری بر کارایی مصرف نیتروژن در کدوی تخمه کاغذی ( *Cucurbita pepo*

.L) اشاره کردند. حضور آب به دلیل نقش آن در فرآیندهای جـذب عناصـرغذایی و در نتیجه افزایش عملکرد ضروری اسـت. هنگامی که مقدار آب مصرفی کاهش یابد، امکان جذب بیشتر عناصر غذایی خصوصاً نیتروژن فراهم نشده و هدر رفت آن به ویژه اگر بافت خاک قابلیت نگهداری رطوبت پایینی داشته باشد، افزایش مـی‌یابـد و در نتیجه باعث کاهش کارآیی نیتـروژن مـی‌گـردد. برانتلی و همکاران (۲۰۱۵) به تاثیر بیوچار چوب بر افزایش کارایی مصرف نیتروژن در ذرت اشاره کرده و دلیل آن‌را تاثیر بیوچار در افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و نگه‌داری نیتروژن و جلوگیری از آبشویی آن و در نتیجه دسترسی بهتر گیاه به نیتروژن و کاهش مصرف کودهای نیتروژنه عنوان کردند. زو و همکاران (۲۰۱۵) نیز به تاثیر افزایشی بیوچار بر کارایی مصرف نیتروژن در یکی از چهار خاک مورد مطالعه در اراضی کشور چین اشاره کردند. اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی نیز معنی‌دار بود و تیمار $B_2F_2$ (۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی ) با ۳۲/۳ کیلوگرم در کیلوگرم بیشترین تاثیر را بر کارایی مصرف نیتروژن داشت (شکل۴-۲۱). مصرف تلفیقی کود شیمیایی به همراه بیوچار، به‌دلیل توانایی بیوچار در کاهش آبشویی نیتروژن از هدررویی آن جلوگیری کرده و نیتروژن بیشتری را در اختیار گیاه قرار می‌دهد و در نتیجه کارایی مصرف نیتروژن افزایش می یابد. کاربرد کود نیتروژن تا حد متعادل موجب افزایش کارایی نیتروژن می‌شود ولی افزایش مقادیر مصرف آن منجر به کاهش کارایی مصرف نیتروژن می‌شود. به نظر می رسد یکی از دلایل کاهش کارایی مصرف نیتروژن در مقادیر بالای کود نیتروژن، فزونی سرعت از دست رفتن عنصر مذکور از طریق آبشویی و تصعید یا به علت عدم استفاده موثر از نیتروژن می‌باشد. واکنش گیاه به مصرف کود نیتروژن از قانون بازده نزولی تبعیـت می‌کند، به این مفهوم که هر چه میزان کود نیتروژن مصرفی افزایش یابد، میزان عملکرد به طور مستمر کمتر افزایش می‌یابد و در نهایت مماس با خط مجانب می‌گردد (حمزه‌ئی و همکاران، ۱۳۹۴).

اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی معنی‌دار بود و تیمارهای $I_1B_1F_2$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_2B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۳۶/۴ کیلوگرم در کیلوگرم بیشترین تاثیر را بر کارایی مصرف نیتروژن داشت (جدول۴-۲۸). بالاتر بودن کارایی مصرف نیتروژن با عملکرد دانه بیشتر در این تیمارها مرتبط بود. بیوچار در خاک به‌عنوان نگهدارنده کود و آب عمل کرده و با تغییر دادن خصوصیات شیمیایی و میکروبی خاک به جذب عناصر غذایی کمک می‌کند.

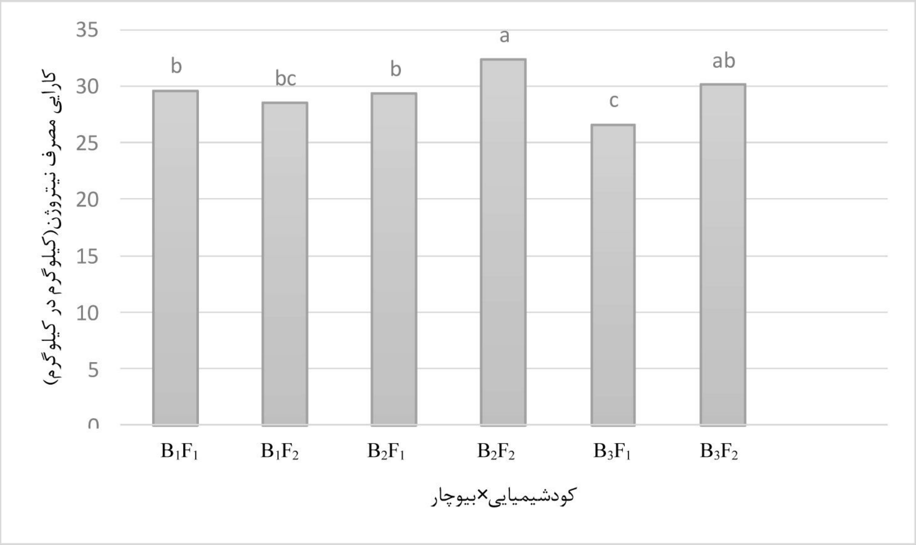



شکل۴-۲۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × بیوچار برکارایی مصرف نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار



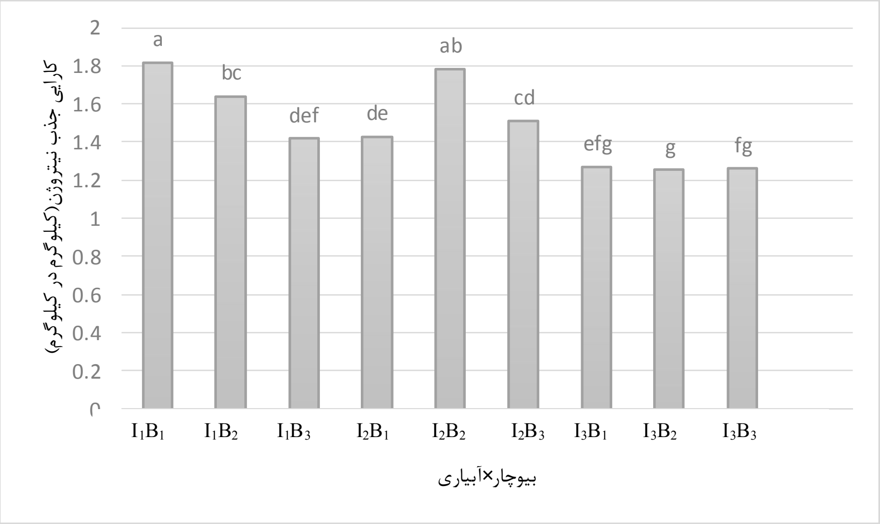

شکل۴-۲۱- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی برکارایی مصرف نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب
حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است
$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰ تن در هکتار بیوچار
$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۲-۶- کارایی جذب نیتروژن

کارایی جذب در واقع نسبت نیتروژن جذب شده در گیاه به نیتروژن به کار رفته می‌باشد. تجزیه واریانس داده‌ها در هر دو سال تاثیر معنی‌دار تیمار آبیاری را بر کارایی جذب نیتروژن نشان داد (جدول۴-۲۱ ). بیوچار در سال اول تاثیر معنی‌داری بر کارایی جذب نیتروژن نداشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار شد و تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار از کارایی جذب بالاتری برخوردار بود (جدول۴-۲۳). کاربرد کودشیمیایی نیز در هر دو سال معنی‌دار بود (جدول۴-۲۱). اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی در هر دو سال معنی‌دار بود و تیمار $I_2F_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر کارایی جذب نیتروژن داشت ولی اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار، و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی فقط در سال دوم معنی‌دار بود (جدول‌های۴-۲۱ و ۴-۲۴).

بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر سال بر کارایی جذب نیتروژن معنی‌دار بود و در سال دوم کارایی جذب نیتروژن بالاتری به‌دست آمد (۱/۵ کیلوگرم بر کیلوگرم) (جدول‌های ۴-۲۶ و ۴-۲۷). تاثیر آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی بر کارایی جذب نیتروژن معنی‌دار بود (جدول ۴-۲۶). اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار معنی‌دار بود و تیمار $I_1B_1$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون مصرف بیوچار ) و تیمار $I_2B_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف ۱۰ تن در هکتار بیوچار ) بیشترین کارایی جذب نیتروژن و تیمارهای آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی کمترین کارایی جذب نیتروژن را داشتند (شکل ۴-۲۲). اعمال تنش آبیاری منجر به کاهش کارایی جذب نیتروژن می‌شود. علیزاده و همکاران (۱۳۹۱) نیز به کاهش کارایی جذب نیتروژن در تیمارهای تحت تنش آبیاری اشاره کردند. تنش آبیاری با اختلال در جذب نیتروژن بر کارایی جذب آن تاثیر منفی می‌گذارد. اثر متقابل آبیاری × کود شیمیایی نیز معنی‌دار بود و تیمار $I_2F_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) و $I_1F_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر کارایی جذب نیتروژن داشتند (جدول ۴-۲۶ و شکل۴-۲۳). اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی نیز معنی‌دار بود و تیمار $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر کارایی جذب نیتروژن داشتند (جدول ۴-۲۶ و شکل۴-۲۴). افزایش کارایی جذب نیتروژن در اثر کاربرد بیوچار در مطالعات دوی و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است. ویدواتی و همکاران (۲۰۱۲) نیز به تاثیر بیوچار بر کاهش آبشویی نیتروژن و افزایش دسترسی گیاهان به این عنصر و در نتیجه کاهش مصرف کودشیمیایی اشاره کردند. کوچکی و همکاران (۱۳۹۳) نیز به افزایش کارایی جذب نیتروژن در گیاه زعفران (*Crocus sativus* L.) اشاره کردند. کاربرد نهاده‌های کودی از طریق افزایش میزان نیتروژن کل بوته و نیز وزن کل بوته، منجر به افزایش کارایی جذب نیتروژن می‌شود. به عبارتی دیگر، در شرایط عدم کاربرد کود، به سبب کاهش چشمگیر میزان نیتروژن کل بوته ، میزان کارایی جذب نیتروژن کمتر از

شرایط مصرف نهاده‌های کودی می‌باشد. از سوی دیگر، برتری کودهای آلی در مقایسه با کود شیمیایی از نظر کارایی جذب و مصرف نیتروژن به دلیل آبشویی بیشتر نیتروژن از منبع شیمیایی گزارش شده است. همچنین فراهمی مناسبتر نیتروژن طی فرآیند معدنی شدن تدریجی کودهای آلی درمقایسه با کود شیمیایی از عوامل دیگر سودمندی بیشتر کودهای آلی نسبت به شیمیایی عنوان شده است (رضوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۳الف؛ کوچکی و همکاران، ۱۳۹۳). اثرات متقابل سه‌گانه بین تیمارهای آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی معنی‌دار بود و تیمارهای حاوی ۱۰ تن در هکتار بیوچار به‌همراه کود شیمیایی و آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی از کارایی بالاتری برخوردار بودند (جدول۴-۲۸). به نظر می‌رسد افزایش قدرت جذب بیوچار در مقادیر بالاتر آن بویژه در شرایط تنش آبیاری، مانع از جذب بهینه عناصر غذایی توسط گیاهان شده و کارایی جذب نیتروژن در مقادیر بالاتر بیوچار کاهش می‌یابد (روزیتو و همکاران، ۲۰۱۷).

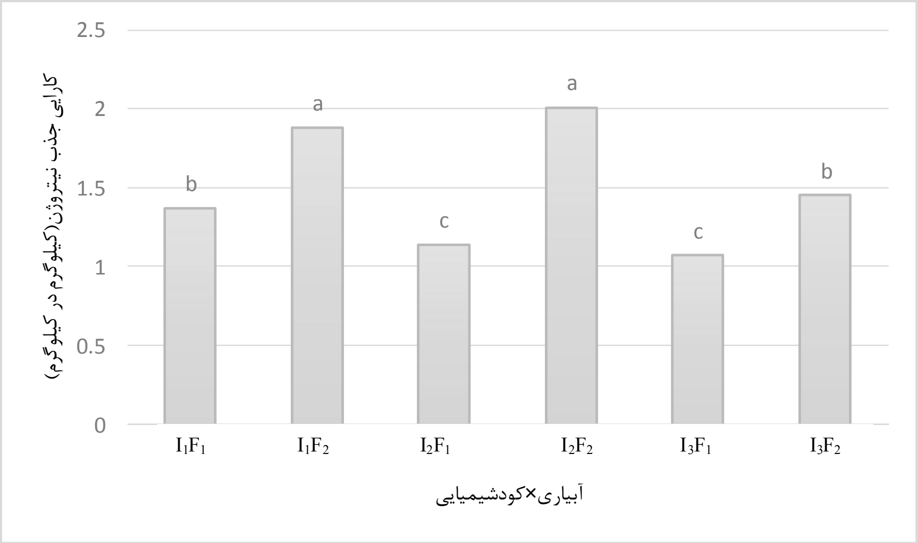



شکل۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری ×بیوچار برکارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

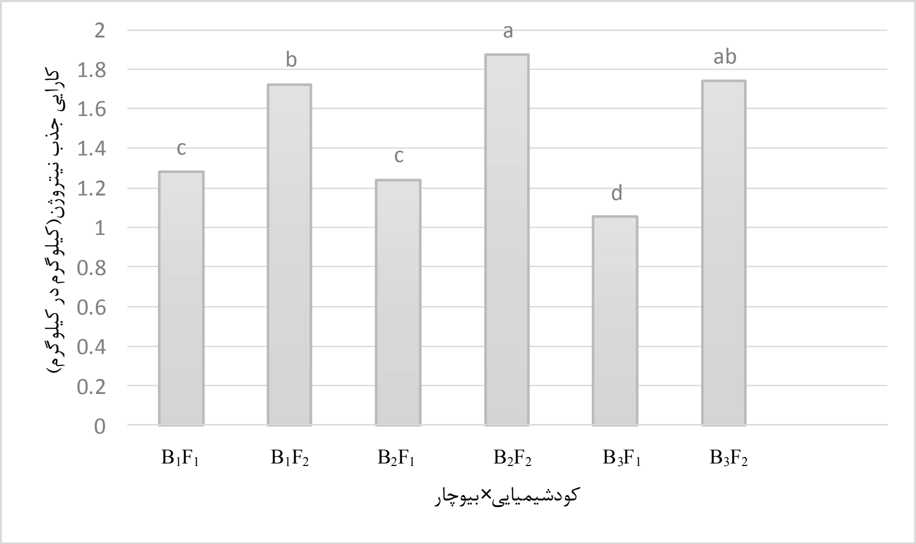



شکل۴-۲۳- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی برکارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم




شکل۴-۲۴- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی برکارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$ :۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$ :۲۰ تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۲-۷-درصد روغن دانه

تیمار آبیاری در سال اول بر درصد روغن دانه معنی‌دار نبود ولی در سال دوم در سطح احتمال ۱ درصد بر درصد روغن دانه موثر بود. بیوچار نیز در سال اول بر درصد روغن دانه تاثیر معنی‌داری نداشت ولی در سال دوم  بر درصد روغن دانه موثر بود و بیشترین میزان درصد روغن دانه مربوط به تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود (۲۹/۵۴ درصد)(جدول‌های۴-۲۹ و ۴-۳۰). کاربرد کود شیمیایی در هیچ یک از سال‌ها بر درصد روغن دانه تاثیر معنی‌داری نداشت. در سال دوم اثر متقابل آبیاری × بیوچار و بیوچار × کود شیمیایی بر درصد روغن دانه معنی‌دار بود (جدول۴-۲۹). بیشترین درصد روغن دانه در اثر متقابل آبیاری × بیوچار در تیمار$I_1B_2$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) و $I_1B_3$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) به‌ترتیب به‌میزان ۳۴/۸ و ۳۲/۸ درصد بود (جدول۴-۳۱). بیشترین تاثیر اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی نیز مربوط به تیمارهای $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) بود (جدول۴-۳۳).

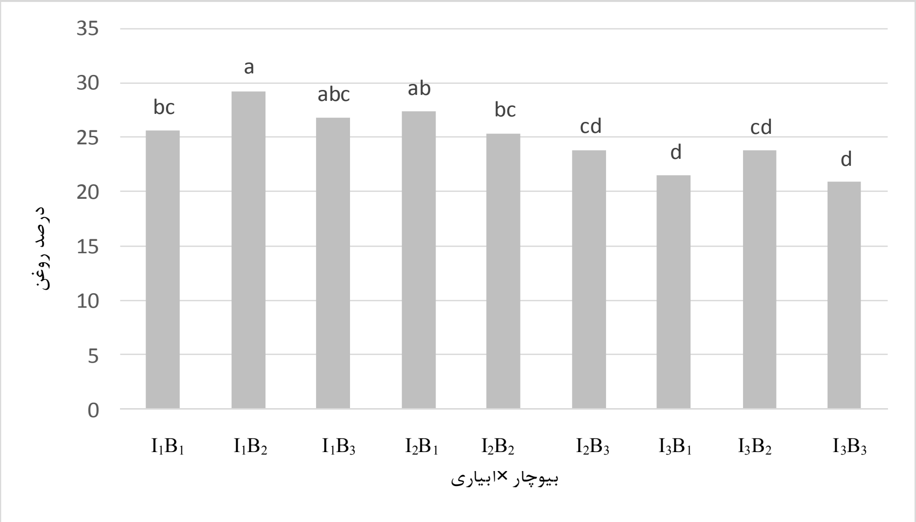
تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر درصد روغن را نشان داد (جدول۴-۳۵). درصد روغن دانه در سال دوم (۲۷/۶ درصد) نسبت به سال اول (۲۲/۱ درصد) افزایش معنی‌داری داشت (جدول۴-۳۶). آبیاری و بیوچار تاثیر معنی‌داری بر درصد روغن دانه داشتند (جدول ۴-۳۵). کاربرد کود شیمیایی تاثیر معنی‌داری بر درصد روغن دانه نداشت. در مطالعات متعددی به عدم تاثیر یا تاثیر منفی کودهای شیمیایی بر درصد روغن دانه اشاره شده است (خان و اعظم، ۱۹۹۹؛ جلیازکو، ۱۹۹۹). اثر متقابل آبیاری × بیوچار معنی‌دار بود (جدول۴-۳۵). بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار مربوط به تیمار $I_1B_2$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی+۱۰ تن در هکتار بیوچار) بود و با افزایش تنش آبی از میزان روغن دانه کاسته شد (شکل۴-۲۵). بلالـویی و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش کردند مقدار روغن دانه سـویا در اثـر تنش خشکی

کاهش معنی‌داری نشان داد که دلیل آن را مـی‌تـوان حساسیت زیاد تجمع لیپیدها نسبت به تنش خشکی در مرحله دانـه‌بندی و کاهش فتوسنتز جاری و کاهش مواد فتوسنتزی عرضه شـده برای پر شدن دانه و همچنین کاهش طول دورهٔ پر شدن دانـه ذکـر نمود. تنش خشکی به‌ویژه در هنگام رسیدگی به دلیل تسریع در رسیدگی گیاه، درصد روغن را کاهش ولی محتوای پروتئین را افزایش می‌دهد. در چنین شرایطی فرصت کافی برای سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره‌شده در دانه وجود نداشته و بنابراین درصد روغن‌کاهش خواهد یافت (آلیاری و همکاران، ۱۳۷۹).

اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی معنی‌دار بود (جدول۴-۳۵). بیشترین اثر متقابل بیوچار × کود شیمیایی مربوط به تیمار $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) بود (شکل۴-۲۶). بیکری و همکاران (۲۰۱۴) نیز بیشترین درصد روغن در گیاه کتان (*Linum Usitatissimum*) را در کاربرد توام بیوچار، میکوریزا و اسیدهیومیک گزارش کردند. به‌نظر می‌رسد کاربرد مقدار متوسطی از بیوچار به‌دلیل ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاه، بهتر از مقادیر زیاد آن باشد (جمال و ابیبه، ۲۰۱۶). محققان دیگری نیز به تاثیر بهتر مقدار متعادلی از بیوچار در مقایسه با مقادیر پایین و زیادی آن اشاره کردند. تنظیم میزان pH و عناصر غذایی خاک در حد متعادل و در نتیجه رشد بهتر گیاه در تیمارهای مقدار متوسط بیوچار از دلایل بهتر بودن این تیمار نسبت به مصارف زیاد بیوچار عنوان شده است (جمال و ابیبه، ۲۰۱۶؛ دیسپنزا و همکاران، ۲۰۱۶).

اثر متقابل سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کود شیمیایی نیز معنی‌دار بود و بیشترین درصد روغن دانه در تیمارهای$I_1B_2F_2$(۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی ) و $I_1B_1F_2$(۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوچار + مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب به‌میزان ۳۰/۲ و۳۰/۱ درصد بود (جدول‌های ۴-۳۵ و ۴-۳۷). این امر تاثیر آبیاری کامل و مصرف بیوچار را بر درصد روغن دانه نشان داد. سوپادیت و همکاران (۲۰۱۲) نیز در آزمایش‌های خود به تاثیر بیوچار در بهبود خواص کیفی گیاه سویا

(*Glycine max*) اشاره کردند. افزودن بیوچار به خاک توانایی جذب عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش می‌دهد و به‌دلیل ساختار متخلخل بیوچار و سطح ویژه زیاد آن از آبشویی عناصر غذایی جلوگیری شده و در نتیجه کارایی کودهای شیمیایی افزایش می‌یابد (سوپادیت و همکاران، ۲۰۱۲).

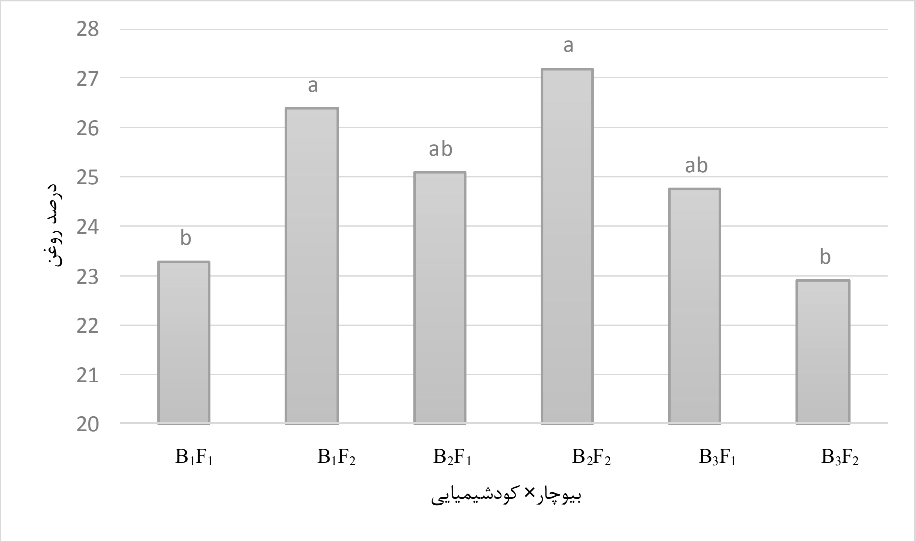



شکل۴-۲۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد روغن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۲۶- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بردرصد روغن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰ تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

## ۴-۳-۲-۸-عملکرد روغن

همانند درصد روغن، عملکرد روغن در سال اول تحت تاثیر تیمارهای آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی قرار نگرفت ولی در سال دوم این تیمارها بر عملکرد روغن تاثیر معنی‌دار داشتند (جدول۴-۲۹).

اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی معنی‌دار بود (جدول ۴-۲۹) و این اثر متقابل نشان داد که کاربرد توام ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کودشیمیایی ($B_2F_2$) با عملکرد روغن ۳۳۵/۵ کیلوگرم در هکتار تاثیر بهتری نسبت به کاربرد بیوچار و کودشیمیایی به‌تنهایی داشت (جدول۴-۳۳). مونیر و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی تیمارهای مختلف تغذیه‌ای از کودهای آلی، شیمیایی و تلفیقی دریافتند که صفات کیفی آفتابگردان مانند درصد روغن و عملکرد روغن درتیمارهای تلفیقی از کود آلی و کود شیمیایی به طورمعنی‌داری زیادتر از کاربرد آنها به‌تنهایی بود.

اثرمتقابل آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی در هر دو سال معنی‌دار بود و تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی از عملکرد روغن زیادتری برخوردار بودند (جدول۴-۳۴). زیادتر بودن عملکرد روغن در این تیمارها اهمیت آبیاری و تغذیه مناسب گیاه را در بهبود عملکرد دانه و روغن آشکار می‌سازد. تنش خشکی علاوه بر کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی، با کاهش دوره پر شدن دانه بر تجمع بسیاری از مواد از جمله روغن تاثیر می‌گذارد. بخشی از کاهش عملکرد روغن در شرایط تنش رطوبتی را می‌توان به کاهش طول دوره پرشدن دانه نسبت داد. در شرایط بدون تنش، زمان بیشتری برای پرشدن دانه وجود دارد، درنتیجه درصد روغن و عملکرد روغن نیز بیشتر است. از آنجایی‌که ابتدا کربوهیدرات‌ها تجمع می‌یابند و سپس این ماده به روغن، پروتئین و یا هر ماده دیگر تبدیل می‌شود، از این‌رو هر قدرطول دوره پرشدن دانه بیشتر باشد درصد روغن و عملکرد آن نیز زیادتر خواهد بود (رازی و اسد، ۱۹۹۹).

### ۴-۳-۲-۹-درصد اسیدهای چرب

در تجزیه با گاز کروماتوگرافی، پنج اسیدچرب شامل دو اسید چرب غیر اشباع (اولئیک و لینولئیک) و سه اسید چرب اشباع (پالمیتیک، استئاریک و مریستیک) مورد بررسی قرار گرفت. بالا بودن نسبی درصد اسید اولئیک در روغن حاکی از مقاومت آن به درجه حرارت‌های نسبتاً بالا جهت سرخ نمودن مواد غذایی و درصد بالای اسید لینولئیک نشان‌دهنده طعم مناسب و کیفیت بالای روغن این گیاه جهت مصرف مستقیم غذایی می‌باشد (خواجه‌پور، ۱۳۸۵). بنابراین بالا بودن میزان این دو اسیدچرب می‌تواند دلیلی بر پایداری روغن بذر سیاه‌دانه باشد.

اسیدهای چرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک از روند نسبتا مشابهی برخوردار بودند. به‌طوری‌که بر اساس جدول تجزیه مرکب داده‌ها میزان این سه اسیدچرب در سال دوم نسبت به سال اول افزایش معنی-

داری داشت. در مقابل اسیدهای چرب اولئیک و استئاریک در سال دوم نسبت به سال اول کاهش معنی-داری نشان دادند (جدول‌های ۴-۳۵ و۴-۳۶). سه اسیدچرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک تحت تاثیر تیمارهای آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی قرار گرفتند ولی اسید اولئیک تحت تاثیر آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی قرار نگرفت و اسید استئاریک تحت تاثیر آبیاری و بیوچار قرار گرفت ولی کود شیمیایی تاثیری بر آن نداشت (جدول‌های ۴-۳۵ و ۴-۳۶).

اسید اولئیک در هیچ یک از سال‌ها به تیمار تنش آبیاری واکنشی نشان نداد (جدول‌های۴-۳۵ و ۴-۳۶). اسیدهای چرب اشباع واکنش پذیری متفاوتی به کاربرد بیوچار داشتند؛ به‌طوریکه کاربرد ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار میزان اسیدهای چرب مریستیک و پالمیتیک را افزایش داد. بیشترین مقدار اسید لینولئیک نیز در تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار مشاهده شد. کاربرد بیوچار بر اسیدچرب اولئیک تاثیر معنی‌داری نداشت. در اسیدچرب استئاریک، کاربرد بیوچار میزان این اسیدچرب را کاهش داد (جدول۴-۳۶). کاربرد کودشیمیایی نیز بر سه اسیدچرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک موثر و بر اسیدهای چرب اولئیک و استئاریک بی‌تاثیر بود (جدول۴-۳۵).

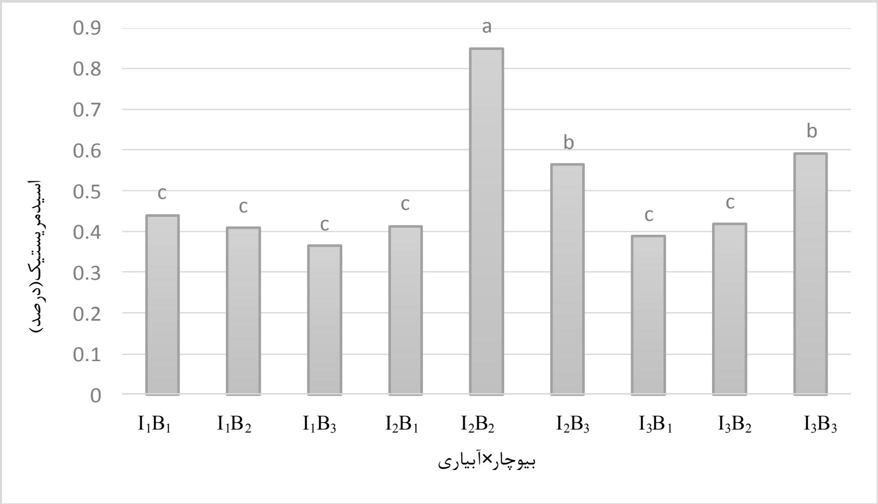
تجزیه مرکب داده‌ها معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری × بیوچار در تمامی اسیدهای چرب را نشان داد و در سه اسیدچرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک بیشترین اثر متقابل در تیمار $I_2B_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) مشاهده شد (شکل‌های۴-۲۷، ۴-۲۹ و ۴-۳۵). در اسیدچرب اولئیک بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار در تیمارهای $I_1B_3$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) و $I_3B_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) مشاهده شد (شکل ۴-۳۳). بیشترین اثر متقابل آبیاری × بیوچار در اسیدچرب استئاریک نیز در تیمارهای $I_1B_1$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) و $I_1B_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) مشاهده شد (شکل ۴-۳۱). به‌نظر می‌رسد کاربرد مقدار متعادل بیوچار و تنش آبی ملایم تاثیر افزایشی بر اکثر اسیدهای چرب داشته است. اثرات تنش

خشـکی درگیاهان مختلف یکسان نیست و نوع، رقم و مرحله‌ی رشـدی گیاه در میزان صدمات وارده به گیاه، نقش تعیین کننده‌ای دارد (نورمحمدی، ۲۰۰۴). مالکی و همکاران (۱۳۹۲) به افزایش درصد اسید لینولئیک در اثر تنش آبی در آزمایشات خود اشاره کردند. افزایش در محتوای اسیدهای چرب در بادام زمینی در شرایط تنش خشکی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده‌است (دوایودی و همکاران، ۱۹۹۶) ولی اشرفی و رزمجو (۲۰۱۰) به کاهش اسیدهای چرب استئاریک و پالمیتک در روغن دانه‌ی گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش آبی اشاره کردند.

در بین اثرات متقابل آبیاری × کودشیمیایی نیز بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $I_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کودشیمیایی) بود. اثرمتقابل آبیاری و کود شیمیایی بر اسیدهای چرب مریستیک، پالمیتیک، لینولئیک و استئاریک معنی‌دار بود (جدول۴-۳۵). تیمار$I_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی+ مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر اسیدهای چرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک داشت و تیمار $I_1F_2$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی+ مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر اسید چرب استئاریک داشت (شکل‌های ۴-۲۸، ۴-۳۰، ۴-۳۲ و ۴-۳۶).

اثرمتقابل بیوچار و کودشیمیایی تنها در اسیدهای چرب غیر اشباع اولئیک معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار$B_3F_2$ (۲۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کود شیمیایی) بود (شکل۴-۳۴). اثر متقابل آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر اسیدهای چرب پالمیتیک، لینولئیک، اولئیک و استئاریک معنی‌دار بود و مقایسه میانگین اثر متقابل این سه تیمار نشان داد که کاربرد بیوچار اثرات افزایشی بر درصد اسیدهای چرب داشت (جدول۴-۳۷). حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) نیز به افزایش درصد اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک با کاربرد همزمان کود زیستی و کودشیمیایی اشاره کردند.

افزودن همزمان بیوچار و کودشـیمیایی، ضـمن تـأمین بخشی از نیتـروژن مورد نیاز گیاه، از هدرروی نیتروژن (آبشـویی یـا متصـاعد شدن) می‌کاهد و سپس به‌دلیل فرآینـد معـدنی شـدن، مجـدداً نیتروژن به صورت تدریجی به شکل قابل جذب گیاه در آمده و سـبب فراهمـی در طـول دوره رشـد گیـاه می‌شود. تأثیر تلفیق بیوچار با کودشیمیایی سبب صرفه جـویی در مصرف کود شیمیایی به‌دلیل کاهش آبشویی آنها می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ویدواتی و همکاران، ۲۰۱۴).

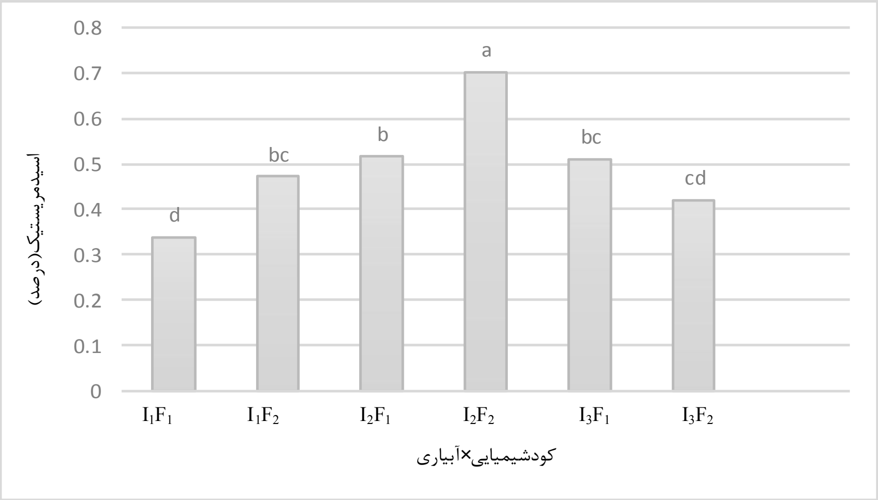



شکل۴-۲۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیدمریستیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

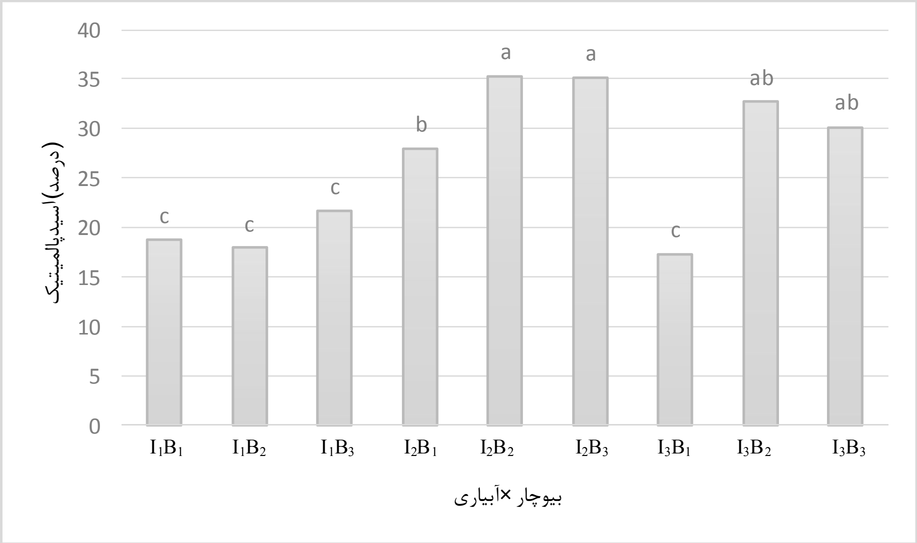



شکل۴-۲۸- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی بر درصد اسیدمریستیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی، $F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

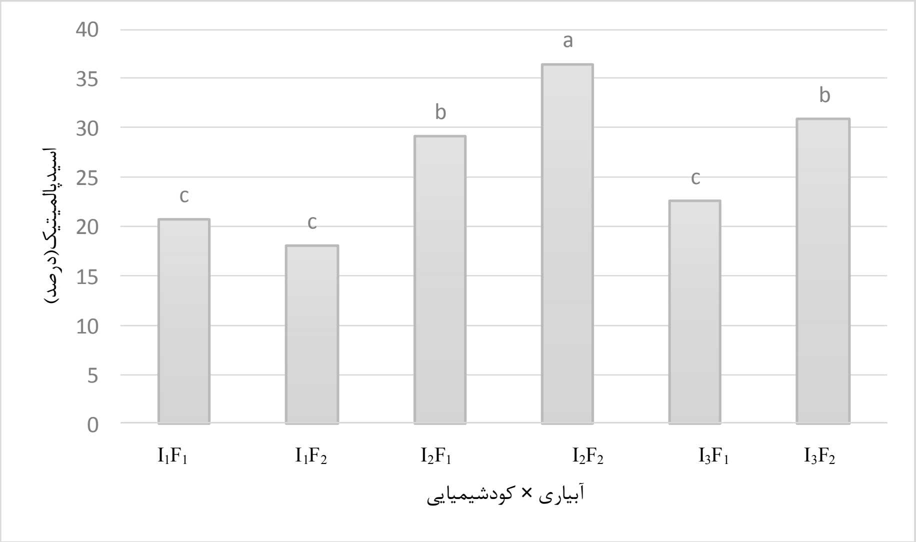



شکل۴-۲۹- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیدپالمیتیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

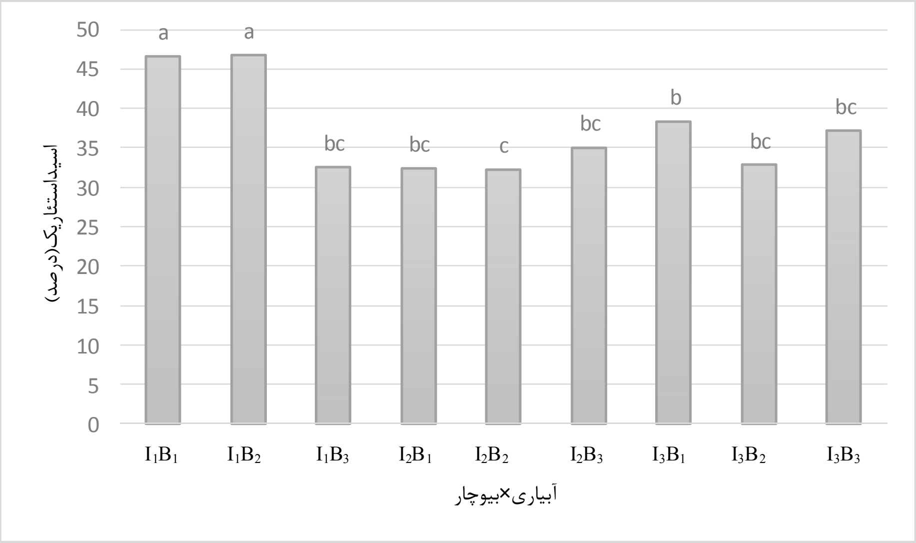



شکل۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی براسیدپالمیتیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

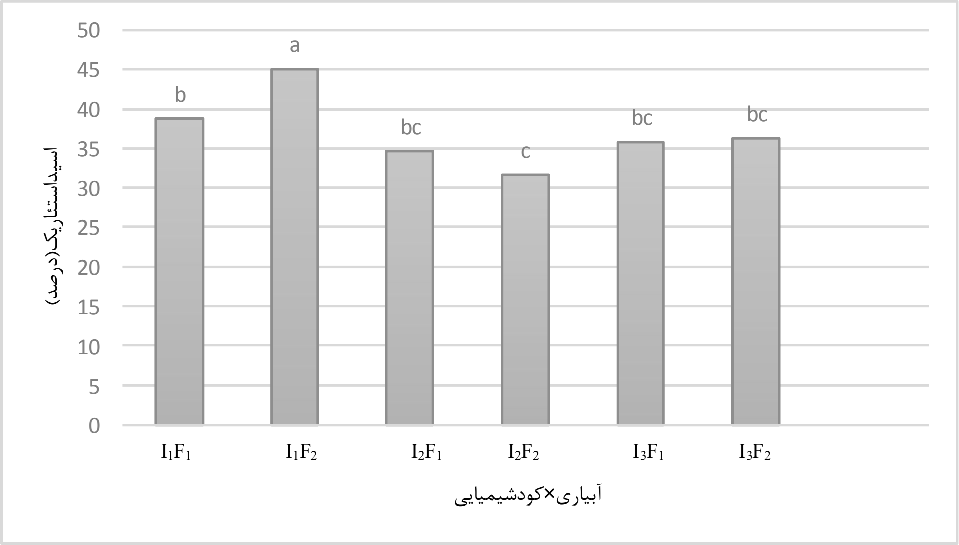



شکل۴-۳۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیداستئاریک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$ :۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$ :۲۰ تن در هکتار بیوچار

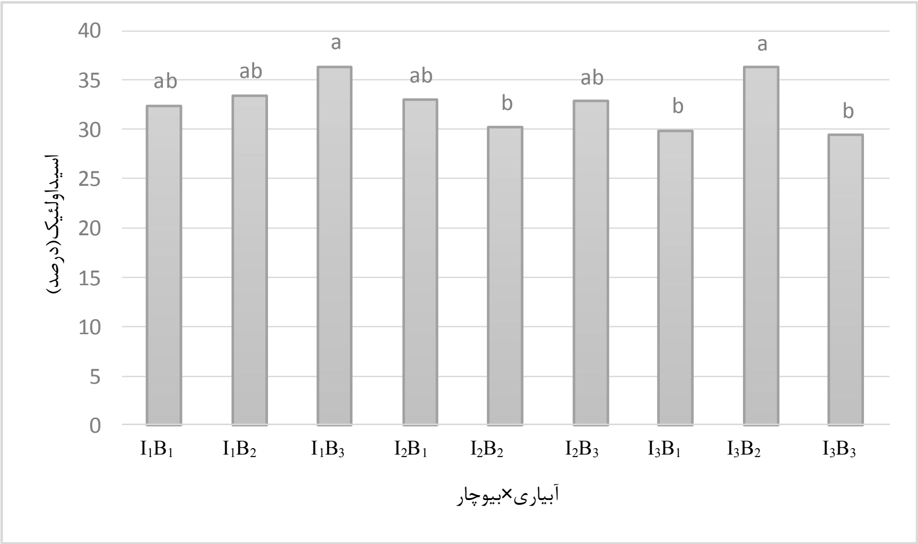



شکل۴-۳۲- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی براسیداستئاریک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی، $F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

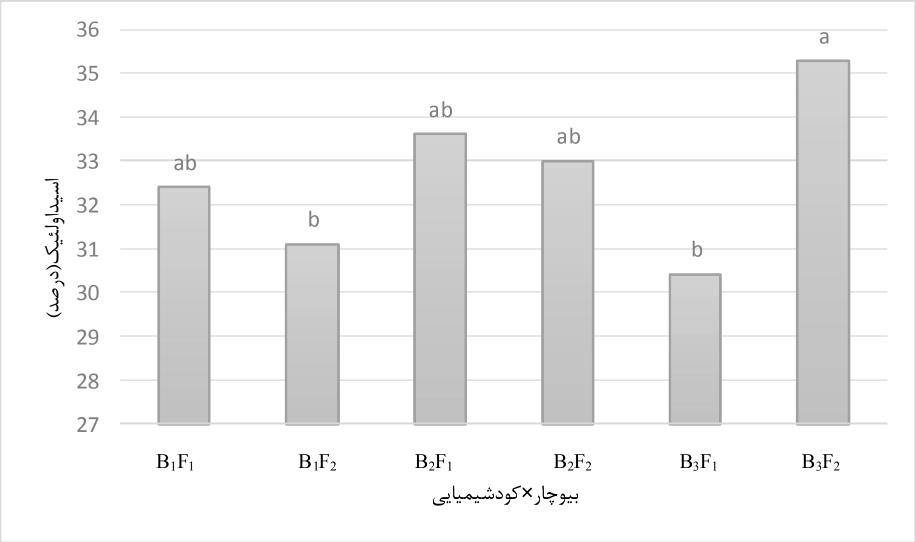



شکل۴-۳۳- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیداولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

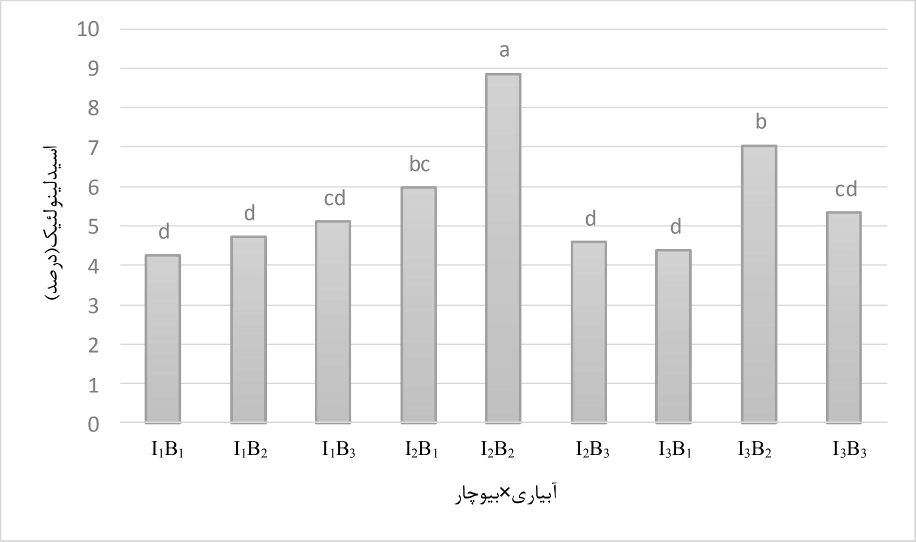



شکل۴-۳۴- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار × کودشیمیایی بردرصد اسید اولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰ تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

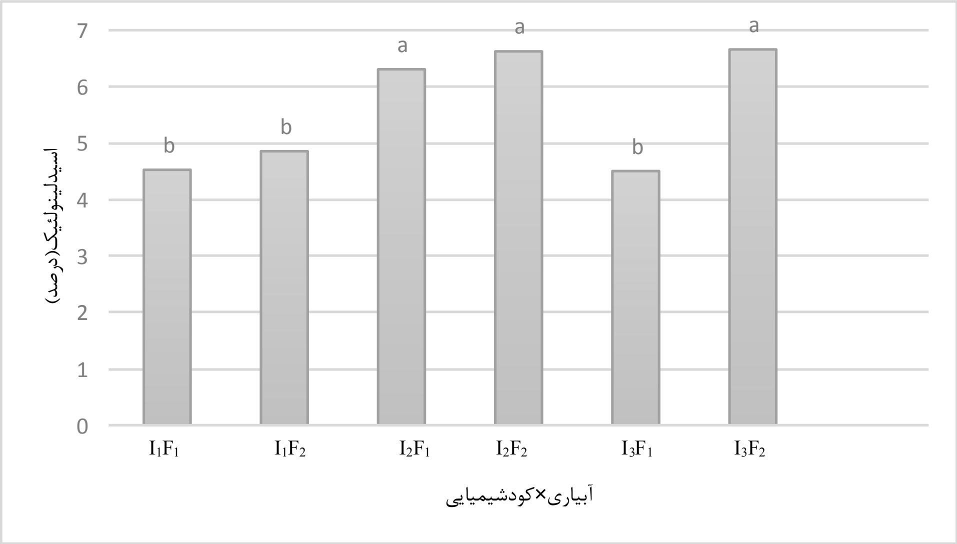



شکل۴-۳۵- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر درصد اسیدلینولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار




شکل۴-۳۶- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × کودشیمیایی براسیدلینولئیک سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

### ۴-۳-۲-۱۰- درصد اسانس

بر اساس جدول تجزیه واریانس داده‌ها تیمار آبیاری در هر دو سال بر درصد اسانس دانه سیاه دانه معنی‌دار شد (جدول۴-۳۸). کاربرد بیوچار در سال اول آزمایش تاثیر معنی‌داری بر درصد اسانس نداشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار شد. تاثیر کود شیمیایی نیز در هیچ یک از سال‌ها معنی‌دار نبود (جدول۴-۳۸). این نتایج مغایر با گزارشات حیدری و جهان‌تیغی (۱۳۹۱) بود که به افزایش اسانس سیاه دانه با کاربرد نیتروژن اشاره کردند.

اثرات متقابل آبیاری × بیوچار در هر دو سال معنی‌دار شد. در سال اول تیمار $I_3B_3$ (آبیاری براساس ۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) و در سال دوم تیمار $I_3B_3$ (آبیاری براساس ۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) و تیمار $I_2B_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار)

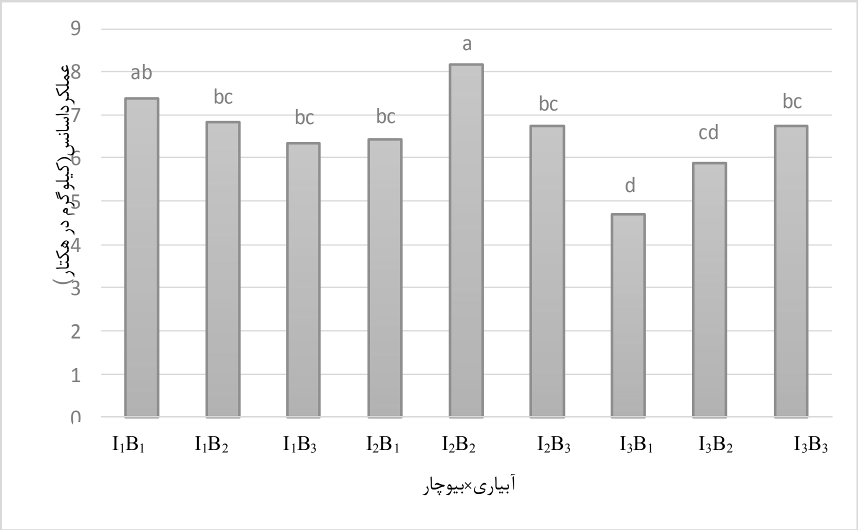
بیشترین تاثیر را بر درصد اسانس دانه داشتند (جدول۴-۴۰). پاندی و همکاران (۲۰۱۶) نیز با کاربرد بیوچار، افزایش اسانس در گیاه ریحان را مشاهده کردند. احمدیان و همکاران (۱۳۸۹) تاثیر بیشتر کودهای آلی را بر افزایش درصد اسانس گیاه بابونه (*Matricaria chamomilla*) گزارش کردند و به تاثیر بیشترکودهای آلی نسبت به کودهای شیمیایی در کاهش اثرات تنش خشکی اشاره کردند. حیدری و جهان‌تیغی (۱۳۹۱) نیز به افزایش درصد اسانس در تیمارهای تحت تنش در سیاه دانه اشاره کردند. سایمون و همکاران (۱۹۹۲) به افزایش میزان اسانس در برگ‌های ریحان (*Ocimum basilicum*) در شرایط تنش خشکی اشاره کردند. تشکیل و تجمع اسانس در گیاهان تحت شرایط محیطی خشک تمایل به افزایش نشان می‌دهد. بر اساس فرضیه موازنه رشد-تمایز هر کمبودی که رشد را بیش از فتوسنتز محدود کند، تولید و تجمع متابولیت های ثانویه را درگیاهان افزایش می دهد ( هرمز و ماتسون، ۱۹۹۲).

### ۴-۳-۲-۱۱- عملکرد اسانس

آبیاری در هیچ‌یک از سال‌ها بر عملکرد اسانس تاثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۴-۳۸). بیوچار در سال اول تاثیر معنی‌داری بر عملکرد اسانس نداشت ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار شد و تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار از کارایی بالاتری برخوردار بود (جدول‌های ۴-۳۸ و ۴-۳۹). کود شیمیایی نیز بر عملکرد اسانس تاثیر معنی‌داری نداشت. اثرات متقابل آبیاری × بیوچار در هر دو سال معنی‌دار شد و تیمار $I_2B_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) بیشترین تاثیر را بر عملکرد اسانس دانه داشت (جدول ۴-۴۰).

تجزیه مرکب داده‌ها تاثیر معنی‌دار سال بر عملکرد اسانس دانه را نشان داد (جدول ۴-۴۲). عملکرد اسانس در سال اول (۷/۱کیلوگرم در هکتار) بیشتر از سال دوم (۶/۱ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۴-۴۳). بالاتر بودن عملکرد اسانس در سال اول با عملکرد بیشتر دانه در این سال مرتبط بود. تاثیر آبیاری و

بیوچار بر عملکرد اسانس معنی‌دار بود ولی کود شیمیایی تاثیری بر عملکرد اسانس نداشت (جدول۴-۴۲). اثرات متقابل آبیاری × بیوچار معنی‌دار بود و تیمار $I_2B_2$ (آبیاری براساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) بیشترین تاثیر را بر عملکرد اسانس دانه داشت (شکل ۴-۳۷). تاثیر میزان متعادل بیوچار و آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی بر تحریک فتوسنتز و افزایش رشد گیاه در این تیمار می‌تواند دلیل افزایش عملکرد دانه و به تبع آن عملکرد اسانس در این تیمار باشد. کاهش عملکرد اسانس در نتیجه کاهش رطوبت خاک می‌تواند ناشی از اثر زیان‌آور تنش خشکی بر رشد و عملکرد پیکر رویشی گیاه باشد. احمدیان و همکاران (۱۳۸۹) نیز بیشترین عملکرد اسانس را در تیمارهای حاوی کود دامی مشاهده کردند.




شکل۴-۳۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× بیوچار بر عملکرد اسانس سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪است

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$:۲۰ تن در هکتار بیوچار

### ۴-۳-۲-۱۲- ترکیبات تشکیل دهنده اسانس

ترکیبات موجود در مواد موثره سیاه دانه به عوامل مختلفی نظیر رقم و شرایط محیطی بستگی دارد. در تجزیه اسانس با دستگاه کروماتوگرافی گازی با طیف سنج جرمی(GC-MAS) ترکیبات متفاوتی شناسایی شد که از فراوانترین آنها تیموکینون وپی‌سایمن بود (جدول۴-۴۴).

آبیاری در سال اول بر درصد تیموکینون و پی‌سایمن موثر بود ولی در سال دوم این تاثیر معنی‌دار نبود. بیوچار در سال دوم و تنها بر درصد تیموکینون دانه موثر بود. تاثیر کود شیمیایی نیز در هیچ یک از سال‌ها بر درصد مواد موثره معنی‌دار نبود (جدول ۴-۳۸). اثرات متقابل آبیاری × بیوچار در سال اول بر درصد تیموکینون موثر بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمارهای $I_1B_2$ (آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) و $I_1B_3$ (آبیاری براساس ۱۰۰درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار) بود (جدول۴-۴۰). چارلز و جولی (۱۹۹۰) به عدم تاثیر آبیاری بر موادموثره نعناع فلفلی ( *Mentha piperita*) اشاره کردند. حیدری و جهان‌تیغی (۱۳۹۱) افزایش درصد تیموکینون با افزایش تنش خشکی در سیاه دانه را گزارش کردند. با وجود افزایش درصد اسانس در تیمارهای آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی، درصد تیموکینون و پی‌سایمن در این تیمارها کاهش یافت که این موضوع بیانگر تاثیر تنش آبی بر کاهش کیفیت اسانس است. پتروپولوس و همکاران (۲۰۰۶) نیز به کاهش کیفیت اسانس علیرغم افزایش میزان اسانس در گیاه جعفری (*Petroselinum crispum*) اشاره کردند.

اثرات متقابل بیوچار × کودشیمیایی در هر دو سال برای تیموکینون و در سال دوم برای پی‌سایمن معنی‌دار شد (جدول ۴-۳۸) و بیشترین تاثیر در هر دو ماده موثره مربوط به تیمار $B_2F_2$ (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کودشیمیایی) بود (جدول۴-۴۱). این امر به‌دلیل تاثیر افزایشی کاربرد هم‌زمان بیوچار به-همراه کودشیمیایی بر ترکیبات تشکیل دهنده اسانس است. پاندی و همکاران (۲۰۱۶) نیز به تاثیر مثبت

کاربرد بیوچار به‌همراه کودشیمیایی بر افزایش کیفیت اسانس ریحان اشاره کرده و کاربرد تلفیقی بیوچار و کودشیمیایی را روشی مناسب برای دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار و کاهش مصرف کودهای شیمیایی عنوان کردند.

## ۴-۴- نتیجه‌گیری

با توجه به کمبود آب در کشور و اهمیت آن در تولید گیاهان دارویی نظیر سیاه دانه، اعمال روش‌های مدیریتی که با حداقل آبیاری عملکرد مناسبی تولید کند، ضروری به نظر می‌رسد. نتایج حاصل از مطالعات مرتبط با خاک حاکی از تاثیر بیشتر تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار بر خصوصیات خاک بود. نتایج نشان داد که تنش رطوبتی سبب کاهش عملکرد و اجزای عملکرد دانه و صفات کیفی گیاه سیاه دانه شد ولی بیوچار به‌دلیل دارا بودن ساختار متخلخل، سطح ویژه زیاد و بارهای منفی سطحی، سبب بهبود ویژگی‌های خاک و در نتیجه ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاه شد. کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار توانست اثرات تنش آبی را کاهش دهد. نتایج نشان داد که با مصرف بیوچار می‌توان میزان آب مصرفی را کاهش داده و آبیاری را بر اساس۷۰ درصد نیاز آبی گیاه انجام داد که این امر به افزایش راندمان مصرف آب نیز کمک می‌کند. کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار علیرغم تاثیر مثبت بر خصوصیات خاک در مقایسه با ۱۰ تن در هکتار بیوچار بر ویژگی‌های گیاه تاثیر کمتری داشت. بنابراین کاربرد مقادیر بیشتر آن در شرایط تنش رطوبتی به دلیل خاصیت جذبی بالای آن توصیه نمی‌شود. اثرات مثبت بیوچار بر روابط خاک، گیاه و آب موجب فتوسنتز بهتر گیاه و بهبود کارایی مصرف آب و نیتروژن و در نتیجه افزایش عملکرد و زیست‌توده گیاه گردید. با وجود تاثیر بیشتر بیوچار بر کربن آلی و عناصر غذایی خاک در سال اول، در سال دوم از میزان این عناصر در خاک کاسته شد (به‌دلیل کربن ناپایدار بالا، آبشویی و یا غیر متحرک شدن). درحالیکه تاثیر بیوچار بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه بیشتر در سال دوم نمایان شد.

علیرغم این تاثیر بهینه، بدلیل افزایش هدایت الکتریکی خاک و کاهش کربن آلی و عناصر غذایی خاک در سال دوم عملکردهای کمی و کیفی گیاه کمتر از سال اول آزمایش بود. همچنین کاربرد بیوچار به‌همراه کودشیمیایی از تاثیر بیشتری نسبت به کاربرد هریک از این تیمارها به‌تنهایی برخوردار بود. این امر با توانایی بیوچار در حفظ و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی آنها مرتبط بود. تیمار $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار+ مصرف کودشیمیایی) بیشترین تاثیر را بر اکثر صفات کمی و کیفی سیاه دانه داشت.

به‌این ترتیب مصرف مقدار متعادلی از بیوچار به همراه کودشیمیایی در شرایط خشک و نیمه خشک برای صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش اثرات تنش خشکی توصیه می‌شود.

### ۴-۵- پیشنهادات

بر اساس نتایج به‌دست آمده، برخی پیشنهادات مرتبط با این آزمایش ارائه می‌گردد:

۱- انجام سایر مطالعات مرتبط با حفظ حاصلخیزی خاک از طریق جایگزینی کودهای شیمیایی با کودهای آلی و بیولوژیک با تاکید بر حفظ محیط‌زیست در رابطه با سیاه دانه و سایر گیاهان دارویی توصیه می‌شود.

۲- با توجه به نادر بودن آزمایشات مرتبط با تاثیر بیوچار بر گیاهان دارویی و بویژه موادموثره آنها، بررسی تاثیر بیوچار بر سایر گیاهان دارویی در شرایط خشک و نیمه خشک توصیه می‌شود.

۳- به‌منظور بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها، استفاده از مواد اولیه با میزان عناصر غذایی بالا در تهیه بیوچار توصیه می‌شود

۴- استفاده از کاه و کلش موجود در مزارع در تهیه بیوچار و بررسی نتایج حاصل از آن بر رشد سیاه دانه

۵- ارزیابی اثرات طولانی‌مدت بیوچار بر خصوصیات خاک و رشد گیاهان دارویی

۶- به‌منظور بررسی بهتر روابط بیوچار، خاک و گیاه استفاده از چند نوع بیوچار با دماهای متفاوت تهیه آنها توصیه می‌شود.

۷- ارزیابی مقادیر مناسب بیوچار مورد نیاز برای دستیابی به عملکرد بهینه در گیاهان دارویی با تاکید بر کاهش مقدار بیوچار مورد استفاده و کاهش هزینه‌های تولید آن.

۸- بـا توجه به نتایج متفاوت بیـــوچار در خاک‌های مختلف، بررسی اثرات بیـــوچار در سایر خاک‌های مزارع ایران و نـیز اعماق متفاوت خاک پیشنهاد مـــی‌شود.

# ۵-پیوست

جدول ۴-۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه ازادی | pH | | هدایت الکتریکی | | درصد رطوبت اشباع خاک | | کربن الی | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| بلوک | ۲ | ۰/۰۱۹ ns | ۰/۰۱۷ ns | ۰/۰۱۴ ns | ۰/۲۵ ns | ۲۰/۷ ns | ۳/۴ ns | ۰/۵۱ ns | ۰/۰۷ ns |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۱ ns | ۰/۱۱۱ ns | ۰/۰۲۱ ns | ۰/۰۶ ns | ۰/۹۳ ns | ۱/۴۵ ns | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۱ ns |
| خطای اصلی | ۴ | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۹ | ۱۲/۱۴ | ۰/۳۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۵ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۰۸ ns | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۵۷** | ۰/۰۱ ns | ۶/۰۹* | ۱/۴۲* | ۰/۰۸* | ۰/۰۷ ** |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۸ ns | ۰/۰۰۴ ns | ۰/۰۴۱** | ۰/۰۴* | ۳/۱۴ ns | ۰/۶۹ ns | ۰/۰۱ ns | ۰/۰۱ ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۳۶** | ۰/۰۰۸* | ۰/۰۰۰۲ ns | ۰/۰۸* | ۱/۶۸ ns | ۰/۱ ns | ۰/۰۴ ns | ۰/۰۷* |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۲۸ ** | ۰/۰۰۰۶ ns | ۰/۰۰۳ ns | ۰/۰۳ ns | ۲/۹۵ ns | ۰/۴ ns | ۰/۰۲ ns | ۰/۰۲ ns |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۹ ns | ۰/۰۰۳ ns | ۰/۰۲۳* | ۰/۰۳ ns | ۱/۰۹ ns | ۰/۸۵ ns | ۰/۰۰۷ ns | ۰/۰۱ ns |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۲ ns | ۰/۰۰۲ ns | ۰/۰۱۶ * | ۰/۰۵ ** | ۰/۱۹ ns | ۱/۵** | ۰/۰۴ | ۰/۰۱ ns |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۱ | ۱/۹۵ | ۰/۲۸ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۰/۷۳ | ۰/۵۳ | ۸/۸ | ۹/۱۳ | ۳/۵ | ۱/۳۷ | ۱۷/۹ | ۱۹/۳ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۴-۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | نیتروژن کل | | پتاسیم | | فسفرقابل دسترس | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| بلوک | ۲ | ۰/۰۰۵۰ ns | ۰/۰۰۰۵۸ ns | ۱۷۱۷ ns | ۱۴۶۷ ns | ۲/۳ ns | ۲۶/۲ ns |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۰۷۲ ns | ۹۴۰ ns | ۲۰۵۶ ** | ۹/۳* | ۳۷/۶* |
| خطای اصلی | ۴ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۰۲۱ | ۳۷۰ | ۲۰۷ | ۱/۱ | ۶/۷ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۷ * | ۰/۰۰۰۷۶* | ۲۲۵۳** | ۱۴۴۴ ** | ۲/۱ * | ۴/۷ ns |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۰۲۳ ns | ۱۲۷۵ * | ۱۲۱۴ ** | ۲۲/۱ ** | ۱۵/۷* |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۳ ns | ۰/۰۰۰۰۶ ns | ۱۶/۶ ns | ۱۶۶۶ ** | ۷۵/۱* | ۳۲۰/۲ ** |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۰۰۸ ns | ۵۱۶ ns | ۵۹/۷ ns | ۶/۱ ** | ۵/۶ ns |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۶ ns | ۰/۰۰۰۲۱ ns | ۶۳۴ ns | ۱۰۴ ns | ۱/۹ ns | ۳/۲ ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۳ ns | ۰/۰۰۰۱۸ ns | ۵۵۱ ns | ۹۷/۲ ns | ۱۵/۱ ** | ۱۷/۱ * |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۰۱۵ | ۳۲۲ | ۱۷۹ | ۰/۷ | ۵/۱ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱۹/۱ | ۲۳/۵ | ۱۱/۸ | ۹/۹ | ۶/۰۱ | ۲۱/۹ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۲- مقایسه میانگین اثر ساده بیوچار و کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| فاکتور | سطوح | pH | | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) | | درصد رطوبت اشباع خاک (درصد) | | کربن آلی (درصد) | | نیتروژن کل (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بیوچار (تن در هکتار) | ۰($B_1$) | ۷/۷a | ۷/۹ a | ۰/۸۷۸b | ۱/۲a | ۳۹/۳۹b | ۳۸/۷۲ b | ۰/۷۷b | ۰/۵۰۲ b | ۰/۰۷۶b | ۰/۰۵b |
| | ۱۰($B_2$) | ۷/۸a | ۷/۹ a | ۰/۸۹۹b | ۱/۲۶a | ۳۹/۷۸ab | ۳۹/۰۸ab | ۰/۸۱ab | ۰/۵۰۳ b | ۰/۰۸ab | ۰/۰۴ b |
| | ۲۰($B_3$) | ۷/۷a | ۷/۹ a | ۰/۹۸۵a | ۱/۲۱a | ۴۰/۵۳a | ۳۹/۲۷a | ۰/۹ a | ۰/۶۱۳a | ۰/۰۸۹a | ۰/۰۶a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود ($F_1$) | ۷/۸a | ۷/۹a | ۰/۹۱ a | ۱/۱۸ b | ۴۰/۰۷a | ۳۹/۰۷a | ۰/۸۵ a | ۰/۵۷ a | ۰/۰۸ a | ۰/۰۵ a |
| | با مصرف کود ($F_2$) | ۷/۷b | ۷/۸b | ۰/۹۲ a | ۱/۲۶ a | ۳۹/۷۲a | ۳۸/۹۸a | ۰/۸۰a | ۰/۵۰ b | ۰/۰۷a | ۰/۰۵ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۲- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| فاکتور | سطوح | پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | فسفرقابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۱۵۸/۸a | ۱۴۶/۹a | ۱۴/۶ a | ۱۱/۹ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۱۵۲/۲a | ۱۲۹/۱b | ۱۳/۲ b | ۹/۴ b |
| | ۴۰($I_3$) | ۱۴۴/۴a | ۱۲۷/۷b | ۱۴/۱ ab | ۹/۳ b |
| بیوچار (تن در هکتار) | ۰($B_1$) | ۱۴۳/۰۵b | ۱۲۶/۳b | ۱۳/۶۲b | ۱۰/۰۷a |
| | ۱۰($B_2$) | ۱۴۸/۰۵b | ۱۳۳/۳b | ۱۴/۳۲a | ۹/۸۷ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۱۶۴/۴ a | ۱۴۴/۱ a | ۱۴/۰۱ab | ۱۰/۸۴a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود ($F_1$) | ۱۵۱/۲ a | ۱۲۹/۱ b | ۱۲/۸ b | ۷/۸ b |
| | با مصرف کود ($F_2$) | ۱۵۲/۴a | ۱۴۰/۱a | ۱۵/۱ a | ۱۲/۷ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۳الف- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | کود شیمیایی | pH | | فسفرقابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی($I_1$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$ ) | ۷/۷۶ bc | ۷/۹۶ a | ۱۴ b | ۹/۴a |
| | باکودشیمیایی($F_2$ ) | ۷/۷۹ bc | ۷/۹۵a | ۱۵/۲ab | ۱۴/۴a |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۷/۸۰ b | ۷/۸۳a | ۱۲/۱c | ۶/۵a |
| | باکودشیمیایی($F_2$ ) | ۷/۷۶ c | ۷/۷۹a | ۱۴/۳b | ۱۲/۴a |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$ ) | ۷/۸۹ a | ۷/۹۵a | ۱۲/۳ c | ۷/۵a |
| | باکودشیمیایی($F_2$ ) | ۷/۷۵ c | ۷/۹۳a | ۱۵/۹ a | ۱۱/۲a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۳ب- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×بیوچار بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | بیوچار | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) | | پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | فرقابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی($I_1$) | $B_1$ | ۰/۸۸c | ۱/۱ cd | ۱۴۵bcd | ۱۲۳ cd | ۱۳cd | ۹/۷bc |
| | $B_2$ | ۰/۸۷c | ۱/۱d | ۱۵۶abc | ۱۴۹ ab | ۱۶/۱a | ۱۳/۱ a |
| | $B_3$ | ۰/۹۹b | ۱/۲bcd | ۱۷۵a | ۱۶۸ a | ۱۴/۱bc | ۱۲/۹ a |
| ۷۰درصد نیاز آبی($I_2$) | $B_1$ | ۰/۸۹c | ۱/۲ abc | ۱۲۲ d | ۱۲۰d | ۱۱/۳e | ۱۰/۵ab |
| | $B_2$ | ۰/۹۱bc | ۱/۳a | ۱۴۴ cd | ۱۲۶ cd | ۱۳/۳cd | ۷/۸ c |
| | $B_3$ | ۰/۸۵c | ۱/۱cd | ۱۶۶ ab | ۱۴۰ b | ۱۴/۹b | ۱۰ bc |
| ۴۰درصد نیاز آبی($I_3$) | $B_1$ | ۰/۸۵ c | ۱/۱ bcd | ۱۶۱abc | ۱۳۵ bc | ۱۶a | ۹/۸ bc |
| | $B_2$ | ۰/۹bc | ۱/۳ab | ۱۴۳ cd | ۱۲۴ cd | ۱۳/۴cd | ۸/۶ bc |
| | $B_3$ | ۱/۱۱a | ۱/۲ abc | ۱۵۱ bc | ۱۲۴ cd | ۱۲/۹d | ۹/۶ bc |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی
$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

جدول۴-۴-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری× بیوچار×کودشیمیایی بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | تیمار کودی | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) ۹۵-۱۳۹۴ | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) ۹۶-۱۳۹۵ | درصد اشباع خاک (درصد) ۹۵-۱۳۹۴ | درصد اشباع خاک (درصد) ۹۶-۱۳۹۵ | فسفرقابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) ۹۵-۱۳۹۴ | فسفرقابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) ۹۶-۱۳۹۵ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰درصد نیاز آبی($I_1$) | $B_1F_1$ | ۰/۸۶ de | ۱/۱def | ۳۸/۶ a | ۳۹/۷ab | ۱۴/۲cde | ۶/۵h |
| | $B_1F_2$ | ۰/۹ cde | ۱/۲ bcde | ۳۸/۵۹a | ۳۸/۶ cde | ۱۲/۸۷efgh | ۱۳abcd |
| | $B_2F_1$ | ۰/۹۲bcde | ۱/۱def | ۳۹/۷۴a | ۳۹/۶ ab | ۱۴/۶cd | ۹/۶defgh |
| | $B_2F_2$ | ۰/۸۳ de | ۱/۰۹ ef | ۴۰/۰۵a | ۳۹/۱abcd | ۱۷/۷b | ۱۶/۶ a |
| | $B_3F_1$ | ۰/۹۴ bcd | ۱/۰۱f | ۴۱/۱۸a | ۳۹/۲abcd | ۱۳/۲defgh | ۱۲cdef |
| | $B_3F_2$ | ۱/۰۴ b | ۱/۴ ab | ۴۰/۵a | ۳۹/۶ ab | ۱۵/۱c | ۱۳/۸ abc |
| ۷۰درصد نیاز آبی($I_2$) | $B_1F_1$ | ۰/۸۸cde | ۱/۳ ab | ۴۰/۶۵a | ۳۷/۶۷ f | ۱۰/۵۳i | ۶/۳ h |
| | $B_1F_2$ | ۰/۹ cde | ۱/۱۲ cdef | ۳۹/۳۸a | ۳۹/۲۹abcd | ۱۲/۱۷h | ۱۴/۸ ab |
| | $B_2F_1$ | ۰/۹۴ bcd | ۱/۲۸ abcd | ۳۹/۲۴a | ۳۹/۰۶abcd | ۱۳/۰۷efgh | ۷ gh |
| | $B_2F_2$ | ۰/۸۹ cde | ۱/۴۵ a | ۳۸/۶۱a | ۳۸/۴۸cdef | ۱۳/۶ defg | ۸/۶ fgh |
| | $B_3F_1$ | ۰/۸۸ cde | ۱/۱۲ cdef | ۴۱/۲۵a | ۳۹/۹۴ a | ۱۲/۶ fgh | ۶/۲ h |
| | $B_3F_2$ | ۰/۸۲ de | ۱/۲۳ bcde | ۳۹/۴۳a | ۳۹/۳۶abc | ۱۷/۲b | ۱۳/۷ abc |
| ۴۰درصد نیاز آبی($I_3$) | $B_1F_1$ | ۰/۹۱bcde | ۱/۱۴ cdef | ۳۹/۱۳a | ۳۸/۱۵ ef | ۱۲/۲۷gh | ۸/۸ efgh |
| | $B_1F_2$ | ۰/۸ e | ۱/۲۴ bcde | ۴۰/۰۴a | ۳۸/۸۵bcde | ۱۹/۷۳a | ۱۰/۸cdef |
| | $B_2F_1$ | ۰/۹۱bcde | ۱/۳abc | ۴۰/۳۹a | ۳۹/۱۱abcd | ۱۲/۸۷efgh | ۷ gh |
| | $B_2F_2$ | ۰/۸۹ cde | ۱/۳۵ab | ۴۰/۶۵a | ۳۹/۰۳bcd | ۱۴ cdef | ۱۰/۳cdefg |
| | $B_3F_1$ | ۱ bc | ۱/۲۶abcde | ۴۰/۵۵a | ۳۹/۰۴bcd | ۱۱/۹۳hi | ۶/۸ gh |
| | $B_3F_2$ | ۱/۲۱ a | ۱/۲۶abcde | ۴۰/۳۲a | ۳۸/۴۵ def | ۱۴ cdef | ۱۲/۴bcde |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ : با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | pH | هدایت الکتریکی | درصدرطوبت اشباع خاک | کربن آلی |
|---|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۰/۳۲* | ۲/۵۴ * | ۲۰/۷ ns | ۲/۲۷ * |
| بلوک(سال) | ۴ | ۰/۰۱ | ۰/۱۳ | ۱۲/۱۲ | ۰/۲۹ |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۷ ns | ۰/۰۴ ns | ۰/۳۱ ns | ۰/۰۰۷ns |
| سال×آبیاری | ۲ | ۰/۰۵ ns | ۰/۰۴ ns | ۲/۰۷ ns | ۰/۰۰۵ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۰/۰۳ | ۰/۰۵ | ۶/۲۳ | ۰/۰۴ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۱ns | ۰/۰۳ * | ۶/۵۲ * | ۰/۱۵** |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۳** | ۰/۰۴ * | ۱/۳ ns | ۰/۱۱ * |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۴ns | ۰/۰۶** | ۲/۰۱ ns | ۰/۰۰۳ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۱** | ۰/۰۲ns | ۱/۱۹ ns | ۰/۰۴ns |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۱ns | ۰/۰۴** | ۱/۲۴ ns | ۰/۰۰۷ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۲ns | ۰/۰۲ * | ۰/۷۷ ns | ۰/۰۲ns |
| سال×بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۰۴ns | ۰/۰۴ * | ۰/۹۹ ns | ۰/۰۰۲ns |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۴ns | ۰/۰۲ * | ۰/۴۷ ns | ۰/۰۰۲ns |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۸* | ۰/۰۱ns | ۱/۸۲ ns | ۰/۰۳ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۱* | ۰/۰۱ns | ۲/۱۶ ns | ۰/۰۰۰۱ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۳ns | ۰/۰۰۵ns | ۰/۶۹ ns | ۰/۰۱ns |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۲ns | ۰/۰۴** | ۰/۹۳ns | ۰/۰۳ns |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۱ | ۱/۱۲ | ۰/۰۱ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۰/۰۷۲ | ۱۰/۵ | ۲/۶۸ | ۱۸/۷ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۴-۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | نیتروژن کل | پتاسیم | فسفرقابل دسترس |
|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | * ۰/۰۲ | * ۸۰۰۸/۳ | **۳۷۴/۰۸ |
| بلوک(سال) | ۴ | ۰/۰۰۲ | ۱۵۹۲/۱ | ۱۴/۳ |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۰۰۴ns | ** ۲۶۱۹/۶ | ** ۳۷/۴ |
| سال×آبیاری | ۲ | ۰/۰۰۰۲ns | ۳۷۷/۰۸ns | ۹/۵ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۰/۰۰۰۲ | ۲۸۹ | ۳/۹ |
| بیوچار | ۲ | **۰/۰۰۱ | **۳۶۲۶/۶ | ۳/۰۲ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۰۰۵ns | * ۱۰۰۸/۳ | **۳۵۲/۸ |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۰۰۸ns | ** ۲۱۴۷/۴ | ** ۲۴/۳ |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۱ns | ۴۴۲/۳ns | ۱/۹۱ns |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۱ns | ۲۹۶/۵ns | ۴/۵ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۰۳ns | ۵۱۳/۸ns | ۱۴/۳ns |
| سال×بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۰۰۷ns | ۷۱/۵ns | ۳/۸ns |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۰۳ns | ۶۷۵ ns | ۴۲/۵ns |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۰۳ns | ۳۴۲/۳ns | ۱۳/۵ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۰۶ns | ۱۳۴/۰۲ns | ۹/۷ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۱ns | ۴۴۲/۳ns | ۰/۵۵ns |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۰۲ns | ۱۳۴/۷ns | ۱۷/۸ns |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۰/۰۰۰۲ | ۲۵۱/۱ | ۲/۸ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۲۱/۰۲ | ۱۱/۰۶ | ۱۴/۰۱ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۶- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات خاک حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| فاکتور | سطوح | pH | هدایت الکتریکی (دسی-زیمنس بر متر) | درصد رطوبت اشباع خاک (درصد) | کربن آلی (درصد) | نیتروژن کل (درصد) | فسفرقابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سال | اول | ۷/۷۹ b | ۰/۹۲ b | ۳۹/۹ a | ۰/۸۳ a | ۰/۰۸ a | ۱۳/۹ a | ۱۵۱ a |
| | دوم | ۷/۹ a | ۱/۲۲ a | ۳۹/۱ a | ۰/۵۳ b | ۰/۰۵ b | ۱۰/۲ b | ۱۳۴ b |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۷/۸ a | ۱/۰۳ a | ۳۹/۵ a | ۰/۶۸ a | ۰/۰۶ a | ۱۳/۲ a | ۱۵۲ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۷/۸ a | ۱/۰۷ a | ۳۹/۳ a | ۰/۷ a | ۰/۰۷ a | ۱۱/۳ b | ۱۳۶ b |
| | ۴۰($I_3$) | ۷/۸ a | ۱/۱ a | ۳۹/۴a | ۰/۶۷ a | ۰/۰۶ a | ۱۱/۷ b | ۱۴۰ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۷/۸ a | ۱/۰۴ b | ۳۹/۰۵ b | ۰/۶۳ b | ۰/۰۶ b | ۱۱/۸ a | ۱۳۴ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۷/۸ a | ۱/۰۸ab | ۳۹/۴ab | ۰/۶۵ b | ۰/۰۶ b | ۱۲/۱ a | ۱۴۰ b |
| | ۲۰($B_3$) | ۷/۸ a | ۱/۱ a | ۳۹/۹ a | ۰/۷۵ a | ۰/۰۷ a | ۱۲/۴ a | ۱۵۴ a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم درهکتار) | بدون کود ($F_1$) | ۷/۸ a | ۱/۰۵ b | ۳۹/۵ a | ۰/۷۱ a | ۰/۰۶ a | ۱۰/۳ b | ۱۴۰ b |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۷/۸ b | ۱/۰۹ a | ۳۹/۳ a | ۰/۶۵ b | ۰/۰۶ a | ۱۳/۹ a | ۱۴۶ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۷- ضرایب همبستگی ساده صفات مرتبط با خاک، عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه

| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱-ارتفاع بوته | ۱ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۲-تعداد شاخه‌فرعی | ۰/۶۴** | ۱ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۳-تعدادفولیکول | ۰/۵۳** | ۰/۹۲** | ۱ | | | | | | | | | | | | | | | |
| ۴-تعداددانه‌دربوته | ۰/۴۰** | ۰/۸۱** | ۰/۸۷** | ۱ | | | | | | | | | | | | | | |
| ۵-وزن‌دانه‌دربوته | ۰/۴۰** | ۰/۷۸** | ۰/۸۳** | ۰/۹۳** | ۱ | | | | | | | | | | | | | |
| ۶-وزن‌هزاردانه | ۰/۱۵ ns | ۰/۲۸** | ۰/۲۴* | ۰/۲۴* | ۰/۲۰* | ۱ | | | | | | | | | | | | |
| ۷-عملکرددانه | ۰/۴۹** | ۰/۴۸** | ۰/۴۸** | ۰/۵۶** | ۰/۵۸** | ۰/۰۸ns | ۱ | | | | | | | | | | | |
| ۸-عملکردبیولوژیک | ۰/۷۳** | ۰/۶۶** | ۰/۵۵** | ۰/۵۱** | ۰/۴۹** | ۰/۲۲* | ۰/۶۵** | ۱ | | | | | | | | | | |
| ۹-شاخص‌برداشت | -۰/۳۶** | -۰/۳۲** | -۰/۲۲* | -۰/۰۸ns | -۰/۰۲ns | -۰/۲۱* | ۰/۲۳* | -۰/۵۲** | ۱ | | | | | | | | | |
| ۱۰-pH | -۰/۱۹* | -۰/۴۶** | -۰/۵۰** | -۰/۴۷** | -۰/۴۸** | -۰/۱۱ns | -۰/۳۰** | -۰/۳۱** | ۰/۱۱ ns | ۱ | | | | | | | | |
| ۱۱-هدایت‌الکتریکی | -۰/۰۹ ns | -۰/۴۴** | -۰/۵۵** | -۰/۵۵** | -۰/۵۶** | -۰/۰۴ns | -۰/۲۱* | -۰/۲۱* | ۰/۰۵ ns | ۰/۲۰* | ۱ | | | | | | | |
| ۱۲-درصدرطوبت‌اشباع | ۰/۱۵ ns | ۰/۱۱ ns | ۰/۱۰ ns | ۰/۰۲ ns | ۰/۱۳ ns | ۰/۱۵ns | ۰/۱ ns | ۰/۱۵ ns | -۰/۰۴ ns | -۰/۰۹ ns | -۰/۱۹* | ۱ | | | | | | |
| ۱۳-کربن‌آلی | ۰/۱۹ ns | ۰/۳۷** | ۰/۴۰** | ۰/۳۷** | ۰/۴۲** | ۰/۰۴ns | ۰/۲۹** | ۰/۲۷** | -۰/۰۰۴ ns | -۰/۳۵** | -۰/۳۴** | ۰/۶۱** | ۱ | | | | | |
| ۱۴-درصد نیتروژن | ۰/۲۳ ns | ۰/۴۰** | ۰/۴۲** | ۰/۳۸** | ۰/۴۲** | ۰/۰۷ns | ۰/۲۶** | ۰/۳۴** | -۰/۱۲ ns | -۰/۴۲** | -۰/۳۴** | ۰/۵۷** | ۰/۹۳** | ۱ | | | | |
| ۱۵-فسفرقابل‌دسترس | ۰/۴۳** | ۰/۵۸** | ۰/۵۹** | ۰/۴۱** | ۰/۴۱** | ۰/۲۲* | ۰/۱۲ ns | ۰/۴۲** | -۰/۴۵** | -۰/۳۳** | -۰/۴۰** | ۰/۱۳ ns | ۰/۲۲* | ۰/۳۲** | ۱ | | | |
| ۱۶-پتاسیم | ۰/۲۹** | ۰/۳۸** | ۰/۳۶** | ۰/۲۱* | ۰/۲۳* | ۰/۱۸* | ۰/۰۴ ns | ۰/۱۹* | -۰/۲۶** | -۰/۲۴** | -۰/۲۲* | ۰/۳۴** | ۰/۳۹** | ۰/۴۳** | ۰/۶۰** | ۱ | | |
| ۱۷-کربن‌بیوماس‌میکروبی | ۰/۰۰۸ ns | ۰/۰۳ ns | ۰/۰۶ ns | ۰/۰۴ ns | ۰/۰۱ ns | ۰/۰۴ns | -۰/۰۹ ns | -۰/۰۵ns | -۰/۰۵ ns | -۰/۰۶ ns | ۰/۰۴ ns | -۰/۰۰۷ns | ۰/۰۷ns | ۰/۰۳ns | ۰/۱۴ns | ۰/۳۰** | ۱ | |
| ۱۸-تنفس‌میکروبی | -۰/۰۱ ns | ۰/۳۸** | ۰/۵۱** | ۰/۴۷** | ۰/۵۰** | ۰/۱ | ۰/۱۳ ns | ۰/۱۵ ns | -۰/۱۳ ns | -۰/۴۵** | -۰/۵۴** | ۰/۳** | ۰/۵۴** | ۰/۵۶** | ۰/۴۲** | ۰/۳۶** | -۰/۰۲ns | ۱ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۴-۸- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات بیولوژیکی خاک در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه ازادی | تنفس میکروبی | | کربن زیست توده‌ی میکروبی | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۷۱/۳ ns | ۲۹۱/۴ ns | ۲۳۴/۲ ns | ۱۱۱/۲ ns |
| آبیاری | ۲ | ۱۴۶۰/۶** | ۱۱۸۸/۳ * | ۳۲/۹ ns | ۲۵/۲ ns |
| خطای اصلی | ۴ | ۱۱۴/۶ | ۱۶۴/۸ | ۸۱/۳ | ۹/۲۴ |
| بیوچار | ۲ | ۱۶۵۷/۲** | ۳۲۹/۵ * | ۶۶/۱ ns | ۱۳/۴ ns |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۳۹۵/۴ ** | ۸۹۱/۴ ** | ۸۹/۸ * | ۲۱/۸ ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۹ ns | ۰/۸۴ ns | ۶۳/۴ ns | ۸/۹ ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۹۸۲/۳ ** | ۹۶/۸ ns | ۱۷/۵ ns | ۲/۱۴ ns |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۳۸/۹۵ ns | ۱۸۰/۱ ns | ۵۳/۲ ns | ۲۴/۶ ns |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۸۹/۴۶ ns | ۴۷۲/۵ ns | ۱۵۱/۵ ** | ۲۵/۵ ns |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۹۲/۶۶ | ۱۳۴/۵ | ۳۶/۸ | ۱۱/۱۷ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۷/۸ | ۱۴/۲۵ | ۱۶/۵ | ۹/۴ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۹- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری و بیوچار بر خصوصیات بیولوژیکی خاک در سال اول و دوم آزمایش

| فاکتور | سطوح | تنفس میکروبی (میلی‌گرم کربن دریک گرم خاک در روز) | | کربن زیست توده‌ی میکروبی (میلی‌گرم کربن در صد گرم خاک) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۱۱۸/۹b | ۷۲/۰۴b | ۳۷/۱ a | ۳۶/۵ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۱۱۷/۲ b | ۸۷/۱۲a | ۳۷/۸ a | ۳۴/۲ a |
| | ۴۰($I_3$) | ۱۳۳/۶ a | ۸۴/۷۰ a | ۳۵/۲ a | ۳۴/۹ a |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۱۱۳/۹c | ۷۹/۳ a | ۳۷/۴ a | ۳۴/۶ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۱۲۴/۸b | ۸۶/۲a | ۳۴/۵ a | ۳۴/۹ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۱۳۲ a | ۷۸/۴ a | ۳۸/۲ a | ۳۶/۲ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

جدول۴-۱۰ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×بیوچار بر خصوصیات خاک در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | بیوچار | تنفس میکروبی (میلی‌گرم کربن دریک گرم خاک در روز) | | کربن زیست توده‌ی میکروبی (میلی‌گرم کربن در صد گرم خاک) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی($I_1$) | $B_1$ | ۱۱۲ ef | ۶۸/۷ de | ۳۴/۱۵cd | ۳۳/۶a |
| | $B_2$ | ۱۲۵bc | ۸۱/۶ bcd | ۳۵/۶۲bcd | ۳۷/۱a |
| | $B_3$ | ۱۱۹ cde | ۶۵/۷ e | ۴۱/۵۴a | ۳۸/۹a |
| ۷۰درصد نیاز آبی($I_2$) | $B_1$ | ۱۰۱f | ۷۴/۱ cde | ۳۹/۵۷ab | ۳۳/۸a |
| | $B_2$ | ۱۱۳de | ۱۰۱/۳ a | ۳۸/۲۵abc | ۳۳/۹a |
| | $B_3$ | ۱۳۶ ab | ۸۵/۸ bc | ۳۵/۹۹bcd | ۳۵/۱a |
| ۴۰درصد نیاز آبی($I_3$) | $B_1$ | ۱۲۴bcd | ۹۵/۱ ab | ۳۶/۸۹abc | ۳۶/۳a |
| | $B_2$ | ۱۳۵ab | ۷۵/۷ cde | ۳۱/۰۳d | ۳۳/۸a |
| | $B_3$ | ۱۴۰a | ۸۳/۵ bc | ۳۷/۳۲abc | ۳۴/۷a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی
$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

جدول ۴-۱۱- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات بیولوژیکی خاک در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | تنفس میکروبی | کربن زیست توده‌ی میکروبی |
|---|---|---|---|
| سال | ۱ | **۴۷۰۸۰ | ۵۶/۷۶ns |
| بلوک(سال) | ۴ | ۱۶۴/۶ns | ۱۷۲/۷ns |
| آبیاری | ۲ | **۱۶۹۸ | ۲۷/۸ ns |
| سال×آبیاری | ۲ | ۱۰۱۰ns | ۳۱/۱ ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۱۳۵ | ۴۵/۲ |
| بیوچار | ۲ | **۱۰۵۰ | ۵۵/۱ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۲/۸ns | ۱۱/۹۴ ns |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۷۸۴ ** | ۸۶/۴ ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | **۵۱۷ | ۸/۹ ns |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۴۸/۲ns | ۳/۱ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۲۲۰ns | **۹۴/۷ |
| سال×بیوچار | ۲ | ۹۸۷ * | ۲۳/۹ ns |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۲/۳ ns | ۶۰/۹ ns |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | *۵۵۰ | ۲۴/۵ ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | **۵۸۸ | ۱۰/۹ ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۱۵۰ns | *۷۴ |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۳۵۵ns | *۸۲/۹ |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۱۱۴ | ۲۳/۹ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۱۳/۳ | ۱۳/۶ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری و بیوچار بر خصوصیات بیولوژیکی خاک حاصل از تجزیه مرکب

| فاکتور | سطوح | تنفس میکروبی (میلی‌گرم کربن دریک گرم خاک در روز) | کربن زیست توده‌ی میکروبی (میلی‌گرم کربن در صد گرم خاک) |
|---|---|---|---|
| سال | اول | ۱۲۳/۵a | ۳۶/۷ a |
| | دوم | ۸۱/۵ b | ۳۵/۲ a |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۹۵/۴۶c | ۳۶/۸ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۱۰۲/۴b | ۳۶/۰۸a |
| | ۴۰($I_3$) | ۱۰۹/۳a | ۳۵/۱ a |
| بیوچار(تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۹۶/۱ b | ۳۶/۰۴ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۱۰۵/۷a | ۳۴/۷ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۱۰۵/۲a | ۳۷/۲ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

جدول ۴-۱۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | ارتفاع بوته | | تعدادشاخه‌های‌فرعی | | تعدادفولیکول‌دربوته | | تعداددانه‌دربوته | | وزن‌دانه‌هادربوته | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۲۵۷/۰۳ ns | ۰/۸۵ ns | ۱۴۷/۷۹ ns | ۵/۸۷ ns | ۲۷/۵۲ ns | ۱/۵۹ ns | ۱۸۴۷۸ ns | ۳۵۷۱ ns | ۰/۳۶۵ ns | ۰/۰۱ ns |
| آبیاری | ۲ | ۳۴۱/۵۴ * | ۱۱۰/۰۶ * | ۴۱۲/۷۱* | ۷۷/۲۶ * | ۲۰۷/۰۲ * | ۲۱/۶۱ ns | ۱۱۸۱۱۳۶* | ۳۵۵۷۱ ns | ۵/۲۱** | ۰/۳۸ * |
| خطای اصلی | ۴ | ۵۷/۹۱ | ۷/۹۰ | ۴۳/۰۷ | ۹/۱۷ | ۲۶/۲۸ | ۹/۳۹ | ۷۷۱۱۶ | ۹۸۵۹ | ۰/۲۴ | ۰/۰۷ |
| بیوچار | ۲ | ۵/۳۸ ns | ۱۰/۰۵ ns | ۱۰/۵۳ ns | ۸/۳۸ ns | ۱۳/۲۶ ns | ۵/۸۷ ns | ۲۰۸۵۲۴ * | ۱۸۱۸۴ * | ۰/۴۶ * | ۰/۱۳ * |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۱۹/۲۴ ns | ۱۰/۴۸ ns | ۱۴/۲۶ ns | ۶/۵۹ ns | ۳/۲۲ ns | ۱/۷۴ ns | ۵۱۳۳۳ ns | ۸۵۲۳ ns | ۰/۳۵ ns | ۰/۰۴ ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۱۵۰ ** | ۶۶۵ ** | ۱۰۰۱** | ۴۴۲ ** | ۳۸۵ ** | ۱۳۷ ** | ۷۴۷۴۱۸** | ۲۹۷۲۱ * | ۱/۵۷** | ۰/۰۳ ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۴/۱۵ ns | ۰/۰۵ ns | ۵۶/۷۷* | ۷/۴۹ ns | ۱۷/۰۵ ns | ۱/۰۷ ns | ۲۸۷۶۰۴ * | ۳۰۲۳ ns | ۱/۸۲** | ۰/۰۱ ns |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۱/۰۹ ns | ۲۳/۹۲ * | ۶/۲۰ ns | ۸/۰۵ ns | ۱/۰۴ ns | ۱/۵۸ ns | ۴۳۰۰۰ ns | ۴۲۴۳۴** | ۰/۰۲۹ ns | ۰/۱۲ * |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۵/۶۱ ns | ۷/۶۲ ns | ۱۱/۱۹ ns | ۱۲/۸۸ ns | ۲/۴۷ ns | ۴/۳۵ ns | ۱۳۳۴۵۶ ns | ۱۱۱۸۱ ns | ۱/۰۱۶** | ۰/۰۵ ns |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۱۱/۰۹ | ۵/۷۴ | ۱۷/۸۹ | ۷/۶۸ | ۱۴/۸۶ | ۳/۱۵ | ۵۸۵۲۳ | ۵۳۷۴ | ۰/۱۷۳ | ۰/۰۳ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۶/۵۲ | ۴/۸۲ | ۱۷/۳۸ | ۱۹/۳۳ | ۱۹/۷۲ | ۱۷/۵۷ | ۲۲/۵ | ۱۳/۹۷ | ۱۷/۸۴ | ۱۵/۸۸ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۴-۱۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | وزن‌هزاردانه | | عملکرددانه | | عملکردبیولوژیک | | شاخص‌برداشت | | کارایی‌مصرف‌آب | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۰/۰۲۳ ns | ۰/۰۱۰۲ ns | ۳۳۸۴۸۸ ns | ۲۷۴۸۶ ns | ۷۷۷۶۵۶۹ ns | ۷۷۸۲۳۴ ns | ۸/۹۷ ns | ۱۳/۲۵ ns | ۰/۰۱ ns | ۰/۰۰۰۷ ns |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۴۳ ns | ۰/۰۲۱۳ ns | ۶۷۸۵۹۰ * | ۲۸۵۶۰۸* | ۸۸۴۴۶۵۹** | ۲۳۶۴۴۴۲ * | ۲۶/۰۱ ns | ۲۶/۰۹ ns | ۰/۰۰۸ ns | ۰/۰۱ ** |
| خطای اصلی | ۴ | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۰۷۴ | ۶۶۵۳۴ | ۲۹۳۱۱ | ۱۴۰۵۲۹۵ | ۱۳۸۱۹۴ | ۷۸/۰۹ | ۹/۱۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۱ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۳۳ ns | ۱۸۸۷۲ ns | ۹۲۱۴۹ * | ۲۰۹۰۵۹ ns | ۷۳۵۱۳۵ * | ۴/۳۰ ns | ۶/۹۳ ns | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۴** |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۴ ns | ۰/۰۰۳۴ ns | ۳۰۷۴۲ ns | ۱۷۷۴۸ ns | ۱۸۴۴۶۲ ns | ۱۶۰۷۱۹ ns | ۹/۶۲ ns | ۴۷/۶۷ ns | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۰۸ ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۱۶** | ۰/۰۴۴ ** | ۱۰۱۳۵۸ * | ۲۵۵۶۴ ns | ۲۰۴۳۶۱۰۷** | ۲۱۵۹۸۸۲۵** | ۴۱۲ ** | ۹۹۴** | ۰/۰۰۲ * | ۰/۰۰۰۸ ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۵ ns | ۰/۰۰۱۲ ns | ۴۱۰۳۴ ns | ۲۰۶۶ ns | ۹۸۱۵۱۶ * | ۶۷۹۰۵۱ * | ۳/۴۶ ns | ۲۰/۳۸ ns | ۰/۰۰۱ ns | ۰/۰۰۰۲ ns |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۶ ns | ۰/۰۰۰۶ ns | ۱۶۸۰۱۷** | ۲۵۷۵ ns | ۴۱۹۶۶ ns | ۸۷۸۹۶۶** | ۱۱۱ ** | ۲۴/۰۵ ns | ۰/۰۰۷** | ۰/۰۰۰۰۷ ns |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۶ ns | ۰/۰۰۹۲ ns | ۷۹۲۲۶* | ۳۵۱۴۲ * | ۶۲۹۸۳۴ * | ۴۳۶۳۵۳ * | ۷۲/۰۶ * | ۴۳/۱۸ * | ۰/۰۰۴** | ۰/۰۰۱۷ * |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۴۶ | ۲۶۵۳۹ | ۹۶۰۸ | ۲۷۳۵۹۷ | ۱۶۰۰۱۸ | ۱۹/۲۷ | ۱۳/۲۳ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۰۰۰۴ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۳/۸۲ | ۲/۹۶ | ۱۴/۹۶ | ۱۰/۴۰ | ۱۲/۸۲ | ۱۱/۶۶ | ۱۶/۱۳ | ۱۲/۶۹ | ۱۴/۸ | ۱۲/۳ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| فاکتور | سطوح | ارتفاع بوته(سانتی‌متر) | | تعدادشاخه‌های‌فرعی | | تعدادفولیکول‌دربوته | | تعداددانه‌دربوته | | وزن‌دانه‌هادربوته(گرم) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۵۵/۴۷a | ۵۲/۵۶a | ۲۹/۳۳a | ۱۶/۶۷ a | ۲۳/۱۶a | ۱۱/۳۶ a | ۱۲۶۲ a | ۵۷۵/۹۱a | ۲/۷۳a | ۱/۳۰ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۵۱/۰۱ab | ۴۸/۵۵b | ۲۳/۹۳ab | ۱۳/۵۸ b | ۱۹/۰۲ab | ۹/۵۷ a | ۱۱۷۱ a | ۴۹۷/۸۳a | ۲/۵۴a | ۱/۰۷ab |
| | ۴۰($I_3$) | ۴۶/۷۶b | ۴۸/۰۵b | ۱۹/۷۸b | ۱۲/۷۴ b | ۱۶/۴۴b | ۹/۳۶ a | ۷۸۱ b | ۵۰۰/۰۳a | ۱/۷۲b | ۱/۰۴ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۵۰/۴۵a | ۵۰/۵۸a | ۲۴/۰۹a | ۱۴/۶۸a | ۱۹/۵۳a | ۱۰/۶۱ a | ۱۰۹۳ab | ۴۹۱/۶۵b | ۲/۳۹۷ab | ۱/۰۵ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۵۱/۴۶a | ۴۹/۲۹a | ۲۵/۲۱a | ۱۳/۵۴ a | ۲۰/۴۰ a | ۹/۴۸ a | ۱۱۶۷ a | ۵۵۵/۰۷a | ۲/۴۵۲a | ۱/۲۲ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۵۱/۳۲a | ۴۹/۲۸a | ۲۳/۷۴a | ۱۴/۷۷ a | ۱۸/۶۸ a | ۱۰/۲۱ a | ۹۵۵ b | ۵۲۷/۰۵ab | ۲/۱۵b | ۱/۱۵ab |
| کودشیمیایی (کیلوگرم‌درهکتار) | بدون کود($F_1$) | ۴۹/۴۱b | ۴۶/۲۱b | ۲۰/۰۴b | ۱۱/۴۷ b | ۱۶/۸۷b | ۸/۵۰ b | ۹۵۴ b | ۵۰۱/۱۳b | ۲/۱۶b | ۱/۱۱ a |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۵۲/۷۵a | ۵۳/۲۲a | ۲۸/۶۵a | ۱۷/۱۹ a | ۲۲/۲۱ a | ۱۱/۶۹ a | ۱۱۸۹ a | ۵۴۸/۱۳a | ۲/۵a | ۱/۱۶ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| فاکتور | سطوح | وزن‌هزاردانه (گرم) | | عملکرددانه (کیلوگرم‌درهکتار) | | عملکردبیولوژیک (کیلوگرم‌درهکتار) | | شاخص‌برداشت | | کارایی‌مصرف‌آب (کیلوگرم‌درمترمکعب) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۲/۴a | ۲/۳۳a | ۱۲۳۹a | ۱۰۵۸ a | ۵۴۳۰a | ۳۷۵۷ a | ۲۸/۵۲a | ۲۹/۷۲ a | ۰/۱۶ a | ۰/۱۴ b |
| | ۷۰($I_2$) | ۲/۳۱a | ۲/۲۹a | ۱۱۵۸a | ۹۵۷ab | ۴۴۳۱a | ۳۴۸۸ a | ۲۶/۹۳ a | ۲۸/۸۹a | ۰/۱۹ a | ۰/۱۶ ab |
| | ۴۰($I_3$) | ۲/۳۱a | ۲/۲۶a | ۸۶۹/۸b | ۸۰۸ b | ۳۲۶۹b | ۳۰۴۰ b | ۲۶/۱۷ a | ۲۷/۳۵a | ۰/۲۰a | ۰/۱۹a |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۲/۳۵a | ۲/۲۸a | ۱۰۵۲a | ۸۸۰ b | ۴۰۲۳a | ۳۳۸۶ab | ۲۶/۹۸ a | ۲۷/۹۷ a | ۰/۱۸ a | ۰/۱۵ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۲/۳۳a | ۲/۲۹a | ۱۱۰۸a | ۱۰۲۰ a | ۴۰۳۴a | ۳۶۴۸ a | ۲۷/۷۷ a | ۲۸/۸۳a | ۰/۱۹ a | ۰/۱۸ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۲/۳۳a | ۲/۳۱a | ۱۱۰۷a | ۹۲۳ b | ۴۱۷۲a | ۳۲۵۰ b | ۲۶/۸۷ a | ۲۹/۱۷a | ۰/۱۹a | ۰/۱۶a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم‌درهکتار) | بدون کود($F_1$) | ۲/۳۹b | ۲/۲۷ b | ۱۰۴۵/۶ b | ۹۱۹ a | ۳۴۶۲b | ۲۷۹۶ b | ۲۹/۹۷ a | ۳۲/۹۵ a | ۰/۱۸ b | ۰/۱۶ a |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۲/۴۸a | ۲/۳۲ a | ۱۱۳۲/۳a | ۹۶۳ a | ۴۶۹۲/۳a | ۴۰۶۱ a | ۲۴/۴۴ b | ۲۴/۳۶b | ۰/۱۹ a | ۰/۱۷ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۱۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| بیوچار (تن درهکتار) | کود شیمیایی | ارتفاع بوته (سانتیمتر) | | تعداد دانه در بوته | | وزن دانه در بوته (گرم) | | عملکرد دانه (کیلوگرم‌درهکتار) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بدون بیوچار ($B_1$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۴۸/۸ a | ۴۶/۶ c | ۱۰۲۸ a | ۵۱۱ b | ۲/۲۶ a | ۱/۰۹ b | ۱۱۱۶abc | ۸۵۱ a |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۵۲/۱ a | ۵۴/۵ a | ۱۱۵۸ a | ۴۷۱ b | ۲/۵۲ a | ۱ b | ۹۸۶ c | ۹۱۰ a |
| ۱۰ تن در هکتار بیوچار($B_2$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۴۹/۵ a | ۴۴/۹ c | ۱۰۰۵ a | ۴۷۹ b | ۲/۲۸ a | ۱/۰۹ b | ۱۰۳۲ bc | ۹۹۲ a |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۵۳/۴ a | ۵۳/۶ ab | ۱۳۲۸ a | ۶۳۰ a | ۲/۶۲ a | ۱/۳۳ a | ۱۱۸۳ ab | ۱۰۴۸ a |
| ۲۰ تن در هکتار بیوچار($B_3$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۴۹/۸ a | ۴۷/۱ c | ۸۲۹ a | ۵۱۲ b | ۱/۹۳ a | ۱/۱۴ b | ۹۸۷ c | ۹۱۵ a |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۵۲/۷ a | ۵۱/۴ b | ۱۰۸۱ a | ۵۴۱ b | ۲/۳۶ a | ۱/۱۵ b | ۱۲۲۶ a | ۹۳۱ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$ : ۲۰تن در هکتار بیوچار
$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۱۵ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای‌عملکرد و کارایی مصرف سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| بیوچار (%) | کود شیمیایی | عملکردبیولوژیک (کیلوگرم‌درهکتار) | | شاخص برداشت | | کارایی مصرف آب (کیلوگرم‌درمترمکعب) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| بدون بیوچار ($B_1$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۲۳۴۶ a | ۲۵۶۳ d | ۳۲/۸ a | ۳۳/۱۶ a | ۰/۱۹abc | ۰/۱۴ a |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۳۵۹۷ a | ۴۲۱۱ a | ۲۲/۱ d | ۲۲/۷ a | ۰/۱۶ c | ۰/۱۵ a |
| ۱۰ تن در هکتار بیوچار ($B_2$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۲۳۵۱ a | ۲۹۶۶ c | ۳۱/۴ ab | ۳۳/۵ a | ۰/۱۸ bc | ۰/۱۷ a |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۳۵۰۲ a | ۴۳۳۱ a | ۲۵/۱ c | ۲۴/۱ a | ۰/۲۰ ab | ۰/۱۸ a |
| ۲۰ تن در هکتار بیوچار ($B_3$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۲۵۵۱ a | ۲۸۶۰cd | ۳۰/۱bc | ۳۲/۱ a | ۰/۱۷ c | ۰/۱۶ a |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۳۵۸۰ a | ۳۶۴۲b | ۲۶ c | ۲۶/۱ a | ۰/۲۲ a | ۰/۱۷ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$ : ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۱۶-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد دانه و بیولوژیک در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (درصد) | تیمار کودی | وزن دانه‌در بوته (گرم) | | عملکرددانه (کیلوگرم‌درهکتار) | | عملکردبیولوژیک (کیلوگرم‌درهکتار) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1F_1$ | ۲/۵acdef | ۱/۱a | ۱۲۷۸ ab | ۹۵۱cdef | ۴۰۱۶ cd | ۲۷۷۲fgh |
| | $B_1F_2$ | ۳/۳a | ۱/۲a | ۱۲۸۸ ab | ۱۱۳۶ab | ۴۹۴۹ ab | ۴۳۱۳ abc |
| | $B_2F_1$ | ۲/۷abcde | ۱/۲a | ۱۱۳۹ abcdef | ۱۱۵۰a | ۳۹۱۳ cde | ۳۴۰۹def |
| | $B_2F_2$ | ۲/۴cdef | ۱/۳a | ۱۳۱۴ ab | ۱۰۶۹abc | ۵۱۸۸ a | ۴۷۲۳ a |
| | $B_3F_1$ | ۳/۱abc | ۱/۴a | ۱۲۳۲abc | ۹۸۲bcde | ۳۹۵۲cde | ۲۷۷۷fgh |
| | $B_3F_2$ | ۲/۲defg | ۱/۳a | ۱۱۸۲ abcd | ۱۰۶۲abcd | ۵۱۵۶ a | ۴۵۵۰a |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1F_1$ | ۲/۱efg | ۱/۱a | ۱۱۳۱ abcdef | ۹۵۰cdef | ۳۵۳۱ cdef | ۲۶۴۲ gh |
| | $B_1F_2$ | ۲/۸abcd | ۰/۸a | ۱۰۸۶ abcdef | ۸۵۱efg | ۵۱۴۰ ab | ۴۶۴۰ a |
| | $B_2F_1$ | ۲/۱fgh | ۱/۱a | ۱۰۵۲ bcdef | ۹۸۵bcde | ۳۳۲۶ def | ۲۶۹۶ gh |
| | $B_2F_2$ | ۳/۱ab | ۱/۳a | ۱۳۵۶a | ۱۱۵۸a | ۵۷۷۶ a | ۴۴۵۵ ab |
| | $B_3F_1$ | ۱/۸fgh | ۰/۹a | ۹۹۶cdefg | ۸۶۴efg | ۳۸۳۰ cde | ۲۹۷۹ efg |
| | $B_3F_2$ | ۳/۱abc | ۱/۱a | ۱۳۲۴a | ۹۳۷cdef | ۴۹۸۵ ab | ۳۵۱۴ de |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1F_1$ | ۲/۱efg | ۱/۱a | ۹۴۱defg | ۶۵۱h | ۲۸۳۵ gh | ۲۲۷۳ h |
| | $B_1F_2$ | ۱/۳hi | ۰/۸a | ۵۸۳h | ۷۴۳gh | ۳۶۶۴ cdef | ۳۶۷۹ cd |
| | $B_2F_1$ | ۲/۰۳fgh | ۰/۹a | ۹۰۶ efg | ۸۴۳efg | ۲۹۱۳f | ۲۷۹۱ fgh |
| | $B_2F_2$ | ۲/۱efg | ۱/۳a | ۸۸۰fg | ۹۱۶ cdef | ۳۰۹۴ef | ۳۸۱۳bcd |
| | $B_3F_1$ | ۰/۸۹i | ۱/۱a | ۷۳۳gh | ۹۰۰defg | ۲۸۳۳f | ۲۸۲۳ fgh |
| | $B_3F_2$ | ۱/۶gh | ۱/۱ a | ۱۱۷۳abcde | ۷۹۵ fgh | ۴۲۸۰ bc | ۲۸۵۹efgh |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۱۶-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر شاخص‌برداشت و کاراییمصرف‌آب در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (درصد) | تیمار کودی | شاخص برداشت | | کارایی مصرف آب (کیلوگرم‌درمترمکعب) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1F_1$ | ۳۲/۵abc | ۳۴/۷ abc | ۰/۱۷۲defg | ۰/۱۲۷ h |
| | $B_1F_2$ | ۲۶/۶ abcde | ۲۹/۱cdefg | ۰/۱۷۳ defg | ۰/۱۵۲efgh |
| | $B_2F_1$ | ۲۹/۵ abcd | ۳۳/۷abcd | ۰/۱۵۳ fg | ۰/۱۵۴efgh |
| | $B_2F_2$ | ۲۶/۴abcde | ۲۲/۳hij | ۰/۱۷۷ defg | ۰/۱۴۳ fgh |
| | $B_3F_1$ | ۳۲/۸ab | ۳۵/۳ab | ۰/۱۶۵ efg | ۰/۱۳۱gh |
| | $B_3F_2$ | ۲۳/۲ de | ۲۳/۲ghij | ۰/۱۵۹ fg | ۰/۱۶۷cdef |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1F_1$ | ۳۲/۱ abc | ۳۵/۹ab | ۰/۱۹۵bcdef | ۰/۱۶۴defg |
| | $B_1F_2$ | ۲۱/۶ ef | ۱۸/۹j | ۰/۱۸۷ bcdef | ۰/۱۳۱ gh |
| | $B_2F_1$ | ۳۱/۷ abc | ۳۶/۶a | ۰/۱۸۱cdefg | ۰/۱۶۹bcdef |
| | $B_2F_2$ | ۲۳/۶ de | ۲۶/۱fghi | ۰/۲۳۳ b | ۰/۱۹۹abc |
| | $B_3F_1$ | ۲۵/۶bcde | ۲۹cdefg | ۰/۱۷۲defg | ۰/۱۴۹efgh |
| | $B_3F_2$ | ۲۶/۸ abcde | ۲۶/۸efgh | ۰/۲۲۸ bc | ۰/۱۶۱defg |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1F_1$ | ۳۳/۱a | ۲۸/۸cdefg | ۰/۲۲۵ bc | ۰/۱۵۶efgh |
| | $B_1F_2$ | ۱۵/۸f | ۲۰/۳ij | ۰/۱۴۰ g | ۰/۱۷۷bcde |
| | $B_2F_1$ | ۲۶/۹ abcde | ۳۰/۲bcdef | ۰/۲۱۷bcd | ۰/۲۰۲ ab |
| | $B_2F_2$ | ۲۸/۴ abcde | ۲۴/۱ ghij | ۰/۲۱۰bcde | ۰/۲۱۹a |
| | $B_3F_1$ | ۲۵/۳cde | ۳۲/۲abcde | ۰/۱۷۵defg | ۰/۲۱۵a |
| | $B_3F_2$ | ۲۷/۳abcde | ۲۸/۵defg | ۰/۲۸۱ a | ۰/۱۹۰abcd |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۱۷- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | ارتفاع بوته | تعدادشاخه‌های-فرعی | تعدادفولیکول‌در-بوته | تعداددانه-دربوته | وزن‌دانه‌هادر-بوته |
|---|---|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۳۲/۱* | ۲۷۰۶** | ۲۴۱۸ ** | ۸۰۹۱۱۸۵** | ۳۸/۳** |
| بلوک(سال) | ۴ | ۱۳۲/۸ ns | ۷۶/۸ ns | ۱۴/۵ ns | ۱۱۰۲۵ ns | ۰/۱ ns |
| آبیاری | ۲ | ** ۴۱۶/۱ | ۴۱۸/۲** | ۱۷۷/۳ ** | ۷۳۷۰۸۳** | ۳/۸** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۵۳/۵ns | ۷۱/۷ ns | ۵۰/۸ ns | ۴۷۹۶۲۳ns | ۱/۷ ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۲۹/۷ | ۲۶/۱ | ۱۷/۸ | ۴۳۴۸۸ | ۰/۱ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۷ ns | ۰/۱ ns | ۳/۷ ns | ۱۳۰۴۲۹* | ۰/۳* |
| کودشیمیایی | ۱ | ** ۷۱۱/۹ | ۱۳۸۷** | ۴۹۴ ** | ۵۳۷۶۱۳** | ۱/۱ * |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۲۹/۸** | ۱۱/۳ ns | ۲/۳ ns | ۳۴۶۲۴ns | ۰/۲ ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۸/۲ ns | ۲۵/۱ ns | ۴/۸۸ ns | ۱۴۳۹۲۲* | ۰/۸** |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۲۲/۳** | ۶/۷ ns | ۰/۰۸ ns | ۸۳۴۰۶ ns | ۰/۰۹ ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۹/۹ ns | ۸/۱ ns | ۳/۵ ns | ۱۰۰۰۹۰** | ۰/۷** |
| سال×بیوچار | ۲ | ۵/۱ ns | ۱۸/۷ ns | ۱۵/۲ ns | ۹۶۲۷۹ * | ۰/۲ ns |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۹۹/۵ * | ۵۶/۲ * | ۳۰/۴ ns | ۲۳۹۵۲۶* | ۰/۵ * |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۹/۵ ns | ۹/۴ ns | ۲/۶ ns | ۲۵۲۳۲ns | ۰/۱ ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۱/۴۴ns | ۳۹/۱ * | ۱۳/۲ ns | ۱۴۶۷۰۵ns | ۰/۹** |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۱۵/۱ ns | ۷/۵ ns | ۲/۷ ns | ۲۰۲۸ ns | ۰/۰۶ ns |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۱۴/۱ ns | ۱۵/۹ ns | ۳/۲ ns | ۴۴۵۴۷ns | ۰/۳ ns |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۶/۳ | ۱۲/۷ | ۹/۱ | ۳۱۹۴۹ | ۰/۱ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۴/۹ | ۱۸/۴ | ۲۰/۲ | ۲۲/۳ | ۱۸/۴ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۴-۱۷- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | وزن‌هزاردانه | عملکرددانه | عملکرد بیولوژیک | شاخص برداشت | کارایی مصرف آب |
|---|---|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۰/۰۷ ns | ۵۸۵۶۸۲* | ۱۱۳۵۲۳۱۰* | ۵۶/۶ ns | ۰/۰۹ * |
| بلوک(سال) | ۴ | ۰/۰۱ ns | ۱۸۲۹۵۰ ns | ۴۲۷۷۴۰۱ ns | ۱۱/۱ ns | ۰/۰۰۹ ns |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۳ ns | ۹۱۳۷۳۷** | ۹۹۵۹۵۶۱** | ۵۰/۲ * | ۰/۰۶ ** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۰/۰۰۸ ns | ۵۰۶۸۹ ns | ۱۲۴۹۵۴۰ ns | ۱/۷ ns | ۰/۰۱ ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۰/۰۲ | ۴۷۹۱۹ | ۷۷۱۷۴۴ | ۴۳/۶ | ۰/۰۰۳ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۷ ns | ۸۶۷۴۷* | ۲۱۳۱۶۱ ns | ۶/۳ ns | ۰/۰۰۵** |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۱۸ * | ۱۱۴۳۷۸* | ۴۲۰۲۶۸۹۰** | ۱۳۴۳** | ۰/۰۰۴ * |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۰/۰۱ ns | ۴۵۶۷۴ * | ۱۲۶۹۴۴ ns | ۴۴/۸ * | ۰/۰۰۲* |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۱ ns | ۲۴۹۰۹ ns | ۱۳۶۹۷۷۹ ** | ۱۹/۹ ns | ۰/۰۰۰۴ ns |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۰۴ ns | ۶۹۹۱۵ * | ۳۴۰۶۶۷ ns | ۱۰۶ ** | ۰/۰۰۷** |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۱ ns | ۴۴۵۰۵ * | ۶۱۲۶۰۳* | ۹۰/۲** | ۰/۰۰۲** |
| سال×بیوچار | ۲ | ۰/۰۲ ns | ۲۴۲۹۲ ns | ۶۴۵۷۶۵ * | ۴/۸ ns | ۰/۰۰۰۵ ns |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۴ ns | ۱۲۵۶۲ ns | ۸۰۴۱ ns | ۶۳/۱ * | ۰/۰۰۰۴ ns |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۳ ns | ۲۸۰۰ ns | ۲۴۲۸۳۴ ns | ۱۲/۴ ns | ۰/۰۰۰۴ ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۶ ns | ۱۸۱۸۰ ns | ۲۹۰۷۸۷ ns | ۳/۸ ns | ۰/۰۰۱ ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۱ ns | ۱۰۰۶۸۳** | ۵۸۰۲۸۴ ns | ۲۸/۷ ns | ۰/۰۰۶** |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۱ ns | ۶۹۸۸۴** | ۴۵۳۵۸۴ ns | ۲۴/۹ ns | ۰/۰۰۶ ** |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۰/۰۱ | ۱۸۰۷۸ | ۲۱۶۸۰۸ | ۱۶/۲ | ۰/۰۰۰۷ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۵/۶ | ۱۳/۲ | ۱۲/۴ | ۱۴/۴ | ۱۴/۳ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۱۸- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| فاکتور | سطوح | ارتفاع بوته (سانتی-متر) | تعدادشاخه-های‌فرعی | تعدادفولیکول-دربوته | تعداددانه-دربوته | وزن‌دانه‌هادر-بوته (گرم) | عملکرددانه (کیلوگرم-درهکتار) | عملکردبیولوژیک (کیلوگرم-درهکتار) | شاخص برداشت | کارایی‌مصرف آب (کیلوگرم‌درمتر-مکعب) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سال | اول | ۵۱/۱ a | ۲۴/۳ a | ۱۹/۵ a | ۱۰۷۲ a | ۲/۳ a | ۱۰۸۹ a | ۴۰۷۷ a | ۲۷/۲ a | ۰/۲۲ a |
| | دوم | ۴۹/۹ b | ۱۴/۳ b | ۱۰/۰۷ b | ۵۲۴ b | ۱/۱ b | ۹۴۱ b | ۳۴۲۸ b | ۲۸/۶ a | ۰/۱۶ b |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۵۱/۱ a | ۲۳ a | ۱۷/۲ a | ۹۱۹ a | ۲/۲ a | ۱۱۴۹ a | ۴۱۴۴ a | ۲۹/۱ a | ۰/۱۵ c |
| | ۷۰($I_2$) | ۴۹/۹ b | ۱۸/۷ b | ۱۴/۲ b | ۸۳۴ b | ۱/۸ b | ۱۰۵۷ b | ۳۹۵۹ a | ۲۷/۹ ab | ۰/۱۹ b |
| | ۴۰($I_3$) | ۴۷/۳ c | ۱۶/۲ c | ۱۲/۹ b | ۶۴۰ c | ۱/۳ c | ۸۳۹ c | ۳۱۵۵ b | ۲۶/۷ b | ۰/۲۴ a |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۵۰/۳ a | ۱۹/۳ a | ۱۵/۱ a | ۷۹۲ ab | ۱/۷ ab | ۹۶۶ b | ۳۷۰۵ a | ۲۷/۴ a | ۰/۱۸ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۵۰/۶ a | ۱۹/۳ a | ۱۴/۹ a | ۸۶۲a | ۱/۸ a | ۱۰۶۴ a | ۳۸۴۱ a | ۲۸/۳ a | ۰/۲۰ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۵۰/۴ a | ۱۹/۲ a | ۱۴/۴ a | ۷۴۱ b | ۱/۶ b | ۱۰۱۵ ab | ۳۷۱۱ a | ۲۸/۲ a | ۰/۲۰ a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم درهکتار) | بدون کود ($F_1$) | ۴۷/۹ b | ۱۵/۷ b | ۱۲/۵ b | ۷۲۷ b | ۱/۶ b | ۹۸۲ b | ۳۱۲۹ b | ۳۱/۴ a | ۰/۱۹ b |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۵۳/۱ a | ۲۲/۹ a | ۱۶/۹ a | ۸۶۸ a | ۱/۸ a | ۱۰۴۷ a | ۴۳۷۶ a | ۲۴/۴ b | ۰/۲۰ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۱۹-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد، اجزای‌عملکرد و کارایی-مصرف‌آب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| آبیاری (درصد) | تیمار کودی | تعداددانه در بوته | وزن دانه‌دربوته (گرم) | عملکرددانه (کیلوگرم-درهکتار) | عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم-درهکتار) | کارایی مصرف آب (کیلوگرم‌درمتر-مکعب) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1F_1$ | ۸۰۶cdefgh | ۱/۸۳ bcde | ۱۱۱۵abcd | ۳۳۹۸cde | ۰/۱۵ fg |
| | $B_1F_2$ | ۹۹۸ abc | ۲/۲۹a | ۱۲۱۲ a | ۴۶۳۰ab | ۰/۱۶ efg |
| | $B_2F_1$ | ۸۶۶ bcdef | ۲/۰۱abc | ۱۱۴۴ abc | ۳۶۶۱c | ۰/۱۵fg |
| | $B_2F_2$ | ۱۰۲۰ ab | ۱/۹۳bcde | ۱۱۹۲ ab | ۴۹۵۵a | ۰/۱۶ efg |
| | $B_3F_1$ | ۹۴۸abcd | ۲/۲۷a | ۱۱۰۷abcd | ۳۳۶۴cdef | ۰/۱۴g |
| | $B_3F_2$ | ۸۷۶ abcdef | ۱/۷۹bcde | ۱۱۲۲ abcd | ۴۸۵۳a | ۰/۱۶ efg |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1F_1$ | ۷۳۸ efgh | ۱/۶۰defg | ۱۰۴۰bcde | ۳۰۸۶cdef | ۰/۱۷ cdef |
| | $B_1F_2$ | ۹۲۱ abcde | ۱/۸۷bcd | ۹۶۹ def | ۴۸۹۰ a | ۰/۱۵ fg |
| | $B_2F_1$ | ۶۸۳ fghi | ۱/۵۷defg | ۱۰۱۸cdef | ۳۰۱۱defg | ۰/۱۷defg |
| | $B_2F_2$ | ۱۰۸۲ a | ۲/۲۵a | ۱۲۵۷ a | ۵۱۱۶ a | ۰/۲۱ ab |
| | $B_3F_1$ | ۶۵۴ghi | ۱/۴۱fgh | ۹۳۰efg | ۳۴۰۴ cde | ۰/۱۶ efg |
| | $B_3F_2$ | ۹۲۷ abcde | ۲/۱۲ab | ۱۱۳۱ abcd | ۴۲۴۹ b | ۰/۱۹ bcd |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1F_1$ | ۷۶۴defgh | ۱/۶۰defg | ۷۹۶gh | ۲۵۵۴ g | ۰/۱۹bcde |
| | $B_1F_2$ | ۵۲۵ ij | ۱/۱۲hi | ۶۶۳ h | ۳۶۷۱c | ۰/۱۵ fg |
| | $B_2F_1$ | ۶۷۶ fghi | ۱/۴۹efgh | ۸۷۴fg | ۲۸۵۲fg | ۰/۲۰abc |
| | $B_2F_2$ | ۸۳۶ bcdefg | ۱/۷۵ cdef | ۸۹۸efg | ۳۴۵۳cde | ۰/۲۱ab |
| | $B_3F_1$ | ۴۰۹j | ۰/۹۵i | ۸۱۶gh | ۲۸۲۸fg | ۰/۱۹bcd |
| | $B_3F_2$ | ۶۲۹ hi | ۱/۳۶ gh | ۹۸۴ def | ۳۵۶۹cd | ۰/۲۳a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۲۰- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر محتوی نیتروژن دانه و زیست‌توده، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه ازادی | محتوی‌نیتروژن‌دانه | | محتوی‌نیتروژن‌زیست‌توده | | درصدپروتئین‌دانه | | عملکردپروتئین‌دانه | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| بلوک | ۲ | ۰/۹۶ ns | ۰/۲۵ ns | ۱۳/۷۶ ns | ۳/۹۶ ns | ۳/۹۴ ns | ۱۴/۹۸ ns | ۶۵۰۴ ns | ۱۸۳۹ ns |
| آبیاری | ۲ | ۰/۹۴ * | ۱/۲۱ ns | ۹/۶۰ * | ۴/۴۸ * | ۴/۳۷ ** | ۱۰/۶۷ ns | ۵۰۲۵ * | ۱۴۵۳ ns |
| خطای اصلی | ۴ | ۰/۱۹ | ۰/۶۱ | ۱/۷۳ | ۰/۸۸ | ۰/۲۲ | ۳/۵۵ | ۶۵۴ | ۱۴۷۱ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۱ ns | ۰/۲۵ ns | ۰/۲۴ ns | ۲/۴۸ * | ۲/۱۶ * | ۵/۳۵ * | ۳۹۳ ns | ۳۳۶۴ ** |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۲۱ ns | ۰/۱۵ ns | ۱/۲۱ ns | ۰/۱۶ ns | ۳/۷۹ ** | ۰/۲۸ ns | ۷۳۱ ns | ۲۲۳ ns |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۸۶ * | ۱/۱۹ ** | ۴۵/۹۸ ** | ۴۳/۶۵ ** | ۴/۹۶ ** | ۲۵/۸۰ ** | ۳۶۸۳ ** | ۵۸۰۱ ** |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۴ ns | ۰/۴۳ * | ۲/۱۶ * | ۰/۱۶ * | ۱/۱۲ ns | ۰/۶۷ ns | ۷۱۹ ns | ۱۸۵ ns |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۶۶ * | ۰/۲۸ ns | ۱/۰۱ ns | ۱/۹۳ ns | ۰/۰۴ ns | ۰/۶۳ ns | ۱۸۸۷ ** | ۱۲۴ ns |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۳۴ ns | ۰/۰۹ ns | ۰/۶۵ ns | ۰/۴۹ ns | ۵/۱۸ ** | ۲/۶۵ ns | ۱۶۹۵ ** | ۸۴۱ ns |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۰/۱۴ | ۰/۱۲ | ۰/۵۰ | ۰/۰۹ | ۰/۵۱ | ۱/۵۰ | ۳۴۱ | ۳۶۱ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱۹/۵۰ | ۱۹/۴۰ | ۱۴/۶۸ | ۱۸/۱۶ | ۷/۰۱ | ۱۱/۰۱ | ۱۵/۱ | ۱۷/۸ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۴-۲۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر کارایی مصرف و جذب نیتروژن در سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | کارایی مصرف نیتروژن | | کارایی جذب نیتروژن | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۲۸۳/۷ $^{ns}$ | ۲۲/۲ $^{ns}$ | ۱/۱۶ $^{ns}$ | ۰/۳۲ $^{ns}$ |
| آبیاری | ۲ | ۵۷۶/۸ $^{*}$ | ۲۴۴/۸ $^{*}$ | ۰/۸۲ $^{**}$ | ۰/۵۸ $^{*}$ |
| خطای اصلی | ۴ | ۵۴ | ۲۴/۱ | ۰/۱۴ | ۰/۰۷ |
| بیوچار | ۲ | ۶/۵ $^{ns}$ | ۷۲/۱ $^{**}$ | ۰/۰۱ $^{ns}$ | ۰/۴۷ $^{**}$ |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۳۲/۴ $^{ns}$ | ۱۷/۲ $^{ns}$ | ۰/۱۰ $^{ns}$ | ۰/۲۴ $^{**}$ |
| کودشیمیایی | ۱ | ۷۱/۳ $^{ns}$ | ۲۱/۶ $^{ns}$ | ۳/۸۴ $^{**}$ | ۵/۴ $^{**}$ |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۳۴/۱ $^{ns}$ | ۱/۵۸ $^{ns}$ | ۰/۱۹ $^{*}$ | ۰/۴۳ $^{**}$ |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۱۳۷/۸ $^{**}$ | ۲/۳۳ $^{ns}$ | ۰/۰۶ $^{ns}$ | ۰/۰۹ $^{ns}$ |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۶۴/۴ $^{*}$ | ۳۰/۲ $^{*}$ | ۰/۰۵ $^{ns}$ | ۰/۳۸ $^{ns}$ |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۲۲/۱ | ۷/۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱۴/۸ | ۱۰/۳ | ۱۴/۸ | ۱۴/۹ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه و زیست‌توده، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین سیاه دانه در سال اول و دوم

| فاکتور | سطوح | محتوی‌نیتروژن‌دانه (گرم‌برمترمربع) | | محتوی‌نیتروژن‌زیست‌توده (گرم‌برمترمربع) | | درصد پروتئین‌دانه (درصد) | | عملکردپروتئین‌دانه (کیلوگرم‌درهکتار) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۲/۱۲ a | ۱/۹۵ a | ۵/۳۹a | ۴/۰۱ab | ۱۰/۸۷ b | ۱۰/۲۸ a | ۱۳۵a | ۱۱۱a |
| | ۷۰($I_2$) | ۲/۰۴ab | ۱/۹۵ a | ۵/۱۴ab | ۴/۱۸ a | ۱۱/۱۱ b | ۱۱/۷۹a | ۱۲۸a | ۱۱۱a |
| | ۴۰($I_3$) | ۱/۶۹ b | ۱/۵۰ a | ۴/۰۲b | ۳/۲۴ b | ۱۱/۸۲ a | ۱۱/۳۳a | ۱۰۳ b | ۹۵a |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۱/۹۵ a | ۱/۶۷ a | ۴/۷۷a | ۳/۳۸ b | ۱۱/۴۵ a | ۱۰/۶۵ b | ۱۱۹a | ۹۴ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۱/۹۷ a | ۱/۹۱ a | ۴/۸۰a | ۴/۰۱ a | ۱۱/۴۸ a | ۱۱/۷۲a | ۱۲۷a | ۱۲۱a |
| | ۲۰($B_3$) | ۱/۹۳ a | ۱/۸۱ a | ۴/۹۸a | ۴/۰۴ a | ۱۰/۸۷ b | ۱۱/۰۳ ab | ۱۲۰ a | ۱۰۲b |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود($F_1$) | ۱/۸۲ b | ۱/۶۵ b | ۳/۹۳ b | ۲/۹۱ b | ۱۰/۹۷ b | ۱۰/۴۴ b | ۱۱۴ b | ۹۵ b |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۲/۰۸ a | ۱/۹۵ a | ۵/۷۷ a | ۴/۷۱ a | ۱۱/۵۷ a | ۱۱/۸۲a | ۱۳۰a | ۱۱۶a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۲۳- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر کارایی مصرف و جذب نیتروژن سیاه دانه در سال اول و دوم

| فاکتور | سطوح | کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) | | کارایی جذب نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۳۵/۹ a | ۳۰/۷ a | ۱/۵۶ a | ۱/۶۸ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۳۳/۵ a | ۲۷/۷ ab | ۱/۴۹ab | ۱/۶۵ a |
| | ۴۰($I_3$) | ۲۵/۱ b | ۲۳/۳ b | ۱/۱۶ b | ۱/۳۵ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۳۲/۱ a | ۲۶/۴ b | ۱/۴۳ a | ۱/۵۷ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۳۱/۶ a | ۲۹/۵ a | ۱/۳۸ a | ۱/۷۲ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۳۰/۹ a | ۲۵/۸ b | ۱/۳۹ a | ۱/۴ b |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود($F_1$) | ۳۰/۳ a | ۲۶/۶ a | ۱/۱۳ b | ۱/۲۴ b |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۳۲/۶ a | ۲۷/۹ a | ۱/۶۷ a | ۱/۸۸ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۲۴ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × کودشیمیایی بر محتوی نیتروژن دانه، محتوی نیتروژن زیست‌توده و کارایی جذب نیتروژن در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | کود شیمیایی | محتوی‌نیتروژن‌دانه (گرم‌برمترمربع) | | محتوی نیتروژن‌زیست‌توده (گرم‌برمترمربع) | | کارایی جذب نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۱/۹۸ a | ۱/۶۴ c | ۴/۴۸ bc | ۲/۹۸ c | ۱/۳۰ bc | ۱/۴۳ c |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۲/۲۶ a | ۲/۲۶ a | ۶/۳۰a | ۵/۰۳ a | ۱/۸۲ a | ۱/۹۲ b |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۱/۸۷ a | ۱/۸۱ bc | ۳/۸۷ cd | ۳/۰۴ c | ۱/۱۱ cd | ۱/۱۶ d |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۲/۲۱ a | ۲/۰۹ ab | ۶/۴۲a | ۵/۳۳ a | ۱/۸۶ a | ۲/۱۵ a |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | بدون‌کودشیمیایی($F_1$) | ۱/۶۲ a | ۱/۵۰c | ۳/۴۴ d | ۲/۷۲ c | ۰/۹۹ d | ۱/۱۴ d |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۱/۷۶ a | ۱/۵۰c | ۴/۶۰ b | ۳/۷۷ b | ۱/۳۲ b | ۱/۵۷ c |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۲۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر محتوی نیتروژن دانه و زیست‌توده، درصد پروتئین و عملکرد پروتئین سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | محتوی‌نیتروژن دانه | محتوی‌نیتروژن زیست‌توده | پروتئین دانه | عملکرد پروتئین |
|---|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۰/۶۰ * | ۲۹/۳ * | ۱/۹ ns | ۶۹۸۶* |
| بلوک(سال) | ۴ | ۰/۶۰ ns | ۸/۸ ns | ۸/۷ ns | ۴۱۷۲ ns |
| آبیاری | ۲ | ۲/۱۳** | ۱۳/۲** | ۷/۳ ** | ۵۸۷۵** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۰/۰۲ ns | ۰/۸ ns | ۵/۶ ns | ۶۰۳ ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۰/۴ | ۱/۳۱ | ۲/۱ | ۱۰۶۳ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۱۵ ns | ۱/۸۵* | ۳/۸* | ۳۰۱۴** |
| کودشیمیایی | ۱ | ۲/۰۴** | ۸۹/۶** | ۲۳/۸** | ۹۳۶۵** |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۰/۳۳* | ۰/۷ ns | ۲/۵* | ۶۵۶ ns |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۳۳ ns | ۳/۹ ** | ۱/۳ ns | ۴۶۷ ns |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۸۵** | ۱/۴ ns | ۰/۵ ns | ۱۰۲۶ ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۳۲* | ۰/۳۵ ns | ۶/۶ ** | ۱۳۳۵** |
| سال×بیوچار | ۲ | ۰/۱۱ ns | ۰/۸۷ ns | ۵/۸ ** | ۷۴۳ ns |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۱ ns | ۰/۰۱ ns | ۵/۳ * | ۱۱۹ ns |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۳ ns | ۰/۶ ns | ۱/۷ ns | ۲۹۹ ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۱۴ ns | ۰/۱ ns | ۰/۰۵ ns | ۴۳۷ ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۱۰ ns | ۰/۰۶* | ۰/۱ ns | ۹۸۴ ns |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۱۱ ns | ۰/۳۹* | ۱/۱ ns | ۱۲۰۲** |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۰/۱۳ | ۰/۴۹ | ۱/۱ | ۳۵۱ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۱۹/۴ | ۱۶/۲ | ۹/۱۸ | ۱۶/۴ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۴-۲۶- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر کارایی مصرف و جذب نیتروژن در سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | کارایی مصرف نیتروژن | کارایی جذب نیتروژن |
|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۴۸۹ * | ۰/۶۹* |
| بلوک(سال) | ۴ | ۱۵۳ns | ۰/۷۴ns |
| آبیاری | ۲ | ۷۷۹ ** | ۱/۳۹** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۴۱/۷ ns | ۰/۰۱ ns |
| خطای اصلی | ۸ | ۳۹/۱ | ۰/۱ |
| بیوچار | ۲ | ۵۸/۶* | ۰/۲* |
| کودشیمیایی | ۱ | ۸۵/۸* | ۹/۲** |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۴۷/۳* | ۰/۳** |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۲۰/۳ ns | ۰/۵ ** |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۵۶/۹* | ۰/۱ * |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۳۷/۴* | ۰/۲ ** |
| سال×بیوچار | ۲ | ۲۰/۰۳ ns | ۰/۲** |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۷/۱ ns | ۰/۰۷ns |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۲/۳ ns | ۰/۰۳ns |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۱۵/۳ ns | ۰/۰۴ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۸۳/۲** | ۰/۰۰۴ns |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۵۷/۲** | ۰/۲ ** |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۱۴/۹ | ۰/۰۴ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۱۳/۱ | ۱۴/۸ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۲۷- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر محتوی نیتروژن دانه، محتوی نیتروژن زیست توده، عملکرد پروتئین، کارایی مصرف و کارایی جذب نیتروژن در سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| فاکتور | سطوح | محتوی نیتروژن دانه (گرم‌برمترمربع) | محتوی نیتروژن زیست توده (گرم‌برمترمربع) | عملکرد پروتئین (کیلوگرم در هکتار) | کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) | کارایی جذب نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| سال | اول | ۱/۹ a | ۴/۸ a | ۱۲۲ a | ۳۱/۵ a | ۱/۴ a |
| | دوم | ۱/۸ b | ۳/۸ b | ۱۰۶ b | ۲۷/۲ b | ۱/۵ b |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۲/۳ a | ۴/۷ a | ۱۲۴ a | ۳۳/۳ a | ۱/۶ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۱/۹ a | ۴/۶ a | ۱۱۹ a | ۳۰/۶ b | ۱/۵ a |
| | ۴۰($I_3$) | ۱/۵ b | ۳/۶ b | ۹۹ b | ۲۴/۲ c | ۱/۲ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۱/۸ a | ۴ b | ۱۲۴ b | ۲۹/۱ ab | ۱/۵ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۱/۹ a | ۴/۴ ab | ۱۱۱a | ۳۰/۸ a | ۱/۵ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۱/۸ a | ۴/۵ a | ۱۰۷ b | ۲۸/۳ b | ۱/۳ b |
| کودشیمیایی (کیلوگرم درهکتار) | بدون کود($F_1$) | ۱/۷ b | ۳/۴ b | ۱۰۴ b | ۲۸/۵ b | ۱/۱ b |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۲/۱ a | ۵/۲ a | ۱۲۳ a | ۳۰/۳ a | ۱/۷ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۲۸-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی محتوی نیتروژن دانه، عملکرد پروتئین، کارایی مصرف و کارایی جذب نیتروژن سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| آبیاری (%) | تیمار کودی | محتوی نیتروژن دانه (گرم‌برمترمربع) | عملکرد پروتئین (کیلوگرم در هکتار) | کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) | کارایی جذب نیتروژن (کیلوگرم برکیلوگرم) |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰درصد نیاز آبی$(I_1)$ | $B_1F_1$ | ۲/۰۲bcdef | ۱۰۹ defg | ۳۳/۵abc | ۱/۵۳cde |
| | $B_1F_2$ | ۲/۲ abcd | ۱۳۹ab | ۳۶/۴ a | ۲/۰۹ab |
| | $B_2F_1$ | ۱/۵ ghij | ۱۱۵cdef | ۳۳/۱ abc | ۱/۳۴ef |
| | $B_2F_2$ | ۲/۴ a | ۱۴۳a | ۳۴/۵ ab | ۱/۹۳b |
| | $B_3F_1$ | ۱/۹cdefg | ۱۰۹defg | ۳۰/۹bcd | ۱/۲۲fgh |
| | $B_3F_2$ | ۲/۱ abcde | ۱۲۱bcde | ۳۱/۳ bcd | ۱/۶۰cd |
| ۷۰درصد نیاز آبی$(I_2)$ | $B_1F_1$ | ۱/۷ defghi | ۱۰۰efg | ۳۱/۳ bcd | ۱/۲۲ fgh |
| | $B_1F_2$ | ۱/۷ defghi | ۱۱۵cdef | ۲۹/۱ cde | ۱/۶۳ c |
| | $B_2F_1$ | ۲/۱ abcde | ۱۲۷abcd | ۲۹/۴ cde | ۱/۲۶fg |
| | $B_2F_2$ | ۲/۴ a | ۱۴۳a | ۳۶/۴ a | ۲/۲۹a |
| | $B_3F_1$ | ۱/۶fghij | ۹۸fg | ۲۶/۱ efg | ۰/۹۲i |
| | $B_3F_2$ | ۲/۲ abc | ۱۳۳abc | ۳۱/۴bcd | ۲/۰۹ ab |
| ۴۰درصد نیاز آبی$(I_3)$ | $B_1F_1$ | ۱/۷ defghi | ۱۰۱efg | ۲۳/۹ fgh | ۱/۰۹ ghi |
| | $B_1F_2$ | ۱/۳j | ۷۴h | ۱۹/۹ h | ۱/۴۴cdef |
| | $B_2F_1$ | ۱/۴ hij | ۹۳gh | ۲۵/۳efg | ۱/۱۱ ghi |
| | $B_2F_2$ | ۱/۶ fghij | ۱۲۳ abcd | ۲۶/۱efg | ۱/۳۹ def |
| | $B_3F_1$ | ۱/۴hij | ۸۸gh | ۲۲/۸gh | ۱hi |
| | $B_3F_2$ | ۱/۸cdefgh | ۱۱۵cdef | ۲۷/۴def | ۱/۵۱ cde |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۲۹- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | درصد روغن | | عملکرد روغن | | اسید مریستیک | | اسید پالمیتیک | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۳۱۲/۹۵$^{ns}$ | ۱۳/۶۰$^{ns}$ | ۸۳۳۸۶/۵$^{ns}$ | ۳۸۳۰$^{ns}$ | ۰/۰۰۲۵$^{ns}$ | ۰/۱۵$^{ns}$ | ۲۳/۸۴$^{ns}$ | ۵۸۳$^{ns}$ |
| آبیاری | ۲ | ۶۴/۹۶$^{ns}$ | ۴۰۲/۳۵$^{**}$ | ۴۶۸۸۸/۵$^{ns}$ | ۱۱۳۷۸۳$^{*}$ | ۰/۰۱۹۰$^{**}$ | ۰/۹۸$^{**}$ | ۲۹/۷۸$^{ns}$ | ۲۹۲۱$^{**}$ |
| خطای اصلی | ۴ | ۷۳/۳۳ | ۱۸/۳۹ | ۱۶۳۵۵/۱ | ۸۳۲۲ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۳ | ۱۶/۳۳ | ۱۰۳ |
| بیوچار | ۲ | ۳/۹۷$^{ns}$ | ۶۴/۸۸$^{*}$ | ۲۰۳۸/۸$^{ns}$ | ۲۰۶۳۸$^{ns}$ | ۰/۰۴۲۸$^{**}$ | ۰/۲۶$^{**}$ | ۵۶/۳۹$^{**}$ | ۹۵۱$^{**}$ |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۷/۸۹$^{ns}$ | ۴۶/۰۹$^{*}$ | ۱۷۹۵/۴$^{ns}$ | ۳۱۶۸$^{ns}$ | ۰/۰۱۸۰$^{**}$ | ۰/۴۹$^{**}$ | ۴۸/۱۲$^{**}$ | ۳۵۱$^{*}$ |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۶$^{ns}$ | ۷۱/۵۳$^{*}$ | ۶۲۲۰/۶$^{ns}$ | ۱۸۱۳۸$^{*}$ | ۰/۰۱۸۸$^{*}$ | ۰/۱۷$^{*}$ | ۳۰/۸۲$^{*}$ | ۱۳۶۹$^{**}$ |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۳/۳۱$^{ns}$ | ۴۸/۶۱$^{ns}$ | ۱۲۲۲$^{ns}$ | ۷۵۶۰$^{ns}$ | ۰/۰۵۴۰$^{**}$ | ۰/۳۳$^{**}$ | ۴۱/۵۹$^{**}$ | ۴۳۰$^{*}$ |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۱/۸۰$^{ns}$ | ۱۱۵/۹۷$^{*}$ | ۴۲۰۴/۸$^{ns}$ | ۱۲۴۳۴$^{*}$ | ۰/۰۳۴۰$^{ns}$ | ۰/۰۴$^{ns}$ | ۲۲/۸۴$^{*}$ | ۱۶۷$^{ns}$ |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۱۸/۴۶$^{ns}$ | ۳۸/۲۷$^{ns}$ | ۸۹۳۳/۱$^{*}$ | ۶۹۴۳$^{**}$ | ۰/۰۳۳۴$^{ns}$ | ۰/۰۲$^{ns}$ | ۲۶/۸۰$^{*}$ | ۵۹۰$^{**}$ |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۱۰/۰۵ | ۱۷/۵۹ | ۲۷۶۵/۴ | ۲۸۹۹ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۳ | ۶/۸۳ | ۹۸/۸ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱۴/۲۹ | ۱۵/۱۵ | ۲۱/۳۴ | ۲۰/۲۲ | ۲۶/۳ | ۲۶/۷ | ۲۳/۷۷ | ۲۳/۸ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۴-۲۹- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | اسید استئاریک | | اسید اولئیک | | اسید لینولئیک | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۵۹/۷۶ $^{ns}$ | ۷۴۸/۰۱$^{ns}$ | ۲۸۷/۳۸ $^{ns}$ | ۳/۶۸ $^{ns}$ | ۴/۱۵ $^{ns}$ | ۲۵/۷۹$^{ns}$ |
| آبیاری | ۲ | ۱۰۹/۰۱ $^{ns}$ | ۲۲۲۶$^{**}$ | ۱۹۵/۲۰$^{ns}$ | ۱۲/۱۴ $^{ns}$ | ۰/۴۷ $^{ns}$ | ۴۶/۹۷$^{*}$ |
| خطای اصلی | ۴ | ۱۱۲/۷۳ | ۱۱۰/۸۲ | ۴۲۳/۶۷ | ۳۶/۳۳ | ۱/۸۸ | ۳/۱۱ |
| بیوچار | ۲ | ۸۳/۳۳$^{*}$ | ۱۴۹/۶۵ $^{ns}$ | ۱۸/۵۶ $^{ns}$ | ۲۳/۹۳ $^{ns}$ | ۰/۲۸ $^{ns}$ | ۸۰/۴۴$^{**}$ |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۹۸/۳۹ $^{*}$ | ۴۳۱/۹۷$^{**}$ | ۱۷۶/۶۱ $^{**}$ | ۹/۵۵ $^{ns}$ | ۴/۷۵ $^{**}$ | ۲۳/۰۲$^{**}$ |
| کودشیمیایی | ۱ | ۳۷/۳۱ $^{ns}$ | ۱۱/۳۷ $^{ns}$ | ۱/۵۰ $^{ns}$ | ۳۶/۴۰ $^{ns}$ | ۱۲/۵۵ $^{**}$ | ۱۱/۱۱$^{ns}$ |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۲۸/۱۵ $^{ns}$ | ۴۴۷/۵۵$^{*}$ | ۱۵/۰۳ $^{ns}$ | ۷/۶۰ $^{ns}$ | ۲/۱۵ $^{ns}$ | ۱۹/۱۹$^{**}$ |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۴۲/۸۲ $^{ns}$ | ۷۱/۴۹$^{ns}$ | ۳۸/۰۹ $^{ns}$ | ۱۵۰/۰۱$^{**}$ | ۰/۹۱ $^{ns}$ | ۰/۴۰ $^{ns}$ |
| ابیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۲۵۳/۲۹ $^{**}$ | ۲۸/۵۹ $^{ns}$ | ۱۷۰/۲۲$^{**}$ | ۶۰/۲۰ $^{*}$ | ۶/۳۶ $^{**}$ | ۹/۶۷$^{*}$ |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۲۴/۷۴ | ۸۵/۰۵ | ۴۱/۵۹ | ۲۲/۳۲ | ۱/۰۷ | ۳/۰۹ |
| ضریب تغییرات (٪) | | ۱۲/۳۲ | ۲۷/۳ | ۱۴/۵۱ | ۲۲/۶ | ۲۲/۹۲ | ۲۶/۴ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم

| فاکتور | سطوح | درصد روغن | | عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) | | اسید مریستیک (درصد) | | اسید پالمیتیک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| آبیاری | ۱۰۰($I_1$) | ۲۱/۶۳ a | ۳۲/۷۹ a | ۲۷۲/۱۱ a | ۳۵۰ a | ۰/۲۹ a | ۰/۵۱ b | ۹/۷۰ a | ۲۹/۱ c |
| | ۷۰($I_2$) | ۲۴/۳۰ a | ۲۶/۷۲ b | ۲۷۹/۴۶ a | ۲۵۶ b | ۰/۲۳ b | ۰/۹۸ a | ۱۰/۹۸ a | ۵۴/۶ a |
| | ۴۰($I_3$) | ۲۰/۶۲ a | ۲۶/۴۸ b | ۱۸۷/۶۱ a | ۱۹۲ b | ۰/۲۳ b | ۰/۶۹ b | ۱۲/۲۷ a | ۴۱/۱ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۲۱/۹۴ a | ۲۷/۷۲ ab | ۲۳۵/۰۷ a | ۲۵۱ b | ۰/۲۳ b | ۰/۵۹ b | ۹/۴۰ b | ۳۳/۲ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۲۲/۷۳ a | ۲۹/۵۴ a | ۲۵۶/۱۷ a | ۳۰۵ a | ۰/۳۰ a | ۰/۸۰ a | ۱۰/۶۶ b | ۴۶/۵ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۲۱/۸۹ a | ۲۵/۷۴ b | ۲۴۷/۹۳ a | ۲۴۲ b | ۰/۲۱ b | ۰/۷۹ a | ۱۲/۸۹ a | ۴۵/۱ a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود($F_1$) | ۲۲/۲۲ a | ۲۶/۵۲ a | ۲۳۵/۱۵ a | ۲۴۷ b | ۰/۲۳ b | ۰/۷۸ b | ۱۱/۷۴ a | ۳۶/۶ b |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۲۲/۱۵ a | ۲۸/۸۲ a | ۲۵۷/۶۳ a | ۲۸۴ a | ۰/۲۷ a | ۰/۶۷ a | ۱۰/۲۳ b | ۴۶/۶ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم

| فاکتور | سطوح | اسید لینولئیک (درصد) | | اسید اولئیک (درصد) | | اسید استئاریک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۴/۳۶ a | ۵/۰۲b | ۴۸/۲۲ a | ۱۹/۹۰ a | ۳۷/۵۴ a | ۴۶/۲۱ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۴/۶۹ a | ۸/۲۵a | ۴۲/۶۳ a | ۲۱/۴۰ a | ۴۱/۴۶ a | ۲۴/۸۹ b |
| | ۴۰($I_3$) | ۴/۴۹ a | ۶/۶۶a | ۴۲/۴۲ a | ۲۱/۲۳ a | ۴۲/۰۷ a | ۳۰/۰۷b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۴/۴۷ a | ۵/۲۵ b | ۴۳/۸۹ a | ۱۹/۶۲ a | ۴۲/۸۳ a | ۳۵/۲۵ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۴/۶۵ a | ۹/۰۸ a | ۴۵/۶۰ a | ۲۱/۰۱ a | ۳۸/۸۹ b | ۳۵/۵۲ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۴/۴۱ a | ۵/۶۱ b | ۴۳/۷۹ a | ۲۱/۹۱ a | ۳۹/۳۵ b | ۳۰/۴۰ a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود($F_1$) | ۴/۰۳ b | ۶/۱۹ a | ۴۴/۲۶ a | ۲۰/۰۳ a | ۳۹/۵ a | ۳۳/۲۷ a |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۴/۹۹a | ۷/۱۰ a | ۴۴/۵۹ a | ۲۱/۶۷ a | ۴۱/۱ a | ۳۴/۱۸ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۳۱ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | بیوچار | درصدروغن | | اسیدمریستیک (درصد) | | اسیدپالمیتیک (درصد) | | اسیدلینولئیک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی$(I_1)$ | $B_1$ | ۲۰/۵a | ۳۰/۶ab | ۰/۳۴a | ۰/۵۳c | ۱۰/۶b | ۲۶/۸d | ۴/۱bcd | ۴/۳g |
| | $B_2$ | ۲۳/۶a | ۳۴/۸ a | ۰/۲۹ab | ۰/۵۲ c | ۶/۷c | ۲۸/۹cd | ۴/۴abcd | ۵/۱f |
| | $B_3$ | ۲۰/۶a | ۳۲/۸a | ۰/۲۳bc | ۰/۴۹ c | ۱۱/۶ab | ۳۱/۶cd | ۴/۵abcd | ۵/۷d |
| ۷۰درصد نیاز آبی$(I_2)$ | $B_1$ | ۲۴/۶a | ۳۰/۱ab | ۰/۱۸c | ۰/۶۴ c | ۶/۳c | ۴۹/۶abc | ۴/۹abc | ۶/۹c |
| | $B_2$ | ۲۴/۱a | ۲۶/۵bc | ۰/۳۰ab | ۱/۳۹a | ۱۳/۶ab | ۵۶/۸a | ۵/۶a | ۱۲/۱a |
| | $B_3$ | ۲۴/۱a | ۲۳/۵ cd | ۰/۲۱c | ۰/۹۰b | ۱۳ab | ۵۷/۳a | ۳/۴d | ۵/۶d |
| ۴۰درصد نیاز آبی$(I_3)$ | $B_1$ | ۲۰/۶a | ۲۲/۳cd | ۰/۱۸c | ۰/۵۹c | ۱۱/۲ab | ۲۳/۳d | ۴/۲bcd | ۴/۴g |
| | $B_2$ | ۲۰/۳a | ۲۷/۲bc | ۰/۳۲a | ۰/۵۰ c | ۱۱/۵ab | ۵۳/۸ab | ۳/۹cd | ۱۰/۱b |
| | $B_3$ | ۲۰/۹a | ۲۰/۸d | ۰/۱۹c | ۰/۹۸b | ۱۴/۱a | ۴۶/۲bc | ۵/۲ab | ۵/۴e |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

ادامه جدول۴-۳۱ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | بیوچار | اسیداولئیک (درصد) | | اسیداستئاریک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1$ | ۴۶/۴ab | ۱۸/۳ a | ۳۹ bcd | ۵۳/۹a |
| | $B_2$ | ۴۸/۱a | ۱۸/۸ a | ۴۰/۱bc | ۵۳/۱ a |
| | $B_3$ | ۵۰/۱ a | ۲۲/۵ a | ۳۳/۴d | ۳۱/۶ b |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1$ | ۴۵/۶abc | ۲۰/۳ a | ۴۱/۷bc | ۲۲/۸ b |
| | $B_2$ | ۳۸/۶cd | ۲۱/۸ a | ۴۰/۱bc | ۲۴/۲b |
| | $B_3$ | ۴۳/۶abcd | ۲۱/۹ a | ۴۲/۷ab | ۲۷/۵b |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1$ | ۳۹/۶bcd | ۲۰/۱ a | ۴۷/۷a | ۲۸/۹b |
| | $B_2$ | ۵۰/۱ a | ۲۲/۳ a | ۳۶/۳cd | ۲۹/۱ b |
| | $B_3$ | ۳۷/۵d | ۲۱/۲ a | ۴۲/۱abc | ۳۲/۱b |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

جدول۴-۳۲ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × کودشیمیایی بر اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | کود شیمیایی | اسیدمریستیک (درصد) | | اسیدپالمیتیک (درصد) | | اسیدلینولئیک (درصد) | | اسیداستئاریک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۹۵- ۱۳۹۴ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی($I_1$) | بدون کودشیمیایی($F_1$) | ۰/۲۰ b | ۰/۴۶c | ۱۱/۸ ab | ۲۷/۵c | ۳/۵ a | ۵/۴۶ b | ۳۶/۳ a | ۴۱/۱ b |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۰/۳۷ a | ۰/۵۶c | ۷/۶c | ۲۸/۵c | ۵/۱ a | ۴/۵۷b | ۳۸/۷ a | ۵۱/۳a |
| ۷۰درصد نیاز آبی($I_2$) | بدون کودشیمیایی($F_1$) | ۰/۲۴ b | ۰/۷۸b | ۱۲/۱ ab | ۳۹/۶bc | ۴/۵ a | ۸/۰۳a | ۳۹/۵ a | ۲۹/۶c |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۰/۲۲ b | ۱/۱۷a | ۹/۹bc | ۵۹/۵a | ۴/۷ a | ۸/۴۷a | ۴۳/۳ a | ۲۰/۱d |
| ۴۰درصد نیاز آبی($I_3$) | بدون کودشیمیایی($F_1$) | ۰/۲۴ b | ۰/۷۷b | ۱۱/۳ab | ۳۰/۴c | ۳/۹ a | ۵/۰۸b | ۴۲/۶ a | ۲۹/۱c |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۰/۲۲ b | ۰/۶۲bc | ۱۳/۱ a | ۴۳/۱b | ۵/۱ a | ۸/۲۵a | ۴۱/۵ a | ۳۱/۱ c |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۳۳ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر درصد روغن، سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| بیوچار (%) | کود شیمیایی | درصد روغن | | عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) | | اسیدپالمیتیک (درصد) | | اسید اولئیک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| بدون بیوچار($B_1$) | بدون کودشیمیایی($F_1$) | ۲۱/۶ a | ۲۴/۹ c | ۲۳۹/۹a | ۲۱۴/۷ d | ۱۱/۲ ab | ۰/۱۴ a | ۴۵/۳ a | ۱۹/۴ bc |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۲۲/۲ a | ۳۰/۵ ab | ۲۳۰/۲ a | ۲۸۷/۴ ab | ۷/۵ c | ۰/۱۵ a | ۴۲/۳ a | ۱۹/۸ bc |
| ۱۰ تن در هکتار بیوچار($B_2$) | بدون کودشیمیایی($F_1$) | ۲۳/۱ a | ۲۷/۱ bc | ۲۴۳/۲ a | ۲۷۴/۵ bc | ۱۱/۴ab | ۰/۱۷ a | ۴۴/۴ a | ۲۲/۷ ab |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۲۲/۴ a | ۳۱/۹ a | ۲۶۹/۱ a | ۳۳۵/۵ a | ۹/۹ bc | ۰/۱۸ a | ۴۶/۶ a | ۱۹/۳ bc |
| ۲۰ تن در هکتار بیوچار($B_3$) | بدون کودشیمیایی($F_1$) | ۲۱/۹ a | ۲۷/۵bc | ۲۲۲/۳ a | ۲۵۴/۴bcd | ۱۲/۵ a | ۰/۱۶ a | ۴۲/۸ a | ۱۷/۹ c |
| | باکودشیمیایی($F_2$) | ۲۱/۸ a | ۲۳/۹c | ۲۷۳/۵ a | ۲۳۰/۷cd | ۱۳/۲ a | ۰/۱۷ a | ۴۴/۶ a | ۲۵/۸ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۳۴-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (درصد) | تیمار کودی | عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) | | اسید پالمیتیک (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1F_1$ | ۲۳۰efgh | ۲۳۰efgh | ۱۳/۲ ab | /۲۸cdef |
| | $B_1F_2$ | ۴۲۳ a | ۴۲۳/۳۳a | ۸/۱ de | ۲۴/۰۳ ef۲۶ |
| | $B_2F_1$ | ۳۷۳ abc | ۳۷۳abc | ۱۱/۱abcd | ۳۱/۳۴cdef |
| | $B_2F_2$ | ۴۰۶ ab | ۴۰۶ab | ۲/۳ f | ۲۶/۶۲cdef |
| | $B_3F_1$ | ۳۲۲bcd | ۳۲۲/۶۶bcd | ۱۰/۹abcd | ۲۴/۹۵def |
| | $B_3F_2$ | ۳۴۶ abcd | ۳۴۶/۶۶abcd | ۱۲/۳ abcd | ۳۵/۰۶bcde |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1F_1$ | ۲۶۴ defg | ۲۶۴/۶۶defg | ۸/۳ cde | ۳۹/۷۳bcde |
| | $B_1F_2$ | ۲۷۶ defg | ۲۷۶/۳۳defg | ۴/۲ ef | ۴۶/۳۰abcd |
| | $B_2F_1$ | ۲۶۲ defg | ۲۶۲defg | ۱۴/۷a | ۴۷/۶۰abc |
| | $B_2F_2$ | ۳۰۶ cde | ۳۰۶/۴۰cde | ۱۲/۴ abc | ۶۶/۱۲a |
| | $B_3F_1$ | ۲۳۱efgh | ۲۳۱/۶۶efgh | ۱۲/۹ ab | ۳۱/۶۴cdef |
| | $B_3F_2$ | ۱۹۶ gh | ۱۹۶/۶۶gh | ۱۳/۱ ab | ۶۶/۳۰a |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1F_1$ | ۱۴۹ h | ۱۴۹/۶۶h | ۱۲/۲abcd | ۱۲/۶۰f |
| | $B_1F_2$ | ۱۶۲ h | ۱۶۲/۶۶h | ۱۰/۱ bcd | ۳۰/۸۳cdef |
| | $B_2F_1$ | ۱۸۸ gh | ۱۸۸/۶۶gh | ۸/۱cde | ۳۹/۲۵bcde |
| | $B_2F_2$ | ۲۹۴ cdef | ۲۹۴/۱۹cdef | ۱۴/۹a | ۵۵/۰۸ab |
| | $B_3F_1$ | ۲۰۹fgh | ۲۰۹fgh | ۱۳/۶ab | ۳۹/۴۰ bcde |
| | $B_3F_2$ | ۱۴۹ h | ۱۴۹h | ۱۴/۳ ab | ۴۳۰/۱۲bcde |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۳۴-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (درصد) | تیمار کودی | اسیداستئاریک (درصد) ۱۳۹۴-۹۵ | اسیداستئاریک (درصد) ۹۶-۱۳۹۵ | اسیداولئیک (درصد) ۱۳۹۴-۹۵ | اسیداولئیک (درصد) ۹۶-۱۳۹۵ | اسیدلینولنیک (درصد) ۹۵-۱۳۹۴ | اسیدلینولنیک (درصد) ۹۶-۱۳۹۵ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1F_1$ | ۳۹/۳defg | ۵۰/۸ a | ۴۶/۱abc | ۱۹/۱ bc | ۳/۳def | ۴/۶c |
| | $B_1F_2$ | ۳۸/۶ defg | ۵۷/۱a | ۴۶/۶ abc | ۱۷/۶ bc | ۴/۹ bcd | ۳/۹ c |
| | $B_2F_1$ | ۴۰/۵ cdefg | ۴۳/۴a | ۴۴/۷ abc | ۱۸/۳ bc | ۲/۵ f | ۶/۱bc |
| | $B_2F_2$ | ۳۹/۷ cdefg | ۶۷/۷a | ۵۱/۳ a | ۱۹/۳ bc | ۶/۲ ab | ۳/۹ c |
| | $B_3F_1$ | ۲۹/۲h | ۲۸/۹a | ۵۲/۸ a | ۲۰/۸ b | ۴/۷bcd | ۵/۶ bc |
| | $B_3F_2$ | ۳۷/۷ defg | ۳۴/۲a | ۴۷/۴ abc | ۲۴/۱ ab | ۴/۲ cdef | ۵/۷ bc |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1F_1$ | ۴۴/۱ bcd | ۲۶/۶a | ۴۲/۵ abc | ۱۸/۱ bc | ۴/۱cdef | ۶/۱bc |
| | $B_1F_2$ | ۳۹/۴ defg | ۱۹/۱a | ۴۸/۶ ab | ۲۲/۷ ab | ۵/۷ abc | ۷/۹ b |
| | $B_2F_1$ | ۳۲/۴ gh | ۲۷/۷a | ۳۷/۵ cd | ۲۴/۶ ab | ۶/۷a | ۱۲/۵a |
| | $B_2F_2$ | ۴۷/۸ abc | ۲۰/۸a | ۳۹/۶ bcd | ۱۹/۱ bc | ۴/۴ cde | ۱۱/۶ a |
| | $B_3F_1$ | ۴۲/۲bcdef | ۳۴/۶a | ۴۴/۶ abc | ۲۰/۱ bc | ۲/۸ ef | ۵/۵ bc |
| | $B_3F_2$ | ۴۲/۶ bcde | ۲۰/۳a | ۴۲/۶ abc | ۲۳/۸ ab | ۴/۱ cdef | ۵/۸ bc |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1F_1$ | ۴۰/۶cdefg | ۲۶/۶a | ۴۷/۴ abc | ۲۱/۱ b | ۳/۶def | ۴/۱ c |
| | $B_1F_2$ | ۵۵/۳ a | ۳۱/۳a | ۳۱/۸ d | ۱۹/۲ bc | ۴/۹bcd | ۴/۸c |
| | $B_2F_1$ | ۳۸/۳ defg | ۲۸/۲a | ۵۱/۱a | ۲۵/۱ab | ۳/۴def | ۶/۷bc |
| | $B_2F_2$ | ۳۴/۳ fgh | ۳۰/۱a | ۴۹/۱ab | ۱۹/۵bc | ۴/۴cde | ۱۳/۵a |
| | $B_3F_1$ | ۴۹/۴ab | ۳۲/۲a | ۳۱/۱d | ۱۲/۸c | ۴/۶bcd | ۴/۴c |
| | $B_3F_2$ | ۳۴/۸efgh | ۳۱/۸a | ۴۳/۹ abc | ۲۹/۵a | ۵/۷abc | ۶/۴bc |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، $I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی، $F_2$: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۳۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | درصد روغن | عملکرد روغن | اسید مریستیک | اسید پالمیتیک |
|---|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۸۱۱ * | ۱۰۶۴۹ ns | ۶/۱۵** | ۲۵۳۷۳** |
| بلوک(سال) | ۴ | ۱۶۳ ns | ۴۳۶۰۸ ns | ۰/۰۷ ns | ۳۰۳ ns |
| آبیاری | ۲ | ۲۴۹** | ۱۳۵۹۹۵** | ۰/۳۹** | ۱۶۱۳** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۲۱۸ ns | ۲۴۶۷۶ ns | ۰/۶۱** | ۱۳۳۷** |
| خطای اصلی | ۸ | ۴۵/۸ | ۱۲۳۳۹ | ۰/۰۱ | ۵۹/۶ |
| بیوچار | ۲ | ۴۸/۶* | ۱۵۹۷۲** | ۰/۱۹** | ۶۶۷ ** |
| کودشیمیایی | ۱ | ۳۳/۶ | ۲۳۶۰۲** | ۰/۱۵** | ۴۹۴** |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۲۹/۹* | ۲۹۷۳ ns | ۰/۲۷** | ۲۰۲** |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۳۸/۵ ns | ۳۶۲۳ ns | ۰/۱۹ ** | ۳۳۰ ** |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۶۱/۵* | ۲۰۱۰ ns | ۰/۰۱ ns | ۱۴۵ ns |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۵۴/۱** | ۱۱۲۸۶** | ۰/۰۱ ns | ۳۶۸** |
| سال×بیوچار | ۲ | ۲۰/۲ ns | ۶۷۰۳ ns | ۰/۱۱** | ۳۳۹ ** |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۳۷/۹ ns | ۱۳۵۶ ns | ۰/۰۴ ns | ۹۰۵ ** |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۲۴ ns | ۱۹۹۰ ns | ۰/۲۳ ** | ۱۹۶ ** |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۱۳/۳ ns | ۵۱۵۸ ns | ۰/۱۹ ** | ۱۴۱ ns |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۵۶/۲* | ۱۴۶۲۸** | ۰/۰۶ ** | ۴۵/۴ ns |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۲/۶ ns | ۴۵۸۹ ns | ۰/۰۴ ns | ۲۴۹ ** |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۱۳/۸ | ۲۸۳۲ | ۰/۰۲ | ۸۶/۶ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۱۴/۹ | ۲۰/۷ | ۲۹/۶ | ۱۶/۴ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۴-۳۵- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | اسید لینولئیک | اسید اولئیک | اسید استئاریک |
|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۱۲۲ * | ۱۵۰۰۵** | ۱۱۸۷ * |
| بلوک(سال) | ۴ | ۱۴/۹$^{ns}$ | ۱۴۵$^{ns}$ | ۴۰۳$^{ns}$ |
| آبیاری | ۲ | ۲۸/۴** | ۵۵/۳ $^{ns}$ | ۷۰۶** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۱۹/۱** | ۱۵۱ * | ۱۶۲۹** |
| خطای اصلی | ۸ | ۲/۴ | ۲۲۹ | ۱۱۱ |
| بیوچار | ۲ | ۴۴/۹** | ۲۲/۸$^{ns}$ | ۱۵۶* |
| کودشیمیایی | ۱ | ۲۳/۶** | ۲۶/۲ $^{ns}$ | ۴۴/۸$^{ns}$ |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۱۷/۸** | ۱۱۵* | ۳۸۱** |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۹/۹ * | ۱/۶ $^{ns}$ | ۱۹۶* |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۲ $^{ns}$ | ۱۰۱* | ۱۰۶$^{ns}$ |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۸/۱** | ۲۰۶** | ۱۳۸* |
| سال×بیوچار | ۲ | ۳۵/۸ ** | ۱۹/۷ $^{ns}$ | ۷۶/۳ $^{ns}$ |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۲$^{ns}$ | ۱۱/۶ $^{ns}$ | ۳/۷$^{ns}$ |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۹/۸** | ۷۰/۴ $^{ns}$ | ۱۴۸* |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۱۱/۳** | ۲۱/۱ $^{ns}$ | ۲۷۸** |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۱/۱$^{ns}$ | ۸۶/۱* | ۷/۵$^{ns}$ |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۷/۸** | ۲۳/۸* | ۱۴۳* |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۲/۱ | ۳۱/۹ | ۵۴/۸ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۲۵/۸ | ۱۷/۳ | ۲۰ |

ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۳۶- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر درصد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| فاکتور | سطوح | درصد روغن | اسید مریستیک (درصد) | اسید پالمیتیک (درصد) | اسید لینولئیک (درصد) | اسید اولئیک (درصد) | اسید استئاریک (درصد) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سال | اول | ۲۲/۱ b | ۰/۲۵ b | ۱۰/۹ b | ۴/۵ b | ۴۴/۴ a | ۴۰/۳ a |
| | دوم | ۲۷/۶ a | ۰/۷۳ a | ۴۱/۶ a | ۶/۶ a | ۲۰/۸ b | ۳۳/۷ b |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۲۷/۲ a | ۰/۴۰ b | ۱۹/۴ c | ۴/۶ c | ۳۴/۱ a | ۴۱/۸ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۲۵/۵ a | ۰/۶۰ a | ۳۲/۸ a | ۶/۴ a | ۳۲/۱ a | ۳۶/۱ b |
| | ۴۰($I_3$) | ۲۲/۱ b | ۰/۴۶ b | ۲۶/۷ b | ۵/۵ b | ۳۱/۸ a | ۳۳/۱ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۲۴/۸ab | ۰/۴۱ b | ۲۱/۳ b | ۴/۸ b | ۳۱/۷ a | ۳۹/۱ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۲۶/۱ a | ۰/۵۵ a | ۲۸/۶a | ۶/۸ a | ۳۳/۳ a | ۳۷/۲ab |
| | ۲۰($B_3$) | ۲۳/۸ b | ۰/۵۰ a | ۲۸/۹ a | ۵/۱ b | ۳۲/۸ a | ۳۴/۸ b |
| کودشیمیایی (کیلوگرم درهکتار) | بدون کود($F_1$) | ۲۴/۳ a | ۰/۴۵ b | ۲۴/۱ b | ۵/۱ b | ۳۲/۱ a | ۳۶/۳ a |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۲۵/۸ a | ۰/۵۳ a | ۲۸/۴ a | ۶/۱ a | ۳۳/۱ a | ۳۷/۶ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۳۷-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر درصد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| آبیاری (%) | تیمار کودی | درصد روغن | اسید مریستیک (درصد) | اسید پالمیتیک (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰درصد نیاز آبی ($I_1$) | $B_1F_1$ | ۲۱/۱fgh | ۰/۳۴ h | ۲۱/۴defg |
| | $B_1F_2$ | ۳۰/۱ a | ۰/۵۳cdef | ۱۶/۱ fgh |
| | $B_2F_1$ | ۲۸/۳ ab | ۰/۳۵gh | ۲۱/۲ defg |
| | $B_2F_2$ | ۳۰/۱ a | ۰/۴۶defgh | ۱۴/۵ gh |
| | $B_3F_1$ | ۲۷/۱ ab | ۰/۳۱h | ۱۹/۶ efgh |
| | $B_3F_2$ | ۲۶/۴ abcd | ۰/۴۲efgh | ۲۳/۶ cdef |
| ۷۰درصد نیاز آبی ($I_2$) | $B_1F_1$ | ۲۶/۱ abcde | ۰/۳۵gh | ۳۰/۷c |
| | $B_1F_2$ | ۲۸/۶ ab | ۰/۴۶defgh | ۲۵/۲ cde |
| | $B_2F_1$ | ۲۶/۱ abcde | ۰/۷۵ab | ۳۱/۲bc |
| | $B_2F_2$ | ۲۴/۴ bcdefg | ۰/۸۸a | ۳۹/۲ ab |
| | $B_3F_1$ | ۲۵/۲bcdef | ۰/۴۳efgh | ۲۵/۶ cde |
| | $B_3F_2$ | ۲۲/۴ defgh | ۰/۶۹bc | ۴۴/۶a |
| ۴۰درصد نیاز آبی ($I_3$) | $B_1F_1$ | ۲۲/۶ cdefgh | ۰/۴۰ fgh | ۱۲/۴ h |
| | $B_1F_2$ | ۲۰/۳ gh | ۰/۳۶gh | ۲۲/۱ defg |
| | $B_2F_1$ | ۲۰/۷ gh | ۰/۵۲defg | ۲۳/۷cdef |
| | $B_2F_2$ | ۲۶/۸ abc | ۰/۳۱h | ۴۱/۶a |
| | $B_3F_1$ | ۲۱/۹efgh | ۰/۶۰ bcd | ۳۱/۵bc |
| | $B_3F_2$ | ۱۹/۷h | ۰/۵۷cde | ۲۸/۷ cd |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

ادامه جدول۴-۳۷-مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی بر درصد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| آبیاری (%) | تیمار کودی | اسیداستئاریک | اسیداولئیک | اسیدلینولئیک |
|---|---|---|---|---|
| ۱۰۰درصد نیاز آبی (I1) | $B_1F_1$ | ۴۵/۱ abc | ۳۲/۶abc | ۴/۰۲e |
| | $B_1F_2$ | ۴۷/۸ab | ۳۲/۱ abc | ۴/۴۹de |
| | $B_2F_1$ | ۴۱/۹bcde | ۳۱/۵abcd | ۴/۳۵e |
| | $B_2F_2$ | ۵۱/۲a | ۳۵/۳ abc | ۵/۰۱de |
| | $B_3F_1$ | ۲۹/۱h | ۳۶/۸ ab | ۵/۲۲cde |
| | $B_3F_2$ | ۳۵/۹defgh | ۳۵/۸ abc | ۵/۰۱de |
| ۷۰درصد نیاز آبی (I2) | $B_1F_1$ | ۳۵/۳defgh | ۳۰/۳ bcd | ۵/۱۰ de |
| | $B_1F_2$ | ۲۹/۲h | ۳۵/۵ abc | ۶/۸۲bc |
| | $B_2F_1$ | ۳۰/۱gh | ۳۱/۱ bcd | ۹/۶۶a |
| | $B_2F_2$ | ۳۴/۳efgh | ۲۹/۴ cd | ۸/۰۴ ab |
| | $B_3F_1$ | ۳۸/۴cdefg | ۳۲/۳ abc | ۴/۱۶e |
| | $B_3F_2$ | ۳۱/۵gh | ۳۳/۲abc | ۵/۰۳ de |
| ۴۰درصد نیاز آبی (I3) | $B_1F_1$ | ۳۳/۳fgh | ۳۴/۱ abc | ۳/۸۶ e |
| | $B_1F_2$ | ۴۳/۳abcd | ۲۵/۵ de | ۴/۸۸ de |
| | $B_2F_1$ | ۳۳/۲fgh | ۳۸/۱a | ۵/۱۰de |
| | $B_2F_2$ | ۳۲/۲gh | ۳۴/۳abc | ۸/۹۵ a |
| | $B_3F_1$ | ۴۰/۹bcdef | ۲۲/۱e | ۴/۵۳de |
| | $B_3F_2$ | ۳۳/۳ fgh | ۳۶/۷ ab | ۶/۱۰cd |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۳۸- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد اسانس، عملکرد اسانس، درصد تیموکینون و درصد سایمن در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | درصد اسانس | | عملکرداسانس | | درصدتیموکینون | | درصد پی‌سایمن | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بلوک | ۲ | ۰/۰۰۰۵ $^{ns}$ | ۰/۰۰۹$^{ns}$ | ۱۱/۱ $^{ns}$ | ۰/۲ $^{ns}$ | ۱۱/۵ $^{ns}$ | ۱۰۶ $^{ns}$ | ۸/۱ $^{ns}$ | ۱۱۱ $^{ns}$ |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۲ $^{**}$ | ۰/۰۹$^{**}$ | ۱۷/۸ $^{ns}$ | ۴/۲ $^{ns}$ | ۸۱۲ $^{**}$ | ۶۹/۱$^{ns}$ | ۵۷۱ $^{**}$ | ۱۵۲ $^{ns}$ |
| خطای اصلی | ۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۶ | ۴/۱ | ۲/۳ | ۲۰/۶ | ۵۴/۶ | ۱۱/۴ | ۱۱۵ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۰۵ $^{ns}$ | ۰/۰۱ $^{**}$ | ۰/۳ $^{ns}$ | ۹/۷ $^{**}$ | ۲۱/۴ $^{ns}$ | ۲۴۱ $^{**}$ | ۳۶/۹ $^{ns}$ | ۵۳/۱ $^{ns}$ |
| آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۱$^{**}$ | ۰/۰۱ $^{**}$ | ۸/۴$^{*}$ | ۳/۵ $^{*}$ | ۹۲/۸$^{**}$ | ۲۶/۵ $^{ns}$ | ۵/۸ $^{ns}$ | ۸۶/۶ $^{ns}$ |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۱ $^{ns}$ | ۰/۰۰۴ $^{ns}$ | ۸/۸ $^{ns}$ | ۰/۰۶ $^{ns}$ | ۱۶/۶ $^{ns}$ | ۶ $^{ns}$ | ۱۴/۱ $^{ns}$ | ۶۹/۸ $^{ns}$ |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۱ $^{ns}$ | ۰/۰۰۱ $^{ns}$ | ۳/۲ $^{ns}$ | ۰/۰۱ $^{ns}$ | ۱۵۴ $^{**}$ | ۱۴۱ $^{ns}$ | ۱۴۰ $^{**}$ | ۵۱/۳ $^{ns}$ |
| بیوچار× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۵ $^{ns}$ | ۰/۰۱ $^{ns}$ | ۶/۸ $^{ns}$ | ۰/۷۳$^{ns}$ | ۳۳۰ $^{**}$ | ۳۷۱ $^{**}$ | ۴/۴ $^{ns}$ | ۳۸۹ $^{**}$ |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۱ $^{ns}$ | ۰/۰۰۲ $^{ns}$ | ۸/۶$^{*}$ | ۰/۶۳$^{ns}$ | ۲۱۵ $^{**}$ | ۱۰۶ $^{ns}$ | ۱۲/۶ $^{ns}$ | ۱۳۱ $^{ns}$ |
| خطای فرعی | ۳۰ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۶ | ۲/۹ | ۱/۲ | ۱۹/۶ | ۴۸/۱ | ۱۸/۲ | ۲۴/۱ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۱۴/۱ | ۱۲/۱ | ۲۴/۱ | ۱۸/۷ | ۱۶/۹ | ۲۷/۹ | ۱۶/۸ | ۲۸/۲ |

Ns ، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۳۹- مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب سیاه دانه در سال اول و دوم

| فاکتور | سطوح | درصد اسانس | | عملکرد اسانس (کیلوگرم در هکتار) | | درصد تیموکینون | | درصد پی‌سایمن | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۰/۶۱ b | ۰/۵۶ b | ۷/۷ a | ۵/۹ a | ۳۳/۲ a | ۲۲/۷ a | ۲۰/۱ a | ۱۴/۱ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۰/۶۶ ab | ۰/۶۷ a | ۷/۶ a | ۶/۵ a | ۲۵/۵ b | ۲۶/۶ a | ۱۴/۸ b | ۲۰/۱ a |
| | ۴۰($I_3$) | ۰/۶۷ a | ۰/۶۸ a | ۵/۹ a | ۵/۵ a | ۱۹/۸ c | ۲۵/۱ a | ۸/۷ c | ۱۷/۱ a |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۰/۶۵ a | ۰/۶۱ b | ۷/۱ a | ۵/۳ b | ۲۴/۹ a | ۲۰/۸ b | ۱۳/۷ a | ۱۶/۳ a |
| | ۱۰($B_2$) | ۰/۶۴ a | ۰/۶۶ a | ۷/۱ a | ۶/۷ a | ۲۶/۵ a | ۲۸/۱ a | ۱۳/۳ a | ۱۶/۹ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۰/۶۵ a | ۰/۶۵ab | ۷/۲ a | ۵/۹ b | ۲۷/۱ a | ۲۵/۶ a | ۱۶/۶ a | ۱۹/۱ a |
| کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار) | بدون کود($F_1$) | ۰/۶۴ a | ۰/۶۵ a | ۶/۷ a | ۵/۹ a | ۲۵/۶ a | ۲۵/۱ a | ۱۴/۸ a | ۱۶/۲ a |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۰/۶۵ a | ۰/۶۳ a | ۷/۵ a | ۶/۱ a | ۲۶/۷ a | ۲۴/۵ a | ۱۴/۱ a | ۱۸/۲ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۴۰ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × بیوچار بر درصد اسانس، عملکرد اسانس ودرصد تیموکینون سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| آبیاری (%) | بیوچار | درصداسانس | | عملکرداسانس (کیلوگرم در هکتار) | | درصدتیموکینون | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ | ۹۵-۱۳۹۴ | ۹۶-۱۳۹۵ |
| ۱۰۰درصد نیاز آبی($I_1$) | $B_1$ | ۰/۶۶abc | ۰/۵۵d | ۹/۳a | ۵/۷bc | ۲۷/۹bc | ۱۶/۶a |
| | $B_2$ | ۰/۶۰bc | ۰/۵۶ cd | ۷/۳ab | ۶/۳ b | ۳۶/۴a | ۲۸/۳a |
| | $B_3$ | ۰/۵۶c | ۰/۵۶cd | ۶/۹abc | ۵/۸ b | ۳۵/۱a | ۲۳/۳a |
| ۷۰درصد نیاز آبی($I_2$) | $B_1$ | ۰/۶۳abc | ۰/۶۵bc | ۷/۰۱abc | ۵/۸ b | ۲۹/۱b | ۲۴/۱a |
| | $B_2$ | ۰/۶۸ab | ۰/۷۵ a | ۸/۳a | ۸/۱a | ۲۳/۷cd | ۲۹/۱a |
| | $B_3$ | ۰/۶۶abc | ۰/۶۳ bcd | ۷/۷ab | ۵/۷bc | ۲۳/۹bcd | ۲۶/۶a |
| ۴۰درصد نیاز آبی($I_3$) | $B_1$ | ۰/۶۵abc | ۰/۶۳ bcd | ۵/۰۱c | ۴/۴c | ۱۷/۸e | ۲۱/۷a |
| | $B_2$ | ۰/۶۵abc | ۰/۶۸ab | ۵/۸bc | ۵/۹ b | ۱۹/۵de | ۲۶/۶a |
| | $B_3$ | ۰/۷۳ a | ۰/۷۵a | ۷/۱ab | ۶/۳b | ۲۲/۱de | ۲۶/۹a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

جدول۴-۴۱ – مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه بیوچار×کودشیمیایی بر درصد تیموکینون و درصد پی‌سایمن سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| بیوچار (%) | کود شیمیایی | درصد تیموکینون | | درصد پی‌سایمن | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ | ۱۳۹۴-۹۵ | ۱۳۹۵-۹۶ |
| بدون بیوچار $(B_1)$ | بدون‌کودشیمیایی $(F_1)$ | ۲۲/۱ b | ۲۰/۶ c | ۱۳/۳a | ۱۳/۵ b |
| | باکودشیمیایی $(F_2)$ | ۲۷/۷ a | ۲۱/۱ c | ۱۳/۷a | ۱۸/۱ ab |
| ۱۰ تن در هکتار بیوچار $(B_2)$ | بدون‌کودشیمیایی $(F_1)$ | ۲۳/۳ b | ۲۴/۱ bc | ۱۴/۳a | ۱۴/۶ b |
| | باکودشیمیایی $(F_2)$ | ۲۹/۸ a | ۳۱/۹ a | ۱۳/۵ a | ۲۴/۲ a |
| ۲۰ تن در هکتار بیوچار $(B_3)$ | بدون‌کودشیمیایی $(F_1)$ | ۳۱/۴ a | ۳۰/۸ab | ۱۶/۹ a | ۲۰/۵ ab |
| | باکودشیمیایی $(F_2)$ | ۲۲/۶ b | ۲۰/۵c | ۱۵/۳ a | ۱۲/۴ b |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار، $B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی، $F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۴-۴۲- تجزیه واریانس مرکب اثرتیمارهای مورد مطالعه بر درصد اسانس، عملکرد اسانس، درصدتیموکینون و درصدسایمن در سیاه دانه در سال اول و دوم آزمایش

| منابع تغییر | درجه آزادی | درصداسانس | عملکرداسانس | تیموکینون | سایمن |
|---|---|---|---|---|---|
| سال | ۱ | ۰/۰۰۴$^{ns}$ | ۳۴/۳* | ۴۷/۹$^{ns}$ | ۲۲۳$^{ns}$ |
| بلوک(سال) | ۴ | ۰/۰۰۵$^{ns}$ | ۵/۶$^{ns}$ | ۵۸/۹$^{ns}$ | ۴۹/۹$^{ns}$ |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۸۲** | ۱۷/۷** | ۲۸۳** | ۴۷۷** |
| سال×آبیاری | ۲ | ۰/۰۱۹$^{ns}$ | ۴/۲$^{ns}$ | ۵۹۷** | ۵۷۶** |
| خطای اصلی | ۸ | ۰/۰۰۶ | ۳/۲ | ۳۷/۶ | ۶۹/۲ |
| بیوچار | ۲ | ۰/۰۰۲$^{ns}$ | ۵/۷* | ۱۹۳** | ۸/۹** |
| کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۰۰۹$^{ns}$ | ۵/۴$^{ns}$ | ۱/۳$^{ns}$ | ۸۶/۵** |
| آبیاری× بیوچار | ۴ | ۰/۰۳۲** | ۱۰/۱** | ۱۰۱* | ۱۰۴* |
| آبیاری× کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۰۶$^{ns}$ | ۱/۸$^{ns}$ | ۱۲۹* | ۲۱۶** |
| بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۱۲** | ۳/۵$^{ns}$ | ۶۷۹** | ۳۰۳** |
| آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۱۴* | ۴/۳$^{ns}$ | ۹۰/۸* | ۷۷/۲** |
| سال×بیوچار | ۲ | ۰/۰۱۳$^{ns}$ | ۴/۲$^{ns}$ | ۷۰/۱** | ۷۹/۹$^{ns}$ |
| سال×کودشیمیایی | ۱ | ۰/۰۰۷$^{ns}$ | ۳/۶$^{ns}$ | ۲۱/۳* | ۴۰/۵$^{ns}$ |
| سال×آبیاری×بیوچار | ۴ | ۰/۰۰۹$^{ns}$ | ۱/۹$^{ns}$ | ۱۸/۱$^{ns}$ | ۱۰۸* |
| سال×آبیاری×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۱$^{ns}$ | ۱/۵$^{ns}$ | ۱۶۶* | ۶۲/۱$^{ns}$ |
| سال× بیوچار×کودشیمیایی | ۲ | ۰/۰۰۵$^{ns}$ | ۴/۱$^{ns}$ | ۲۲/۸$^{ns}$ | ۱۱۵$^{ns}$ |
| سال×آبیاری× بیوچار ×کودشیمیایی | ۴ | ۰/۰۰۴$^{ns}$ | ۴/۹$^{ns}$ | ۲۳۱** | ۸۷/۶* |
| خطای فرعی | ۶۰ | ۰/۰۰۷ | ۲/۱ | ۳۳/۹ | ۳۸/۷ |
| ضریب تغییرات(٪) | | ۱۳/۴ | ۲۲/۱ | ۲۲/۸ | ۲۲/۷ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول۴-۴۳- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر عملکرد اسانس سیاه دانه حاصل از تجزیه مرکب دو ساله

| فاکتور | سطوح | عملکرد اسانس (کیلوگرم در هکتار) |
|---|---|---|
| سال | اول | ۷/۱ a |
| | دوم | ۶/۱ b |
| آبیاری (درصد) | ۱۰۰($I_1$) | ۶/۸ a |
| | ۷۰($I_2$) | ۷/۱ a |
| | ۴۰($I_3$) | ۵/۷ b |
| بیوچار (تن درهکتار) | ۰($B_1$) | ۶/۱ b |
| | ۱۰($B_2$) | ۶/۹ a |
| | ۲۰($B_3$) | ۶/۶ ab |
| کودشیمیایی (کیلوگرم درهکتار) | بدون کود($F_1$) | ۶/۳ a |
| | با مصرف کود($F_2$) | ۶/۸ a |

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

$I_1$ : آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی ، $I_2$ :آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی ،$I_3$ :آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی

$B_1$ ، بدون مصرف بیوچار ،$B_2$: ۱۰تن در هکتار بیوچار، $B_3$: ۲۰تن در هکتار بیوچار

$F_1$ ، بدون مصرف کودشیمیایی ،$F_2$ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول۴-۴۴- میانگین اجزای شناسایی شده در اسانس سیاه دانه در طی دو سال آزمایش

| نام ترکیب | مقدار (درصد) |
|---|---|
| α-Pinene | ۲/۲ |
| Sabinene | ۱/۴ |
| β-Pinene | ۲/۳۳ |
| Myrcene | ۱/۶ |
| ρ-Cymene | ۱۴/۰۸ |
| γ-Terpinene | ۱/۵ |
| Limonene | ۷/۶ |
| α-Thujene | ۸/۲ |
| Thymoquinone | ۲۵/۱۹ |
| *n*-Hexadecane | ۱۰ |
| Carvone | ۵/۳ |
| Octadecadienoic acid | ۱۲ |
| Carvacrol | ۸/۶ |

## مراجع


۱. احمدیان ا. قنبری ا. سیاه سر ب. حیدری م. رمرودی م. و موسوی نیک س.م، (۱۳۸۹) "اثر بقایای کود شیمیایی، دامی و کمپوست بر عملکرد، اجزای عملکرد، برخی خصوصیات فیزیولوژیک و میزان اسانس بابونه تحت شرایط تنش خشکی" **نشریه پژوهشهای زراعی ایران**، جلد ۸، شماره ۴: ص ۶۶۸-۶۷۶.

۲. اصفهانی م. صدرزاده س. م. کاووسی م. دباغ‌محمدی‌نسب ع، (۱۳۸۴ ) "بررسی اثر مقادیر مختلف کود نیتروژن و پتاسیم بر عملکرد، اجزای عملکرد و رشد برنج رقم خزر" **مجله علوم زراعی ایران**، جلد ۷، شماره ۳: ص ۲۴۰-۲۲۶.

۳. امیدبیگی ر، (۱۳۸۶ ) "**تولید و فراوری گیاهان دارویی**" انتشارات آستان قدس رضوی، جلد سوم، چاپ چهارم، ۳۹۷ صفحه.

۴. آلیاری ه. شکاری ف. و شکاری ف، (۱۳۷۹) "**دانه‌های روغنی**" انتشارات عمیدی، تبریز، ۱۸۲ صفحه.

۵. حشمتی س. امینی دهقی م. و فتحی امیرخیز ک، (۱۳۹۶) "تأثیر کاربرد کودهای زیستی و شیمیایی فسفر بر عملکرد دانه، عملکرد روغن و اسیدهای چرب گلرنگ بهاره در شرایط کمبود آب" **علوم گیاهان زراعی ایران**، جلد ۴۸ شماره ۱: ص ۱۶۹-۱۵۹.

۶. حمزه‌ای ج. بابایی م. و خرم دل س، (۱۳۹۴) "اثر رژیمهای مختلف آبیاری و سطوح نیتروژن بر تولید میوه، کیفیت روغن، کارآیی مصرف آب و کارآیی زراعی نیتروژن در کدوی تخمه کاغذی ( *Cucurbita pepo* L.) " **نشریه بوم شناسی کشاورزی**، جلد۷، شماره ۱: ص ۱۰۸-۹۹.

۷. حیدری م. جهان تیغی ح، (۱۳۹۱) " تأثیر تنش خشکی و مقادیر کود نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه، درصد اسانس و میزان تیموکینون گیاه دارویی سیاهدانه (*Nigella sativa* L)" **مجله تنشهای محیطی در علوم زراعی**،جلد ۵، شماره ۱، ص ۴۰ -۳۳

۸. حیدری م. جهان تیغی ح،( ۱۳۹۲) " ارزیابی اثر تنش خشکی و مقادیر مختلف کود نیتروژن بر خصوصیات کیفی دانه گیاه دارویی سیاه‌دانه" **نشریه پژوهشهای زراعی ایران**، جلد ۴، شماره ۱۱: ص۶۴۷-۶۴۰ .

۹. خواجه‌پور م.ر، ( ۱۳۸۵) " **گیاهان صنعتی**" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۵۶۴ صفحه.

۱۰. دیانت مهارلویی ز. و موسوی ع.ا، (۱۳۹۵) "تأثیر کمپوست و ضایعات میوه رسیده انجیر بر برخی ویژگیهای فیزیکی خاک سطحی" **نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)**، جلد ۳۰، شماره ۲: ص ۵۳۱-۵۲۲.

۱۱. رسولی ف، (۱۳۸۱) "**تأثیر سه کود آلی غنی شده با نیتروژن بر رشد و ترکیب شیمیایی برنج و اثرات باقیمانده آن بر گندم**"پایان نامه کارشناسی ارشد بخش خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۱۲. رضائی چیانه ا. زهتاب سلماسی س. قاسمی گلعذانی ک. و دل آذر ع، (۱۳۹۱) " اثر تیمارهای آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد سه توده بومی رازیانه" **دانش کشاورزی پایدار**، جلد۲۲، شماره۴: ص ۷۰-۵۵.

۱۳. رضائی چیانه ا. تاجبخش م. قیاسی م. و امیرنیا ر، (۱۳۹۴) " بررسی اثر تلفیقی کودهای آلی و شیمیایی بر عملکرد کمی و کیفی گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) تحت شرایط دیم" **پژوهش در گیاهان زراعی**، جلد ۳، شماره ۱: ص ۶۹-۵۵.

۱۴. رضوانی‌مقدم پ. سیدی س.م. و آزاد م، (۱۳۹۳الف) "اثرات کودهای آلی و بیولوژیک بر عملکرد و اجزای عملکرد سیاه دانه (*Nigella sativa* L.)" **نشریه پژوهشهای زراعی ایران**، جلد ۴، شماره ۱۲: ص ۵۶۷-۴۷۳.

۱۵. رضوانی‌مقدم  پ. سیدی س.م. و آزاد م، (۱۳۹۳ب) " مقایسه تأثیر منابع آلی، شیمیایی و بیولوژیک نیتروژن بر کارایی مصرف نیتروژن در (*Nigella sativa* L.) سیاهدانه" **دوماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران**، جلد ۳۰، شماره ۲: ص ۲۷۴-۲۶۰.

۱۶. زلفی باوریانی م. رونقی ع. کریمیان ن. قاسمی ر. و یثربی ج، (۱۳۹۵) "اثر بیوچار تهیه شده از کود مرغی در دماهای متفاوت بر ویژگیهای شیمیایی یک خاک آهکی" **نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)**. جلد ۲۰، شماره ۷۵: ص۸۶-۷۳.

۱۷. شبیری س. قاسمی گلعذانی ک. گلچین ا. و صبا ج، (۱۳۸۵) "تأثیر میزان آب آبیاری بر فنولوژی و عملکرد سه رقم نخود (*Cicer arietinum* L.)" **مجله دانش کشاورزی**، جلد ۱۶، شماره ۲: ص ۱۳۷-۱۴۷.

۱۸. شعبانزاده ش. رمرودی م. و گلوی م، (۱۳۹۰) "تأثیر محلول پاشی عناصر ریزمغذی بر عملکرد دانه و ویژگیهای کیفی سیاه دانه (*Nigella sativa* L.) در رژیمهای مختلف آبیاری" **مجله تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی**، جلد۱، شماره ۲: ص ۸۹-۷۹.

۱۹. شیدای کرکج ا. سپهری ع. بارانی ح. و معتمدی ج، (۱۳۹۶) " ارتباط ذخیره کربن آلی خاک با برخی ویژگیهای خاک در مراتع آذربایجان شرقی" **نشریهٔ علمی پژوهشی مرتع**، جلد ۱۱، شماره ۲: ص ۱۳۸-۱۲۵.

۲۰. صادقی نژاد ع.ا. مدرس ثانوی س.ع.م. طباطبایی س.ع. مدرس وامقی س.م، (۱۳۹۳) " اثر تنش کمبود آب در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام پاییزه کلزا ( *Brassica napus* L.)" **نشریه دانش آب و خاک** ، جلد ۲۴، شماره ۲: ص ۵۳-۶.

۲۱. صمصام شریعت ه، (۱۳۷۱ ) **"عصاره گیری و استخراج مواد موثره گیاهان دارویی و روش شناسایی و ارزشیابی آنها"** انتشارات مانی، ص۵۳-۷.

۲۲. صنوبر ع. دهقانی ف. و طباطبایی س.ع، (۱۳۸۹) " اثر دور آبیاری بر عملکرد، کارآیی مصرف آب و برخی از خصوصیات کیفی ارقام گندم" **مجله پژوهش آب در کشاورزی**، جلد ۴، شماره ۱: ص ۴۰-۳۱.

۲۳. ضیایی س. ت. محرری ن. و حسین زاده ح، (۱۳۹۱) بررسی اثر دارو شناسی و سم شناسی سیاه دانه. **فصلنامه گیاهان دارویی**، جلد ۱۱، ۲، شماره ۴۲: ص ۴۲-۱۶.

۲۴. عشقی زاده ح. کافیم. نظامی ا. خوشگفتارمنش ا.ح. وکرمی م، (۱۳۹۴) " تأثیر کم آبیاری و تنش شوری در تولید ارزن پادزهری بر برخی ویژگیهای شیمیایی خاک" **نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)** جلد ۱۹، شماره ۷۳: ص ۲۰۶-۱۹۱.

۲۵. علیزاده پ. فلاح س. و رئیسی ف، (۱۳۹۱) " بر همکنش منبع نیتروژن و تنش خشکی در مرحله گلدهی ذرت بر جذب و کارایی مصرف نیتروژن و فسفر" **نشریه آب و خاک**. جلد ۲۶، شماره۵ : ص۱۱۹۹-۱۱۹۰

۲۶. قربانلی م. بابائی آ. باباخانلو پ. و میرزا م، (۱۳۷۸) "بررسی اثر تنش آبی در مراحل رشد ونمو، کمیت و کیفیت اسانس و مقدار روغن دانه سیاهدانه (*Nigella sativa* L.)" **مجله علوم زراعی ایران**، جلد۳۰ ، شماره ۳ : ص۵۹۳-۵۸۵.

۲۷. کافی م. برزویی ا. صالحی م. کمندی ع. معصومی ع. و نباتی ج، (۱۳۸۸) "**فیزیولوژی تنشهای محیطی در گیاهان**" انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ۵۰۲ صفحه.

۲۸. کوچکی ع. جمشید عینی م. و سیدی س.م، (۱۳۹۳) " نقش اندازه بنه مادری و نوع کود بر کارایی مصرف نیتروژن در زعفران زراعی" **نشریه زراعت و فناوری زعفران**، جلد ۲، شماره ۴: ص ۲۵۴-۲۴۳.

۲۹. گلزردی ف.، (۱۳۹۵) "خشکی، خطری جدی برای تولیدات کشاورزی" **اثر آنلاین**، https://www.researchgate.net/publication/307583463

۳۰. مالکی خضرلو س. طهماسبی سروستانی ز. مدرس ثانوی س.ع. (۱۳۹۲) "ارزیابی عملکرد کمی و کیفی کدوی تخم پوست کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) تحت القای تنش کم آبی و کود نیتروژن" **دوماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران**، جلد۳۱، شماره ۵: ص ۸۶۳-۸۵۳.

۳۱. مجاب ف. نیک آور ب. جاویدنیا ک. رودگرآملی م.ع. (۱۳۸۲) " ترکیب شیمیایی اسانس و روغن سیاهدانه" **فصلنامه گیاهان دارویی**، شماره ۶: ص ۲۶-۲۲.

۳۲. مرادنیا س. نادری ر. و نجفی م، (۱۳۹۶) " ارزیابی ماندگاری تأثیر کاربرد کودهای آلی، اوره و سولفات روی بر ویژگیهای خاک در تناوب کلزا- گندم" **نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)**، جلد۲۱، شماره ۲: ص ۲۴۵-۲۳۵.

۳۳. ملکی ع. حیدری مقدم ع. سیادت س.ع. طهماسبی، ا. و فتحی ا، (۱۳۹۰) " اثر آبیاری تکمیلی بر عملکرد، اجزای عملکرد و درصد پروتئین دانه سه رقم نخود دیم در ایلام" **مجله علمی – پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی و علفهای هرز**، جلد ۵ شماره ۱۹: ص ۷۸-۶۵.

۳۴. موسی‌زاده م. برادران ر. و ثقه الاسلامی م .ج، (۱۳۸۹) "مطالعه اثر تراکم گیاهی و زمان محلول‌پاشی اوره بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص برداشت سیاه دانه (*Nigella sativa* L. )" **نشریه پژوهشهای زراعی ایران**، جلد۸، شماره ۱: ص ۴۸-۴۲.

۳۵. نجفی قیری م. و بوستانی ح.ر، (۱۳۹۶) " تأثیر کاربرد برخی بقایای گیاهان زراعی و تفاله شیرین بیان و بیوچار حاصل از آنها بر وضعیت پتاسیم یک خاک آهکی" **نشریه پژوهشهای حفاظت آب و خاک**، جلد ۲۴، شماره ۳: ص ۹۳-۷۷.

۳۶. نوروزپور ق. و رضوانی‌مقدم پ، (۱۳۸۴) " اثر دورهای مختلف آبیاری و تراکم بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی سیاهدانه (*Nigella sativa* L.)" **مجله پژوهشهای زراعی ایران**، جلد۳، شماره ۲: ص ۳۰۵-۳۱۵.

۳۷. نوروزپور ق. و رضوانی‌مقدم پ، (۱۳۸۵) " اثر فواصل مختلف آبیاری و تراکم بوته بر عملکرد( *Nigella*

*sativa*) روغن و اسانس دانه سیاهدانه" **پژوهش و سازندگی**، جلد ۷۳: ص۱۳۸-۱۳۳.

38. Abdel Rahman A. A. Shalaby F.A. and Monayeri M.O.E.I. (**1971**) "Effect of moisture stress on metabolic products and ions accumulation" **Plant Soil**, **34**, pp **65**.
39. Abubakari A.H. Bayor H. Takyi I. Chimsah F.A. Nyarko G. Atuah L. and Banful B. (**2016**) "Effect of compost-biochar mixes and irrigation on the growth and yield of Amaranthus (*Amaranthus hybridus*) under two growing temperatures" **African Journal of Agricultural Research**, **11**, **25**, pp **2257-2265**.
40. Adams R.P. (**1995**) "**Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography /Mass Spectroscopy**" Allured Publishing Co. IL.
41. Ahmad A.A. Husain A. Mujeeb M. Khan S.A. Najmi A.K., Siddique N.A. Damanhouri Z.A. and Anwar F. (**2013**) "A review on therapeutic potential of Nigella sativa: A miracle herb" **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, **3**, **5**, pp **337-352**.
42. Akhondian J. Parsa A. and Rakhshandeh H. (**2007**) "The effect of *Nigella sativa* (black cumin seed) on intractable pediatric seizures" **Medical Science Monitor**, **13**, pp **555-559**.
43. Akhtar S.S. Andersen M.N. and Liu F. (**2015**) "Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress" **Agricultural Water Management**., **158**, pp **61–68**.
44. Akhtar S.S. Li G. Andersen M.N. and Liu F. (**2014**) "Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation" **Agricultural Water Management, 138**, pp **37–44**.
45. Akom M. Boateng CH.O. Otoo1 E. and Dawoe E. (**2015**) "Effect of biochar and inorganic fertilizer in Yam (*Dioscorea rotundata Poir*) production in a forest agroecological zone" **Journal of Agricultural Science**, **7**, pp **211-222**.
46. Alam M. S. (**1999**) "**Nutrient uptake by plants under stress conditions**" In: M. Pessarakli (ed.), Hand book of plant and crop stress, Marcel, Dekker Inc., pp **285-315**.
47. Ali K. Arif M. and Jan T. (**2015**) "Integrated use of biochar: A tool for improving soil and wheat quality of degraded soil under soil wheat- maize cropping pattern" **Pakistan Journal of Botany**, **47**, **1** pp **233-240**.

48. Ali B.H. and Blunden G. (**2003**) "Pharmacological and toxicological properties of *Nigella sativa* " **Phytotherapy Research**, **17**, pp **299-305**.

49. AOAC (Association of Official Analytical Chemists), (**1995**) "**Official Methods of Analysis**"16th Edition. AOAC International, Gaithersburg, MD.

50. Ameloot N. Sleutel S. Das KC. Jegajeevagan K. and De Neve S. (**2015**) "Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: Effects on N mineralization and biological soil properties" **GCB Bioenergy**, **7**, pp **135–144**.

51. Artiola J.F. Rasmussen C. and Freitas R. (**2012**) "Effects of a biochar-amended alkaline soil on the growth of romaine lettuce and bermudagrass" **Soil Science**, **177**, pp **561–570.**

52. Asai H. Samson B.K. and Stephan H.M. (**2009**) "Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield" **Crop Research**, **111**, pp **81–84**.

53. Asdadi A. Harhar H. Gharby S. Bouzoubaâ Z. Yadini A.E. Moutaj R. Hadek M.E. Chebli B. and Hassani L.M.I. (**2014**) "Chemical composition and antifungal activity of *Nigella Sativa* L. oil seed cultivated in Morocco" **International Journal of Pharmaceutical Science Invention**, **3**, pp **9-15**.

54. Ashraf M. and Foolad M.R. (**2007**) "Roles of glycine, betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance" **Environmental and Experimental Botany**, **59**, pp **206-216**.

55. Ashrafi E. and Razmjoo K.h. (**2010**) "Effect of irrigation regimes on oil content and composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars" **Journal of American Oil Chemists Society**, **87**, pp **499-506**.

56. Atta M.B. (**2003**) "Some characteristics of nigella (*Nigella sativa* L.) seed cultivated in Egypt and its lipid profile" **Food Chemistry**, **83**, pp **871-876**.

57. Aziz E.E. Hendawy S.F. Ezz El-Din A.A and Omer E.A. (**2008**) "Effect of soil type and irrigation intervals on plant growth, essential oil yield and constituents of *Thymus vulgaris* plant" **American-Eurasian Journal Of Agricultural & Environmental Sciences**, **4**, pp **443-450**.

58. Badr A. Ibrahim O.M. Tawfik M. M. and Bahr A.A. (**2015**) "Management strategy for improving the productivity of wheat in newly reclaimed sandy soil" **International Journal of ChemTech Research**, **8**, **4**, pp **1438-1445**.

59. Badry B. and Salim M. (**2016**) “Influence of biochar and seaweed extract applications on growth, yield and mineral composition of wheat (*Triticum aestivum* L.) under sandy soil conditions” **Annals of Agricultural Science** , **61**, **2**, pp **257–265**.
60. Baiamonte G. De Pasquale C. Marsala V. Cimò G. Alonzo G. Crescimanno G. Conte P. (**2015**) “Structure alteration of a sandyclay soil by biochar amendments” **Journal of Soils and Sediments, 15**, pp **816–824**.
61. Bakry B. A. Ibrahim O.M. Eid A.R. and Abdelmoneim Badr A. (**2014**) “Effect of humic acid, mycorrhiza inoculation and biochar on yield and water use efficiency of flax under newly reclaimed sandy soil” **Agricultural Sciences**, **5**, pp **1427-1432**.
62. Batool A. Taj S. Rashid A. Khalid A. Qadeer S. Saleem AR. and Ghufran M.A. (**2015**) “Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench” **Frontiers in Plant Science**, **6**, **733**, doi: 10.3389/fpls.2015.00733.
63. Bellaloui N. Mengistu A. and Kassem A. (**2013**) “Effects of genetics and environment on fatty acid stability in soybean seed” **Journal of Food and Nutrition Sciences**, **4**, **9A**, pp **165-175**.
64. Berek A.K. Hue N. and Ahmad A. (**2011**) “Beneficial use of biochar to correct soilacidity”**The Food Provider**, http:www.ctahr.hawaii.edu/huen/nvh/biochar.
65. Biederman L.A. Harpole W.S. (**2013**) “Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling:A meta-analysis” **GCB Bioenergy**, **5**, pp **202–214**.
66. Bo L. Bi Z. and Xiong Z. (**2017**) “Dynamic responses of nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency to nitrogen and biochar amendment in an intensified vegetable field in southeastern China” **GCB Bioenergy, 9**, pp **400–413**.
67. Borchard N. Siemens J. and Ladd B. (**2014**) “Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice” **Soil Tillage Research, 144**, pp **184–194**.
68. Borken W. Savage K. Davidson EA. and Trumbore S.E. (**2006**) “Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil” **Global Change Biology, 12**, pp **177–193**.

69. Brantley K.E. Savin M.C. Brye K.R. and Longer D.E. (**2015**) "Pine woodchip biochar impact on soil nutrient concentrations and corn yield in a silt loam in the mid-southern U.S. agriculture" **Agriculture**, **5**, **1**, pp **30-47**.

70. Brodowski S. John B. Flessa H. and Amelung W. (**2006**) "Aggregate-occluded black carbon in soil" **European Journal of Soil Science**, **57**, pp **539–546**.

71. Bruck H. Payne W. and Sattelmacher B. (**2000**) "Effects of phosphorus and water supply on yield, transpirational water-use efficiency, and carbon isotype discrimination of pearl millet" **Crop science, 40**, **1**, pp **121-125**.

72. Bruun E.W. Ambus P. Egsgaard H. and Hauggaard-Nielsen H. (**2012**) "Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics" **Soil Biology and Biochemistry**, **46**, pp **73-79**.

73. Carmo D.L. Lima L.B. Silva C.A. (**2016**) "Soil fertility and electrical conductivity affected by organic waste rates and nutrient inputs. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 40, e0150152.

74. Carter C. Shackley S. Sohi S. Boun Suy T. and Haefele S. (**2013**) "The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*)" **Agronomy**, **3**, pp **404-418**.

75. Castaldi S. Riondino M. Baronti S. Esposito F.R. Marzaioli R. Rutigliano F.A. Vaccari F.P. and Miglietta F. (**2011**) "Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes" **Chemosphere, 85**, pp **1464–1471**.

76. Chan K.Y. and Xu Z.H. (**2009**) "Biochar – Nutrient properties and their enhancement" In: **Biochar for Environmental Management**, Science and Technology (eds. Lehmann J., and Joseph S), Earthscan Ltd. London.

77. Chan K.Y. Van Zwieten L. Meszaros I. Downie A. and Joseph S. (**2007**) "Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment" **Australian Journal of Soil Research 45**, pp **629-634**.

78. Chan K.Y.Van Zwieten L. Meszaros I. Downie A. and Joseph S. (**2008**) "Using poultry litter biochars as soil amendments" **Australian Journal of Soil Research**, **46**, pp **437–444**.

79. Charls D.J. Joly R.J. and Simon J.E. (**1990**) "Effects of osmoticstresson the essential oil content andcomposition of peppermint" **Phytochemistry**, **29**, **9**, pp **2837-2840**.

80. Chaudhry U.K. Shahzad S. Naqqash Abdul Saboor M.N. Yaqoob S. Salim M. and Khalid M. (**2016**) “Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.)” **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, **9**, **1**, pp **348-358**.

81. Cheikh-Rouhou S. Besbes S. Hentati B. Blecker C. Deroanne C. and Attia H. (**2007**) “*Nigella sativa* L. chemical composition and phytochemical characteristics of lipid fraction” **Food Chemistry, 101**, pp **673–681**.

82. Cheng C. H. Lehmann J. Thies J. E. Burton S. D. and Engelhard M. H. (**2006**) “Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes” **Organic Geochemistry**, **37**, **11**, pp. **1477-1488**.

83. Chun Y. Sheng G. Chiou C. T. and Xing B. (**2004**) “Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars” **Environmental Science and Technology**, **38**, pp **4649-4655**.

84. Clough T. Condron L. Kammann C. and Müller C. (**2013**) “A Review of biochar and soil nitrogen dynamics” **Agronomy**, **3**, pp **275–293**.

85. Colling J. Stander MA. Makunga NP. (**2010**) “Nitrogen supply and abiotic stress influence canavanine synthesis and the productivity of in vitro regenerated Sutherlandia frutescens microshoots” **Journal of Plant Physiology**, **15**, **167**, **17** pp **1521-1524**.

86. Collison M.L. Collison R. Sakrabani B. Tofield Z. Wallage. (**2009**) “Biochar and Carbon Sequestration: A Regional Perspective A report prepared for East of England Development Agency (EEDA)” Norwich, UK: Low Carbon Innovation Centre, University of East Anglia, Available: www.uea.ac.uk/lcic/Biochar [accessed 8 November 2011].

87. Cornelissen G. Martinsen V. Shitumbanuma V. Alling V. Breedveld G.D. Rutherford D.W. Sparrevik M. Hale S.E. Obia A. and Mulder J. (**2013**) “Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in zambia” **Agronomy**, **3**, pp **256–274**.

88. D’Antuono L.F. Moretti A. and Lovato A.F.S. (**2002**) “Seed yield, yield components, oil content and essential oil content and composition of *Nigella sativa* L. and *Nigella damascena* L.” **Industrial Crops and Products, 15**, pp **59–69**.

89. Das A.K. Sadhu M.K. Som M.G. and Bose T.K. (**1992**) “Effect of spacings on growth and yield of black cumin” **Indian Cocoa, Arecanut and Spices Journal**, **16**, pp **17–8**.

90. De Gryze S. Cullen M. Durschinger L. Lehmann J. Bluhm D. and Six J. (**2010**) "Evaluation of the opportunities for generating carbon offsets from soil sequestration of biochar" An issues paper commissioned by the Climate Action Reserve, final version.
91. De Melo Carvalho M.T. De Holanda Nunes Maia A. Madari B. E. Bastiaans L. Van Oort P. A. J. Heinemann A. B. Soler da Silva M. A. Petter F. A. Marimon Jr. B. H. and Meinke H. (**2014**) "Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system" **Solid Earth**, **5**, pp **939–952**.
92. Demisie W. and Zhang M. (**2015**) "Effect of biochar application on microbial biomass and enzymatic activities in degraded red soil" **African Journal of Agricultural Research, 10**, pp **755-766**.
93. Dempster D.N. Jones D.L. and Murphy D. V. (**2012**) " Organic nitrogen mineralisation in two contrasting agro-ecosystems is unchanged by biochar addition" **Soil Biology and Biochemistry** , **48**, pp **47–50**.
94. Dewi W. S, Wahyuningsih G. I. Syamsiyah J. and Mujiyo. (**2018**) "Dynamics of N-NH4+, N-NO3-, and total soil nitrogen in paddy field with azolla and biochar" **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 142,012014. doi :10.1088/1755-1315/142/1/012014
95. Dispenza V. Pasquale C. D. Fascella G. Mammano M.M. and Alonzo G. (**2016**) "Use of biochar as peat substitute for growing substrates of Euphorbia × lomi potted plants" **Spanish Journal of Agricultural Research, 14**, **4**, pp **1-11**.
96. Dong D. Feng Q. McGrouther K. Yang M. Wang H. and Wu W. (**2014**) "Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field" **Journal of Soils and Sediments, 15**, pp **153–162**.
97. Dume B. Mosissa T. and Nebiyu A. (**2016**) "Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a military camp in South West Ethiopia" **African Journal of Environmental Science and Technology, 10**, pp **77-85**.
98. Dwivedi S.L. Nigam S.N. Nageswara Rao R.C. Singh U. and Rao K.V.S. (**1996**) "Effect of drought on oil, fatty acids and protein contents of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) seeds" **Field Crops Research**, **48, 2–3**, pp **125–133**.
99. Ebrahimi M. Zamani Gh.R. and Alizadeh Z. (**2017**) "A study on the effects of water deficit on physiological and yield-related traits of pot marigold (*Calendula officinalis* L.)" **Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants**, **33**, **3**, pp **492-508**.

100. Fahad S. Hussain S. Saud S. Hassan S. Tanveer M. Ihsan M.Z. Shah A.N. Ullah A. Nasrullah. Khan F. Ullah S. Alharby H. Nasim W. Wu C.and Huang J. (**2016**) "A combined application of biochar and phosphorus alleviates heat-induced adversities on physiological, agronomical and quality attributes of rice" **Plant Physiology and Biochemistry, 103**, pp **191–198**.

101. Faloyea O.T. Alatisea M.O. Ajayia A.E. Ewulo B.S. (**2017**) "Synergistic effects of biochar and inorganic fertiliser on maize (*zea mays*) yield in an alfisol under drip irrigation" **Soil and Tillage Research, 174**, pp **214-220**.

102. Fang Y. Singh B. Singh B.P. (**2015**) "Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils" **Soil Biology and Biochemistry**, **80**, pp **136–145**.

103. Farhoosh R. Haddad Khodaparast M. H. and Sharif A. (**2009**) "Bene hull oil as a highly stable and antioxidative vegetable oil" **European Journal of Lipid Science and Technology**, **111**, pp **1259–1265**.

104. Fiaz K. Malik S. A Younis U. Danish S. Raza Shah M. H. and Niaz S. (**2014**) "Drought impact on Pb/Cd toxicity remediated by biochar in *Brassica campestris*" **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, **14**, **4**, pp **845-854**.

105. Filiberto D.M. and Gaunt J.L. (**2013**) "Practicality of Biochar Additions to Enhance Soil and Crop Productivity" **Agriculture**, **3**, pp **715-725**.

106. Flénet F. Bouniols A. and Saraiva C. (**1996**) "Sunflower response to a range of soil water contents" **European Journal of Agronomy**, **5**, pp **161–167**.

107. Foster E.J. Neil Hansenc B. Matt Wallenstein b. d. and Cotrufoa F. (**2016**) "Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system" **Agriculture, Ecosystems and Environment, 233**, pp **404–414**.

108. Freddo A. (**2013**) Ph.D. dissertation, "**Biochar: for better or for worse**?" University of East Anglia School of Environmental Science.

109. Gaskin J.W. Speir R.A. Harris K. Das K.C. Lee R. D. Morris L.A. and Fisher D.S. (**2010**) "Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield" **Agronomy Journal, 102**, pp **623–633**.

110. Gebremedhin G.H. Haileselassie B. Berhe D. and Belay T. (**2015**) “Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia” **Journal of Fertilizers and Pesticides**, **6**, pp **158-162**.

111. Gee G.W. and Bauder J.W. (**1986**) "**Particle-size distribution**" In: Klute A. (ed.), Methods of Soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd edition, Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison WI, pp **384-411**.

112. Ghamarnia H. Jalili Z. and Daichin S. (**2012**) “The effects of saline irrigation water on different components of black cumin (*Nigella sativa* L.)” **International Journal of AgriScience**, **2**, pp **915-922**.

113. Ghamarnia H. Miri E. and Ghobadei M. (**2014**) “Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (*Nigella sativa* L.) in a semi-arid climate” **Irrigation Science**, **32**,**1**, pp **67–76**.

114. Glaser B. Lehmann J. Zech W. (**2002**) “Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review” **Biology and Fertility of Soils**, **35**, pp **219-230**.

115. Gokila B. and Baskar K. (**2015**) “Influence of biochar as soil amendment on yield and quality of maize” **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, **5**, pp**152-155**.

116. Graciano C. Guiamet J.J. and Goya J.F. (**2005**) “Impact of nitrogen and phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings” **Forest Ecology and Management**, **212**, pp **40-49**.

117. Gundale M.J. and Deluca T.H. (**2006**) “Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. **Forest Ecology and Management**, **231,** pp **86-93**.

118. Gupta P. K. (**2000**) "Soil, plant, water, and fertilizer analysis" **Agrobios**, New Dehli, India.

119. Gwenzi W. Chaukura N. Mukome F.N. Machado S. and Nyamasoka B. (**2015**) “Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties” **Journal of Environmental Management**, **150**, pp **250-261**.

120. Hadi M.Y. Mohammed G.J. Hameed I.H. (**2016**) “Analysis of bioactive chemical compounds of *Nigella sativa* using gas chromatographymass spectrometry” **Journal of Pharmacognosy and Phytotherapy**, **8**, **2**, pp **8-24**.

121. Hafeez Y. Iqbali S. Jabeeni KH. Shahzad S. Jahan S. and Rasul F. (**2017**) “Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* under drought stress” **Pakistan Journal of Botany, 49**, pp **7-13**.

122. Haider G. Koyro H.W. Azam F. Steffens D. Müller C. and Kammann C. (**2015**) “Biochar but not humic acid productamendment affectedmaize yields via improving plant-soil moisture relations” **Plant Soil** , **395**, pp **141–157**.

123. Haider G. (**2016**) Ph.D. Thesis, “**Biochar as a beneficial soil amendment in sandy soils**” Department of Plant Ecology, Faculty of Biology and Chemistry Justus-Liebig-University Giessen, Germany.

124. Haider G. Steffens D. Müller C. and Kammann C.I. (**2016**) “Standard extraction methods may underestimate nitrate stocks captured by field-aged biochar” **Journal of Environmental Quality,** doi:10.2134/jeq2015.10.0529.

125. Haj Seyed Hadi M.R. Darz M.T. Ghandehari Z. and Riazi Gh. (2016) “Effects of vermicompost and amino acids on the flower yield and essential oil production from *Matricaria chamomile* L.” **Journal of Medicinal Plants Research, 5**, **23**, pp **5611-5617**.

126. Hao Jien S. and Sheng Wang C. (**2013**) “Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil” **Catena**, **110**, pp **225–233**.

127. Häring V. Manka'abusi D. Akoto-Danso E.K. Werner S. Atiah K. Steiner C. Lompo D.J.P. Adiku S. Buerkert A. and Marschner B. (**2017**) “Effects of biochar, waste Water irrigation and fertilization on soil properties in West African urban agriculture” **Scientific Reports**, DOI: 10.1038/s41598-017-10718-y.

128. Heichel G.H. and Barnes D.K. (**1984**) “Opportunities for meeting crop nitrogen needs from symbiotic nitrogen fixation” In: “**D.A. Bezdicek (ed.) Organic farming: Current technology and its role in a sustainable agriculture**”, Spec. Pub. 46. American Society of Agronomy, Madison, WI. p. **49-59**.

129. Herms D.A. Mattson W.J. (**1992**) “The dilemma of plants: To grow or defend” **The Quarterly Review of Biology, 67**, pp **283 – 325**.

130. Hersztek M.M. Gondek K. Klimkowicz-Pawlas A. Baran A. and Bajda T. (**2017**) “Sewage sludge biochars management-ecotoxicity, mobility of heavy metals, and soil microbial biomass” **Environmental Toxicology and Chemistry**, **9999**, pp **1–11**.

131. Hina K. (**2013**) Ph.D.Thesis, “**Applications of biochar for waste water treatment**” Massey University, Palmerston North, New Zealand

132. Howard H. (**2011**) “The effect of biochar on the root development of corn and soybeans in Minnesota soil and sand” **International Biochar Initiative**, 24 June , http://www.biochar□international.org.

133. Horwath W.R. Paul E.A. (**1994**) "Microbial biomass" In: **DR Buxton (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties**, ASA and SSSA. Madison, WI.

134. Huggins D. R. and Pan W. L. (**1993**) “Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity” **Journal of Agronomy**., **85**, pp **898-905**.

135. brahim O. M. Bakry A. B. El kramany M.F. and Elewa T.A. (**2015**) “Evaluating the role of bio-char application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions” **Global Journal of Advanced Resarch**, **2**, **2**, pp **411-418**.

136. Igalavithana A.D. Ok Y.S. Niazi N.K. Rizwan M. Al-Wabel M.I. Usman A.R. Moon D.H. and Lee S.S. (**2017**) “Effect of corn residue biochar on the hydraulic properties of sandy loam soil” **Sustain, 9**, pp **1–10.**

137. Isermeyer H. (**1952**) “Eine einfache methode zur bestimmang der bodenatmung und der carbonate imBoden” **Z P Flanzenernaehr Bodenkd, 56**, pp **26-38**.

138. Jaleel C.A. Manivannan P. Kishorekumar A. Sankar B. Gopi R. Somasundaram R. and Panneerselvam R. (**2007**) “Water deficit stress mitigation by calcium chloride in *Catharanthus roseus*: effects on oxidative stress, proline metabolism and indole alkaloid accumulation” **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces - Journal**, **60**, **1**, pp **110-116**.

139. Jeffery S. Meinders M.B. Stoof C.R. Bezemer T.M. van de Voorde TF, Mommer L. and van Groenigen J.W. (**2015**) “Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil” **Geoderma**, **251**, pp **47–54.**

140. Jeliazkov A. (**1999**) “NPK fertilizer and yield of pepermint (*Mentha peperitia*)” **Acta Horticulture**, **505**, pp **231-236**.

141. Jemal k. and Abebe A. (**2016**) "Determination of bio-char rate for improved production of Lemmon grass" **International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research**, **4**, **2**, pp **149–157**.

142. Jianlin W. Guiruiz Y. Quanxiao F. Defeng J. Hua Q. and Qiufeng W. (**2008**) "Responses of water use efficiency of 9 plant species to light and CO2 and their modeling" **Acta Ecologica Sinica, 28**, pp **525–533**.

143. Jien S. and Wang C. (**2013**) "Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil", **Catena**, **110**, pp **225-233**.

144. Jrah Harzallah H. Kouidhi B. Flamini G. Bakhrouf A. and Mahjoub T. (**2011**) "Chemical composition, antimicrobial potential against cariogenic bacteria and cytotoxic activity of Tunisian *Nigella sativa* essential oil and thymoquinone" **Food Chemistry**, **129**, pp **1469-1474**.

145. Kammann C.I. Linsel S. Gössling J.W. and Koyro H.W. (**2011**) "Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations" **Plant Soil**, **345**, pp **195–210.**

146. Karer J. Wimmer B. Zehetner F. Kloss S. and Soja G. (**2013**) "Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions" **Agricultural and Food Science**, **22**, pp **390–403**.

147. Kasozi G.N. Zimmerman A.R. Nkedi-Kizza P. and Gao B. (**2010**) "Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (biochars)" **Environmental Science & Technology, 44**, pp **6189–6195**.

148. Kathrin A. (**2016**) M.Sc. thesis, "**Biochar in soil: Effect on physical, chemical and hydrological properties in differently textured soils**" Department of Agro ecology, AU.

149. Khan M. M. and Azam Z.M. (**1999**) "Change in the essential oil constituents of *Foeniclum rulgare* in relation of basal and foliar application of nitrogen and phosphorus" **Journal of Plant Nutrition**, **11**, pp **2205-2515**.

150. Kimetu J.M. Lehmann J. Ngoze S.O. Mugendi D.N. Kinyangi J.M. Susan R. Verchot L. Recha J.W. and Pell A.N. (**2008**) "Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient" **Ecosystems**, **11**, pp **726–739**.

151. Kirschbaum M.U.F. (**2000**) "Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?" **Biogeochemistry**, **48**, pp **21–51**.

152. Klut A. (**1986**) "Method of Soil Analysis: Physical, Chemical and Mineralogical Methods" **Soil Science Society of America**, Madison, Wiscosin, USA, pp **432-449**.

153. Kraska P. Oleszczuk P. Andruszczak S. Kwiecińska-Poppe E. Różyło K. Pałys E. Gierasimiuk P. and Michałojć Z. (**2016**)" Effect of various biochar rates on winter rye yield and the concentration of available nutrients in the soil" **Plant, Soil and Environment**, **62**, **11**, pp **483-489**.

154. Laird D.A. Fleming P. Davis D.D. Horton R. Wang B. and Karlen D.L. (**2010**) "Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil" **Geoderma**, **158**, pp **443–449**.

155. Lehmann J. Czimczik C. Laird D. Sohi S. (**2009**) "Stability of biochar in soil" In: **Biochar for Environmental Management**, **Science and Technology**(eds Lehmann J, Joseph S), Earthscan, London, pp **183–205**.

156. Lehmann J. Gaunt J. Rondon M. (**2006**) "Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – A review" **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11**, pp **403–427**.

157. Lehmann J. Joseph S. Editors. (**2009**) "Biochar for environmental management" **Science and Technology**, Earthscan Publisher Ltd. ISBN 978-1-84407-658-1.

158. Lehmann J. Rillig M.C. Thies J. Masiello C.A. Hockaday W.C. and Crowley D. (**2011**) "Biochar effects on soil biota: A review" **Soil Biology and Biochemistry**, **43**, pp **1812-1836**.

159. Liesch A.M. Weyers S.L. Gaskin J.C. and Das K.C. (**2010**) "Impact of two different biochars on earthworm growth and survival" **Annals of Environmental Science**, **4**, pp **1-9**.

160. Liu X. Zhang A. Ji C. Joseph S. Bian R. Li L. Pan G. Paz-Ferreiro J. (**2013**) "Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions- A meta-analysis of literature data" **Plant Soil**, **373**, pp **583–594**.

161. Lu A.N. Liu X.R. Liu D.u.Z. Wang Y. D. and Zhang Q. Z. (**2014**) "Effect of biochar on soil respiration in the maize growing season after 5 years of consecutive application" **Soil Research**, **52**, pp **505–512**.

162. Ly P. Duong V.Q. Jensen L.S. Jensen L.S. Pandey A. Neergaard A. (**2014**) “Effects of rice straw, biochar and mineral fertilizer on methane ($CH_4$) and nitrous oxide ($N_2O$) emissions from rice (*Oryza sativa* L.) grown in a rain-fed lowland rice soil of Cambodia: a pot experiment” **Paddy and Water Environment**, **13**, pp **465–475**.

163. Maguire R.O. and Agblevor F.A. (**2010**) “Biochar in agricultural systems” **Virginia Cooperative Extension programs**. College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University.

164. Major J. M. Rondon D. Molina S. J. Riha and Lehmann J. (**2010**) “Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a colombian savanna oxisol.” **Plant and Soil**, **333**, **1–2**, pp **117–128**.

165. Major J. Rondon M. Molina D. Riha S.J. and Lehmann J. (**2012**) “Nutrient Leaching in a Colombian Savanna Oxisol Amended with Biochar” **Journal of Environmental Quality, 41**, pp **1076- 1086**.

166. Major J. Steiner C. Downie A. and Lehmann J. (**2009**) “Biochar effects on nutrient leaching” In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.): **Biochar for environmental management: Science and technology**, Earthscan, London, pp. **271-288**.

167. Mannan M. A. Halder E. Karim M. A. and Ahmed J. U. (**2016**) Alleviation of adverse effect of drought stress on soybean (*Glycine max* L.) by using poultry litter biochar” **Bangladesh Agronomy Journal, 19**, **2**, pp **61-69**.

168. Matthaus B. and Özcan M.M. (**2011**) “Fatty acids, tocopherol, and sterol contents of some nigella species seed oil” **Czech Journal of Food Sciences**, **29**, **2** pp **145–150**.

169. Melaz G.B. (**2014**) Ph.D. thesis, “**Interactions between different types of biochar and soil microbial activity**” University of Barcelona, Department of animal biology.

170. Mehta B.K. Pandit V. and Gupta M. (**2009**) “ New principal from seeds of *Nigella sativa* “ **Natural Product Research**, **23**, pp **138-148**.

171. Merrill A.L. and Watt B.K. (**1955**) “Energy value of foods, basis and derivation”**Agriculture Handbook No. 74,** Washington, DC, Unites States Department of Agriculture.

172. Mirsa A. Strivastava N.K. (**2000**) “Influence of water stress on Japanese mint” **Journal of Herb, Spices Med. Plants**., **1**, pp **51-58**.

173. Misra A. (2003) Ph.D. thesis, "**Influence of water conditions on growth and mineral nutrient uptake of native plants on calcareous soil**" Lund University.

174. Mizuta K. Matsumoto T. Hatate Y. Nishihara K. and Nakanishi T. (**2004**) "Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal" **Bioresource Technology**, **95**, 3, pp **255-257**.

175. Mohammadkhani N. and Heidari R. (**2007**) "Effects of water stress on respiration, photosynthetic pigments and water content in tow Maize cultivar" **Pakistan Journal of Biological Science**, **10**, **22**, pp **4022-4028**.

176. Monnie F. (**2016**) Ph.D. Thesis, "**Effect of biochar on soil physical properties, water use efficiency, and growth of maize in sandy loam soil**" University of Ghana, Legon, Accra.

177. Motavalli P.P. Parton W.J. Elliott E.T. and Frey S.D. (**1995**) "Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: evidence from laboratory and simulation studies" **Soil Biology and Biochemistry**, **27**, **12**, pp **1589–1559**.

178. Mozaffari F. Ghorbanli S. Babai M. and Farzami A. (**2000**) "The effect of water stress on the seed oil of *Nigella sativa* L" **Journal of Essential Oil Research**, **12**, pp **36-38**.

179. Mukherjee A. and Zimmerman A.R. (**2013**) "Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures" **Geoderma, 193-194**, pp **122–130**.

180. Mukome F.N.D. Six J. and Parikh S.J. (**2012**) "The effects of walnut shell and wood feedstock biochar amendments on greenhouse gas emissions from a fertile soil" **Geoderma**, **200**, **201**, PP **90–98**.

181. Munir M.A. Malik M.A. and Saleem M.F. (**2007**) "Impact of integration of crop manuring and nitrogen application on growth, yield and quality of spring planted sunflower (*Helianthus annuus* L.) **Pakistan Journal of Botany**, **39**, **2**, pp **441-449**.

182. Nelson N.O. Agudelo S.C. Yuan W. and Gan J. (**2011**) "Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils" **Soil Science**, **176**, **1**, doi:http://dx.doi.org/10.1097/SS.0b013e3182171eac.

183. Nigussie, A. Endalkachew Kissi E. Misganaw M. and Ambaw G. (**2012**) "Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*)

grown in chromium polluted soils" **American-Eurasian Journal of Agriclture and Environment Science**, **12**, **3**, pp **369-376**.

184. Nickavar B. Mojab F. Javidnia K. and Roodgar M.A. (**2003**) " Chemical composition of the fixed and volatile oils of *Nigella sativa* L. from Iran" **Zeitschrift für Naturforschung**, **58**, pp **629-631**.

185. Njoku C. Uguru B.N. Chibuike C. C. (**2016**) "Use of biochar to improve selected soil chemical properties, carbon storage and maize yield in an ultisol in abakaliki ebonyi state, Nigeria" **International Journal of Environmental and Agriculture Research** , **2**, pp **15-22**.

186. Nour mohammadi Gh. (**2004**) "Evaluation of the response of three safflower lines to different drought stress" **Journal of Agricultural Science**, **4**, pp **251-259.**

187. Novak J.M. Lima I. Xing B. Gaskin J.W. Steiner C. Das K. Ahmedna M. Rehrah Dj. Watts D.W. Busscher W. J. and Schomberg H. (**2009**) "Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand" **Annals of Environmental Science**, **3**, **1**, pp **195-206.**

188. Noyce G. L. Basiliko N. Fulthorpe R. Sackett T. E. and Thomas S.C. (**2015**) "Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest" **Biology and Fertility of Soils**, **40**, pp **201-205**.

189. Oguntunde P.G. Fosu M. Ajayi A.E. van de Giesen N. (**2004**) "Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil" **Biology and Fertility of Soils, 39**,**4**, PP **295–299**.

190. Olmo M. Alburquerque J.A. Barrón V. del Campillo M.C. Gallardo A. Fuentes M. Villar R. (**2014**) "Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions" **Biology and Fertility of Soils**, **50**, pp **1177–1187**.

191. Onifade A.A. Jewell A.P. and Adedeji W.A. (**2013**) "*Nigella sativa* concoction induced sustained seroreversion in HIV patient" **The African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines**, **10**, pp **332-335**.

192. Padhye S. Banerjee S. Ahmad A. Mohammad R. and Sarkar F.H. (**2008**) "From here to eternity-the secret of Pharaohs: Therapeutic potential of black cumin seeds and beyond" **Cancer therapy**, **6**, pp **495-510**.

193. Pan Y-F. Yang M. Dong D. Wu W.X. (**2013**) “Effects of biochar on soil nitrogen cycle and related mechanisms: a review” **The journal of applied ecology**, **24**, pp **2666–2673**.

194. Pandey V. Patel A. and Patra D.D. (**2016**) “Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.)” **Ecological Engineering**, **90**, pp **361–366**.

195. Pandit N.R. Mulder J. Halea S.E. Martinsen V. Schmidt H.P. Cornelissen G. (**2018**) “Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in amoderately acidic low-input Nepalese soil” **Science of the Total Environment** , **625**, pp **1380–1389**.

196. Petropoulos S.A. Dimitra D. Polissiou M.G. and Passam H.C. (**2008**) “The effect of water deficit stress on the growth, yield and composition of essential oils of parsley” **Scientia Horticulturae**, **115**, pp **393–397**.

197. Ponge J.F. Ballot S.D. Rossi J.P. Lavelle P. Betsch J.M. Gaucher P. (**2006**) “Ingestion of charcoal by the Amazonian earthworm Pontoscolex corethrurus: a potential for tropical soil fertility” **Soil Biology and Biochemistry**. **38**, pp **2008–2009**.

198. Prayogo C, Jones J.E. Baeyens J. and Bending G.D. (**2014**) “Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure” **Biol Fertil Soils, 50**, pp **695–702**.

199. Pühringer H. (**2016**) Master´s thesis, “**Effects of different biochar application rates on soil fertility and soil water retention in on-farm experiments on smallholder farms in Kenya**” Independent Project in Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences.

200. Rab A. Rabnawaz Khan M. Ul Haq S. Zahid S. Asim M. Afridi M.Z. Arif M. and Munsif F. (**2016**) “Impact of biochar on mungbean yield and yield components” **Pure and Applied Biology**, **5**, **3,** pp **632-640**.

201. Rahmani N. Daneshian J. and Farahani A.H. (**2009**) “Effects of nitrogen fertilizer and irrigation regimes on seed yield of calendula (*Calendula officinalis* L.)” **Journal of Agricultural Biotecnology and Sustanable Development**, **1**, pp **24-28**.

202. Richards L. A. (**1954**) “**Diagnosis improvement of saline and alkali soils**” USDA, Handbook No. 60, p **102**.

203. Rondon M.A. Lehmann J. Ramirez J. and Hurtado M. (**2007**) “Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions” **Biology and Fertility of Soil**, **43**, pp **699 – 708**.

204. Różyło K. Świeca M. Gawlik-Dziki U. Stefaniuk M. and Oleszczuk P. (**2017**) “The potential of biochar for reducing the negative effects of soil contamination on the phytochemical properties and heavy metal accumulation in wheat grain” **Agricultural and Food Science**, **26**, **1**, pp **34-46**.

205. Saggar S. Hedley C.B. and Salt G.J. (**2006**) “Soil microbial biomass metabolic quotient, and carbon and nitrogen mineralization in 25-year-old Pinus radiate agroforestry regimes” **Australian Journal of Soil Research**, **39**, pp **491-504**.

206. Salvagiotti F. Castellarín J.M. Miralles D.J. and Pedrol H.M. (**2009**) “Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake” **Field Crops Research**, **113**, pp **170-177**.

207. Sara S. Z. and Shah T. (**2018**) “Residual effect of biochar on soil properties and yield of maize (*Zea mays* L.) under different cropping systems” **Open Journal of Soil Science**, **8**, pp **16-35**.

208. Sawwan J. Shibli R.A. Swaidat I. and Tahat M. (**2000**) “Phosphorus regulates osmotic potential and growth of African violet under in vitro induced water deficit” **Journal of Plant Nutrition**, **23**, **6**, pp **759-771**.

209. Sharafzadeh Sh. and Zare M. (**2011**) “Effect of drought stress on qualitative and quantitative characteristics of some medicinal plants from Lamiaceae family: A Review” **Advances in Environmental Biology**, **5**, **8**, pp **2058-2062**.

210. Schulz h., Dunst G. and Glaser B. (**2013**) “Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility” **Agronomy for Sustainable Development**, **33**, **4**, pp **817-827**.

211. Schouten S. (**2010**) “**Biochar for sustainable agricultural development**” A critical review of biochar for carbon management and the improvement of agricultural production systems, Institute of Environmental Sciences, Leiden.

212. Sharpe R. R. Harper L. A. Giddens J. E. and Langdale G. W. (**2001**) “Nitrogen use efficiency and nitrogen budget for conservation tilled wheat” **Soil Science Society of America Journal, 52**, pp **1349 - 1398**.

213. Shen Y. Zhu L. Cheng H. Yue S. and Li Sh. (**2017**) "Effects of biochar application on CO2 emissions from a cultivated soil under semiarid climate conditions in Northwest China" **Sustainability**, **9**, **1482**, doi:10.3390/su9081482
214. Si L. Xie Y. Ma Q. and Wu L. (**2018**) "The short-term effects of rice straw biochar, nitrogen and phosphorus fertilizer on rice yield and soil properties in a cold waterlogged paddy field" **Sustainability, 10**, **537**, doi: 10.3390/su10020537.
215. Sika M.P. (**2012**) M.Sc. Thesis, "**Effect of biochar on chemistry, nutrient uptake and fertilizer mobility in sandy soil**" University of Stellenbosch. ISSN 1818-6769.
216. Simon J.E. Bubenheim R.D. Joly R.J. and Chares D.J. (**1992**) "Water stress induced alteration in essential oil content and composition of sweet basil" **Journal of Essential Oil Research**, **4**, pp **71 – 75**.
217. Soderberg K. (**2013**) "**Effects of biochar amendment in soils from Kisumu, Kenya**" Independent project in Biology, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala.
218. Sohi S. P. Krull E. Lopez-Capel E. and Bol R. (**2010**) "A review of biochar and its use and function in soil. **Advances in Agronomy**, **105**, pp **47-82**.
219. Song D. Xi X. Huang S. Liang G. Sun J. Zhou W. and Wang X. (**2016**) "Short-term responses of soil respiration and C-cycle enzyme activities to additions of biochar and urea in a calcareous soil" **PLOS One**, **11**, **9**, e0161694. doi:10.1371.
220. Song W. and Guo M. (**2012**) "Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures" **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 94**, pp **138-145**.
221. Speratti A. B. Johnson M. S. Sousa H. M. Dalmagro H. J. and Couto E.G. (**2018**) "Biochars from local agricultural waste residues contributeto soil quality and plant growth in a Cerrado region (Brazil) Arenosol" **GCB Bioenergy**,**10**, pp **272–286**.
222. Steiner C. Glaser B. Teixeira W. G. Lehmann J. Blum W. E. H. and Zech W. (**2008**) "Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal" **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, **171**, pp **893-899**.
223. Sukartono U. W. Kusuma Z. and Nugroho W.H. (**2011**) "Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure

application on sandy soils of. Lombok, Indonesia" **Journal of Tropical Agriculture**, **49**, **1-2**, pp **47-52**.

224. Suppadit S. Phumkokrak N. and Poungsuk P. (**2012**) "The effect of using quail litter biochar on soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) production" **Chilean Journal of Agricultural Research**, **72**, **2**, pp **244-251**.

225. Suseela V. Conant R.T. Wallenstein M.D. Dukes J.S. (**2012**) "Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment" **Global Change Biology, 18**, pp **336–348**.

226. Tammeorg P. Simojoki A. Mäkelä P. Stoddard F. L. Alakukku L. and Helenius J. (**2014**) "Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand" **Agriculture, Ecosystems and Environment 191**, pp **108–116**.

227. Teat A.L. (**2014**) M.Sc thesis, "**Yield and physiological responses of the bioenergy crop Miscanthus × giganteus to fertilizer, biochar and drought**" Department of Biology, Appalachian State University, North Carolina.

228. Thomas S.C. Frye S. Gale N. Garmon M. Launchbury R. Machado N. Melamed S. Murray J. Petroff A. and Winsborough C. (**2013**) "Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species" **Journal of Environmental Management**., **129**, pp **62–68**.

229. Tian X. Li C. Zhang M. Wan Y. Xie Z. Chen B. and Li W. (**2018**) "Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield" **Plos One**, **13**, **1**, doi.org/10.1371/journal.pone.0189924.

230. Upadhyay K.P. (**2015**) Ph.D thesis, "**The influence of biochar on crop growth and the colonization of horticultural crops by arbuscular mycorrhizal fungi**" The University of Queensland. Nepal.

231. Van Zwieten L. Kimber S.W.L. Morris S.G. Singh B.P. Grace P.R. Scheer C. Rust J. Downie A.E. and Cowie A.L. (**2013**) "Pyrolysing poultry litter reduces $N_2O$ and $CO_2$ fluxes" **Science of the Total Environment, 465**, pp **279–287**.

232. Verheijen F. Jeffery S. Bastos A. C. Van der Velde M. and Diafas I. (**2010**) “Biochar application to soils” **Scientific and Technical Research Reports**, Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg.

233. Vukovic I. M. Mesic Z. Zgorelec A. Jurisic. and Sajko K. (**2008**) “Nitrogen use efficiency in winter wheat” **Cereal Research Communications**, **36**, pp **1199–1202**.

234. Walkley A. and Black I.A. (**1934**) “Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method” **Soil Science**, **37**, pp **29-38**.

235. Wang Sh. Wang X. and Ouyang Zh. (**2012**) “Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the upstream watershed of Miyun Reservoir, North China” **Journal of Environmental Sciences**, **24**, **3**, pp **387–395**.

236. Wang. Sh. Wang X. Ouyang Zh. (**2012**) “Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the UpstreamWatershed of Miyun Reservoir, North China” **Journal of Environmental Sciences**, **24**, **3**, pp **387–395**.

237. Wang Y. Pan F. Wang G. Zhang G. Wang Y. Chen X. Mao Z. (**2014**) “Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions” **Scientia Horticulturae (Amsterdam), 175**, pp **9–15**.

238. Whitman T. Singh B.P. and Zimmerman A.R. (**2015**) “Priming effects in biochar-amended soils: implications of biochar-soil organic matter interactions for carbon storage” **Biochar for Environmental Management.** pp **453–486**.

239. Widowati W.H. (**2012**) “The effect of biochar on the growth and N fertilizer requirement of Maize (*Zea mays*) in green house experiment” **Journal of Agricultural Science**, **4**, **5**, pp **256-262**.

240. Widowati U. W. Soehono L. A. and Guritno B. (**2011**) "Effect of biochar on the release and loss of nitrogen from urea fertilization" **Journal of Agricultural Food Technologies**, **1**, pp **127-132**.

241. Widowati U. and Sutoyo A. (**2012**) “The effects of biochar and potassium fertilizer to the uptake and potassium leaching” **Buana Sains**, **12**, pp **83-90**.

242. Widowati W.H. Asnah A. and Utomo W.H. (**2014**) "The use of biochar to reduce nitrogen and potassium leaching from soil cultivated with maize" **Journal of Degraded and Mining Lands Management**, **2**, **1**, pp **211-218**.

243. Wingate J. R. (**2008**) Ph.D. Thesis, "**Development of novel charcoals for the sorption and transformation of heavy metals in contaminated land**" University of Surrey.

244. Woolf D. (**2008**) "Biochar as soil amendment: A review of the environmental implications" **Nature**, pp **1-10**.

245. Zafar K. Noorul H. Nesar A. Vartika S. Khalid M. Prashant S. Zeeshan A. Zohrameena S. (**2016**) "Pharmacological activity of *Nigella Sativa*: A Review" **World Journal of Pharmaceutical Sciences**, **4**, **5**, pp **234-241**.

246. Zavalloni C. Alberti G. Biasiol S, Vedove G.D. Fornasier F. Liu J. and Peressotti A. (**2011**) "Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A shortterm study" **Applied Soil Ecology**, **50**, pp **45–51**.

247. Zebarth B. J. Neilsen G. H. Hogue E. and Neilsen D. (**1999**) "Influence des amendements faits de dechets organiques" **Canadian Journal of Soil Science**, **79**, pp **501-504**.

248. Zeelie A. (**2012**) M.Sc. Thesis, "**Effect of biochar on selected soil physical properties and crop performance of winter wheat pot plants**" University of Stellenbosch.

249. Zerihun A. and Haile D. (**2017**) "The effect of organic and inorganic fertilizers on the yield of two contrasting soybean varieties and residual nutrient effects on a subsequent finger millet crop" **Agronomy**, **7**, **42**, doi:10.3390/agronomy7020042.

250. Zhang P. Sun H. Yu L. Sun T. (**2013**) "Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived biochars: impact of structural properties of biochars" **Journal of Hazardous Materials**, **244**, **245**, pp **217–224.**

251. Zhang Q. Dijkstra F.A. Liu X. Wang Y. Huang J. and Lu N. (**2014**) "Effects of biochar on soil microbial biomass after four years of consecutive application in the north china plain. **Plos One**, 9, 7, doi:10.1371/journal.pone.0102062.

252. Zhang X. Zhang Y. Sha L. Wu C. Tan Z. Song Q. Liu Y. and Dong L. (**2015**) "Effects of continuous drought stress on soil respiration in a tropical rainforest in southwest China" **Plant Soil**, doi: 10.1007/s11104-015-2523-4.

253. Zhu Q. H. Peng X. H. Huang T. Q. Xie Z. B. and Holden N. M. (**2014**) "Effect of biochar addition on maize growth and nitrogen use effciency in acidic red soils" **Pedosphere**, **24**, **6**, pp **699-708**.

254. Zhu Q. Peng X. and Huang T. (**2015**) "Contrasted effects of biochar on maize growth and N use efficiency depending on soil conditions" **International Agrophysics**, **29**, pp **257-266**.

255. Zimmerman A.R. and Gao B. (**2013**) "The stability of biochar in the environment" In **Biochar and soil biota**, Ladygina N, Rineau F Ed. CRC Press, Boca Raton, pp **1-40**.

**Abstract**

A field experiment was conducted as split plots factorial layout based on a randomized complete block design with three factors and three replications at the Research Station, Faculty of Agriculture, the Ferdowsi University of Mashhad (Iran) during growing years of 2015-2016 and 2016-2017. Three levels of irrigation (100, 70, and 40 percent of water requirement) were assigned as main plots and the combination of three levels of biochar (0, 10, and 20 $t.ha^{-1}$) and two levels of chemical fertilizers (without and with chemical fertilizer) were allocated as sub plots. Recommended dose for nitrogen, phosphorus, and potassium was 150 $kg.ha^{-1}$, 75 $kg.ha^{-1}$and 100 $kg.ha^{-1}$, respectively. The results showed that biochar was significantly influenced electrical conductivity and soil available phosphorus just in first year but soil saturated moisture, organic carbon, total nitrogen percent, potassium and microbial respiration were affected in two years.The highest biochar effect on soil characteristics was found in the 20 t $ha^{-1}$ biochar application treatment. 100 percent of water requirement was significantly influenced the yield and yield components of black seed. Application of biochar had no effect on plant hight, number of stem branches, follicle number, 1000-seed weights and harvest index. Biochar in first year was significantly influenced the seed number per plant and seed weight per plant but in second year biochar increased yield, yield components and biological yield. 10 t $ha^{-1}$ level of biochar had more effect on yield and yield components compared to 20 t $ha^{-1}$ level. 40 percent of water requirement was significantly influenced the protein and essential oil percent but had reverse effect on oil percent. 10 t $ha^{-1}$ level of biochar had more effect on quality charactriestics compared to 20 t $ha^{-1}$ level. Combined use of fertilizer and biochar were more affected on plants growth than biochar or fertilizer alone. The interaction between biochar, chemical fertilizer and water requirements significantly affected the seed and straw yield. The significant increase of grain yield, straw yield observed in 70% water requirement+10 $t.ha^{1-}$ biochar+ with chemical fertilizer by 1257 and 5116 kg $ha^{-1}$ respectively. As a result, the current study confirmed that the biochar application may help in increasing of black seed production through the improving some physical and chemical properties of the soil due to its high porosity and high water retention capacity.

This in particular, in arid and semi-arid areas, where reduces the amount of water consumed and increases water yields for plants that are under water stress. This means that, by using the biochar in soil, only 70% water irrigation required. These results may use for water saving in agriculture in arid and semi-arid conditions.

**Keywords**: Chemical fertilizer, Leaching, Seed yield, Water requirment

دانشگاه صنعتی شاهرود


**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Agriculture**


Ph.D. **Thesis in Agronomy**

# Effects of biochar application on soil fertility, drought tolerance, growth and essential components of black seed (*Nigella sativa* L.)


By: Fatemeh Abbaspour

Supervisors:

Dr. Hamid Reza Asghari

Dr. Parviz Rezvani Moghaddam

Advisors:

Dr. Hamid Abbasdokht

Dr. Javad Shabahangh

Dr. Adel Baig Babaei



October 2018