نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، ص. ۷۶۴-۷۴۶

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 14, No. 4, Winter. 2017, p. 746-764

بررسی اثر مقادیر مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در شرایط کم‌آبیاری بر برخی ویژگی‌های اگرواکولوژیکی ذرت (*Zea mays* L.) به روش سطح پاسخ

محسن جهان[1*]- محمدبهزاد امیری[2]- فرانک نوربخش[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹

چکیده

امروزه مصرف متعادل و بهینه‌ی کود و آب از مهم‌ترین عوامل افزایش تولید و بهره‌وری کیفیت محصولات کشاورزی محسوب می‌شوند. به‌منظور برآورد مقادیر بهینه‌ی سوپرجاذب رطوبت، اسیدهیومیک و آب آبیاری در زراعت ذرت (*Zea mays* L.) آزمایشی با استفاده از روش سطح پاسخ، در قالب طرح باکس-بنکن طراحی و در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح پایین و بالای سوپرجاذب رطوبت (۸۰ و ۱۶۰کیلوگرم در هکتار)، اسیدهیومیک (چهار و هشت کیلوگرم در هکتار) و حجم آب آبیاری (۱۰۰ و ۵۰درصد نیاز آبی) با استفاده از نرم‌افزار مشخص شدند که با در نظر گرفتن سه تکرار برای نقطه‌ی مرکزی، در مجموع ۱۵ترکیب تیماری حاصل شد. نتایج آزمایش نشان داد که عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اسیدهیومیک و آبیاری از جزء خطی مدل رگرسیونی و اثرات درجه دو سوپرجاذب و آبیاری از جزء درجه دو مدل رگرسیونی قرار گرفت، به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه (۲۴۴۸۹ کیلوگرم در هکتار) زمانی حاصل شد که به‌ترتیب از ۱۲۰ و هشت کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک استفاده شد و در طول فصل رشد ۳۰۰مترمکعب در هکتار آب در اختیار گیاه قرار گرفت. بیش‌ترین تأثیرگذاری اسیدهیومیک در بهبود عملکرد ماده‌ی خشک در سطح میانی این کود (شش کیلوگرم در هکتار) حاصل شد، ضمن این‌که افزایش دو برابری اسیدهیومیک مصرفی از چهار به هشت کیلوگرم در هکتار منجر به افزایش هفت درصدی میزان پروتئین دانه شد. در سناریوی اقتصادی با مصرف به‌ترتیب ۱۲۶/۰۶ و ۷/۱۹کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک و ۳۴۷/۴۷مترمکعب در هکتار آبیاری عملکرد دانه‌ای معادل ۲۶۷۰۸کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی دست‌یابی به حداکثر عملکرد دانه (۲۶۳۰۹کیلوگرم در هکتار) و حداکثر کارآیی مصرف آب (۵/۲۳) زمانی محقق شد که از ۱۲۳/۶۳کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، ۷/۱۹کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک و ۳۲۳/۲۳مترمکعب در هکتار آبیاری استفاده شد و از آنجایی‌که از دیدگاه اکولوژیک، سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی نسبت به دو سناریوی دیگر دارای اولویت است، به‌نظر می‌رسد با استفاده از مقادیر بهینه‌ی منابع در این سناریو می‌توان ضمن دست‌یابی به تولید پایدار ذرت، آلودگی‌های زیست‌محیطی را به حداقل رساند.

واژه‌های کلیدی: باکس‌بنکن، تلفات نیتروژن، تنش آبی، تابع درجه دو، سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی

مقدمه

ایران با داشتن شرایط آب‌وهوایی ویژه، بستر مناسبی را برای تولید انواع محصولات کشاورزی فراهم آورده است و در این میان زراعت غلات به‌خصوص گندم (*Triticum aestivum* L.)، جو (*Hordeum vulgare* L.) و ذرت (*Zea mays* L.)، بخش اصلی فعالیت کشاورزان مناطق خشک و نیمه‌خشک را تشکیل می‌دهد. ذرت پس از گندم و برنج (*Oryza sativa*)، مهم‌ترین محصول غذایی جهان محسوب می‌شود (Poehlman, 1959). پتانسیل عملکرد ذرت به‌نحوی است که در سطوح تجاری برداشت ۱۵ تا ۲۰تن دانه در هکتار دور از تصور نیست (Emam, 2004) و به‌دلیل استعداد زیاد ذرت در تولید دانه، این گیاه به پادشاه غلات معروف شده است (Peoples *et al*., 1980). در بین غلات، ذرت دارای بیش‌ترین تنوع مصرف است، زیرا افزون بر مصرف به‌عنوان غذای انسان، به‌عنوان علوفه برای دام و هم‌چنین در صنایع تخمیر و تهیه‌ی فرآورده‌های متنوع صنعتی از جمله اتانل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Emam, 2004).

اساسی‌ترین مشکل کشاورزی به‌خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک، کمبود منابع آب است، چراکه در این مناطق نه‌تنها مقدار کل نزولات جوی کم است، بلکه توزیع آن در طول فصل رشد نیز غیریکنواخت بوده و منطبق بر نیاز آبی محصول نمی‌باشد، در نتیجه به‌دلیل بحران فزاینده‌ی کمیت و کیفیت منابع آبی، بهینه‌سازی

۱- دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استادیار مجتمع آموزش عالی گناباد
۳- دانش‌آموخته دکتری اگرواکولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: Jahan@um.ac.ir
DOI: 10.22067/gsc.v14i4.48347

مصرف آب از اهمیت زیادی برخوردار است (Islam *et al*., 2012). تعیین میزان بهینه‌ی آب آبیاری همواره یکی از اهداف محققان بوده است و همواره سعی بر این بوده که از روش‌هایی برای تعیین میزان مناسب آبیاری استفاده شود. استفاده‌ی بی‌رویه، سبب تلفات منابع آب شده و کمبود آب به‌ویژه در مراحل حساس، به محصول تنش وارد می‌کند. از جمله مشکلات آبیاری بیش از حد می‌توان به شستشوی عناصر غذایی از خاک و به‌دنبال آن آلودگی آب‌های زیرزمینی و در نهایت آلودگی زیست‌بوم و هم‌چنین کاهش کارآیی مصرف کود به‌ویژه کودهای محلول در آب و ایجاد شرایط نامطلوب فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اشاره کرد (Rong and Xuefeng, 2011). برای روشن شدن اهمیت آبیاری در کشت غلات، گزارش شده است که تنها یک‌بار آبیاری گندم بلافاصله بعد از کاشت، منجر به افزایش عملکرد به‌میزان ۱۳۲درصد نسبت به شرایط دیم گردید و هم‌چنین یک‌بار آبیاری در مرحله‌ی تشکیل تورم غلاف برگ پرچم، افزایش ۲۳درصدی عملکرد دانه را سبب شد (Caliandro and Boari, 1992). نتایج تحقیقات Randy and Maranvill, 2000 در خصوص اعمال تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد ذرت نشان داد که اعمال تنش رطوبتی باعث کاهش عملکرد دانه، تعداد دانه در بلال، وزن صد دانه، کاهش قطر ساقه و کاهش ارتفاع گیاه شد.

دسترسی ناکافی به آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش کارآیی مصرف آب را به‌عنوان یکی از محورهای اصلی کشاورزی پایدار در این مناطق مطرح کرده است. تنش آب از یک‌سو از خصوصیات کمی و کیفی گیاه کاسته و از سوی دیگر به‌دلیل بالابودن قیمت آب، خرید آب توسط کشاورزان را به یک معضل بزرگ تبدیل کرده است (Rosales *et al*., 2012)، از این‌رو در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی به‌منظور افزایش کارآیی مصرف آب صورت گرفته است که در این مسیر، بهره‌گیری از نهاده‌های سازگار با محیط نظیر سوپرجاذب‌ها و اسیدهای آلی به‌عنوان راهکارهایی اساسی جهت صرفه‌جویی و استفاده‌ی بهینه از آب مورد توجه قرار گرفته‌اند (Islam *et al*., 2012). امروزه از پلیمرهای سوپرجاذب به‌طور قابل‌توجه‌ای در کشاورزی استفاده می‌شود و نقش آن‌ها در کاهش شدت تنش خشکی و میزان مرگ‌ومیر گیاهان و هم‌چنین افزایش تولید محصولات زراعی در پژوهش‌های متعددی به اثبات رسیده است (Abedi-Koupai *et al*., 2008; Zhong *et al*., 2012). این پلیمرها قادرند مقدار زیادی آب جذب و آن را در ساختمان خود حفظ کنند و در صورت نیاز در شرایط خشکی آن را در اختیار گیاه قرار دهند (Natesan *et al*., 2007; Wang and Wang, 2010; Zhong *et al*., 2013). سوپرجاذب‌ها از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی و ساختمان خاک، کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک (Abedi-Koupai *et al*., 2008)، افزایش کارآیی مصرف عناصر غذایی (Eneji *et al*., 2013)، افزایش جوانه‌زنی و سبز شدن بذر (Eneji *et al*., 2013)، کاهش تلفات آب در خاک (Xie *et al*., 2011)، کاهش میزان تبخیر از سطح خاک (Nykanen *et al*., 2011) و کاهش تلفات ناشی از مصرف کودها (Zheng *et al*., 2009) منجر به بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات مختلف می‌شوند. در بررسی اثر سطوح مختلف سوپرجاذب بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت گزارش شد که با افزایش مقادیر مصرفی سوپرجاذب، عملکرد دانه و علوفه‌ی ذرت به‌میزان قابل‌توجهی در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت (Karimi *et al*., 2006). هم‌چنین گزارش شد که کاربرد سوپرجاذب ضمن کاهش تنش خشکی در ذرت، منجر به افزایش ۱۶درصدی عملکرد این گیاه در مقایسه با شاهد شد (Khadem *et al*., 2011). در پژوهشی دیگر گزارش شد که استفاده از هیدروژل‌های سوپرجاذب به‌میزان ۳۰۰کیلوگرم در هکتار افزایش عملکرد و اجزای عملکرد ذرت را در پی داشت، به‌طوری‌که عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، وزن هزار دانه و تعداد دانه در ردیف در هر دو شرایط تنش و غیر تنش نسبت به شاهد افزایش یافت (Kuhestani *et al*., 2009).

طی چند دهه اخیر تلاش برای افزایش تولید در واحد سطح از یک‌سو و مصرف بیش از حد و نامتعادل کودهای شیمیایی از سوی دیگر، پیامدهای زیست‌محیطی منفی و افزایش هزینه‌های تولید را به‌همراه داشته است و این امر بر ضرورت تجدیدنظر در روش تولید و جستجو برای شیوه‌های جدید و ایمن افزایش تولید محصول تأکید دارد (Wu *et al*., 2005). مواد هیومیکی مخلوطی از ترکیبات آلی مختلف هستند که از منابع مختلفی نظیر خاک، هوموس، پیت، لیگنیت اکسیدشده، زغال‌سنگ و غیره استخراج می‌شوند و از نظر اندازه‌ی مولکولی و ساختار شیمیایی متفاوت هستند (Puglisi *et al*., 2009; Rezazadeh *et al*., 2012). مقادیر اندک اسیدهای آلی از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، منجر به افزایش حاصل‌خیزی خاک می‌شود (Natesan *et al*., 2007). از دیگر مزایای اسیدهیومیک می‌توان به خاصیت کلات‌کنندگی عناصر غذایی (Verlinden *et al*., 2009)، افزایش ظهور ریشه‌های جانبی، افزایش رشد اندام‌های هوایی و محتوای نیتروژن، رفع کلروز برگ‌ها (Maccarthy, 2001)، بهبود جذب عناصر غذایی و سهولت جذب عناصر پُرمصرف و کم‌مصرف (Puglisi *et al*., 2009)، افزایش فعالیت‌های شبه‌هورمونی (Samavat and Malakuti, 2006) و افزایش تولید و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی (Tahir *et al*., 2011) اشاره کرد. در یک پژوهش، اثر اسیدهیومیک بر خصوصیات رشدی فلفل (*Capsicum frutesens* L.) مطالعه و گزارش شد که سطوح ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰میلی‌گرم بر کیلوگرم اسیدهیومیک، افزایش طول هیپوکوتیل، قطر و طول ساقه، وزن خشک، میزان عناصر غذایی و عملکرد گیاه را به‌همراه داشت (Turkmen *et al*., 2005). در پژوهشی دیگر، اثر سطوح مختلف اسیدهیومیک (صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰میلی‌گرم در لیتر) بر عملکرد و اجزای

عملکرد گیاه دارویی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) بررسی و گزارش شد که بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی، ارتفاع و تعداد گل و برگ در بوته در اثر کاربرد تیمار ۲۰۰۰میلی‌گرم در لیتر اسید هیومیک به‌دست آمد (Mohammadipour *et al*., 2012).

فراهمی آب و عناصر غذایی، عامل‌های کلیدی در تولید اگرواکوسیستم‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند (Zhou *et al*., 2007) و بهینه‌سازی این دو عامل با هم مرتبط است، به‌طوری‌که استفاده‌ی بهینه از کود در شرایطی امکان‌پذیر است که مدیریت بهینه‌ی آبیاری وجود داشته باشد (Mahajan *et al*., 2012). آب آبیاری ممکن است سبب نفوذ عمقی و آب‌شویی عناصر غذایی موجود در کودهای مصرفی به پایین‌تر از محدوده‌ی توسعه‌ی ریشه گیاهان شود. برای به حداقل رساندن آب‌شویی عناصر غذایی، مدیریت مصرف کود باید با مدیریت صحیح مقدار و زمان آبیاری همراه باشد. با دانستن مقدار آب موردنیاز محصول و ظرفیت نگه‌داری آب توسط خاک، می‌توان مدیریت مناسب آبیاری را اعمال کرد به‌طوری‌که از آب‌شویی عناصر غذایی اجتناب گردد (Sanchez-Martin, 2006).

برای تعیین حد بهینه‌ی آب آبیاری و کود، استفاده از مدل‌ها و روابط تجربی-ریاضی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. یکی از معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای بهینه‌سازی این عوامل و تخمین مدل رگرسیون درجه دو، طرح مرکب مرکزی[1] است (Wu and Hamada, 2000). این طرح روشی جایگزین و مناسب برای طرح فاکتوریل می‌باشد که اولین بار در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون ارائه گردید و توسط باکس و هانتر اصلاح شد. مزیت استفاده از طرح مرکب مرکزی نسبت به آزمایشات فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیش‌تر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش می‌باشد که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند، هم‌چنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007). در یک پژوهش Koocheki *et al*., 2015 با استفاده از طرح مرکب مرکزی، مقادیر بهینه‌ی مصرف کود نیتروژن و آبیاری را در زراعت گندم تعیین و گزارش کردند که در سناریوی اقتصادی به‌منظور دست‌یابی به ۴۰۴۵کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه، مقدار بهینه‌ی کود و آب به‌ترتیب ۲۷۴کیلوگرم در هکتار کود اوره و ۳۹۶۴مترمکعب در هکتار آب به‌دست آمد. در پژوهشی دیگر، Jahan *et al*, 2017 پس از بررسی مقادیر بهینه‌ی کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در زراعت گندم گزارش کردند که در سناریوی اقتصادی، مصرف ۱۴۵کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، ۲۰۰کیلوگرم در هکتار فسفر و ۱۸تن در هکتار کود دامی، منجر به تولید ۶۵۰۰کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه شد و در سناریوی زیست‌محیطی با مصرف ۲۱کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، بدون کاربرد فسفر و مصرف ۱۶تن در هکتار کود دامی، عملکرد دانه‌ای معادل با ۳۱۶۰کیلوگرم در هکتار حاصل شد.

علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در مورد اثر سطوح مختلف آبیاری و کود بر روی گیاهان مختلف صورت گرفته است، اطلاعات موجود در زمینه‌ی بهینه‌سازی هم‌زمان این عوامل با استفاده از تکنیک‌های آماری اندک است، لذا این تحقیق با هدف بهینه‌سازی میزان مصرف سوپرجاذب رطوبت، اسیدهیومیک و آب آبیاری در زراعت ذرت با استفاده از تکنیک سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش طی سال ۱۳۹۳ در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض‌جغرافیایی ۳۶درجه و ۱۶دقیقه شمالی و طول‌جغرافیایی ۵۹درجه و ۳۸دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵متر از سطح دریا در زمینی به مساحت ۱۵۰مترمربع اجرا شد. این پژوهش با استفاده از طرح مرکب مرکزی طراحی شد تا حداکثر اطلاعات با کمترین تعداد اجرا از طریق توزیع نقاط آزمایشی در محدوده‌ی موردنظر استخراج شود. مبنای انتخاب سطوح سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک، نتایج پژوهش‌های قبلی نگارندگان مقاله بود (Jahan *et al*., 2013; Jahan *et al*., 2015a; Jahan *et al*., 2015b). به‌منظور محاسبه‌ی نیاز آبی ذرت در شرایط مشهد، از نرم‌افزار OPTIWAT استفاده شد. با اطلاع از طول فصل رشد ذرت، داده‌های مربوط به تبخیر و تعرق روزانه و فاصله‌ی آبیاری هفت روز، حجم آب موردنیاز در هر بار آبیاری برای تیمار ۱۰۰درصد نیاز آبی ۴۰۰مترمکعب در هکتار و برای ۵۰درصد نیاز آبی ۲۰۰مترمکعب در هکتار محاسبه شد. تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح پایین و بالای سوپرجاذب رطوبت (با نام تجاری کلوفونی) (۸۰ و ۱۶۰کیلوگرم در هکتار)، اسیدهیومیک (با نام تجاری پوهوموس ۸۵درصد) (چهار و هشت کیلوگرم در هکتار) و حجم آب آبیاری (۱۰۰ و ۵۰درصد نیاز آبی) با استفاده از نرم‌افزار مشخص شدند که با در نظرگرفتن سه تکرار برای نقطه‌ی مرکزی، در مجموع ۱۵ترکیب تیماری برای مطالعه لحاظ گردید. مقادیر بیشینه، مرکزی و کمینه‌ی فاکتورها به‌ترتیب با ۱+، ۰ و ۱- در جدول ۱ نشان داده شده است. قبل از انجام آزمایش، به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق صفر تا ۳۰سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام گرفت. نتایج حاصل از تجزیه‌ی فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. برای آماده‌سازی زمین عملیات دیسک‌زنی و تسطیح زمین توسط تراکتور انجام شد. سپس مقادیر مختلف سوپرجاذب برای هر یک از کرت‌های مربوطه محاسبه و به‌طور یکنواخت در سطح

1- Central composite design

کرت‌های موردنظر پخش و بلافاصله با خاک مخلوط شدند. بذور ذرت از مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد تهیه و در کرت‌هایی به ابعاد ۳×۲متر و ردیف‌هایی به فواصل ۵۰سانتی‌متر بر مبنای تراکم مطلوب ذرت (هفت بوته در مترمربع) کشت و بلافاصله آبیاری شدند. به‌واسطه‌ی ماهیت طرح آماری، کلیه‌ی تیمارها در یک بلوک اعمال شدند. به‌منظور اجتناب از مخلوط‌شدن آب کرت‌ها با یکدیگر، برای هر تکرار و هر کرت لوله‌ی آبیاری جداگانه در نظر گرفته شد. تیمارهای آبیاری بعد از عملیات تنک، به‌صورت هر هفت روز یک‌بار اعمال و برای کنترل حجم آب ورودی از کنتور استفاده شد.

اعمال سطوح مختلف اسیدهیومیک در دو نوبت به‌صورت محلول‌پاشی روی برگ‌ها در مراحل شش تا هفت برگی و قبل از گلدهی در کرت‌های مربوطه انجام گرفت. محلول‌پاشی به‌هنگام غروب آفتاب و توسط پمپ دستی با حجم پاشش ۴۰۰لیتر در هکتار به‌صورت یکنواخت در سطح کرت‌های موردنظر انجام شد.

جدول ۱- مقادیر و ضرایب تیمارها با توجه به طرح باکس- بنکن

Table 1- Values and coefficients of treatments based on the Box-Benken design

شماره تیمارها Number of treatments	ضرایب* Coefficients			مقادیر تیمارها Amounts of treatments		
	سوپرجاذب رطوبت Water super absorbent ($Kgha^{-1}$)	اسیدهیومیک Humic acid (ha^{-1} Kg)	حجم آبیاری Volume of irrigation (m^3 ha^{-1})	سوپرجاذب رطوبت Water super absorbent (Kg ha^{-1})	اسیدهیومیک Humic acid (Kg ha^{-1})	حجم آبیاری Volume of irrigation (m^3 ha^{-1})
1	0	0	0	120	6	300
2	-1	0	-1	80	6	200
3	0	0	0	120	6	300
4	0	+1	-1	120	8	200
5	+1	-1	0	160	4	300
6	+1	0	+1	160	6	400
7	-1	+1	0	80	8	300
8	+1	0	-1	160	6	200
9	-1	-1	0	80	4	300
10	+1	+1	0	160	8	300
11	0	-1	-1	120	4	200
12	0	0	0	120	6	300
13	-1	0	+1	80	6	400
14	0	+1	+1	120	8	400
15	0	-1	+1	120	4	400

* ۱+، ۱- و ۰ به‌ترتیب سطوح بالا، پایین و میانگین هر فاکتور می‌باشد.

* +1, -1 and 0 are high, low and average levels of each factor, respectively.

به‌منظور کنترل علف‌های هرز، ۲نوبت وجین‌دستی به‌ترتیب در مراحل چهار برگی و ۱۰برگی انجام شد. در کلیه‌ی مراحل آماده‌سازی زمین، کاشت و هم‌چنین در طول دوره‌ی رشد، از هیچ‌گونه علف‌کش، آفت‌کش و قارچ‌کش شیمیایی استفاده نشد.

در اواخر فصل رشد، با آغاز مرحله‌ی رسیدگی دانه‌ها، زرد شدن بوته‌ها و خشک شدن بلال‌ها، ۰/۵مترمربع از هر کرت به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی نظیر تعداد دانه در بوته و میزان پروتئین دانه اندازه‌گیری شدند. برای تعیین عملکرد دانه و عملکرد ماده‌ی خشک، پس از حذف اثر حاشیه‌ای، سطح سه مترمربع از هر کرت انتخاب و عملیات برداشت انجام شد. پروتئین دانه و میزان نیتروژن خاک به‌روش AOAC Official Method 968.06 (4.2.04) بر اساس تعیین نیتروژن به روش کجلدال و با استفاده از دستگاه Semi-Automated Distillation Unit انجام شد (Horwitz and Latimer, 2005).

جهت محاسبه کارآیی مصرف آب آبیاری (WUE)[1] (kg Grain.m^3 $Water^{-1}$) از معادله ۱ استفاده شد (Koocheki *et al*., 2015):

1- Water Use Efficiency

$$WUE = \frac{Y_s}{W_I + W_P} \quad (۱)$$

که در این معادله، Y_s عملکرد دانه ($kg.ha^{-1}$)، W_I مقدار آب آبیاری ($m^3.ha^{-1}$) و W_P میزان بارندگی (mm) می‌باشد.

مقادیر بهینه‌ی سوپرجاذب رطوبت، اسیدهیومیک و حجم آب آبیاری با توجه به سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی تعیین گردید، بدین‌ترتیب که در سناریوی اقتصادی، عملکرد دانه‌ی ذرت، در سناریوی زیست‌محیطی، کارآیی مصرف آب و در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب به‌عنوان مبنای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. در ادامه، سطوح بهینه‌ی فاکتورها برای حصول هر یک از سناریوهای تعریف شده بر اساس الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی تعیین گردید.

در نهایت نتایج برازش شده با داده‌های مشاهده شده مقایسه شدند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از آزمون‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا[1] (معادله‌ی ۲) و رگرسیون خطی یک به یک ارزیابی شدند.

$$RMSE\,(\%) = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

که در این معادله $\bar{O}$ میانگین مشاهدات، P_i مقادیر برازش شده و O_i مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

RMSE به‌صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و بر اساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی که مقدار RMSE کمتر از ۱۰درصد باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰درصد باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰درصد باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰درصد باشد، ضعیف برآورد می‌شود (Myers and Montgomery, 1995). همچنین، برای ارزیابی مدل می‌توان از نمودار مقادیر مشاهده شده در برابر مقادیر برازش شده استفاده کرد. بر این اساس، معادله خط راست مقادیر مشاهده شده و برازش شده با توجه به مدل‌های نهایی که در هر یک از صفات انتخاب شدند رسم شد (معادله‌ی ۳).

$$P_i = a + b\,O_i \quad (۳)$$

تجزیه واریانس و تحلیل رگرسیونی داده‌های حاصل از آزمایش و رسم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Minitab Ver. 17، Slide Write Ver. 2 و MS EXCEL Ver. 11 انجام گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل[2] در جدول ۳ نشان داده شده است بر این اساس عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اسیدهیومیک و آبیاری از جزء خطی مدل رگرسیونی و اثرات درجه دو سوپرجاذب و آبیاری از جزء درجه دو مدل رگرسیونی قرار گرفت. آزمون عدم برازش برای عملکرد دانه غیرمعنی‌دار بود که قابلیت بالای مدل برازش‌شده را نشان می‌دهد (جدول ۳). همان‌طورکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین میزان عملکرد دانه زمانی حاصل شد که به‌ترتیب از ۱۲۰ و ۸کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک استفاده شد و در هر آبیاری ۳۰۰مترمکعب در هکتار در هر نوبت آب در اختیار گیاه قرار گرفت. با افزایش مقادیر مصرفی سوپرجاذب از ۸۰ به ۱۲۰کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه افزایش یافت، ولی افزایش بیش از ۱۲۰ حد سوپرجاذب کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب منجر به کاهش عملکرد دانه شد (شکل ۱). لازم به‌ذکر است که علی‌رغم کاهش عملکرد دانه در سطوح بالای سوپرجاذب، عملکرد دانه در بالاترین سطح این کود (۱۶۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب) بیش‌تر از مقدار این صفت در پایین‌ترین سطح سوپرجاذب مصرفی (به‌ترتیب ۸۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب) بود (شکل ۱).

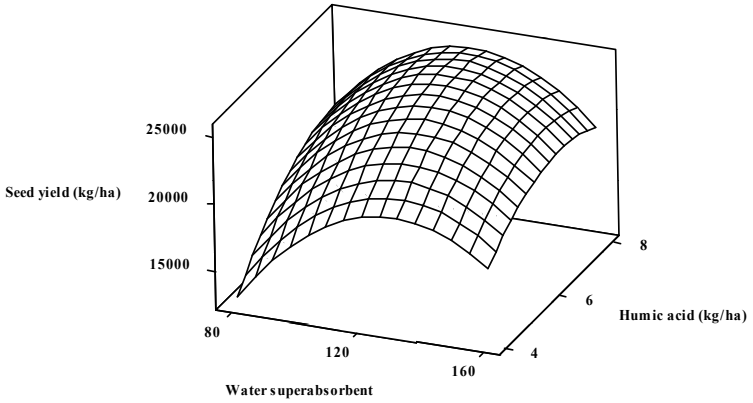
1- Root mean square error

2- Full quadratic regression

جدول ۲- خصوصیات خاک، اسیدهیومیک و سوپرجاذب مورد استفاده

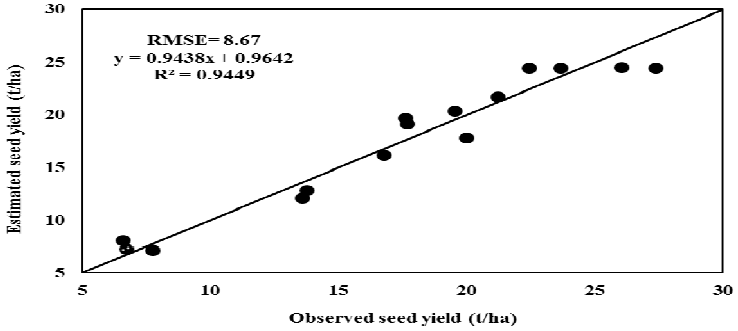
Table 2- Characteristics of used soil, humic acid and super absorbent

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک Physiochemical characteristics of soil		خصوصیات اسیدهیومیک مورد استفاده Characteristics of used humic acid		خصوصیات سوپرجاذب مورد استفاده Characteristics of used polymer super absorbent	
بافت خاک Soil texture	لوم سیلتی Silty loam	نام تجاری Trade name	پوهوموس ۸۵ درصد WGS 85%	ظاهر Appearance	پودر سفید رنگ White powder
نیتروژن کل (درصد) Total nitrogen (%)	0.061	اسیدهیومیک (درصد) Humic acid (%)	85	مقدار رطوبت (درصد) Moisture content	Less than 5
فسفر قابل‌دسترس ($mg.kg^{-1}$) Available phosphorus ($mg.kg^{-1}$)	11.4	اکسید پتاسیم (درصد) Potassium oxid (%)	12	بو و سمیت Odor and toxicity	0
پتاسیم قابل‌دسترس ($mg.kg^{-1}$) Available potassium ($mg.kg^{-1}$)	468	آهن (درصد) Fe (%)	1	چگالی توده‌ای ($g.cm^{-3}$) Mass density ($g.cm^{-3}$)	0.8
نسبت آب به خاک ($dS.m^{-1}$) Electrical conductivity ($dS.m^{-1}$)	1.1	نیتروژن آلی (درصد) Organic nitrogen (%)	0.8	pH	6-7
کربن آلی خاک (درصد) Soil organic carbon (%)	0.54	pH	9-10		
اسیدیته خاک pH	8.23				



شکل ۱- سطح-پاسخ عملکرد دانه ذرت نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در سطح ثابت ۳۰۰ مترمکعب در هکتار آبیاری

Figure 1- Response surface of maize grain yield affected by different levels of water superabsorbent and humic acid in constant level of 300 $m^3.ha^{-1}$ in each irrigation



شکل ۲- نمودار و معادله خط رگرسیون مقادیر برازش داده شده و مشاهده شده برای عملکرد دانه و مقدار RMSE با توجه به مدل رگرسیونی درجه دو کامل

Figure 2- Graph and regression line equation of the fitted and observed values for grain yield and the RMSE values based on model of full quadratic regression

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مدل رگرسیونی درجه دو کامل اثر سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک و کم‌آبیاری بر برخی ویژگی‌های رشدی ذرت

Table 3- Analysis of variance (mean squares) of full quadratic regression

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Df	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد ماده‌ی خشک Dry matter yield	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	پروتئین دانه Grain protein	کارآیی مصرف آب WUE
مقدار ثابت Constant		**	**	**	**	**
مدل رگرسیون Regression model	9	64785781*	99083176n.s	45649*	8.05n.s	1.66*
خطی Linear	3	112519668**	140592408n.s	55835*	2.27n.s	1.07n.s
سوپرجاذب superabsorbent	1	16824640n.s	18483200n.s	9905n.s	1.32n.s	0.54n.s
اسیدهیومیک Humic acid	1	43897326*	81856013n.s	26912*	2.31n.s	2.20n.s
آبیاری Irrigation	1	276837038**	321438013*	130688**	3.18n.s	0.47n.s
درجه ۲ Square	3	77651454*	136266444n.s	78961**	20.19*	3.69*
سوپرجاذب×سوپرجاذب Superabsorbent×Superabsorbent	1	85848811*	76118339n.s	115078**	32.12*	4.00*
اسیدهیومیک×اسیدهیومیک Humic acid×Humic acid	1	14262055n.s	116844231n.s	63283*	11.99*	0.51n.s
آبیاری×آبیاری Irrigation×Irrigation	1	158757681**	270733078*	93982**	25.12*	7.73**
اثر متقابل Interaction effect	3	4186221n.s	20390675n.s	2150n.s	1.70n.s	0.21n.s
سوپرجاذب×اسیدهیومیک Superabsorbent×Humic acid	1	4646094n.s	20611600n.s	14n.s	0.52n.s	0.20n.s
سوپرجاذب×آبیاری Superabsorbent×Irrigation	1	7444385n.s	17472400n.s	6084n.s	4.55n.s	0.25n.s
اسیدهیومیک×آبیاری Humic acid×Irrigation	1	468184n.s	23088025n.s	352n.s	0.04n.s	0.19n.s
عدم برازش Lack of fit	3	6885371n.s	46842308n.s	7161n.s	2.21n.s	0.42n.s

**، * و n.s به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار.

**, * and n.s are significant at the 0.01 and 0.05 of probability level and non-significant, respectively.

به‌منظور تخمین عملکرد دانه با استفاده از مدل رگرسیونی درجه دو کامل از اطلاعات جدول ۴ استفاده شد. ضرایب تبیین (R^2) نشان‌دهنده‌ی درصد تغییرات هر یک از متغیرهای وابسته تحت تأثیر متغیرهای مستقل است، به‌طوری‌که ضرایب تبیین بالا، برازش خوب مدل برآورد شده را نشان می‌دهند.

جدول ٤- ضرایب رگرسیون و تبیین معادله رگرسیونی درجه دو برای صفات مختلف مورد مطالعه در ذرت

Table 4- Regression coefficients and coefficients of determination of regression equation fitted for corn studied traits.

$$Y= a_0+a_1X_1+a_2X_2+a_3X_3+a_4X_1^2+a_5X_2^2+a_6X_3^2+a_7X_1X_2+a_8X_1X_3+a_9X_2X_3^*$$

	متغیرهای پاسخ Response variables				
ضرایب Coefficients	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد ماده‌ی خشک Dry matter yield	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	پروتئین دانه Grain protein	کارآیی مصرف آب WUE
a_0	-64995	-91020	-2495	-21.70	-13.59
a_1	806	837	26.25	0.399	0.17
a_2	8513	20679	424	5.08	1.83
a_3	925	666	23.90	0.15	0.20
a_4	-3.01	-2.84	-0.11	-0.0018	-0.0006
a_5	-491	-1406	-32.73	-0.45	-0.09
a_6	-29.14	-38.10	-0.70	-0.01	-0.006
a_7	-13.50	-28.40	0.02	0.004	-0.002
a_8	2.27	3.48	0.06	0.001	0.0004
a_9	11.40	80.10	-0.31	0.003	-0.007
R^2	94.49	85.21	94.77	88.05	88.90

X_1، X_2 و X_3 به‌ترتیب متغیرهای مستقل سوپرجاذب رطوبت، اسیدهیومیک و آبیاری هستند.

X_1, X_2 and X_3 are independent variables of water superabsorbent, humic acid and irrigation, respectively.

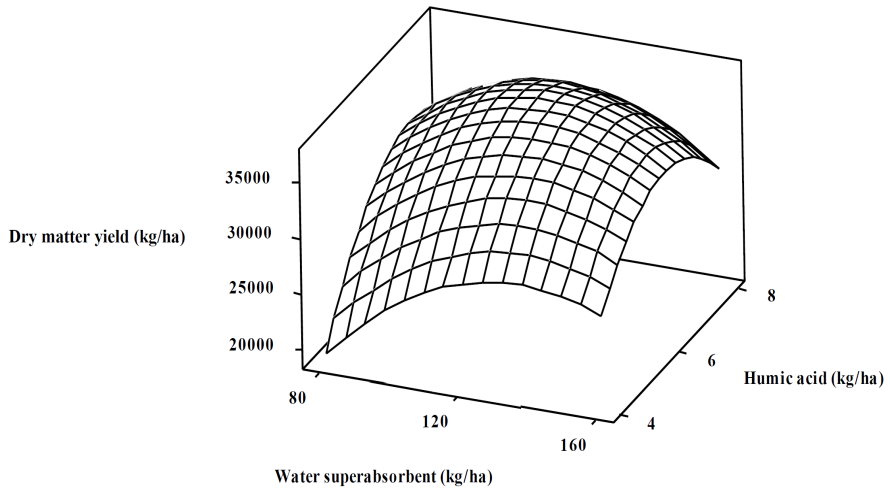
مقدار پایین RMSE (۸/۶۷درصد) و مقدار بالای ضریب تبیین (R^2= ۰/۹۴) نشان‌دهنده ی برازش عالی مدل است (شکل ۲)، ضمن این‌که بین عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون و شیب و عرض از مبدأ معادله‌ی خط ۱:۱ تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

به‌نظر می‌رسد که کاربرد ۱۲۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی خاک (Abedi-Koupai *et al*., 2008) منجر به افزایش عملکرد دانه شد. در یک بررسی اثر سطوح مختلف سوپرجاذب و اسیدهیومیک بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیاقرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) مطالعه و گزارش شد که بیش‌ترین و کمترین عملکرد دانه به‌ترتیب در تیمارهای ۸۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب به‌علاوه‌ی اسیدهیومیک و عدم‌کاربرد سوپرجاذب بدون اسیدهیومیک بدست آمد، ضمن این‌که در تمامی سطوح سوپرجاذب موردمطالعه، کاربرد اسیدهیومیک منجر به افزایش عملکرد دانه شد (Jahan *et al*., 2011). Yazdani *et al*., 2012 اثر مقادیر مختلف سوپرجاذب و مدار آبیاری را بر عملکرد و اجزای عملکرد سویا مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که با افزایش مقادیر مصرفی سوپرجاذب، عملکرد دانه به‌میزان قابل‌توجهی نسبت به شاهد افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد که اسید هیومیک مورد مطالعه از طریق بهبود فراهمی عناصر غذایی (Puglisi *et al*., 2009) شرایط مساعدی را برای رشد مطلوب‌تر گیاه فراهم کرد، لذا افزایش عملکرد دانه در شرایط کاربرد این کودها منطقی به‌نظر می‌رسد. در یک پژوهش، اثر اسیدهای آلی هیومیک و فولویک بر عملکرد گل و دانه گاوزبان ایرانی (*Echium amoenum*) بررسی و گزارش شد که اسیدهیومیک و اسید فولویک به‌ترتیب منجر به افزایش ۳۲ و ۲۲درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شدند (Amiri, 2015). در پژوهشی دیگر، اثر سطوح مختلف اسیدهیومیک بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت مطالعه و گزارش شد که بیش‌ترین و کمترین مقدار عملکرد دانه به‌ترتیب در تیمارهای ۳۵۰۰گرم در هکتار و شاهد با میانگین‌های ۱۰۴۶۸ و ۸۰۰۵کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (Ghorbani *et al*., 2009).

عملکرد ماده‌ی خشک

اثر آبیاری از جزء خطی و درجه دو مدل رگرسیونی بر عملکرد ماده‌ی خشک معنی‌دار بود (جدول ۳)، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار عملکرد ماده‌ی خشک در سطح متوسط آبیاری (۳۰۰مترمکعب در هکتار در هر نوبت) به‌دست آمد و عملکرد ماده‌ی خشک در شرایط ۳۰۰مترمکعب در هکتار آبیاری به‌ترتیب ۴۶ و پنج درصد بیش‌تر از سطوح ۲۰۰ و ۴۰۰مترمکعب در هکتار آبیاری بود. همان‌طورکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش سوپرجاذب تا سطح ۱۲۰کیلوگرم در هکتار، عملکرد ماده‌ی خشک افزایش یافت، ولی افزایش بیش‌تر سوپرجاذب کاهش عملکرد ماده‌ی خشک را در پی داشت. عملکرد ماده‌ی خشک در شرایط کاربرد ۱۲۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب به‌ترتیب از افزایش ۱۸ و هفت درصدی نسبت به کاربرد سطوح ۸۰ و ۱۶۰کیلوگرم در هکتار برخوردار شد. بیش‌ترین تأثیرگذاری

اسیدهیومیک در بهبود عملکرد ماده‌ی خشک در سطح میانی این کود (شش کیلوگرم در هکتار) حاصل شد، ضمن این‌که کاربرد هشت کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک افزایش ۲۳درصدی عملکرد ماده‌ی خشک را در مقایسه با کاربرد سطح چهار کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک به‌همراه داشت (شکل ۳).



شکل ۳- سطح- پاسخ عملکرد ماده‌ی خشک ذرت نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در سطح ثابت ۳۰۰ مترمکعب در هکتار آبیاری

Figure 3- Response surface of maize dry matter yield affected by different levels of water super absorbent and humic acid in constant level of 300 m^3 ha^{-1} irrigation

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین توابع برازش شده برای متغیرهای پاسخ در جدول ۵ نشان داده شده است. مقدار پایین RMSE (۱۲/۱۱درصد) و مقدار بالای ضریب تبیین (۰/۸۵=R^2) در عملکرد ماده‌ی خشک، برازش خوب مدل را مورد تأیید قرار داد (جدول ۵).

جدول ۵- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین توابع برازش شده برای متغیرهای پاسخ در ذرت

Table 5- Root mean square error and defining coefficients of fitted equations for response variables in maize

	متغیرهای پاسخ Response variables		
	عملکرد ماده‌ی خشک Dry matter yield	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	پروتئین دانه Grain protein
RMSE (%)	12.11	8.07	4.92
R^2	0.85	0.94	0.88

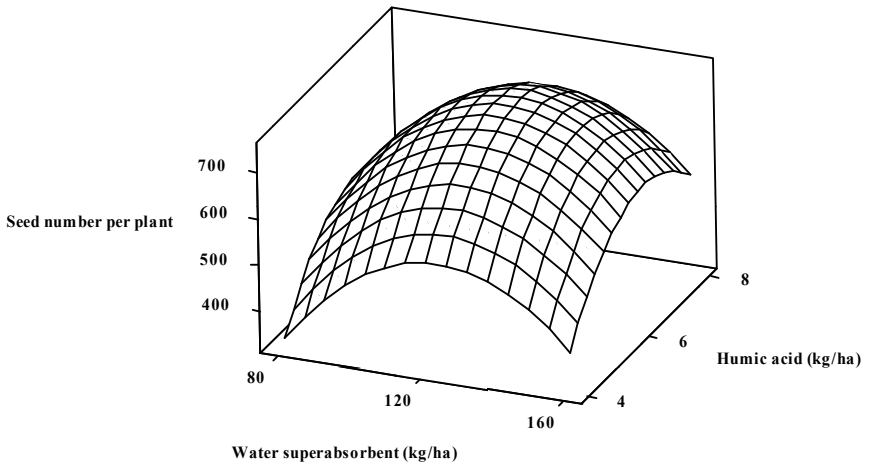
به‌نظر می‌رسد که اسیدهیومیک احتمالاً از طریق بهبود فعالیت‌های آنزیمی در محیط ریشه (Samavat and Malakuti, 2006)، کارایی گیاه را در جذب آب افزایش داده و در نتیجه عملکرد ماده‌خشک افزایش یافت. Mohammadipour *et al*, 2012 اثر سطوح مختلف اسیدهیومیک (صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰میلی‌گرم در لیتر) را بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی همیشه‌بهار مطالعه و گزارش کردند که بیش‌ترین عملکرد ماده خشک در تیمار ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدهیومیک حاصل شد. Jahan *et al*, 2015a اثر سطوح سوپرجاذب و اسیدهیومیک را در مدارهای آبیاری مختلف بر عملکرد کمی و کیفی چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) مطالعه و گزارش کردند که بیش‌ترین عملکرد ماده خشک در نتیجه‌ی کاربرد سوپرجاذب و محلول‌پاشی اسیدهیومیک و دور آبیاری هفت روز به‌دست آمد. در یک بررسی گزارش شد که کاربرد پنج تا ۱۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب تأثیر معنی‌داری بر خصوصیات کمی و کیفی ذرت نداشت، در حالی‌که مصرف مقادیر بیش‌تر سوپرجاذب (۱۵کیلوگرم در هکتار و بالاتر) عملکرد و اجزای عملکرد ذرت را به‌میزان قابل‌توجهی افزایش داد (Moa *et al*., 2011). در پژوهشی اثر هیدروژل‌های سوپرجاذب بر خصوصیات کمی و کیفی ذرت در

شرایط تنش خشکی بررسی و گزارش شد که کاربرد ۳۰۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب، کاهش شستشوی مواد غذایی، رشد سریع و مطلوب ریشه و تهویه بهتر خاک باعث افزایش عملکرد ماده‌خشک گیاه شد (Kuhestani *et al*., 2009).

تعداد دانه در بوته

اثرات خطی اسیدهیومیک و آبیاری و هم‌چنین اثرات درجه دو سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آبیاری بر تعداد دانه در بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). با افزایش مقادیر مصرفی سوپرجاذب از ۸۰ به ۱۲۰کیلوگرم در هکتار، تعداد دانه در بوته ۳۴درصد افزایش یافت، در حالی‌که افزایش بیش‌تر سوپرجاذب از ۱۲۰ به ۱۶۰کیلوگرم در هکتار کاهش ۲۱درصدی تعداد دانه در بوته را در پی داشت (شکل ۴). کاربرد شش کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک به‌ترتیب منجر به افزایش ۳۶ و ۱۶درصدی تعداد دانه در بوته نسبت به کاربرد سطوح چهار و هشت کیلوگرم در هکتار شد (شکل ۴). ۳۰۰مترمکعب در هکتار در هر مرتبه آبیاری در طول فصل رشد، بیش‌ترین تولید تعداد دانه در بوته را در مقایسه با سایر سطوح آبیاری مورد مطالعه سبب شد، به‌طوری‌که تعداد دانه در بوته در این شرایط به‌ترتیب ۴۸ و ۲درصد نسبت به اعمال سطوح آبیاری ۲۰۰ و ۴۰۰مترمکعب در هکتار افزایش یافت (شکل ۴).

با توجه به RMSE و R^2 محاسبه شده برای متغیر پاسخ تعداد دانه در بوته (به‌ترتیب ۸/۰۷درصد و ۰/۹۴)، برازش مدل در این صفت در کلاس عالی قرار گرفت (جدول ۵).



شکل ٤- سطح- پاسخ تعداد دانه در بوته ذرت نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در سطح ثابت ۳۰۰ مترمکعب در هکتار آبیاری

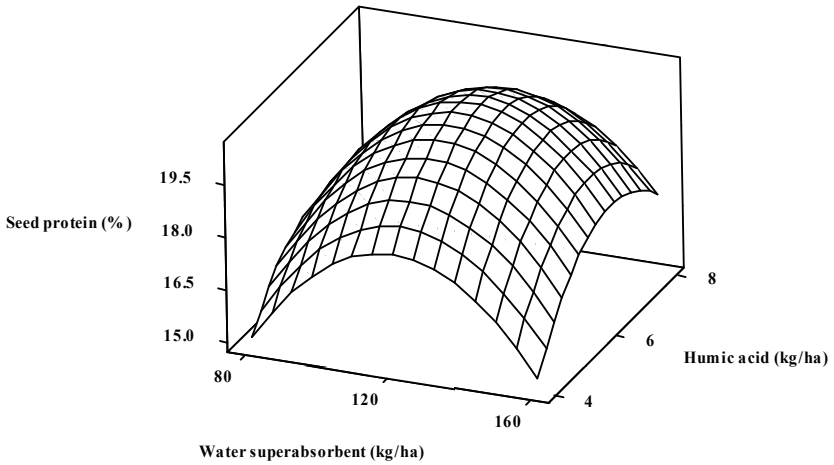
Figure 4- Response surface of grain number per plant in maize affected by different levels of water super absorbent and humic acid in constant level of 300 $m^3.ha^{-1}$ irrigation

به‌نظر می‌رسد که سطوح مختلف سوپرجاذب از طریق بهبود جذب عناصر غذایی و سهولت جذب عناصر ماکرو و میکرو (Eneji *et al*., 2013) توسط گیاه منجر به بهبود خصوصیات کمی گیاه شدند. در یک پژوهش گزارش شد که کاربرد ۶۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، موجب افزایش تعداد خوشه و بذر در بوته‌ی یولاف (*Avena sativa*) شد (Islam *et al*., 2011). در پژوهشی با بررسی اثر سطوح سوپرجاذب و اسیدهیومیک در مدارهای آبیاری مختلف بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا قرمز گزارش شد که کارایی تمامی سطوح سوپرجاذب مورد مطالعه در شرایط استفاده از اسیدهیومیک بهبود یافت، بدین‌ترتیب که در شرایط کاربرد اسیدهیومیک کارایی سطوح صفر، ۴۰ و ۸۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب به‌ترتیب ۱۹، ۱۸ و ۱۱درصد نسبت به کاربرد جداگانه‌ی آن‌ها افزایش یافت (Jahan *et al*., 2011). در پژوهشی دیگر، اثر سطوح مختلف اسید هیومیک (صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰میلی‌گرم در لیتر) بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی همیشه‌بهار بررسی و گزارش شد که بیش‌ترین تعداد گل و دانه در بوته در اثر کاربرد تیمار ۲۰۰۰میلی‌گرم در لیتر اسید هیومیک به‌دست آمد (Mohammadipour *et al*., 2012). در پژوهشی دیگر، پس از بررسی اثر سطوح مختلف اسید فولویک (صفر، ۵۰ و ۱۰۰میلی‌گرم در لیتر) بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی اسفرزه (*Plantago avate*) گزارش شد که کاربرد اسید فولویک ضمن بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاه، خسارات ناشی از تنش شوری را کاهش داد (Gholami *et al*.,

2013). همسو با نتایج این پژوهش، Ghorbani *et al*., 2009 گزارش کردند که کاربرد ۳۵۰۰گرم در هکتار اسیدهیومیک، موجب افزایش قابل‌توجه تعداد بذر در ردیف و طول بلال ذرت شد. در یک پژوهش گزارش شد که استفاده از نهاده‌های اکولوژیک مختلف (اسیدهیومیک، نیتروکسین، میکوریزا و استفاده‌ی ترکیبی این کودها) منجر به بهبود خصوصیات کمی و کیفی و به‌ویژه وزن و تعداد دانه در بوته‌ی گندم شد (Massoud *et al*., 2013). در پژوهشی دیگر، گزارش شد که کاربرد ۲۰۰ تا ۳۰۰گرم در هکتار اسیدهیومیک، عملکرد دانه و عملکرد ماده‌ی خشک تولیدی ذرت را به‌ترتیب ۲۵ و ۲۳درصد نسبت به شاهد افزایش داد، ضمن این‌که در شرایط استفاده از این اسید آلی، وزن هزار دانه و تعداد دانه در بوته نیز در مقایسه با شاهد افزایش یافت (Sarir *et al*., 2005).

پروتئین دانه

اثرات درجه دو سوپرجاذب، اسیدهیومیک و آبیاری بر پروتئین دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). روند تغییرات میزان پروتئین دانه با افزایش سوپرجاذب مصرفی تا سطح ۱۲۰کیلوگرم در هکتار افزایش و سپس با افزایش بیش‌تر سوپرجاذب به‌شدت کاهش یافت. پروتئین دانه در سطح ۱۲۰کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب به‌ترتیب ۱۷ و ۱۲درصد بیش‌تر از سطوح ۸۰ و ۱۶۰کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۵). سطح میانی اسیدهیومیک (شش کیلوگرم در هکتار) بیش‌ترین تأثیرگذاری را در بهبود میزان پروتئین دانه داشت (با میزان پروتئین ۱۷درصد) و پروتئین دانه را به‌ترتیب ۱۱ و پنج درصد نسبت به سطوح چهار و هشت کیلوگرم در هکتار افزایش داد (شکل ۵). لازم به‌ذکر است که افزایش دو برابری اسیدهیومیک مصرفی از چهار به هشت کیلوگرم در هکتار منجر به افزایش هفت درصدی میزان پروتئین دانه شد (شکل ۵). افزایش میزان آب آبیاری از ۲۰۰ به ۳۰۰ و از ۳۰۰ به ۴۰۰مترمکعب در هکتار، میزان پروتئین دانه را به‌ترتیب با افزایش و کاهش مواجه ساخت (شکل ۵)، به‌طوری‌که میزان پروتئین دانه در شرایط آبیاری متوسط (۳۰۰مترمکعب در هکتار) به‌ترتیب ۱۶ و ۹درصد بیش‌تر از سطوح ۲۰۰ و ۴۰۰مترمکعب در هکتار بود (شکل ۵).



شکل ۵- سطح- پاسخ پروتئین دانه ذرت نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در سطح ثابت ۳۰۰ مترمکعب در هکتار آبیاری

Figure 5- Response surface of maize grain protein affected by different levels of water super absorbent and humic acid in constant level of 300 $m^3.ha^{-1}$ irrigation

RMSE پایین (۴/۹۲درصد) و ضریب تبیین بالا (R^2= ۰/۸۸) در متغیر پاسخ پروتئین دانه نشان‌دهنده‌ی برازش عالی مدل در صفت فوق بود.

تأثیر اسیدهیومیک بر رشد گیاه ممکن است به‌صورت مستقیم (افزایش کل وزن خشک گیاه) و یا به‌صورت غیرمستقیم (افزایش راندمان مصرف کود و کاهش فشردگی خاک) باشد (Samavat and Malakuti, 2006). پس از بررسی اثر اسیدهای آلی Amiri, 2015 بر خصوصیات کمی و کیفی گاوزبان ایرانی (*Echium amoenum*) گزارش کرد که اسیدهای آلی هیومیک و فولویک روغن دانه را به‌ترتیب ۱۱ و هشت درصد و پروتئین دانه را به‌ترتیب ۲۱ و ۲۴درصد نسبت به شاهد افزایش دادند. در پژوهشی گزارش شد که اسیدهیومیک در افزایش جذب فسفر، افزایش مقادیر رنگدانه‌های فتوسنتزی و بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی چای ترش (*Hisbiscus sabdariffa* L.) مؤثر بود (Heidari and Khalili,

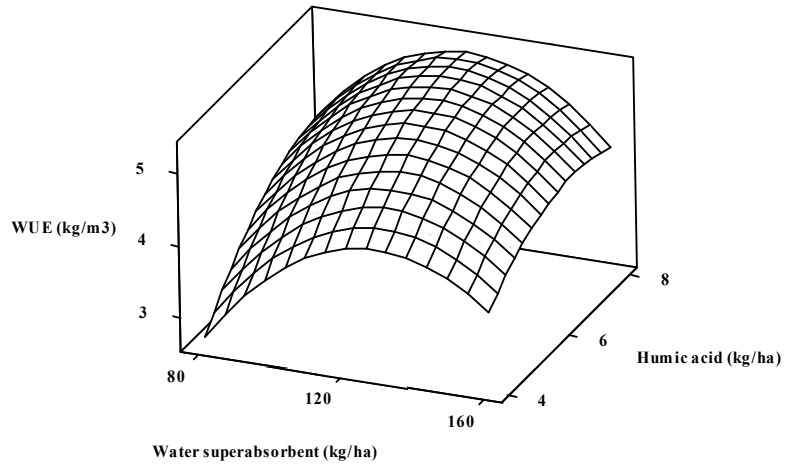
2014). در پژوهش دیگری، اثر محلول‌پاشی اسیدهیومیک بر عملکرد گل، عملکرد زیست‌توده و نیز غلظت عناصر فسفر، پتاسیم و کلسیم اندام‌های گل و برگ گاوزبان اروپایی (*Borage officinalis* L.) مثبت گزارش شد (Heidari and Minayee, 2014). به‌نظر می‌رسد که سطوح مختلف سوپرجاذب از طریق کاهش تلفات آب (Xie *et al*., 2011) و کاهش تبخیر آب از سطح خاک (Nykanen *et al*., 2011)، منجر به کاهش شدت تنش خشکی شدند و در نتیجه میزان پروتئین دانه افزایش یافت. در آزمایشی، اثر مقادیر مختلف سوپرجاذب و مدار آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد سویا مورد مطالعه قرار گرفت و گزارش شد که با افزایش مقادیر مصرفی سوپرجاذب، عملکرد بذر، وزن صد بذر، تعداد غلاف در بوته و عملکرد روغن به‌میزان قابل‌توجهی نسبت به شاهد افزایش یافت (Yazdani *et al*., 2012).

کارآیی مصرف آب

اثرات درجه دو سوپرجاذب و آبیاری بر کارآیی مصرف آب معنی‌دار بود (جدول ۳). عدم‌وجود اختلاف معنی‌دار در آزمون عدم‌برازش از نظر کارآیی مصرف آب، بیان‌گر قابلیت بالای برازش مدل در صفت فوق بود (جدول ۳). با افزایش مقادیر سوپرجاذب مصرفی از ۸۰ به ۱۲۰کیلوگرم در هکتار کارآیی مصرف آب افزایش یافت، ولی افزایش بیش از حد سوپرجاذب منجر به کاهش کارآیی مصرف آب شد (شکل ۶). تغییرات کارآیی مصرف آب با افزایش اسیدهیومیک مصرفی، دارای روندی صعودی بود، به‌این‌ترتیب که افزایش هیومیک مصرفی از چهار به شش و از شش به هشت کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب افزایش ۱۹ و هشت درصدی کارآیی مصرف آب را سبب شد (شکل ۶). بیش‌ترین کارآیی مصرف نیتروژن در سطح میانی آبیاری (۳۰۰مکعب در هکتار) به‌دست آمد، به‌عنوان مثال کارآیی مصرف آب در این سطح ۲۶درصد بیش‌تر از سطح ۴۰۰مترمکعب در هکتار بود (شکل ۶).

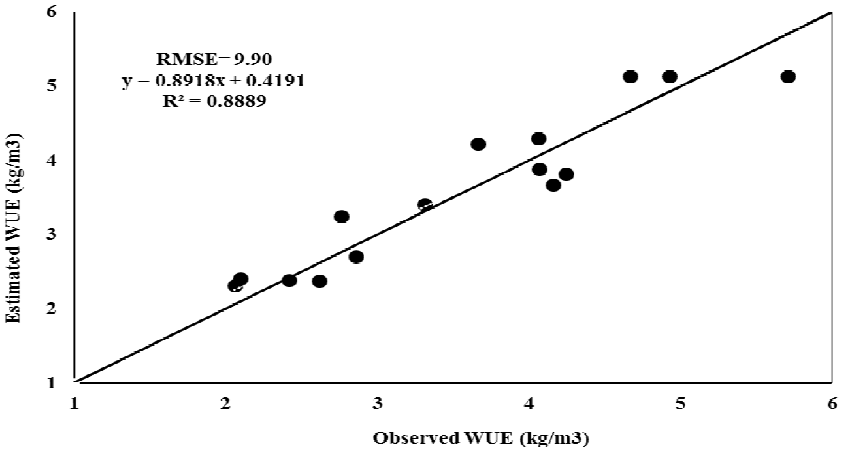
مقدار پایین RMSE (۹/۹۰درصد) و مقدار بالای ضریب تبیین (R^2= ۰/۸۸) حاکی از برازش عالی مدل بود (شکل ۷).

در مطالعات مختلف نشان داده شده است که تعدیل در مصرف آب آبیاری می‌تواند منجر به بهبود کارایی مصرف آب توسط گیاه شود (Koocheki *et al*., 2015; Mansoori *et al*., 2014). در یک پژوهش اثر سطوح مختلف کود نیتروژن و آبیاری بر کارآیی مصرف آب گندم بررسی و گزارش شد که کمترین میزان کارآیی مصرف آب در بالاترین سطح آبیاری (۵۰۰۰مترمکعب در هکتار) و در تیمار عدم‌کوددهی نیتروژن مشاهده شد (Koocheki *et al*., 2015). Jahan *et al*, 2015b) گزارش کردند که کارآیی مصرف منابع (نیتروژن) در گندم با افزایش سطوح مصرف کود نیتروژن کاهش یافت. Mansoori *et al*, 2014 گزارش کردند که بیش‌ترین کارآیی مصرف آب در گیاه دارویی موسیر (*Allium hritifolium*) در تیمار ۳۰۰کیلوگرم در هکتار اوره، ۱۵۰۰مترمکعب در هکتار آبیاری و در تراکم ۱۸بوته در مترمربع به‌دست آمد.



شکل ٦- سطح پاسخ کارآیی مصرف آب در ذرت نسبت به سطوح مختلف سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک در سطح ثابت ۳۰۰ مترمکعب در هکتار آبیاری

Figure 6- Response surface of WUE in maize affected by different levels of water superabsorbent and humic acid in constant level of 300 $m^3.ha^{-1}$ irrigation



شکل ۷- نمودار و معادله خط رگرسیون مقادیر برازش داده شده و مشاهده شده برای کارآیی مصرف آب و مقدار RMSE با توجه به مدل رگرسیون درجه دو کامل

Figure 7- Graph and regression line equation of the fitted and observed values for WUE and the RMSE values based on model of full quadratic regression

بهینه‌سازی منابع

در این پژوهش بهینه‌سازی منابع از سه منظر اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی– زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت.

در سناریوی اقتصادی عملکرد دانه ذرت به‌عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده‌ی مقادیر بهینه منابع در نظر گرفته شد. در این سناریو برای دست‌یابی به حداکثر عملکرد دانه (۲۶۷۰۸کیلوگرم در هکتار) باید به‌ترتیب ۱۲۶/۰۶ و ۷/۱۹کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب رطوبت و اسیدهیومیک مصرف نمود و در طول فصل رشد ۳۴۷/۴۷مترمکعب در هکتار آب در اختیار گیاه قرار داد. بر اساس مقدار بهینه‌ی منابع در این سناریو، عملکرد ماده‌ی خشک ۳۸۱۵۰کیلوگرم در هکتار، تعداد دانه در بوته ۷۵۲عدد، پروتئین دانه ۱۹/۹۰درصد، تلفات نیتروژن ۴۷/۵۷کیلوگرم در هکتار و کارایی مصرف آب ۵/۰۶برآورد شد (جدول ۶).

در سناریوی زیست‌محیطی افزایش کارآیی مصرف آب به‌عنوان عامل اصلی در بهینه‌سازی منابع در نظر گرفته شد. بر این اساس، بیش‌ترین کارآیی مصرف آب (۵/۲۹کیلوگرم دانه در مترمکعب آب) در شرایط کاربرد ۱۲۲/۰۲کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، ۷/۳۵کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک و ۳۰۳/۰۳مترمکعب در هکتار آبیاری به‌دست آمد (جدول ۶). استفاده از مقادیر بهینه‌ی منابع در سناریوی زیست‌محیطی افزایش چهار درصدی کارآیی مصرف آب را در مقایسه با سناریوی اقتصادی در پی داشت (جدول ۶). از آنجایی‌که در این سناریو، عملکرد اقتصادی از اهمیت کمتری در مقایسه با سناریو اقتصادی برخوردار است، در شرایط استفاده از مقادیر بهینه‌ی منابع در سناریوی زیست‌محیطی عملکرد دانه ۲۴درصد نسبت به سناریوی اقتصادی کاهش یافت، ضمن این‌که در این سناریو، عملکرد ماده‌ی خشک ۳۶۲۴۲کیلوگرم در هکتار، تعداد دانه در بوته ۷۲۲عدد و میزان پروتئین دانه ۱۹/۹۶درصد برآورد شد (جدول ۶).

در سناریوی اقتصادی–زیست‌محیطی عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در بهینه‌سازی منابع مورد توجه قرار گرفتند. با توجه به این سناریو، دست‌یابی به حداکثر عملکرد دانه (۲۶۳۰۹کیلوگرم در هکتار) و حداکثر کارآیی مصرف آب (۵/۲۳) زمانی محقق می‌شود که از ۱۲۳/۶۳کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، ۷/۱۹کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک و ۳۲۳/۲۳مترمکعب در هکتار آبیاری استفاده گردد، ضمن این‌که در شرایط استفاده از مقادیر بهینه‌ی منابع در سناریوی اقتصادی–زیست‌محیطی (مقادیر فوق) می‌توان به ۳۷۶۹۳کیلوگرم در هکتار عملکرد ماده‌ی خشک، ۷۴۸دانه در بوته و ۲۰/۱۳درصد پروتئین دانه دست یافت (جدول ۶).

از آنجایی‌که در تولید پایدار محصولات کشاورزی توجه به جنبه های اقتصادی و زیست‌محیطی از اهمیت یکسانی برخوردار است، به‌نظر می‌رسد که می‌توان استفاده از مقادیر بهینه‌ی منابع در سناریوی اقتصادی–زیست‌محیطی (۱۲۳/۶۳کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، ۷/۱۹کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک و ۳۲۳/۲۳مترمکعب در هکتار آبیاری) را به‌عنوان مناسب‌ترین سطوح مصرفی منابع در نظر گرفت.

در پژوهش Koocheki *et al*, 2015 با استفاده از طرح مرکب مرکزی، مقادیر بهینه‌ی مصرف کود نیتروژن و آبیاری را در زراعت گندم تعیین و گزارش کردند که در سناریوی اقتصادی، مقدار بهینه‌ی کود و آب به‌منظور دست‌یابی به ۴۰۴۵کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه در شرایط کاربرد ۲۷۴کیلوگرم در هکتار کود اوره و ۳۹۶۴ مترمکعب در هکتار آب به‌دست آمد.

در پژوهشی دیگر، Jahan *et al*, 2015b پس از بررسی مقادیر بهینه‌ی کودهای نیتروژن، فسفر و دامی در زراعت گندم گزارش کردند که در سناریوی اقتصادی، مصرف ۱۴۵کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، ۲۰۰کیلوگرم در هکتار فسفر و ۱۸تن در هکتار کود دامی، منجر به تولید ۶۵۰۰کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه شد و در سناریوی زیست‌محیطی با مصرف ۲۱کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص، بدون کاربرد فسفر و مصرف ۱۶تن در هکتار کود دامی، عملکرد دانه‌ای معادل با ۳۱۶۰کیلوگرم در هکتار حاصل شد. Mansoori *et al*, 2014 گزارش کردند که در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی مقدار بهینه‌ی کود نیتروژن، آبیاری و تراکم بوته‌ی موسیر به‌ترتیب معادل ۱۶۹کیلوگرم کود اوره در هکتار، ۲۰۲۵مترمکعب در هکتار آبیاری و ۱۷/۷بوته در مترمربع برآورد شد. Mokhtari *et al*, 2013؛ Jalilian *et al*, 2010 و Karimi *et al*, 2006 کارآیی مصرف آب را در ذرت به‌ترتیب ۱/۸۴گرم بر کیلوگرم، ۲/۶۵ و ۲/۲۵کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که اثر سوپرجاذب بر تمامی صفات مورد بررسی (به‌جز عملکرد ماده‌ی خشک) از جزء درجه دو مدل رگرسیونی معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیش‌ترین تأثیرگذاری سوپرجاذب در بهبود صفات مورد مطالعه در سطح میانی آن (۱۲۰کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. مقایسه‌ی شکل‌های ۱ و ۳ نشان می‌دهد که با افزایش سوپرجاذب مصرفی از ۱۲۰ به ۱۶۰کیلوگرم در هکتار عملکرد ماده‌ی خشک با شیب ملایم‌تری نسبت به عملکرد دانه کاهش یافت، در نتیجه به‌نظر می‌رسد استفاده بیش از حد سوپرجاذب تأثیر منفی بیش‌تری بر عملکرد زایشی داشت، از طرفی تعداد دانه در بوته در سطح بالای سوپرجاذب (۱۶۰کیلوگرم در هکتار) نسبت به سطح میانی آن (۱۲۰کیلوگرم در هکتار) به‌شدت با کاهش مواجه شد، بنابراین به‌نظر می‌رسد که کاهش عملکرد دانه در سطوح بالای سوپرجاذب به‌دلیل کاهش تعداد دانه در بوته باشد. عملکرد دانه و تعداد دانه در بوته تحت تأثیر اثرات خطی اسیدهیومیک قرار گرفتند و اثرات درجه دو اسیدهیومیک بر تعداد دانه در بوته و میزان پروتئین دانه معنی‌دار بود. عملکرد دانه در حالی با افزایش سطوح اسیدهیومیک روندی صعودی داشت که عملکرد ماده‌ی خشک در سطح بالای اسیدهیومیک (هشت کیلوگرم در هکتار) نسبت به سطح میانی آن (شش کیلوگرم در هکتار) کاهش نشان داد. اثرات خطی و درجه دو آبیاری بر تمامی صفات مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری تأثیر داشت، به‌طوری‌که بهترین وضعیت صفات در شرایط آبیاری ۳۰۰مترمکعب در هکتار بروز یافت. از آنجایی‌که در دیدگاه اکولوژیک، سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی نسبت به دو سناریوی

جدول ۶- مقادیر بهینه‌سازی شده‌ی سوپرجاذب رطوبت، اسیدهیومیک و آبیاری به‌منظور دست‌یابی به متغیرهای وابسته مورد انتظار در سناریوهای مختلف

Table 6- Optimized values of water superabsorbent, humic acid and irrigation in order to achieve expected dependent variables in different scenarios

سناریوهای مختلف Different scenarios	متغیرهای مستقل (X) Independent variables (X)			متغیرهای وابسته (Y) Dependent variables (Y)				
	سوپرجاذب Superabsorbent ($kg.ha^{-1}$)	اسیدهیومیک Humic acid ($kg\ ha^{-1}$)	آبیاری Irrigation ($m^3\ ha^{-1}$)	عملکرد دانه Grain yield ($kg.ha^{-1}$)	عملکرد ماده‌ی خشک Dry matter yield ($kg\ ha^{-1}$)	تعداد دانه در بوته Grain number per plant	پروتئین دانه Grain protein (%)	کارآیی مصرف آب WUE ($kg\ m^3$)
اقتصادی Economic	126.06	7.19	347.47	26708	38150	752	19.90	5.06
زیست‌محیطی Environmental	122.02	7.35	303.03	20240	36242	722	19.96	5.29
اقتصادی-زیست‌محیطی Eco-Environmental	123.63	7.19	323.23	26309	37693	748	20.13	5.23

دیگر دارای اولویت است، به‌نظر می‌رسد که با استفاده از مقادیر بهینه‌ی منابع در این سناریو (۱۲۳/۶۳کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب، ۷/۱۹کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک و ۳۲۳/۲۳مترمکعب در هکتار آبیاری) می‌توان ضمن دست‌یابی به تولید پایدار ذرت، آلودگی‌های زیست‌محیطی را به حداقل رساند.

سپاسگزاری

بودجه‌ی این طرح (مصوب ۱۳۹۳/۳/۳۰ به شماره ۲/۳۰۷۵۳) از محل اعتبار پژوهه معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Abedi-Koupai, J., Sohrab, J., and Swarbrick, G. 2008. Evaluation of hydrogel application on soil water retention characteristics. Journal of Plant Nutrition 31: 317-331.
2. Amiri, M. B. 2015. Study of ecological and agronomic characteristics of *Echium amoenum* in Mashhad conditions. Ph.D thesis of Agroecology, Faculty of agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian with English Abstract).
3. Aslan, N. 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator for chromite concentration. Powder Technology 86: 769–776.
4. Caliandro, A., and Boari, F. 1992. Supplementary irrigation in arid and semi-arid regions. In: International Conference on Supplementary Irrigation and Drought Water Management. Sep 27- Oct 2. 1992. Italy.
5. Emam, Y. 2004. Cereal production. Shiraz University Press. (In Persian with English Abstract).
6. Eneji, A. E., Islam, R., An, P., and Amalu, U. C. 2013. Nitrate retention and physiological adjustment of maize to soil amendment with superabsorbent polymers. Journal of Cleaner Production 52: 474-480.
7. Gholami, H., Samavat, S., and Ardebili, Z. O. 2013. The alleviating effects of humic substances on photosynthesis and yield of *Plantago ovate* in salinity conditions. International Research Journal of Applied and Basic Sciences 4: 1683-1686.
8. Ghorbani, S., Khazaee, H. R., Kafi, M., and Banayan Aval, M. 2009. Effect of humic acid application in water of irrigation on yield and yield components of *Zea mays* L. Agroecology 2: 123-131. (In Persian with English Abstract).
9. Heidari, M., and Khalili, S. 2014. Effect of humic acid and phosphorous fertilizer on flower and seed yield, photosynthetic pigments and amounts of minerals in *Hisbiscus sabdariffa* L. Iranian Journal of crops of Iran 45: 191-199. (In Persian with English Abstract).
10. Heidari, M., and Minayee, A. 2014. Effect of drought stress and humic acid on flower yield and the concentration of macro nutrients in *Borago officinalis* L. Iranian Journal of Plant Production 21: 167-183. (In Persian with English Abstract).
11. Horwitz, W., and Latimer, G. W. 2005. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 18th Edition. Maryland, USA.
12. Islam, M. R., Eneji, A. E. Ren, C., Li, J., and Hu, Y. 2011. Impact of water-saving superabsorbent polymer on oat (*Avena* spp.) yield and quality in an arid sandy soil. Scientific Research and Essays 6: 720-728.
13. Islam, M. R., Garcia, S. C., and Horadagoda, A. 2012. Effects of irrigation and rates and timing of nitrogen fertilizer on dry matter yield, proportions of plant fractions of maize and nutritive value and in vitro gas production characteristics of whole crop maize silage. Animal Feed Science and Technology 172: 125-135.
14. Jahan, M., Sohrabi, R., Doayee, F., and Amiri, M. B. 2011. Effect of superabsorbent water application in soil and humic acid foliar application on some agroecological characteristics of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Mashhad (Iran). Iranian Journal of Ecological Agriculture 2: 71-90. (In Persian with English Abstract).
15. Jahan, M., Kamayestani, N., and Ranjbar, F. 2013. Assay for applying super absorbent polymer in a low input corn (*Zea mays* L.) production system aimed to reduce drought stress under Mashhad conditions. Agroecology 5: 272-281. (In Persian with English Abstract).
16. Jahan, M., Nassiri Mahallati, M., Ranjbar, F., Aryaee, M., and Kamayestani, N. 2015a. The effects of super absorbent polymer application into soil and humic acid foliar application on some agrophysiological criteria and quantitative and qualitative yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under Mashhad conditions. Agroecology 6: 753-766. (In Persian with English Abstract).
17. Jahan, M., Nasiri Mahallati, M., Khalilzade, H., Bigonah, R., and Razavi, A. R. 2015b. Using response-surface methodology for optimizing nitrogen, phosphorus and cattle manure fertilizers application in winter wheat production. Iranian Journal of Field Crops Research, In Press. (In Persian with English Abstract).
18. Jalilian, A., Ghobadi, R., and Farnia, A. 2010. A study effects of different nitrogen fertilizer levels on yield, harvest index and water use efficiency of the corn in different water condition. 5th National Conference New Ideas in Agriculture, 16-17 Februry, Esfahan. (In Persian).

19. Karimi, A., Homaee, M., Moezardalan, M., Liyaghat, A. M., and Raiesi, F. 2006. Effect of Fertigation on yield and water use efficiency on corn in a tape irrigation system. Journal of Agricultural sciences 3: 561-575. (In Persian).
20. Karimi, A., and Naderi, M. 2007. Yield and water use efficiency of forage corn as influenced superabsorbent polymer application in soils with different textures. Pajouheshe Keshavarzi 3: 187-198. (In Persian with English Abstract).
21. Khadem, S. A., Ghalavio, M., Ramroodi, S. R., Mousavi, M. J., and Rezvani-Moghadam, P. 2011. Effect of animal manure and superabsorbent polymer on yield and yield components on corn (*Zea mays* L.). Iranian Journal of Crop Science 1: 115-123. (In Persian with English Abstract).
22. Koocheki, A., Nasiri Mahallati, M., Fallahpoor, F., and Amiri, M. B. 2015. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. Journal of Agroecology, In Press. (In Persian with English Abstract).
23. Kuhestani, Sh., Askari, N., and Maghsudi, K. 2009. Assessment effects of super absorbent hydrogels on corn yield (*Zea mays* L.) under drought stress condition. Iranian Water Research Journal 3(5): 71-78. (In Persian with English Abstract).
24. Maccarthy, P. 2001. The principles of humic substances. Soil Science 166: 738-751.
25. Mahajan, G., Chauhan, B. S., Timsina, J., Singh, P. P., and Singh, K. 2012. Crop performance and water-and nitrogen-use efficiencies in dry-seeded rice in response to irrigation and fertilizer amounts in northwest India. Field Crops Research 134: 59-70.
26. Mansoori, H., Banayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., and Lakzian, A. 2014. Management of nitrogen fertilization, irrigation and planting density in *Allium hirtifolium* by using central composite optimizing method. Iranian Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production 24: 40-60. (In Persian with English Abstract).
27. Mao, S., Islam M. R., Xue, X., Yang, X., Zhao, X., and Hu, Y. 2011. Evaluation of a water-saving superabsorbent polymer for corn (*Zea mays* L.) production in arid regions of Northern China. African Journal of Agricultural Research 6: 4108-4115.
28. Massoud, O. N., Afifi, M. M. I., El-Akshar, Y. S., and El-Sayed, G. A. M. 2013. Impact of biofertilizers and humic acid on the growth and yield of wheat grown in reclaimed sandy soil. Journal of Agriculture and Biological Research 9: 104-113.
29. Mohammadipour, E., Golchin, A., Mohammadi, J., Negahdar, N., and Zarchini, M. 2012. Effect of humic acid on yield and quality of marigold (*Calendula officinalis* L.). Annals of Biological Resarch 3: 5095-5098.
30. Mokhtari, V., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., and Jahan, M. 2013. Comparison of water use efficiency in some crop and medicinal species. Iranian Journal of Field Crops Research 3: 401-407. (In Persian with English Abstract).
31. Myers, R. H., and Montgomery, D. C. 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Willey & Sons, New York, USA.
32. Natesan, R., Kandasamy, S., Thiyageshwari, S., and Boopathy, P. M. 2007. Influence of lignite humic acid on the micronutrient availability and yield of blackgram in an alfisol. Science World Journal 7: 1198-1206.
33. Nykanen, V. P. S., Nykanen, A., Puska M. A., Goulart-Silva, G., and Ruokolainen, J. 2011. Dual-reponsive and super absorbing thermally cross-linked hydrogel based on methacrylate substituted polyphosphazene. Soft Matter 7: 4414-4424.
34. Pandy, R. K., and Maranvill, J. W. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. Agricultural Water Management 46: 15-27.
35. Peoples, M. B., Beilharz, V. C., Waters, S. P., Simpson, R. J., and Dalling, M. J. 1980. Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). Planta 149: 241-251.
36. Poehlman, J. M. 1959. Breeding field crops. Henry Holt and Company, New York.
37. Puglisi, E., Fragoulis, G., Ricciuti, P., Cappa, F., Spaccini, R., Piccolo A., Trevisan, M., and Crecchio, C. 2009. Effects of a humic acid and its size-fractions on the bacterial community of soil rhizsphere under maize (*Zea mays* L.). Chemosphere 77: 829-837.
38. Rezazadeh, H., Khrasani, S. K., and Haghighi, R. S. A. 2012. Effects of humic acid on decrease of phosphorus usage in forage maize var. KSC704 (*Zea mays* L.). Australian Journal of Agricultural Engineering 3: 34-38.
39. Rong, Y., and Xuefeng, W. 2011. Effects of nitrogen fertilizer and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in Northwest China. Procedia Environmental Sciences 11: 726-732.
40. Rosales, M. A., Ocampo, E., Rodriguez-Valentin, R., Olvera-Carrillo, Y., Acosta-Gallegos, J., and Covarrubias, A. A. 2012. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. Plant Physiology and Biochemistry 56: 24-34.
41. Samavat, S., and Malakuti, M. 2006. Important use of organic acid (humic and fulvic) for increase quantity and quality agriculture productions. Water and Soil Researchers Technical 463: 1-13.
42. Sanchez-Martin, L., Meijide, A., Garcia-Torres, L., and Vallejo, A. 2010. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate. Agriculture, Ecosystems and

Environment 137: 99-107.
43. Sarir, M. S., Sharif, M., Zeb, A., and Akhlaq, M. 2005. Influence of different levels of humic acid application by various methods on the yield and yield components of maize. Sarhad. Jouranl of Agriculture 21: 75-81.
44. Tahir, M. M., Khurshid, M., Khan, M. Z., Abbasi, M. K., and Kazmi, M. H. 2011. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils. Pedosphere 21: 124-131.
45. Turkmen, O., Demir, S., Sensoy, S., and Dursun, A. 2005. Effect of arbuscular mycorrhizal fungus and humic acid on the seedling development and nutrient content of pepper grown under saline soil conditions. Journal of Biological Sciences 5: 565-574.
46. Verlinden, G., Pycke, B., Mertens, J., Debersaques, F., Verheyen, K., Baert, G., Bries, J., and Haesaert, G. 2009. Application of humic substances results in consistent increases in crop yield and nutrient uptake. Journal of Plant Nutrition 32: 1407-1426.
47. Wang, W., and Wang, A. 2010. Nanocomposite of carboxymethyl cellulose and attapulgite as a novel pH-sensitive superabsorbent: Synthesis, characterization and properties. Carbohydrate Polymers 82: 83-91.
48. Wu, C. F. J., and Hamada, M. 2000. Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization. New York.
49. Wu, S. C., Caob, Z. H., Lib, Z. G., Cheunga, K. C., and Wong, M. H. 2005. Effects of biofertilizers containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. Geoderma 125: 155-166.
50. Xie, L., Liu, M., Ni, B., Zhang, X., and Wang, Y. 2011. Slow-release nitrogen and boron fertilizer from a functional superabsorbent formulation based on wheat straw and attapulgite. Chemical Engineering Journal 167: 342-348.
51. Yazdani, F., Allahdadi I., and Akbari, G. A. 2012. Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition. Pakistan Journal of Biological Sciences 10: 4190-4196.
52. Zheng, T., Liang, Y. H., Ye, S. H., and He, Z. Y. 2009. Superabsorbent hydrogels as carriers for the controlled-release of urea: experiments and a mathematical model describing the release rate. Biosystems Engineering 102: 44-50.
53. Zhong, K., Zheng, X. L., Mao, X. Y., Lin, Z. T., and Jiang, G. B. 2012. Sugarcane bagasse derivative-based superabsorbent containing phosphate rock with water-fertilizer integration. Carbohydrate Polymers 90: 820-826.
54. Zhong, K., Lin, Z. T., Zheng, X. L., Jiang, G. B., Fang, Y. S., Mao, X. Y., and Liao, Z. W. 2013. Starch derivative-based superabsorbent with integration of water-retaining and controlled-release fertilizers. Carbohydrate Polymers 92: 1367-1376.
55. Zhou, X., Wang, H., Chen, Q., and Ren, J. 2007. Coupling effects of depth of film-bottomed tillage and amount of irrigation and nitrogen fertilizer on spring wheat yield. Soil and Tillage Research 94: 251-261.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 14, No. 4, Winter. 2017, p. 746-764

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، ص. ۷۶۴-۷۴۶

Evaluation of the Increased Rates of Water Super Absorbent and Humic Acid Application under Deficit Irrigation Condition on Some Agroecological Characteristics of *Zea Mays* Using Response Surface Methodology

M. Jahan[1*]- M. B. Amiri[2]- F. Noorbakhsh[3]

Received: 13-06-2015
Accepted: 28-02-2016

Introduction

Water super absorbents are water absorbing natural or synthetic polymers (they may contain over 99% water). They have been defined as polymeric materials which exhibit the ability of swelling in water and retaining a significant fraction (> 20%) of water within their structure, without dissolving in water content. The applications of hydrogels are grown extensively. These materials do not have any harm to the environment. Development of using super absorbent hydrogels to reduce crises such as soil erosion, frequent droughts or providing food security requires knowledge of their behaviors and performances in the soil.

Humic substances are a mixture of different organic compounds that extract from various sources such as soil, humus, peat, oxidized lignite and coal. They are different in molecular size and chemical structure. A little amount of humic acid increase soil fertility by improving the physical, chemical and biological characteristics of soil.

Increase in agricultural production and productivity depends, to a large extent, on the availability of water. Hence, the importance of irrigation is however, the availability of irrigation facilities which is highly inadequate in Iran. Determining the optimal amount of irrigation water has always been a main goal of researchers. Among the problems of excessive irrigation can be pointed to leach the nutrients especially nitrogen from the soil, the pollution of groundwater and environment and reduce fertilizer use efficiency, especially water-soluble fertilizers.

To determine the optimal irrigation water and fertilizer, the use of mathematical models is inevitable. One of the most common methods used to optimize these factors is the central composite design. A central composite design is an experimental design, useful in response surface methodology, for building a second order (quadratic) model for the response variable without needing to use a complete three-level factorial experiment.

Despite of many researches on the effect of water super absorbent, humic acid and irrigation on different crops, information on simultaneous optimization of these factors for many crops is scarce, therefore, in this study optimum levels of water super absorbent, humic acid and irrigation in maize were determine.

Materials and Methods

In order to estimate the optimized application rates of water superabsorbent, humic acid and irrigation in cultivation of maize (*Zea mays* L.), an experiment as Box-Behnken design using Response Surface Methodology, was conducted at Research Farm of Ferdowsi University of Mashhad, during 2013-14 growing season. The experimental treatments were designed considering of the high and the low levels of water superabsorbent (80 and 160 kg ha^{-1}), humic acid (4 and 8 kg ha^{-1}) and irrigation (200 and 400 m^3 ha^{-1} in each irrigation) using Minitab 17 statistical software, as the central point in every treatment replicated 3 times, so 15 treatment combinations were provided totally.

Results and Discussion

The results showed that linear effects of humic acid and irrigation and quadratic effects of superabsorbent and irrigation were significant on seed yield, as the highest grain yield obtained in treatments of 120 kg ha^{-1} super absorbent, 8 kg ha^{-1} humic acid and 300 m^3 ha^{-1} irrigation. The middle level of humic acid (6 kg ha^{-1}) led

1- Associate Prof., Dep. of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2- Assistant Prof. of Gonabad Center of Higher Education
3- Ph.D. student of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: Jahan@um.ac.ir)

to the highest dry matter yield and increase of humic acid from 4 to 8 kg ha^{-1} improved grain protein by 7%. In economic scenario, using 126.06 kg ha^{-1} superabsorbent, 7.19 kg ha^{-1} humic acid and 347.47 m^3 ha^{-1} irrigation, resulted in 26710 kg ha^{-1} grain yield. In eco-environmental scenario, using 123.63 kg ha^{-1} superabsorbent, 7.19 kg ha^{-1} humic acid and 323.23 m^3 ha^{-1} irrigation, resulted in the highest grain yield (26309 kg ha^{-1}) and the highest water use efficiency (5.23).

It seems that application of 120 kg ha^{-1} water super absorbent increased grain yield by improving soil physical properties. Jahan *et al*., (2011) reported that the highest and the lowest grain yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) obtained in treatments of 80 kg ha^{-1} water super absorbent + humic acid and Non-applicaion of water super absorbent and humic acid, respectively. Yazdani et al., (2012) evaluated effect of different amounts of water super absorbent and irrigation on yield and yield components of soybean (*Glycine max* L.) and reported that with increasing amounts of water super absorbent, grain yield was increased.

Conclusions

According to the ecological perspective, eco-environmental scenario is a priority compared two other scenarios, therefore by using the optimized values of resources in this scenario can be achieved to the sustainable production of maize, meanwhile can be minimized environmental pollutions.

Keywords: Box-Behnken, Eco-E nvironmental Scenario, Nitrogen Losses, Quadratic Equation, Water Stress