

## تأثیر پلیمر آکواسورس بر برخی خصوصیات فیزیکی و رطوبتی خاک‌های مختلف

سالومه سپهری صادقیان<sup>۱\*</sup>، نادر عباسی<sup>۲</sup> و محمد مهدی نخجوانی مقدم<sup>۱</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: استادیار؛ و استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

### چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های حال و آینده، به ویژه در مناطق خشک جهان، کم‌آبی است. یکی از روش‌های بهبود بهره‌وری آب و مدیریت بهتر آب مصرفی در بخش کشاورزی، کاربرد مواد جاذب رطوبت است. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی اثر کاربرد پلیمر جاذب رطوبت آکواسورس بر پارامترهای فیزیکی و منحنی مشخصه رطوبتی سه بافت مختلف خاک است. آکواسورس نسل جدیدی از پلیمرهای جاذب رطوبت بر پایه پتاسیم است که زیست‌تخریب‌پذیر بوده و فاقد ترکیب مخرب آکریل آمید است. به این منظور، آزمایش‌هایی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار اجرا شد که فاکتور اول چهار درصد وزنی از پلیمر جاذب رطوبت (صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی پلیمر/خاک) و فاکتور دوم سه بافت مختلف خاک (لوم‌شنی، لوم‌رسی و رس‌سیلتی) بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در تمامی بافت‌های خاک مورد مطالعه، کاربرد ماده جاذب رطوبت و افزایش سطح مورد استفاده، میزان رطوبت را در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم افزایش داده است. بیشترین مقدار رطوبت قابل استفاده گیاه در بافت‌های لوم‌شنی، لوم‌رسی و رس‌سیلتی به ترتیب به میزان ۹/۸، ۱۳/۸ و ۱۲/۷ درصد حجمی و مربوط به کاربرد ۰/۵ درصد وزنی ماده جاذب رطوبت در این تیمارهاست. کاربرد مقادیر بیشتر سبب کاهش رطوبت قابل استفاده برای گیاه شده است. بنابراین، با آنکه پلیمر جاذب رطوبت آکواسورس در جذب آب توانایی خوبی دارد، اما در سطوح بالای استفاده اثر بازدارندگی دارد و قادر به تخلیه مطلوب رطوبت نیست.

### واژه‌های کلیدی

پلیمر جاذب رطوبت، رطوبت قابل استفاده گیاه، منحنی مشخصه رطوبتی خاک

### مقدمه

مدیریت صحیح و به‌کارگیری روش‌های پیشرفته به منظور حفظ ذخیره خاک و افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک از جمله اقدامات مؤثر برای بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب خواهد بود. یکی از راهکارهای استفاده بهینه از منابع آب و حفظ آن، کاربرد مواد جاذب رطوبت به منظور مدیریت

محدودیت منابع آب شیرین در بسیاری کشورها به صورت معضلی جدی در آمده به طوری که به واسطه آن رشد اقتصادی آن کشورها محدود شده است. خاورمیانه از جمله مناطقی است که مشکل محدودیت آب شیرین در آن شدید است. اعمال

و ۷ است، اثر منفی بر خاک و هیچگونه سمیتی نیز ندارد (Behera & Mahanwar, 2020). کاربرد پلیمرهای جاذب رطوبت می‌تواند کمک شایانی کند به درختکاری و مدیریت پوشش گیاهی در مناطق صعب‌العبور و به طور کل در مناطقی که امکان انتقال آب وجود ندارد یا اگر دارد هزینه‌بر است. این مواد می‌توانند به رشد پوشش گیاهی کمک کنند و باعث کاهش تبخیر و شست‌وشوی کودها در مناطقی با فرصت‌های محدود آبیاری شوند، جایی که آبیاری برای حمایت از رشد گیاه و کاهش تنش آبی ضروری است (Misiewicz *et al.*, 2019). نتایج تحقیقات واسکونسلوس و همکاران (Vasconcelos *et al.*, 2019) نشان می‌دهد استفاده از هیدروژل جاذب رطوبت به شکل معنی‌داری سبب بهبود شرایط خاک برای رشد گیاه می‌گردد. این پژوهشگران نتیجه گرفته‌اند که استفاده از مقادیر کم ماده جاذب رطوبت (کمتر از ۰/۷۵ درصد وزنی) سبب افزایش رشد ریشه هندوانه شده و به طور کلی روند رشد گیاه را در خاک با دو بافت رسی و شنی بهبود بخشیده است. تحقیقات روی پلیمر جاذب رطوبت جدیدی به نام <sup>1</sup>CMTKG در هند نشان داده‌است که این هیدروژل جاذب رطوبت و زیست‌تخریب‌پذیر، قابلیت جذب آب را تا حدود ۶۰۰ میلی‌لیتر بر گرم دارد و قابلیت نگهداشت آب در خاک را بهبود بخشیده است. همچنین، کاربرد این پلیمر سبب افزایش تخلخل خاک و بهبود رشد نخود شده است (Warker & Kumar, 2019). نتایج تحقیقات ایساوی و همکاران (Essawy *et al.*, 2016) روی پلیمر هیدروژل جدیدی با نام CTS که بر پایه کیتوسان تهیه شده است، نشان می‌دهد این پلیمر جاذب رطوبت می‌تواند ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش دهد و سبب آزادسازی کنترل‌شده

بهتر آب مصرفی است. این مواد تحت عنوان مواد جاذب رطوبت مطرح می‌شوند و قصد از به‌کارگیری آنها کاهش مصرف آب است. توانایی این مواد در جذب رطوبت و در اختیار قرار دادن تدریجی آن بر اساس نوع ماده جاذب رطوبت و فرمولاسیون در نظر گرفته شده توسط شرکت تولیدکننده آن متفاوت است و در خصوص هر محصولی نیاز به بررسی و ارزیابی دارد. به طور کلی هیدروژل‌ها مواد نرم متشکل از شبکه‌های سه بعدی هستند که با پلیمرهای آبدوست دارای اتصالات عرضی شکل گرفته‌اند. این ویژگی‌ها هیدروژل‌ها را قادر به جذب و نگهداشتن مقادیر زیادی آب بدون حل شدن می‌کند. بنابراین، هیدروژل‌ها می‌توانند به عنوان مخزن آب عمل کنند و بسته به تقاضای ریشه گیاه، آب را آزاد سازند (Vasconcelos *et al.*, 2019). رطوبت جذب‌شده در این ژل‌های آبدوست پس از جذب آب و در اثر خشک‌شدن محیط آب داخل پلیمر به تدریج تخلیه می‌شود و بدین ترتیب خاک به مدت طولانی مرطوب می‌ماند. ماده‌ای که قابلیت جذب آب را به میزان حداقل ۲۰ برابر وزن خود داشته باشد به عنوان ماده جاذب رطوبت ارزیابی می‌شود. مقدار جذب آب در این پلیمرها بسته به فرمول‌بندی، ناخالصی‌ها و مقدار نمک موجود در آب - از مقدار بسیار کم حدود ۲۰ برابر وزنی تا بالاتر از ۴۰۰ برابر وزنی متغیر است (Raju *et al.*, 2002). استفاده از هیدروژل در مناطق خشک و نیمه خشک باعث بهبود بافت خاک، افزایش نگهداشت آب در محیط رشد گیاه، بهبود راندمان آبیاری و افزایش بهره‌وری آب می‌گردد و نیز با توجه به افزایش نفوذ آب موجب کاهش فرسایش، افزایش جوانه‌زنی و رشد سریع‌تر گیاهان می‌شود (Nirmala & Guvvali, 2019). اسیدیتة پلیمرهای جاذب رطوبت که بین ۶

۱/۲۶ درصد نسبت به شاهد بیشتر شده است. اما در مکش ۱۰ بار اثر کاربرد پلیمر معنی‌دار نبود. رطوبت قابل استفاده گیاه<sup>۳</sup> (AW) با کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم پلیمر در هکتار ۶/۳ درصد نسبت به شاهد افزایش یافته‌است. بین سطوح متفاوت کاربرد پلیمر، کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم پلیمر در هکتار در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر خاک اثر بهتری در افزایش درصد رطوبت حجمی خاک و ثابت نگه‌داشتن آن در خاک‌های سنگین داشته‌است. این محققان نتیجه‌گیری کرده‌اند که افزایش ۶/۳ درصد در میزان رطوبت قابل استفاده گیاه اگر چه از نظر آماری در مقایسه با شاهد معنی‌دار است، اما در مسائل مهندسی آبیاری قابل توجه نیست و کاربرد این پلیمر جاذب رطوبت توصیه نمی‌شود. بررسی‌های یو و همکاران (Yu *et al.*, 2017) روی پنج نمونه مختلف از هیدروژل‌های جاذب رطوبت نشان داده‌است که این پلیمرها سبب بهبود نگهداشت آب در خاک می‌شوند و با افزایش سطح استفاده، تبخیر از سطح خاک و از سطوح مواد جاذب رطوبت کاهش بیشتری پیدا می‌کند؛ این مسئله به خصوص برای هیدروژل‌هایی با اندازه ذرات بزرگ‌تر مشهودتر است.

در خصوص اثر کاربرد پلیمرهای هیدروژل بر ویژگی‌های فیزیکی و ظرفیت نگهداشت آب در خاک‌ها، مطالعات متعددی شده و گزارش‌هایی نیز در دست است از اثرهای مثبت این پلیمرها بر بهبود قابلیت حفظ رطوبت خاک‌ها، و نیز اینکه طیف وسیعی از این نوع محصولات روانه بازار شده و در اختیار بهره‌برداران قرار گرفته است. با این همه یادآوری می‌شود که به طور کلی به دلیل تفاوت در نحوه سنتز و ساختار شیمیایی پلیمرها، ظرفیت جذب و نگهداری آب در این پلیمرهای آبدوست متفاوت است و در نتیجه اثر آنها بر تغییرات رطوبت

مواد غذایی شود. نتایج حاصل از تحقیقات حقایقی مقدم (Haghayeghi-Moghaddam, 2006) بر پلیمر نوازورب<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که اختلاط ۲۵ گرم نوازورب در یک متر مربع از خاک با بافت متوسط در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر، نفوذ عمقی را ۱۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش و ظرفیت نگهداری آب در خاک را به میزان ۹ درصد افزایش داده‌است. ساتریانی و همکاران (Satriani *et al.*, 2018) در تحقیقی با بررسی اثر کاربرد پلیمر جاذب رطوبت جدیدی بر پایه سلولز بر کاشت لوبیا نشان دادند که کاربرد این پلیمر سبب کاهش مصرف آب همراه با حفظ عملکرد محصول شده و به افزایش کارایی مصرف آب لوبیا، در مقایسه با تیمار کنترل، انجامیده است. پروانک بروجنی و عابدی کویایی (Parvanak-Boroujeni & Abedi-Koupai, 2009) اثر کاربرد پلیمر جاذب رطوبت سوپر آب-۲۰۰ را بر انواع تخلخل خاک لوم‌شنی در درصدهای وزنی مختلف پلیمر ارزیابی کردند و نشان دادند افزودن پلیمر و نیز افزایش سطح استفاده از آن باعث افزایش انواع تخلخل خاک به‌ویژه تخلخل مویین به میزان سه برابر، نسبت به شاهد، شده‌است. سهراب و عباسی (Sohrab & Abbasi, 2010) در تحقیقی طی دو سال تأثیر استفاده از ماده جاذب رطوبت سوپر آب-۲۰۰ را بر نگهداری آب در شرایط مزرعه (لایسی‌مترهای زهکش‌دار) و خصوصیات فیزیکی خاک بررسی کردند و نشان دادند که در مکش‌های صفر، ۰/۳ و ۳ بار بین سطوح ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم پلیمر در هکتار اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با تیمار شاهد در افزایش درصد رطوبت حجمی خاک دیده شده است. با کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم پلیمر در هکتار، رطوبت حجمی خاک در مکش‌های صفر، ۰/۳ و ۳ بار به ترتیب ۱/۳۳، ۰/۵۴ و

1- Novasorb  
3- Available Water

2- Superab A200

تکرار تعریف شد. دو فاکتور اصلی در این طرح آماری عبارت بودند از سه بافت متفاوت خاک شامل لوم شنی<sup>۲</sup> (SL)، لوم رسی<sup>۳</sup> (CL) و رس سیلتی<sup>۴</sup> (SiC) و چهار درصد وزنی از پلیمر. سطوح کاربرد هیدروژل آکواسورس بر اساس مطالعات پیشین در خصوص سایر پلیمرهای جاذب رطوبت انتخاب شد. در مطالعات پیشین این مواد جاذب رطوبت عمدتاً در سطوح صفر تا ۳ درصد وزنی پلیمر/خاک خشک بررسی شده‌اند (Abedi-Koupai *et al.*, 2008; Raiee *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2017; Satriani *et al.*, 2018, Rashed *et al.*, 2021)

بر این اساس، در مطالعه حاضر سطوح صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی آکواسورس/خاک خشک برای ارزیابی این ماده جاذب رطوبت انتخاب شد. پلیمر جاذب رطوبت مورد بررسی با نام تجاری آکواسورس محصول کشور ارمنستان است. این پلیمر ماده‌ای استریل، غیرسمی و با قابلیت حفظ کارایی به مدت حداقل ۱۰ سال است که در گستره‌ای وسیع از شرایط اقلیمی و دما پایدار است.

پلیمر آکواسورس بر پایه پتاسیم و زیست‌تخریب‌پذیر است که پس از پایان دوره پایداری تجزیه خواهد شد به آب، دی‌اکسید کربن، آمونیاک و ترکیبات پتاسیم که برای گیاه قابل استفاده‌اند (Ecotechnology, 2018). مشخصات کلی پلیمر هیدروژل آکواسورس در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز شامل سه نوع بافت خاک برداشت شده از سه منطقه در اطراف شهرستان کرج است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

و ظرفیت نگهداشت خاک‌ها نیز بسیار متفاوت خواهد بود. همچنین، اثر ترکیب و میزان املاح خاک یا میزان رس در بافت‌های مختلف خاک نیز در بررسی کارایی هر پلیمر جاذب رطوبت اثرگذار است. این موضوع منجر به انتشار گزارش‌های بعضاً متفاوت در خصوص کارایی پلیمرهای جاذب رطوبت شده است، به نوعی که بعضی از محصولات جاذب رطوبت مورد تأیید محققان قرار گرفته و در مورد برخی محصولات کاربرد این مواد توصیه نشده است. مهم‌ترین نوع پلیمرهای جاذب رطوبت که در حال حاضر در بخش کشاورزی به کار می‌روند، پلیمرهایی با ماهیت پلی‌اکریل‌آمید هستند (Xiahua *et al.*, 2008). متأسفانه این ترکیب اثرهای مخرب زیست‌محیطی دارد و بر ارگانسیم‌های موجود در خاک و آب اثرهای منفی به جا می‌گذارد (Ambrojio *et al.*, 2019). پلیمر آکواسورس<sup>۱</sup> نسل جدیدی از پلیمرهای هیدروژل بر پایه پتاسیم است که دارای استانداردهای بالای اکولوژیکی و فاقد ترکیبات مخرب اکریل‌آمید است، اما در خصوص اثر این پلیمر بر خصوصیات فیزیکی و رطوبتی خاک تا کنون مطالعات جامعی صورت نگرفته است. هدف از تحقیق حاضر بررسی و تحلیل اثر کاربرد سطوح مختلف پلیمر جاذب رطوبت آکواسورس بر ویژگی‌های فیزیکی و منحنی مشخصه رطوبت خاک در سه بافت مختلف خاک است.

## مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر پلیمر جاذب رطوبت آکواسورس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳

1- Aquasource  
3- Silty Clay

2- Sandy Loam

جدول ۱- مشخصات کلی پلیمر هیدروژل آکواسورس (Ecotechnology, 2018)

Table 1 - General specifications of Aquasource hydrogel polymer

ظرفیت جذب آب شهر (g/g) Swelling Index in tap water (g/g)	اندازه ذرات Size of fractions	اسیدیته محلول آبی pH of aqueous solution	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب) Density(g/cm <sup>3</sup> )	رطوبت (%) Moisture (%)	حالت ظاهری Shape
1:400	1µm- 3mm	6-7	0.5	<10%	White granules

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک مورد استفاده (Sepahri et al., 2020)

Table 2- Physical and chemical characteristics of the soil samples

جمع کاتیون‌ها (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Sum of cations (meq/lit)	جمع آنیون‌ها (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Sum of anions (meq/lit)	اسیدیته pH	شوری (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dS/m)	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture
61.67	36.83	7.75	2.11	19.36	14.66	65.98	SL
22.35	19.42	7.01	2.12	29.36	44.66	25.98	CL
32.85	28.87	7.33	2.65	43.36	40.66	15.98	SiC

که نشان‌دهنده به تعادل رسیدن رطوبت در مکش وارد شده بود، نمونه‌ها از دستگاه خارج و بلافاصله وزن شدند. نمونه‌ها به منظور تعیین رطوبت وزنی در درون آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا کاملاً خشک شوند. دمای آزمایشگاه برای همه آزمایش‌ها روی ۲۵±۲°C تنظیم شد.

برای به‌دست آوردن پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک ( $\alpha, n, \theta_s, \theta_r$ ) در هر نمونه، از دو نرم‌افزار RETC (v.6.02) (Van Genuchten et al., 1991) و Rosetta (v. 1.1) (Schaap, 1998) استفاده شد. برای پیش‌بینی پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک ( $\alpha, n, l, K_s, \theta_s, \theta_r$ ) از مدل‌های متعددی استفاده می‌شود که یکی از معتبرترین آنها مدل ون‌گنوختن (Van Genuchten et al., 1991) است که با معادله ۱ نشان داده می‌شود:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

منحنی‌های مشخصه رطوبتی مربوط به تمامی تیمارها با تعیین میزان رطوبت نمونه‌ها در ۸ نقطه مکش (پتانسیل ماتریک صفر، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۵ بار) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد. آماده کردن نمونه‌های عمل‌آوری شده برای قرار دادن در دستگاه صفحات فشاری به ترتیب زیر بود: استوانه‌هایی به قطر ۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و در انتهای هر استوانه یک قطعه کاغذ صافی هم‌قطر با آن برای جلوگیری از خروج ذرات ریز خاک قرار داده شد. درون هر استوانه ۱۰۰ گرم خاک با ماده جاذب رطوبت، در چهار سطح اشاره شده در بالا مخلوط شد. سپس روی آن با تکه پارچه‌ای به اندازه مناسب برای تحکیم توده خاک درون استوانه با کش لاستیکی بسته شد. نمونه‌های آماده شده به مدت ۲۴ ساعت برای اشباع درون تشت قرار داده شدند. نمونه‌های اشباع‌شده پس از وزن شدن داخل دستگاه صفحات فشاری تحت مکش با پتانسیل‌های ماتریک مورد نظر قرار داده شدند. پس از توقف جریان خروجی آب از دستگاه،

پژمردگی دائم (مکش ۱۵ بار) تعیین شد (Klute, 1986). همچنین، به منظور تحلیل اثر افزودن ماده جاذب رطوبت بر میزان رطوبت آزاد شده تحت مکش‌های مختلف نیز نقاط رطوبتی اندازه‌گیری شده به دو دسته کلی یکی محدوده مکش‌های کم (پتانسیل ماتریک صفر تا ۳ بار) و دیگری محدوده مکش‌های زیاد (پتانسیل ماتریک ۳ تا ۱۵ بار) تقسیم‌بندی و تحلیل شدند. برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم افزار SPSS (V.21) و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن ( $P < 0.05$ ) استفاده گردید.

### نتایج و بحث

#### اثر کاربرد ماده جاذب رطوبت بر ویژگی‌های فیزیکی و منحنی مشخصه رطوبت خاک

بررسی منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک نشان می‌دهد که افزودن ماده جاذب رطوبت به تمامی بافت‌های مورد مطالعه سبب شده است تا منحنی مشخصه رطوبتی به سمت راست جابه‌جا شود (شکل‌های ۱ تا ۳). به این معنی که با کاربرد آکواسورس درصد رطوبت حجمی نمونه خاک در هر پتانسیل ماتریک اعمال شده، افزایش یافته است. از طرفی، با افزایش سطوح ماده جاذب رطوبت نیز جابه‌جایی منحنی اتفاق افتاده است. بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در هر مکش اعمال شده با کاربرد آکواسورس و افزایش سطح استفاده از آن، میزان درصد رطوبت حجمی در نمونه خاک، در مقایسه با تیمار شاهد، افزایش یافته است.

تحلیل واریانس پارامترهای فیزیکی خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف و همچنین مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و نوع بافت بر پارامترهای فیزیکی خاک با استفاده از نرم افزار SPSS (v.21) و بر اساس آزمون چند

که در آن،  $\theta =$  رطوبت حجمی خاک ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )،  $\theta_r =$  رطوبت حجمی باقیمانده ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )،  $\theta_s =$  رطوبت حجمی اشباع ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )،  $n =$  شیب کلی منحنی مشخصه رطوبت خاک بین دو نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم،  $\alpha =$  عکس مکش ورود هوا به خاک ( $\text{cm}^{-1}$ )، و  $h =$  پتانسیل آب در خاک (kPa).

برنامه Rosetta بر اساس شبکه عصبی عمل می‌کند و به واسطه توابع انتقالی خاک (درصد توزیع اندازه ذرات، بافت خاک، چگالی ظاهری و درصد حجمی رطوبت در دو نقطه ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) پارامترهای منحنی رطوبتی خاک را بر اساس معادله ون گنوختن تخمین می‌زند (Schaap *et al.*, 2001). توابع انتقالی خاک توابعی هستند که ویژگی‌های زود یافت خاک مانند جرم مخصوص ظاهری، بافت، درصد مواد آلی و در صورت وجود مقدار آب خاک در مکش ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال را به ویژگی‌های دیر یافت خاک مانند منحنی مشخصه رطوبت خاک و تابع هدایت هیدرولیکی ارتباط می‌دهند (Schaap *et al.*, 2001). برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین مربعات خطا ( $\text{MSE} \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$ ) در برآورد رطوبت خاک در تیمارهای مختلف استفاده شد (معادله ۲).

$$MSE = \frac{\sum_1^n (\text{exp-cal})^2}{N} \quad (2)$$

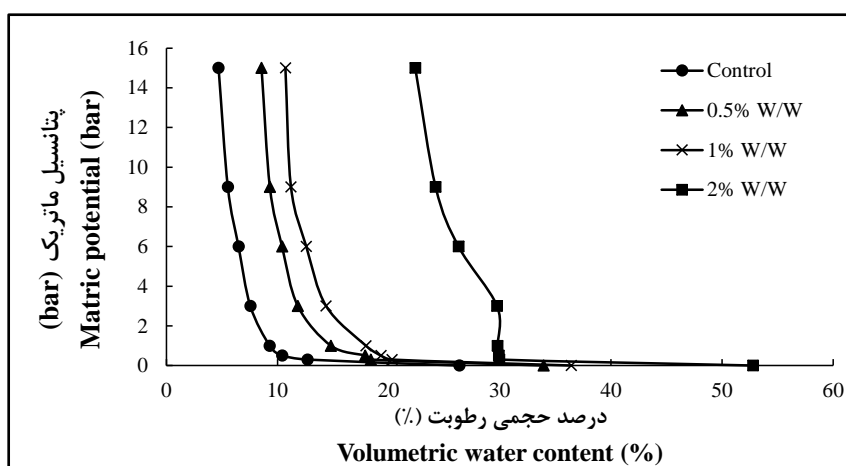
که در آن:  $N =$  تعداد کل داده‌ها، exp: داده‌های مشاهداتی، cal: داده‌های محاسباتی متناظر با داده‌های مشاهداتی است. مقدار ایده‌آل برای معیار MSE صفر است.

رطوبت قابل استفاده گیاه (AW) از تفاضل رطوبت نقطه ظرفیت زراعی (مکش ۰/۳ بار) و نقطه

خاک و سطوح ماده جاذب رطوبت و اثر متقابل این دو عامل قرار گرفته‌اند.

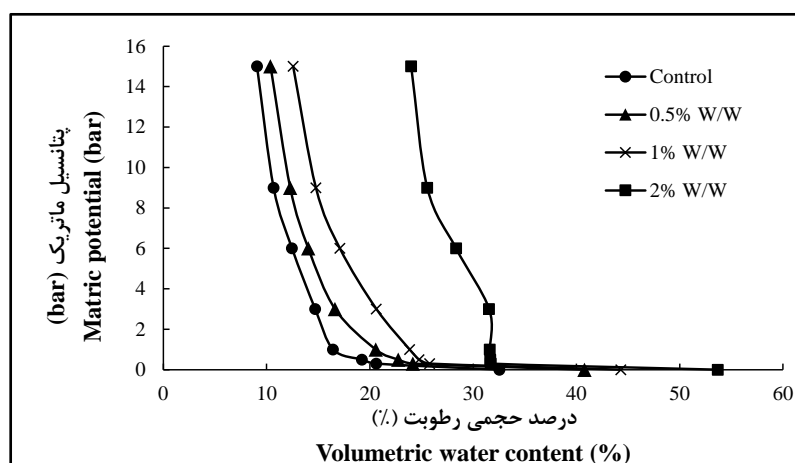
نتایج مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر پارامترهای مختلف در جدول‌های ۴ تا ۸ نمایش داده شده است (در این جدول‌ها حروف غیر مشابه در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است).

دامنه‌ای دانکن در سطح آماری ۵ درصد صورت گرفت (جدول ۳). در این جدول مشاهده می‌شود که تیمارهای کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت، بافت‌های مختلف خاک و اثر متقابل این دو عامل بر پارامترهای درصد حجمی رطوبت در حالت اشباع، ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم اثر معنی‌دار داشته‌اند. همچنین، مقادیر رطوبت آزاد شده در محدوده مکش‌های کم (صفر تا ۳ بار) و زیاد (۳ تا ۱۵ بار) و رطوبت قابل استفاده گیاه نیز تحت تأثیر عوامل بافت



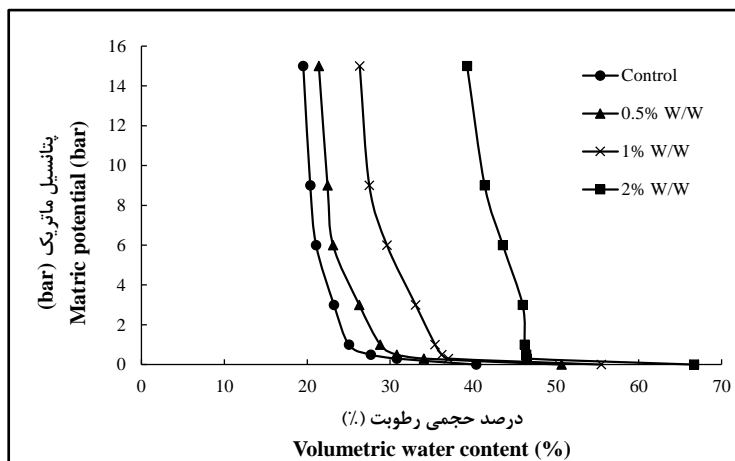
شکل ۱- منحنی مشخصه رطوبت بافت لوم شنی در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 1- Soil-water characteristic curves of sandy-loam due to the application of different levels of superabsorbent



شکل ۲- منحنی مشخصه رطوبت بافت لوم رسی در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 2- Soil-water characteristic curves of clay-loam due to the application of different levels of superabsorbent



شکل ۳- منحنی مشخصه رطوبت بافت رس سیلتی در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 3- Soil-water characteristic curves of silty-clay due to the application of different levels of superabsorbent

جدول ۳- تحلیل واریانس پارامترهای فیزیکی خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف

Table 3- Variance analysis of soil physical parameters under the influence of different treatments

Average of squares - میانگین مربعات - در صد حجمی رطوبت						درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
رطوبت قابل استفاده گیاه Plant available water	محدوده مکش زیاد High suction range	محدوده مکش کم Low suction range	بزمردگی دائم Permanent wilting point	حد ظرفیت زراعی Field capacity	نقطه اشباع Saturation point		
35.7 **	17.6**	55.8 **	542.0 **	343.0 **	938.1 **	3	سطوح آکواسورس (A) Superabsorbent levels
24.2 **	20.1 **	1.9 **	783.1**	880.9 **	785.5 **	2	بافت خاک (B) Soil texture
3.6 **	2.8 **	3.8 *	4.9 **	6.3 **	10.2 **	6	A×B
1.1	1.5	6.9	1.1	1.2	7.3	22	Error
6.4	20.7	1.5	18.8	5.9	15.6	-	CV (%)

-ns = non-significant, \*\* and \* are significant at 1% and 5% levels, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر رطوبت اشباع (درصد حجمی)

Table 4- Comparison of the means of simple and interaction effect of superabsorbent levels and soil texture on saturated moisture (%V)

میانگین Average	سطوح ماده جاذب رطوبت (درصد وزنی) Superabsorbent levels (%W/W)				بافت خاک Soil texture
	2	1	0.5	0	
37.39 <sup>C</sup>	52.80 <sup>b</sup>	36.44 <sup>de</sup>	33.96 <sup>e</sup>	26.37 <sup>f</sup>	SL
42.84 <sup>B</sup>	53.70 <sup>b</sup>	44.31 <sup>c</sup>	40.78 <sup>cd</sup>	32.56 <sup>e</sup>	CL
53.31 <sup>A</sup>	66.67 <sup>a</sup>	55.48 <sup>b</sup>	50.70 <sup>b</sup>	40.39 <sup>cd</sup>	SiC
	57.72 <sup>A</sup>	45.41 <sup>B</sup>	41.81 <sup>C</sup>	33.10 <sup>D</sup>	average



جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر رطوبت ظرفیت زراعی (درصد حجمی)

Table 5 - Comparison of the means of simple and interaction effects of superabsorbent levels and soil texture on moisture content at field capacity (%V)

میانگین Average	سطوح ماده جاذب رطوبت (درصد وزنی) Superabsorbent levels (%W/W)				بافت خاک Soil texture
	2	1	0.5	0	
20.34 <sup>C</sup>	29.97 <sup>d</sup>	20.30 <sup>f</sup>	18.40 <sup>g</sup>	12.70 <sup>h</sup>	SL
25.57 <sup>B</sup>	31.70 <sup>d</sup>	25.80 <sup>e</sup>	24.17 <sup>e</sup>	20.62 <sup>f</sup>	CL
37.09 <sup>A</sup>	46.47 <sup>a</sup>	37.02 <sup>b</sup>	34.07 <sup>c</sup>	30.80 <sup>d</sup>	SiC
	36.05 <sup>A</sup>	27.71 <sup>B</sup>	25.54 <sup>C</sup>	21.37 <sup>D</sup>	average

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم (درصد حجمی)

Table 6 - Comparison of the means of simple and interaction effects of superabsorbent levels and soil texture on moisture content at permanent wilting point (%V)

میانگین Average	سطوح ماده جاذب رطوبت (درصد وزنی) Superabsorbent levels (%W/W)				بافت خاک Soil texture
	2	1	0.5	0	
11.60 <sup>C</sup>	22.40 <sup>cd</sup>	10.72 <sup>g</sup>	8.57 <sup>h</sup>	4.7 <sup>i</sup>	SL
14.01 <sup>B</sup>	24.00 <sup>c</sup>	12.57 <sup>f</sup>	10.38 <sup>g</sup>	9.07 <sup>gh</sup>	CL
26.64 <sup>A</sup>	39.29 <sup>a</sup>	26.33 <sup>b</sup>	21.40 <sup>d</sup>	19.52 <sup>e</sup>	SiC
	28.56 <sup>A</sup>	16.54 <sup>B</sup>	13.45 <sup>C</sup>	11.10 <sup>D</sup>	average

مختلف ماده جاذب رطوبت، میزان رطوبت در حالت ظرفیت زراعی بین ۱/۴۵ تا تقریباً ۲/۳۶ برابر رطوبت نمونه شاهد افزایش یافته است. این مقدار در بافت‌های لومرسی و رس‌سیلتی به ترتیب ۱/۱۷-۱/۵۴ و ۱/۱-۱۱/۵۱ برابر نسبت به نمونه شاهد هر بافت است. در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی، با کاربرد ماده جاذب رطوبت میزان درصد حجمی رطوبت در نقطه پژمردگی دائم به ترتیب ۱/۸-۴/۸، ۱/۲-۱۴/۷ و ۱/۱-۲ برابر نسبت به نمونه شاهد هر بافت افزایش نشان می‌دهد. با توجه به مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر رطوبت آزاد شده در مکش‌های کم (صفر تا ۳ بار) و زیاد (۳ تا ۱۵ بار) (جدول‌های ۷ و ۸)، مشاهده می‌شود که در هر بافت با کاربرد ماده جاذب رطوبت میزان رطوبت بیشتری در مکش کم آزاد شده است. در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی در نمونه شاهد به ترتیب

نتایج مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر درصد حجمی رطوبت اشباع (جدول ۴) نشان می‌دهد که بیشترین میزان رطوبت در حالت مکش صفر مربوط به بافت رس‌سیلتی با کاربرد ۲ درصد وزنی آکواسورس و به میزان ۶۶/۶۷ درصد حجمی است. به طور کلی در تمامی بافت‌ها با کاربرد ماده جاذب رطوبت و افزایش سطح مورد استفاده، میزان رطوبت اشباع افزایش معنی‌داری یافته است. همچنین، استفاده از این پلیمر و افزایش میزان کاربرد آن بر درصد رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم نیز اثر معنی‌داری داشته است. بیشترین میزان رطوبت در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم مربوط به بافت رس‌سیلتی با کاربرد ۲ درصد وزنی ماده جاذب رطوبت به ترتیب به میزان ۴۶/۴۷ و ۳۹/۲۹ درصد حجمی بوده است (جدول-های ۵ و ۶). در بافت لوم‌شنی، با کاربرد سطوح

حدود ۱۸/۸، ۱۷/۹ و ۱۷/۲ درصد حجمی، آزادسازی رطوبت در محدوده مکش کم اتفاق افتاده است. کاربرد آکواسورس در سطح ۰/۵ درصد وزنی در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی سبب آزادسازی رطوبت به ترتیب به میزان ۱/۱۸، ۱/۳۵ و ۱/۴ برابر نسبت به نمونه شاهد شده‌است. با کاربرد ۱ درصد وزنی آکواسورس، میزان آزادسازی رطوبت در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی به ترتیب حدود ۱/۱۷، ۱/۳۳ و ۱/۳ برابر نسبت به نمونه شاهد هر بافت افزایش یافته است. و سرانجام اینکه کاربرد ۲ درصد وزنی ماده جاذب رطوبت، آزادسازی رطوبت در مکش کم در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی را به ترتیب ۱/۲۲، ۱/۲۴ و ۱/۲ برابر نمونه شاهد افزایش داده‌است.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر رطوبت آزاد شده در مکش کم (% حجمی)

Table 7- Comparison of the means of simple and interaction effects of superabsorbent levels and soil texture on moisture released in low suction range (% V)

میانگین Average	سطوح ماده جاذب رطوبت (درصد وزنی) Superabsorbent levels (%W/W)				بافت خاک Soil texture
	2	1	0.5	0	
	21.51 <sup>AB</sup>	23.04 <sup>ab</sup>	22.06 <sup>abcd</sup>	22.13 <sup>abcd</sup>	
21.96 <sup>A</sup>	22.14 <sup>abcd</sup>	23.68 <sup>ab</sup>	24.15 <sup>a</sup>	17.85 <sup>cd</sup>	CL
21.17 <sup>B</sup>	20.68 <sup>abcd</sup>	22.40 <sup>abc</sup>	24.43 <sup>a</sup>	17.16 <sup>d</sup>	SiC
	21.95 <sup>B</sup>	22.71 <sup>AB</sup>	23.57 <sup>A</sup>	17.94 <sup>C</sup>	average

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های اثر ساده و متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و بافت خاک بر رطوبت آزاد شده در مکش زیاد (% حجمی)

Table 8- Comparison of the means of simple and interaction effects of superabsorbent levels and soil texture on moisture released in high suction range (% V)

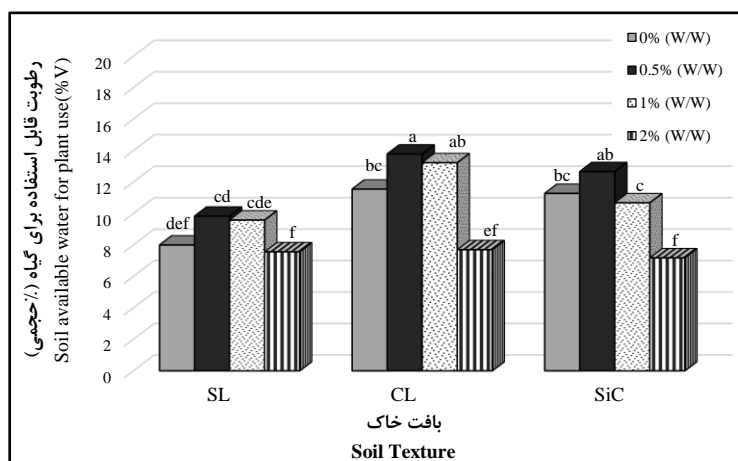
میانگین Average	سطوح ماده جاذب رطوبت (درصد وزنی) Superabsorbent levels (%W/W)				بافت خاک Soil texture
	2	1	0.5	0	
	4.29 <sup>C</sup>	7.36 <sup>ab</sup>	3.66 <sup>de</sup>	3.27 <sup>e</sup>	
6.88 <sup>A</sup>	7.55 <sup>ab</sup>	8.06 <sup>a</sup>	6.25 <sup>abc</sup>	5.64 <sup>bcd</sup>	CL
5.51 <sup>B</sup>	6.70 <sup>abc</sup>	6.75 <sup>abc</sup>	4.87 <sup>cde</sup>	3.70 <sup>de</sup>	SiC
	7.21 <sup>A</sup>	6.16 <sup>A</sup>	4.80 <sup>B</sup>	4.07 <sup>B</sup>	average

منجر به افزایش آزادسازی رطوبت بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی به ترتیب به میزان ۲/۶، ۱/۳ و ۱/۸ برابر نسبت به نمونه شاهد هر بافت شده‌است. به این ترتیب در محدوده مکش‌های زیاد، در مقایسه با مکش‌های کم، افزایش در سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت منجر به آزادسازی مقادیر بیشتری رطوبت در خاک، نسبت به تیمار شاهد شده‌است. از طرفی در مقادیر کمتر، استفاده از آکواسورس (۰/۵ درصد وزنی) در تمامی بافت‌ها

با افزایش مکش در محدوده مکش‌های زیاد نیز در تمامی بافت‌ها با کاربرد ماده جاذب رطوبت، میزان آزادسازی رطوبت تا حدودی افزایش پیدا کرده‌است (جدول ۸). با کاربرد ۰/۵ درصد وزنی آکواسورس در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی، میزان رطوبت آزاد شده در این محدوده مکش به ترتیب حدود ۱/۱۴، ۱/۱۱ و ۱/۳ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته‌است. از طرفی، در این محدوده مکش، کاربرد ۲ درصد وزنی آکواسورس

قابل استفاده گیاه در شکل ۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار رطوبت قابل استفاده برای گیاه در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی به ترتیب به میزان ۹/۸، ۱۳/۸ و ۱۲/۷ درصد حجمی و مربوط به کاربرد ۰/۵ درصد وزن آکواسورس در این تیمارها بوده است. با استفاده از ۰/۵ درصد وزن پلیمر، میزان رطوبت قابل استفاده برای گیاه در بافت‌های لوم‌شنی، لومرسی و رس‌سیلتی به ترتیب ۱/۲۳، ۱/۱۹ و ۱/۱۲ برابر نمونه شاهد هر بافت به دست آمده است. کاربرد مقدار بیشتر ماده جاذب رطوبت، تا حدودی کاهش رطوبت قابل استفاده گیاه را به همراه دارد، به طوری که با استفاده از ۲ درصد وزن پلیمر میزان آب قابل استفاده گیاه کمتر از مقداری است که در نمونه شاهد دیده می‌شود.

مقادیر بیشتری رطوبت در محدوده مکش کم آزاد شده است. با افزایش میزان استفاده از ماده جاذب رطوبت تا ۲ درصد وزنی، مقدار رطوبت آزاد شده در محدوده مکش‌های زیاد افزایش بیشتری داشته است. در سطوح کم، استفاده از آکواسورس تعامل بین پلیمر و خاک در سیستم خاک/پلیمر باعث سهولت در انتقال رطوبت ذخیره شده در پلیمر به ذرات خاک شده است. با افزایش سطح ماده جاذب رطوبت، تعامل بین پلیمر و ذرات خاک کاهش یافته و به علت توده‌ای شدن این مواد، تا حدودی حبس رطوبت در آکواسورس اتفاق افتاده است. مطالعات سایر محققان نیز نشان داده است که کاربرد ماده جاذب رطوبت میزان تخلخل خاک را افزایش می‌دهد (Abedi-Koupai & Sohrab, 2004). اثر کاربرد سطوح مختلف آکواسورس و نوع بافت بر رطوبت



شکل ۴- اثر متقابل سطوح ماده جاذب رطوبت و نوع بافت بر رطوبت قابل استفاده برای گیاه (درصد حجمی)

Fig. 4 - Interaction of superabsorbent levels and soil textures on soil available water for plant use (% V)

تبادل مناسب رطوبت بین پلیمر و خاک اطراف آن می‌شود و به این ترتیب به رغم وجود رطوبت در سیستم خاک/پلیمر، این رطوبت برای گیاه قابل استفاده نیست به طوری که در هر سه بافت کمترین میزان رطوبت قابل استفاده گیاه متعلق به تیمار ۲ درصد وزن آکواسورس است. مشابه این موضوع را

این موضوع را می‌توان مربوط به کاهش تعامل ذرات خاک و پلیمر با افزایش میزان کاربرد ماده جاذب رطوبت در خاک دانست. در سطوح بالای مصرف پلیمر، تماس هیدروژل ایجاد شده با ذرات خاک کاهش می‌یابد و به دنبال آن توده‌ای شدن ماده جاذب رطوبت رخ می‌دهد. این رخداد مانع

نتایج ارزیابی مدل‌ها مربوط به دو نقطه ظرفیت زراعی (FC) و پژمردگی دائم (PWP) در تیمارهای مختلف بسنده شد (جدول ۹). بر اساس جدول (۹) مشاهده می‌شود که برآزش مدل ون گنوختن (معلم) در نرم‌افزار RETC در تمامی تیمارها تقریب مناسبی از پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارائه کرده است ( $R^2 > 0.98$ ). همچنین، با افزایش سطوح استفاده از ماده جاذب رطوبت، دقت مدل در برآورد پارامترها تا حدودی کاهش یافته است (جدول ۹). نرم‌افزار Rosetta در مقایسه با نرم‌افزار RETC تقریب مناسبی برای برآورد پارامترها نداشته است، خصوصاً در مقادیر بالای استفاده از ماده جاذب رطوبت دقت مدل قابل قبول نیست ( $R^2$  حدود ۰/۷). بنابراین، نتایج برآزش مدل ون گنوختن (معلم) در نرم‌افزار RETC برای برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی ( $\alpha, n, \theta_s, \theta_r$ ) ارائه شده‌اند (شکل‌های ۵ تا ۸).

دیگر محققان (Arabi *et al.*, 2016; Soheilnejad *et al.*, 2018; Vasconcelos *et al.*, 2019; Saha *et al.*, 2020) گزارش داده‌اند. این محققان دلیل کاهش رطوبت قابل استفاده گیاه را اثر بازدارندگی پلیمرهای جاذب رطوبت در سطوح بالای استفاده در اثر حجیم شدن پلیمر و اشغال فضای زیاد خلل و فرج خاک دانسته‌اند.

### اثر کاربرد پلیمر آکواسورس بر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت خاک

به منظور ارزیابی عملکرد دو نرم‌افزار RETC (v.6.02) و Rosetta (v. 1.1) در برآورد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف، پارامترهای ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا برای کلیه تیمارها تعیین شد. با توجه به حجم زیاد داده‌ها و روند یکسان پارامترهای آماری در مقایسه دو مدل در برآورد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف، به ارائه

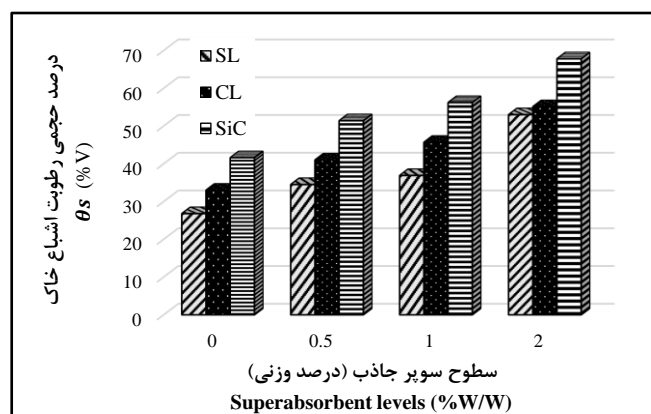
جدول ۹- مقادیر ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا برای سطوح مختلف کاربرد ماده جاذب رطوبت در بافت‌های مختلف

Table 9 - Correlation coefficient and mean square error values for different levels of superabsorbent application in different soil textures

سطوح ماده جاذب رطوبت Superabsorbent levels								مدل Model	بافت خاک Soil texture
۲ درصد وزنی 2 % W/W		۱ درصد وزنی 1 % W/W		۰/۵ درصد وزنی 0.5 % W/W		شاهد Control			
MSE(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	MSE(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	MSE(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	MSE(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>		
0.088	0.9894	0.093	0.9889	0.028	0.9967	0.010	0.9991	RETC (FC)	SL
0.500	0.9037	0.611	0.8001	0.076	0.9904	0.050	0.9925	Rosetta (FC)	
0.110	0.9840	0.030	0.9960	0.019	0.9978	0.054	0.9912	RETC (PWP)	
0.638	0.7932	0.603	0.8793	0.380	0.9671	0.734	0.8342	Rosetta (PWP)	
0.170	0.9802	0.199	0.9817	0.082	0.9900	0.044	0.9950	RETC (FC)	CL
0.610	0.8210	0.454	0.9294	0.399	0.9310	0.079	0.9901	Rosetta (FC)	
0.102	0.9849	0.098	0.9883	0.013	0.9980	0.090	0.9890	RETC (PWP)	
0.629	0.7210	0.721	0.8449	0.487	0.9123	0.552	0.8892	Rosetta (PWP)	
0.165	0.9833	0.061	0.9907	0.029	0.9962	0.024	0.9972	RETC (FC)	SiC
0.572	0.7076	0.291	0.9645	0.388	0.9686	0.229	0.9777	Rosetta (FC)	
0.375	0.9698	0.187	0.9821	0.044	0.9937	0.031	0.9958	RETC (PWP)	
0.718	0.7002	0.800	0.8287	0.466	0.9094	0.406	0.9444	Rosetta (PWP)	

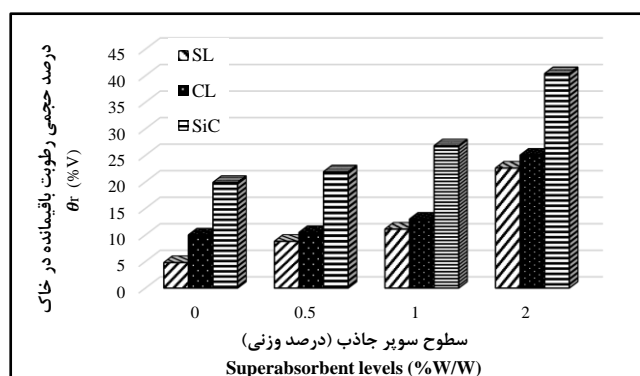
در بافت رس سیلتی کاربرد ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی ماده جاذب رطوبت سبب افزایش مقدار  $\theta_s$  به ترتیب به میزان ۱۹/۱، ۲۶/۰ و ۳۸/۶ درصد شده است. با توجه به شکل (۶) مشاهده می شود که درصد رطوبت حجمی باقیمانده با کاربرد پلیمر و افزایش سطوح مورد استفاده افزایش یافته است. بیشترین درصد رطوبت حجمی باقیمانده مربوط به بیشترین سطح کاربرد ماده جاذب رطوبت (۲درصد وزنی) و بافت رس سیلتی در حدود ۴۰ درصد است. افزایش رطوبت حجمی باقیمانده در بافت لوم شنی بیش از دو بافت دیگر است و کاربرد ماده جاذب رطوبت میزان این پارامتر را تا حدود ۴/۵ برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است.

بررسی اثر کاربرد ماده جاذب رطوبت بر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک نشان می دهد که به طور کلی در هر بافت با افزودن آکواسورس و افزایش سطح کاربرد، مقدار درصد رطوبت حجمی اشباع خاک افزایش می یابد (شکل ۵). در هر سه بافت، بیشترین مقدار  $\theta_s$  مربوط به بیشترین سطح استفاده از پلیمر است. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی ماده جاذب رطوبت به خاک لوم شنی، مقدار  $\theta_s$  به ترتیب ۲۲/۳، ۲۷/۴ و ۴۹/۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. در بافت لومرسی، استفاده از ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی آکواسورس مقدار  $\theta_s$  را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۹/۵، ۲۷/۸ و ۴۰/۱ درصد افزایش می دهد و



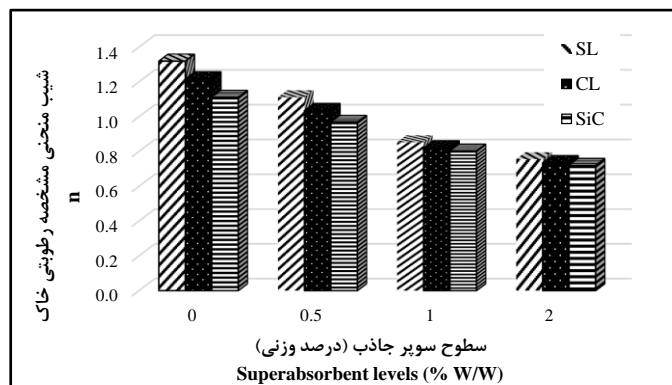
شکل ۵- تغییرات درصد رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_s$ ) در بافت های مختلف خاک در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 5 - Changes in the saturated water content ( $\theta_s$  (%V)) of different soil textures due to the application of different levels of superabsorbent



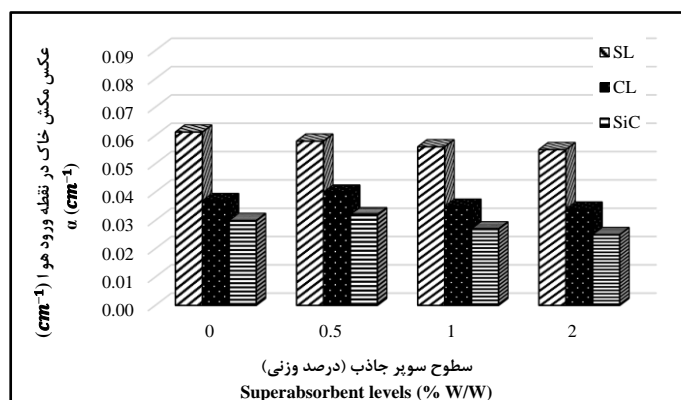
شکل ۶- تغییرات درصد رطوبت حجمی باقیمانده ( $\theta_r$ ) در بافت های مختلف خاک در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 6 - Changes in the residual water content ( $\theta_r$  (%V)) of different soil textures due to the application of different levels of superabsorbent



شکل ۷- شیب منحنی مشخصه رطوبت (n) در بافت‌های مختلف خاک در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 7 - Changes in the slope of the soil-water characteristic curve (n) of different soil textures due to the application of different levels of superabsorbent



شکل ۸- عکس مکش خاک در نقطه ورود هوا ( $\alpha(cm^{-1})$ ) در بافت‌های مختلف خاک در اثر کاربرد سطوح مختلف ماده جاذب رطوبت

Fig. 8 - Changes in the inverse of the air entry suction  $\alpha(cm^{-1})$  of different soil textures due to the application of different levels of superabsorbent

آکواسورس و افزایش سطح مورد استفاده، مقدار  $\alpha$  کم می‌شود. در ناحیه ورود هوا به خلل و فرج خاک، پتانسیل ماتریک تغییر می‌کند. در بافت‌های سبک‌تر به علت داشتن خلل و فرج زیاد، با مکش بسیار کم، آب از خلل و فرج خارج می‌شود. یا به عبارتی مقدار  $\alpha$  در این نوع خاک‌ها زیاد است. افزودن ماده جاذب رطوبت و افزایش سطح کاربرد به علت تورم زیاد این مواد سبب اتصال خلل و فرج درشت و در نتیجه افزایش سطح تماس آب با خاک می‌شود. در این حالت، برای خروج آب نیاز به فشار بیشتری است و مقدار  $\alpha$  کم می‌شود (Abedi-Koupai *et al.*, 2008). به این ترتیب، در بافت لوم‌شنی با افزایش سطح پلیمر مورد استفاده میزان  $\alpha$  کاهش یافته است. با

در هر سه بافت مورد مطالعه، با افزودن پلیمر جاذب رطوبت و افزایش سطح استفاده، به علت افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک، مقدار شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک ( $n$ ) کم می‌شود و سرعت از دست دادن آب کاهش می‌یابد (شکل ۷). بیشترین کاهش مربوط به بافت لوم‌شنی و کاربرد ۲ درصد وزنی آکواسورس به میزان ۴۲ درصد نسبت به نمونه شاهد است. نتایج مشابهی را سایر محققان (Abedi-Koupai & Sohrab, 2004; Haghshenas-Gorgabi & Beigi-Harchegani 2010; Kheiri-Shalamzari & Boroomandnasab, 2014) گزارش داده‌اند. بررسی اثر کاربرد سطوح مختلف آکواسورس بر فشار ورود هوا به خاک (شکل ۸) نشان می‌دهد که در بافت لوم‌شنی با افزودن

و بازه مکش‌های زیاد (پتانسیل ماتریک از ۳ تا ۱۵ بار) می‌شود. کاربرد ۲ درصد وزنی آکواسورس در بافت‌های لوم‌شنی، لوم‌رسی و رس‌سیلتی، میزان رطوبت در حد ظرفیت زراعی را به ترتیب حدود ۲/۴، ۱/۶ و ۱/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد هر بافت افزایش می‌دهد. بیشترین رطوبت قابل استفاده گیاه در هر سه بافت مورد مطالعه با کاربرد ۰/۵ درصد وزنی آکواسورس به دست آمده است. کاربرد ۰/۵ درصد وزنی پلیمر در بافت‌های لوم‌شنی، لوم‌رسی و رس‌سیلتی، میزان رطوبت قابل استفاده گیاه را به ترتیب حدود ۱/۲۳، ۱/۱۹ و ۱/۱۲ برابر نسبت به نمونه شاهد در هر بافت افزایش می‌دهد. کاربرد مقادیر بیشتر پلیمر سبب کاهش رطوبت قابل استفاده گیاه می‌شود. در مجموع، کاربرد ماده جاذب رطوبت آکواسورس سبب افزایش قابل توجه رطوبت اشباع، رطوبت باقیمانده در خاک و درصد رطوبت حجمی در هر مکش از منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌شود. همچنین، این پلیمر دارای خاصیت آزادسازی رطوبت در مکش‌های کم به‌ویژه در بافت‌های سنگین است و کاربرد آن به افزایش ظرفیت نگهداشت آب در مکش‌های زیاد به‌ویژه در بافت‌های سبک می‌انجامد. اما توجه به این نکته ضروری است که در سطوح کم کاربرد آکواسورس (حدود ۰/۵ درصد وزنی)، تعامل بین پلیمر و خاک در سیستم خاک/پلیمر باعث سهولت در انتقال رطوبت ذخیره‌شده در ماده جاذب رطوبت به ذرات خاک می‌گردد. افزایش سطح کاربرد این پلیمر تا ۲ درصد وزنی اثر بازدارنده دارد و در این حالت تعامل بین پلیمر و ذرات خاک کاهش می‌یابد که به تخلیه نشدن مناسب رطوبت از پلیمر منجر می‌شود. همچنین باید در نظر داشت که کاربرد پلیمرهای جاذب رطوبت در شرایطی اقتصادی خواهد بود که تأمین آب در محل مورد

سنگین‌تر شدن بافت خاک در نمونه شاهد، به علت وجود خلل و فرج ریز و سطح ویژه زیاد خاک مقدار فشار ورود هوا افزایش یافته است. کاربرد آکواسورس در بافت‌های لوم‌رسی و رس‌سیلتی در مقادیر کم به علت ایجاد محیطی متخلخل در اثر جذب و دفع آب، باعث کاهش خلل و فرج ریز و سرعت حرکت بیشتر آب شده و برای خروج آب از این نقاط نیاز به فشار کمتری است و به عبارتی مقدار  $\alpha$  تا حدودی افزایش یافته است (در بافت لوم‌رسی پارامتر  $\alpha$  نسبت به نمونه شاهد حدود ۷/۵ درصد و در بافت رس‌سیلتی حدود ۶ درصد افزایش یافته است). با این همه، در موارد مصرف سطوح بالای ماده جاذب رطوبت تورم زیاد این مواد منجر به تشدید مشکل ماندابی و افزایش فشار ورود هوا به خاک شده است (Abedi-Koupai & Sohrab, 2004). میزان افزایش این پارامتر در تیمار ۲ درصد وزنی ماده جاذب رطوبت در بافت‌های رس‌سیلتی و لوم‌رسی به ترتیب حدود ۱۶/۵ و ۸ درصد است.

### نتیجه‌گیری

بررسی منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک نشان می‌دهد که در هر سه بافت لوم‌شنی، لوم‌رسی و رس‌سیلتی با کاربرد آکواسورس، درصد رطوبت حجمی نمونه خاک در هر پتانسیل ماتریک اعمال شده، افزایش می‌یابد. کاربرد آکواسورس و افزایش سطح کاربرد این پلیمر جاذب رطوبت (از صفر به ۲ درصد وزنی پلیمر/خاک) در بافت‌های لوم‌شنی، لوم‌رسی و رس‌سیلتی سبب افزایش میزان رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم می‌شود. همچنین، کاربرد این ماده جاذب رطوبت و افزایش سطح کاربرد آن از صفر تا ۲ درصد وزنی پلیمر/خاک، سبب افزایش میزان رطوبت آزادشده در بازه مکش‌های کم (پتانسیل ماتریک از صفر تا ۳ بار)

نظر، قیمت تمام‌شده بالایی داشته باشد. آبیاری را افزایش دهد و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر در این صورت کاربرد پلیمر می‌تواند فاصله‌های باشد.

### قدردانی

نگارندگان از مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به پاس فراهم آوردن امکان این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

### مراجع

- Abedi-Koupai, J. & Sohrab, F. (2004). Evaluating the application of superabsorbent polymers on soil water capacity and potential on three soil textures. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 17(3), 163-173. (in Persian)
- Abedi-Koupai, J., Sohrab, F. & Swarbrick, G. (2008). Evaluation of hydrogel application on soil water retention characteristics. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 317-331.
- Ambrojo, G., Wong, J. & Ferrari, B. J. (2019). Ecotoxicological effects of polyacrylate, acrylic acid, polyacrylamide and acrylamide on soil and water organisms. Swiss Centre for Applied Ecotoxicology, Lausanne, Switzerland. *Technical Report. No: 20646*.
- Arabi, Z., Kaboosi, K., Rezvantalab, N. & Torke-Lalebagh, J. (2016). Effects of irrigation and super-absorbent hydrogels on morphological characteristics, yield and essential oil of anise (*Pimpinella Anisum* L.). *Journal of Crop Production*, 8(4), 51-66. (in Persian)
- Behera, S. & Mahanwar, P. (2020) Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 59(4): 341-356.
- Cao, Y., Wang, B., Guo, H., Xiao, H. & Wei, T. (2017). The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau. *Ecological Engineering*, 102, 270-279.
- Ecotechnology. (2018). What is Aquasource? <http://www.ecotechnology.am/aquasource/index.php/en-us/aquasource-en#>.
- Essawy, H., Ghazy, M., El-Hai, F. & Mohamed, M. (2016). Superabsorbent hydrogels via graft polymerization of acrylic acid from chitosan-cellulose hybrid and their potential in controlled release of soil nutrients. *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, 144-151.
- Haghighy-Moghaddam, S. A. (2006). *Methods to increase soil moisture storage using superabsorbents to increase agricultural water productivity. Technical workshop of mechanized surface irrigation*. (in Persian). Nov. 24-25. Karaj, Iran.
- Haghshenas-Gorgabi, M. & Beigi-Harchegani, H. (2010). The effect of Mianeh zeolite on water retention and water retention models in two soil textures. *Iranian Water Research Journal*, 4(6), 35-42. (in Persian)
- Kheiri-Shalamzari, K. & Boroomandnasab, S. (2014). The effect of different levels of superabsorbent a300 in some physics and hydraulic properties of a silty loam soil. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 36 (4) , 63-71. (in Persian)
- Klute, A. (1986). *Water Retention: Laboratory methods, methods of soil analysis, Part 1*. American Society of Agronomy (pp 635-666), Madison, WI.
- Misiewicz, J., Lejcus, K., Dabrowska, J. & Marczak, D. 2019. The characteristics of absorbency under load (AUL) for superabsorbent and soil mixtures. *Scientific Reports*, 9, 1-9.
- Nirmala, A. & Guvvali, T. (2019). Hydrogel/superabsorbent polymer for water and nutrient management in horticultural crops-review. *International Journal of Chemical Studies*, 7(5), 787-795.



- Parvanak-Boroujeni, K. & Abedi-Koupai, J. (2009). The effect of super AB-A200 hydrogels on porosity, water holding capacity and hydraulic conductivity of soil in the field. *Plant and Ecosystem*, 5(18), 102-118. (in Persian)
- Rafiee, Z., Zehtabian, G. R. Tavili, A. & Kianirad, M. (2011). Comparing effect of hydrogel and compost on establishment and growth properties of *Haloxylon aphyllum*. *Scientific and Research Journal Arid Biome*, 1(3), 24-37. (in Persian)
- Raju. K. M., Raju. M. P. & Mohan. Y. M. (2002). Synthesis and water absorbency of cross-linked superabsorbent polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 1795-1801.
- Rashed, M., Kenawy, E. R., Hosny, A., Hafez, M. & Elbana, M. (2021). An environmental friendly superabsorbent composite based on rice husk as soil amendment to improve plant growth and water productivity under deficit irrigation conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 44(7), 1010-1022.
- Saha, A., Sekharan, S. & Manna, U. (2020). Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review. *Soil and Tillage Research*, 204, 1-17.
- Satriani, A., Catalano, M. & Scalcione, E. (2018). The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 195, 114-119.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. & Van Genuchten, M.T. (1998). Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 847-855.
- Schaap, M.G., Leij, F.J. & Van Genuchten, M.T. (2001). Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Sepehri, S., Abbasi, N. & Nakhjavanimoghaddam, M.M. (2020). Investigating the effects of aquasource super-absorbent on water productivity of peppermint (*Mentha piperita*). *Final Research Report, Agricultural Engineering Research Institute*. (In Persian).
- Soheilnejad, A. Mahdavi-Damghani, A., Liaghati, S. & Pezeshkpour, P. (2018). Effect of superabsorbent hydrogel Aquasorb application on mitigating drought stress, grain yield and water use efficiency of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 19(4), 363-375. (in Persian)
- Sohrab, F. & Abbasi, F. (2010). Investigating the effect of using superabsorbent materials on soil water retention. *Final research report. No. 89/945. Agricultural Engineering Research Institute*. (in Persian)
- Van Genuchten, M.T., Leij, F.J. & Yates, S.R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, USEPA Rep. 60012-91/065. USEPA, Environment Research Laboratory. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP).
- Vasconcelos, M., Gomes, R., Sousa, A., Moreira, F., Rodrigues, F., Fajardo, A. & Neto, L. (2019). Superabsorbent hydrogel composite based on starch/rice husk ash as a soil conditioner in melon (*Cucumis melo* L.) seedling culture. *Journal of Polymers and the Environment*, 28, 131:140.
- Warker, S. & Kumar, A. (2019). Synthesis and assessment of carboxymethyl tamarind kernel gum based novel superabsorbent hydrogels for agricultural applications, *Polymer*, 182: 1-10.
- Xiahua, Q., Mingzhu, L., Zhenbin, C. & Fen, Z. (2008). Study on the Swelling Kinetics of Superabsorbent Using Open, Circuit Potential Measurement. *European Polymer Journal*, 44, 743-754.
- Yu, J., Shi, J. G. & Ma, X. (2017). Superabsorbent Polymer Properties and Concentration Effects on Water Retention under Drying Conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 889-901.

## Effect of Aquasource Polymer on the Hydro-Physical Properties of Different Soils

S. Sepehri-Sadeghian\*, N. Abbasi and M. M. Nakhjavanimoghaddam

\* Corresponding Author: Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: s.sepehri@aeri.ir  
Received: 4 February 2021, Accepted: 5 April 2021

### Extended Abstract

#### Introduction

Today, one of the most important challenges of the present and the future, especially in the arid regions of the world, is the issue of water shortage and in some cases the water crisis. One of the ways to improve water productivity and better water management in agricultural sector as the largest consumer of water is the use of super-absorbent materials to improve soil texture, increase soil water retention, reduce erosion and increase germination. The aim of this study is to evaluate the effect of Aquasource superabsorbent polymer on physical parameters and soil-water characteristic curves (SWCC) of different soil textures.

#### Methodology

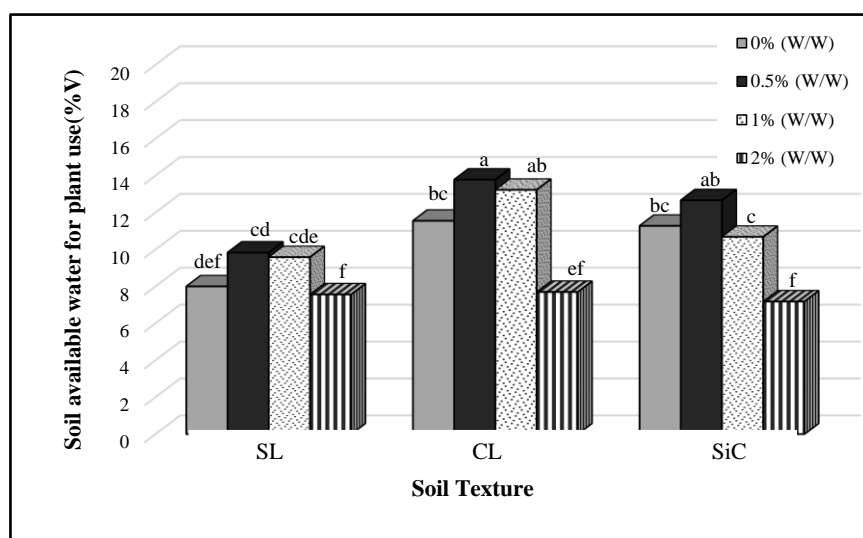
Aquasource is a new generation of potassium-based superabsorbent polymers that are biodegradable and free of destructive acrylamide compounds. In order to evaluate the effect of Aquasource hydrogel on hydro-physical properties of soils, some experiments in the form of a completely randomized design with 3 replications was performed. The first factor was different levels of superabsorbent (0, 0.5, 1 and 2% by weight of superabsorbent/soil) and the second factor was three different soil textures (sandy-loam, clay-loam and silty-clay). SWCCs related to all treatments were determined by determining the moisture content of the samples at different pressures (0, 0.3, 0.5, 1, 3, 6, 9 and 15 bars) using a pressure plate device. Then, to obtain the soil moisture characteristic curve parameters ( $\alpha, n, \theta_s, \theta_r$ ) in each sample, two softwares RETC (v.6.02) and Rosetta (v. 1.1) were used.

#### Results and Discussion

The results of variance analysis and mean comparisons based on Duncan's test showed that in all soil textures studied, the application of superabsorbent and the increase Aquasource amounts, increased the moisture contents at the field capacity and permanent wilting point. However, the highest amount of soil available water for plant use in sandy loam, clay loam and silty clay textures was 9.8%, 13.8% and 12.7%, respectively, and they are related to the use of 0.5% w/w of superabsorbent in these treatments (Fig. 1). The use of larger amounts, up to 2% w/w, reduced the soil available water for plant use. This issue can be related to the reducing the interaction of soil particles and polymers with increasing the amount of superabsorbent application in soil. At high levels of superabsorbent consumption, the contact of the hydrogel with the soil particles is reduced, followed by the aggregation of the superabsorbent. This prevents the proper exchange

between the superabsorbent and the surrounding soil, and thus despite the presence of moisture in the soil-superabsorbent system, this moisture cannot be used for the plant, so that in all three soil textures the lowest amount of plant available water belongs to the treatments of 2% w/w of Aquasource.

The results of statistical analysis for estimating the parameters of the soil-water characteristic curve due to the application of different levels of superabsorbent in different soil textures using two software RETC (v.6.02) and Rosetta (v. 1.1) showed that the fit The Van-Genuchten (Moallem) model in RETC software in all treatments has provided a good approximation of the parameters of the soil-water characteristic curve ( $R^2 > 0.98$ ). Also, with increasing the amounts of superabsorbent, the accuracy of the model in estimating the parameters decreased to some extent.



**Fig. 1 - Interaction of superabsorbent levels and soil textures on soil available water for plant use (%V)**

### Conclusions

Application of Aquasource superabsorbent and increasing the application level of this superabsorbent polymer (from 0 to 2% by weight of superabsorbent/soil) in sandy-loam, clay-loam and silty-clay soil textures caused an increase in the moisture content at field capacity and permanent wilting point. Application of 2% W/W in sandy-loam, clay-loam and silty-clay soil textures increased the moisture content at the field capacity by about 2.4, 1.6 and 1.5 times, respectively, compared to the control treatments of each soil textures. However, the highest amounts of plant available water in all three soil textures were obtained by applying 0.5% W/W (superabsorbent/soil). Application of 0.5% W/W in sandy loam, clay loam and silty clay textures increased the plant available water by about 1.23, 1.19 and 1.12 times compared to the control treatments in each soil textures, respectively. However, the use of larger amounts reduced the plant available water. At low levels of Aquasource application, the interaction between the

superabsorbent polymer and the soil particles in the soil/polymer system facilitates the transfer of moisture stored in the superabsorbent to soil particles. However, increasing the application level of this polymer up to 2% W/W has an inhibitory effect and in this case, the interaction between the polymer and soil particles is reduced, which leads to a lack of proper drainage of moisture from the polymer.

**Acknowledgement**

The authors would like to thank Agricultural Engineering Research Institute for supporting this research.

**Keywords:** Available water, Moisture absorbing polymer, Soil-Water Characteristic Curve