

## Correcting the effect of soil salinity in soil moisture measurement in gypsum blocks using the response surface method (RSM)

Yaser Hoseini<sup>1\*</sup>

(Received: January, 2024      Accepted: July, 2023)

### Abstract

Continuous evaluation and measurement of soil moisture content are necessary for irrigation management and planning. One common instrument for measuring soil moisture is the gypsum block method, which can be done easily and quickly. However, soil salinity can cause errors in measuring water content using the gypsum block model 5910-A. In this research, the effect of different irrigation salinities (1, 2, 6, 10, 18) dS m<sup>-1</sup> was investigated on gypsum blocks in three textural classes; clay-loam, loam, and sandy-loamy. The study was conducted in a completely randomized laboratory experiment with two replications and correction functions were investigated using the response surface method to determine the effect of parameters on the correction value. Correction functions were developed for each texture at different salinities using response surface method. Results showed that the response surface method (RSM) could estimate correction functions with an error probability of less than 0.0001 using two variables; moisture suction and salinity, or considering just the salinity factor. The accuracy of correction functions slightly decreased in different textures of clay loam, sandy loam and loam. The response surface method showed that the best salinity correction model was based on the salinity variable and the amount of soil matric suction for all three soil texture. Soil matric suction was determined from the soil moisture curve using the Parabolic model with a goodness of fit ( $R^2$ ) of 0.96 for loamy soil, and 0.94 for clay-loam and sandy-loam textures. To minimize correction under maximum salinity and soil suction conditions in different textures, the response surface method showed that the lowest moisture modification in clay-loam texture could be 0.075 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) at a suction of 8 (bar) and salinity of 18 (dS m<sup>-1</sup>) with an acceptance degree of 1. The desirability degree for loam soil and sandy-loam was calculated as 0.96 and 0.95 respectively. The results indicated that moisture correction values increased with soil salinity, but the accuracy of estimation functions for moisture correction values also increased. The changes in the moisture modification function were sinusoidal and quadratic in relation to the soil salinity and matric suction variables, respectively.

**Keywords:** Ardabil province, Soil salinity, Moisture correction, Response level, Statistical distribution.

Hoseini Y. 2025. Correcting the effect of soil salinity in soil moisture measurement in gypsum blocks using the response surface method (RSM). *Applied Soil Research*, 12 (4): 74-91.

1- Professor, Department of Agricultural engineering and technology, Moghan College of Agriculture & Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili.

\* Corresponding Author Email: [y\\_hoseini@uma.ac.ir](mailto:y_hoseini@uma.ac.ir)

## تصحیح اثر شوری خاک در اندازه‌گیری رطوبت خاک در بلوک‌های گچی با استفاده از روش سطح پاسخ

یاسر حسینی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶)

### چکیده

برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری، بررسی و اندازه‌گیری مداوم رطوبت خاک ضروری است. یکی از ابزارهای معمول در اندازه‌گیری رطوبت خاک بلوک گچی می‌باشد که به آسانی و سرعت مناسب انجام پذیر است. لیکن شوری خاک باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری رطوبت در بلوک گچی می‌گردد. در این تحقیق اثر شوری‌های مختلف آب آبیاری (۱۸، ۱۰، ۶، ۲، ۱۱-dS m) بر میزان تصحیح نتایج رطوبت قرائت بلوک گچی مدل ۵۹۱۰ به‌طور جداگانه در سه نوع بافت شن-لومی، لومی، لوم-رسی در دو تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی و در گلدان بررسی گردید و توابع اصلاحی با استفاده از روش سطح پاسخ که تأثیر پارامترهای مؤثر بر مقدار تصحیح را مشخص می‌کند، برای هر یک از بافت‌ها در شوری‌های مختلف به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در همه بافت‌ها، روش سطح پاسخ می‌تواند توابع اصلاحی برای تعیین مقدار اصلاح رطوبت با دو متغیر مکش رطوبتی و شوری و سپس یا در نظر گرفتن عامل شوری، با احتمال خطای کم‌تر از ۰/۰۰۰۱ برآورد نماید. دقت توابع اصلاحی در بافت لوم رسی، لوم شنی و لومی به میزان ۲ درصد کاهش یافت. همچنین نتایج روش سطح پاسخ نشان داد که بهترین نوع مدل تصحیح شوری براساس متغیر شوری و میزان مکش ماتریک خاک که از منحنی رطوبتی خاک تعیین شده بود، مدل مکعبی با ضریب تبیین ۰/۹۶ برای خاک لومی است. ضریب تبیین این مدل برای بافت‌های لوم رسی و لوم شنی ۰/۹۴ حاصل شد. برای رسیدن به هدف کم‌ترین اصلاح رطوبتی در شرایط بیشینه شوری و مکش خاک در بافت‌های مختلف با روش سطح پاسخ، نتایج نشان داد که در بافت لوم-رسی، می‌توان کم‌ترین اصلاح رطوبتی به‌میزان  $0/75 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3})$  را در مکش ۸ (bar) و شوری  $18 \text{ (dS m}^{-1})$ ، با بیشینه درجه مقبولیت برابر ۱، به‌دست آمد. همچنین درجه مقبولیت برای خاک لومی و لوم-شنی به‌ترتیب برابر ۰/۹۶ و ۰/۹۵ محاسبه گردید. نتایج نشان داد که اصلاح رطوبتی در کلیه بافت‌ها، با افزایش میزان شوری خاک، افزایش یافته و دقت توابع رطوبت اصلاح شده نیز افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات توابع اصلاح رطوبتی نسبت به متغیر شوری به شکل سینوسی و نسبت به مکش ماتریک خاک به شکل تابع درجه دوم به‌دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** استان اردبیل، شوری خاک، اصلاح رطوبتی، سطح پاسخ، توزیع آماری.

حسینی ی. . ۱۴۰۳. تصحیح اثر شوری خاک در اندازه‌گیری رطوبت خاک در بلوک‌های گچی با استفاده از روش سطح پاسخ. جلد ۱۲. شماره ۴. صفحه: ۷۴-۹۱.

۱- استاد گروه مهندسی فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی.

\* پست الکترونیک: [y\\_hoseini@uma.ac.ir](mailto:y_hoseini@uma.ac.ir)

## مقدمه

می‌تواند عامل تعدیل‌کننده تأثیر شوری خاک بر میزان قرائت بلوک‌گچی باشد، در پژوهش ایشان، با افزایش میزان رس خاک‌ها، تعداد گروه‌های معنی‌دار از نظر تأثیر شوری بر قرائت بلوک‌گچی، کاهش یافت.

در رابطه با استفاده از روش سطح پاسخ در اصلاح تحقیقات چندانی صورت نگرفته است، لیکن از روش سطح پاسخ در سایر شاخه‌های مرتبط با خاک استفاده شده است. این روش نخستین بار توسط باکس و ویلسون (Box & Wilson, 1951) معرفی شد و تا به امروز نیز از آن به عنوان یکی از ابزارهای طرح‌های آزمایشی استفاده می‌گردد (Fu, 2015). هر چند بسیاری این روش را به عنوان یک شبه مدل<sup>۱</sup> می‌دانند. این روش با معیار قرار دادن تعداد متغیرها و حدود بیشینه و کمینه تعیین شده برای هر متغیر، ماتریس آزمایش را طراحی می‌کند. بدین ترتیب تعداد آزمون‌ها و سطوح هر متغیر در هر آزمون مشخص می‌شود. زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد، این روش در مقایسه با سایر روش‌ها ارجحیت دارد. طرح آزمایش به نحوی است که حتی بدون تکرار آزمون، نتایج آماری قابل اعتمادی به دست می‌آید. برای بررسی نتایج از نرم‌افزار (Version 12.0, Stat-Ease, Minneapolis, MN 55413) استفاده می‌شود (Hosseini, 2023).

کرمی و همکاران (Karami et al., 2016) روش سطح پاسخ را به عنوان یک روش قابل قبول در مقایسه با روش‌های سنتی مدل‌سازی نشان داده‌اند. مظاهری و محمودآبادی (Mazaheri & Mahmoodabadi, 2012) به بررسی نفوذپذیری خاک در شرایط مزرعه‌ای و نقش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در نفوذپذیری خاک تحقیقی را با استفاده از روش سطح پاسخ انجام دادند. نتایج نشان داد که بافت خاک تأثیر معنی‌داری بر نفوذپذیری دارد. شیرازی و همکاران (Shirazi et al., 2019)، عوامل مؤثر بر فرسایش را با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ تک عامل<sup>۲</sup> با ضریب تبیین ۰/۹۸ مناسب‌ترین روش برای تعیین تأثیر شوری بر میزان فرسایش خاک می‌باشد.

در پاره‌ای از پژوهش‌های انجام شده تأثیر عوامل شیمیایی آب و خاک بر منحنی نگه‌داشت رطوبتی خاک به روش سطح پاسخ مطالعه شده است. تحقیقات آشتیانی و همکاران

اهمیت اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از بلوک‌گچی را می‌توان به علت دارا بودن محاسنی از جمله ارزانی، قابلیت کارگذاری در اعماق مختلف خاک، راحتی اندازه‌گیری، دقت عمل مناسب و امکان کاربرد آن در روش‌های آبیاری خودکار دانست (Hosseini, 2023). این روش اولین بار توسط بیوکاس و میک (Bouyoucos & Mick, 1948) پیشنهاد شد. اگرچه در ساختمان بلوک‌گچی از محلول سولفات کلسیم به عنوان الکترولیت استفاده می‌شود لیکن، بزرگ‌ترین مشکل در بلوک‌های گچی، حساسیت آن‌ها به شوری محلول خاک است (Ajayi et al., 2019). یکی دیگر از مشکلات بلوک‌گچی آن است که با وجود اینکه عمر مفید بلوک‌های گچی تا ۵ سال ذکر می‌شود، ولی عملاً در خاک‌های شور یا آلی و خاک‌های مرطوب عمر مفیدی کمتر از یک سال خواهند داشت (Vories and Sudduth, 2021).

قهرمان و همکاران (Ghahraman et al., 2010) تأثیر شوری بر قرائت بلوک‌گچی را بررسی نمودند، نتایج پژوهش ایشان نشان داد که افزایش شوری از حد ۲ (dS m<sup>-1</sup>) بر درستی نتایج بلوک‌های گچی تأثیر معنی‌داری دارد. این رفتار در مورد هر سه نوع بافت خاک مورد آزمون (شن-لومی، لومی و لوم-رسی) اتفاق افتاد.

رودز و همکاران (Rhoades et al., 1989) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که، شوری خاک منجر به تخمین زیاد در محتوای رطوبتی خاک در قرائت بلوک‌گچی می‌شود. مطالعات وایت و همکاران (White et al., 1994) و همچنین سان و همکاران (Sun et al., 2000) نیز، افزایش تخمین میزان رطوبت خاک در خاک‌های شور به دلیل افزایش ثابت دی‌الکتریک محلول خاک را نشان داد. در پژوهشی که توسط چاو و همکاران (Chow et al., 2009) انجام شد، بیان گردید که استفاده از بلوک‌گچی در اندازه‌گیری رطوبت در خاک لوم - شنی شور، نیاز به واسنجی مجدد داشته و بلوک‌گچی نسبت به شوری خاک حساس است. این موضوع توسط اوت (Evet et al., 2006) نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مشابهی به دست آمد. طبق نظر ایشان، عملکرد بلوک‌های گچی در شوری‌های بیش از ۲ (dS m<sup>-1</sup>) به دلیل بروز خطا در قرائت آن، دقیق نیست. هایننت و اوت (Hignett and Evett, 2008) بیان نمود که، سنگین بودن بافت خاک،

۱ - Metamodeling

۲ - One factor

گرفت (Rasheed *et al.*, 2022). آزمایش در سه نوع خاک با بافت (شن-لومی، رسی و لوم-رسی) و با دو تکرار برای هر کدام انجام شد. برای هر یک از بافت‌ها اندازه‌گیری رطوبت، دو بار تکرار گردید. با توجه به نیاز تعادل آبی بین بلوک و خاک لازم بود که پس از نصب بلوک، به مدت تقریباً ۳ ساعت صبر کرد تا این تعادل برقرار شود در این حالت تغییرات عدد قرائت شده در بلوک گچی به کمترین مقدار می‌رسد. بلوک‌ها قبل از ایجاد شوری‌های مورد نظر در درون خاک گلدان‌ها قرار گرفتند. در این پژوهش از دستگاه رطوبت‌سنج بلوک‌گچی<sup>۱</sup> برای قرائت بلوک‌ها در داخل گلدان‌های آبشویی شده با آب شور استفاده شد و در مجموع ۳ بار برای هر گلدان آبیاری انجام شد، قرائت بلوک‌های گچی در این دستگاه با تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب صورت می‌گیرد که از قطبی شدن الکترودها جلوگیری نموده و خطا در قرائت را کاهش می‌دهد. عدد قرائت شده با دستگاه با رطوبت بلوک (در واقع خاک) رابطه مستقیم دارد و بین صفر برای خاک خشک و ۱۰۰ برای خاک اشباع تغییر می‌نماید.

برای اعمال تیمارهای شوری، خاک تمامی گلدان‌ها با شوری‌های مربوطه آبشویی گردیدند، به‌صورتی که شوری آب زهکشی‌شده با شوری آب آبیاری یکسان شد. برای جلوگیری از پراکندگی ذرات خاک بر اثر بالا رفتن غلظت سدیم در محلول خاک، محلول‌های شور به کار رفته با اضافه نمودن نمک‌های NaCl و CaCl<sub>2</sub> با نسبت دو به یک و با روش سعی و خطا به‌دست آمدند به این صورت که ابتدا مقداری نمک NaCl و CaCl<sub>2</sub> در یک ظرف جداگانه با نسبت دو به یک با آب مخلوط شده و به‌تدریج در گالن‌های حاوی آب معمولی اضافه گردیدند و بعد از هم‌زدن کامل آب با استفاده از EC متر شوری آن‌ها اندازه‌گیری می‌شد و این کار تا زمانی ادامه می‌یافت که شوری مورد نظر به‌دست آید. لازم به توضیح است که آبیاری گلدان‌ها با آب شور به صورت کامل انجام گردید به نحوی که آب اضافی از ته گلدان‌ها به‌صورت آب آبشویی خارج شد. در این پژوهش از دستگاه رطوبت‌سنج بلوک‌گچی برای قرائت بلوک‌ها در داخل گلدان‌های آبشویی شده با آب شور استفاده شد.

(Ashtiani *et al.*, 2010) تأثیر شوری آب آبیاری را بر منحنی رطوبتی خاک با افزایش ۲۵ درصدی ظرفیت نگهداری آب در خاک، نسبت به آب معمولی نشان داده‌اند. همچنین شاینبرگ و همکاران (Shainberg *et al.*, 1971) نشان دادند که تورم رس و نگه‌داشت رطوبت تابعی از نسبت جذب سدیمی خاک بوده و با افزایش نسبت جذب سدیمی، قدرت نگهداری رطوبت در خاک افزایش می‌یابد. تأثیر شوری بیش از ۱۵ (دسی زیمنس بر متر) خاک بر میزان رطوبت اندازه‌گیری شده، حتی بر دستگاه‌های مبتنی بر انتشار امواج الکتریکی نیز تأثیرگذار بوده و باعث بیش‌برآورد رطوبت در این خاک‌ها می‌شود (Peng *et al.*, Wang *et al.*, 2019). راشد و همکاران (Rasheed *et al.*, 2022) بیان کرده‌اند که اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک در روش TDR در شوری‌های زیاد خاک و بافت سنگین خاک خطا داشته و نیاز به واسنجی دارد. با توجه به مطالب ارائه شده، در این پژوهش ضمن بررسی اثر شوری خاک بر قرائت بلوک‌گچی در بافت‌های مختلف، ارائه توابعی با استفاده از روش سطح پاسخ، برای تعیین رطوبت اصلاح شده، براساس متغیرهای شوری و مکش ماتریک خاک به‌دست آمده از منحنی مقاومت-مکش ماتریک دستگاه است. از آنجا که در روش سطح پاسخ، تأثیر هر یک از متغیرهای شوری و مکش ماتریک به صورت مجزا بر بلوک گچی قابل بررسی می‌باشد لذا استفاده از این روش می‌تواند علاوه بر تعیین کمی متغیرهای مؤثر، می‌توان روند تأثیر این متغیرها را بر رطوبت با توجه به سطوح پاسخ ارائه شده توسط نرم افزار بررسی نمود.

## مواد و روش‌ها

### نحوه انجام آزمایش

خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. برای انجام این آزمایش از ۵ سطح شوری آب آبیاری ۱، ۲، ۶، ۱۰، ۱۸ dS m<sup>-1</sup> استفاده گردید، سطح شوری ۱ dS m<sup>-1</sup> به عنوان تیمار شاهد، استفاده شد. شوری ۲ تا ۶ dS m<sup>-1</sup> به عنوان شوری متوسط تأثیر گذار بر بلوک‌گچی، انتخاب گردید (Moradi, 2022). همچنین شوری‌های ۱۰ تا ۱۸ dS m<sup>-1</sup> با توجه به حداکثر شوری قابل تحمل برای گیاهان انتخاب و مورد ارزیابی قرار

1 - Soil moisture 5910-A, USA.

جدول ۱- متغیرهای شیمیایی آب مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Water chemical variables used in the research

pH	EC	P <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
dS m <sup>-1</sup>		Meq L <sup>-1</sup>							
6.8	0.6	0.051	25.6	4.9	2.3	9.2	9.3	5.3	0.02

قرائت‌ها تا رطوبت نزدیک به ۱۵ درصد حجمی ادامه یافت. همزمان با هر قرائت، گلدان‌ها توزین و رطوبت وزنی خاک هر گلدان محاسبه و با توجه به حجم خاک گلدان به رطوبت حجمی تبدیل شد. برای تعیین مکش ماتریک خاک از منحنی رابطه بین مکش ماتریک و میزان مقاومت قرائت شده توسط بلوک گچی استفاده شد.

#### تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک‌ها به روش هیدرومتری تعیین گردید (Bouyoucos, 1962)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک‌ها به وسیله دستگاه هدایت‌سنج، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک ۰/۵ نرمال تعیین گردید (Loeppert & Sparks, 1996). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

#### واسنجی بلوک‌های گچی

برای این کار نمونه خاک را در گلدان‌های با حجم مشخص، جهت فرارگرفتن در آن آماده کرده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس خشک شدند. گلدان‌های مورد استفاده در این تحقیق ۳۰ گلدان به شکل مخروط ناقص با ارتفاع ۲۷ سانتی‌متر، قطر دهانه ۲۶ سانتی‌متر و قطر قاعده ۱۹ سانتی‌متر بود. پس از آن با قراردادن یک بلوک گچی در خاک درون ظروف در عمق ۱۵ سانتی‌متری، به وزن مجموع خاک خشک، گلدان و بلوک با دقت یک گرم اندازه‌گیری گردید. سپس خاک گلدان‌ها را با غلظت‌های شوری ۱ تا ۱۸ دسی زیمنس بر متر، اشباع کرده و اجازه داده شد آب اضافی از ظروف زهکشی گردد تا کل خاک در شرایط یکسانی از رطوبت و شوری قرار گیرد. با گذشت زمان و خشک شدن تدریجی خاک‌ها در هوای آزاد

جدول ۲- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 2. The results of physical and chemical analysis of the studied soils

Texture	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Bulk density (gr.cm <sup>-3</sup> )	TNV %	OC %
Sandy-Loam	55	20	25	1.34	18.1	0.66
Loam	34	21	45	1.36	13.1	0.91
Clay-Loam	35	30	35	1.56	11.5	0.85

ادامه جدول ۲- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 2. The results of physical and chemical analysis of the studied soil

P (mg.kg <sup>-1</sup> )	PW %	FC <sub>volumetric</sub> %	pH	Dg (mm)	Ca+Mg (meq l <sup>-1</sup> )	EC (dS m <sup>-1</sup> )
13.2	12.8	23.3	7.3	0.2	8.4	0.5
15.6	13.5	27.9	7.7	0.2	8.8	0.35
16.1	14.5	32	7.7	0.18	9.1	1.07

حتی در صورت یکسان بودن، دامنه انتخاب شده آن‌ها یکسان نمی‌باشد. برای این کار از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود (Montgomery & Myers, 1995).

$$X = \frac{x \cdot \frac{[X_{\max} + X_{\min}]}{2}}{\frac{[X_{\max} - X_{\min}]}{2}} \quad (2)$$

#### روش سطح پاسخ و ارزیابی مدل

در روش "سطح پاسخ" دامنه انتخاب شده برای هر متغیر اهمیت زیادی دارد (Asadzadeh *et al.*, 2016). دامنه هر متغیر باید کدبندی شده و در محدوده (+۱) و (-۱) قرار گیرد تا تحلیل به خوبی صورت پذیرد، زیرا واحد متغیرهای مستقل (شوری و مکش ماتریک خاک) یکسان نبوده و

$$Y = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^4 \beta_{ki} x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{kii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^4 \beta_{kij} x_i x_j \quad (3)$$

در این رابطه،  $\beta_{k0}$ ،  $\beta_{ki}$ ،  $\beta_{kii}$ ،  $\beta_{kij}$  به ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل متغیرهای شوری و مکش ماتریک هستند. همچنین  $Y$  مقدار تصحیح برای رطوبت اندازه‌گیری شده بلوک‌های گچی، و  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای مستقل کد شده هستند. در این معادله  $i$  نشانگر چهار سطح شوری و بین ۱ تا ۴ است. مقادیر  $j$  که شوری و مکش ماتریک می‌باشد بین ۱ و ۲ متغیر می‌باشند. این معادله و ماتریس آن را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

دستگاه معادلات ذکر شده، با استفاده از روش حداقل مربعات<sup>۲</sup> حل شده و ضرایب معادله به دست آمد. پس از آنکه ضرایب معادله به دست آمدند با حل معادله ۴، پاسخ پیش‌بینی شده و تصحیح رطوبتی به دست آمده می‌بایست با داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت و اختلاف واقعی رطوبت، مورد بررسی قرارگیرد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل توسط ضریب تبیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ ) بیان می‌شود. همچنین از ضریب تبیین اصلاح شده ( $R^2_{adj}$ ) نیز استفاده می‌شود. در محاسبه این ضریب، برخلاف  $R^2$ ، به جای مجموع مربعات، از میانگین مجموع مربعات استفاده می‌شود (Montgomery and Myers, 1995). نحوه محاسبه این دو ضریب در روابط (۶) و (۷) ارائه شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \quad (6)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_{residual}/DF_{residual}}{SS_{total}/(DF_{model} + DF_{residual})} \quad (7)$$

در روابط بالا  $SS_{residual}$  بیان‌گر مجموع مربعات باقیمانده،  $DF$  معرف درجه آزادی و  $SS_{total}$  معرف مجموع مربعات کل ( $SS_{residual} + SS_{model}$ ) است.

که در این رابطه،  $x$  مقدار واقعی متغیرهای مستقل از جمله شوری و مکش ماتریک خاک و  $x_{min}$  و  $x_{max}$  مقادیر کمینه و بیشینه متغیرها می‌باشند. در رابطه با نقش پتانسیل ماتریک، از آنجا که میزان رطوبت در خاک با مکش ماتریک خاک (قرائت اندازه‌گیری شده در بلوک گچی که بین ۰ تا ۱۰۰ متغیر بوده و رابطه عکس با مقادیر مقاومت بلوک گچی بر حسب کیلو اهم و مکش ماتریک خاک بر حسب بار دارد) ارتباط دارد، لذا از مکش ماتریک خاک به عنوان منغیر مستقل دیگری در مدل‌سازی استفاده شد تا بتوان تأثیر توأم شوری و مکش ماتریک را هم در روابط تصحیح میزان تصحیح رطوبت لحاظ نمود. با توجه به آنکه برای بلوک گچی مورد آزمایش، منحنی که رابطه بین مقاومت اندازه‌گیری شده و پتانسیل ماتریک خاک را نشان می‌دهد، موجود بود و قبلاً برای این خاک به دست آمده بود، لذا از این منحنی برای تعیین میزان مکش ماتریک خاک استفاده گردید. همچنین ارائه نتایج حاصل از آن بر میزان تصحیح رطوبتی، صرفاً برای بررسی تغییرات این متغیر در رطوبت‌های مختلف و بررسی تأثیر متقابل شوری و مکش ماتریک بر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط بلوک گچی بود، لیکن، در مرحله دوم انجام آزمایش، مکش ماتریک حذف شد و تأثیر مستقیم شوری بر اندازه‌گیری رطوبت بررسی گردید که در نهایت روابط کاربردی تری نیز استخراج شد.

در مدل مورد مطالعه، از روش داده‌های موجود<sup>۱</sup> (که همان داده‌های اندازه‌گیری شده توسط بلوک گچی و روش مستقیم حاصل از آزمایش است) استفاده شد که متغیرهای مستقل آن، شامل شوری خاک و مکش ماتریک، و متغیر وابسته نیز میزان اصلاح رطوبتی بر مقادیر اندازه‌گیری رطوبت توسط بلوک گچی در نظر گرفته شد. در این روش، داده‌های حاصله از آزمایش با در نظر گرفتن حدود بیشینه و کمینه به عنوان ورودی نرم‌افزار (Version Design (12.0, Stat-Ease, Minneapolis, MN 55413 Expert در نظر گرفته شد. پس از انتخاب روش داده‌های موجود برای انجام روش سطح پاسخ، مطابق رابطه زیر، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی شدند (Montgomery and Myers, 1995).

## معیارهای درستی تخمین مدل

برای ارزیابی مدل از آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی ( $\varepsilon$ )، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب باقیمانده جرم (CRM)، ضریب نش-ساتکلیف (NS)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا نرمال (NRMSE) و ضریب همبستگی (Correlation) استفاده گردید. روابط (۸) الی (۱۴) معادلات آماره‌های مذکور را نشان می‌دهند (Hoseini, 2024).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| \quad (10)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (11)$$

$$Correlation = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (12)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (13)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (14)$$

در روابط فوق،  $N$ : تعداد نمونه،  $P_i$ : مقادیر پیش‌بینی شده رطوبت در شوری‌های اعمال شده توسط مدل،  $Q_i$ : مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با بلوک در شوری مختلف،  $\bar{P}$ : میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل،  $\bar{Q}$ : میانگین مقادیر واقعی می‌باشد.

## نتایج و بحث

## قرائت بلوک گچی در خاک شور

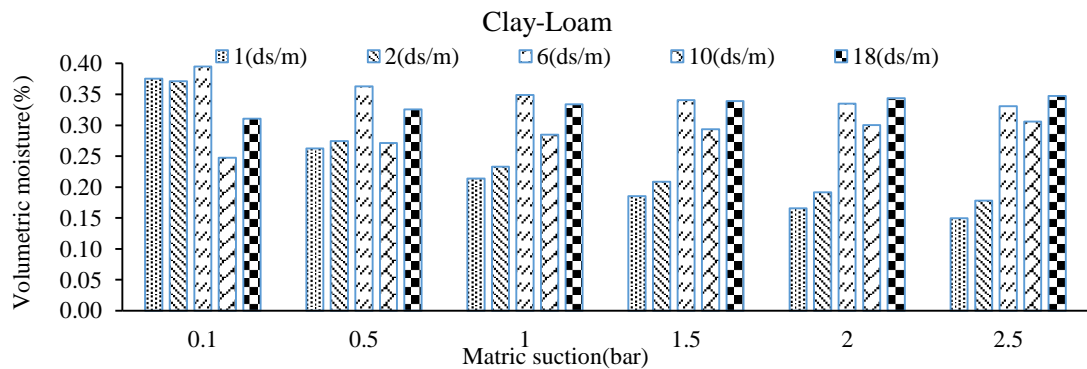
در میزان رطوبت به‌دست آمده در مکش‌های مختلف با استفاده از بلوک گچی بلوک گچی مدل ۲۵۹۱۰ در مقایسه با تیمار ۱  $dS m^{-1}$  به عنوان تیمار شاهد در اشکال ۱ تا ۳ نشان داده شده است. با توجه به روند تغییرات رطوبت در بافت‌های مختلف مشخص شد که تغییرات رطوبت در شوری‌های ۲ تا ۱۸  $dS m^{-1}$  در هر یک از بافت‌ها، متفاوت از تغییرات رطوبت در شوری ۱  $dS m^{-1}$  می‌باشد. لذا برای مقایسه تأثیر شوری بر قرائت بلوک گچی، بافت‌های

مختلف به صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفت. برای مقایسه تأثیر بافت بر تغییرات مکش رطوبتی در بافت‌های مختلف، تغییرات رطوبتی در بافت‌های مختلف در اشکال ۱ تا ۳ نشان داده شده است، همان‌طور که در این اشکال نشان داده شده است، با سنگین‌تر شدن بافت خاک در شوری ۱۸  $dS m^{-1}$  رطوبت نشان داده شده در مکش ماتریک یکسان، افزایش می‌یابد. اما میزان اختلاف مقادیر رطوبت نشان داده شده توسط بلوک گچی در بافت لوم - شنی در مقایسه با بافت لومی کم بوده و علت آن می‌تواند به دلیل تفاوت بافت‌های این دو نوع خاک از نظر میزان رس موجود در آن‌ها باشد. لذا تأثیر میزان رس در هنگام خشک‌شدن خاک شور در تعیین اختلاف رطوبت برآورد شده و واقعی، می‌تواند تعیین‌کننده باشد. این اثر با تحقیقات دکستر (Dexter, 2004)، هماهنگی دارد به عقیده ایشان اثر مقدار رس در منحنی رطوبتی خاک، بیش تر در مکش‌های ماتریک زیاد تأثیرگذار بوده و با افزایش مقدار رس قدرت نگهداری آب در خاک افزایش می‌یابد.

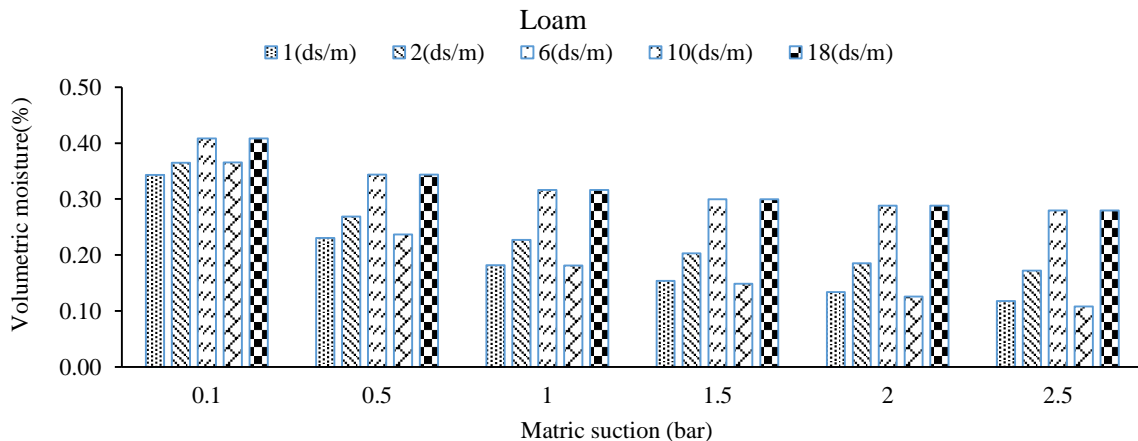
در کلیه تیمارهای بافت خاک، رطوبت نشان‌داده شده توسط بلوک گچی، تا شوری ۶  $dS m^{-1}$  در مکش‌های یکسان، یک روند افزایشی را نشان می‌دهد، ولی در شوری ۱۰  $dS m^{-1}$  رطوبت نشان‌داده شده توسط بلوک گچی، کم تر از رطوبت ۶  $dS m^{-1}$  می‌باشد. این اختلاف در بافت لومی و لوم-شنی وضوح بیشتری دارد و این برخلاف انتظار است، زیرا با افزایش شوری در خاک انتظار می‌رود در کلیه بافت‌ها اعداد قرائت شده در خاک‌های شورتر در رطوبت‌های یکسان، بیش تر باشد که علت آن می‌تواند تأثیر متفاوت غلظت‌های مختلف شوری بر مقاومت الکتریکی بلوک گچی باشد. البته، در شوری ۱۸  $dS m^{-1}$ ، مجدداً افزایش محتوای رطوبتی در مکش‌های یکسان در بافت‌های مختلف دیده می‌شود. روند افزایشی اعداد قرائت شده توسط بلوک گچی، در پژوهش‌های نیک‌روش و همکاران (Nikraves et al., 2013) نیز مشاهده شده است، نتایج تحقیق ایشان نشان داد که اندازه‌گیری رطوبت در خاک با شوری‌های ۲، ۴، ۶، ۸  $dS m^{-1}$  به ترتیب ۲۳، ۳۰، ۲۰، ۱۳ درصد بیش از تیمار ۱  $dS m^{-1}$  به دست می‌آید.

خاک‌ها در طول زمان بیش‌تری ثبت‌گردید و سپس بسته به شوری خاک با سرعت بیش‌تری کاهش رطوبت در این تیمارها مشاهده شد و این مسئله در شوری‌های ۱۰ - ۱۸  $\text{dS m}^{-1}$  مشهودتر بود. نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها در جدول ۳ نشان‌داده شده است همان‌طور که در این جدول مشخص است، نتایج اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها در مکش‌های مختلف، برای شوری‌های ۶ و ۱۸ دسی‌زیمنس بر متر برای خاک‌های با بافت سبک و متوسط به هم نزدیک می‌باشد و اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان نمی‌دهد. این موضوع در شوری‌های ۱، ۱۰، ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر هم برای خاک‌های لوم-شنی و لومی تکرار می‌گردد، با این توضیح که نزدیک شدن بافت خاک به بافت متوسط تفاوت در این گروه‌ها را کم‌تر می‌نماید. در بافت نسبتاً سنگین لوم - رسی تفاوت میانگین‌ها در گروه‌های ۱، ۲، ۱۸ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نمی‌باشد.

در تحقیق حاضر، میزان تغییرات رطوبت نشان داده شده توسط بلوک گچی نسبت به تیمار شاهد به طور میانگین و به ترتیب برای شوری‌های ۱۸، ۱۰، ۶، ۲  $\text{dS m}^{-1}$ ، برای خاک لوم رسی، ۱۰، ۳۰، ۱۸-، ۱۷ درصد و برای خاک لومی برابر، ۱۰، ۳۰، ۱۸-، ۱۷ درصد، ۲۷، ۳۱، ۲۰-، ۲۵ و برای خاک لوم شنی برابر، ۲۷، ۱۷، ۳۳-، ۳۵ درصد محاسبه گردید که از مقادیر تحقیق نیک روش و همکاران (Nikravesh *et al.*, 2013) بیش‌تر است. لذا به نظر می‌رسد روند یکسان و یکنواختی در رابطه با تأثیر شوری بر قرائت بلوک‌گچی در شوری‌های بیش از ۱۰  $\text{dS m}^{-1}$  نمی‌توان در نظر گرفت، و تأثیر شوری‌های بالا بر قرائت بلوک‌گچی می‌تواند به صورت سینوسی باشد. به طوریکه، برای خاک لوم-رسی، میزان افزایش در پدیده دیگر افزایش زمان ماندگاری بلوک‌گچی در خاک‌های شور برای ایجاد همسانی رطوبت بین خاک و بلوک‌گچی بود، به‌طوریکه در خاک‌های با شوری بیش‌تر در کلیه موارد، قرائت اشباع

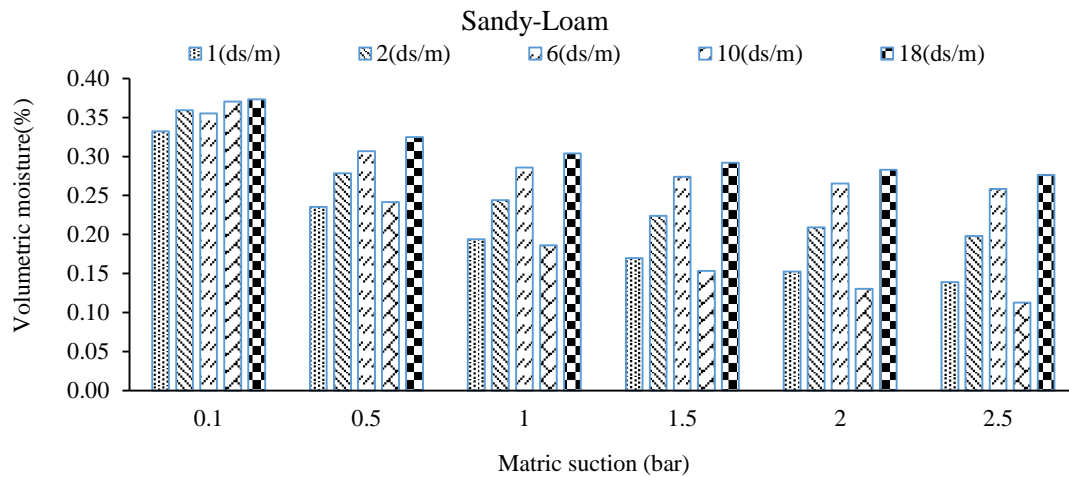


شکل ۱- میزان رطوبت خوانده شده در بلوک‌گچی در شوری‌های مختلف در خاک لوم-رسی در مقایسه با تیمار (دسی‌زیمنس بر متر)  
Figure 1. The amount of moisture read in the gypsum block at different salinities in loam-clay soil compared to 1 ( $\text{dS m}^{-1}$ ) treatment



شکل ۲- میزان رطوبت خوانده شده در بلوک‌گچی در شوری‌های مختلف در خاک لوم در مقایسه با تیمار (دسی‌زیمنس بر متر)  
Figure 2. The amount of moisture read in the gypsum block at different salinities in loam soil compared to 1 ( $\text{dS m}^{-1}$ ) treatment





شکل ۳- میزان رطوبت خوانده شده در بلوک گچی در شوری های مختلف در خاک لوم- شنی در مقایسه با تیمار ۱ (دسی زمینس بر متر) Figure 3. The amount of moisture read in the gypsum block at different salinities in Sandy-loam soil compared to 1 (dS m<sup>-1</sup>) treatment

جدول ۳- نتایج آزمون فیشر جهت مقایسه میانگین های منحنی رطوبتی خاک در بافت ها و شوری های مختلف

Table 3- The results of Fisher's test to compare the averages of the soil moisture curve in different textures and salinities

Clay- Loam			Loam			Sandy- Loam		
Salinity (dS m <sup>-1</sup> )	Mean	Fisher Test	Salinity (dS m <sup>-1</sup> )	Mean	Fisher Test	Salinity (dS m <sup>-1</sup> )	Mean	Fisher Test
6	0.36	A*	18	0.34	A	18	0.32	A
18	0.30	B	6	0.34	A	6	0.30	AB
2	0.28	B	2	0.27	B	2	0.28	BC
1	0.26	BC	10	0.24	B	10	0.24	CD
10	0.23	C	1	0.23	B	1	0.24	D

\*حروف مشابه نشان دهنده عدم معنی دار بودن تفاوت میانگین داده ها می باشد (سطح ۵٪)

\*Similar letters indicate the non-significance of the average data difference (5% level)

دقت بسیار خوبی برآورد شده است، به طوری که آزمون مقایسه‌ی میانگین‌ها که در جدول (۴) نشان داده شده است، در سطح اعتماد یک درصد برای کلیه بافت‌ها، معنی‌دار نگردید. همچنین با توجه به آن که مقدار اختلاف ضریب تبیین پیش‌بینی شده با ضریب تبیین اصلاح شده برای کلیه مدل‌ها، کمتر از ۰/۲ می‌باشد و مقادیر آن به واحد نزدیک است، که برای خاک لومی برابر ۰/۹۶ و برای خاک لوم رسی و لوم شنی برابر ۰/۹۴ محاسبه گردید. لذا این شاخص نیز نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌ها می‌باشد (Hosseini, 2023). با بهره‌گیری از نتایج طرح داده‌های موجود، و تجزیه رگرسیون این داده‌ها، آنالیز واریانس مدل استخراج شده و مقدار تصحیح رطوبت در بافت‌های مختلف، با توجه به متغیرهای شوری (dS m<sup>-1</sup>)

استخراج مدل پیش‌بینی تصحیح رطوبت به شوری به روش سطح پاسخ

آزمایش‌های سطح پاسخ براساس طرح داده‌های موجود<sup>۱</sup> که همان نتایج حاصل از آزمایش است، انجام شد و با مقایسه مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده، از میان مدل‌های مختلف، مدل مکعبی<sup>۲</sup> با پیش‌نهاد نرم‌افزار (با توجه به شاخص‌های آماری مطلوب، از جمله داشتن ریشه میانگین مربعات خطای کمتر، ضریب تبیین بالاتر و مجموع مربعات مانده پیش‌بینی مدل<sup>۳</sup> کم‌تر) نسبت به سایر مدل‌ها، برای پیش‌بینی مقدار تصحیح رطوبت در بافت‌های مختلف، انتخاب گردید. همانطور که در جدول (۳) مشخص است، نتایج تجزیه واریانس مدل مکعبی نشان داد که برای بافت‌های مختلف، میزان تصحیح رطوبتی با

3 -Predicted Residual Sum of Squares for the model

1 - Historical Data

2 - Quadratic

به‌طوری که مثلاً همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، در بافت لومی تأثیر توان سوم شوری در معادله نهایی به دلیل تأثیر ناچیز آن در نظر گرفته نشده است (Hosseini, 2023). استفاده از چندین متغیر تأثیر گذار برای رسیدن به دقت بیشتر در تخمین رابطه‌ی رگرسیونی با دقت مناسب، با پژوهش شیرازی و همکاران (Shirazi *et al.*, 2019) مطابقت دارد، ایشان نشان دادند که با افزایش متغیرهایی تأثیرگذار در تعیین مدل نهایی، نتایج از دقت بیشتر بر خوردار خواهند بود. باید در نظر داشت که، برای کلیه بافت‌ها، مدل‌ها از کفایت مطلوب برخوردار می‌باشند ولی میزان کفایت دقت مدل برای بافت لومی و لومی-شنی کاهش می‌یابد.

(A) و مکش ماتریک (bar) (B)، در جدول (۵) بیان شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، میزان کفایت دقت مدل در بافت لوم-رسی، بیش از سایر بافت‌ها بوده و برابر ۹۵ برآورد گردید، کفایت دقت، محدوده مقادیر پیش‌بینی در نقاط طراحی را با میانگین خطای پیش‌بینی مقایسه می‌کند. نسبت‌های بالاتر از ۱ نشان‌دهنده کفایت مدل‌ها است و درجه مقبولیت<sup>۱</sup> مناسب بیش از ۴ می‌باشد، مقدار کفایت دقت به‌دست آمده برای بافت لوم-رسی، بسیار بیش‌تر از ۴ می‌باشد که می‌تواند به دلیل در نظر گرفتن تأثیر متقابل متغیرهایی تأثیرگذار باشد، البته درجه آزادی مدل مذکور، کم‌تر از سایر بافت‌ها می‌باشد که علت تفاوت در درجه آزادی در بافت‌های مختلف در نظر گرفتن شاخص‌های مختلف تأثیر گذار در بافت‌های مختلف است

جدول ۴- شاخص‌های آماری مدل انتخاب شده تصحیح رطوبتی در بافت‌های مختلف

Table 4. Statistical indices of the selected model of moisture correction in different texture

Texture	Model	Predicted R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	P-value
Loam	Cubic	0.96	0.96	0.96	< 0.0001
Clay-Loam	Cubic	0.93	0.94	0.94	< 0.0001
Sandy-Loam	Cubic	0.93	0.94	0.94	< 0.0001

جدول ۵- آنالیز واریانس مدل انتخاب شده برای بافت‌های مختلف خاک

Table 5. Analysis of variance of the selected model for different soil textures

Texture	df	Sum of Squares	Mean Square	F-value	Adeq Precision	C.V
Loam	7	1.84	0.26	1144	91.6	16
Clay-Loam	5	2.46	0.49	992	95	38.5
Sandy-Loam	9	1.46	0.162	573	70.5	22.5

کرده و با عدد ثابت جمع جبری نمود تا مقدار تصحیح به دست آید. در نتایج نشان می‌دهد که به دلیل تغییر روند نمودارهای حاصل از آزمایشات و پایین افتادگی نمودار ستونی در شوری ۱۰ (dS m<sup>-1</sup>)، به نظر می‌رسد، استفاده از توابع با وجود دقت مناسب آن‌ها، از حساسیت بیشتر بر خوردار است. در پژوهشی که توسط قهرمان و همکاران (Ghahraman *et al.*, 2010) انجام شد، رابطه اصلاحی برای کلیه شوری‌ها وابسته به عدد قرائت شده بلوک گچی و هدایت الکتریکی خاک ارائه شده است و روند افزایشی قرائت در شوری‌های بیش از ۱۰ (dS m<sup>-1</sup>) نیز مشاهده می‌شود و در کلیه شوری‌های خاک، روند یکسانی را دارد.

#### برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش سطح پاسخ

همان‌طور که در جدول (۶) مشخص است، میزان تصحیح اعمال شده در رطوبت تعیین شده توسط بلوک گچی، وابسته به نوع بافت خاک، میزان شوری خاک و پتانسیل مکش خاک می‌باشد. با کم کردن اختلاف رطوبت به دست آمده از توابع ارائه شده در جدول از رطوبت قرائت شده با بلوک گچی، میزان رطوبت واقعی خاک در شوری مورد نظر به دست می‌آید. برای تعیین مقدار تصحیح رطوبتی می‌بایست ضرایب به دست آمده برای متغیرهایی مختلف آمده در مقدار شوری و مکش ماتریک و یا ترکیب آن‌ها ضرب

1 -Desirability

تری از هر یک از متغیرهایی مؤثر داشته باشد که با نتایج پنگ و همکاران (Peng *et al.*, 2022) همخوانی دارد، زیرا براساس پژوهش ایشان اثرات متقابل عوامل مؤثر بر میزان رطوبت اندازه‌گیری شده توسط سنجنده‌ها، می‌تواند به اندازه عوامل اصلی تأثیرگذار باشد.

با توجه به آنکه اندازه‌گیری مکش ماتریک خاک برای تعیین میزان اصلاح مورد نیاز در بلوک‌گچی ممکن است با دشواری‌هایی همراه باشد و لذا استفاده از روابط تصحیح اثر شوری را مشکل می‌سازد، ضرایب تصحیح اثر شوری، بدون در نظر گرفتن مکش ماتریک خاک محاسبه گردید و ضرایب معادله در جدول (۶) بیان شد. لازم به ذکر است که برای استفاده از مکش به عنوان عامل تأثیرگذار بر میزان اصلاح رطوبتی اندازه‌گیری‌های بلوک‌گچی و تعیین میزان آن، مجدد نرم افزار Designe Expert 11 با عامل شوری به عنوان تنها عامل، به کار گرفته شد و بررسی دقت نتایج نشان داد که اگرچه از نظر دقت به مقدار جزئی نسبت به حالت دو عاملی (یعنی شوری و محتوای آب) کمتر به دست می‌آید، لیکن از نظر شاخص‌های آماری نتایج بسیار دقیق بود که در جداول (۷) و (۸) ارائه شده است، نتایج نشان داد که با استفاده از میزان شوری به عنوان تنها عامل تأثیرگذار بر نتایج بلوک‌گچی، و نزدیکی نتایج مدل‌های تک عاملی و دو عاملی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش تک‌عاملی اگرچه از نظر دقت کمی کم‌تر از روش دو عاملی است، لیکن با توجه به سهولت اندازه‌گیری میزان شوری، می‌تواند روش کاربردی تری باشد. همچنین نتایج شاخص‌های عملکردی مدل در بافت‌های مختلف برای هر دو حالت در جداول (۸) و (۹) نشان داده شده است. همانطور که در این جداول مشخص است، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) برای خاک لوم-رسی در هر دو حالت، بهتر از مدل‌های مربوط به خاک‌های با بافت لومی و لوم شنی می‌باشد، همچنین در شاخص‌های میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب نش-ساتکلیف (Ns) و ضریب همبستگی، خاک با بافت لومی امتیاز بالاتری را به دست آورده است. اما با در نظر گرفتن کلیه شاخص‌های عملکردی مدل، می‌توان دقت مدل سطح پاسخ را به ترتیب مربوط به مدل‌های خاک لوم-رسی، لومی و لوم-شنی در نظر گرفت. همانطور که آماره‌ها نشان می‌دهند با توجه به اینکه ضریب نش-

همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، تأثیر هر یک از متغیرهای مؤثر بر میزان تصحیح رطوبتی، معنی‌دار می‌باشد. نتایج نشان داد که عامل شوری رابطه‌ی مثبت و معنی‌داری با میزان تصحیح رطوبتی در کلیه تیمارهای بافت خاک دارد و با توجه به ضریب تعیین شده برای این عامل در کلیه بافت‌ها، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر تصحیح رطوبتی می‌باشد که با نتایج نیک‌نژاد (Niknenjad, 2015) که شوری را به عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر حسگرهای رطوبتی معرفی می‌نماید، مطابقت دارد. همان‌طور که در جدول (۶) مشخص است، پس از شاخص شوری و شاخص توان دوم شوری، از نظر اثرگذاری بر میزان تصحیح شوری در مقام اول و دوم قرار می‌گیرد و پس از آن شاخص توان دوم مکش ماتریک قرار دارد و از آنجاکه علامت این دو متغیر منفی است، لذا با کاهش آن‌ها، میزان تصحیح رطوبتی در بافت‌ها، افزایش نشان می‌دهد.

در رابطه با عامل مکش ماتریک خاک و شاخص تأثیر گذاری این متغیر می‌توان گفت که تأثیر این متغیر در خاک با بافت لوم-رسی بیش از بافت‌های لومی و لوم-شنی می‌باشد، ولی در کلیه بافت‌ها، تأثیر این متغیر بر میزان تصحیح شوری، مثبت و معنی‌دار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مدل سطح پاسخ مقدار تصحیح رطوبت را برای بافت‌های مختلف، با دقت بسیار خوبی برآورد می‌کند. به طوری که با احتمال خطا<sup>۱</sup> برای کلیه بافت‌ها، کم‌تر از ۰/۰۰۱ برآورد گردید. با بررسی مدل‌های سطح پاسخ در بافت‌های مختلف مشاهده می‌شود که میزان اهمیت متغیرهایی تأثیرگذار در برآورد تصحیح رطوبتی در بافت لومی به ترتیب از شوری، توان دوم شوری، اثر متقابل شوری و مکش ماتریک، توان دوم مکش ماتریک شوری و مکش ماتریک، توان سوم شوری و مکش ماتریک کاهش می‌یابد. همچنین مطابق جدول (۶)، در بافت لوم-رسی، اهمیت متغیرهایی تأثیرگذار به ترتیب شوری، توان دوم شوری، مکش ماتریک، توان دوم مکش ماتریک و توان سوم شوری کاهش می‌یابد. در بافت لوم-شنی نیز ترتیب عوامل تأثیرگذار به صورت، شوری، توان دوم شوری، توان دوم مکش ماتریک، توان سوم شوری و مکش ماتریک، در نهایت توان سوم مکش ماتریک بود. لذا همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، اثر متقابل عوامل تأثیرگذار ممکن است، تأثیر بیش

داشته است، ولی همچنان در کلیه شاخص‌های آماری و در کلیه بافت‌ها دقت بالای مدل در برآورد مقدار تصحیح رطوبتی مشاهده می‌شود. در براساس یافته‌های این پژوهش، نتایج تصحیح رطوبتی در بافت سنگین‌تر، به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است که با نتایج پژوهش‌های لو و همکاران (Lu et al., 2018) مطابقت دارد. شکل (۴) نمودار یک به یک نتایج حاصل از مدل را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل دیده می‌شود، مدل به خوبی توانسته است مقدار تصحیح رطوبتی را بر اساس متغیرهای مؤثر پیش‌بینی نماید. همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، در کلیه مقادیر منفی مقدار تصحیح رطوبتی، مدل ارائه شده توسط سطح پاسخ کم برازشی داشته و برای مقادیر تصحیح رطوبتی در حدود  $0/1 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$  بیش برازش توسط مدل مشاهده می‌شود، لیکن مقادیر آن جزئی و در حد  $0/04 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$  می‌باشد. که علت آن می‌تواند به دلیل تأثیر سینوسی مقدار شوری بر معادله نهایی تصحیح شوری باشد.

ساتکلیف از منفی بی‌نهایت الی یک متغیر است. اگر مقدار آن برابر یک باشد تناسب کامل بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد و در واقع کارایی صد در صدی مدل را نشان می‌دهد و اگر بیش از  $0/75$  باشد نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف شده و اگر بین  $0/36$  -  $0/75$  باشد، نتایج شبیه‌سازی متوسط تا خوب و اگر کمتر از  $0/36$  باشد، نتایج ارزیابی ضعیف می‌باشد (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

در این پژوهش، همانطور که در جداول (۸) و (۹) نشان داده شده است، در کلیه تیمارهای بافت خاک و در حالت های تک متغیری (شوری خاک) و دو متغیری (شوری و مکش ماتریک خاک)، این آماره بیش از  $0/9$  می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل است. همچنین مقایسه شاخص‌های عملکردی مدل در حالتی که فقط میزان رطوبت به عنوان شاخص تأثیرگذار در نظر گرفته شود، مشخص می‌کند اگرچه در این حالت برای کلیه بافت‌ها به دلیل حذف یک عامل تأثیرگذار به مقدار جزئی کاهش

جدول ۶- ضرایب مدل پیشنهادی برای اصلاح رطوبت با دو متغیر شوری و مکش ماتریک در سه نوع بافت

Table 6- Coefficients of the proposed model for moisture correction with two variables of salinity and matric suction in three types of texture

Variables	Loam Texture	P-value	Clay-Loam Texture	P-value	Sandy-Loam Texture	P-value
Constant N	-0.265	< 0.0001	-0.38	< 0.0001	-0.1977	< 0.0001
A	0.189	< 0.0001	0.2483	< 0.0001	0.147	< 0.0001
B	0.0194	0.01	0.018	< 0.0001	0.0245	0.042
AB	-0.00177	< 0.0001	---	---	-0.0023	0.0036
A <sup>2</sup>	-0.0256	< 0.0001	-0.0338	< 0.0001	-0.02	< 0.0001
B <sup>2</sup>	-0.00125	< 0.0001	-0.00153	< 0.0001	-0.0031	< 0.0001
A <sup>2</sup> B	0.0001	< 0.0001	---	---	0.00014	< 0.0001
AB <sup>2</sup>	---	---	---	---	-0.000045	0.22
A <sup>3</sup>	0.0009	< 0.0001	0.0018	< 0.0001	0.00073	< 0.0001
B <sup>3</sup>	---	---	---	---	0.00021	0.05

A = salinity of saturated soil (dS. m<sup>-1</sup>r), B = matric suction (bar) ، B = مکش ماتریک (بار)

جدول ۷- ضرایب مدل پیشنهادی برای اصلاح رطوبت در بافت‌های مختلف فقط با در نظر گرفتن عامل شوری

Table 7- Coefficients of the proposed model for moisture correction only with consideration the salinity factor

Variables	Loam Texture	P-value	Clay-Loam Texture	P-value	Sandy-Loam Texture	P-value
Constant N	-0.215	< 0.0001	-0.034	< 0.0001	-0.14	< 0.0001
A	0.182	< 0.0001	0.24	< 0.0001	0.137	< 0.0001
A <sup>2</sup>	-0.025	< 0.0001	-0.033	< 0.0001	-0.019	< 0.0001
A <sup>3</sup>	0.0009	< 0.0001	0.0018	< 0.0001	0.00073	< 0.0001

A = شوری (دسی زیمنس بر متر) (dS. m<sup>-1</sup>r)

جدول ۸- شاخص‌های عملکردی مدل‌های اصلاح رطوبتی در بافت‌های مختلف با در نظر گرفتن عامل شوری و مکش ماتریک  
Table 8- Performance indicators of moisture correction models in different texture, taking into account salinity factor and matric suction

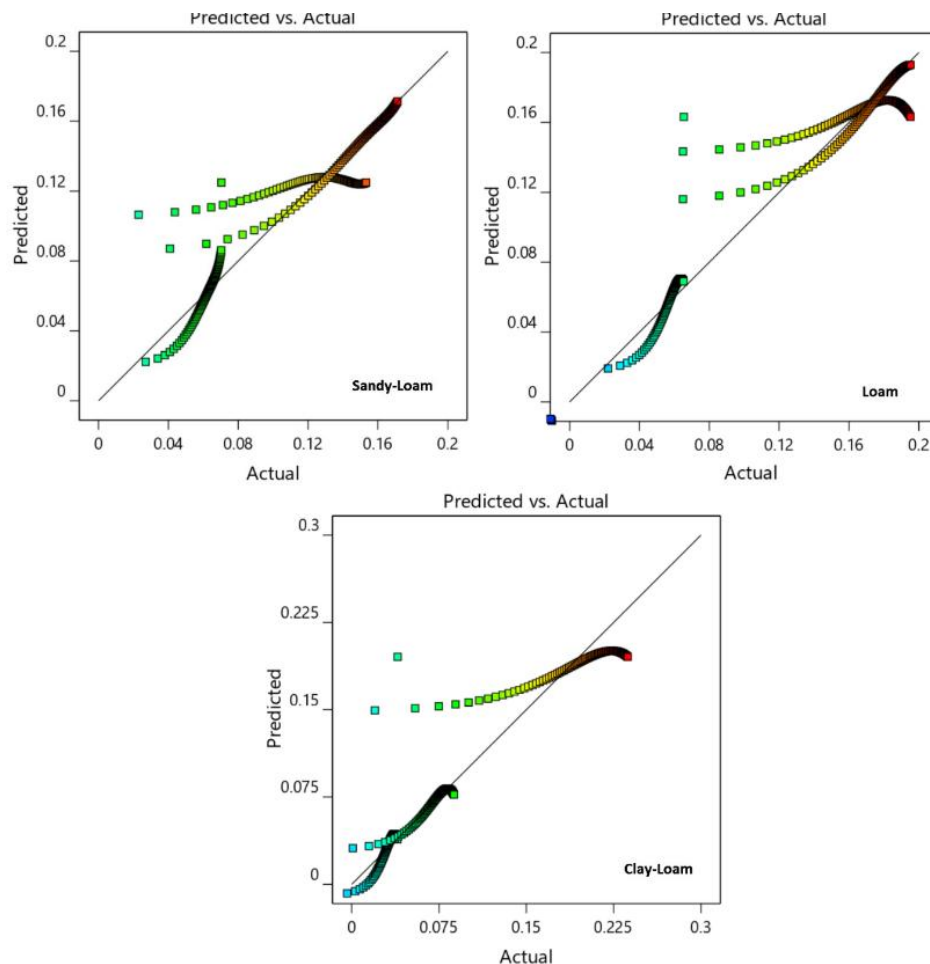
Texture	Correlation (r)	NS	CRM	RMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	NRMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	MAE (%)	ε (%)
Loam	0.98	0.96	0.01	0.015	15.3	0.01	125.6
Clay-Loam	0.97	0.94	0.052	0.022	14.1	0.013	36.9
Sandy-Loam	0.97	0.93	0.015	0.017	19.7	0.011	46.5

RMSE: ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، ε: درصد خطای نسبی، MAE: میانگین خطای مطلق، CRM: ضریب باقیمانده جرم، NS: ضریب نش-ساتکلیف، NRMSE: ریشه‌ی میانگین مربعات خطا نرمال و Correlation: ضریب همبستگی می‌باشد.

RMSE: root mean square error, ε: relative error percentage, MAE: mean absolute error, CRM: mass residual coefficient, NS: Nash-Sutcliffe coefficient, NRMSE: normal root mean square error and Correlation: correlation coefficient.

جدول ۹- شاخص‌های عملکردی مدل‌ها فقط با در نظر گرفتن عامل شوری  
Table 9- performance indicators of models only considering the salinity factor

Texture	Correlation (r)	NS	CRM	RMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	NRMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	MAE (%)	ε (%)
Loam	0.96	0.92	0.15	0.021	0.0004	0.014	75
Clay-Loam	0.96	0.91	0.12	0.026	0.0007	0.016	57.1
Sandy-Loam	0.95	0.9	0.09	0.022	0.0005	0.16	47.3

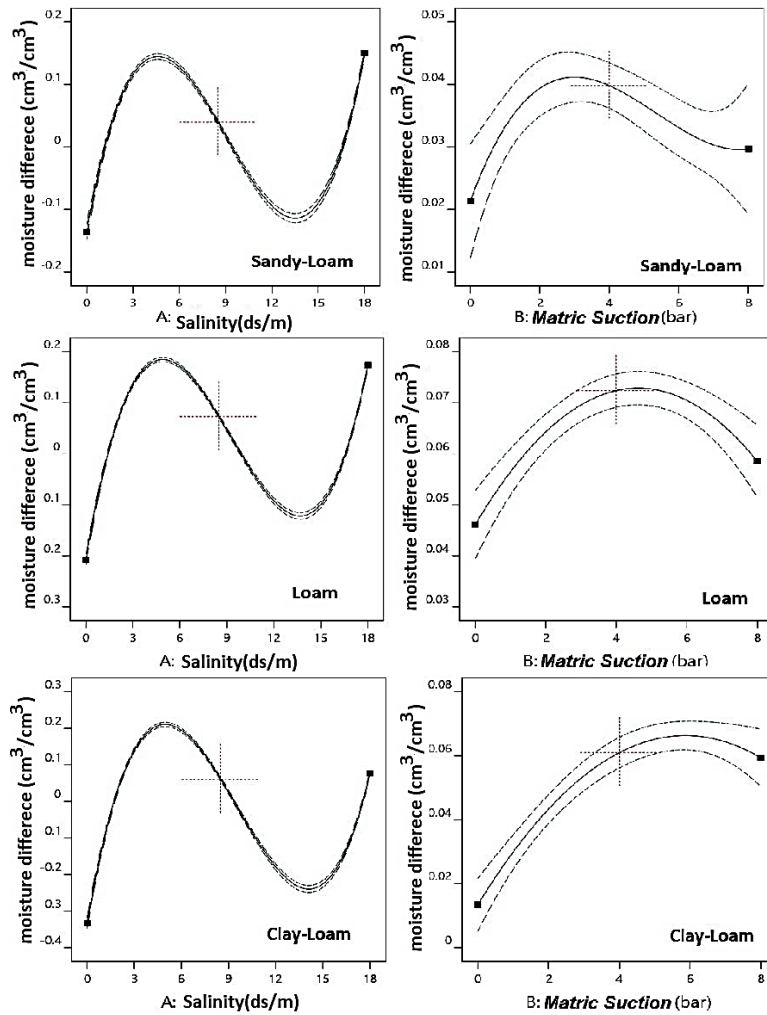


شکل ۴- نمودار مقادیر اصلاح رطوبتی به دست آمده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده  
Figure 4. Diagram of moisture correction values obtained by the model and measured values

حجمی افزایش نشان می‌دهد. همچنین، شاینبرگ و همکاران (Shainberg *et al.*, 1971) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند، ایشان بیان کردند که مقدار تورم رس‌ها و قدرت نگهداری رطوبت در خاک‌ها، می‌تواند تابعی از مقدار ESP آن‌ها باشد و با افزایش مقدار ESP افزایش داشته باشد.

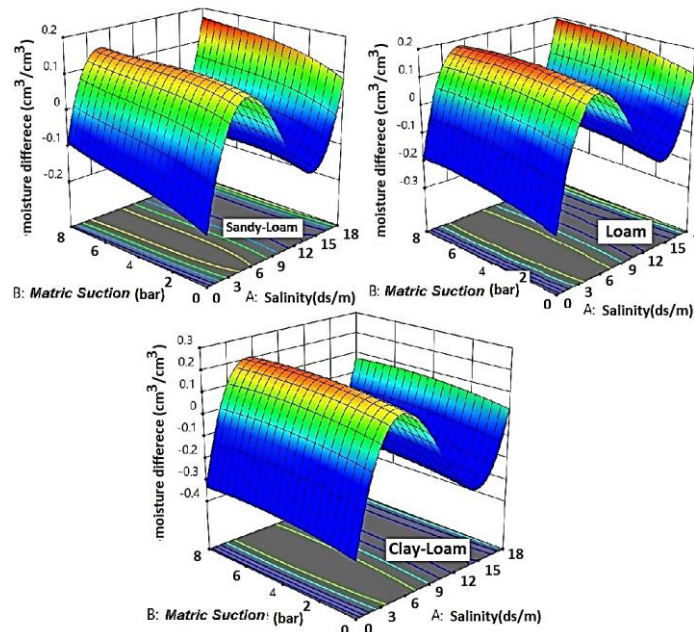
از نظر شاخص مکش رطوبتی، در همه بافت‌ها یک روند افزایشی و سپس کاهش دیده می‌شود، به‌طوری‌که برای بافت لوم-شنی، روند افزایشی تا مکش ۲/۵ (bar) دیده شده و سپس روند کاهش آن تا مکش ۸ (bar) دیده می‌شود. برای خاک‌های با بافت لومی و لوم-رسی نیز، روند افزایشی تا مکش ۴ (bar) دیده می‌شود که بیش‌تر از بافت لوم-شنی است، این موضوع می‌تواند به‌دلیل قدرت نگه‌داری رطوبت در خاک‌های با بافت سنگین‌تر باشد که با پژوهش‌های وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2019) مطابقت نشان می‌دهد. در پژوهش ایشان تأثیر مقادیر رس بر مکش ماتریک خاک در محتوای رطوبتی یکسان مورد مطالعه قرارگرفت و تأثیر مثبت و معنی‌دار آن بر افزایش مقادیر رطوبتی قرائت شده نشان داده شد. در شکل (۶) سطوح پاسخ سه بعدی متغیرهای مؤثر بر مقدار تصحیح رطوبتی نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، در کلیه بافت‌ها، مقدار تصحیح رطوبتی نسبت به متغیرهای شوری خاک و میزان مکش ماتریک خاک، دارای یک خط بیشینه و یک خط کمینه است که به‌ترتیب در شوری‌های ۳/۵ و ۱۵ (dS m<sup>-1</sup>) دیده می‌شود. پس از یافتن مدل‌های برآورد تصحیح رطوبتی در بافت‌های مختلف، برای یافتن نقطه مطلوب که همان کم‌ترین میزان تصحیح رطوبتی در دامنه تغییرات عوامل مؤثر می‌باشد، در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار Design Expert (Version 12.0, Stat-Ease, Minneapolis, MN 55413) حداقل تصحیح رطوبتی به عنوان توابع هدف به نرم‌افزار معرفی گردید و شرایط به‌صورتی در نظر گرفته شد که کم‌ترین تصحیح رطوبتی را با فرض بیشینه عوامل تأثیرگذار در دامنه تغییرات آن، تعیین نماید، لذا با در نظر گرفتن فرضیات فوق اهداف مطلوب با درجه مقبولیت‌های مختلف برای همه بافت‌ها، محاسبه گردید که مشخصات نقاط هدف مطابق جدول (۱۰) می‌باشد.

شکل (۵) تأثیر هر یک از متغیرهای مؤثر را به صورت مجزا بر مقدار تصحیح رطوبتی در بافت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، تأثیر عوامل مؤثر بر مقدار تصحیح رطوبتی، یکسان نبوده و برای عامل شوری تأثیر این شاخص به صورت سینوسی می‌باشد. به طوری که تا شوری ۴ (dS m<sup>-1</sup>)، تأثیر مثبت و افزایشی بر میزان تصحیح رطوبتی دارد و سپس تا ۱۵ (dS m<sup>-1</sup>)، تأثیر آن منفی و کاهش می‌شود و پس از آن، مجدداً افزایشی می‌شود و این روند تقریباً برای همه بافت‌ها تکرار می‌گردد. همانطور که در اشکال (۱)، (۲) و (۳) مشخص است، مقادیر اندازه‌گیری شده برای تیمار شاهد در همه بافت‌ها، میزان رطوبت کاهش یافته و از روند سینوسی برخوردار نمی‌باشد. طبق نظر جلالی (Jalali, 2008)، خطر تخریبی سدیم در خاک‌های منیزیمی و یا در صورت استفاده از آب‌های با Mg بالا افزایش پیدا می‌کند. به این ترتیب که در یک SAR مشخص، آبیاری با آبی که درصد Ca/Mg کمتری دارد موجب می‌شود که خاک با افزایش غلظت سدیم در محلول تبدلی شده و خطر پراکنش ذرات خاک افزایش یابد. از آنجاکه در آزمایش انجام شده مقدار SAR حدود ۵ بوده و طبق طبقه‌بندی ویل کاکس آب آزمایش، جزو آب‌های با طبقه C<sub>1</sub>S<sub>1</sub> و آب‌های خیلی خوب طبقه‌بندی می‌شود و همچنین با توجه به آنکه نسبت Ca/Mg نزدیک به ۱ می‌باشد، لذا امکان تأثیر منفی آب بر ساختمان خاک در آزمایش انجام شده ناچیز می‌باشد. مسئله در تحقیقات گنکالوز و همکاران (Goncalves *et al.*, 2010) نشان داده شده است، ایشان، نشان دادند که حضور یون سدیم در آب شور، منجر به افزایش منافذ ریز خاک و همچنین افزایش تخلخل غیرمؤثر آن شد، که در نتیجه آن، افزایش ظرفیت نگه‌داری آب در خاک را در پی دارد. البته در آزمایش انجام شده ممکن است تأثیر متقابل یون‌های سدیم و کلسیم موجود در نمک بکار رفته در نهایت سبب پراکنش ذرات خاک و افزایش ظرفیت نگهداری خاک به دلیل تغییر ساختار آن شده باشد. این موضوع در تحقیق آشتیانی و همکاران (Ashtiani *et al.*, 2010) نیز بیان شده است، ایشان در خصوص اثرات کیفیت آب آبیاری بر منحنی رطوبتی خاک، به این نتیجه رسیدند که به طور میانگین میزان آب قابل استفاده در خاک‌های تحت آبیاری با آب دارای املاح در مقایسه با آب معمولی در حدود چهار درصد



شکل ۵- تأثیر شوری و مکش ماتریک خاک بر تصحیح رطوبتی با توجه به بافت خاک

Figure 5- The effect of salinity and soil matric suction on moisture correction according to soil texture



شکل ۶- سطوح پاسخ مقدار تصحیح رطوبتی بر اساس متغیرهای شوری و مکش ماتریک

Figure 6. The response levels of moisture correction value based on salinity and matric suction variables

مقبولیت ۰/۹۴ قرار می‌گیرند. لذا با توجه به آن که مدل پیش‌بینی مقدار تصحیح رطوبتی برای بافت لوم-رسی نسبت به سایر بافت‌ها از دقت بیشتری برخوردار است، در این مرحله نیز، نقطه هدف را با درجه مقبولیت بالاتری نسبت به سایر بافت‌ها برآورد نموده است که با پژوهش حسینی (Hosseini, 2021) مطابقت دارد.

همان طور که نتایج نشان می‌دهد، برای بافت لوم-رسی در بیشینه مقادیر شوری و مکش ماتریک، می‌توان کمترین اصلاح رطوبتی را با درجه مقبولیت ۱ به دست آورد و این به معنای آن است که اگر هدف محاسبه کمترین اصلاح رطوبتی در بیشینه مقادیر شوری و مکش ماتریک باشد، با احتمال زیاد، می‌توان به آن دست یافت. پس از آن بافت لومی با درجه مقبولیت ۰/۹۶ و بافت لوم-شنی با درجه

جدول ۱۰- نقاط بهینه عملکرد مدل در بافت‌های مختلف  
Table 10. Optimum points of model performance in different texture

Texture	Salinity (ds.m <sup>-1</sup> )	Matric suction(bar)	Volumetric moisture difference	Desirability
Loam	16.23	8	-0.021	0.96
Clay-Loam	18	8	0.075	1
Sandy-Loam	15.76	8	-0.049	0.949

مختلف آن‌ها، متفاوت می‌باشد و با توجه به اینکه با در نظر گرفتن متغیر شوری به عنوان تنها متغیر مؤثر بر میزان اصلاح رطوبتی نیز نتایج دقیقی در پی داشت، لذا می‌توان رابطه اصلاح رطوبتی را به تابع تک متغیری و صرفاً بر اساس شوری خاک، کاهش داده و مورد استفاده قرارداد.

#### سپاسگزاری

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی طی قرارداد پژوهشی شماره ۴۰۱/د/۹/۲۲۱۲۸ تهیه شده است و به این وسیله از آن معاونت قدردانی می‌شود.

#### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، در همهی بافت‌های خاک، مدل سطح پاسخ قادر به برآورد میزان تصحیح رطوبتی در شوری‌ها و مکش‌های ماتریک مختلف می‌باشد و اختلاف مقادیر پیش‌بینی و مقادیر تعیین شده از مدل در سطح یک درصد معنی‌دار نمی‌باشد. همچنین میزان تأثیر شوری و مکش و اثر متقابل آن‌ها در بافت‌های مختلف به شکل یکسان نبوده، اما مدل سطح پاسخ قادر به تعیین مهم‌ترین متغیرهایی مؤثر بر میزان تصحیح رطوبتی می‌باشد و تابع مکعبی را بر اساس متغیرهایی مؤثر به عنوان بهترین تابع تعیین می‌نماید. مدل سطح پاسخ در این پژوهش با داشتن ضریب تبیین و اصلاح شده بالا در بافت‌های مختلف، از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند میزان تصحیح رطوبتی را در بافت‌های مختلف، به خوبی محاسبه نماید. تأثیر متغیر شوری بر مقادیر تصحیح رطوبتی به صورت سینوسی بوده و تأثیر متغیر مکش ماتریک بر مقادیر تصحیح رطوبتی به صورت تابع درجه دوم است. همچنین تأثیر متقابل این عوامل بر مقادیر تصحیح رطوبتی در توابع نهایی دیده شد که اثر آن‌ها در پاره‌ای موارد، مانند خاک لوم-رسی، بیش از تأثیر هر یک از متغیرهای به صورت مجزا بود. این موضوع نشان می‌دهد که در واسنجی ابزارهای اندازه‌گیری رطوبت در خاک مانند بلوک‌گچی، نیاز است که در توابع اصلاحی، تأثیر متقابل این عوامل نیز مورد نظر قرارگیرد و در برآورد تابع اصلاحی لحاظ گردد. از آنجا که روش سطح پاسخ نشان داد که تأثیر متغیرهایی مؤثر بر بلوک‌گچی در دامنه‌های



## References

- Ajayi A. S., Eleta P. O., Duweni E. C., Ehiomoge P. 2019. Fabrication and Testing of Gypsum Blocks for Soil Moisture Determination: *Journal of Natural Sciences Research*, 9: 2225-0921
- Asadzadeh F., Fegh-Hassan-Agha M., Khodaverdiloo H. 2016. Modeling of the effect of rock fragment cover and sizes on the sediment concentration using response surface method. *Applied Soil Research*. 3(1): 25-38.
- Ashtiani S. M., Parsinjad M., Abbasi A. 2010. The effect of use urban wastewater in the irrigation of Sorghum on some physical properties of the soil. *Journal of Soil Research, Soil and Water Sciences*, 25(3): 242-253. (In Persian)
- ASTM D 2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water(Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, 430p.
- Box G.E.P., Wilson K.B. 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. 13(1):1-45.
- Bouyoucos G.J., Mick A.H. 1948. A comparison of electric resistance units for making a continuous measurement of soil moisture under field conditions. *Plant Physiology*. Pp. 532-543.
- Bouyoucos G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5): 464-465.
- Chow L., Xing Z., Rees H., Meng F., Monteith J., Stevens L. 2009. Field Performance of Nine Soil Water Content Sensors on a Sandy Loam Soil in New Brunswick, Maritime Region, Canada, *Sensors*,9(93): 98-9413.
- Dexter A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201-214.
- Evelt S.R., Tolck J.A., Howell, T.A. 2006. Soil profile water content determination: Sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence and precision. *Vadose Zone J.* 5: 894-907.
- Fu M. C. 2015. Handbook of Simulation Optimization. Vol. 216. New York: Springer.
- Ghahraman B., Davari K., Astarai A.R., Majidi M., Temski S. 2010. The possibility of correcting the effects of salinity on the reading of Gypsum block in measuring soil moisture. *Water and soil*, 23(1): 69-74. (In Persian)
- Goncalves R., Gloaguen T., Folegatti M., Libardi P., Lucas Y., Montes C. 2010. Pore size distribution in soils irrigated with sodic water and wastewater. *R. Bras. Ci. Solo*, 34: 701-707.
- Hosseini Y. 2021. Application of the response surface method in optimizing the mixing ratio of soil with sawdust in different soil moisture treatments in greenhouse cucumber cultivation, *water research in agriculture*. 35(3): 303-321. (In Persian)
- Hosseini Y. 2023. The effect of moisture and salinity stress on the morphological characteristics of the root and the performance of French tomato and determining the optimal point of performance using the response surface method. *Water and irrigation*. 51(3): 211-233. (In Persian)
- Hoseini Y. 2024. Evaluation of Geostatistical and Response Surface Methods for Estimating Soil Saturated Hydraulic Conductivity Using Soil Physical Properties. *Applied Soil Research*, 11(4): 63-76.
- Hignett C., Evelt S.R. 2008. Direct and surrogate measures of soil water content. In *Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation, and Sensor Technology*; Evelt, S.R., Heng, L.K., Moutonnet, P., Nguyen, M.L., Eds.; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, Chapter 1, pp. 1-22.
- Karami H.R., Keyhani M., Mowla D. 2016. Experimental analysis of drag reduction in the pipelines with response surface methodology. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 138: 104-112.
- Jalali, M. 2008. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*. 145: 207-215.
- Loeppert R.H., Sparks D.L. 1996. Carbonate and gypsum. p. 437-474. In: D.L. Sparks (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3 chemical methods*. SSSA, Madison, WI.
- Lu Y., Horton R., Ren T. 2018. Simultaneous determination of soil bulk density and water content: a heat pulse-based method. *Eur. J. Soil Sci.* 69 (5): 947-952.
- Moradi D. 2022. *Comprehensive Manual for Soil Mechanics Laboratory, Soil Engineering and Geotechnics*. 396 p. (In Persian)
- Mazaheri M.R., Mahmoodabadi M. 2012. Study on infiltration rate based on primary particle size distribution data in arid and semiarid region soils. *Arab J Geosci* 5: 1039-1046.

- Montgomery D.C., Myers R.H. 1995. "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", Raymond H. Meyers and Douglas C. Montgomery, A Wiley-Inter Science Publications. 1204p.
- Moriassi D.N., Arnold, J.G., Vanliew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50: 885-900.
- Nikravesh A., Moazed H., Broumandnasab S., Naseri A. 2013. The effect of irrigation water salinity with constant turbidity on soil moisture characteristic curve. *Journal of water and soil*, 27(4): 763-768. (In Persian)
- Niknenjad D. 2015. The effect of salinity on the amount of moisture measured by TDR method in different soil textures, National Conference of Knowledge and Technology of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran, Tehran. (In Persian)
- Peng W., Lu Y.L., Ren T.S., Horton R. 2021. Application of infinite line source and cylindrical-perfect-conductor theories to heat pulse measurements with large sensors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 (3): 94–99.
- Peng W., Lu Y., Wang M., Ren T., Horton. 2022. Determining water content and bulk density: The heat-pulse method outperforms the thermo-TDR method in high-salinity soils, *Geoderma*, 407:55-64.
- Rasheed M.W., Tang J., Sarwar A., Shah S., Saddique N., Khan M.U. 2022. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 14: 11-53.
- Rhoades J.D, Manteghi N.A, Shouse P.J, Alves W.J. 1989. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 433–439.
- Shainberg I., Bresler E., Klausner Y. 1971. Studies on Na/Ca montmorillonite systems. I. The swelling pressure. *Soil Sci.* 111: 214-219.
- Shirazi M., Khademorasoul A., Safieddine-Ardabili, S.M. 2019. Evaluation and optimization of the effects of soil salinity (EC) on soil erosive properties using response surface methodology. 16th Iranian Soil Science Congress, Zanjan. (In Persian)
- Vories E., Sudduth K. 2021. Determining Sensor-based field capacity for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 250:12-25.
- Sun Z.J., Young G.D., McFarlane R., Chambers B.M. 2000. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time domain- reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science*. 8: 21-29.
- Wang Y., Lu Y., Horton R., Ren T. 2019. Specific heat capacity of soil solids: Influences of clay content, organic matter and tightly bound water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 83 (4):65-78.
- White I., Knight J.H., Zegelin S.J., Topp G.C. 1994. Comments on 'Consideration on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content' by W.R. Whaley. *Euro. J. Soil Sci.* 45: 503-508.