

Explanation of the Weighting Factor for Salinity Constraint in the Integral Water Capacity Concept (IWC)

ZAHRA ASADI^{1*}, MOHAMMAD HOSEIN MOHAMMADI¹, MEHDI SHORAFI¹, MOHSEN FARAHBAKHSH¹

1. Department of Soil Science., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Feb. 1, 2020- Revised: Apr. 25, 2020- Accepted: May, 3, 2020)

ABSTRACT

The purpose of this study is to present a weighting factor for considering limitation of salinity on plant water uptake (ω_{si}) for the concept of Integral Water Capacity (IWC). The experiment was conducted under greenhouse conditions and included corn planting in two soil types, three salinity levels (1.5, 4, and 8 dS m⁻¹), and three replications. After the plants were fully established, all pots were continuously irrigated with a specific salinity. The transpiration values were obtained from the weight differences of pots considering water mass balance components at different times. Cumulative transpiration was calculated at each time step and they were plotted against the drainage water salinity at the same time. Then, using the numerical derivative of the cumulative transpiration curves, the transpiration intensity curve was calculated. By fitting a logarithmic model and their relativization, the effect of salinity constraint on the transpiration was calculated and a new salinity weighting coefficient was proposed. The results of ω_{si} showed that the relative water uptake decreased logarithmically with increasing salinity and the salinity tolerance of corn varied in soils with different properties and a constant value cannot be reported as salinity tolerance.

Keywords: Water Uptake, Salinity Stress, Available Water, Corn.

تیین ضریب وزنی برای محدودیت شوری در مفهوم گنجایش جمعی آب (IWC)

زهرا اسدی^{۱*}، محمدحسین محمدی^۱، مهدی شرفا^۱، محسن فرحبخش^۱

۱. گروه مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۱۴)

چکیده

هدف از این پژوهش، ارائه یک ضریب وزنی جهت لحاظ کردن محدودیت شوری در جذب آب توسط گیاه (osi) برای مفهوم گنجایش جمعی آب خاک (IWC) می باشد. این آزمایش در شرایط گلخانه و شامل کشت گیاه ذرت در دو نوع خاک، سه سطح شوری (۱/۵، ۴ و ۸ دسی زیمنس بر متر) و سه تکرار می باشد. پس از استقرار کامل گیاهان، همه گلدان ها با شوری مشخص به طور پیوسته آبیاری شدند. مقادیر تعرق، از اختلاف مقادیر آبیاری، وزن گلدان ها و مقادیر آب زهکشی شده در زمان های مختلف به دست آمد. تعرق تجمعی در هر زمان محاسبه و در برابر شوری آب زهکشی در همان زمان ترسیم شد. سپس با استفاده از مشتق عددی منحنی های تعرق تجمعی، منحنی شدت تعرق به دست آمد. با برازش یک مدل لگاریتمی و نسبی سازی آن ها، تأثیر محدودیت شوری بر تعرق محاسبه و به عنوان یک ضریب وزنی جدید شوری پیشنهاد شد. نتایج حاصل از osi به دست آمده نشان داد که جذب آب نسبی با افزایش شوری به صورت لگاریتمی کاهش می یابد و حدود تحمل به شوری گیاه ذرت در خاک های با خصوصیات مختلف، متفاوت است و نمی توان یک مقدار ثابت را به عنوان حد تحمل به شوری گزارش نمود.

واژه های کلیدی: جذب آب، تنش شوری، آب قابل استفاده، ذرت.

مقدمه

ایران با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۰۰ میلی متر در شرایط اقلیمی خشک می باشد. در حال حاضر اکثر خاک های مناطق خشک و نیمه خشک ایران به نحوی تحت تأثیر شوری می باشند شوری و تنش حاصل از آن یکی از مهم ترین و رایج ترین تنش های محیطی است که تولید محصولات کشاورزی را در کشور ما با محدودیت مواجه ساخته است (Taghizadeh ghassab et al., 2017). بنابراین، نه تنها مدیریت و برنامه ریزی استفاده از آب های شیرین در فعالیت های کشاورزی بسیار حائز اهمیت است، بلکه باید از آب های شور و لب شور با کیفیت پایین نیز به عنوان منابع آب بالقوه برای محصولات کشاورزی در نظر گرفته شود (Jalali et al., 2017).

به منظور برآورد مقدار آب قابل استفاده واقعی گیاه، مفهوم گنجایش جمعی آب^۱ (IWC) را پیشنهاد شد (Gronovelt et al., 2001). این روش ترکیبی از تابع های محدودیت فیزیکی شامل: بررسی محدودیت های زهکشی، تهویه، مقاومت به نفوذ ریشه و هدایت هیدرولیکی می باشد. معادله کلی IWC به صورت زیر می باشد (رابطه ۱):

(رابطه ۱)

$$IWC = \int_0^{\infty} \{ \prod_{i=1}^n \omega_i(h) \} C(h) dh$$

$C(h) = d\theta/dh$ گنجایش ویژه رطوبتی (cm^{-1}) و برابر با

شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک بوده و ω_i ، توابع وزنی (۰ تا ۱) برای انواع محدودیت های فیزیکی در جذب آب از i تا n ، h مکش ماتریک (cm) و Π نشان دهنده این است که توابع وزنی مورد نظر ضرب پذیرند.

در مفهوم اولیه IWC پیشنهادی، تأثیر تنش شوری خاک دخالت داده نشده است. در حالی که در حضور غشا نیمه تراوا مانند غشاء سلول های ریشه، پتانسیل اسمزی به میزان بالایی انرژی و جذب آب را تحت تأثیر قرار می دهد. برای دخیل نمودن شوری خاک در جذب آب، مفهوم IWC را با به کار بردن اثر پتانسیل اسمزی بر آب قابل استفاده واقعی گیاه اصلاح کردند (Gronovelt et al., 2004). تمام قدرت اسمزی خودشان را به کار می برند (ضریب انعکاس غشاء را برابر با یک فرض نمودند $\sigma=1$) و سپس یک تابع وزنی شوری (ω_s) برای بیان تنش شوری پیشنهاد کردند که همانند دیگر ضرایب وزنی IWC، یک تابع تجربی است. بنابراین، این مدل ممکن است در پیش بینی تأثیر تنش شوری در همه خاک ها و گیاهان مفید نباشد. علاوه بر این (Gronovelt et al., 2004) تأثیر زهکشی روی تابع وزنی شوری را نادیده گرفتند. شوری حاکم بر محیط ریشه به طور همزمان تحت تأثیر زهکشی و تبخیر و تعرق

برخوردار می‌باشد. اخیراً (2018) Mohammadi and Khattar یک روش عددی برای تبیین و برآورد شوری خاک و در نتیجه ضریب وزنی شوری (ω_s) پیشنهاد نمودند. این روش با وجود اساس فیزیکی و عدم نواقص‌های مدل پیشنهادی (Grant and Groenevelt, 2019) تاکنون مورد ارزیابی و مقایسه با داده‌های تجربی قرار نگرفته است.

بنابراین هدف از این پژوهش بررسی کمی تأثیر شوری بر شدت تعرق نسبی برای گیاه ذرت جهت مدل سازی تابع محدودیت شوری، بررسی جذب آب توسط گیاه ذرت در دو خاک با جرم مخصوص ظاهری مختلف و پیشنهاد یک روش جدید برای تبیین محدودیت شوری در مفهوم IWC می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ابتدا دو خاک با بافت مشابه و جرم مخصوص ظاهری متفاوت از لایه سطحی (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) دو مزرعه تهیه شد. بعد از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه و هوا خشک کردن، بخشی از نمونه‌ها کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به روش‌های مرسوم آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (Ali Ehyae and Behbahanizadeh, 1993). و مقدار K_s توسط نرم‌افزار RETC برآورد شد (جدول ۱).

است. تبخیر و تعرق، غلظت املاح در آب خاک را از طریق کاهش میزان آب افزایش می‌دهد؛ درحالی که زهکشی تنها حجم آب را کاهش می‌دهد و به طور غیرمستقیم تنش شوری را تقویت می‌کند. مدل پیشنهادی (2004) Gronovelt et al. بر اساس یک رابطه مستقیم بین مکش ماتریک خاک و شوری است. این رابطه ممکن است در پیش‌بینی شوری برای خاک‌های خشک و نیز خاک‌های نزدیک به اشباع نامناسب باشد (Mohammadi and Khattar, 2018). همچنین مکش ماتریک و اسمزی، اثر متقابل بر هم داشته و در دامنه‌های رطوبتی مختلف می‌توانند اثر هم دیگر را تشدید کرده و یا کاهش دهند. بنابراین در ضریب شوری (2004) Gronovelt et al. مکش ماتریک و اسمزی به صورت مدل ضرب‌پذیر و وابسته به هم آورده شده‌اند؛ در صورتی که جهت اعمال مدیریت بهینه علاوه بر بررسی اثر متقابل این دو پارامتر، بررسی هر کدام به تنهایی نیز ضروری است.

Grant and Groenevelt (2019) تابع وزنی شوری (ω_s) ارائه شده توسط (2004) Gronovelt et al. را برای خاک‌های خشک اصلاح کردند و یک ω_s جدیدی را ارائه دادند اما نواقصی از قبیل تجربی بودن ω_s و نادیده گرفتن اثر زهکشی روی آن همچنان وجود دارد. این در حالی است که (2018) Reynolds و (2019) Reynolds نشان دادند که زهکشی در تعریف ظرفیت زراعی (FC) و تعیین آب قابل استفاده گیاه از اهمیت بسیار بالایی

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده دو خاک مورد مطالعه

ویژگی	واحد	خاک ۱	خاک ۲
اسیدیته	-	۸	۷/۸
کربنات کلسیم معادل	%	۴	۴/۱۹
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع	دسی‌زیمنس بر متر	۰/۳	۰/۴
رس	%	۱۰	۹
سیلت	%	۲۲	۱۹
شن (۲-۰/۰۲ میلی‌متر)	%	۶۸	۷۲
بافت خاک		لوم شنی	لوم شنی
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	متر بر روز	۲/۳۵	۱/۱
جرم مخصوص ظاهری خاک گلدان‌ها	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱/۱۸	۱/۴۵

θ_s ، مقدار رطوبت اشباع خاک ($m^3 m^{-3}$)، θ_r ، مقدار رطوبت باقی‌مانده خاک ($m^3 m^{-3}$)، α ، معادل عکس مکش ماتریک در نقطه ورود هوا (kPa) و n شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشند. جدول (۲)، نتایج حاصل از برازش مدل منحنی رطوبتی (1980) van Genuchten بر مقادیر تجربی در دو خاک مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد.

منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از دستگاه‌های جعبه شن، محفظه فشاری و غشاء فشاری اندازه‌گیری شد (Klute, 1986) و مدل منحنی رطوبتی (van Genuchten, 1980) (رابطه ۲) بر داده‌های تجربی برازش داده شد:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} + \theta_r \quad (\text{رابطه ۲})$$

جدول ۲- نتایج حاصل از برازش مدل منحنی رطوبتی (Van Genuchten 1980) بر مقادیر تجربی

خاک	$\theta_r(m^3m^{-3})$	$\theta_s(m^3m^{-3})$	$\alpha (1/cm)$	N
۱	۰/۱۱	۰/۴۷	۰/۰۲۸	۱/۹۸
۲	۰/۱۱	۰/۴۳	۰/۰۱۷	۲/۴۶

پلاستیکی آماده شده از قبل و جوانه زدن، دو گیاهچه ذرت در گلدان‌های مربوطه حفظ شدند. تیمارهای شوری پس از استقرار کامل گیاهان، اعمال شد با توجه به تاریخ کشت در ۱۸ مرداد و برداشت در ۹ آبان ۱۳۹۶، طول دوره کشت گیاهان ۸۳ روز بود. برای ساخت محلول‌های آب آبیاری از نمک کلرور کلسیم و کلرور سدیم، به نسبت مساوی استفاده شد (Munns, 2002). در ابتدا تمام گلدان‌ها با مقادیر کافی آب آبیاری، با شوری مشخص به طور پیوسته تا حدود نزدیک به اشباع آبیاری شدند؛ به نحوی که بخشی از محلول خاک زهکشی شود. آبیاری پس از قطع کامل زهکشی انجام شد. حجم آب زهکشی با حجم‌سنجی تغییرات آب درون بطری و مقادیر تعرق با توزین روزانه گلدان انجام شد. این اندازه‌گیری‌ها در دو نوبت صبح و عصر در هر دور آبیاری انجام شد. به منظور اندازه‌گیری جذب آب (تعرق) و جلوگیری از تبخیر خاک، سطح فوقانی گلدان‌ها از یک لایه مالچ سنگ‌ریزه‌ای سفید پوشانده شد تا سهم نسبی مؤلفه تبخیر از خاک (E) در مقادیر تبخیر و تعرق (ET) اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کم باشد. همچنین در این آزمایش جهت بررسی و اصلاح اثر تبخیر از ۱۸ گلدان شاهد استفاده شد که تمام شرایط گلدان‌های بالا به جز حضور گیاه را داشت. بنابراین با وجود ۱۸ گلدان با حضور گیاه و ۱۸ گلدان بدون حضور گیاه در نهایت ۳۶ گلدان در این آزمایش استفاده شد.

برای نشان دادن جذب آب و تعیین ضریب وزنی شوری (ω_s)، در مفهوم IWC پیشنهاد شده توسط (et al. 2001) Groenevelt (رابطه ۱)، میزان تعرق تجمعی محاسبه شد و شوری متناظر با آن‌ها در آب زهکشی شده اندازه‌گیری شد. سپس از منحنی‌های تعرق تجمعی به صورت عددی مشتق گرفته شد تا شدت تعرق (تغییرات تعرق تجمعی نسبت به زمان $(\Delta T/\Delta t)$) به دست آید. برای این منظور همچنین، لازم بود که تغییرات شدت تعرق اندازه‌گیری شده با یک رابطه ریاضی تبیین شود زیرا برای رسیدن به شدت تعرق در واحد مقدار شاخصه لازم است که تعرق در یک زمان مشخص به مقدار شاخصه در آن زمان تقسیم شود. این کار می‌تواند با استفاده از اعداد گسسته (و دارای پراکندگی) انجام شود. این کار علاوه بر وقت‌گیر بودن، مستلزم درون‌یابی‌های زیادی است. به همین دلیل مدل‌های مختلف

بخش دیگر از نمونه‌ها برای پر کردن گلدان‌های پلاستیکی به قطر ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۹ سانتی‌متر از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شدند. این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، اجرا شد. ابتدا در هر گلدان ۱۲ کیلوگرم خاک خشک ریخته و به جرم مخصوص مزرعه رسانده شد و به منظور اندازه‌گیری مقدار جذب آب و زهکشی و تنظیم مکش ماتریک خاک، در مرکز خاک یک تانسیومتر دست‌ساز نصب شد. تانسیومتر دست‌ساز، شامل یک شیلنگ شفاف و کلاهک متخلخل (با هدایت هیدرولیکی بسیار بیشتر از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک) متصل به آن بود. کلاهک زهکش در داخل گلدان‌ها و در مرکز خاک تعبیه شد و سر دیگر شیلنگ در یک بطری حاوی آب با سطح مبنای مشخص، ثابت شد. بدین ترتیب مکشی معادل فاصله عمودی از کلاهک تا سطح آب بطری، بر خاک اعمال شد (۱۰۰ سانتی‌متری)؛ به نحوی که تانسیومتر قادر بود کلیه آب خاک که با مکشی کمتر ۱۰۰ سانتی‌متری نگره‌داری می‌شد را زهکشی کند. از طرف دیگر اتصال سر شیلنگ به بطری محتوی آب، این امکان را فراهم می‌کرد تا در حالت‌هایی که مکش ماتریک خاک بیش از مکش آب درون کلاهک تانسیومتر است، آب از ظرف به طرف کلاهک و در نتیجه به خاک منتقل شود. بدین ترتیب تانسیومتر دست‌ساز، در طی دوره آزمایش، مکش خاک را در محدوده مشخص (۱۰۰ سانتی‌متری) ثابت نگه داشت (Meskini-Vishkaee et al., 2015). این شیلنگ شفاف نازک نیز در داخل شیلنگ تانسیومتر به نحوی تعبیه شد تا یک سر آن در درون کلاهک و سر دیگر آن همراه با یک شیر قطع‌کن از بطری بیرون آمده باشد. این شیلنگ جهت نمونه‌برداری آب خاک درون گلدان و تعیین شوری مورد استفاده قرار گرفت.

این آزمایش در دو خاک مجزا و مستقل و در قالب طرح کاملاً تصادفی و شامل کشت گیاه ذرت (رقم KSC260) سه سطح شوری آب آبیاری (۱/۵، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) و سه تکرار انجام شد. (مجموعاً ۱۸ گلدان) سطوح شوری آب آبیاری بر اساس حدود دامنه تحمل گیاه ذرت به شوری (مقادیر آستانه تحمل به شوری (EC_T) برابر با ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شوری نهایی (EC_F) برابر با ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) ارائه شده توسط فائو (۲۰۰۲) انتخاب شدند.

پس از کاشت بذر گیاهان ذرت در داخل گلدان‌های

کشت شده (تغرق تجمعی در هر گلدان) در خاک ۱ و ۲، تحت آبیاری با آب شور (دسی‌زیمنس بر متر ۸ و ۴، $EC_i=1/5$) را نشان می‌دهد. در هر سه تکرار، شیب منحنی جذب آب تجمعی در مقابل شوری آب زهکشی، در سطح شوری ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر بیشتر از شوری ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار جذب آب در طول دوره کشت در خاک تحت تیمار شوری ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به تیمارهای ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر، با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. با افزایش شوری آب آبیاری، حداکثر مقدار تغرق تجمعی مشاهده شده (سطح آخرین نقطه هر نمودار) کاهش می‌یابد.

شکل (۲) تغییرات شدت تغرق گیاه ذرت در هر زمان در مقابل شوری آب زهکشی در آن زمان، در خاک‌های شماره ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. شوری آب زهکشی در گلدان‌هایی که تحت تیمار شوری ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر بودند، در اوایل دوره کشت در حدود ۱/۵ تا ۲ دسی‌زیمنس بر متر بوده و با گذشت زمان و آبیاری با آب شور به تدریج شوری خاک و در نتیجه شوری آب زهکشی افزایش یافته و در انتهای دوره کشت به حدود ۶ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است. به همین صورت در مورد گلدان‌های تحت تیمار شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر، شوری آب زهکشی در اوایل دوره کشت در حدود ۲ تا ۳ دسی‌زیمنس بر متر و در انتهای دوره کشت به ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافته است و در گلدان‌های تحت تیمار شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر، از حدود ۵ دسی‌زیمنس بر متر در اوایل دوره کشت به ۲۳ دسی‌زیمنس بر متر در انتهای دوره کشت افزایش یافته است (شکل ۲).

آبیاری با آب شور باعث تجمع نمک در خاک و کاهش پتانسیل اسمزی خاک و در نتیجه منجر به کاهش جذب آب توسط ریشه و رشد گیاه می‌شود (Estrada Munns *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2013). همچنین مشاهده شد که در اثر آبیاری با آب شور تبخیر و تغرق (ET) ذرت در تمام مراحل رشد به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (Huang *et al.*, 2019). (2019) Zalacáin *et al.* نشان دادند که در شرایط کنترل‌شده و آبیاری با آب ۲ تا ۳ دسی‌زیمنس بر متر، ۱۵ سال طول می‌کشد تا خاک شور شود. Zhang *et al.* (2020) ضمن مشاهده روند شور شدن خاک تحت کشت ذرت، آن را تحت تأثیر مدیریت خاک و (2019) Acar and Yilmaz آن را کاملاً تابع شدت آبشویی خاک معرفی می‌کنند.

ریاضی از جمله مدل خطی^۱، نمایی^۲، لگاریتمی^۳، چندجمله‌ای^۴ با درجه دو و توانی^۵ بر منحنی‌های شدت تغرق برآزش داده و با توجه به بیشترین میانگین ضریب تبیین (R^2) و کمترین میانگین مربوط به ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. مقدار شدت تغرق در واحد مقدار رشد گیاه به ازای هر شوری محاسبه و سپس مقادیر بیشینه آن تعیین و سایر مقادیر بر مقدار بیشینه تقسیم شده و شدت تغرق نسبی در شوری‌های مختلف برای هر سه تکرار و سه تیمار مورد مطالعه، محاسبه و مقادیر میانگین آن‌ها به دست آمد. مقادیر به‌دست‌آمده مبین مقدار نسبی جذب آب به ازای مقدار رشد گیاه در شوری‌های مختلف است و تابع مبین آن به عنوان تابع ω_s در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده با تابع تنش شوری ($\alpha(h)$) ارائه شده

توسط (van Genuchten and Hoffman, 1984) مقایسه شد:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{0.50}}\right)^p} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$h_{0.50}$ مکش اسمزی است که در آن جذب آب، به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و p یک ضریب تجربی است که به شرایط گیاه، خاک و شرایط آب و هوایی بستگی دارد که معمولاً مقدار آن ۳ در نظر گرفته می‌شود (van Genuchten and Hoffman, 1984). علاوه بر آن، با استفاده از روابط Maas and Hoffman (۱۹۷۷)، تابع وزنی شوری در مفهوم IWC (ω_{si}) با استفاده از تابع پیشنهادی (Mohammadi and Khattar, 2018) برای دو خاک مورد مطالعه محاسبه شد و با نتایج این پژوهش مقایسه شد.

(رابطه ۴)

$$\omega_{si} = 1 \quad 0 < EC_i \leq EC_T$$

$$\omega_{si} = 1 - \frac{EC_i - EC_T}{EC_F - EC_T} \quad EC_T < EC_i < EC_F$$

$$\omega_{si} = 0 \quad EC_i \geq EC_F$$

که EC_i شوری آب زهکشی در زمان‌های مختلف می‌باشد. جهت نشان دادن رابطه بین جذب آب توسط گیاه و شوری خاک در طول دوره کشت گیاه ذرت، در زمان‌های مختلف مقدار ارتفاع گیاه در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری و رابطه لجستیکی رشد بر داده‌های ارتفاع برآزش داده شدند:

$$h = \frac{h_m}{1 + b_0 \exp(-bt)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

h_m رشد حداکثر (cm) گیاه، t ، زمان (دقیقه)، b_0 و b پارامترهای تجربی معادله رشد می‌باشد.

نتایج و بحث

تعیین ضریب وزنی شوری گیاه ذرت

شکل (۱) تغییرات تغرق (جذب آب) تجمعی گیاه ذرت (T)

مدل لگاریتمی می‌باشد. فرم لگاریتمی علاوه بر اینکه بیشترین همخوانی را با منحنی اندازه‌گیری شده شدت تعرق دارد، نسبت به مدل چندجمله‌ای با درجه دو نیز ساده‌تر می‌باشد، لذا در نهایت یک مدل لگاریتمی ساده (رابطه ۶) انتخاب و بر تمام منحنی‌های شدت تعرق برازش داده شد:

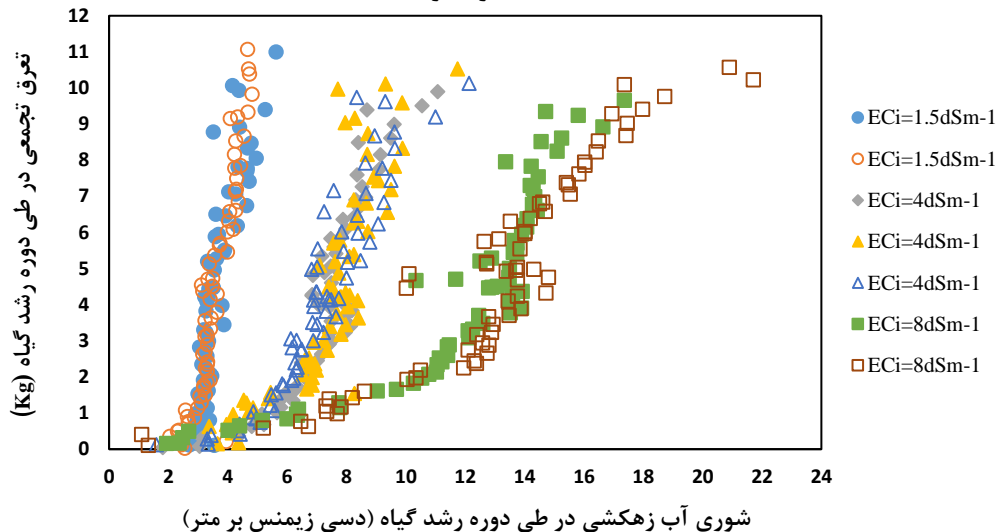
$$y = A \ln x + B \quad (\text{رابطه ۶})$$

y، شدت تعرق ($\Delta T/\Delta t$)؛ x، شوری آب زهکشی (EC)؛ A و B، ضرایب برازشی می‌باشد.

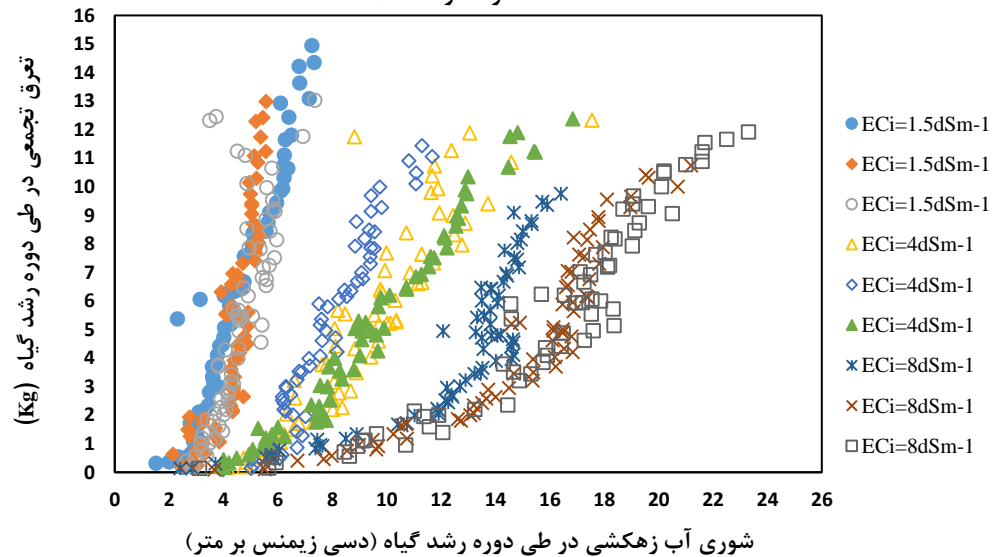
ضرایب حاصل از برازش مدل لگاریتمی (رابطه ۲) بر منحنی‌های شدت تعرق گیاه ذرت در دو خاک ۱ و ۲ در جدول (۷) ارائه شده است.

معادلات حاصل از برازش مدل‌های ریاضی مختلف بر داده‌های شدت تعرق گیاه ذرت کشت‌شده در دو خاک ۱ و ۲ در جدول (۳) و (۴) و آماره‌های حاصل از برازش آن‌ها در جدول (۵) و (۶) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵) و (۶)، میانگین ضریب تبیین دو خاک حاصل از برازش مدل‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، چندجمله‌ای با درجه دو و توانی به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۶۱، ۰/۸۱، ۰/۸۲، ۰/۶۸ و ۰/۶۸ و میانگین ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۱۴، ۰/۱۵ و ۰/۱۵ می‌باشد که بیشترین میانگین ضریب تبیین مربوط به مدل چندجمله‌ای با درجه دو و مدل لگاریتمی و کمترین میانگین RMSE مربوط به

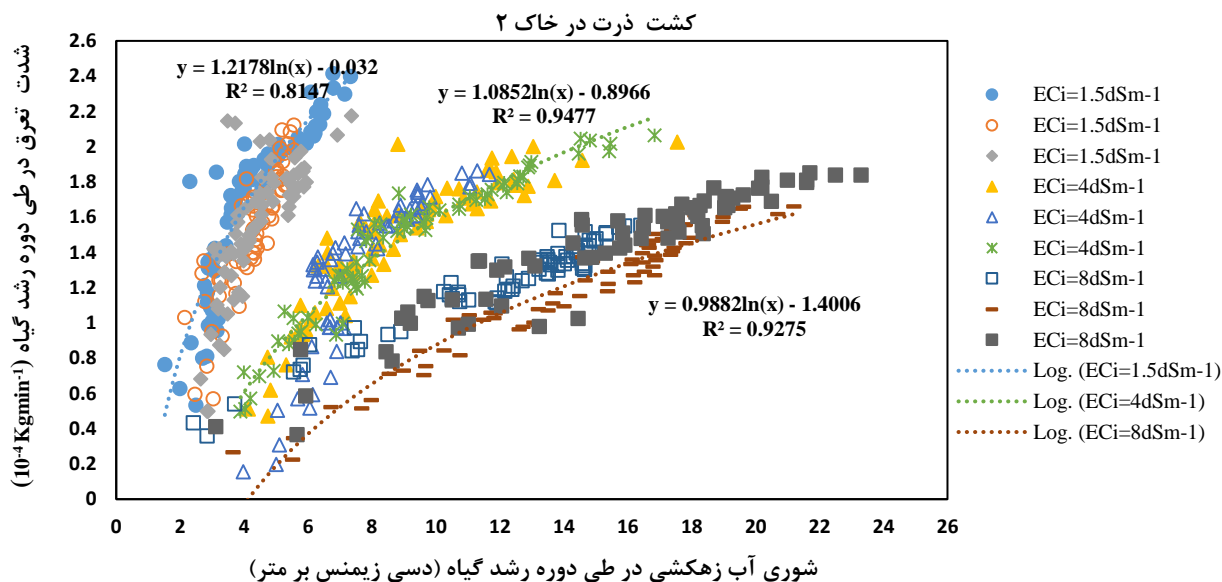
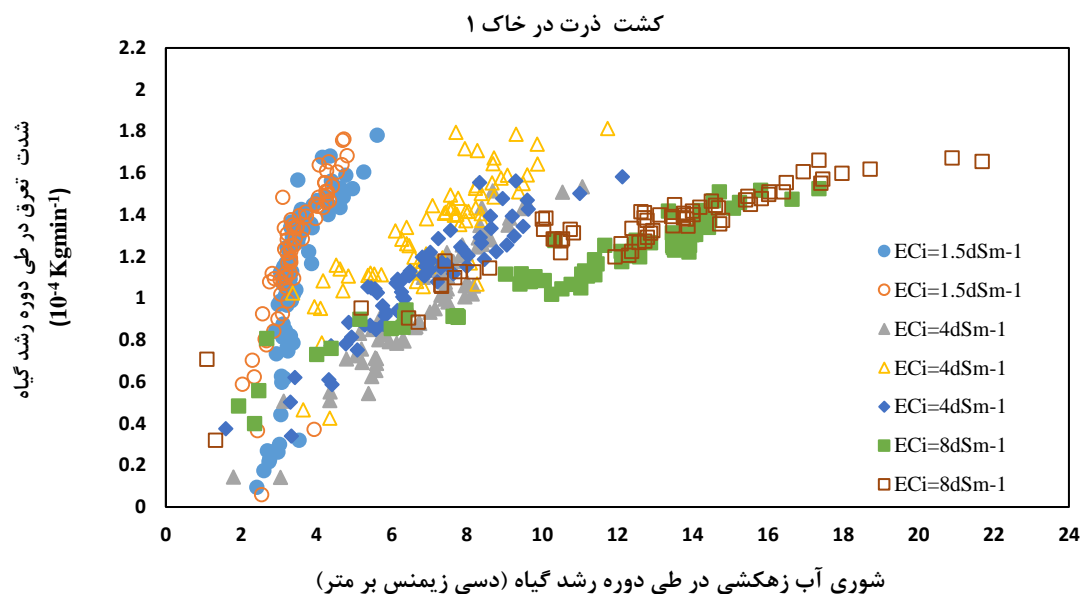
کشت ذرت در خاک ۱



کشت ذرت در خاک ۲



شکل ۱- تغییرات تعرق تجمعی اندازه‌گیری شده گیاه ذرت در زمان t_2 در مقابل شوری آب زهکشی در همان زمان t_1 در طول دوره کشت در سطوح مختلف شوری آب آبیاری (۱/۵، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر). داده‌های تکرار هر تیمار نیز نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات شدت تعرق اندازه‌گیری شده گیاه ذرت ($\Delta T/\Delta t$) در زمان t_2 در مقابل شوری آب زهکشی در همان زمان (t_1) در طول دوره کشت در سطوح مختلف شوری آب آبیاری (۱/۵، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر). داده‌های تکرار هر تیمار نیز نشان داده شده است.

جدول ۳- مدل‌های مختلف ریاضی برازش‌یافته بر منحنی‌های شدت تعرق گیاه ذرت در خاک ۱

توانی	مدل‌های ریاضی				شوری (dS/m)
	چندجمله‌ای درجه دو	لگاریتمی	خطی	نمایی	
$y = 0.04x^{2.53}$	$y = -0.28x^2 + 2.71x - 4.86$	$y = 1.99 \ln(x) - 1.42$	$y = 0.51x - 0.74$	$y = 0.1 \exp(0.62x)$	۱/۵
$y = 0.17x^{1.53}$	$y = -0.11x^2 + 1.2x - 1.58$	$y = 1.46 \ln(x) - 0.58$	$y = 0.42x - 0.24$	$y = 0.25 \exp(0.33x)$	۱/۵
+	+	+	+	+	۱/۵
$y = 0.3x^{0.75}$	$y = -0.002x^2 + 0.17x + 0.24$	$y = 0.86 \ln(x) - 0.35$	$y = 0.13x + 0.36$	$y = 0.56 \exp(0.11x)$	۴
$y = 0.2x^{0.83}$	$y = 0.008x^2 + 0.24x - 0.16$	$y = 0.78 \ln(x) - 0.38$	$y = 0.13x + 0.18$	$y = 0.4 \exp(0.13x)$	۴
$y = 0.07x^{1.37}$	$y = -0.002x^2 + 0.2x - 0.27$	$y = 0.96 \ln(x) - 0.81$	$y = 0.17x - 0.18$	$y = 0.2 \exp(0.22x)$	۴
$y = 0.45x^{0.43}$	$y = 0.002x^2 + 0.09x + 0.46$	$y = 0.42 \ln(x) + 0.29$	$y = 0.05x + 0.66$	$y = 0.7 \exp(0.05x)$	۸
$y = 0.35x^{0.5}$	$y = 0.0002x^2 + 0.07x + 0.44$	$y = 0.47 \ln(x) + 0.06$	$y = 0.06x + 0.46$	$y = 0.55 \exp(0.06x)$	۸
+	+	+	+	+	۸

جدول ۴- مدل‌های مختلف ریاضی برازش‌یافته بر منحنی‌های شدت تعرق گیاه ذرت در خاک ۲

مدل‌های ریاضی					شوری (dS/m)
توانی	چندجمله‌ای درجه دو	لگاریتمی	خطی	نمایی	
$y = 0.5x^{0.83}$	$y = -0.05x^2 + 0.75x - 0.5$	$y = 1.22 \ln(x) - 0.03$	$y = 0.29x + 0.04$	$y = 0.7 \exp(0.09x)$	۱/۵
$y = 0.34x^{1.02}$	$y = 0.03x^2 + 0.09x + 0.51$	$y = 1.36 \ln(x) - 0.42$	$y = 0.36x - 0.003$	$y = 0.48 \exp(0.26x)$	۱/۵
$y = 0.36x^{0.98}$	$y = -0.08x^2 + 0.98x - 1.24$	$y = 1.27 \ln(x) - 0.31$	$y = 0.27x - 0.34$	$y = 0.6 \exp(0.21x)$	۱/۵
$y = 0.22x^{0.89}$	$y = -0.013x^2 + 0.36x - 0.68$	$y = 1.12 \ln(x) - 0.91$	$y = 0.12x + 0.41$	$y = 0.62 \exp(0.09x)$	۴
#	$y = -0.05x^2 + 1.003x - 3.4$	$y = 1.95 \ln(x) - 2.65$	$y = 0.26x - 0.7$	#	۴
#	$y = -0.009x^2 + 0.3x - 0.46$	$y = 1.08 \ln(x) - 0.9$	$y = 0.12x + 0.34$	#	۴
$y = 0.05x^{1.16}$	$y = -0.001x^2 + 0.12x - 0.24$	$y = 0.99 \ln(x) - 1.4$	$y = 0.09x - 0.07$	$y = 0.27 \exp(0.1x)$	۸
$y = 0.21x^{0.7}$	$y = -0.001x^2 + 0.1x + 0.19$	$y = 0.64 \ln(x) - 0.35$	$y = 0.08x + 0.29$	$y = 0.45 \exp(0.08x)$	۸
$y = 0.16x^{0.8}$	$y = -0.002x^2 + 0.22x + 0.005$	$y = 0.87 \ln(x) - 0.9$	$y = 0.07x + 0.31$	$y = 0.52 \exp(0.06x)$	۸

جدول ۵- ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا حاصل از برازش مدل‌های ریاضی مختلف بر منحنی‌های شدت تعرق گیاه ذرت در خاک ۱

شوری آب آبیاری (dS/m)										
توانی		چندجمله‌ای درجه دو		لگاریتمی		نمایی		خطی		
R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	
۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۶۹	۰/۱۹	۰/۶۸	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۴۶	۰/۶۶	۰/۱۹	۱/۵
۰/۵۱	۰/۳۸	۰/۷۳	۰/۲۲	۰/۶۶	۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۴	۰/۶۱	۰/۲۷	۱/۵
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	۱/۵
۰/۶۲	۰/۱۵	۰/۶۹	۰/۱۵	۰/۷۸	۰/۱۵	۰/۶	۰/۱۶	۰/۶۹	۰/۱۵	۴
۰/۸۷	۰/۱۴	۰/۸۹	۰/۰۹	۰/۸۶	۰/۱۰	۰/۷۸	۰/۱۵	۰/۸۷	۰/۱۰	۴
۰/۸۷	۰/۱۱	۰/۸۹	۰/۱۰	۰/۸۴	۰/۱۲	۰/۷۸	۰/۱۶	۰/۸۹	۰/۱۰	۴
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	۸
۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۸۹	۰/۰۷	۰/۸۵	۰/۰۹	۰/۷	۰/۱۱	۰/۸۶	۰/۰۸	۸
۰/۹۱	۰/۰۷	۰/۹۲	۰/۰۷	۰/۸۹	۰/۰۸	۰/۸۷	۰/۰۷	۰/۹۲	۰/۰۶	۸
۰/۷۴	۰/۱۶	۰/۸۲	۰/۱۳	۰/۷۹	۰/۱۴	۰/۶۷	۰/۲۲	۰/۷۹	۰/۱۴	میانگین

(+) عدم وجود داده کافی

جدول ۶- ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا حاصل از برازش مدل‌های ریاضی مختلف بر منحنی‌های شدت تعرق گیاه ذرت در خاک ۲

شوری آب آبیاری (dS/m)										
توانی		چندجمله‌ای (۲)		لگاریتمی		نمایی		خطی		
R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	R ²	RMSE (10 ⁻⁴ Kgmin ⁻¹)	
۰/۷۳	۰/۲۲	۰/۸۳	۰/۲	۰/۸۱	۰/۲	۰/۶۷	۱	۰/۷۸	۰/۴۵	۱/۵
۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۶۴	۰/۲۲	۰/۶۲	۰/۲۲	۰/۵	۰/۲۶	۰/۵۸	۰/۲۴	۱/۵
۰/۶۹	۰/۱۶	۰/۷۷	۰/۱۶	۰/۷۳	۰/۱۷	۰/۷۰	۰/۱۶	۰/۷۷	۰/۱۶	۱/۵
#	#	۰/۸۷	۰/۶	۰/۸۲	۰/۲۳	#	#	۰/۷۲	۰/۳۸	۴
#	#	۰/۹۵	۰/۰۹	۰/۹۵	۰/۰۹	#	#	۰/۸۸	۰/۱۴	۴
۰/۷۸	۰/۱۹	۰/۸۷	۰/۱۳	۰/۸۵	۰/۱۴	۰/۶۵	۰/۲۴	۰/۷۶	۰/۱۸	۴
۰/۸۸	۰/۱۱	۰/۹	۰/۱۱	۰/۸۹	۰/۱۲	۰/۷۹	۰/۱۵	۰/۸۹	۰/۶۴	۸
۰/۹۴	۰/۰۸	۰/۹۵	۰/۰۷	۰/۹۳	۰/۰۹	۰/۸۶	۰/۱۳	۰/۹۵	۰/۰۸	۸
۰/۹۶	۰/۰۶	۰/۹۵	۰/۰۴	۰/۹۲	۰/۰۷	۰/۹	۰/۰۸	۰/۹۴	۰/۰۶	۸
۰/۶۲	۰/۱۵	۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۸۳	۰/۱۵	۰/۵۶	۰/۲۹	۰/۸۱	۰/۲۶	میانگین

(#) غیر معنی‌دار بودن ضریب تبیین

جدول ۷- ضرایب حاصل از برازش مدل لگاریتمی (رابطه ۶) بر منحنی‌های شدت تعرق گیاه ذرت در دو خاک ۱ و ۲

خاک ۲		خاک ۱		شوری آب آبیاری (dS/m)
B ($10^{-4} \text{ Kgmin}^{-1}$)	A ($10^{-4} \text{ Kg.m.min}^{-1} \text{ dS}^{-1}$)	B ($10^{-4} \text{ Kgmin}^{-1}$)	A ($10^{-4} \text{ Kg.m.min}^{-1} \text{ dS}^{-1}$)	
-۰/۰۳	۱/۲۲	-۱/۴۲	۱/۹۹	۱/۵
-۰/۳۱	۱/۲۷	-۰/۵۸	۱/۴۶	۱/۵
-۰/۴۳	۱/۳۶	+	+	۱/۵
-۰/۰۹	۱/۰۸	-۰/۸۱	-۰/۹۵	۴
۲/۶	۱/۹۵	-۰/۳۵	-۰/۸۶	۴
-۰/۹۱	۱/۱۱	۰/۳۸	-۰/۷۸	۴
-۰/۳۵	۰/۶۴	-۰/۰۶	۰/۴۷	۸
-۰/۰۹	۰/۸۷	+	+	۸
-۱/۴	۱	-۰/۲۹	-۰/۴۲	۸

(+) عدم وجود داده کافی

مقدار شوری که در آن جذب آب به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد، در خاک‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۴/۷۶ و ۲/۷۴ دسی-زیمنس بر متر می‌باشد.

(Maas and Grattan 1999) گزارش نمودند که مقدار آستانه تحمل به شوری ذرت در حدود ۱/۷ دسی-زیمنس بر متر و مقدار شوری که در آن جذب آب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد، ۳/۷ (دسی-زیمنس بر متر) می‌باشد. مقدار (EC₅₀) به‌دست‌آمده در این پژوهش (در هر دو خاک)، با مقادیر گزارش‌شده توسط (Maas and Grattan 1999) تفاوت زیادی دارد. این اختلاف توسط (Jalali et al 2017) برای گندم دوروم نیز گزارش شده است. علت تفاوت بین مقادیر به‌دست‌آمده با مقادیر گزارش‌شده توسط (Maas and Grattan 1999) احتمالاً به این امر مربوط می‌شود که در آزمایش آن‌ها حدود تحمل به شوری بر اساس عملکرد نسبی گیاه و شوری عصاره اشباع تعیین شد؛ در حالی که در پژوهش حاضر، بر اساس شوری زهاب و تعرق گیاه گزارش شده است. (Steppuhn and Asay 2005) EC₅₀ گیاه ذرت را ۵/۵۴ دسی-زیمنس بر متر گزارش دادند که به EC₅₀ به‌دست‌آمده برای ذرت در این گزارش نزدیک می‌باشد. (Butcher et al. 2018) مقدار EC₅₀ را برای گیاه ذرت در خاک‌های لومی شنی برابر ۸/۲۸ دسی-زیمنس بر متر گزارش نمودند و علت اختلاف بین این مقادیر با مقادیر ارائه‌شده در مطالعات دیگر را به تفاوت شرایط محیطی (بافت خاک، یون‌های غالب، الگوهای آب و هوایی، مکانیسم‌های شور شدن) بین مطالعات و مدل‌های مختلف استفاده‌شده نسبت دادند.

ضریب تبیین بالا با میانگین ۰/۹۵ و RMSE پایین با میانگین ۰/۰۳۴ نشان‌دهنده برازش مناسب مدل van Genuchten and Hoffman (1984) بر مقادیر اندازه‌گیری‌شده

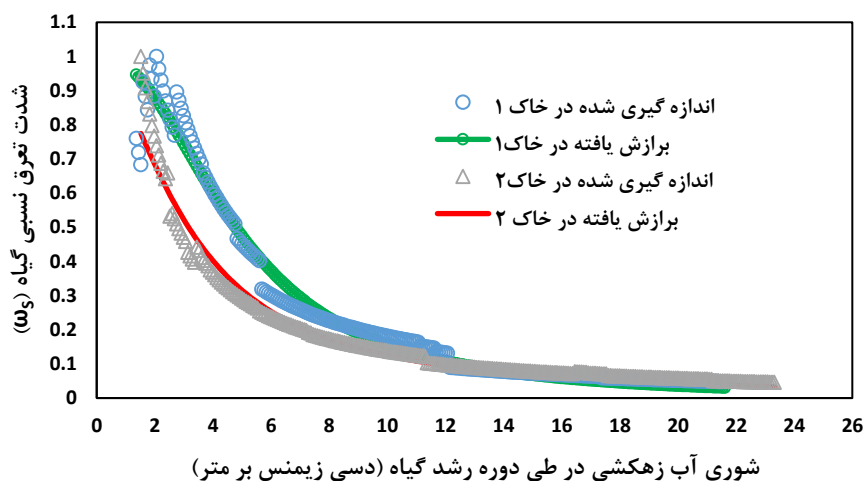
با توجه به جدول (۷)، در بررسی تأثیر سطوح شوری روی پارامترهای حاصل از برازش مدل لگاریتمی (رابطه ۶) بر تغییرات شدت تعرق گیاه ذرت، مشاهده شد که میانگین ضریب A در خاک ۱ در سطح شوری ۱/۵ دسی-زیمنس بر متر برابر ۱/۷۳ و بیشتر از ضریب A در سطح شوری ۴ و ۸ دسی-زیمنس بر متر (به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۶۳) می‌باشد. در خاک ۲ نیز ضریب A در سطوح شوری ۱/۵ و ۴ دسی-زیمنس بر متر برابر با ۱/۳ و بیشتر از سطح شوری ۸ دسی-زیمنس بر متر (۰/۸۴) می‌باشد. شکل (۲) نمونه‌ای از برازش مدل لگاریتمی (رابطه ۶) بر مقادیر شدت تعرق گیاه ذرت در برابر شوری آب زهکشی در سه تیمار شوری آب آبیاری (۱/۵، ۴ و ۸ دسی-زیمنس بر متر) را نشان می‌دهد. شکل (۳) رابطه بین شدت تعرق نسبی یا جذب آب نسبی گیاه ذرت با شوری آب زهکشی، در دو خاک ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. از آنجا که این مقادیر سرعت نسبی جذب آب به ازای شوری‌های مختلف را نشان می‌دهد، پیشنهاد شد که به عنوان ضریب وزنی جذب آب (ω_{Si}) در مدل IWC در نظر گرفته شود.

پاسخ گیاه ذرت به شوری آب آبیاری

تغییرات تعرق نسبی (جذب آب نسبی) ذرت در پاسخ به افزایش شوری به عنوان تابعی از شوری آب زهکشی در شکل (۳) آمده است. با توجه به شکل (۳)، تغییرات شدت تعرق واقعی ذرت به عنوان تابعی از شوری آب زهکشی به صورت غیرخطی می‌باشد. لذا مدل غیرخطی (van Genuchten and Hoffman 1984) (رابطه ۳) بر مقادیر اندازه‌گیری‌شده، برازش داده شد و نتایج حاصل آن در شکل (۳) ارائه شده است. حداکثر جذب آب توسط ذرت در خاک ۱ و ۲ به ترتیب تا شوری ۲ و ۱/۵ دسی-زیمنس بر متر می‌باشد و بعد از آن با افزایش شوری آب زهکشی، جذب آب به صورت لگاریتمی کاهش یافته است. این مقادیر نشان‌دهنده آستانه تحمل به شوری ذرت در خاک ۱ و ۲ می‌باشد. (EC₅₀).

اندازه‌گیری شده با EC_{50} حاصل از برازش مدل van (1984) Genuchten and Hoffman برابر می‌باشد اما در خاک ۲، مقدار EC_{50} به دست آمده از برازش مدل van and Hoffman Genuchten نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده ۱۵ درصد افزایش داشته است.

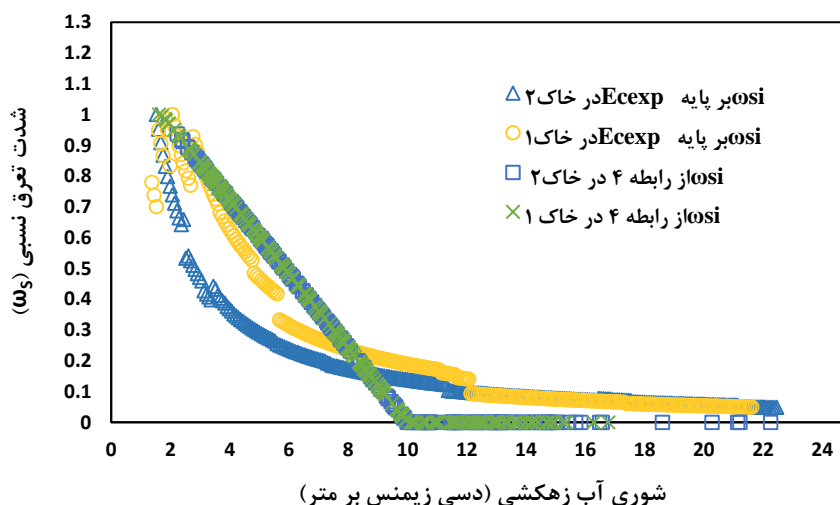
شدت تعرق واقعی گیاه ذرت در شوری‌های مختلف آب زهکشی - شده می‌باشد (شکل ۳). مقادیر EC_{50} و P (ضریب تجربی مدل ون گنوختن و هافمن) حاصل از برازش مدل van (1984) Genuchten and Hoffman در خاک ۱، به ترتیب ۴/۷۹ دسی‌زیمنس بر متر و ۲/۲۹ و در خاک ۲، ۳/۱۶ دسی‌زیمنس بر متر و ۱/۶۹ به دست آمد. در خاک ۱، EC_{50} به دست آمده از مقادیر



شکل ۳- تغییرات تعرق نسبی (جذب آب نسبی ذرت) اندازه‌گیری شده (ω_s) در شوری‌های مختلف آب زهکشی در دو خاک شماره ۱ و ۲ و نیز مدل (1984) van Genuchten and Hoffman (رابطه ۳) برازش یافته بر آن‌ها

و با ω_{si} به دست آمده در این پژوهش مقایسه شد. در شکل (۴) مقایسه ω_{si} پیشنهادی بر پایه شوری اندازه‌گیری شده (EC_{exp}) و ضریب وزنی شوری (ω_{si}) محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴) نشان می‌دهد.

مقایسه ω_{si} پیشنهادی با ω_{si} محاسبه شده با استفاده از رابطه (۳) مطابق رابطه (۴) و با استفاده از ضرایب ارائه شده توسط فائو (۲۰۰۲) برای گیاه ذرت ($EC_T = 1/7$ و $EC_F = 10$) ضریب وزنی شوری (ω_{si}) در شوری آب زهکشی اندازه‌گیری شده، محاسبه شد



شکل ۴- مقایسه ضریب وزنی شوری پیشنهاد شده و حاصل از رابطه (۴) در دو خاک شماره ۱ و ۲

خاک در جذب آب شور توسط گیاه تأثیری ندارد و ذرت در خاک های متفاوت، به طور یکسان آب جذب می‌کند؛ در حالی که

منحنی مربوط ω_{si} محاسبه شده توسط رابطه (۴) در هر دو خاک بر هم منطبق شده است. بر اساس برآورد رابطه (۴)، نوع

شوری آب زهکشی و تعرق تجمعی از گیاه بوده و مانند هر رابطه رگرسیونی دیگر نمی‌توانند الزاماً مؤید رابطه علت و معلولی بین شوری و تعرق باشند. به منظور تبیین بهتر رابطه بین شوری و شدت تعرق، شکل (۳) ارائه شد که نشان می‌دهد با افزایش شوری، جذب آب به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. در این تحقیق، از داده‌های تعرق تجمعی در مقابل شوری (شکل ۱)، مقدار شدت تعرق نسبی از مقدار شاخساره در شوری‌های مختلف استخراج شد (شکل ۵). به منظور نشان دادن رابطه شدت جذب آب توسط گیاه با شوری آب زهکشی در طول دوره رشد، مقدار رشد شاخساره در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد و معادله رشد (رابطه ۵) بر آن برازش داده شد. پارامترهای حاصل از برازش معادله (۳) بر مقادیر اندازه‌گیری شده رشد گیاه ذرت و در دو خاک ۱ و ۲ در جدول (۸) ارائه شده است.

تفاوت بین منحنی‌های تعرق نسبی ذرت در شوری اندازه‌گیری شده در دو خاک ۱ و ۲ به خوبی نشان‌دهنده اثر نوع خاک در میزان جذب آب توسط گیاه ذرت می‌باشد. همچنین مقایسه منحنی‌های شکل (۴) مؤید متغیر بودن مقادیر EC_T و EC_F است و نمی‌توان مقدار ثابتی برای گیاه ارائه کرد.

رابطه شدت تعرق با شوری آب زهکشی

شکل‌های (۱) و (۲) مربوط به طول دوره کشت گیاه ذرت می‌باشد که با گذشت زمان، حجم شاخساره از یک سو و نیز شوری خاک از سوی دیگر افزایش می‌یابد. گسترش حجم شاخساره به معنی افزایش سطح در اختیار تعرق و در نتیجه افزایش میزان آب جذب شده از خاک است، هر چند که مقدار آب جذب شده در واحد مقدار شاخساره (یا سطح برگ) به دلیل شوری کاهش می‌یابد. شکل‌های (۱) و (۲) صرفاً مشاهدات تجربی و بیانگر رابطه بین

جدول ۸- پارامترهای حاصل از برازش معادله رشد (رابطه ۵) بر مقادیر اندازه‌گیری شده رشد گیاه ذرت

شوری آب آبیاری (dS/m)		خاک ۱			خاک ۲		
h_m (سانتی متر)	b_0	b	h_m (سانتی متر)	b_0	b		
۱۴۴	۴/۹	۰/۰۲۳۲	۳۲۱	۳۸/۷۹	۰/۰۴۳	۱/۵	
۱۴۷	۳۲/۴۲	۰/۰۵۵	۱۴۸	۱۳/۸۵	۰/۰۴۱	۱/۵	
+	+	+	۱۴۸	۲/۴۴	۰/۰۱۳	۱/۵	
۲۵۱	۱۲۰/۳۲	۰/۰۵۷	۱۳۱	۵۵۶	۰/۱۰۷	۴	
۱۵۵	۷۴۵/۷۸	۰/۰۹۷	۱۳۱	۱۱۳۲	۰/۱۱۳	۴	
۱۲۶	۳۸/۵۹	۰/۰۵۴	۱۲۸	۲۳۷	۰/۰۹۵	۴	
۱۰۵	۳۷۳۲	۰/۱۳۳	۱۰۷	۱۶۴۳	۰/۱۲۲	۸	
۵۶	۶۷۷۱۰	۰/۲۰۱	۱۰۴	۲۵۹	۰/۰۹۶	۸	
۹۹	۲۳۱۲	۰/۱۲۳	۱۱۸	۲۶۷۶۷	۰/۱۷۷	۸	

(+) عدم وجود داده

اثر نوع خاک بر میزان تاثیر تنش شوری بر جذب آب توسط ذرت با توجه به شکل (۳)، مقدار شوری که در آن جذب آب توسط ذرت حداکثر است (EC_{Smax}) در خاک ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۲ و ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد؛ به عبارت دیگر، ذرت در خاک ۱ نسبت به خاک ۲ می‌تواند تا شوری‌های بیشتر آب را بدون محدودیت جذب کند. مقایسه بین مقادیر EC_{50} دو خاک مورد بررسی (شکل ۳) نشان می‌دهد که مقدار EC_{50} در خاک ۲ برابر با ۲/۷۴ و تقریباً نصف EC_{50} در خاک ۱ (۴/۷۶) بوده و یا جذب آب در خاک ۲ با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. در شوری یکسان، جذب آب توسط گیاه ذرت، در خاک ۱ بیشتر از خاک ۲ می‌باشد. اثر کاهش شوری در رشد ذرت در خاک‌هایی با بافت‌های مختلف، در مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی گذشته نیز مشاهده شده است. به عنوان مثال، در مدل‌های شیب‌سازی رشد ذرت در خاک‌های بدون شستشو، مشاهده شد که عملکرد ذرت در

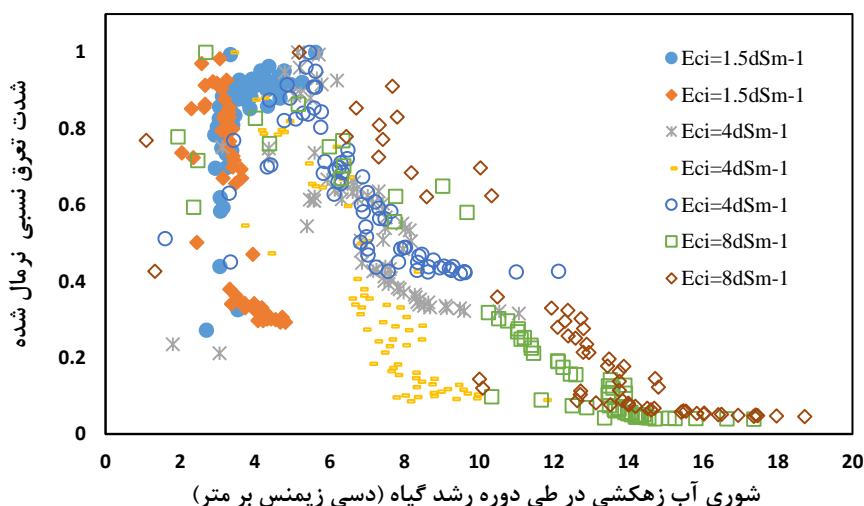
با توجه به ضرایب مربوط به معادله رشد برازش‌یافته (رابطه ۵) که در جدول (۸) ارائه شده است، رشد گیاه در زمان‌های مختلف محاسبه شد. سپس سرعت تعرق در واحد مقدار رشد گیاه محاسبه و منحنی شدت تعرق نسبی نرمال شده (نسبت به رشد) در برابر شوری‌های متناظر ترسیم شد. شکل (۵) نمونه‌ای از رابطه شدت تعرق نسبی نرمال (نسبت به رشد) گیاه ذرت با شوری آب زهکشی و برای سه سطح شوری مورد مطالعه و دو خاک ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.

شکل (۵) به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش شوری در طول دوره آزمایش، شدت تعرق گیاه از واحد مقدار زیتوده گیاه کاهش می‌یابد. در تیمار شوری پایین (۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر) مقدار کاهش شدت تعرق، کم و یا بدون کاهش می‌باشد اما در تیمار شوری بالاتر (۸ دسی‌زیمنس بر متر)، مقدار تعرق با شدت بیشتری کاهش می‌یابد.

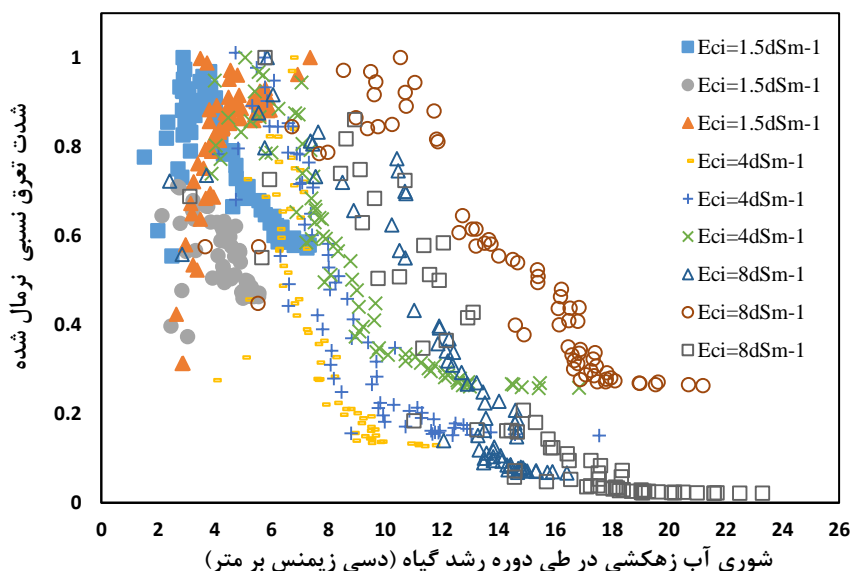
به میزان ۱۳ درصد کاهش یافته است (Blanco *et al.*, 2007) اما وقتی ذرت در مخلوط پیت، لوم سیلتی و شنی رشد کرد، در شوری‌های بیشتر از ۴/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش قابل توجهی در رشد شاخه‌ها مشاهده نشد (Shalhevet *et al.*, 1995).

خاک‌های شنی در شوری عصاره اشباع بیشتر از ۱ دسی‌زیمنس بر متر و در خاک‌های رس و لوم در شوری‌های بیشتر از ۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافته است (Beltrão and Asher, 1997). به طور مشابه، ارتفاع رویشی ذرت که در خاک لومی شنی رشد کرده است، در شوری‌های بیشتر از ۱/۹ دسی‌زیمنس بر متر،

کشت ذرت در خاک ۱



کشت ذرت در خاک ۲



شکل ۵- رابطه شدت تعرق نسبی نرمال (نسبت به رشد) با شوری آب زهکشی در طول کشت گیاه ذرت در خاک‌های شماره ۱ و ۲

بافت و خصوصیات خاک نقش مهمی در اثرات شوری آب آبیاری بر روند شور شدن خاک و عملکرد گیاه دارد (Butcher *et al.*, 2018; Panta *et al.*, 2016). خاک لوم سیلتی نسبت به خاک لوم شنی بیشتر مستعد شور شدن تحت آبیاری با آب شور می‌باشد و مشاهده شد زمانی که ذرت در خاک لومی شنی رشد می‌کند نسبت به زمانی که در خاک لومی سیلتی قرار دارد، مقدار آب

Butcher *et al.* (2018) نشان دادند وقتی ذرت و سویا در خاک لوم رسی سیلتی رشد می‌کند، کاهش در عملکرد آن‌ها در اثر شوری خاک مشاهده نمی‌شود اما وقتی در خاک شنی رشد می‌کند، عملکرد به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. آن‌ها عدم کاهش عملکرد ذرت و سویا در خاک‌های لومی رسی سیلتی را به دلیل کمتر بودن اثر تنش شوری در خاک‌های ریزبافت دانستند.

برای به دست آوردن توابع ω_{Si} لازم بود که کشت‌های متعدد در شوری‌های مختلف و ثابت انجام گیرد اما در روش پیشنهادی برای ω_{Si} در تحقیق حاضر، نیاز به کشت‌های متعدد وجود ندارد و می‌توان فقط بر اساس سری‌های زمانی زهکشی و تعرق به‌دست‌آمده از یک آزمایش در شرایط طبیعی مقدار ω_{Si} را به دست آورد. یکی دیگر از مزیت روش پیشنهادی برای تعیین ω_{Si} ، این است که در خاک‌های دارای زهکش، اندازه‌گیری شوری زهاب عملاً ساده‌تر از پایش شوری عصاره اشباع خاک است و شوری عصاره اشباع خاک در طول دوره کشت در محیط رشد ریشه متغیر است و نمی‌توان مقدار ثابت برای آن قائل شد. در این پژوهش سعی شد تا تابع ω_{Si} بر اساس شوری زهاب پیشنهاد شود تا استفاده و کاربرد آن راحت‌تر باشد.

REFERENCES

- Acar, B. and Yilmaz, A. M. (2019). Irrigation techniques and plant growth strategies in salt-affected soils. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 7(1), 1-9.
- Ali Ehyaei, M. and Behbahanizadeh, A. (1993). Methods of chemical analysis of soil, Vol.1, Publication No. 893. Soil and Water Research Institute. Tehran.
- Beltrão, J. and Asher, J. B. (1997). The effect of salinity on corn yield using the CERES-maize model. *Irrigation and Drainage Systems*, 11(1), 15-28.
- Blanco, F. F., Folegatti, M. V., Gheyi, H.R. and Fernandes, P. D. (2007). Emergence and growth of corn and soybean under saline stress. *Scientia Agricola*, 64(5), 451-459.
- Butcher, K., Wick, A. F., DeSutter, T., Chatterjee, A. and Harmon, J. (2018). Corn and soybean yield response to salinity influenced by soil texture. *Agronomy Journal*, 110(4), 1243-1253.
- Estrada, B., Aroca, R., Barea, J. M. and Ruiz-Lozano, J. M. (2013). Native arbuscular mycorrhizal fungi isolated from a saline habitat improved maize antioxidant systems and plant tolerance to salinity. *Plant science*, 201, 42-51.
- Grant, C. D. and Groenevelt, P. H. (2019). Plant available water in saline soils—revisited. *Soil Research*, 57(3), 239-246.
- Groenevelt, P. H., Grant, C. D. and Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*, 39(3), 577-598.
- Groenevelt, P. H., Grant, C. D., Murray, R. S. (2004). On water availability in saline soils. *Soil Research*, 42, 833-840.
- Huang, M., Zhang, Z., Sheng, Z., Zhu, C., Zhai, Y., Lu, P. and Brinkman, D. (2019). Soil Salinity and Maize Growth under Cycle Irrigation in Coastal Soils. *Agronomy Journal*, 111(5), 2276-2286.
- Jalali, V., Kapourchal, S. A. and Homaei, M. (2017). Evaluating performance of macroscopic water uptake models at productive growth stages of durum wheat under saline conditions. *Agricultural water management*, 180, 13-21.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods*, (methodsofsoilan1), 635-662.
- Maas, E. V. and Grattan, S. R. (1999). Crop yields as affected by salinity. *Agronomy*, 38, 55-110.
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2), 115-134.
- Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M. H., Neyshabouri, M. R. and Shekari, F. (2015). Evaluation of canola chlorophyll index and leaf nitrogen under wide range of soil moisture. *International agrophysics*, 29(1), 83-90.
- Mohammadi, M. H. and Khataar, M. (2018). A simple numerical model to estimate water availability in saline soils. *Soil Research*, 56(3), 264-274.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment*, 25(2), 239-250.
- Munns, R., James, R. A. and Läuchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of experimental botany*, 57(5), 1025-1043.
- Panta, S., Flowers, T., Doyle, R., Lane, P., Haros, G. and Shabala, S. (2016). Growth responses of *Atriplex lentiformis* and *Medicago arborea* in three soil types treated with saline water irrigation. *Environmental and experimental botany*, 128, 39-50.
- Reynolds, W. D. (2018). An analytic description of field capacity and its application in crop production. *Geoderma*, 326, 56-67.
- Reynolds, W. D. (2019). Improved drainage relationships for characterizing the agronomic and environmental performance of field crop production. *Geoderma*, 352, 126-137.
- Shalhevet, J., Huck, M. G. and Schroeder, B. P. (1995). Root and shoot growth responses to salinity in maize and soybean. *Agronomy Journal*, 87(3),

بیشتری جذب می‌کند (Huang *et al.*, 2019). بخشی از نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های (Zhang *et al.* (2020) مبنی بر مقاومت به شوری ذرت با افزایش تخلخل خاک، مشابهت دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که ω_{Si} های تجربی به‌دست‌آمده دارای شکل‌های غیرخطی بوده و از توابعی مانند تابع ون‌گنوختن تبعیت می‌کند. ثانیه حدود تحمل به شوری گیاه ذرت در خاک‌هایی با خصوصیات مختلف، متفاوت است و با کاهش جرم مخصوص ظاهری، تحمل به شوری گیاه بیشتر می‌شود. بنابراین نمی‌توان یک مقدار ثابت را به عنوان حد تحمل به شوری برای گیاه ذرت گزارش نمود. علاوه بر این، توابع ω_{Si} هایی که قبلاً پیشنهاد شده بود، مورد آزمون‌های عملی قرار نگرفته بودند و نیز

- 512-516.
- Steppuhn, H. and Asay, K. (2005). Emergence, height, and yield of tall, NewHy, and green wheatgrass forage crops grown in saline root zones. *Canadian journal of plant science*, 85(4), 863-875.
- Taghizadeh Ghassab, A., Safadoust, A. and Mosaddeghi, M. R. (2017). Effects of Salinity and Sodicy of Water and Soil Texture on Some Soil Mechanical Properties and Optimum Water Content for Tillage. *Journal of Water and Soil Science*, 31(3), 419-430. (In Farsi).
- Van Genuchten, M. T. (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1," *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten, M. T., Hoffman, G. J. (1984). In: Shainberg, I., Shalhevet, J. (Eds.), *Analysis of Crop Salt Tolerance Data*. Ecological Studies, Springer, New York, 51, 258-271.
- Zalacáin, D., Martínez-Pérez, S., Bienes, R., García-Díaz, A. and Sastre-Merlín, A. (2019). Salt accumulation in soils and plants under reclaimed water irrigation in urban parks of Madrid (Spain). *Agricultural water management*, 213, 468-476.
- Zhang, Z., Zhang, Z., Lu, P., Feng, G. and Qi, W. (2020). Soil Water-Salt Dynamics and Maize Growth as Affected by Cutting Length of Topsoil Incorporation Straw Under Brackish Water Irrigation. *Agronomy*, 10(2), 246.