

ارزیابی اثرات تراکم خاک بر شاخص‌های فراهمی آب خاک و برخی ویژگی‌های رشدی گیاه نیشکر

چکیده

مزارع نیشکر در استان خوزستان به دلیل تردد ماشین‌آلات سنگین وزن و همچنین شرایط اقلیمی خاص، در معرض خطر تراکم خاک قرار دارند. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات تراکم بر شاخص‌های فراهمی آب خاک و برخی صفات رشدی گیاه نیشکر اجرا گردید. در مجموع، بر اساس شرایط واقعی حاکم در مزرعه، نه تیمار تراکم شامل سه سطح فشار ادوات کشاورزی (کم، متوسط و زیاد) و سه سطح رطوبتی خاک (کم، بهینه و زیاد) تعریف شد. در اوایل فصل رشد نمونه‌های خاک از دو عمق سطحی و زیر سطحی جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های معمول فیزیکی و همچنین شاخص‌های فراهمی آب خاک شامل آب قابل استفاده گیاه (PAW)، دامنه رطوبتی خاک با حداقل محدودیت (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی (IWC) تهیه شد. منحنی رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات و غشاء فشاری و منحنی مقاومت خاک با استفاده از پنترومتر دستی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. شاخص‌های رشدی گیاه شامل قطر یقه نی، ارتفاع نی، رطوبت نسبی غلاف و وزن تر اندام هوایی بودند. نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های فراهمی آب خاک نشان داد که در لایه سطحی خاک هم اثر ساده تراکم و هم اثرات متقابل آن‌ها بر شاخص LLWR و IWC در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. کمترین مقدار LLWR و IWC به ترتیب با مقادیر 0.026 و $0.017 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ در کرت با بیشترین تراکم و بیشترین رطوبت خاک (W3P3) مشاهده شد. ارتفاع و عملکرد نی نیز در سطح پنج درصد تحت تاثیر تیمارها قرار گرفتند و کمترین میزان عملکرد نی با مقدار 38 تن در هکتار در تیمار تراکم زیاد و رطوبت زیاد مشاهده شد. پیه شنهاد گردید در پژوهش‌های بعدی مقدار بهینه رطوبت خاک برای عملیات برداشت محصول برای هر کلاس بافتی خاک به صورت علمی و دقیق تعیین گردد.

کلیدواژه‌ها: فشار ادوات کشاورزی، آب قابل استفاده گیاه، دامنه رطوبتی خاک با حداقل محدودیت، گنجایش آب انتگرالی، رطوبت بهینه

Effects of soil compaction on soil water availability indicators and some growth characteristics of sugarcane plant

ABSTRACT

The present study was conducted to investigate the effects of soil compaction on soil water availability indicators and some growth characteristics of sugarcane plants. A total of nine compaction treatments were defined, including three levels of agricultural tools pressure and three levels of soil moisture. Soil samples were collected at the beginning of the growing season from the topsoil and subsoil layers to measure the usual physical properties as well as the indices. Soil water availability indicators including plant available water (PAW), least limiting water range (LLWR) and integral water capacity (IWC) were calculated. The soil moisture curve was measured using a pressure plate and membrane devices and the soil resistance curve was measured using a manual penetrometer in the laboratory. Plant growth indicators included straw collar diameter (D), straw height (H), sheath relative water content (RWC), and shoot weight (Y). The results of ANOVA showed that both the simple effects of compaction factors and interaction effects of compaction \times soil moisture on LLWR and IWC indicators in the soil surface layer were significant ($p < 0.05$). The lowest values of LLWR and IWC were observed in the plot with the highest compaction and soil moisture (W3P3), with values of 0.026 and $0.017 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively. The lowest Y was also observed in the treatment of high compaction and high soil moisture (W3P3), with a value of $38 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. It was suggested that the next research should scientifically and accurately determine the optimal value of soil water for each class of soil texture.

Keywords: Agricultural tools pressure, Integral water capacity, least limiting water range, plant available water, optimal soil water

مقدمه

پدیده‌ی تراکم یا فشردگی خاک‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اشکال تخریب فیزیکی خاک محسوب می‌شود که به‌طور ویژه در کشت‌های مکانیزه مورد توجه است. تراکم خاک بر وضعیت آب در خاک، فرسایش، چرخه‌ی عناصر و رشد گیاهان مؤثر است؛ ضمن اینکه وضعیت رطوبتی خاک نیز بر شاخص تراکم‌پذیری خاک‌ها اثرگذار می‌باشد (O'Sullivan and Simota, 1995). اتحادیه‌ی اروپا فشردگی خاک را به‌عنوان یکی از تهدیدات اساسی تخریب خاک معرفی نموده است (Gürsoy, 2021). شنا سایی و اندازه‌گیری فشردگی خاک مشکل است و می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را بدون بروز علائم آشکار و قابل پایش محدود نماید (McGarry and Sharp, 2003). تراکم خاک را می‌توان افزایش جرم مخصوص ظاهری یا کاهش تخلخل خاک در اثر بارهای وارده‌ی خارجی و یا داخلی توصیف نمود. در عرصه‌ی تولیدات کشاورزی، فشردگی خاک به‌عنوان یک مشکل چندوجهی در نظر گرفته شده که می‌تواند منجر به بروز مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی چشمگیری شود (Gürsoy, 2021). رخداد تراکم در خاک‌ها سبب کاهش تهویه، تغییر در توزیع اندازه‌ی منافذ، کاهش گنجایش نگهداری آب و افزایش مقاومت مکانیکی خاک می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش عملکرد گیاه است (Nawaz et al., 2013). مجموع اثرات این تغییرات ممکن است از نظر کمی با مفهوم دامنه‌ی آب با کمترین محدودیت (LLWR)¹ و گنجایش آب انتگرالی (IWC)² که بیان‌کننده‌ی آب قابل دسترس گیاه هستند، قابل بیان باشند. کشت و صنعت‌های نیشکری در استان خوزستان که به‌عنوان قطب اصلی کشت نیشکر در کشور محسوب می‌شوند؛ اراضی هستند که به‌واسطه‌ی استفاده از ادوات و ماشین‌آلات سنگین و نیمه‌سنگین متعدد در مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت؛ خطر وقوع تراکم خاک در آنها بالا است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۲). نیشکر (*Saccharum officinarum L.*) گیاهی C₄ از تیره‌ی غلات است که عموماً در مناطق حاره‌ای و نیمه حاره‌ای کشت می‌شود (Wang et al., 2020; Yousefi et al., 2018). در استان خوزستان فصل برداشت نیشکر مصادف با فصول پاییز و زمستان است که معمولاً مقارن با بارش باران است. بارندگی‌های پیش‌بینی نشده در فصل برداشت سبب می‌شود که به دلیل وجود رطوبت زیاد در مزارع؛ تراکم‌پذیری خاک تشدید شود (Monjezi and Marzban, 2022).

پیشینه پژوهش

مطالعات نشان داده است که شاخص‌های LLWR و IWC برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک به‌طور ویژه در رابطه با تراکم خاک شاخص‌های مناسبی هستند (De Lima et al., 2021; Liu et al., 2021). تراکم خاک با اثرگذاری بر فراوانی و هندسه‌ی خلل و فرج خاک سبب کاهش شاخص LLWR خاک‌ها می‌گردد که با کاهش مقدار LLWR و کاهش مقاومت خاک‌ها در برابر تنش‌های محیطی؛ رشد گیاه در این خاک‌ها با محدودیت مواجه شده و به دنبال آن عملکرد گیاه کاهش می‌یابد بدین ترتیب می‌توان از این شاخص‌ها (LLWR و IWC) جهت ارزیابی عملکرد گیاه نیز استفاده نمود (Zou et al., 2000). زنگی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی ارتباط بین ویژگی‌های رطوبتی خاک، آب قابل استفاده گیاه، LLWR و IWC را با شاخص دکستر (S) در کلاس‌های بافتی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش شاخص دکستر با کاهش معنی‌دار مقدار انرژی انتگرالی آب در دامنه‌ی آب قابل استفاده گیاه همراه است. براساس نتایج این پژوهش، مهمترین عوامل تعیین‌کننده‌ی مقدار شاخص انرژی انتگرالی آب در رطوبت‌های مختلف؛ شکل منحنی رطوبتی خاک³ و شاخص دکستر بودند. با توجه به نتایج حاصله از این پژوهش امکان تمایز کیفیت فیزیکی خاک‌های با مقدار یکسان دامنه‌ی رطوبتی با استفاده از شاخص انرژی انتگرالی آب وجود دارد.

اندازه‌گیری شاخص‌های LLWR، IWC و شاخص دکستر در ارتباط با کیفیت فیزیکی خاک سطحی و زیر سطحی در مزارع تحت کشت گندم و آفتابگردان نشان داد که کیفیت خاک زیر سطحی پایین‌تر از خاک سطحی است که احتمالاً بدلیل تشکیل کفه‌ی شخم متأثر از عملیات‌های خاکورزی می‌باشد. همچنین مزرعه گندم نسبت به مزرعه آفتابگردان کیفیت فیزیکی بهتری داشت که این مساله بدلیل تردد انسان و تراکم خاک در مزارع آفتابگردان و تفاوت سیستم ریشه دو گیاه می‌باشد (Osmani et al., 2020). طی پژوهشی

¹ Least limiting water range, LLWR

² Integrated water content, IWC

³ Soil moisture characteristics curve (SMCC)

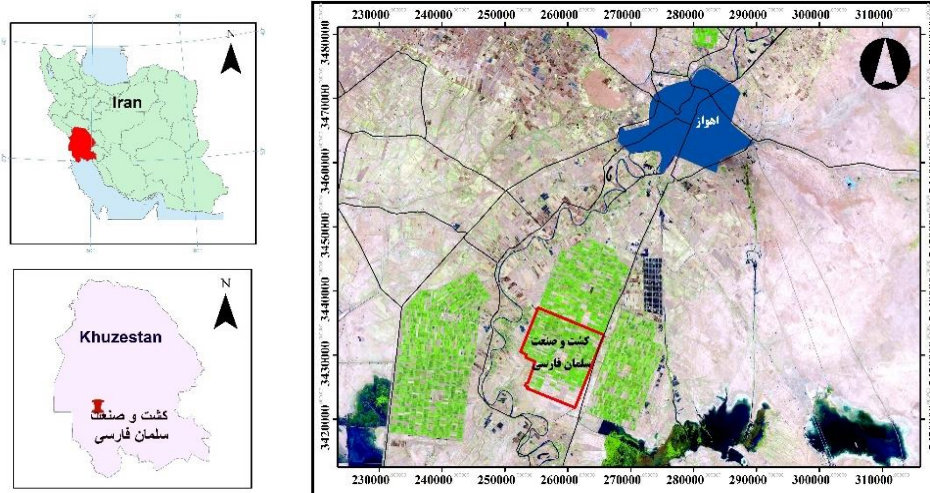
داسیلوا و کی (۱۹۹۷) با استفاده از توابع انتقالی به بررسی ارتباط بین میزان ماده آلی، درصد رس و جرم مخصوص ظاهری با شاخص LLWR پرداختند. نتایج نشان داد که رابطه‌ای مستقیم بین میزان ماده‌ی آلی خاک با مقدار LLWR وجود دارد ولیکن با جرم مخصوص ظاهری و درصد رس دارای رابطه‌ی معکوس می‌باشد. نی‌شابوری و همکاران (۲۰۱۴) برای برآورد مستقیم LLWR از ویژگی‌هایی از قبیل بافت، ماده‌ی آلی، جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم و نسبت سدیم تبادلی با روش رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نمودند. نتایج حاصله مؤید وجود ارتباط بین بافت خاک و درصد ماده آلی با شاخص LLWR می‌باشد. همچنین وقوع تراکم یا فشردگی در خاک می‌تواند این ویژگی‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در پژوهشی تأثیر روش‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولوژیکی خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت خاک و کمترین شاخص LLWR در مزارع با شرایط بدون خاک‌ورزی قابل مشاهده است. در مقابل، بیشترین مقدار LLWR مربوط به مزارع با خاک‌ورزی عمیق می‌باشد. در واقع، در مزارع بدون خاک‌ورزی تراکم خاک باعث محدود شدن دامنه LLWR گردید. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش تراکم خاک، مقاومت مکانیکی و تخلخل تهویه‌ای عوامل اصلی محدودیت جذب آب هستند (Kahlon and Chawla, 2017). در پژوهش دیگری، حقیقی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر انواع سیستم خاک‌ورزی بر شاخص LLWR پرداختند. نتایج آنها نشان داد که کمترین مقدار LLWR در خاک‌های متراکم مشاهده شد، اما بین سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. بدین ترتیب مقاومت مکانیکی خاک مهم‌ترین عامل محدود کننده در خاک خشک محسوب می‌شود.

لازم به ذکر است که در کشت و صنعت‌های نیشکر در استان خوزستان با توجه به تردد زیاد ادوات کشاورزی با وزن بسیار زیاد و همچنین نوع خاک و رطوبت خاک هنگام تردد؛ مسأله تراکم خاک به حد زیادی مشکل ساز شده است (مهردادیان و همکاران، ۱۳۹۰؛ مرادی و همکاران، ۱۳۹۲؛ قناعتی و همکاران، ۱۳۸۹). هرچند که در سال‌های گذشته مطالعاتی در خصوص پیامدهای تراکم خاک بر کیفیت خاک و رشد گیاه انجام شده (مرادی و همکاران، ۱۳۹۲، لرزاده و همکاران، ۱۳۸۱)، اما تاکنون تأثیر فشار ناشی از وزن و تردد ماشین‌آلات مختلف در مقادیر مختلف رطوبت خاک بر فشردگی و تراکم خاک با استفاده از شاخص‌های فراهمی آب خاک برای گیاه در این اراضی بررسی نشده است. بدین ترتیب با توجه به وجود ارتباطات معنی‌دار بین ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک‌ها، تراکم‌پذیری و شاخص‌های فراهمی آب در خاک‌ها بالاخص در خاک‌هایی که تحت کشت‌های مکانیزه هستند؛ لذا پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات تراکم خاک متاثر از خاک‌ورزی و برداشت محصول در کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان بر شاخص‌های فراهمی آب و شاخص دکستر پایریزی و عملیاتی شده است.

روش‌شناسی پژوهش

موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

این پژوهش در استان خوزستان در منطقه‌ی مطالعاتی کشت و صنعت سلمان فارسی واقع در ۴۰ کیلومتری جاده اهواز-آبادان با مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۷ دقیقه عرض و ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شد (شکل ۱). خاک این اراضی از نظر بافت عمدتاً در کلاس لومرسی سیلتی قرار دارد. متوسط ارتفاع منطقه‌ی مطالعاتی از سطح دریا ۵ متر می‌باشد. براساس آماره بلندمدت هواشناسی (۲۱ ساله) اقلیم منطقه گرم و خشک، میزان بارندگی کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال و میانگین دما ۲۶/۳ درجه سانتی‌گراد است (سازمان هواشناسی استان خوزستان، ۱۳۹۹).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی در استان خوزستان

اعمال سطوح مختلف رطوبت و تراکم خاک

با توجه به همگن بودن خاک در مزارع نیشکر (جدول ۱)، دو عامل رطوبت خاک و فشار وارده به خاک جهت ایجاد تراکم خاک انتخاب شدند. از طرف دیگر، بیشترین پتانسیل ایجاد تراکم در مرحله‌ی برداشت نیشکر ناشی از وزن دستگاه برداشت (هاروستر) و سید حمل نی می‌باشد. بنابراین، تعداد سه سطح تراکمی شامل (۱) یکبار عبور هاروستر و یکبار عبور سید حمل نی خالی (P1)، (۲) یکبار عبور هاروستر و یکبار عبور سید حمل نی نیمه پر (P2) و (۳) یکبار عبور هاروستر و یکبار عبور سید حمل نی کاملاً پر (P3) در سه سطح رطوبتی خاک شامل (۱) رطوبت بهینه (۱۴ درصد وزنی، W2)، (۲) رطوبت کمتر از بهینه (۱۲ درصد وزنی، W1) و (۳) رطوبت بیشتر از بهینه، (۱۶ درصد وزنی، W3) در نظر گرفته شد. وزن هاروستر تقریباً ۱۴ تن و وزن سید حمل نی هنگام پر بودن حدوداً ۱۸ تن و هنگام خالی بودن حدود ۵ تن است. لازم به ذکر است که تعداد و نوع ترددها و همچنین شرایط رطوبتی انتخاب شده بر اساس واقعیت‌های موجود در مزارع نیشکر و بر اساس نظر کارشناسان کشت و صنعت سلمان فارسی انتخاب شدند. در این کشت و صنعت، بر اساس تجربه رطوبت بهینه‌ی خاک مزارع برای تردد ماشین‌آلات در هنگام برداشت محصول حدود ۱۴ درصد وزنی تعیین شده است. تیمارها در اسفندماه ۱۴۰۱ اجرا شدند؛ به این صورت که ابتدا کل مزرعه آبیاری شد و سپس با پایش روزانه رطوبت خاک و رسیدن به محدوده‌های رطوبتی مورد نظر ادوات برداشت نیشکر (هاروستر و سید حمل نی) در سه حالت مختلف در سطح مزرعه عبور داده شدند. ضمناً پشته‌ها به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شدند.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی خاک به تفکیک عمق

عمق خاک (cm)	مقدار رس (%)	مقدار شن (%)	مقدار سیلت (%)	مقدار ماده آلی (%)	جرم مخصوص ظاهری (g cm-3)
۰-۳۰	۲۵/۴ (۳۱)*	۲۹/۵ (۴/۸)	۴۴/۸ (۶/۱)	۱/۲۹ (۰/۱۳)	۱/۵۵ (۰/۰۹)
۳۰-۶۰	۲۷/۸ (۲/۶)	۳۱/۸ (۶/۱)	۳۹/۳ (۸/۴)	۱/۱۴ (۰/۱۱)	۱/۶۱ (۰/۱۵)

*: اعداد داخل پرانتز، انحراف از استاندارد داده‌ها را نشان می‌دهد (n = 10).

نمونه برداری خاک

برای تعیین شاخص‌های فراهمی آب، در اوایل فصل رشد گیاه (اردیبهشت و خرداد ماه ۱۴۰۰) نمونه برداری از خاک از دو عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری به صورت دست‌نخورده توسط دستگاه Core Sampler از هر تیمار انجام شد. برای تعیین سایر ویژگی‌های خاک از جمله بافت و ماده آلی خاک نیز نمونه‌های مرکب دست‌خورده در چندین تکرار از هر تیمار برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید.

تعیین شاخص‌های فراهمی آب

۱. شاخص آب قابل استفاده گیاه (PAW)

طبق رابطه ۱، آب قابل استفاده گیاه دامنه رطوبتی بین ظرفیت مزرعه (θ_{FC}) و نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) بوده و برای محاسبه آن به این دو ضریب رطوبتی نیاز است که از طریق دستگاه صفحات و غشاء فشاری به ترتیب در فشار ۰/۰۳ و ۱/۵ مگاپاسکال تعیین شدند (Wilson et al., 2013).

$$PAW = \theta_{FC} - \theta_{PWP} \quad \text{رابطه ۱}$$

۲. شاخص دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)

شاخص LLWR نیز طبق تعریف بیانگر دامنه رطوبتی خاک بین دو حد بالا و پایین بوده که حد بالایی آن θ_{FC} یا رطوبت معادل تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (θ_{AFP}) (هر کدام که کمتر باشد) و حد پایینی آن θ_{PWP} یا رطوبت معادل مقاومت مکانیکی ۲/۵ مگاپاسکال (θ_{SR}) (هر کدام که بیشتر باشد) در نظر گرفته می‌شود (da Silva et al., 1994). رطوبت θ_{FC} معادل پتانسیل ماتریک ۰/۰۳ مگاپاسکال و θ_{PWP} معادل پتانسیل ماتریک ۱/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. همچنین θ_{SR} از منحنی مقاومت خاک و θ_{AFP} با داشتن جرم مخصوص ظاهری (D_b) و حقیقی خاک (D_s) توسط رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\theta_{AFP} = \left[\left(1 - \frac{D_b}{D_s} \right) - 0.1 \right] \quad \text{رابطه ۲}$$

برای تعیین منحنی رطوبتی خاک، ابتدا نمونه‌های دست‌نخورده برداشت شده از اعماق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری اشباع و وزن اشباع آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه صفحات فشاری قرار گرفتند و رطوبت معادل آن‌ها در مکش‌های ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۱/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد (da Silva et al., 1994). زمان به تعادل رسیدن نمونه‌ها بر اساس توقف خروج آب از لوله خروجی دستگاه تعیین شد. برای تعیین θ_{FC} و θ_{PWP} داده‌های آزمایشگاهی منحنی رطوبتی توسط نرم افزار RETC^۴ به مدل ونگنوختن برازش داده شد. در این نرم‌افزار پس از انتخاب مدل و وارد کردن داده‌های بدست آمده از دستگاه صفحات فشاری ضرایب مدل منحنی رطوبتی شامل α ، θ_r ، θ_s و n و m محاسبه شدند.

برای تعیین ضرایب مدل منحنی مقاومت خاک نیز از یک دستگاه پنترومتر دستی مدل ASTM D1558 استفاده شد. برای این منظور، نمونه‌های دست‌نخورده پس از خروج از دستگاه صفحات فشاری به سه دسته سه تایی تقسیم شدند و هر دسته در یکی از شرایط رطوبتی شامل مکش ۰/۰۳، ۰/۵ و ۱/۵ مگاپاسکال قرار گرفتند. سپس مقاومت مکانیکی خاک در عمق میانی هر نمونه و با سه تکرار اندازه‌گیری شد و ضرایب مدل مقاومت مکانیکی (a و b) از طریق برازش داده‌های اندازه‌گیری شده (مقاومت مکانیکی در برابر مکش خاک) در نرم افزار اکسل بدست آمدند (رابطه ۳).

^۴ Retention curve (RETC)

$$R = a \theta^b \quad \text{رابطه ۳}$$

با داشتن ضرایب مدل منحنی رطوبتی خاک و همچنین ضرایب مدل مقاومت مکانیکی خاک، شاخص‌های فراهمی آب در هر تیمار توسط نرم‌افزار SAWCal^۵ محاسبه شد (Asgarzadeh et al. 2014). نرم‌افزار SAWCal یک نرم افزار ساده و کاربرپسند است که با زبان C# نوشته شده و برای محاسبه LLWR و IWC فقط به پارامترهای مدل نگهداشت آب و ننگوختن و مقاومت مکانیکی خاک نیاز دارد.

۳. شاخص گنجایش آب انتگرالی (IWC)

گنجایش آب انتگرالی شکل ۱ صلاح شده‌ی شاخص LLWR است. از جمله معایب شاخص LLWR این است که برای محدودیت‌های تهویه، مقاومت مکانیکی و پتانسیل آب یک آستانه‌ی ثابت و ناگهانی در نظر می‌گیرد، در صورتی که اثر این عوامل تدریجی است. علاوه بر این، عامل هدایت هیدرولیکی در شاخص LLWR لحاظ نشده است. گنجایش آب انتگرالی هر دو محدودیت مذکور را برطرف نموده است. در این روش، مقدار کل آب قابل استفاده گیاه طبق رابطه ۴ از حاصل ضرب توابع وزنی مربوط به هر محدودیت در مقدار آب خاک به دست می‌آید (Groenevelt et al., 2001).

$$IWC = \int_0^{\infty} \left(\prod_{i=1}^n \omega_i(h) \right) C(h) \cdot dh \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن $C(h)$ گنجایش ویژه رطوبتی (cm^{-1})، توابع وزنی (بین صفر و یک) برای انواع محدودیت‌ها و h مکش ماتریک (cm) است. گنجایش ویژه رطوبتی از مشتق‌گیری معادله‌ی منحنی رطوبتی خاک به دست می‌آید. در این روش، چهار عامل محدود کننده شامل تهویه، هدایت هیدرولیکی، مقاومت مکانیکی و پتانسیل آب وجود دارد که تهویه و هدایت هیدرولیکی زیاد در دامنه‌ی مرطوب و مقاومت مکانیکی و هدایت هیدرولیکی کم در دامنه‌ی خشک خاک تاثیرگذار هستند. توابع وزنی هر کدام از این عوامل در جدول ۲ (روابط ۵ تا ۸) ارائه شده‌اند که مقدار آنها بین صفر و یک تغییر می‌کند. مقدار صفر بیانگر محدودیت شدید و مقدار ۱ عدم تاثیرگذاری را نشان می‌دهد. مقدار IWC نیز با داشتن ضرایب منحنی رطوبتی و منحنی مقاومت خاک در نرم‌افزار SAWCAL محاسبه شد (Asgarzadeh et al., 2014)، با این تفاوت که علاوه بر ضرایب مدل منحنی رطوبتی به یک ضریب a که مربوط به مدل منحنی هدایت هیدرولیکی معلم است، نیاز دارد. این ضریب توسط نرم افزار RETC تعیین گردید.

جدول ۲. معادلات مورد استفاده در محاسبه‌ی شاخص IWC

نوع محدودیت	تابع وزنی	
تهویه	$\omega_a(h) = \frac{\log(h) - \log(h_0)}{\log(h_f) - \log(h_0)}$	رابطه ۵
هدایت هیدرولیکی زیاد	$\omega_{kwet}(h) = \left[\frac{K_r(330)}{K_r(h)} \right]^p$	رابطه ۶
هدایت هیدرولیکی کم	$\omega_{kdry}(h) = \left[\frac{K_r(12000)}{K_r(h)} \right]^{-d}$	رابطه ۷
مقاومت مکانیکی خاک	$\omega_r(h) = 2.5 - (ah^b)$	رابطه ۸

⁵ - [Soil Available Water Calculator](#)

که در روابط بالا، h_0 و h_f به ترتیب مکش ماتریک در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ و ۱۵ در صد، $K_r(h)$ ، $K_r(330)$ و $K_r(12000)$ به ترتیب هدایت هیدرولیکی نسبی، هدایت هیدرولیکی در مکش ماتریک ۰/۰۳۳ مگاپاسکال و هدایت هیدرولیکی در مکش ماتریک ۱/۲ مگاپاسکال است. علائم p ، d و a و b ضرایب مدل‌ها هستند.

اندازه‌گیری صفات گیاهی

به منظور ارزیابی پاسخ گیاه نیشکر به تغییرات فیزیکی خاک و شاخص‌های فراهمی آب در پایان فصل رشد گیاه ارتفاع نی، قطر نی و عملکرد نی در هر تیمار اندازه‌گیری شد. برای این کار، در هر تیمار به‌طور تصادفی سه کرت نمونه‌برداری به ابعاد ۱ در ۲ متر با استفاده از طناب تفکیک گردید. ابتدا در هر ایستگاه ارتفاع و قطر نی‌ها با متر اندازه‌گیری شد و سپس به صورت دستی تمام نی‌ها برداشت و توزین گردید. با توجه به اینکه که در برخی مزارع نیشکر از متغیر رطوبت نسبی غلاف برگ نیشکر به عنوان شاخصی از وضعیت آب خاک و گیاه و تعیین زمان آبیاری استفاده می‌شود، در این پژوهش رطوبت نسبی غلاف برگ در سه نوبت و قبل از هر نوبت آبیاری اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌ی آماری

تجزیه‌ی نتایج به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو عامل فشار ادوات و رطوبت خاک در حین عبور ادوات توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۳ صورت پذیرفت. همچنین مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

۱. تأثیر تراکم خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و شاخص‌های فراهمی آب خاک

تجزیه‌ی واریانس شاخص‌های فراهمی آب در لایه‌ی سطحی و زیرسطحی خاک در جدول ۳ ارائه شده است. در لایه سطحی نسبت به لایه زیرسطحی شدت تغییرات محسوس‌تر بوده است. در لایه سطحی اثرات اصلی سطوح مختلف فشار ادوات و سطوح مختلف رطوبت خاک (در حین تردد ماشین‌آلات) در سطح پنج درصد و اثرات متقابل آنها در سطح یک درصد بر شاخص‌های LLWR و IWC معنی‌دار شده است. علاوه بر این، Db در سطح پنج درصد تحت تأثیر اثر متقابل فشار ادوات و رطوبت خاک قرار گرفته است. ولیکن اثرات اصلی و متقابل این دو عامل بر شاخص PAW معنی‌دار نشده است. این نشان می‌دهد که حدود رطوبتی مربوط به تهویه و مقاومت مکانیکی خاک در مقایسه با حدود رطوبتی θ_{FC} و θ_{PWP} نسبت به تراکم خاک حساس‌تر هستند. تراکم خاک از طریق کاهش منافذ درشت و تخلخل کل، افزایش نسبت منافذ ریزتر و افزایش سطح تماس ذرات خاک با یکدیگر باعث کاهش دامنه رطوبتی قابل دسترس گیاه می‌شود (Safadoust et al., 2014). زیرا، اولاً با کاهش تخلخل کل و ریزتر شدن منافذ، تهویه خاک ضعیف شده و احتمال تنش کمبود اکسیژن افزایش می‌یابد، و ثانیاً، با نزدیک‌تر شدن ذرات خاک به یکدیگر، مقاومت خاک در برابر رشد و توسعه ریشه زیاد می‌شود. همچنین با ریزتر شدن منافذ خاک پتانسیل ماتریک و هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. هرچه دامنه LLWR محدودتر باشد به این معنی است که گیاهان در طول فصل رشدشان با تنش‌های فیزیکی مکرر و شدیدتری مواجه هستند (da Silva et al., 1997). در لایه زیرسطحی اثرات اصلی عامل‌ها بر هیچ‌کدام از شاخص‌ها معنی‌دار نبود و فقط اثرات متقابل آنها در سطح پنج درصد بر شاخص LLWR معنی‌دار بود. نتایج Reichert et al. (2004) نیز حاکی از آن است که لایه زیرسطحی کمتر تحت تأثیر تراکم خاک قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، تراکم ایجاد شده در لایه‌های زیرین پایدارتر است، زیرا به آسانی با عملیات خاک‌ورزی یا چرخه‌های ذوب-انجماد اصلاح نمی‌شود.

جدول ۳. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین اثرات ساده دو تیمار مورد مطالعه بر تراکم و شاخص‌های فراهمی آب در خاک سطحی و زیر سطحی

منبع تغییر	لایه سطحی			لایه زیر سطحی			نتایج ANOVA
	PAW cm ³ cm ⁻³	LLWR cm ³ cm ⁻³	IWC cm ³ cm ⁻³	PAW cm ³ cm ⁻³	LLWR cm ³ cm ⁻³	IWC cm ³ cm ⁻³	
W	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
P	ns	*	*	ns	ns	*	ns
W × P	ns	**	**	*	*	**	ns
سطوح رطوبت خاک	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1
سطوح فشار	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1

ns: اختلاف غیرمعنی دار؛ * : معنی دار در سطح ۵ درصد؛ ** : معنی دار در سطح ۱ درصد

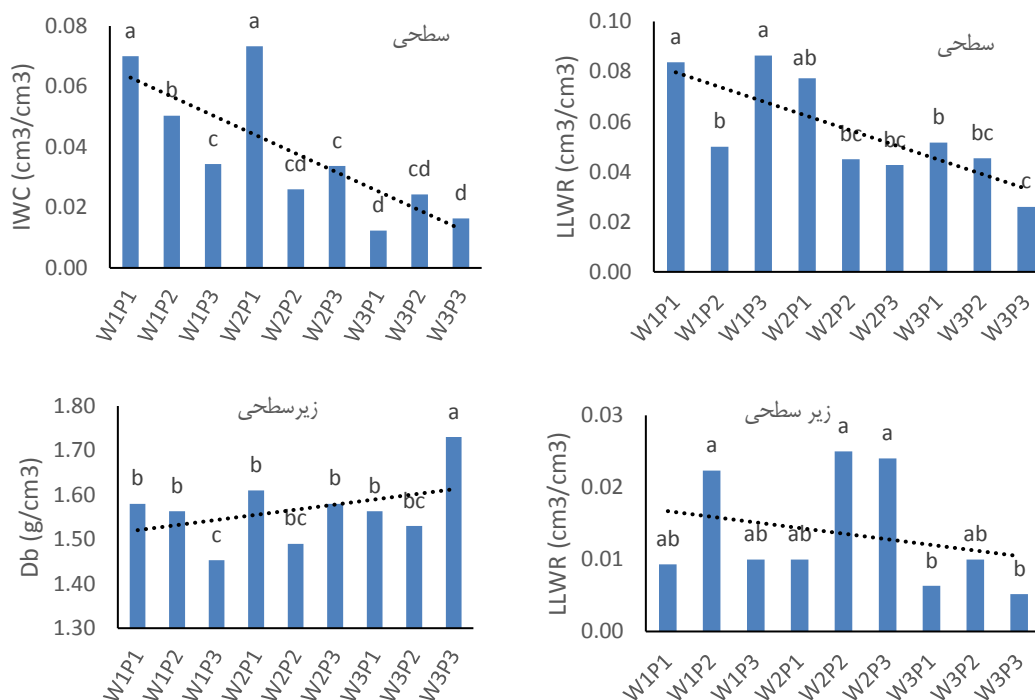
W: رطوبت خاک در زمان برداشت محصول، P: فشار ادوات برداشت و اعداد ۱ تا ۳ نشان دهنده سطح هر کدام از عوامل می‌باشد.

PAW: آب قابل استفاده گیاه، LLWR: دامنه رطوبتی خاک با حداقل محدودیت، IWC: گنجایش آب انتگرالی و Db: جرم مخصوص ظاهری.

نتایج مقایسه‌ی میانگین‌های اثرات ساده (جدول ۳) نشان داد که کمترین مقدار شاخص LLWR و IWC به ترتیب با مقادیر ۰/۰۴۱ و ۰/۰۱۷ cm³cm⁻³ در تیمار رطوبتی W3، یعنی تیماری که رطوبت خاک آن در زمان عبور ادوات برداشت بیشتر از حد بهینه بوده، ایجاد شده است. در مورد شاخص LLWR بین سطح دوم و سوم اختلاف معنی‌دار نیست اما در خصوص شاخص IWC اختلاف معنی‌دار است. بیشترین میانگین شاخص LLWR و IWC در تیمار رطوبتی کمتر از حد بهینه مشاهده شد که مؤید این حقیقت است که حد بهینه رطوبتی معرفی شده برای عملیات برداشت محصول در اراضی نیشکر (رطوبت ۱۴ در صد وزنی) که به صورت تجربی تعیین شده احتمالاً صحیح نبوده و لازم است مطالعات دقیق‌تری با هدف تعیین رطوبت بهینه خاک در مزارع نیشکر در زمان تردد ماشین آلات برداشت انجام شود. بنابراین، با توجه به اهمیت تعیین دقیق رطوبت بهینه خاک در کاهش اثرات تراکم، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده رطوبت بهینه خاک برای کلاس‌های غالب بافت خاک مزارع نیشکر تعیین گردد. در مطالعه‌ای که توسط Barzegar et al. (2000) در مزارع نیشکر هفت تپه انجام شد، رطوبت نزدیک به حد شکل‌پذیری خاک به عنوان رطوبت بهینه معرفی گردید. علاوه بر رطوبت خاک، فشار ادوات (نسبت وزن ادوات به سطح تماس آنها) نیز در تراکم‌پذیری خاک‌ها نقش دارند. مقایسه میانگین‌های اثرات ساده سطوح مختلف فشار ادوات نشان داد که کمترین مقدار LLWR و IWC به ترتیب با مقادیر ۰/۰۵۱ و ۰/۰۲۸ cm³cm⁻³ در تیمار P3 ایجاد شده است. اختلاف موجود بین تیمار P2 و P3 معنی‌دار نیست، اما بین تیمار P1 و P3 معنی‌دار است. این نشان می‌دهد که بیشترین تراکم خاک زمانی رخ می‌دهد که سبد حمل نی در حالت پر در مزرعه تردد دارد. مقایسه میانگین اثرات متقابل (شکل ۲) حاکی از آن است که به طور کلی، روند تغییرات شاخص LLWR و IWC هم در لایه سطحی و هم در لایه زیر سطحی با افزایش سطح هر دو فشار و رطوبت خاک نزولی است. روند افزایشی تغییرات جرم مخصوص ظاهری نیز این موضوع را تایید می‌کند. شدت کاهش شاخص‌های فراهمی آب در لایه سطحی بیشتر و منظم‌تر و در لایه زیر سطحی کمتر و نامنظم‌تر بود. علت نامنظم بودن تغییرات LLWR در لایه زیر سطحی احتمالاً ناشی از ناهمگنی بافت خاک در لایه‌های زیرین باشد. کلاس بافت خاک در عمق ۳۰-۶۰ در دو کلاس لوم رسی سیلتی و شن لومی متغیر بود. در لایه سطحی خاک بیشترین شاخص LLWR و IWC در تیمار W1P1 ایجاد شده است. کمترین مقدار LLWR در تیمار W3P3 (۰/۰۲۶ cm³cm⁻³) و کمترین مقدار IWC در تیمار W3P1 (۰/۰۱۲ cm³cm⁻³) مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص IWC به دلیل در نظر گرفتن منحنی هدایت هیدرولیکی خاک، شاخص حساستری نسبت به اعمال فشار و تراکم شدن خاک در رطوبت‌های بالاتر از حد بهینه است. دلیل

احتمالی این امر، تأثیر وزن ادوات بر منافذ خاک و مسدود شدن مسیر حرکت آب در خاک و در نتیجه شیب کاهشی تندتر در منحنی هدایت هیدرولیکی خاک است.

دامنه تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای مورد مطالعه از $1/45$ (W1P3) تا $1/73$ گرم بر سانتی متر مکعب (W3P3) متغیر بود که نشان دهنده تأثیر بیشتر رطوبت خاک نسبت به فشار ادوات بر فشردگی خاک مزارع نیشکر است. بر اساس تحقیقات انجام شده، دامنه مناسب برای دستیابی به حداکثر رشد و عملکرد گیاه نیشکر در خاک‌های لومی بین $1/1$ تا $1/3$ گرم بر سانتی متر مکعب (Wakgari et al., 2021; Esteban et al., 2019) و دامنه بحرانی که در آن رشد و توسعه ریشه متوقف می شود بین $1/8$ تا $1/9$ گرم بر سانتی متر مکعب (Hunsigi, 2012) ذکر شده است. بر اساس این مقادیر بحرانی، مقدار جرم مخصوص ظاهری تمام مزارع نیشکر بالاتر از مقادیر بهینه و کمی کمتر از دامنه بحرانی قرار دارد که نشان دهنده وجود مشکل فشردگی خاک و مشکل پایداری برای تولید نیشکر در این اراضی است. لازم به ذکر است که نوع بافت خاک بر حد بحرانی جرم مخصوص ظاهری خاک برای ریشه گیاهان تأثیر می گذارد و برای خاک‌های رسی این دامنه کمتر است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد افزایش تراکم خاک از تیمار کمترین سطح فشار و رطوبت (W1P1) به بیشترین سطح فشار و رطوبت خاک (W3P3) حدود $9/5$ درصد است با اینحال موجب کاهش 69 و 77 درصدی مقدار آب قابل دسترس خاک به ترتیب براساس شاخص‌های LLWR و IWC شده است (شکل ۲). یافته‌های این پژوهش با نتایج Kazemi et al. (2021) مغایر است. این پژوهشگران گزارش کردند که با افزایش تراکم خاک از $1/35$ به $1/75$ گرم بر سانتی متر مکعب مقدار شاخص IWC حدود 20 درصد و مقدار LLWR حدود 66 درصد کاهش یافت. آنها همچنین بیان کردند که شاخص LLWR نسبت به IWC در برابر تراکم خاک حساسیت بیشتری دارد.



شکل ۲. مقایسه میانگین‌های شاخص‌های LLWR و PAW و Db در لایه‌های سطحی و زیرسطحی

۲. تأثیر تراکم خاک بر رشد و عملکرد گیاه نیشکر

نتایج تجزیه‌ی واریانس اثر عوامل تراکم بر ویژگی‌های رشدی گیاه (جدول ۴) نشان داد که اثرات ساده سطوح مختلف فشار و سطوح مختلف رطوبت خاک فقط در رابطه با ارتفاع گیاه معنی‌دار بود (سطح پنج درصد). اثرات متقابل عوامل تراکم علاوه بر ارتفاع گیاه بر وزن تر نی نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار گردید. تأثیر فشردگی خاک بر رشد گیاه عمدتاً نتیجه کاهش فضای منفذی و افزایش مقاومت مکانیکی خاک است. افزایش مقاومت مکانیکی خاک ازدیاد طول ریشه را محدود کرده و سبب کاهش جذب آب و عناصر غذایی می‌شود (Yu et al., 2024). اخیراً Pandey et al., 2021 نشان دادند که کاهش ریشه در خاک‌های متراکم شده با افزایش غلظت اتیلن در منافذ اطراف ریشه مرتبط است. آن‌ها اظهار داشتند که تجمع گاز اتیلن به دلیل کاهش ظرفیت انتشار آن ناشی از کاهش فضای منفذی خاک باعث تأخیر در رشد ریشه می‌شود. تأثیر تراکم خاک بر رشد گیاه به نوع بافت خاک و شرایط رطوبتی خاک نیز بستگی دارد. به عنوان مثال، نتایج مطالعه‌ی Mondal and Chakraborty (2023) نشان دادند تأثیر تراکم خاک در خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی کمتر بود و با افزایش رطوبت خاک، تأثیر تراکم بر رشد گیاه کاهش می‌یابد. تراکم خاک از طریق ایجاد محدودیت‌های فیزیکی از جمله تهویه، مقاومت مکانیکی و هدایت هیدرولیکی خاک رشد ریشه‌ی گیاه را محدود می‌کند (Chen et al., 2014).

جدول ۴. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای مورد مطالعه بر شاخص‌های رشدی گیاه نیشکر

H (cm)	RWC (g/g)	Y (t/ha)	D (cm)	منبع تغییر	
*	ns	ns	ns	W	
*	ns	ns	ns	P	ANOVA
*	ns	*	ns	P × W	
۲۰۶/۶۳ a	۰/۸۸	۴۶/۷۷	۲۱/۷۹	W1	
۲۰۶/۵۹ a	۰/۸۶	۴۶/۳۸	۲۰/۲۷	W2	سطوح رطوبت
۱۴۴/۳۷ b	۰/۸۲	۴۱/۰۸	۱۹/۷۳	W3	
۱۹۵/۹۹ a	۰/۸۷	۴۴/۸۷	۲۱/۰۱	P1	
۱۸۲/۸۱ b	۰/۸۶	۴۶/۴۰	۲۰/۲۱	P2	سطوح فشار
۱۷۸/۷۸ b	۰/۸۲	۴۲/۹۷	۲۰/۵۶	P3	

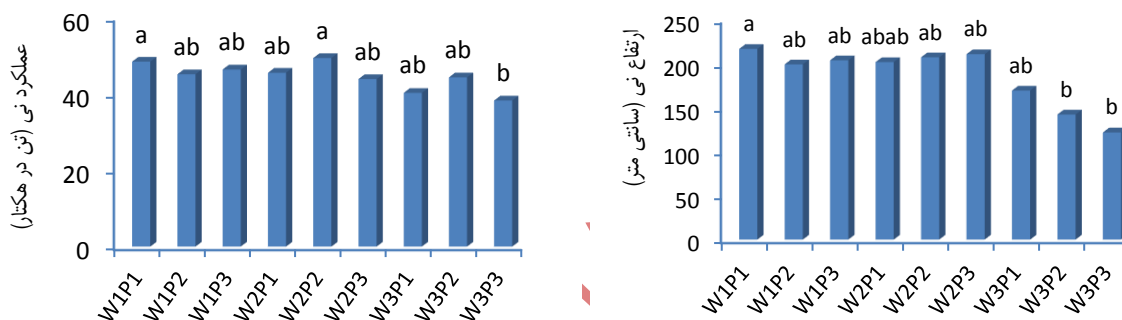
ns: اختلاف غیرمعنی‌دار؛ * : معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ ** : معنی‌دار در سطح ۱ درصد

W: رطوبت خاک در زمان برداشت محصول، P: فشار ادوات برداشت و اعداد ۱ تا ۳ نشان دهنده سطح هر کدام از عوامل می‌باشد.

D: قطر بقیه نی، Y: عملکرد نی (وزن تر نی)، H: ارتفاع نی و RWC رطوبت نسبی برگ.

نتایج بررسی مقایسه میانگین اثرات متقابل فشار ادوات و رطوبت خاک در زمان تردد ماشین‌آلات (شکل ۳) نشان داد که کمترین ارتفاع و عملکرد نی در تیمار W3P3 به ترتیب با مقادیر ۱۲۱/۷ سانتی‌متر و ۳۸/۴ تن بر هکتار و بیشترین مقادیر در تیمارهایی با فشار کم و رطوبت کم (W1P1) اتفاق افتاده است. باتوجه به این که استفاده از هاروستر و سید حمل نی در مزارع نیشکر اجتناب‌ناپذیر است، پیشنهاد می‌گردد برای کاهش آسیب‌های تراکم خاک توجه ویژه‌ای به رطوبت خاک شود. همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد بین تیمار W1P3 و W3P3 که از نظر فشار ادوات یکسان هستند، هرچند اختلاف معنی‌داری بین عملکرد نی مشاهده نشده است اما حدود ۱۷ درصد افت عملکرد ایجاد شده است. در مورد ارتفاع نی نیز بین دو تیمار مذکور حدود ۴۰ درصد افت مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، باتوجه به این که فصل برداشت نیشکر در استان خوزستان معمولاً از شهریور تا اسفند صورت می‌گیرد و عمده بارندگی‌های منطقه این فصول رخ می‌دهد، گاهی سال‌ها برداشت نیشکر در شرایط رطوبتی مناسب خاک امکان‌پذیر نیست (Barzegar et al., 2005). تحت این شرایط استفاده از ادوات سبک‌تر و یا ادواتی که سطح تماس بیشتری با خاک ایجاد می‌کنند، مانند ادوات جفت‌چرخ و یا ادوات زنجیری می‌تواند راهکار مناسبی باشد. در مطالعه‌ی مشابه، لرزاده و همکاران (۱۳۸۱) تأثیر تراکم

خاک بر اجزاء عملکرد و میزان قند نیشکر وارسته CP-48 در استان خوزستان را بررسی کردند و گزارش دادند که با افزایش تراکم خاک تا مقاومت ۶۵۰ کیلوپاسکال هیچ‌گونه کاهش معنی‌داری بر روی عملکرد کمی و کیفی نیشکر ایجاد نگردید، اما با افزایش بیشتر تراکم تا میزان ۳۲۵۰ کیلوپاسکال ارتفاع گیاه، عملکرد نی، تعداد پنجه‌ها در واحد سطح و وزن ماده خشک برگ، ساقه و نی به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. همچنین نتایج آنها نشان داد که تراکم خاک تأثیر معنی‌داری بر میزان قند گیاه و درصد خلوص شربت استخراجی نداشته است. نتایج (Esteban et al. (2019) نیز نشان داد که عملکرد نیشکر در مزارع تحت مدیریت ترافیک کنترل شده در مقایسه با مزارع بدون کنترل به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. آزمایش‌های صحرائی نشان می‌دهد که اقداماتی مانند زیر شکنی می‌تواند اثرات منفی تراکم خاک را تا حد زیادی کاهش دهد. در این راستا، نتایج (Geneti et al. (2021) نشان داده که عملکرد نیشکر در مزارع زیر شکن شده در مقایسه با مزارع بدون زیر شکن حدود ۳۱ درصد افزایش یافت.



شکل ۳. مقایسه میانگین‌های شاخص‌های گیاهی نیشکر تحت تاثیر سطوح مختلف تراکم خاک

۳. روابط بین شاخص‌های فراهمی آب خاک و صفات رویشی گیاه نیشکر

بر اساس نتایج همبستگی بین برخی ویژگی‌های عملکردی گیاه نیشکر و شاخص‌های رطوبتی خاک (جدول ۵) می‌توان گفت که تراکم خاک از طریق کاهش آب قابل دسترس خاک و تخریب ساختمان خاک تا حدودی بر عملکرد گیاه تأثیر گذار بوده است. زیرا، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین شاخص LLWR و عملکرد نی گیاه نیشکر و همچنین قطر یقه بدست آمد. همچنین بین PAW و عملکرد نی و رطوبت نسبی آب برگ همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد. برخی پژوهشگران نیز ارتباط بین شاخص‌های رشدی گیاه با شاخص‌های فراهمی آب را گزارش داده‌اند. (Kazemi et al. (2021) بیان کردند که پاسخ گیاه آفتابگردان به تراکم خاک از طریق شاخص PAW غیرمعنی دار بود، اما در مقابل پاسخ گیاه به تراکم از طریق شاخص LLWR و IWC معنی‌دار بود.

جدول ۵. همبستگی ویژگی‌های عملکردی گیاه نیشکر و شاخص‌های فراهمی آب در خاک

IWC	LLWR	PAW	
cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	
- ۰/۰۱۱	۰/۳۷۹ *	۰/۱۳۸	D (cm)
- ۰/۲۸۱	۰/۳۶ *	۰/۴۰۸ *	Y (t/ha)
- ۰/۲۶۷	۰/۲۹۹	۰/۴۵۹ *	RWC (g/g)

*: معنی دار در سطح ۵ درصد ؛ **: معنی دار در سطح ۱ درصد

D: قطر یقه نی، Y: عملکرد نی (وزن تر نی) و RWC رطوبت نسبی برگ،

PAW: آب قابل استفاده گیاه، LLWR: دامنه رطوبتی خاک با حداقل محدودیت و IWC: گنجایش آب انتگرالی خاک.

هر چند که رابطه‌ی ضعیفی بین ویژگی‌های عملکردی گیاه نیشکر با شاخص LLWR بدست آمد، اما روند تغییرات نشان می‌دهد که رابطه‌ی مستقیمی بین شاخص LLWR و رشد گیاه وجود دارد. علت اینکه روابط بدست آمده ضعیف هستند این است که رشد گیاه تابع عوامل محیطی و خاکی متعددی است و برای بدست آوردن یک رابطه قوی بین عملکرد و خصوصیات خاک، لازم است ویژگی‌های بیشتری در نظر گرفته شوند. خصوصیات خاک شامل مجموع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به‌ویژه میزان فراهمی عناصر غذایی و آب هستند. علاوه بر تنش‌های تهویه و رطوبتی که ناشی از وضعیت رطوبت خاک است، عملکرد محصول به مقدار خیلی زیادی به تنش‌های هواشناسی نیز وابسته است و میزان تأثیر به‌گونه گیاهی یا رقم آن بستگی دارد. معمولاً محصولات غلات و بذر نسبت به سایر گیاهان حساسیت بیشتری به تنش‌های محیطی دارند (Peltonen-Sainio et al., 2010). دمای پایین یا بالا در مراحل حیاتی توسعه مانند جوانه‌زنی و گرده‌افشانی در عملکرد نهایی محصول بسیار حایز اهمیت هستند و معمولاً اثرات منفی آنها با شرایط بهینه بعدی قابل جبران نیستند (Mäkinen et al., 2018). Shah and Paulsen, 2003 بیان کردند که تنش دماهای زیاد می‌تواند کارایی مصرف آب را کاهش دهد حتی زمانی که گیاهان برای رطوبت خاک تحت تنش نباشند. لذا، انتظار این که رابطه‌ی قوی بین عملکرد گیاه با شاخص‌های فراهمی آب به تنهایی وجود داشته باشد، بسیار دور از واقعیت است. علاوه بر این که شاخص همبستگی، روابط خطی بین متغیرها را بررسی می‌کند در حالی که در طبیعت این روابط بیشتر به شکل غیر خطی حاکم است.

نتیجه گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج جرم مخصوص ظاهری خاک اندازه‌گیری شده در این پژوهش و دامنه بهینه ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر، مشکل تراکم خاک در اراضی تحت نیشکر وجود دارد و برنامه‌ریزی برای کاهش آن ضروری است. همچنین نتایج نشان داد که شاخص‌های LLWR و IWC ابزارهای مفیدی برای ارزیابی تراکم خاک هستند و حساسیت لازم را برای نشان دادن تأثیر مدیریت‌های مختلف دارند. لذا، استفاده از آنها در برنامه‌های مدیریت تراکم خاک پیشنهاد می‌گردد. به‌طور کلی، تحلیل نتایج شاخص‌های LLWR و IWC نشان داد که تراکم خاک دسترسی گیاه نیشکر به آب را با محدودیت روبرو می‌کند و کاهش رشد و عملکرد گیاه را به همراه دارد. رطوبت خاک در زمان تردد ادوات کشاورزی نقش بسیار مهمی در شدت تراکم خاک دارد و باتوجه به سهولت و کم‌هزینه بودن مدیریت و کنترل آن نسبت به وزن ادوات، پیشنهاد می‌گردد توجه ویژه‌ای به آن شود و حدود بهینه و بحرانی آن برای هر کلاس بافتی به‌طور دقیق تعیین گردد. همچنین باتوجه به اهمیت آستانه‌های حدود رطوبتی خاک که برای محاسبه شاخص‌های LLWR و IWC استفاده می‌شوند، توصیه می‌شود در مطالعات آینده حتی الامکان آستانه‌ی بحرانی مقاومت مکانیکی و تهویه‌ای برای گیاه نیشکر تعیین گردد.

تقدیر و تشکر

بعدا تکمیل خواهد شد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

فهرست منابع

- زنگی آبادی، مهدی؛ گرجی اناری، منوچهر؛ شرفا، مهدی؛ کشاورز، پیمان و عادت، سعید. (۱۳۹۶). ارتباط انرژی انتگرالی آب در دامنه‌های مختلف رطوبتی با شاخص S در خاک‌های با بافت متوسط و سبک. *مجله آب و خاک*. ۳۱ (۲)، ۳۸۶-۳۹۸. doi: 10.22067/jsw.v31i2.53472
- سازمان هواشناسی. (۱۳۹۹). هواشناسی استان خوزستان. قابل دسترسی در آدرس اینترنتی <https://www.irimo.ir/far/index.php>
- قناعتی، علی؛ بهرامی، هوشنگ؛ و شیخ داوودی، محمدجواد. (۱۳۸۹). ارزیابی میزان فشردگی خاک ناشی از برداشت مکانیزه نیشکر در رطوبت های مختلف خاک در مزارع کشت و صنعت دعبل خزاعی اهواز. *مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)*، ۳۳ (۲)، ۱-۱۲. SID. <https://sid.ir/paper/233728/fa>
- کاظمی، زهرا؛ نیشابوری، محمدرضا؛ زارع حقی، داوود و عسگرزاده، حسین. (۱۳۹۷). محاسبه گنجایش آب تجمعی با بکارگیری دمای پوشش سبز گیاه در فشردگی های مختلف خاک. *مجله پژوهش های خاک*. ۳۲ (۲)، ۲۱۹-۲۲۹. doi: 10.22092/ijsr.2018.117042
- لرزاده، شاپور؛ نادیان، حبیب اله؛ بخشنده، عبدالمهدی؛ نورمحمدی، قربان و درویش، فرخ. (۱۳۸۱). اثرات سطوح مختلف تراکم خاک بر روی عملکرد، اجزا عملکرد و میزان قند نیشکر واریته ۱۰۳-۴۸ CP در استان خوزستان. *مجله علوم زراعی ایران*، ۴ (۱)، ۳۶-۴۷. SID. <https://sid.ir/paper/57118/fa>
- مرادی، فرزاد؛ خلیلی مقدم، بیژن؛ جعفری، سیروس و قربانی دشتکی، شجاع. (۱۳۹۲). تأثیر کشت و کار مکانیزه طولانی مدت بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک در تعدادی از کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان. *مجله آب و خاک*. ۲۷ (۶)، ۱۱۵۳-۱۱۶۵. doi: 10.22067/jsw.v0i0.33121
- مهردادیان، علیرضا؛ آسودار، محمدمین و عباسی، فاطمه. (۱۳۹۰). اثر تردد ماشین های برداشت بر فشردگی خاک های مزارع نیشکر جنوب غربی خوزستان. *مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)*، ۳۴ (۲)، ۱-۱۴. SID. <https://sid.ir/paper/233766/fa>

REFERENCES

- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., & Nikbakht, A. M. (2014). SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. *Computers and electronics in agriculture*, 109, 86-93.
- Barzegar, A., Mahmoudi, S. H., Hamed, F., & Abdolvahabi, F. (2005). Long term sugarcane cultivation effects on physical properties of fine textured soils. *J. Agric. Sci. Technol.* (7) و 59-68.
- Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>.
- da Silva, A. P., & Kay, B. D. (1997). Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, 61(3), 877-883.
- da Silva, A.P. Kay, B.D. and Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775-1781.
- De Lima, R. P., Rolim, M. M., da C. Dantas, D., da Silva, A. R., & Mendonça, E. A. S. (2020). Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields. *Soil Use and Management*. doi:10.1111/sum.12601 (<https://doi.org/10.1111/sum.12601>)
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., & de Paula Ribeiro, N. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71.
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., & de Paula Ribeiro, N. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71.
- Geneti, D. (2021). Effect of Soil Compaction on Growth, Yield and Quality of Sugarcane (*Saccharum Officinarum* L.) Crop and Its Management: A Review.
- Ghanaati, A., Bahrami, H., & Sheikh Davoodi, M.J. (2011). The evaluation of soil compaction upon mechanized harvesting at different soil water contents on sugarcane fields of Debale Khazaei Agro Industrial in Ahvaz. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 33(2), 1-12. Sid. <https://Sid.Ir/Paper/233728/En> (In Persian).
- Groenevelt, P., Grant, C. & Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*. 39, 577-598.

- Gürsoy, S. (2021). Soil compaction due to increased machinery intensity in agricultural production: its main causes, effects and management. *Technology in agriculture*, 1-18.
- Haghighi Fashi, F., Gorji, M., & Sharifi, F. (2017). Least limiting water range for different soil management practices in dryland farming in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(13), 1814-1822.
- Hunsgi, G. (2012). *Production of sugarcane: theory and practice* (Vol. 21). Springer Science & Business Media.
- Kahlon, M. S., & Chawla, K. (2017). Effect of tillage practices on least limiting water range in Northwest India. *International Agrophysics*, 31(2), 183.
- Kazemi, Z., Neyshabouri, M. R., Haghi, D. Z., Asgarzadeh, H., Milani, A. O., Irani, M., & Nasab, A. D. M. (2021). Revisiting integral water capacity on the basis of stomatal conductance at various soil and root length densities in sunflower plant. *Agricultural Water Management*, 243, 106451.
- Kazemi, Z., Neyshabouri, M. R., Zaree Haghi, D., & Asgarzadeh, H. (2018). Computation of integral water capacity using plant green leaf temperature at different soil compaction levels. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(2), 219-229. doi: 10.22092/ijsr.2018.117042 (In Persian).
- Kazemi, Z., Neyshabouri, M. R., Zaree Haghi, D., & Asgarzadeh, H. (2018). Computation of Integral Water Capacity Using Plant Green Leaf Temperature at Different Soil Compaction Levels. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(2), 219-229. doi: 10.22092/ijsr.2018.117042
- Liu, H., Zhou, H., Lin, C., Li, B., Tian, J., & Yao, L. (2021). Evaluation of tillage effect on maize production using a modified least limiting water range approach. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.1002/saj2.20321
- Lorzadeh, S., Nadian, H., Bakhshandeh, A., Nourmohammadi, G., & Darvish, F. (2002). Effects of different levels of soil compaction on yield, yield components and sucrose in sugarcane cv. CP-48-103, in Khuzestan, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 4(1), 36-47. Available: <https://Sid.Ir/Paper/57118/En> (In Persian).
- Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K., Nendel, C., Ferrise, R. (2018). Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Research*, 222, 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.008>
- Mc Garry, D., & Sharp, G. (2003). A rapid, immediate, farmer-usable method of assessing soil structure condition to support conservation agriculture. *Conservation agriculture: environment, farmers experiences, innovations, socio-economy, policy*, 375-380.
- Mehrdadian, A.R., Asoodar, M.A., & Abasi, F. (2012). Effect of sugarcane harvest machinery traffic on soil compaction in south west of Khuzestan. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 34(2), 1-14. Sid. <https://Sid.Ir/Paper/233766/En> (In Persian).
- Mondal, S., & Chakraborty, D. (2023). Root growth and physiological responses in wheat to topsoil and subsoil compaction with or without artificial vertical macropores. *Heliyon*, 9(8), e18834.
- Monjezi, N., & Marzban, A. (2022). Investigation of the Effect of Optimizing Ratooning Operation at Different Speeds on Soil Physical Properties of Sugarcane Fields. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12(1), 121-139.
- Moradi, F., KhaliliMoghadam, B., Jafari, S., & Ghorbani Dashtaki, S. (2014). Long-term effects of mechanized cultivation on some soil physical properties in some khozestan sugarcane agro-industries. *Water and Soil*, 27(6), 1153-1165. doi: 10.22067/jsw.v0i0.33121 (In Persian).
- Nawaz, M.F., Bourrie, G., & Trolard, F., (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustainable Develop.* 33 (2), 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>.
- Neyshabouri, M.R., Kazemi, Z., Oustan, S. & M. Moghaddam. (2014). PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. *Geoderma*, 226, 179-187.
- O'Sullivan, M. F., & Simota, C. (1995). Modelling the environmental impacts of soil compaction: a review. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 69-84. doi:10.1016/0167-1987(95)00478-B
- Osmani, A., Asgarzadeh, H., & Asadzadeh, F. (2020). Comparison of Physical Quality Indices of Topsoil and Subsoil under Wheat and Sunflower Cultivation. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(3), 373-386. doi: 10.22092/ijsr.2020.343111.531
- Pandey, B. K., Huang, G., Bhosale, R., Hartman, S., Sturrock, C. J., Jose, L., & Bennett, M. J. (2021). Plant roots sense soil compaction through restricted ethylene diffusion. *Science*, 371(6526), 276-280.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Trnka, M., Olesen, J. E., Calanca, P., Eckersten, H., & Kozyra, J. (2010). Coincidence of variation in yield and climate in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139, 483-489.
- Reichert, J. M., Da Silva, V. R., & Reinert, D. J. (2004). Soil moisture, penetration resistance, and least limiting water range for three soil management systems and black beans yield. In *13th International Soil Conservation Organisation Conference-Brisbane, July* (pp. 1-4).
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A. A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M. R., & Ahrens, B. (2014). Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management*, 136, 34-41.

- Wakgari, T. (2021). Long term sugarcane cultivation effect on selected physical and hydraulic properties of soils at three Ethiopian sugarcane estates. *American Journal of Plant Biology*, 6(3), 60-72.
- Wang, X., Feng, Y., & Yu, L. (2020). Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China, *Science of the Total Environment*, 719, 137517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137517>.
- Wang, Y., Zhang, Z., Guo, Z., Zhang, Y., Zhang, P., Xiao, X., & Peng, X. (2024). Soil physical stresses beyond the dynamic least limiting water range determine crop yields in wheat-maize system in a Vertisol. *Field Crops Research*, 312, 109396.
- Wilson, M. G., Sasal, M. C., & Caviglia, O. P. (2013). Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range:: Effect on early wheat growth. *Geoderma*, 192, 354-361.
- Yousefi, Z., Kolahi, M., Majd, A., & Jonoubi P. (2018). Effect of cadmium on morphometric traits, antioxidant enzyme activity and phytochelatin synthase gene expression (SoPCS) of *Saccharum officinarum* var. cp48- 103 in vitro. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 157, 472- 481.
- Yu, C., Mawodza, T., Atkinson, B. S., Atkinson, J. A., Sturrock, C. J., Whalley, R., & Mooney, S. J. (2024). The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, 29, 100838.
- Zangiabadi, M., gorji, M., Shorafa, M., Keshavarz, P., & Saadat, S. (2017). The relationship between integral energy (EI) of different soil moisture ranges and S-index in medium to coarse-textured soils. *Water and Soil*, 31(2), 386-398. doi: 10.22067/jsw.v31i2.53472 (In Persian).
- Zou, G., Sands, R., Buchan, G. & Hudson, I. (2000). Least limiting water range: A potential indicator of soil physical quality of forest soil. *Aust. J. Soil Res.* 38, 947.

Effects of soil compaction on soil water availability indicators and some vegetative traits of sugarcane plant

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil compaction is regarded as a significant form of physical soil degradation, particularly in the context of mechanized cultivation. Soil compaction affects a number of key processes, including the water status of the soil, erosion, the cycle of elements, and finally, plant growth. Additionally, the moisture status of the soil plays a role in determining the compaction ability of the soil. The use of numerous heavy and semi-heavy tools and machines in different stages of planting, growing, and harvesting in sugarcane fields in Khuzestan Province poses a significant risk of soil compaction. It is therefore crucial to understand the impact of soil compaction on soil quality and plant growth in order to achieve sustainable agricultural management.

Material and methods

The present study was conducted to investigate the effects of compaction on soil water availability indicators and some growth characteristics of sugarcane plants. A total of nine compaction treatments were defined, comprising three levels of agricultural tool pressure (low, medium, and high) and three levels of soil moisture (low, optimum, and high). Different levels of tool pressure were applied through the passage of the harvester and the cane carrying basket based on the realities of the sugarcane fields. After the application of the compaction treatments, which were carried out at the time of the harvest, soil samples were taken at the beginning of the growing season from the depths of 0 to 30 cm and 30 to 60 cm to measure the usual physical characteristics as well as the indices. Soil water availability including plant available water (PAW), least limiting water range (LLWR) and integral water capacity (IWC) were obtained. The soil moisture curve was measured using a pressure plate device and the soil resistance curve was measured using a manual penetrometer in the laboratory. Plant growth indicators included straw collar diameter (D), straw height (H), sheath relative water content (RWC), and shoot weight (Y).

Results and discussion

The results of ANOVA showed that both the main effect of compaction factors and their interaction effects on LLWR and IWC index in the soil surface layer were significant ($p < 0.05$). The highest value of LLWR and IWC was observed with values of 0.073 and 0.051 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), respectively, in the low soil moisture level (W1) and the lowest value in the high soil moisture level (W3). In the subsurface layer, the main effects of compaction factors were not significant on any of the indices. The results of ANOVA for plant indices also showed that the interaction effects of compaction factors on D and Y were significant ($P < 0.05$). The lowest Y of 38 tons per hectare was observed in high pressure (P3) and high soil moisture content (W3) treatments. Correlation test also showed that there is a positive and significant relationship between LLWR indices and Y.

Conclusion

The analysis of the results obtained from the LLWR and IWC indices revealed that soil compaction restricts the sugarcane plant's access to water, thereby reducing its growth and yield. The moisture content of the soil during the operation of agricultural machinery is of great consequence with regard to the degree of soil compaction. Given the simplicity and low cost of soil moisture management and control in comparison to the weight of the machinery, it is recommended that particular attention be paid to this factor and that the optimal and critical limits be determined with precision for each tissue class.

Keywords: *Agricultural tools pressure, Integral water capacity, least limiting water range, plant available water, optimal soil water*