تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاکی با ساختمان ناپایدار پس از آبیاری غرقابی

محمدرضا مصدقی، عباس همت و محمدعلی حاج‌عباسی[۱]

چکیده

حالت فیزیکی خاک نقش مهمی در سبز شدن بذر، رشد و توسعهٔ ریشهٔ گیاه و تولید محصول دارد. از عوامل تغییردهندهٔ ویژگی‌های فیزیکی خاک، نیروهای داخلی حاصل از مکش ماتریک است. در این بررسی، تأثیر این نیروها در افق سطحی یک خاک لوم‌رسی‌سیلتی و با ساختمان ناپایدار (سری خمینی شهر یا فاین‌لومی، میکسد، ترمیک تیپیک هاپل‌آرجید) بررسی شد. آزمایش به صورت گلدانی انجام گرفت. در این پژوهش، تغییرات سطح خاک با زمان، چگالی ظاهری، شاخص مخروطی و مقاومت کششی در رطوبت‌های مختلف پس از نخستین آبیاری غرقابی اندازه‌گیری شد.

نتایج نشان داد که بستر بذر (۲۰ سانتی‌متر) با آرایش سست (با چگالی ظاهری ۱/۲ مگاگرم بر متر مکعب) حدود ۱/۵ سانتی‌متر نشست کرد. با توجه به این که هیچ گونه بار خارجی، پس از نخستین آبیاری، بر خاک وارد نشده بود، حالت فیزیکی آن به قبل از خاک‌ورزی نزدیک شد. چگالی ظاهری، شاخص مخروطی و مقاومت کششی خاک پس از آبیاری و در طول خشک شدن افزایش چشم‌گیری یافت. تغییرات مقاومت خاک (شاخص مخروطی و مقاومت کششی) با رطوبت شدید بود. ارتباط شاخص مخروطی و مقاومت کششی با تنش مؤثر نشان داد که احتمالاً کنترل کنندهٔ اصلی مقاومت در حالت تر، تنش مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: *تنش مؤثر، مکش ماتریک، نیروهای موئینه‌ای، نشست، چگالی ظاهری، شاخص مخروطی، مقاومت کششی*

---

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری خاک‌شناسی، دانشیار ماشین‌های کشاورزی و دانشیار خاک‌شناسی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

مقدمه

حالت فیزیکی خاک (Soil tilth) نقش مهمی در سبز شدن بذر، رشد و توسعهٔ ریشهٔ گیاه و تولید محصول دارد. آثار مفید یک محیط فیزیکی خوب شامل: تهویهٔ مناسب، حرکت مناسب آب در خاک، تنظیم دما برای رشد ریشه و نگهداری رطوبت کافی برای رشد گیاه می‌باشد. در این زمینه، مهم‌ترین عامل فضای خالی یا خلل و فرج (Pore space) خاک است (۹). در مورد خلل و فرج خاک، دو ویژگی فیزیکی بافت و ساختمان، مهم هستند، که اولی تقریباً تغییر چندانی نمی‌کند و جزء خواص ذاتی خاک است، در صورتی که ساختمان خاک، یک ویژگی متغیر و بسیار تأثیرپذیر است، که فرایندهای مختلف آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این فرایندها شامل انقباض و انبساط، خشک و مرطوب شدن، یخزدگی و ذوب شدن، عملیات خاک‌ورزی و تراکم است (۸). از این میان، مهم‌ترین نیروهای تغییر دهندهٔ ساختمان خاک، نیروهای خارجی یا مکانیکی و نیروهای درونی یا مویینه‌ای (Internal or capillary forces) ناشی از فرایندهای مرطوب و خشک شدن (Wetting-drying cycles) است (۱۶ و ۱۷).

مولینز و همکاران (۲۹) در یک بررسی و گردآوری جامع در مورد فرایندهای سخت شوندگی خاک دریافتند که بدون وجود بار خارجی نیز ممکن است تراکم در خاک به وجود آید. بسیاری از پژوهش‌ها، چگالی ظاهری (Bulk density, BD) زیاد در افق سطحی (پس از سبز شدن مزرعه) را ناشی از نیروهای خارجی می‌پندارند، در حالی که نیروهایی که سبب تراکم می‌شوند، در داخل خود خاک به وجود می‌آیند. در بسیاری از پژوهش‌ها در مورد تراکم خاک سطح‌الارض، نمی‌توانند آثار بار خارجی و نیروهای درونی را در خاک‌های با ساختمان ناپایدار جدا کنند، اگرچه رسم بر این بوده است که تراکم را کلاً به عمل بار خارجی نسبت بدهند. در حالی که بررسی‌های یانگ و همکاران (۳۸) نشان داد که BD یک خاک ناپایدار، چند ماه پس از خاک‌ورزی به $1/7\ Mg.m^{-3}$ می‌رسد، که دلیل روشنی بر این ادعاست که همیشه بار خارجی عامل سفتی و تراکم خاک نیست. بنابراین، کاهش نیروهای خارجی، بدون توجه به تغییر سیستم مدیریتی آنها، اثر اندکی بر مشکل سفتی و تراکم این گونه خاک‌ها دارد.

در مناطق خشک و نیمه خشک ایران مشکل کم آبی، تبخیر بیش از حد وسفت شدگی خاک امری معمولی است. بررسی‌های موجود نشان داده است که ناپایداری ساختمانی این گونه خاک‌ها سبب ایجاد سله پس از آبیاری غرقابی می‌شود (۱۲). این خاک‌ها به علت فقر ماده آلی و ساختمان ناپایدار دارای مشکلات کلوخه‌ای شدن پس از عملیات خاک‌ورزی است. بنابراین، باید روش‌های اصلاحی برای دست‌یابی به بستر بذر مناسب انتخاب گردد (۱ و ٦).

حاج‌عباسی و همت (۱۸) با بررسی یک خاک لوم‌رسی در اصفهان به این نتیجه رسیدند که کربن آلی ناچیز و ناپایداری ساختمانی این خاک سبب شده اعمال شیوه بی‌خاک‌ورزی (No-tillage) به مدت چهار سال نتواند ساختمان خاک را به طور معنی‌داری بهبود بخشد، و در نتیجه عملکرد محصول گندم در روش مذکور به طور معنی‌داری کاهش یافته است. آنها نتیجه گرفتند که خاک‌ورزی و نرم کردن سالیانه به روش مرسوم برای جلوگیری موقتی از سفت شدگی خاک و کاهش محصول الزامی است. بررسی‌های مصدقی و همکاران (۲۵) روی یک خاک لوم‌رسی‌سیلتی نشان داد که تغییرات مقاومت و تراکم‌پذیری خاک مورد نظر، با رطوبت شدید است. حاج‌عباسی و همکاران (۳) نشان دادند که حدود ٦۰٪ خاک‌دانه‌ها در این خاک کوچک‌تر از ۰/۲۵ mm است؛ هم‌چنین، سخت شدگی خاک در روش بی‌خاک‌ورزی سبب کاهش عملکرد ذرت شد.

اندازه‌گیری شاخص‌مخروطی (Cone index, CI) در یک خاک لوم‌رسی در منطقهٔ اصفهان، پیش از عملیات خاک‌ورزی و در پایان فصل رشد گیاه گندم آبی در شرایط رطوبتی یکسان، نشان داد که در طول یک فصل زراعی مقاومت خاک به حالت اولیه بر می‌گردد (٦). بررسی‌های حاج‌عباسی و همت (۱۸) نشان داد که درصد خاک‌دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۲۵ mm در این خاک که چهار سال تحت سیستم‌های خاک ورزی مرسوم و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

بی‌خاک‌ورزی بوده به ترتیب ۷۰٪ و ۵۵٪ است، و عملکرد گندم در روش بی‌خاک‌ورزی کاهش یافته است. بنابراین، به نظر می‌رسد فشردگی و مقاومت خاک در بیشتر مناطق مرکزی ایران به دلیل ساختمان ناپایدار، در طول یک سال زراعی، و به ویژه در روش آبیاری غرقابی به حالت اولیه برمی‌گردد (٤). بررسی‌های همت و خشویی (۷)، همت (۱۹) و میرلوحی و همکاران (۵) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت که نقش روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی در کوتاه و میان‌مدت در بهبود پایداری خاک‌های این مناطق، بر خلاف مناطق مرطوب و نیمه مرطوب (۲) چندان نیست، و بدون توجه به مدیریت اعمال شده، در طول یک دوره فصل رشد، خاک به توده‌ای سفت با منافذ مویینه (که موجب افزایش تبخیر از بخش‌های عمقی خاک می‌شوند) و بدون ساختمان تبدیل می‌گردد.

با توجه به این نتایج می‌توان این فرضیه را عنوان کرد که دلیل اصلی سفت شدگی و تراکم در خاک‌های مناطق مرکزی، عوامل درونی و فرایندهای مرطوب و خشک شدن بوده، که از مهم‌ترین عوامل تغییرات ساختمانی خاک‌های خاک‌ورزی شده است (۳۱). هدف این پژوهش بررسی روند تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و عوامل کنترل کنندهٔ تغییرات مقاومت در یک خاک با ساختمان ناپایدار پس از آبیاری غرقابی است.

مبانی نظری

تنش (Stress, σ) یا نیرو در واحد سطح، یکی از اجزای اصلی معادلات پایه در مکانیک است، که در مکانیک خاک نیز کاربرد دارد. از مفاهیم نظری موجود در مکانیک خاک، تنش مؤثر ترزاقی (Terzaghi's effective stress) در خاک‌های اشباع است. چون خاک اشباع مجموعه‌ای از خاک و آب است، برابر این تئوری، هر تنش وارده به خاک، بسته به شرایط زه‌کشی، بین جزء جامد و مایع خاک تقسیم می‌شود؛ به سخن دیگر:

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad \text{یا} \quad \sigma' = \sigma - u_w \qquad [۱]$$

که در آن σ، تنش کل (Total stress)، σ′، تنش مؤثر (Effective stress) بر ذرات جامد و u_w، فشار آب منفذی (Pore water pressure) است. در شرایط زه‌کشی نشده، تمامی تنش وارده را آب منفذی تحمل می‌کند و چون u_w مثبت یا صفر است، سبب دور کردن ذرات خاک از یکدیگر می‌شود (۳۳).

مبانی نظری تنش مؤثر ترزاقی (معادله ۱) در خاک غیر اشباع، به دلیل این که جزء هوا نیز به سیستم افزوده می‌شود، به صورت زیر گسترش می‌یابد:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi\,(u_a - u_w) \qquad [۲]$$

که در معادلهٔ فوق u_a، فشار هوای منفذی و χ نسبت سطح مقطع خاک است که با آب اشغال می‌شود، و تابعی از درجهٔ اشباع خاک (Saturation percentage, S) بوده (در رطوبت‌های زیاد مساوی S فرض می‌شود)، بین صفر (خاک خشک) و یک (خاک اشباع) تغییر می‌کند. در واقع معادلهٔ ۱ حالت خاصی از معادلهٔ ۲ است که χ مساوی یک بوده و u_a وجود ندارد (۲۰ و ٢٤). با فرض این که هوای خاک دارای پیوستگی با هوای خارج است، می‌توان از u_a در معادلهٔ ۲ صرف‌نظر کرد. آن گاه خواهیم داشت:

$$\sigma' = \sigma - \chi\, u_w \qquad [۳]$$

و چون u_w در شرایط غیر اشباع منفی و برابر ψ_m (پتانسیل ماتریک، Matric potential) است، نهایتاً می‌توان نوشت:

$$\sigma' = \sigma - \chi\, \psi_m \qquad [٤]$$

که عبارت دوم ($-\chi\,\psi_m$)، بیان کنندهٔ اثر پتانسیل ماتریک بر تنش مؤثر است. اگر در سیستم، بار خارجی (σ) وجود نداشته باشد و خاک نزدیک به سطح باشد، می‌توان نوشت:

$$\sigma' = -\chi\,\psi_m \qquad [۵]$$

با خشک شدن خاک، قدر مطلق ψ_m زیاد شده و χ کاهش می‌یابد. بنابراین، تا رطوبت مشخصی، با کاهش رطوبت، تنش مؤثر و مقاومت خاک افزایش می‌یابد. می‌توان گفت مکش ماتریک (Matric suction) به صورت تنش ایزوتروپیک (Isotropic stress) عمل می‌کند، که سبب کشش ذرات خاک به سمت یکدیگر در حد فاصل آب و هوا می‌شود. اثر فشار آب

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

منفذی در شرایط اشباع و غیر اشباع بر مقاومت خاک در شکل ۱ نشان داده شده است (۳۷).

هم‌چنین، باید خاطر نشان کرد که تنش مؤثر در خاک غیر اشباع حاصل جمع اثرات پتانسیل ماتریک (معادله ۵) و کشش سطحی آب است ولی در رطوبت‌های زیاد (S>۰/٤) می‌توان از اثر کشش سطحی چشم‌پوشی کرد. از سوی دیگر، در رطوبت‌های کم (S< ۰/۳) اثر کشش سطحی غالب می‌شود (۳۲، ۳٤ و مکاتبات شخصی با پروفسور ا. آر. دکستر).

بنابراین، رابطهٔ خطی مقاومت خاک (Soil strength) (τ) با تنش مؤثر در شرایط نبود نیروی خارجی را می‌توان به صورت زیر نوشت (۲۸، ۳۰، ۳۲ و ۳٤):

$$\tau = c + b\,(-\chi\,\psi_m) \qquad [٦]$$

که c و b ضرایب تجربی معادله بوده و c بیان کننده پیوستگی (Cohesion) در حالت اشباع است. معادلهٔ ٦ در شرایطی صادق است که عوامل سیمانی‌کننده و رسوبی خاک در اثر خشک شدن نقش چندانی در افزایش مقاومت نداشته باشند (یعنی تنها عامل کنترل کننده مقاومت، نیروی هماوری حاصل از مکش ماتریک باشد). بنابراین، اگر تغییرات مقاومت خاکی از این روند پی‌روی کند، آن خاک دارای ساختمان ناپایدار بوده و مقاومت آن در اثر خشک شدن به شدت افزایش می‌یابد. معادلهٔ ٦ برای شرایط مرطوب صادق بوده و با خشک شدن خاک از روند خطی خارج می‌شود. در خاک‌های با ساختمان پایدار، مقاومت با تنش مؤثر رابطهٔ فوق را ندارد و تقریباً ثابت است زیرا مقاومت خاک‌دانه‌ای و بین‌خاک‌دانه‌ای بیش از آن است که تنش مؤثر قادر به نزدیک کردن و تراکم آنها باشد (۲٦ و ۲۸).

مواد و روش‌ها

بررسی حاضر روی یک خاک با ساختمان ناپایدار (خاک مزرعهٔ پژوهشی دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، واقع در نجف‌آباد) متعلق به سری خمینی‌شهر صورت گرفت. رده‌بندی این خاک Fine-loamy, mixed, thermic Typic Haplargids است. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. بافت خاک به روش پیپت اندازه‌گیری شد. حدود پایداری خاک (Soil consistency limits) شامل حد روانی (Liquid limit, LL)، حد خمیری (Plastic limit, PL) و حد انقباض (Shrinkage limit, SL) به روش استاندارد BS اندازه گرفته شد. تفاوت LL و PL به عنوان شاخص خمیری (Plastic index, PI) و تفاوت PL و SL به عنوان شاخص تردی (Friability index, FI) محاسبه گردید. درصد آهک، مواد آلی و چگالی حقیقی (Particle density, PD) به ترتیب به روش‌های خنثی کردن با اسید، اکسیداسیون تر و پیکنومتر اندازه‌گیری شد. منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک (Soil moisture characteristic curve, SMCC) به روش صفحهٔ فشاری روی نمونه‌های دست‌خورده و با BD برابر ۱/۲ $Mg.m^{-3}$ در فشارهای صفر (اشباع)، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۸، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار با ۱۰ تکرار تعیین شد.

خاک سطحی هوا-خشک پس از گذراندن از الک ۸ میلی‌متری به طور یک‌نواخت درگلدان‌هایی با ارتفاع و قطر ۳۰ و به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر ریخته شد. در کف گلدان‌ها سنگ‌ریزه به ضخامت سه سانتی‌متر به منظور زه‌کشی ریخته شد. چگالی ظاهری (BD) خاک به مقدار ۱/۲ $Mg.m^{-3}$ رسانده و سعی شد تغییرات آن با عمق گلدان به حداقل برسد، که نشان دهندهٔ یک بستر مطلوب پس از عملیات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه باشد. برای اندازه‌گیری نشست خاک (Soil settlement) با زمان پس از آبیاری، از جا به جایی‌سنج (Displacement gauge) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. جا به جایی‌سنج‌ها (سه عدد) با اتصال پایه‌ای روی سطح خاک سه گلدان قرار گرفتند. در انتهای هر جا به جایی‌سنج، یک صفحهٔ فلزی گذاشته شد تا از فرو رفتن نوک جا به جایی‌سنج در خاک جلوگیری کند. میانگین اعداد سه تکرار به عنوان مقدار نشست در نظر گرفته شد.

گلدان‌ها به آرامی با آب‌پاش و با آب شهری دارای خواص شیمیایی، EC = ۰/٥٦ dS/m و SAR = ۰/۷۷ (غیر شور و قلیا)

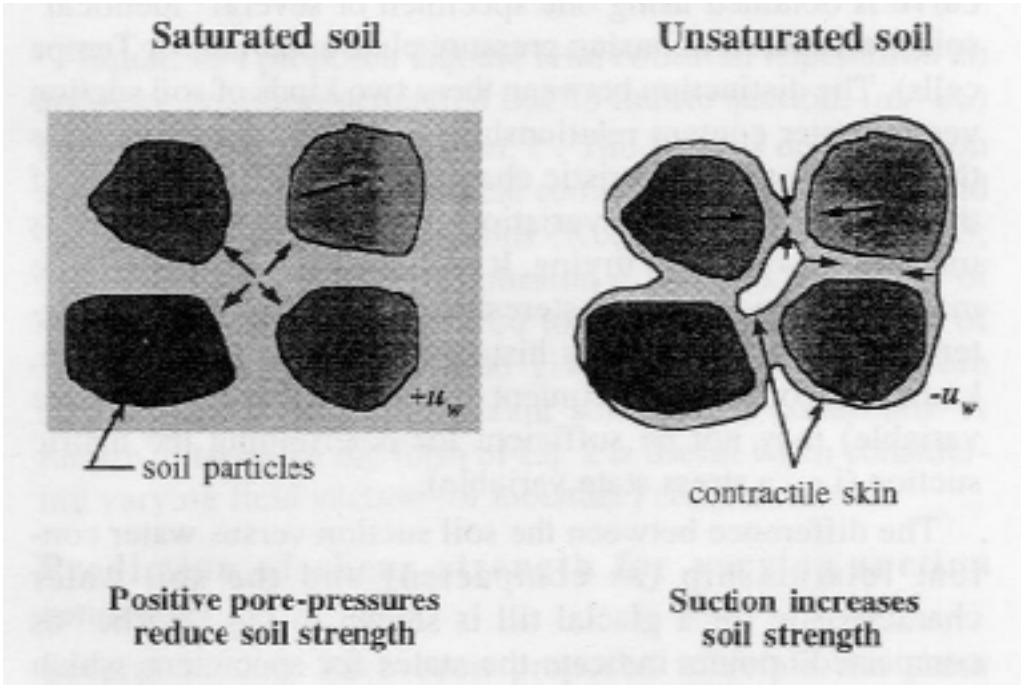
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

جدول ۱. برخی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک[۱]

بافت	شن	سیلت	رس	SP	LL	FC	PL	PWP	PI	SL	FI	$CaCO_3$	OM	PD
				----------[۲] (%w/w) ----------										$Mg.m^{-3}$
SiCL	۱۵/۸	۵۰/۲	۳٤/۸	٤۲	۳۰/٦	۲۵/۸	۱۹/۱	۱۰/۲	۱۱/۵	۸/٦	۱۰/۵	٤۵	۱/۰	۲/۷۳

۱. SP، LL، FC، PL، PWP، PI، SL، FI، OM و PD به ترتیب بیان کنندهٔ درصد اشباع ، حد روانی، ظرفیت زراعی، حد خمیری، رطوبت پژمردگی دائمی، شاخص خمیری، حد انقباض، شاخص تردی، ماده آلی و چگالی حقیقی می‌باشند.
۲. درصد وزنی رطوبت بر اساس خاک خشک



شکل ۱. اثر فشار آب منفذی بر مقاومت خاک در شرایط اشباع و غیر اشباع (برگرفته از منبع ۳۷)

آبیاری شدند، و سعی شد از یک گوشه گلدان‌ها آب‌دهی صورت گیرد که شبیه‌سازی آبیاری سطحی باشد و با توجه به درصد اشباع خاک (SP) ، خاک به نزدیک اشباع برسد. بلافاصله پس از آبیاری، نشست، رطوبت وزنی (MC)، چگالی ظاهری (BD)، شاخص مخروطی (CI) و مقاومت کششی (Indirect tensile strength, ITS) خاک با گذشت زمان اندازه‌گیری شد. سعی شد فواصل اندازه‌گیری طوری تنظیم شود که دامنهٔ نمونه‌برداری مناسبی از رطوبت خاک را شامل گردد و از سوی دیگر امکان نمونه‌برداری وجود داشته باشد. زیرا در رطوبت‌های خیلی زیاد و خیلی کم، امکان برداشت نمونه دست نخورده برای BD و ITS بسیار ضعیف بود.

رطوبت وزنی (MC) و BD با استفاده از لولهٔ نمونه‌برداری (با قطر داخلی ٤ و طول ۵۰ سانتی‌متر) با فواصل ۲/۵ سانتی‌متر تا عمق ۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. لولهٔ نمونه‌برداری از وسط به دو قسمت طولی بریده شده بود، به طوری که پس از برداشت نمونه و باز کردن لولای نمونه‌گیر، خاک داخل آن به بخش‌های ۲/۵ سانتی‌متری تقسیم می‌شد. CI با استفاده از فروسنج مخروطی (Cone penetrometer) مدل Rimik CP20 با فواصل عمقی ۲/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در ضمن، مقاومت در حالت نرم و هوا–خشک پیش از آبیاری نیز اندازه گرفته شد.

برای اندازه‌گیری ITS، به عنوان بهترین و حساس‌ترین شاخص مقاومت خاک در برابر سر از خاک درآوردن گیاهچه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

(سبز شدن بذر) (۱۰ و ۲۶)، با استفاده از سیلندر نمونه‌برداری مذکور، نمونه‌برداری از عمق ۰-۱۶ سانتی‌متر صورت گرفت. برای بررسی تغییرات مقاومت خاک سطحی و عمقی، استوانه خاک به دو بخش ۰-۸ و ۸-۱۶ سانتی‌متر تقسیم شد. به کمک روش غیر مستقیم (Indirect tension test) (۱۰)، ITS در نمونه‌های مذکور اندازه‌گیری شد. در این روش، استوانهٔ خاک به صورت طولی بین دو صفحهٔ بارگذاری قرار می‌گیرد و نیرو و جا به جایی به طور هم‌زمان تا لحظهٔ بروز ترک طولی و شکست نمونه یادداشت می‌شود. سرعت بارگذاری در یک میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد. سپس با استفاده از فرمول زیر، ITS محاسبه گردید:

$$ITS = 2F\,g(x)/(\pi dl) \qquad [۷]$$

که در فرمول فوق، F نیروی شکست در نقطهٔ گسیختگی، d و l به ترتیب قطر و طول نمونه و g(x) ضریب صاف‌شدگی (Flattening coefficient) بوده که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (۱۳):

$$g(x) = (-d/2a)\{2x-\sin 2x-(2y/d)\ln(\pi/4+x/2)\} \qquad [۸]$$

در این رابطه، a عرض بخش صاف شدهٔ استوانهٔ خاک در تماس با صفحهٔ بارگذاری در نقطهٔ گسیختگی، y فاصلهٔ بین دو بخش صاف شده در نقطهٔ گسیختگی و x =a/y نسبت صاف‌شدگی (Flattening ratio) است.

پتانسیل ماتریک (ψ_m) تا مقادیر kPa ۸۰- با استفاده از تانسیومتر در گلدان‌ها، و در پتانسیل‌های کمتر به طور غیر مستقیم با استفاده از MC و از منحنی SMCC استخراج شد. کلاهک تانسیومتر در عمق‌های ۵ و ۱۲ سانتی‌متر تعبیه شد، که به ترتیب بیان کننده پتانسیل ماتریک لایه‌های ۰-۸ و ۸-۱۶ سانتی‌متر بود. با فرض این که $\sigma' = -\chi\psi_m$ و $\chi=S$ است، تنش مؤثر (σ') در رطوبت‌های مختلف محاسبه شد و معادلهٔ ٦ بر داده‌های CI و ITS به عنوان شاخص‌های مقاومت خاک در مقابل تنش مؤثر (σ') با استفاده از نرم‌افزار Excel برازش داده شد. دامنهٔ رطوبتی مورد بررسی برای رابطهٔ مقاومت (CI و ITS) و تنش مؤثر از بخش مرطوب منحنی رطوبتی انتخاب شد. درجهٔ اشباع این داده‌ها بزرگ‌تر از ۰/٤ بود، و می‌توان از اثر کشش سطحی آب در تنش مؤثر (با توجه به توضیحات بخش مبانی نظری) صرف‌نظر کرد، و تنها به اثر مکش ماتریک ($-\chi\psi_m$) بسنده نمود که در رطوبت‌های بالا منشأ اصلی مقاومت است.

نتایج و بحث

در موقع آب‌دهی گلدان‌ها، ابری از گرد و غبار جلوی جبههٔ پیش‌روی آب ایجاد شد، که نشان دهنده پاشیدگی خاک‌دانه‌ها و اثر آزاد شدن هوای محبوس خاک است. به محض تماس آب با سطح خاک، خاک‌دانه‌ها و کلوخه‌های سطحی از هم پاشیده شدند، و سطحی تقریباً صاف با کپه‌های حاصل از تخریب آنها به جای ماند. بررسی‌های مولینز و همکاران (۲۷ و ۲۸) نیز مؤید این مشاهدات است. بررسی‌های کمپر و همکاران (۲۳) و قوامی و همکاران (۱۵) نیز نشان داد خاک نرم حاصل از خاک‌ورزی در نخستین دورهٔ خیس و خشک‌شدگی تحکیم می‌یابد. مرطوب شدن سبب سست شدن خاک‌دانه‌ها شده و اجازه می‌دهد که نیروهای گرانشی و کشش سطحی آب آنها را به سمت یکدیگر بکشد، و خشک شدن سبب تثبیت این آرایش می‌شود. به اعتقاد قزهی و اور (۱٦) در نخستین دورهٔ مرطوب شدن یک خاک سست، به دلیل آن که تماس خاک‌دانه‌ها به صورت نقطه‌ای و تنش حاصل از نیروی آب ورودی در این نقاط بسیار زیاد است، بیشترین تغییرات ساختمانی صورت می‌گیرد. در دوره‌های بعدی مرطوب و خشک شدن، سطح تماس خاک‌دانه‌ها زیادتر شده و اصطلاحاً به هم جوش می‌خورند (Welding) و تنش مؤثر کمتر می‌شود. بازبینی نیم‌رخ خاک پس از آبیاری نشان داد که تا عمق حدود پنج سانتی‌متری، خاک‌دانه‌ها و کلوخه‌ها تخریب شده (به دلیل خیس‌خوردگی سریع) و از این عمق به پایین، به هم جوش خورده بودند. به سخن بهتر، در خاک زیرسطحی به هم پیوستگی (Coalescence) به وجود آمده که ذراتی بین خاک‌دانه‌ها به صورت پل قرار گرفته و آنها را به یکدیگر نگه می‌دارند. ولی در عین حال هنوز

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

کم و بیش خلـل و فـرج بیـن خاک‌دانـه‌ها وجـود دارد، کـه در پژوهش‌های قزهی و اور (١٦) نیز این نتایج دیده می‌شود.

ویژگی‌های فیزیکی

نشست خاک

در شکل ٢، نشست خاک پس از آبیاری با گذشت زمـان نشـان داده شده است. در حین آبیاری به دلیل انبساط کانی‌های خـاک و اثر فشار هوای محبوس منفذی، حدود ٠/٣ میلی‌مـتر بـالاروی (Upheaving) سطح خاک به وجود آمد، کـه بلافاصلـه پـس از فرو رفتن آب ایستابی و آزاد شدن هوای منفذی، نشسـت آغـاز شد. بیشترین شیب منحنی و نشست خـاک در محـدودهٔ زمـانی سه ساعت پس از آبیاری صورت گرفت (شکل ٢). بررسـی‌های ویچ و همکاران (٣٦) نیز نشان داد که نشست بستر بذر در حین زه‌کشی سریع است، و تقریباً تمامی آن در طول ١٢ ساعت پـس از آبیاری صورت می‌گیرد.

هوای محبوس در داخل خاک‌دانه‌ها که با نیروهای مویینه‌ای آب را به داخل خاک‌دانه‌ها می‌کشد، تا جایی فشرده می‌شود کـه بتواند خاک‌دانه‌های ضعیف شده با آب را بشـکند. بررسـی‌های کلـر (٢٢) و کمپـر و همکـاران (٢٣) نـیز نشـان می‌دهـد کـه آب‌گیری سریع دلیل اصلی فروپاشی خاک‌دانه‌ها و کاهش خلـل و فرج درشـت اسـت. در حیـن خیس‌شـدگی سـریع، گرادیـان (شیب) درصد رطوبت در جبههٔ رطوبتی در یک خاک‌دانه بسـیار تند است، به طوری که خاک‌دانه در یک سمت نزدیک به اشـباع و در سمت دیگر خشک است. شیب تند رطوبتـی سـبب تـورم چشم‌گیر بخش مرطوب نسبت به بخش خشـک خاک‌دانـه‌ها، و در نـهایت سـبب ضعیـف و خـرد شـدن آنـها می‌شـود. وقتـی خیس‌شدگی به تندی صورت می‌گیرد، شـیب رطوبتـی و شـیب انبساط زیاد بوده، تنش‌های برشی عمود بر جـهت خیس‌شـدگی سبب خرد شدن خاک‌دانه‌ها می‌شود.

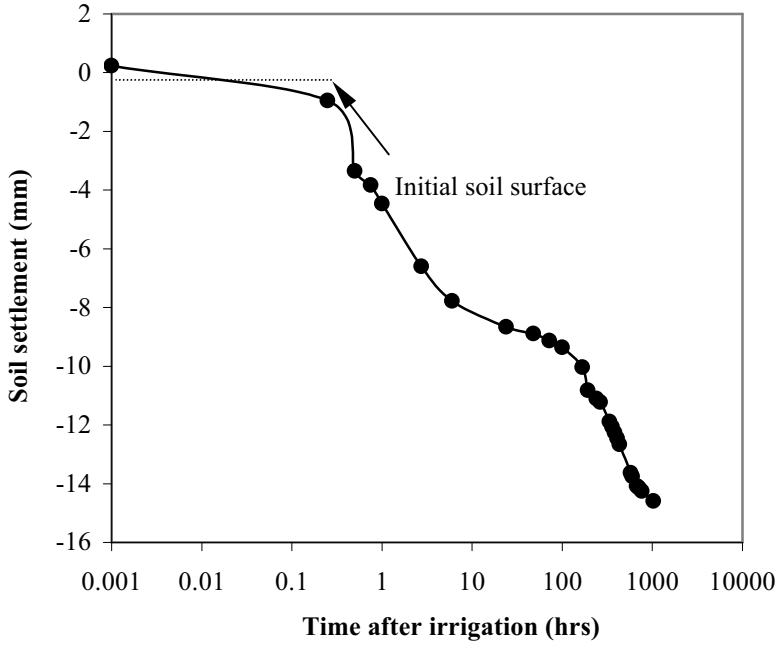
نشسـت نـهایی حـدود ١/٥ سـانتی‌متر و برابـر ٧/٥ درصـد کرنش ظاهری (Apparent strain) یا نشست نسبت به ضخامت کل خاک است. این خود دلیلی بر فـروپاشـی سـاختمان خـاک، کاهش تخلخل، تراکم و سپس انقباض خاک اسـت. ایـن مقـدار نشست، سبب افزایش BD لایهٔ ٠-٢٠ سانتی‌متری از مقدار اولیهٔ ١/٢ به $Mg.m^{-3}$ ١/٣ می‌شود. ولی همان طوری کـه در شـکل ٣ نشان داده شده، افزایش BD در طول خشک شدن بیشتر از ایـن مقدار است (از ١/٢ به حـدود ١/٥)، کـه بیـان کننـدهٔ اثـر تـوأم انقباض عمودی و افقی (Vertical and horizontal shrinkage) در فشـردگی خـاک می‌باشـد. بـه اعتقـاد مولینـز (٢٦) فراینـد سخت‌شدگی شامل دو مرحله است: ١. خردشـدگی سـاختمانی خاک‌دانه‌ها در اثر آب‌گیری و ٢. سخت‌شدگی بـدون بازسـازی ساختمانی در طی خشک شدن. سخت‌شدگی خاک با فروپاشـی ساختمانی آغاز و با انقباض در طول خشک شدن ادامه می‌یـابد. نشست خاک نشـان دهنـدهٔ انقبـاض عمـودی خـاک اسـت. دو ساعت پس از آبیاری، ترک‌خـوردگی در خـاک آغـاز شـد، و از این هنگام به بعد، انقباض عمودی و افقی سبب فشردگی بیشـتر خاک گردید. با توجه به شکل ٢، می‌توان گفت بیشتر از هشـت میلی‌متر نشست حاصل از فروپاشی ساختمان سه ساعت پس از آبیاری، و بقیهٔ تغییرات تدریجی آن حاصل از انقباض است.

چگالی ظاهری (BD)

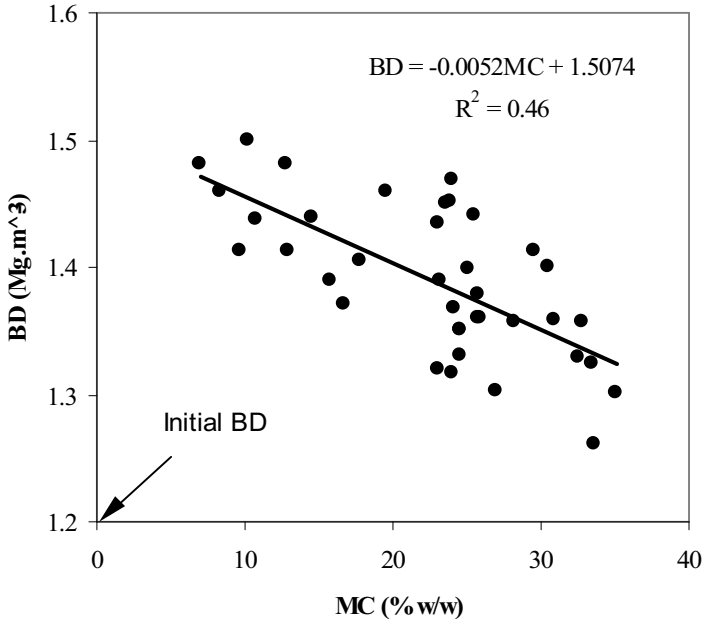
تغییرات میانگین BD (در عمق ٠-٢٠ سانتی‌متر) پس از آبیـاری با تغییرات رطوبت به دلیل نشست و انقباض در شـکل ٣ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که پـس از نخسـتین آبیـاری BD تا حدود $Mg.m^{-3}$ ١/٥ افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات در BD لایهٔ ٠-٥ سانتی‌متری دیـده شـد (داده‌هـا نشـان داده نشـده است). نتایج پژوهش‌های حاج‌عباسـی و همکـاران (٣) در ایـن خاک نیز نشـان داد کـه BD خـاک در دو سیسـتم خـاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی در پایـان فصـل رشـد یکسـان، و برابـر $Mg.m^{-3}$ ١/٤٥ است. هم‌خوانـی نتـایج ایـن بررسـی و بررسـی حاج‌عباسی و همکاران (٣) نشان می‌دهد که بیشـترین تغییـرات BD و ساختمان خاک طی نخستین آبیـاری صـورت مـی‌گیـرد. محدود بودن تودهٔ خاک توسط گلدان در بررسی حاضـر سبـب انقباض افقی بیشتر و در نتیجه BD زیـادتـر نسبـت بـه شـرایط

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]



شکل ۲. نشست خاک با گذشت زمان پس از آبیاری (از آغاز تا پایان آزمایش)



شکل ۳. تغییرات چگالی ظاهری (BD) (میانگین عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری) با رطوبت وزنی (MC) خاک با گذشت زمان پس از آبیاری

طبیعی مزرعه می‌شود. بررسی‌های ویچ و همکاران (۳۶) و مولینز و همکاران (۲۷ و ۲۸) نشان داد که تغییرات BD در فرایند خشک شدن، روند خاص و معنی‌داری ندارد. در صورتی که در این پژوهش تغییرات BD حدود $Mg.m^{-3}$ ۰/۳ بود. البته BD اولیه خاک‌ها در بررسی ویچ و همکاران (۳۶) و مولینز و همکاران (۲۷ و ۲۸) به ترتیب ۱/۵۵ و $Mg.m^{-3}$ ۱/۵ بود، که

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

بیشتر از BD اولیه خاک در پژوهش حاضر است.

ویژگی‌های مکانیکی

شاخص مخروطی (CI)

در شکل ٤ تغییرات میانگین CI (در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر) پس از آبیاری با رطوبت (منحنی مشخصه مقاومت خاک یا Soil strength characteristic curve) نشان دهندهٔ تغییرات شدید در محدودهٔ رطوبتی مورد بررسی است. با استفاده از این منحنی، تخمین مقاومت به کمک رطوبت خاک امکان‌پذیر است. اگرچه مقاومت خاک در رطوبت حد پژمردگی دائمی (Permanent wilting point, PWP) برای رشد گیاه محدود کننده نیست (۲۰۰۰ kPa >) (۲۷)، ولی انتظار می‌رود در آبیاری‌های متوالی بعدی، مقاومت خاک پیش از PWP برای رشد ریشه محدود کننده باشد. از سوی دیگر، بررسی‌های ویچ و همکاران (۳٦) نشان داد که رشد گیاهچهٔ ذرت در مقاومت ۱۱۰۰ kPa آغاز به کاهش نموده و در ۲۰۰۰ kPa متوقف می‌شود. چون مقاومت ۱۱۰۰ kPa در این خاک پس از نخستین آبیاری در رطوبت حدود ۱۰-۱۲ درصد (بیشتر از PWP) به وجود آمد (شکل ٤)، می‌تواند بر درصد سبز مزرعه اثر بگذارد. هم چنان که بررسی اقبال و همکاران (۱۲) نشان داد، پس از آبیاری این خاک، سبز شدن بذر چغندرقند به میزان ۵۰٪ کاهش یافت. مقایسهٔ مقاومت خاک در حالت نرم و هوا-خشک پیش از آبیاری (حدود ۴۰۰ kPa، نشان داده نشده است) با مقدار آن در همین رطوبت پس از آبیاری (بیش از ۲۵۰۰ kPa)، نشان داد که مقاومت خاک در اثر نشست و انقباض ناشی از آبیاری بیش از شش برابر شده است. بررسی شکل ٤ نشان می‌دهد که مقاومت خاک در رطوبت‌های بیشتر از LL کمتر از ۱۰۰ kPa، و در رطوبت‌های کمتر از SL بیشتر از ۲۰۰۰ kPa است. این وابستگی شدید مقاومت به رطوبت خاک را می‌توان دلیل ناپایداری ساختمانی این خاک دانست (۲۷ و ۲۸).

مقاومت کششی (ITS)

با بازبینی و مقایسهٔ مقادیر ITS مربوط به عمق‌های ۰-۸ و ۸-۱٦ سانتی‌متر در یک نمودار، دیده شد که هر دو روند یکسانی دارند. پس می‌توان گفت منشأ افزایش مقاومت در عمق‌های اول و دوم یکسان بوده که روند مشابهی ایجاد کرده است. بنابراین، در شکل ۵ مجموع داده‌های ۰-۸ و ۸-۱٦ سانتی‌متری (ادغام شده) آورده شده است. مشابهت روند تغییرات CI و ITS با رطوبت، تخمین یکی با در دست داشتن دیگری را ممکن می‌سازد (شکل ٦).

تغییرات شدید ITS با رطوبت بیان کننده تأثیر غالب رطوبت بر مقاومت مکانیکی این خاک است، که توانسته ۷٤٪ از تغییرات مقاومت را توجیه کند. بقیهٔ تغییرات (۲٦٪) احتمالاً به دلیل اثر BD است. اندازه‌گیری ITS در خاک هوا-خشک (رطوبت وزنی ۱/۵٪) پس از آبیاری نشان داد که مقادیر میانگین به دست‌آمده (۸۰ kPa) قابل مقایسه با مقادیری است که مولینز و همکاران (۲۷ و ۲۸) به دست آوردند، و مقدار استاندارد kPa ۹۰ (حالت هوا-خشک در خاک‌های سخت شونده Hardsetting soils) (۲٦) است. از سوی دیگر، ٦۰٪ خاک‌دانه‌های این خاک کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر است (۳)، که نشان می‌دهد خاک مورد بررسی پتانسیل سخت‌شوندگی را داراست.

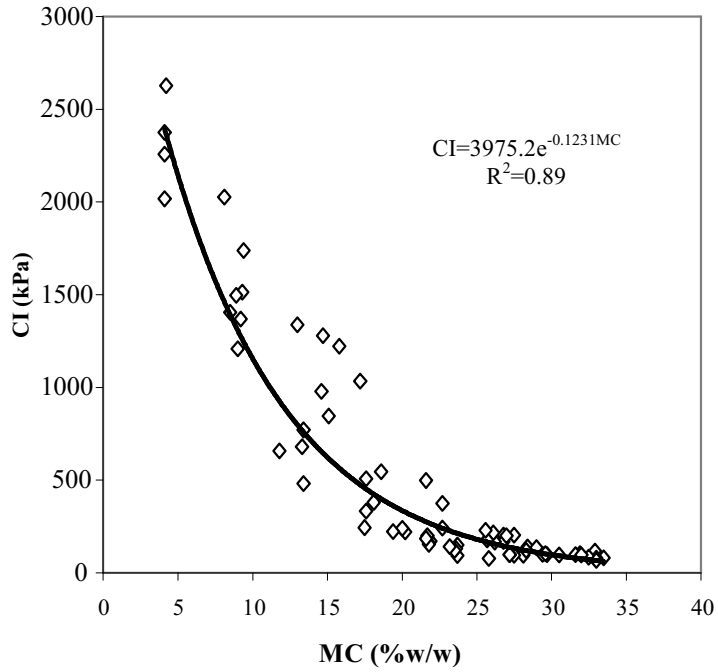
مقاومت و تنش مؤثر

به منظور بررسی رابطهٔ مقاومت و تنش مؤثر از داده‌های مربوط به تنش‌های مؤثر ۰-۵۰ کیلوپاسکال در مورد CI و ۰-٦۰ کیلوپاسکال در مورد ITS استفاده شد (دامنهٔ رطوبتی زیاد). منحنی مشخصهٔ رطوبتی در شکل ۷ و منحنی مشخصهٔ تنش مؤثر در شکل ۸ نشان داده شده است. مدل ارائه شده در شکل ۷، مدل گاردنر و همکاران (۱٤) است. شباهت روند تغییرات شکل ۸ با شکل‌های ٤ و ۵ نشان دهندهٔ تاثیر تنش مؤثر بر مقاومت خاک می‌باشد (۳٦).

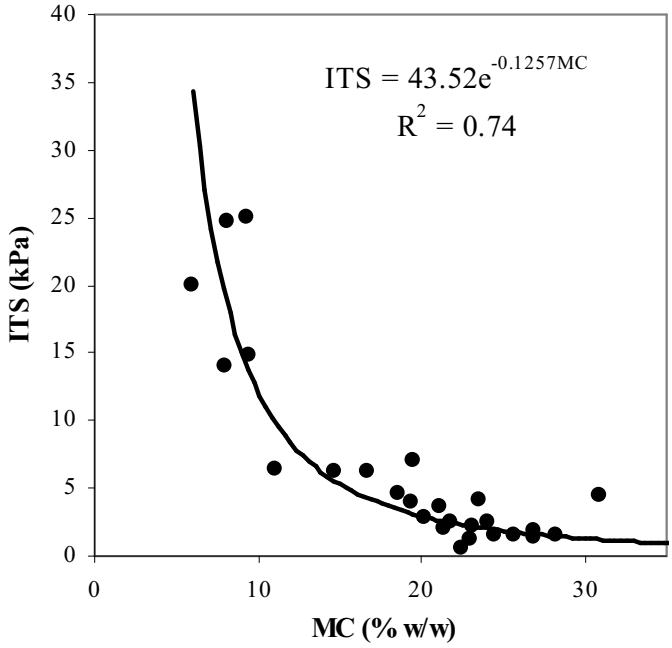
در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب رابطهٔ CI، ITS و تنش مؤثر آورده شده است. با برازش معادلهٔ خطی ٦ بر داده‌ها، به ترتیب ۷۲ و ٤۸ درصد تغییرات CI و ITS با تنش مؤثر قابل

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]



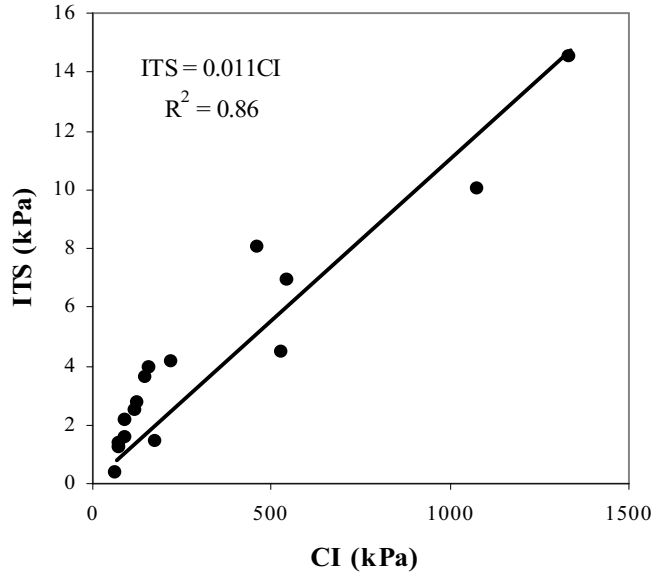
شکل ٤. تغییرات شاخص مخروطی (CI) (میانگین عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری) با رطوبت وزنی (MC) خاک با گذشت زمان پس از آبیاری



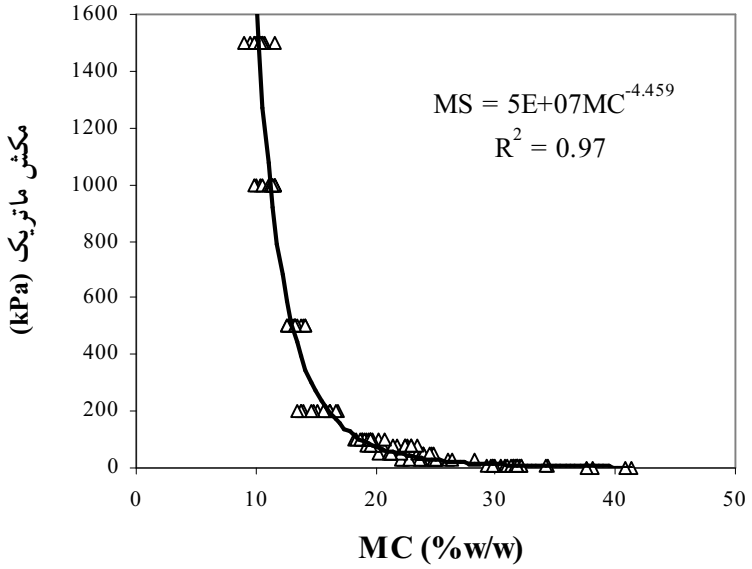
شکل ۵. تغییرات مقاومت کششی (ITS) (داده‌های ادغام شده لایه‌های ۰-۸ و ۸-۱٦ سانتی‌متری) با رطوبت وزنی (MC) خاک با گذشت زمان پس از آبیاری

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]



شکل ٦. هم‌بستگی مقاومت کششی (ITS) و شاخص مخروطی (CI) خاک

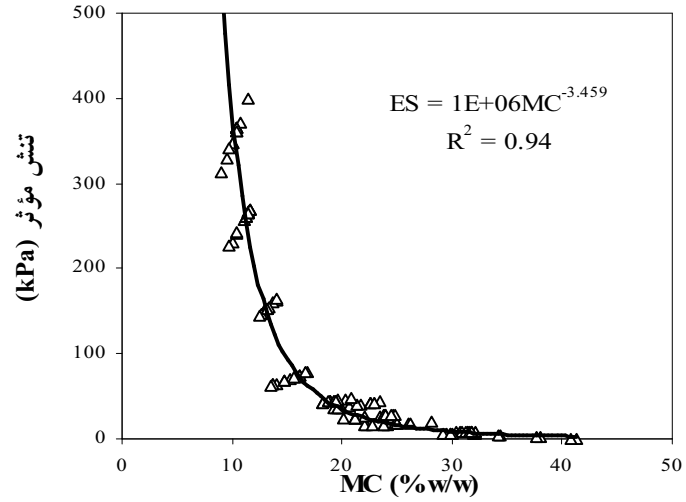


شکل ۷. منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک

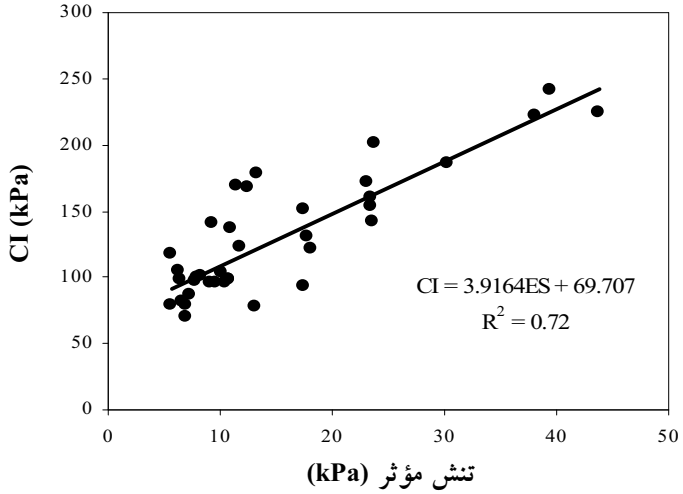
توجیه است. بنابراین، احتمالاً کنترل کنندهٔ اصلی مقاومت در حالت تر در این خاک، تنش مؤثر می‌باشد. به نظر می‌رسد رسوب برخی کانی‌ها (سیلیس محلول) و واکنش‌های آهک زیاد این خاک با ذرات طی فرایند خشک شدن، توجیهی بر بقیهٔ تغییرات مقاومت باشد. مدل ترسیمی هورن و دکستر (۲۱) نشان می‌دهد که ذرات رسوبی مانند سیلیس محلول و کربنات‌ها (که در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به فراوانی یافت می‌شوند) به همراه هلال آب پیرامون ذرات خاک در طی فرایند خشک شدن، به نقاط تماس ذرات یا خاک‌دانه‌ها حرکت کرده و با رسوب در این محل‌ها بر مقاومت خاک می‌افزایند. بنابراین، رسوب مؤثر و موقت کانی‌ها و کربنات‌ها نیز بستگی تام به عمل هلال آب و تنش مؤثر دارد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

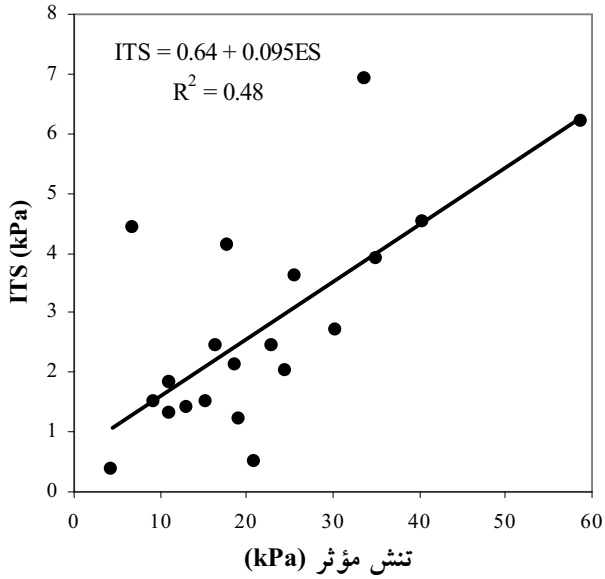
[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]



شکل ۸. منحنی تغییرات تنش مؤثر با رطوبت وزنی (MC) خاک



شکل ۹. رابطهٔ شاخص مخروطی (CI) و تنش مؤثر خاک



شکل ۱۰. رابطهٔ مقاومت کششی (ITS) و تنش مؤثر خاک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

بر طبق معادلهٔ مقاومت خاک (معادله ٦)، c برای CI و ITS به ترتیب حدود ۷۰ kPa و ۰/٦٤ kPa (عرض از مبدأ معادله‌های برازش در شکل‌های ۹ و ۱۰) است، که می‌تواند بیان کننده مقاومت در رطوبت‌های نزدیک به اشباع باشد، و با داده‌های واقعی مقاومت در بخش مرطوب شکل ٤ هم‌خوانی دارد. از سوی دیگر، مقادیر ناچیز c نشان دهندهٔ این واقعیت است که این خاک در حالت اشباع مقاومت چندانی نداشته و تأییدی بر رفتار سخت‌شوندگی و غالبیت اثر تنش مؤثر بر مقاومت می‌باشد. جدا کردن سخت‌شدگی طبیعی و سخت‌شدگی زمانی (Age-hardening) (۱۱ و ۳۵) در این شرایط مشکل است (چون به بررسی دقیق آرایش جدید و بررسی میکروسکوپی پیوندها و اتصالات ذرات خاک نیاز دارد)، ولی می‌توان گفت سخت‌شدگی زمانی افزایش مقاومت در مقیاس خاک‌دانه‌ها و ذرات خاک مجزا و سخت‌شدگی طبیعی افزایش مقاومت در تمام یک افق هستند، اگرچه هردو فرایند در اثر تنش مؤثر و فرایندهای رسوبی ایجاد می‌شوند (مکاتبات شخصی با دکتر سی. ای. مولینز). گرنت و همکاران (۱۷) معتقدند که افزایش خطی مقاومت در برابر BD به دلیل سخت‌شدگی طبیعی، و افزایش غیرخطی مقاومت در برابر BD در اثر هر دو فرایند است. زیرا گذشته از اثر BD بر مقاومت (سخت‌شدگی طبیعی)، افزایش قدرت پیوندها و اتصالات موجود در BD ثابت (سخت‌شدگی زمانی) نیز سبب افزایش مقاومت خاک می‌شود (۱۱).

نتیجه‌گیری و توصیه

پژوهش حاضر نشان داد که در سری خاک مورد بررسی، که در اصفهان فراوان یافت می‌شود، و یک خاک تیپیک مناطق خشک مرکزی است، کنترل کنندهٔ اصلی مقاومت در حالت تر، تنش مؤثر است. زیرا پس از نخستین آبیاری و بدون وجود بار خارجی، خاک به حالت فیزیکی پیش از خاک‌ورزی نزدیک شد. در شرایط ایران مرکزی، چون وزن وسایل نقلیهٔ کشاورزی زیاد نیست، و از سوی دیگر دورهٔ مرطوب محدود کننده‌ای برای ورود تراکتور به مزرعه وجود ندارد، بنابراین، نیروهای داخلی و فروپاشی ذرات خاک در تماس با آب در افزایش سفتی خاک نقش اساسی دارند. کاهش مقاومت خاک‌دانه‌ها در اثر تماس با آب، فروپاشی ذرات در اثر فشار هوای محبوس، آرایش تصادفی ذرات ریز در بین خاک‌دانه‌ها و ذرات درشت، و افزایش تنش مؤثر پس از خشک شدن، سبب سخت شدن و تراکم خاک می‌شوند.

کمبود مواد آلی و مدیریت ناصحیح این خاک در گذشته سبب شد تا در نخستین آبیاری غرقابی، که تنش مؤثر به صفر رسید (چون خاک اشباع است)، ساختمان خاک که در اثر خاک‌ورزی و عملیات تهیهٔ بستر سست و نرم شده، به حالت فیزیکی پیش از خاک‌ورزی نزدیک شود. بنابراین، اگر به گونه‌ای تنش مؤثر حاکم بر ذرات بزرگ‌تر از صفر شود به طوری که سبب نگهداری و هم‌آوری ذرات و جلوگیری از حرکت تصادفی ذرات گردد، می‌توان تا حدودی ساختمان مناسب ایجاد شده طی عملیات تهیه بستر را در طول دورهٔ رشد به عنوان خاک‌پوش خاکی (برای جلوگیری از تبخیر) و بستر بذر و گیاه مناسب حفظ کرد. یعنی اگر خاک پس از آبیاری تا حدودی تحت مکش ماتریک باشد، تنش مؤثر (حاصل از نیروی مکش خاک) بزرگ‌تر از صفر شده و در نتیجه از فروپاشی ذرات و آرایش تصادفی آنها تا حدودی جلوگیری می‌کند. بنابراین، اگر از اصول آبیاری تنشی (Tension wetting) در این گونه خاک‌ها استفاده شود، که از بروز تنش مؤثر صفر در خاک جلوگیری می‌کند، می‌توان از زایل شدن حالت فیزیکی مناسب خاک پس از آبیاری تا حدودی جلوگیری کرد (۲۳ و ۲۹).

از نمونه‌های بارز این نوع آبیاری می‌توان سیستم آبیاری جویچه‌ای با سرعت آب‌دوانی کم، سیستم آبیاری قطره‌ای، سیستم آبیاری بارانی با شدت پاشش کم و سیستم آبیاری کوزه‌ای را نام برد. ایجاد راه‌کارهای عملی و فناوری‌های لازم در استفاده از آبیاری تنشی، و به خصوص کاربرد آن در روش آبیاری سطحی، به عهدهٔ متخصصین آبیاری، خاک‌شناسی و ماشین‌های کشاورزی است، که به صورت یک روش کاربردی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

در اختیار کشاورزان قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از رسالهٔ دکتری نویسندهٔ اول است. کلیه هزینه‌ها و تأمین بودجه این طرح را دانشگاه صنعتی اصفهان تأمین کرده که بدین وسیله صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. هم‌چنین از آقای مهندس محمدعلی مطلبی و آقای محمدحسین شمس در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، که در انجام آزمایش‌های مقاومت کششی کمک کردند، و از دانشکدهٔ عمران برای در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌شود. در نهایت، از راهنمایی‌های ارزنده پروفسور ا. آر. دکستر (موسسه خاک‌شناسی و خاک‌ورزی لهستان، IUNG) و دکتر سی. ای. مولینز (دانشگاه آبردین، اسکاتلند) قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. اشرفی زاده، س. ر. ۱۳۷۸. بررسی تأثیر زیرشکن بر بعضی خصوصیات فیزیکو-مکانیکی خاک و عملکرد گندم. گزارش پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی، کرج.

۲. افیونی، م. و م. ر. مصدقی. ۱۳۸۰. اثر روش‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و حرکت بروميد. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۵(۲): ۳۹-۵۳.

۳. حاج‌عباسی، م. ع.، آ. ف. میرلوحی و م. صدر ارحامی. ۱۳۷۸. اثر شیوه‌های خاک‌ورزی بر بعضی از ویژگی‌های فیزیکی خاک و عملکرد ذرت در مزرعه تحقیقاتی لورک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۳(۳): ۱۳-۲۳.

٤. مصدقی، م. ر. و ع. همت. ۱۳۸۰. مروری بر پدیدهٔ سخت شوندگی طبیعی خاک ومشکلات آن در خاک‌های ایران. مجموعه مقالات کوتاه هفتمین کنگرهٔ علوم خاک ایران. دانشگاه شهرکرد، ٤-۷ شهریور.

۵. میرلوحی، آ. ف.، م. ع. حاج‌عباسی، س. ج. رضوی و ا. قناعتی. ۱۳۸۰. بررسی واکنش ژنوتیپ‌های مختلف ذرت به سیستم شخم متداول و بدون شخم در اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۵(۱): ۱۱۷-۱۲٦.

٦. همت، ع. ۱۳۸۱. مروری بر نتایج تحقیقات در مدیریت خاک‌ورزی برای تولید محصولات زراعی آبی در ایران. مجموعه خلاصه مقالات دومین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. ۸ و ۹ آبان، کرج.

۷. همت، ع. و ا. ا. خشویی. ۱۳۷٦. اثرات سیستم‌های مستقیم‌کاشت، بی‌برگردان‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بر عملکرد دانه گندم پاییزه آبی. علوم کشاورزی ایران ۲۸(۱): ۱۹-۳۳.

8. Aluko, O. B. and A. J. Koolen. 2000. The essential mechanics of capillary crumbling of structured soils. Soil Till. Res. 55: 117-126.

9. Aluko, O. B. and A. J. Koolen. 2001. Dynamics and characteristics of pore space changes during the crumbling on drying of structured agricultural soils. Soil Till. Res. 58: 45-54.

10. Dexter, A. R. and B. Kroesbergen. 1985. Methodology for determination of the tensile strength of soil aggregates. J. Agric. Eng. Res. 31: 139-147.

11. Dexter, A. R., R. Horn and W. D. Kemper. 1988. Two mechanisms for age-hardening of soil. J. Soil Sci. 39: 163-175.

12. Eghbal, M. K., M. A. Hajabbasi and H. T. Golsefidi. 1996. Mechanism of crust formation on a soil in central Iran. Plant and Soil 180: 67-73.

13. Frydman, S. 1964. The applicability of the Brazilian (indirect tension) test to soils. Austral. J. Appl. Sci. 15: 335-343.

14. Gardner, W. R., D. Hillel and Y. Benyamini. 1970. Post irrigation movement of soil water. I. Redistribution. Water Resour. Res. 6: 851-861.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]

15. Ghavami, M., J. Keller and I. S. Dunn. 1974. Predicting soil density following irrigation. Trans. ASAE 17: 166-171.
16. Ghezzehei, T. A. and D. Or. 2000. Dynamics of soil aggregate coalescence governed by capillary and rheological processes. Water Resour. Res. 36: 367-379.
17. Grant, C. D., D. A. Angers, R. S. Murray, M. H. Chantigny and U. Hasanah. 2001. On the nature of soil aggregate coalescence in an irrigated swelling clay. Austral. J. Soil Res. 39: 565-575.
18. Hajabbasi, M. A. and A. Hemmat. 2000. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran. Soil Till. Res. 56: 205-212.
19. Hemmat, A. 1998. Seedbed characteristic effects on wheat emergence in conventional and conservatin tillage systems. PP. 123-132. *In*: E. H. Bartali and M. Daoudi (Eds.), Proc. 13th Int. Cong. Agric. Eng., Rabat, Morocco.
20. Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. 2nd Edition, Academic Press, London.
21. Horn, R. and A. R. Dexter. 1989. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. Soil Till. Res. 13: 253-266.
22. Keller, J. 1970. Sprinkler intensity and soil tilth. Trans. ASAE 13(6): 118-125.
23. Kemper, W. D., J. S. Olsen and A. Hodgdon. 1975. Irrigation method as a determinant of large pore persistence and crust strength of cultivated soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 519-523.
24. Koolen, A. J. and H. Kuipers. 1983. Agricultural Soil Mechanics. Advanced Series in Agricultural Sciences, Springer-Verlag, Berlin.
25. Mosaddeghi, M. R., M. A. Hajabbasi, A. Hemmat and M. Afyuni. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. Soil Till. Res. 55: 87-97.
26. Mullins, C. E. 2000. Hardsetting soils. PP. G65-G87. *In*: M. E. Summer (Ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL.
27. Mullins, C. E., P. S. Blackwell and J. M. Tisdall. 1992. Strength development during drying of cultivated, flood-irrigated hardsetting soil. I. Comparison with a structurally stable soil. Soil Till. Res. 25: 113-128.
28. Mullins, C. E., A. Cass, D. A. MacLeod, D. J. M. Hall and P. S. Blackwell. 1992. Strength development during drying of cultivated, flood-irrigated hardsetting soil. II. Trangie soil, and comparison with theoretical predictions. Soil Till. Res. 25: 129-147.
29. Mullins, C. E., D. A. Macleond, K. H. Northcote, J. M. Tisdall and I.M. Young. 1990. Hardsetting soils: behavior, occurrence, and management. Adv. Soil Sci. 11: 37-108.
30. Mullins, C. E. and K. P. Panayiotopoulos. 1984. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. J. Soil Sci. 35: 459-468.
31. Or, D., F. L. Leij, V. A. Snyder and T. A. Ghezzehei. 2000. Stochastic model for posttillage soil pore space evolution. Water Resour. Res. 36(7): 1641-1652.
32. Snyder, V. A. and R. D. Miller. 1985. Tensile strength of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 58-65.
33. Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., London.
34. Towner, G. D. and E. C. Childs. 1972. The mechanical strength of unsaturated porous granular materials. J. Soil Sci. 23: 481-498.
35. Utomo, W. H. and A. R. Dexter. 1981. Age-hardening of agricultural top soils. J. Soil Sci. 32(3): 335-350.
36. Weaich, K., A. Cass and K. L. Bristow. 1992. Use of a penetration resistance characteristic to predict soil strength development during drying. Soil Till. Res. 25: 149-166.
37. Wulfsohn, D., B. A. Adams and D. G. Fredlund. 1996. Application of unsaturated soil mechanics for agricultural conditions. Can. J. Agric. Eng. 38(3): 173-181.
38. Young, I. M., C. E. Mullins, P. A. Costigan and A. G. Bengough. 1988. Hardsetting and structural regeneration in two unstable British sandy loams and their influence on crop growth. Soil Till. Res. 19: 383-394.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-26]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.1.7.1]