فروسایی خاک: چالش جهانی

جلد اول

تراکم، سخت شوندگی، شرایط ماندابی

فواد تاجیک

کارشناس ارشد خاکشناسی، عضو هیات علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی،

کرج، بلوار شهید فهمیده، روبروی بانک کشاورزی، صندوق پستی ۸۴۵-۳۱۵۸۵

تلفن: ۲۷۰۵۲۴۲ و ۲۷۰۵۳۲۰ و ۲۷۰۸۳۵۹ فاکس: ۲۷۰۶۲۷۷

نشر با ذکر منبع، آزاد است.

به نام خداوند جان آفرین

آنچه در دست دارید، قرار بود کتابی شود در باره فروسایی یا تخریب خاک و در زمره انتشارات مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی منتشر گردد. بد عهدی ها مانع این کار و دانشگاه صنعتی اصفهان مقصد بعدی این نوشتار شد که آن هم بی سرانجام ماند. پس از گذشت سالها، راهی بهتر از نشر آن در دنیای وب نیافتم که بی شباهت به تیر در تاریکی نیست. امیدوارم حاصل چند سال کوشش من مخاطب خود را بیابد و هدف اولیه که نشر دانش بود، حاصل آید.

ذکر نام نویسنده ای تنها در عنوان، به آن معنا نیست که از یاری دیگران محروم بوده ام. ویرایش متن، ابتدا با دقت تحسین برانگیز استاد گرامی آقای دکتر حمید سیادت صورت گرفت و سپس آقای دکتر محمد علی حاج عباسی بر غنای آن افزودند و از کژی هایش کاستند. اگر نام این بزرگواران بر تارک این متن نیامد از آن جهت است که هرگونه مسئولیت و عواقب نشر الکترونیکی بر عهده نویسنده بماند و از شائبه سوء استفاده از نام آنان بر حذر باشم. در نهایت، آنچه می بینید همچنان نیازمند به روز رسانی، تکمیل و تنقیح است که به یاری حق توسط نویسنده یا خوانندگان علاقمند و صاحبنظر انجام خواهد شد.

پراکنده ساختن این کتاب به هر شکل ممکن آزاد است، به امید آنکه باقیات صالحاتی برای نویسنده به شمار آید.

فؤاد تاجیک

فصل سوم – خاک های سخت شونده: رفتار، پراکندگی مکانی، مدیریت

۳-۱- مقدمه

خاک‌های سخت شونده[1] خاک‌هایی هستند که در حین خشک شدن، سخت و متراکم شده و شخم زدن در آنها دشوار یا غیر ممکن می گردد، مگر آنکه مجدداً خیس شوند. در این متن، واژه "Hardsetting" به صورت یک واژه پیوسته نوشته می شود که مطابق همان نگارشی است که در آغاز معرفی این مفهوم نوشته شد و نه به صورت "Hard-setting" که در برخی موارد به کار رفته است. این نوع رفتار خاک تنها در استرالیا شناسایی و نقشه برداری شده و «سخت شونده» نام گرفته است (نورثکات، ۱۹۷۵).

در حدود ۱۳ درصد از خاک‌های استرالیا دارای نیمرخ دو جزئی[2] با افق A1 سخت شونده می‌باشند اما وسعت خاک‌های دارای ویژگی های سخت شوندگی در سطح یا خاک‌هایی که پس از شخم در معرض سخت شدن هستند بسیار بیشتر است. اراضی وسیعی در گندم زارهای استرالیا دارای افق سطحی سخت شونده هستند و آشکار است که در قسمت‌های دیگر جهان نیز خاک‌هایی با چنین ویژگی‌ها و رفتاری وجود دارد. برای مثال، حداقل ۱۲ درصد از خاک‌های زامبیا را می توان به عنوان «سخت‌شونده» طبقه بندی نمود (اسپاگارن، ۱۹۸٦).

جوانه زنی و استقرار گیاهان در خاک حاوی سله[3] مستلزم نرم کردن خاک است، در حالی که آبیاری یا بارندگی پس از کاشت بذر در خاک‌های سخت شونده می تواند منجر به فروپاشی[4] مجدد لایه سطحی گردد. حتی وقتی که سله مشهود نیست، خشک شدن خاک ممکن است تا آن حد باعث سخت شدن لایه سطحی شود که مانع خروج گیاهچه گردد (مولینز و همکاران، ۱۹۸۷). در شرایطی که گیاه مستقر شده است نیز امکان ایجاد مشکل وجود دارد زیرا جذب آب توسط ریشه ها باعث خشک تر شدن خاک و افزایش مقاومت آن می شود تا حدی که ادامه رشد ریشه ها مختل می گردد. شخم زدن یک خاک سخت شونده ممکن است با محدودیت زمانی شدیدی روبرو شود زیرا تعیین زمانی که زمین قابل عبور بوده و در عین حال خیلی سخت نباشد، دشوار است. حتی در صورت خاک ورزی در زمان مناسب، در اغلب موارد ایجاد بستر بذری که نه کلوخه ای باشد و نه پودری[5]، به سختی امکان پذیر است.

1- Hardsetting soils
2- Duplex profile
3- Crust
4- Collapse
5- Dusty

خاک‌های سخت شونده همچنین دچار مشکلاتی مانند تهویه ضعیف در شرایط مرطوب، نفوذپـذیری انـدک، و افزایش رواناب و فرسایش می باشند. بنابراین دست یابی به نظام مدیریت مناسب برای کـاربری پایـدار خـاک‌هـای سخت شونده یک چالش عمده است. در حال حاضر، اگر چه توجه و شناخت فزاینده ای از «سخت شـوندگی» بـه عنوان یک رفتار متمایز خاک (که باعث ایجاد محدودیت های فیزیکی ویژه در خـاک ورزی و تولیـد محـصول مـی گردد) وجود دارد اما مشکلات مدیریتی خاک‌های سخت شونده حتی در استرالیا مورد توجه شایـسته قـرار نگرفتـه است (نورثکات، ۱۹۸۲).

تعریف رفتار سخت شوندگی خاک آسان به نظر می رسد اما تعیین مرزهایی که آن را از سایر رفتارهای خاک متمایز نماید بسیار دشوار است. افزون بر این، خاک‌هایی که در شرایط طبیعی ویژگی سخت شوندگی ندارند، ممکن است در اثر مدیریت نامناسب چنین رفتاری را نشان دهند، لذا نقشه هایی که بر مبنای رفتار خاک‌های بکر تهیه شده است، همه خاک‌های سخت شونده را در بر نمی گیرد. در حقیقت، به نظر می آید که تمامی خاک های دارای توزیع معینی از اندازه ذرات و کانی رس مشخص، در صورت کمبود مواد آلی یا مواد پیوند دهنده معدنی و یا فقدان پایداری خاکدانه‌های ریز، بالقوه سخت شونده هستند.

دراین فصل که عمدتا برگرفته از تک نگاشت مولینز و همکاران (۱۹۹۰) است ابتدا مبانی علمی رفتار سخت شوندگی تشریح شده و سپس طبقه بندی و پراکندگی مکانی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجا که فروسایی خاک‌های سخت شونده در نهایت ممکن است منجر به کاهش محصول تا مقادیر آستانه یا غیر اقتصادی گردد، فهم فرایند سخت شدن ضروری است. درک این فرایند می تواند مقدمه ای برای امکان سنجی انتقال سیستم های مدیریت موفق از یک منطقه با اقلیم، محصول یا نوع خاک ویژه به منطقه دیگر محسوب گردد.

خاک‌های سخت شونده تنها در استرالیا طبقه‌بندی و نقشه‌برداری شده‌اند و در سیستم رده‌بندی فائو و ایالات متحده (دودال،۱۹۷۰؛ سازمان نقشه برداری آمریکا، ۱۹۷۵) ویژگی های مربوط به سخت شوندگی به طور مشابهی طبقه بندی نشده است، لذا در این فصل ناچار بر تجربه های موجود در استرالیا تاکید می گردد. در بخش ۳-۳ چنین رفتاری از خاک در نقاط دیگر جهان به ویژه در اقلیم های مدیترانه ای و حاره مورد بررسی قرار گرفته و در حد امکان تشریح شده است.

۳-۱-۱- تراکم و سخت شوندگی

در حال حاضر، پراکندگی مکانی و شدت فروسایی خاک‌های سخت شونده و سایر خاک های سطحی با ساختمان ناپایدار و تفاوت آنها با خاک های متراکم مورد توجه شایسته قرار نگرفته است. برخی محققان با مشاهده

جرم مخصوص ظاهری زیاد خاک سطحی در برخی مراحل پس از جوانه زنی، آن خاک را متراکم نامیده اند. چنین تعبیری گمراه کننده است زیرا به طور ضمنی بر اعمال بار خارجی (مانند تردد ادوات کشاورزی یا انسان و حیوانات) دلالت می کند، در حالی که نیروهای مسبب تراکم درون خاک بوده اند. در برخی مطالعات مربوط به تراکم خاک سطحی، تمایز میان اثرات اعمال بار خارجی با اثر خیس کردن خاک‌های ناپایدار یا دارای ساختمان ضعیف، عملاً امکان پذیر نبوده است. ایجاد شرایط سخت شوندگی در یک خاک شخم خورده مستلزم فرو ریختن[1] آن می باشد که (با توجه به افزایش جرم مخصوص ظاهری) نوعی فرایند تراکم بدون اعمال بار خارجی محسوب - گردیده است. حتی در کتاب‌ها و مجموعه مقالات مربوط به تراکم، به ندرت به عواقب فرو ریختن ساختمان خاک سطحی توجه شده و بطور گمراه کننده ای بر تاثیر اعمال بار خارجی بر تراکم خاک تاکید نموده اند. در حالی که به عنوان نمونه، چند ماه پس از شخم یک خاک سخت شونده در انگلستان، جرم مخصوص ظاهری لایه سطحی به ۱/۷ Mg/m^3 رسیده (یانگ و همکاران، ۱۹۸۸) که دلیلی واضح بر این مطلب است که اعمال بار خارجی همواره علت افزایش جرم مخصوص ظاهری نمی باشد. تمایز میان علل تراکم، تنها اهمیت علمی و آکادمیک ندارد بلکه در عمل نیز استفاده از راه حلی مانند کاهش سطح تردد در خاک‌های سخت شونده (بدون تغییر سیستم مدیریت) ممکن است تاثیر اندکی بر حل مشکل تراکم داشته باشد.

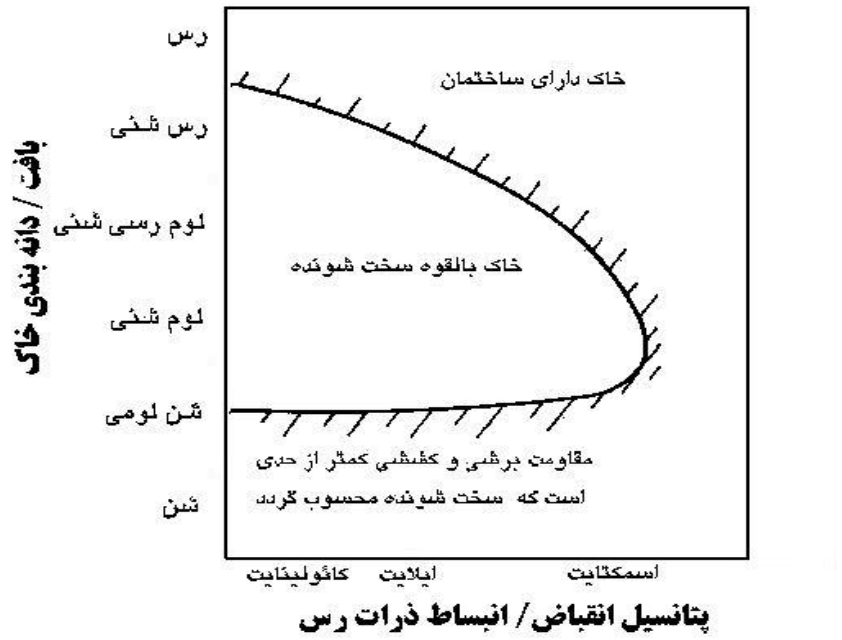
۳-۲- مبانی علمی رفتار سخت شوندگی

۳-۲-۱- ویژگی های خاک‌های سخت شونده

پیش از توصیف دقیق فرایند سخت شدن، بیان برخی ویژگی های شاخص خاک های سخت شونده ضرورت دارد. شکل ۲۲ دامنه ای از بافت ها و رفتار انواع رس در خاک‌های مستعد سخت شدن را نشان می دهد. اگر چه مولینز و پانایوتوپولوس (۱۹۸٤) نشان داده اند که مخلوط مصنوعی شن با حدود ۲ درصد کائولینایت می تواند رفتار سخت شوندگی داشته باشد، اما مطابق شکل ۲۲ مقاومت برشی و کششی چنین مخلوطی و همچنین برخی خاک های لوم شنی آنقدر کوچک است که مشکلی درهنگام شخم نشان نمی دهند و به عنوان خاک‌های سخت شونده طبقه بندی نمی گردند (لی، ۱۹۸۸). در خاک های رسی، انقباض در حین خشک شدن، باعث ایجاد ترک های ساختمانی می‌شود و بنابراین، چنین خاک‌هایی به عنوان سخت شونده طبقه بندی نمی گردد. اگرچه ایجاد ترک مستلزم وجود مقدار بیشتر رس منبسط شونده می باشد اما رس غالب در اکثر خاک‌های سخت شونده، میکای آبدار (ایلایت) و یا کائولینایت گزارش شده است (نوریش و پیکرینگ، ۱۹۸۳). در خاک‌های قرمز – قهوه ای

1- Slumping

استرالیا، وجود پیوندهای ضعیف و تمایل به سخت شدن با مقادیر زیاد سیلت و شن ریز توام بوده است (فرنچ، ۱۹۸۱؛ کوکرافت و مارتین، ۱۹۸۱). همچنین، درجایی که خاک حاوی مقادیرمحسوسی از مواد پیوند دهنده یا



شکل ۲۲- دامنه ای از بافت های خاک که احتمال سخت شوندگی با توجه به نوع کانی رس در آن وجود دارد (خاک‌های سیلتی نیز می توانند سخت شونده باشند ودراین صورت ممکن است دراواسط این دامنه قرار گیرند) [لی، ۱۹۸۸].

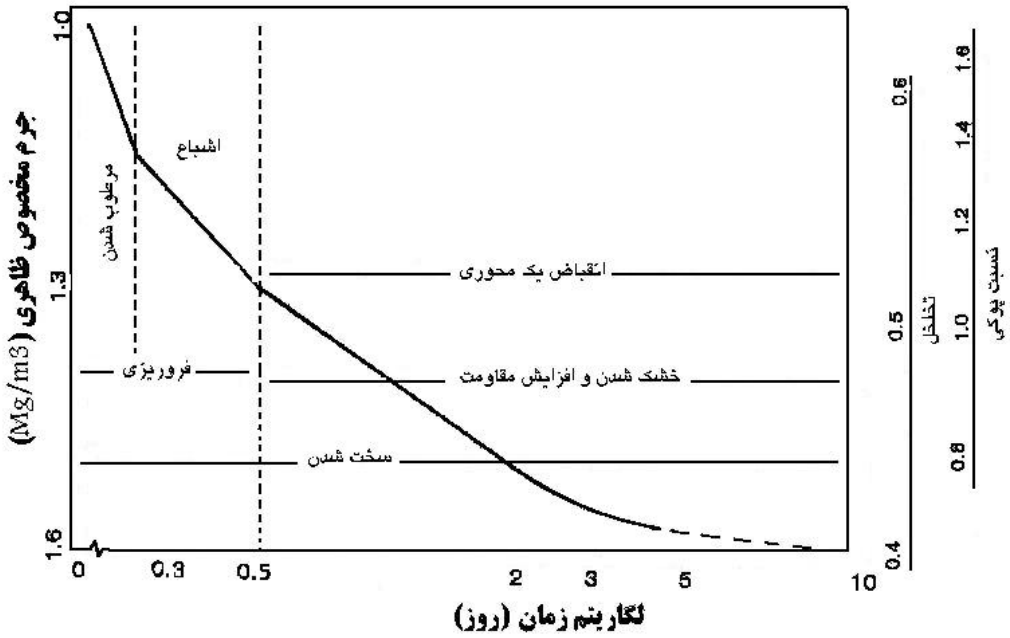
پایدارکننده (مانند اکسیدها و اکسی هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم) باشد، لاتریتی شدن ممکن است منجر به تشکیل توده سیمانی دائمی و یا تشکیل خاکدانه‌های ریز پایدار در آب گردد (ترپنل و وبستر، ۱۹۸٦). خاک‌هایی که دائماً در حالت خشک، سخت اند و پس از خیس شدن مجدد نیز نرم نمی شوند (همانگونه که در فرایند لاتریتی شدن خاک‌ها پس از جنگل تراشی دیده می شود) به عنوان خاک‌های سخت شونده طبقه بندی نمی گردند، بلکه این خاک ها و افق های دیگر خاک که پس از مرطوب شدن هم، سخت باقی می مانند بر حسب نوع مواد پیوند دهنده به صورت فراجی پن یا دوری پن طبقه بندی می‌شوند (اک و انگر، ۱۹۸۵). رفتار سخت شوندگی خاک‌هایی مانند خاک‌های سدیمی با مقدار زیاد پراکنش رس[1] به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته اند. وجود رس قابل پراکنش برای شرایط سخت شوندگی الزامی نیست، زیرا یانگ (۱۹۸۷) شرایط سخت شوندگی را در خاکی مشاهده کرد که حاوی رس قابل پراکنش نبود اما مقدار عمده ذرات کوچکتر از ٦۰ میکرومتر آن پس از فرو بردن در آب

1- Dispersible clay

با حداقل بهم خوردگی مکانیکی، به‌صورت ذرات ۶۰-۲۰ میکرومتر در محلول شناور شدند. پدیده سخت شوندگی عمدتاً در خاک‌هایی با مقدار کم و معمولاً کمتر از ۲ درصد مواد آلی (کوکرافت و مارتین، ۱۹۸۱) مشاهده شده است.

۳-۲-۲- فرایند سخت شدن

در یک خاک سطحی که قبلاً با شخم نرم شده، ویژگی سخت شوندگی متضمن فروریختن تمام یا قسمتی از ساختمان خاکدانه ای آن است که در حین خیس شدن و بعد از آن، مصنوعاً تشکیل شده است (کوکرافت ومارتین، ۱۹۸۱؛ مورفی و همکاران، ۱۹۸۷؛ لی، ۱۹۸۸؛ مید و چان، ۱۹۸۸؛ یونگ و همکاران، ۱۹۸۸) وسخت شدن خاک در حین خشک شدن و بدون بازآرایی مجدد ساختمان آن صورت می گیرد. بنابراین، خاک‌هایی که به طور طبیعی «سخت» هستند، قادر به تشکیل و تکامل خاکدانه های پایدار در آب نمی باشند. شکل ۲۳ نموداری از فرایندهایی است که در حین و پس از خیس کردن لایه شخم در یک خاک سخت شونده ممکن است واقع گردد. این فرایندها دامنه کاملی از وقایع امکان پذیر را نشان می دهد، اما در هر شرایطی لزوماً همه این فرایندها واقع نمی گردد. در هر حال، شکل ۲۳ نشان می دهد که شرایط سخت شوندگی حداقل به دو یا سه فرایند جداگانه قابل تقسیم است. بنابراین، در اصلاح چنین خاک‌هایی باید فرایند فروریزی یا فرایند افزایش مقاومت و یا هر دو آنها مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۲۳- نمودار فرضی برای نشان دادن توالی احتمالی فرایند تراکم در حین سخت شدن لایه ای از خاک دارای ساختمان در عمق ۰/۱ متری [لی، ۱۹۸۸].

۳-۲-۲-۱- فروریزی

فرایند فروریزی، منحصر به خاک‌های سخت شونده نیست بلکه در حین و بعد از خیس کردن بستری از خاکدانه‌های ناپایدار در آب، رخ می دهد. خاکدانه‌ها در حین خیس شدن به‌طور همزمان نرم شده و منبسط می گردند و انرژی آزاد شده ممکن است برای خرد کردن[1] آنها کافی باشد. در حین معلق شدن برخی یا تمام ذرات سیلت و رس (اگر چه لزوماً به صورت جداگانه در نمی‌آیند) و تحت شرایط یونی معین، برخی یا تمامی جزء رس ممکن است پراکنده گردد. در حین خیس شدن، خاکدانه‌ها متلاشی[2] می شوند زیرا به علت آزاد شدن سریع گرمای خیسیدگی، وجود هوای محبوس، اثر مکانیکی حرکت سریع آب (کالیس جرج و گرین، ۱۹۷۹) یا انبساط موضعی (امرسون، ۱۹۷۷) برای تحمل تنش های ناشی از جذب سریع آب، مقاومت کافی ندارند.

آیلمور و سیلز (۱۹۸۲) دریافته اند خاکی که پس از خیس شدن، خرد می شود؛ پس از خشک شدن، تمایل بیشتری به سخت شدن دارد. امرسون (۱۹۸٤ و ۱۹۷۷) اثر نوع کانی رس بر پدیده خرد شدن را تشریح نموده است. انبساط بلوری یک خاکدانه خشک مونتموریلونایتی حاوی کلسیم حدوداً ۲۵ بار بیشتر از خاکدانه کائولینایتی حاوی کلسیم می باشد. افزون بر این، تنش‌های ناشی از انبساط و هوای محبوس ممکن است با باز شدن[3] صفحات مونتموریلونایت کاهش یابد، اما چنین پدیده‌ای در صفحات کائولینایت صورت نمی‌گیرد. بنابراین، غوطه‌ور کردن خاکدانه خشک مونتموریلونایتی در آب منجر به انبساط تدریجی آن از قسمت بیرونی و دست نخورده ماندن باقیمانده آن می شود در حالیکه یک خاکدانه کائولینایتی همراه با آزاد کردن هوا به سرعت فرو می پاشد.

برخی محققان نشان داده اند که در خاک‌هایی که از نظر ساختمانی ناپایدارند، اشباع در پتانسیل ماتریک صفر در مقایسه با خیس شدن تحت مکش[4] منجر به کاهش بیشتری در تخلخل می گردد (قوامی و همکاران، ۱۹۷٤؛ کمپر و همکاران، ۱۹۷۵). در واقع مقایسه توزیع اندازه خلل و فرج درشت در بستری از خاکدانه‌ها که با دو روش متفاوت خیس شده اند مبنایی برای آزمایش پایداری ساختمانی توسط چایلدز بوده است (چایلدز، ۱۹٤۰ و ۱۹٤۲؛ چایلدز و یونگ، ۱۹۵۸؛ رایکریفت و ثوربورن، ۱۹۷٤؛ کالیس جرج و فیگوئرا، ۱۹۸٤). مطالعه اثرات دقیق خیس شدن در پتانسیل های ماتریک متفاوت دشوار است زیرا چنین اثراتی ممکن است با تاثیر شدت خیس شدن (که به پتانسیل ماتریک درون خاک و اثرات مستقیم پتانسیل ماتریک بر مقاومت خاک بستگی دارد) ترکیب شود. برای نمونه‌هایی

1- Slaking
2- Disintegrated
3- Unbending
4- Tension wetting

که در مکش‌های زیرصفر مرطوب شده‌اند، قوامی و همکاران (۱۹۷٤) یک رابطه تجربی از فرایند تراکم در حین فروریزی را به‌دست آورده‌اند.

$$e = e_o \left[\frac{\psi_m + c}{\sigma} \right]^b \qquad (۲)$$

که در آن، e نسبت تخلخل بستری از خاکدانه‌ها با نسبت تخلخل اولیه e_o است که تا پتانسیل ماتریک ψ_m و تحت تنش موثر σ مرطوب می‌شود. عامل اخیر (σ) مجموعه‌ای از وزن مواد رویی خاک، بارهای وارده بر سطح خاک و نسبتی از مکش آب خاک $|\psi_m|$ می باشد. در اینجا، b ثابت برازش تجربی و c چسبندگی نمونه های مرطوب است. کاربرد این معادله برای تشریح فرایند فروریزی لایه‌ای از خاکدانه‌ها که در پتانسیل ماتریک ۱/۳- و ٤/٥- کیلوپاسکال مرطوب شده و در معرض بارهایی به اندازه ۲/۲ تا ۱۸/٤ کیلوپاسکال (معادل بار وارد بر خاک در عمق بیش از ۰/۰٥ متر) قرار گرفته اند، موفقیت آمیز بوده است. قوامی و همکاران (۱۹۷٤)، این معادله را برای تخمین تراکم خاک در ستونی از خاکدانه‌ها به ارتفاع ۰/٦ متر که با استفاده از یک آبپاش به‌طور یکنواختی مرطوب شده و صفحه مکشی در انتهای آن تعبیه گردیده است، به‌کار برده‌اند. نسبت تخلخل بالاترین لایه تا ۰/۰٤ کاهش یافته است اما به علت بار وارده بیشتر، نسبت تخلخل درانتهای ستون تا ۰/۲۳ کاهش یافته است. اگر چه آزمایش‌های انجام شده ممکن است دقیقاً مشابه شرایط مزرعه نباشد، اما می-تواند نکات مهم زیر درباره فرایند فروریزی را ثابت کند.

۱- حتی در محدوده لایه سطحی خاک، بار وارده می‌تواند تاثیری مهم در افزایش تراکم قسمت‌های پایین‌تر لایه شخم در حالت مرطوب داشته باشد.

۲- معادله ۲ نقش دوگانه پتانسیل ماتریک را (که در صورت و مخرج کسر سمت راست معادله وجود دارد) بیان می کند. این بدان علت است که پتانسیل ماتریک به‌طور همزمان در مقاومت سیستم و تنش موثر کل که منجر به تراکم می گردد، سهیم می باشد.

۳- برای خاکدانه‌های ناپایدار در آب، زمانی که در پتانسیل صفر اشباع می شوند جزء مربوط به چسبندگی در معادله ۲ زائد است. در عمل مقدار فروریزی در چنین نمونه‌هایی نسبت به نمونه‌هایی که در مکش های زیر صفر مرطوب شده اند، بیشتر است. چنین شرایطی ممکن است عملاً در جائیکه لایه نفوذ ناپذیر موجود در زیر عمق شخم، خیس شده و موقتاً لایه اشباعی با پتانسیل ماتریک صفر در آن ایجاد شود (سطح ایستابی آویزان[1]) مشاهده گردد. نتیجه چنین وضعیتی ایجاد لایه ای با جرم مخصوص ظاهری بیشتر است که امکان دارد با تراکم ناشی از تردد اشتباه شود.

1- Perched water table

پتانسیل ماتریک خاک پیش از خیس کردن، همچنین بر وقوع[1] یا شدت[2] خرد شدن تاثیر می گذارد. خاکدانه-های مرطوب نسبت به خاکدانه‌های خشک شده در هوا و برخی خلل و فرج آنها پر از آب است (امرسون، ۱۹۷۷). نظریه کولیس جرج و لعل (۱۹۷۱) مبنی بر آنکه پوشش سطحی[3] ممکن است بتواند شرایط مرطوب تری را در سطح خاک فراهم کرده و تا حدی از خرد شدن خاکدانه‌ها جلوگیری نماید (اگر چه بر مبنای رفتار خاک های سخت شونده نیست) شایسته بررسی و مطالعه بیشتر می باشد.

اک و اونگر (۱۹۸۵) منابع علمی مربوط به کفه شخم[4] را بررسی نموده و نشان داده‌اند که کفه شخم اغلب در خاکهای فاقد رفتار انقباض– انبساط مشاهده می‌گردد. کفه شخم، لایه متراکم فاقد ساختمان و یا نفوذ ناپذیری است که در زیر لایه شخم یافت می‌شود. اگر چه ایجاد کفه شخم معمولاً به تردد ماشین‌های سنگین در شرایطی که خاک درعمق پایین مرطوب است نسبت داده می‌شود اما در مطالب پیش گفته روشن شد که چنین شرایطی می‌تواند در خاک های سخت شونده هم در نتیجه فرایند فروریزی اتفاق بیافتد.

۳-۲-۲-۲- انقباض یک محوری[5]

تجارب آزمایشگاهی در مورد رفتار بستری از خاکدانه‌های یک خاک سخت شونده که تحت مکش یا در پتانسیل صفر مرطوب شده باشد، نشانگر آن است که حداقل در مراحل اولیه خشک شدن $(\psi_m > -5KPa)$ انقباض یک محوری رخ می‌دهد (بلاک ول و همکاران، ۱۹۸۸). در حالی که یانگ (۱۹۸۷) و لی و همکاران (۱۹۸۸) در ستون-های دست نخورده کوچک که از لایه فاقد ساختمان در عمق بیش از ۰/۰٤m یک خاک سخت شونده برداشت شده و در دامنه‌ای از پتانسیل‌های ماتریک خشک شده‌اند، انقباض اندک یا فقدان انقباض را مشاهده نموده‌اند. این نتایج، تناقضی با هم ندارد زیرا در مورد اخیر، نمونه‌ها پیش از آزمایش و خیس شدن مجدد، فرو ریخته و خشک بوده اند، در حالیکه تجربه قبلی بر روی بستری از خاکدانه‌های دست خورده که برای اولین بار در فرایند خشک کردن قرار گرفته اند، انجام شده است. چنین حالتی در همه شرایط عمومیت ندارد اما اگر چنین باشد و خاک بصورت فاقد ساختمان بماند، لزوماً انقباض باید یک محوری باشد.

1- Incidence
2- Severity
3- Surface mulch
4- Plow pan
5- Uniaxial shrinkage

از آنجایی که انقباض یک محوری طبق تعریف، ناهمگرا[1] است لذا می بایست با جابجایی باقیمانده خاکدانه‌های فرو پاشیده و یا کالبد خاک توام باشد. این جابجایی تنها در صورتی می‌تواند بدون ایجاد ترک واقع گردد که نیروهای پیوند دهنده خاک، دامنه ای وسیع داشته و نامعین باشند. این نکته ای مهم است زیرا احتمالاً چنین نیرویی تنها با پتانسیل ماتریک قابل تامین می باشد و لذا هنگام وقوع انقباض یک محوری، پتانسیل ماتریک می تواند معرف عمده بودن سهم تنش موثر در مقاومت خاک محسوب گردد.

۳-۲-۲-۳- شرایط سخت شوندگی و افزایش مقاومت خاک

اغلب چنین اظهار شده است که مقاومت برخی خاک‌های سخت شونده در حین خشک شدن شدیداً افزایش می یابد و به همین علت است که کشاورزان آنها را "خاک‌های وقت ناهار" می نامند. چنین خاک هایی در هنگام صبح، بسیار مرطوب و در هنگام بعدازظهر بسیار خشک‌اند و تنها هنگام ظهر (وقت ناهار) قابل شخم می باشند! چنین اصطلاحی هر چند اغراق آمیز است اما بر محدودیت دامنه زمانی مناسب برای خاک ورزی تاکید دارد. یانگ (۱۹۸٦) و لی و همکاران (۱۹۸۸) در نمونه های استوانه‌ای دست نخورده (از خاک هایی با رفتار سخت شوندگی) که در دامنه‌ای از پتانسیل‌های ماتریک به تعادل رطوبتی رسیده بودند، مقاومت کششی و مقاومت فشاری محصور نشده را اندازه‌گیری نموده‌اند. در همه موارد، آنها تغییر ویژگی‌های مقاومت نمونه ها با پتانسیل ماتریک و مقدار رطوبت را مشاهده نمودند به طوری که با کاهش مقدار رطوبت تا پتانسیل ماتریک ۱- مگاپاسکال، به تدریج مقدار مقاومت افزایش شدیدتری می یابد. مشخص ترین افزایش مقاومت (بیش از سه برابر) در پتانسیل های ۰/۱- و ۱- مگاپاسگال بوده که در دامنه کوچکی از مقدار رطوبت وزنی (در حد دو درصد) واقع گردیده است. مشاهدات مولینز و مک لئود (چاپ نشده) نشانگر تشابه نتایج در تعدادی از خاک‌های سخت شونده استرالیا می باشد، اما افزایش مقاومت متناسب با کاهش مقدار رطوبت، تدریجی تر بوده است.

مولینز و همکاران (۱۹۸۷) برای توضیح پیدایش و افزایش مقاومت در خاک‌های سخت شونده که در بستر شخم شده ای از خاکدانه‌های خشک آغاز می گردد، فرایند زیر را پیشنهاد نموده اند:

۱- خیس کردن سیستم، تمامی یا قسمتی از سیلت و رس را جابجا می کند. این جابجایی ممکن است در حین خرد شدن و یا پراکنش اتفاق بیافتد.

در مراحل اولیه خشک شدن، مواد متحرک در پشت لبه هلالی آب که در حال پسروی است حرکت کرده و

1- Anisotropic

فرورفتگی های سطح دانه های شن و خاکدانه‌های باقیمانده را اشغال می کنند یا پل های حلقوی شکل میان مواد پایدار بزرگتر را شکل می دهند. کمپر و همکاران (۱۹۸۷) این پدیده را در زیر میکروسکوپ مشاهده کرده‌اند.

۲- با خشک تر شدن نمونه، علیرغم ورود هوا به خاک، مواد منتقل شده تا رسیدن به پتانسیل بسیار اندک (که برای کائولین در حد کمتر از ۱- مگاپاسگال گزارش شده است) به‌صورت اشباع باقی می‌مانند و در نتیجه، مشارکت پتانسیل ماتریک در تنش موثر، جزء مهمی از مقاومت خاک محسوب می گردد.

در خاک‌های سخت شونده ای که بخش قابل توجهی از خاک در حین خیس شدن جابجا می شود، توجه به پل‌های حلقوی شکل[1] گمراه کننده است زیرا کل خاک، نرم و ذرات جامد آن متحرک می شود به گونه ای که دانه های شن و حفرات کیسه ای[2] حاوی هوای محبوس در زیر آنها دفن می شوند (برای مثال، کوکرافت ومارتین، ۱۹۸۱). با وجود این، مراحل ۱ و ۳ معتبر باقی می مانند.

توالی وقایع فوق الذکر بیان رضایت بخشی از فرایند سخت شدن است که شامل افزایش شدید مقاومت در پتانسیل های ۰/۱- و ۱- مگاپاسکال می گردد. بند سوم از فرایند مذکور برای تبیین اثرات بعدی خشک و تر شدن بر خاک سخت شونده ای که فرو ریخته است به خوبی قابل کاربرد می باشد.

به محض ورود هوا به خاک، سهم تنش موثر در مقاومت مواد پیوند دهنده تا مقدار صفر کاهش می‌یابد و لذا مقاومت نمونه تماماً متاثر از پیوندهای شیمیایی خواهد بود. این مطلب ممکن است متناقض به نظر رسد که خاکی با پیوندهای شیمیایی نه چندان قوی که برای پایدار کردن آن در آب کافی نیست، بتواند هنگام خشک شدن، سخت و محکم باشد. لیکن باید یادآوری شود که خیس کردن خاک، دامنه ای از نیروهای فروپاشنده[3] قوی را به واسطه انبساط لایه دوگانه، هوای محبوس و گرمای خیسیدگی آزاد می‌کند که برای گسستن پیوندهای شیمیایی ای که در کوتاه مدت قوی و سخت اند کفایت می کند. درعین حال، پیوندهای پلیمری ضعیف (مانند پلی ساکاریدها) موجود در خاکدانه‌های پایدار در آب، اگر چه سهم متوسطی در مقاومت خاک دارند، ممکن است در برابر خیس شدن مقاوم باشند.

مقاومت نمونه های خاک سخت شونده ای که در هوا خشک شده اند ممکن است چند برابر مقاومت نمونه های به تعادل رسیده در پتانسیل ۱- مگاپاسکال باشد، اما رابطه کلی میان هر دو حالت وجود دارد (یانگ، ۱۹۸۷؛ لی و همکاران ۱۹۸۸) به گونه ای که خاک‌های با مقاومت زیاد در حالت هوا خشک، در پتانسیل ۱- مگاپاسکال نیز

1- Annular bridges
2- Vesicular
3- Disruptive

مقاومت بیشتری نشان می دهند. انقباض و یا بازآرایی ذرات خاک احتمالاً در فرایند خشک شدن دخیل است به گونه ای که تنش های موثر موجب نزدیک تر شدن سطح ذرات شده و تشکیل پیوندهای شیمیایی را تسهیل می نماید. در هر پتانسیل ماتریک معین، تنش های موثر به سطح هر صفحه مستعد شکست که قبلاً توسط مواد پیوند دهنده متحرک اشغال شده است، بستگی دارد. درعین حال، مشروط بر آنکه تعداد زیادی از عوامل پیوند دهنده[1] در حین خشک شدن گسیخته نشوند، سطح کل مواد پیوند دهنده نیز در مقدار مقاومت نمونه های خشک شده در هوا تعیین کننده خواهد بود.

اگر چه مبانی نظری دقیق تری برای تشریح اهمیت مقاومت در حالت خشک خاک‌های سخت شونده در دسترس نیست، اما مولینز و پانایوتوپولوس (۱۹۸٤) نظریه هایی را برای توضیح افزایش مقاومت کششی و برشی در حین خشک شدن تا نقطه ورود هوا به خاک ارائه نموده اند. در این نظریه ها، مقاومت کششی و برشی، نشان دهنده مجموع دو مفهوم هستند :

۱) پیوستگی (دگردوسی) که نماینده مجموع کل اثر پیوندهای شیمیایی بر مقاومت است.

۲) تنش موثر که نمایانگر اثر پتانسیل ماتریک بر مقاومت می باشد.

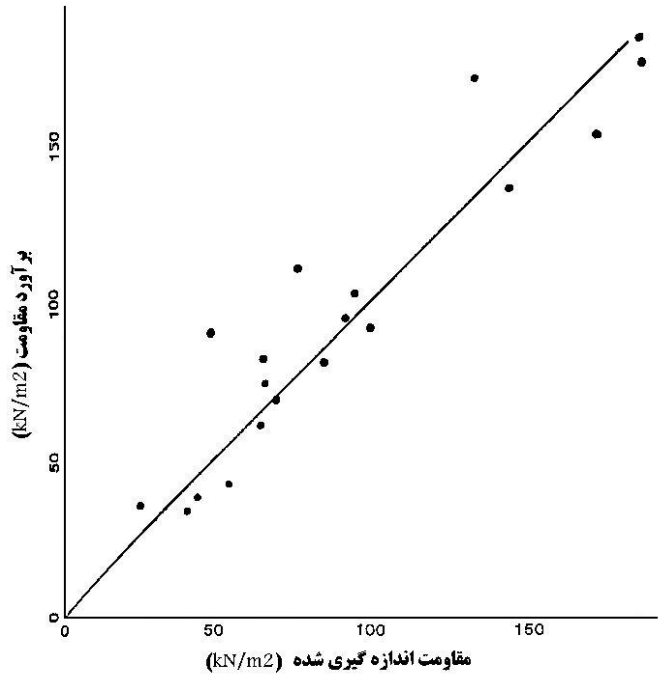
برآورد اثر دگردوسی دشوار است زیرا حتی در نمونه هایی که انقباض مشهود (ماکروسکوپی) ندارند، ممکن است به علت بازآرایی ذرات خاک در حین خشک شدن، افزایشی در مقدار دگردوسی ایجاد گردد.

با تخمین مقدار دگردوسی نمونه هایی که در پتانسیل ۳- کیلوپاسکال به تعادل رسیده اند و با فرض آنکه این کمیت، در پتانسیل‌های پایین‌تر به شدت افزایش نیابد، لی و همکاران (۱۹۸۹) توانسته‌اند مقاومت-های اندازه گیری شده برای نمونه های کوچک دست نخورده از خاک‌های سخت شونده و سایر خاک‌های فاقد ساختمان را با تخمین‌های نظری مقاومت مقایسه نمایند. با در نظر گرفتن فرضیات نظری و محدودیت های آزمایشی، برازش بسیار خوبی میان برآوردها ومقادیر اندازه گیری شده مقاومت به خرد شدن (در نمونه هایی که در پتانسیل ۱۰۰- کیلوپاسکال به تعادل رسیده اند) مشاهده شده است (شکل ۲٤). درجه برازش مشابهی نیز برای مقاومت کششی بدست آمده است اما پیش از آن، جزء مربوط به تنش موثر بر دو تقسیم می گردد تا وجود خلل و فرج کیسه ای تقریباً کروی نیز (همانگونه که توسط اشنایدر و میلر، ۱۹۸۵ تشریح شده است) منظور گردد. در هر دو حالت، تنش موثر سهم غالب را در مقاومت داشته است؛ بنابراین، کاربرد روش هایی برای گسیختن هلال آب (مانند افزودن مواد ضد آب) ممکن است به گسترش ترک‌های ریز و سست کردن خاک کمک کند.

برای نمونه هایی که در ۰/۳- و ۱- مگاپاسکال به تعادل رسیده اند، برآورد نظری مقاومت حتی تا سه برابر بیش از مقدار اندازه گیری شده آن است. چنین وضعیتی نشانگر ورود تدریجی و مستمر هوا به مواد پیوند دهنده یا

1- Bridgs

گسترش تدریجی گسیختگی به واسطه توسعه ترک (براوناک، ۱۹۷۹) در پتانسیل‌های کمتر از ۱۰۰- کیلوپاسکال می باشد. اگر چه توضیح پیشین برای تشریح رفتار سخت شوندگی کفایت می‌کند، اما امکان آنکه در برخی خاک‌های سخت‌شونده مواد پیوند دهنده متشکل از سیلیکای محلول بوده یا با آن تقویت شوند (دانیل و همکاران، ۱۹۸۸)



شکل ٢٤- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و برآورد نظری مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های دست نخورده (عمق ۰/۰۸-۰/۰٤ متر) از خاک‌های فاقد ساختمان نیجریه که در پتانسیل ماتریک ۱۰۰- کیلوپاسکال به تعادل رسیده اند[لی و همکاران، ۱۹۸۹] .

توجه بیشتری را ضروری می سازد. در مورد اخیر، ته نشست مداوم سیلیس منجر به توسعه لایه فراجی پن می‌شود که نشانه آن، سخت ماندن لایه و خرد شدن قسمت هایی از آن بعد از خیس شدن می باشد.

۳-۲-۲-٤- تشکیل سله و سخت شدن خاک سطحی

بسیاری از خاک‌ها با وجود سله بستن، رفتار سخت شوندگی ندارند. در حالی که شرایط سخت شوندگی بر کل افق A1 تاثیر می گذارد، ضخامت سله معمولاً کمتر از ۱۰ میلی‌متر است و در حالت خشک لایه‌ای مجزا را تشکیل می دهد که از خاک زیرین کنده می شود (نورثکات، ۱۹۷۹).

مک اینتایر (۱۹۸۵) دریافته است که سله سطحی از دو قسمت مجزا تشکیل شده است: یک لایه نازک سطحی به ضخامت ۰/۱ میلی متر که به نظر می رسد در اثر برخورد قطرات باران تشکیل شده باشد؛ و ناحیه

شستشوی زیرین[1] که تا ۳ میلی‌متر ضخامت دارد و تخلخل اندک آن به ته نشست ذرات ریز متحرک در خلل و فرج نسبت داده می شود. ناحیه شستشو معمولاً فقط در خاک‌هایی با ساختمان ناپایدار دیده می شود.

واضح است که سله بستن مانند شرایط سخت شوندگی مستلزم حرکت و ته نشست ذرات ریز می‌باشد. سه عامل با تاثیر بر خاک سطحی، آن را به طور خاص نسبت به سله بستن آسیب پذیر می کند:

۱- برخورد مکانیکی قطرات باران

۱- غلظت اندک الکترولیت های موجود در محلول خاک در اثر شستشو با آب باران

۳- فقدان ماتریکس خاک که اگر وجود داشته باشد می تواند منجر به کند کردن پراکنش رس و حرکت ذرات ریز گردد (آغاسی و همکاران، ۱۹۸۱).

وجه تمایز یک خاک سخت شونده با خاکی که سله می بندد آن است که افق A1 خاک سخت شونده به قدری ناپایدار است که افزایش رطوبت خاک (بدون تاثیر عوامل فوق الذکر) سبب خرد شدن خاکدانه ها و حرکت ذرات ریز می گردد. یک مطالعه آزمایشگاهی تشکیل سله توسط آرنت (۱۹۸۵) برخی جنبه های گسترش فرایند سله بستن تا اعماق پایین تر افق A1 را روشن می‌کند. وی سله‌ای سطحی را که از گل روان[2] تهیه شده بود روی لایه‌ای ۳ تا ۱۰ میلی‌متری از کلوخه های بهم پیوسته با گل ایجاد نمود. در نتیجه کاهش نفوذپذیری، کلوخه های زیر سله سطحی به کندی دراثر پدیده موئینگی مرطوب می‌شوند. چنین شرایطی منجر به کاهش مقدار هوای محبوس می گردد و لذا کلوخه‌ها خرد نمی‌شوند و تنها پیوستگی درونی‌شان ضعیف تر می گردد. هنگامیکه کلوخه ها به جای باران شدید با غرقاب کردن تدریجی مرطوب شدند، کل لایه کلوخه ها اشباع شده و پیش از تشکیل لایه محافظ، به گل روان تبدیل گردیدند. فرونشست حاصله در حین خشک شدن کل لایه، سله ای به ضخامت ۲۰ میلی متر را تشکیل داد، در حالیکه با کاربرد باران، لایه ای ٦ میلی متری روی کلوخه های دست نخورده (به ضخامت ۲۰ میلی متر) ایجاد می شود.

کالیس جرج و گرین (۱۹۷۹) نفوذپذیری ستونی از خاکدانه‌های خشک برداشت شده از یک خاک سخت شونده را به عنوان تابعی از اندازه خاکدانه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. به منظور شبیه‌سازی شرایط آبیاری غرقابی یا وضعیت زیر جویچه های آبیاری، سطح ستون خاک از آب پوشیده شد. آنان مشاهده کردند که خرد شدن خاکدانه‌ها سبب ایجاد خفگی[3] سطحی یا لایه محدود کننده‌ای می‌شود که باعث تاخیر نفوذ و در نتیجه خیس شدن

1- Washed-in
2- Slurried soil
3- Throttle

تدریجی خاک زیرین می گردد. آنان (همانگونه که توسط لعل و همکاران (۱۹۷۰) تشریح شده بود) دریافتند که عمق ناحیه خرد شدن خاکدانه ها از ۰/۰۲ متر به ۰/۱۳ متر و در عین حال اندازه خاکدانه ها از ۰/۵۰-۰/۲۵ میلی متر به ۳-۲ میلی متر افزایش می یابد.

در هر دو حالت بارندگی شدید و یا آبیاری شیاری یا کرتی، خرد شدن خاکدانه های سطحی و بسته شدن خلل و فرج ممکن است لایه‌ای را ایجاد کند که در مراحل بعد، نفوذپذیری را محدود می‌نماید و لذا نیمرخ زیرین معمولاً در اولین مرحله، در اثر مکش مرطوب می گردد. لیکن به علت آنکه حرکت آب ممکن است با یک لایه محدود کننده در اعماق پایین‌تر دچار وقفه گردد، باران یا آبیاری کافی می تواند این مکش را در سطح ایستابی آویزان موقت، تا صفر کاهش دهد. یک لایه محدود کننده ممکن است در اثر شخم و هنگامی که کفه شخم مرطوب است ایجاد شود زیرا حتی بدون وقوع پراکنش و لغزنده شدن[1] ، دست کاری یک خاک سخت شونده باعث حرکت سیلت و رس شده و تجمع[2] آنها منجر به ایجاد تراکم در عمق مربوطه می گردد. بنابراین، رژیم آبی دقیق و میزان تراکمی که احتمالاً در اعماق مختلف یک افق سخت شونده ایجاد می شود، زمینه ای برای تحقیقات آینده خواهد بود که بهتر است از اندازه گیری های تانسیومتر در محل و در حین خاک ورزی، بارندگی یا آبیاری تعیین گردد.

۳-۲-۲-۵- خیس شدن تحت مکش و غرقاب شدن[3]

تفاوتی میان خاک‌هایی که تحت مکش مرطوب شده اند با آنهایی که در پتانسیل صفر اشباع شده اند وجود دارد. علاوه بر تفاوت درجه فروریزی خاکدانه‌ها که در اینجا مورد بحث قرار گرفت، مرطوب کردن تحت مکش سبب تخریب شدید خاکدانه‌ها نخواهد شد (امرسون و بکر، ۱۹۷۳) و ذرات جابجا شده نیز می‌توانند آزادانه حرکت کنند، هر چند جابجایی ذرات در نواحی تماس میان خاکدانه‌ها متمرکز خواهد بود.

کمپر و همکاران (۱۹۷۵) دریافتند که غرقاب کردن بستری از خاکدانه های یک خاک سیلت لوم که از نظر ساختمانی ناپایدار بوده ودر هوا خشک شده بود، به ایجاد گسیختگی ۸ برابر بزرگتر از نمونه هایی که تحت مکش مرطوب شده بودند، منجر گردید. در شرایط مزرعه، آبیاری غرقابی این خاک‌ها منجر به کمتر از ۵۰ درصد جوانه زنی شده است، در حالیکه مرطوب کردن تحت مکش خاک، ۱۰۰ درصد جوانه زنی را موجب شده است. لیکن، هولم (۱۹۸۳) آزمایشی را تشریح نموده است که در آن بذرهای پنبه در ستونی از خاکدانه‌های یک خاک سخت شونده کشت شده و با غوطه ور کردن پایه آن درآب به مدت ۲٤ ساعت، به روش موئینگی مرطوب شده است.

1- Smearing
2- Overburden
3- Flooding

بذرهای پنبه جوانه زدند اما در ارتفاع ۰/۰۵ متری ستون کاملاً از رشد بازماندند؛ در ارتفاع ۰/۲-۰/۱ متری ستون ضمن صدمه دیدن جوانه اولیه رشد کردند و در ارتفاع ۰/٤ متری ستون بدون هیچ صدمه‌ای رشد نمودند. در این تحقیق، آبیاری شیاری معمولی در مزرعه منجر به تنها ۵۰ درصد جوانه زنی شده بود.

این دو آزمایش نمایانگر درجات متفاوت رفتار سخت شوندگی هستند و برای روشن ساختن اثر پتانسیل ماتریک در مرطوب کردن و ارتباط آن با افزایش مقاومت، کارهای بیشتری باید انجام گردد. به عنوان روشی کاربردی، کوکرافت و مارتین (۱۹۸۱) روش مرطوب کردن تحت مکش را با جریان آهسته آب در کف شیار آبیاری (برخلاف پر کردن سریع شیارها) انجام دادند به گونه ای که بیشتر طول شیار، تحت مکش مرطوب شود.

۳-۲-۳- پراکنش و سخت شوندگی

پراکنش کلوئیدهای خاک با طبیعت و توزیع کاتیون‌های قابل تبادل که بارهای دائمی یا متغیر موجود در سطوح کلوئید را خنثی می کنند، کنترل می شود. این یونهای مخالف که با نیروهای الکتروستاتیک یا کولومبی نگه داشته می شوند، هم در لایه اشترن و هم در قسمت پخشیده لایه دوگانه الکتریکی گوی – چپمن قرار دارند (شانموگاناتان و ادز، ۱۹۸۳).

تا هنگامی که اغلب یون‌های مخالف در لایه دوگانه پخشیده موجود باشند و ضخامت لایه به همان اندازه قطر ذرات کلوئیدی منفرد باشد، حالت پراکنش رس پایدار خواهد بود. نیروهای دافعه اسمزی میان لایه های دوگانه مانع از نزدیک شدن لایه ها تا حد عمل نیروهای جذب کننده ضعیف (عمدتاً نیروهای واندروالس) و بهم پیوستن ذرات[1] می شود. چنین وضعیتی در حضور کاتیون‌های مخالف یک ظرفیتی (به ویژه سدیم) تقویت می گردد.

اگر ضخامت لایه دوگانه به اندازه کافی کاهش یابد، نیروهای جذب کننده غالب شده و سبب بهم پیوستن ذرات می گردد. فشرده شدن لایه دوگانه ممکن است در دوحالت واقع شود :

۱) جایگزینی کاتیون‌های قابل تبادل یک ظرفیتی با کاتیونهای چند ظرفیتی

۲) افزایش غلظت الکترولیت در محلول خاک.

تغییر بار سطحی روی ذرات نیز بر فرایند هماوری – پراکنش[2] تاثیر می گذارد.

1- Coagulation

2- Flocculation-Dispersion

۳-۲-۳-۱- کاتیون های تبادلی و پراکنش

۳-۲-۳-۱-۲- سدیم

تاثیر منفی سدیم تبادلی بر ویژگی های فیزیکی خاک به واسطه اثر آن بر پراکنش رس، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. خاک‌های سدیمی آن قدر سدیم تبادلی دارند تا رفتار فیزیکی خاک را تحت تاثیر قرار دهند. آزمایشگاه شوری آمریکا (۱۹۵٤) حد ۱۵ درصد سدیم تبادلی[1] (ESP) را به عنوان مرز میان خاک‌های سدیمی و غیر سدیمی تعریف کرده است. لیکن پراکنش کلوئیدی و خرد شدن خاکدانه می‌تواند در مقادیر بسیار کم ESP نیز واقع گردد. برای مثال، امرسون (۱۹۷۷) گزارش نموده است که در نمونه های عمق ۱۰cm-۰ از ۵۱ خاک واقع در جنوب شرقی استرالیا، پراکنش در ESP برابر ۵ آغاز و در بیشتر نمونه ها در ESP برابر ۱۰ کامل می شود.

مک اینتایر (۱۹۷۹) مقدار بحرانی ESP برابر ۵ را پیشنهاد کرده است که برای شرایط استرالیا مناسب می باشد. شرایط فیزیکی نامطلوب در این مقدار کم ESP، در مقایسه با وضعیت گزارش شده از ایالات متحده آمریکا، به زیادتر بودن رس و بالاتر بودن نسبت $\frac{Mg}{Ca}$ تبادلی در خاک‌های استرالیا نسبت داده شده است.

۳-۲-۳-۱-۲- منیزیم

در ESP معین، در صورتی که منیزیم بجای کلسیم به عنوان کاتیون تبادلی مکمل وجود داشته باشد، خاکدانه‌ها پایداری کمتری دارند. امرسون و بکر (۱۹۷۳) دریافتند که در خاک های قرمز – قهوه ای حاوی ایلایت در ویکتوریا، با جایگزینی منیزیم بجای کلسیم به عنوان کاتیون مکمل، ESP لازم برای پراکنش حدوداً نصف شد. در مقایسه اثرات منیزیم تبادلی با سدیم تبادلی روی پراکنش یک خاک ایلایتی حاوی کلسیم، امرسون و چی (۱۹۷۷) نشان داده‌اند که منیزیم درمقایسه با سدیم، ۱۰ درصد ازپراکنش را سبب شده است.

انرژی آبپوشی[2] منیزیم ۲۰ درصد بزرگتر از کلسیم است. چنین تفاوتی منجر به افزایش درصد یونهای منیزیم حاضر در لایه دوگانه پخشیده نسبت به یونهای کلسیم می گردد (باکر و همکاران، ۱۹۷۳). در یک ESP معین، واکنش خاک ها به درصد مشابهی از منیزیم تبادلی متفاوت می باشد. ترکیب کانی رس عامل اصلی موثر بر واکنش خاک در نظر گرفته می شود (رحمان و راول، ۱۹۷۹). آزمایشگاه شوری آمریکا (۱۹۵٤) برای طبقه‌بندی خاک‌ها و آب آبیاری، منیزیم و کلسیم را به عنوان یون‌های مشابه گروه بندی کرده است. لیکن واضح است که برای برخی خاک‌ها نقش ویژه منیزیم باید در نظر گرفته شود.

1- Exchangeable Sodium Percentage

2- Hydration

۳-۲-۳-۱-۳- آلومینیوم

یون های آلومینیوم تبادلی به علت ظرفیت بالای خود، در لایه اشترن به فراوانی یافت می شوند به طوری که لایه دوگانه پخشیده فشرده شده و به دنبال آن نیروهای دافعه کاهش می یابند. پیوند بین ذرات نیز ممکن است با کاتیون های آلومینیوم پلیمریک محصور در عامل هیدروکسیل به وقوع پیوندد. اثر آلومینیوم تبادلی بر رفتار پراکنشی نمونه‌های برداشت شده از دو عمق یک خاک زیر سطحی رسی اسیدی توسط امرسون (۱۹۸۳) مشاهده و تشریح شده است. مقدار آلومینیوم تبادلی نمونه اسیدی‌تر (ESP = ۲۰ و pH = ۵) سه برابر بیشتر از نمونه دیگر (ESP = ۲٤ و pH = ٦/٤) بود و در حالیکه نمونه های خاک اسیدی اصلاً پراکنده نشدند، نمونه های دیگر کاملاً در آب پراکنده گشتند.

۳-۲-۳-۲- غلظت الکترولیت ها و پراکنش

پراکنش رس های خاک، حساسیت زیادی به غلظت الکترولیت در محلول خاک دارد. با افزایش غلظت الکترولیت ها تنش اسمزی میان ذرات رس به حدی کاهش می یابد که نیروهای با دامنه کوتاه غالب شده و هماوری واقع می گردد. کوئیرک و اسکوفیلد (۱۹۵۵) مفهوم آستانه غلظت را پیشنهاد نموده اند که برابر غلظت مورد نیاز برای جلوگیری از فروپاشی ذرات است. در آزمایش تعیین آستانه غلظت، پراکنش رس هنگامی صورت می گیرد که غلظت الکترولیت ها در محلول خاک به کمتر از حد آستانه برسد. لیکن پراکنش خاک‌های مورد آزمایش کوئیرک و اسکوفیلد (۱۹۵۵) در غلظتی کمتر از حد مورد نیاز برای فرایند معکوس آن (هماوری رس های معلق) صورت می گیرد. به عبارت دیگر، جزء رس خاک با عوامل پایدار کننده (مانند مواد آلی) ارتباط نزدیکی دارد، از این رو در مقایسه با رس معلق در آزمایش تعیین غلظت آستانه، حساسیت بیشتری به غلظت الکترولیت نشان می دهد (اوستر، ۱۹۸۲).

از آنجایی که پراکنش رس های خاک، هم به غلظت الکترولیت ها و هم به سدیم تبادلی حساسیت دارد، حد آستانه غلظت بسته به مقدار ESP تغییر می کند. به عبارت دیگر، حد بحرانی ESP برای وقوع پراکنش متناسب با کاهش مقدار الکترولیت، کاهش می یابد. بر این اساس شینبرگ و همکاران (۱۹۸۰) نشان داده اند که وقتی مقدار املاح خاک برابر $3\ mol_c/m^3$ باشد، پراکنش فقط در ESP بالاتر از ۱۲ صورت می گیرد. لیکن، در آب مقطر، پراکنش در ESP حدود ۱ تا ۲ نیز مشاهده می گردد.

اثر مشخص مقادیر کم سدیم تبادلی در سطوح پایین الکترولیت، نامناسب بودن حد ESP مورد استفاده برای تعریف خاک های سدیمی را توجیه می کند. آزمایشگاه شوری آمریکا (۱۹۷۹) محلول هایی با غلظت بیش از

mol_c/m^3 ۳ را استفاده کرد (شینبرگ و همکاران، ۱۹۸۰) و به ESP برابر ۱۵ دست یافت؛ اما مک اینتایر (۱۹۵٤) از غلظت mol_c/m^3 ۰/۷ استفاده کرد و اثرات پراکنش را در ESP برابر ۵ مشاهده نمود. تاثیر قابل ملاحظه غلظت الکترولیت بر پراکنش رس دو نتیجه مهم در تشکیل و اصلاح خاک‌های سخت شونده دارد:

۱) آبشویی املاح از قسمت های بالایی نیمرخ خاک ممکن است غلظت املاح را تا حد بسیار پایینی کاهش دهد و لذا منجر به پراکنش، تشکیل سله و ایجاد شرایط سخت شوندگی گردد. بنابراین، خاکی با ESP متوسط ممکن است دارای ویژگی های فیزیکی قابل قبولی در قسمت عمده ای از طول نیمرخ خود باشد اما در عین حال به علت غلظت اندک محلول خاک، مستعد پراکنش خاک سطحی نیز محسوب گردد.

۲) حساسیت یک خاک به پراکنش می تواند با افزایش غلظت الکترولیت در محلول خاک، کاهش یابد. شینبرگ و همکاران (۱۹۸۰) نشان داده اند که خاک هایی که سرعت آزاد سازی املاح از فاز جامد آنها در ESP معین برای حفظ غلظت محلول خاک در حدی بالاتر از آستانه غلظت کفایت می کند، دچار پراکنش نخواهند شد. رهاسازی املاح به وسیله هوادیدگی یا هیدرولیز رخ می دهد. برای مثال، ردز و همکاران (۱۹٦۸) گزارش کرده اند که آزاد سازی کلسیم ومنیزیم از کانی هایی مانند هورنبلند و فلدسپار پلاژیوکلاز منجر به افزایش غلظت املاح در محلول آبشویی تا حد mol_c/m^3 ۵-۳ شده است. در خاک‌های آهکی، حل شدن کانی‌های کربناتی می تواند در جلوگیری از پراکنش ناشی از وجود سدیم تبادلی موثر باشد (شینبرگ و گل، ۱۹۸۲؛ کازمان و همکاران، ۱۹۸۳). به عنوان یک راهبرد مدیریتی، با کاربرد گچ در خاک سطحی به منظور افزایش غلظت الکترولیت در آن می توان از پراکنش جلوگیری نمود. کاربرد گچ در خاک هایی با ESP در حدود ۱ نیز موثر بوده است (کازمان و همکاران، ۱۹۸۳).

تاثیر غلظت الکترولیت بر پراکنش رس نتیجه دو پدیده فیزیکوشیمیایی مشهود در خاک‌هاست. در آزمایش‌های ستون آبشویی، پوپیسکی و شینبرگ (۱۹۷۹) دریافتند که هر چند غلظت املاح در آب خروجی ستون ثابت بود، غلظت رس آزاد شده در فرایند پراکنش درابتدای آبشویی به سرعت افزایش یافت و پس از آبشویی معادل حدود ۱/۵ برابر حجم خلل و فرج خاک، به حداکثر مقدار خود رسید. با ادامه آبشویی، مقدار رس به تدریج کاهش یافت تا به حد پایین و تقریباً ثابتی رسید. هر چند هنوز رس موجود در ستون آبشویی برای حفظ یک غلظت بالاتر کافی بود، غلظت رس در حین آبشویی کاهش یافت.

چنین الگویی از تغییرات مقدار رس را می توان با نظریه امرسون و باکر (۱۹۷۳) که برای پراکنش خاکدانه‌ها در آب ارائه شده است، توجیه نمود. آنان پیشنهاد کرده‌اند که در بررسی پراکنش رس از خاکدانه‌های حاوی مقدار کم سدیم تبادلی به دو نکته باید توجه نمود :

۱) غلظت املاح در محلول خاک می بایست کمتر از غلظت آستانه هماوری باشد.

۲) شیب غلظت املاح بین محلول رقیق موجود در خلل و فرج خاک ومحلول غلیظ تر در خلل و فرج بسیار ریز[1] موجود در خاکدانه ها می بایست از مقدار مشخصی بیشتر باشد. این شیب غلظت املاح سبب حرکت اسمزی آب به درون خاکدانه و انبساط و خرد شدن آن می گردد (شینبرگ و همکاران، ۱۹۸۰). هنگام نفوذ عمقی آب باران در خاک، شیب غلظتی قابل توجهی در جبهه رطوبتی میان خلل و فرج ریز خاکدانه و خلل و فرج بزرگتر مرتبط با آن وجود دارد. چنین حالتی در مراحل اولیه بارش منجر به حداکثر شدن پراکنش در حین مکانیسم انفجار اسمزی[2] می گردد. با ادامه آبشویی، فرایند انتشار[3] باعث کاهش شیب غلظت املاح میان درون و برون خاکدانه ها شده و از پراکنش آنها می کاهد.

طی مطالعات مربوط به اثر کیفیت آب آبیاری بر مقدار نفوذ، استر و شرودر (۱۹۷۹) دریافتند که کمترین سرعت نفوذ در ستون‌هایی به دست آمد که متناوباً با آب دارای SAR=۱۹/۹ و آب مقطر آبیاری شده بودند. با فرض آنکه نفوذپذیری خاک شن لومی درشت مورد استفاده در آزمایش عمدتاً متاثر از پراکنش رس و فرو ریختن خلل و فرج باشد، اثر شیب غلظت املاح بر پراکنش، توجیه کننده نتایج مشاهده شده است. همچنین، داده‌ها موید آن است‌که وقوع بارندگی در فواصل آبیاری (یا بالعکس) پراکنش بالقوه خاکدانه‌ها را تشدید می-کند.

پدیده دوم موثر بر غلظت املاح و پراکنش رس، غربال املاح[4] است که طی آن ذرات نمک در میان واحدهای کوچک ساختمانی خاکدانه ها[5] محبوس می گردند (بلاک مور، ۱۹۷۶). سطوح رس دارای بار منفی با ناحیه دفع آنیونی محصور شده اند به گونه ای که در سطوح رس مرطوب معمولاً تمایلی برای جذب املاح و جدا کردن آنها از آب وجود دارد. نواحی دفع آنیونی درون خاکدانه‌ها که در سطوح خلل و فرج باریک تر قرار دارند، سطح مقطع فرایند پخشیدگی املاح از خلل و فرج بزرگتر داخلی را محدود می‌نماید. بنابراین، در شرایطی که ارتباط بسیاری از خلل و فرج درشت توسط خلل و فرج باریکتر با خارج قطع شده باشد، مقادیر زیادی از املاح ممکن است محبوس گردند. چنین وضعیتی ممکن است در حالتی که روی خاکدانه ها با

1- Micropores
2- Osmotic explosion
3- Diffusion
4- Salt sieving
5- Microfabric

پوسته های رسی[1] پوشیده باشد، رخ دهد. در شرایطی که پراکنش خاکدانه متاثر از سرعت پخشیدگی املاح از خاکدانه به محلول خاک باشد، غربال املاح حایز اهمیت می گردد (رنگاسامی و همکاران، ۱۹۸٤).

۳-۲-۳-۳- چگالی بار سطحی

افزایش چگالی بار منفی در سطح کلوئیدها منجر به افزایش نیروهای دافعه میان ذرات و همچنین ضخامت لایه دوگانه و لذا افزایش پراکنش ذرات می شود. تغییر pH، بار لبه ای کانی های رسی و بارهای سطحی مربوط به اجزاء با بار متغیر (مانند اکسیدهای آهن و آلومینیوم و مواد آلی) را تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین، سطوح لبه کانی کائولینایت که با شکسته شدن پیوندهای اولیه چهار وجهی های سیلیس و هشت وجهی های آلومینیوم ایجاد شده است، در محلول اسیدی، حاوی بار مثبت و در محلول های بازی، حاوی بار منفی است. اسیدیته‌ای که در آن، مجموع بارهای منفی برابر مجموع بارهای مثبت باشد، نقطه با بار صفر یا ZPC[2] نامیده می شود. مقدار ZPC برای اکسیدهای آهن و آلومینیوم در محدوده ۹-۷ قرار دارد، لذا خاک‌های سرشار از آنها، ZPC نسبتاً بالایی دارند.

افزایش پراکنش رس متناسب با pH که در برخی خاک‌ها مشاهده شده، به افزایش بار خالص منفی نسبت داده شده است (آرورا و کولمان، ۱۹۷۹؛ سوارز و همکاران، ۱۹۸٤). در مقادیر کم pH، میان لبه های کائولینایت با بار مثبت و سطوح رس با بارمنفی، پیوندهای لبه – سطح تشکیل می‌شود. به همین ترتیب، اکسیدهای آهن و آلومینیوم حاوی بار مثبت با سطوح رس حاوی بار منفی پیوند می خورند. چنین پیوندی، هماوری متقابل[3] نام دارد که مانع از وقوع پراکنش می گردد. با افزایش pH تا حد ZPC، تشکیل پیوندها کاهش یافته و در نهایت، بار لبه های کانی کائولینایت معکوس شده و شرایط دافعه لبه – سطح ایجاد می گردد (فرنکل و همکاران، ۱۹۷۸). خاک‌های حاوی مقادیر زیاد کلوئیدهای با بار متغیر، در فرایند پراکنش بیشترین حساسیت را به مقدار pH دارند.

تغییرات گسترده‌ای در نحوه اثر سدیم تبادلی بر خاک‌های حاوی کائولینایت گزارش شده است (فرنکل و همکاران، ۱۹۷۸). اغلب مطالعات بر روی خاک‌های اسیدی حاوی مقادیر قابل توجه اکسیدهای آهن انجام گردیده است. در چنین شرایطی انتظار می رود که پیوندهای لبه – سطح موجب خنثی کردن نیروهای پراکنشی گردند، اما یکی از خاک های حاوی کائولینایت که توسط فرنکل و همکاران (۱۹۷۸) موردمطالعه قرار گرفته، اسیدی نبوده است و لذا پیوندهای لبه – سطح در آن ضعیف تر و حساسیت آن به پراکنش ناشی از اعمال نیروهای دافعه مرتبط با سدیم جذب سطحی شده، بیشتر بوده است.

1- Cutans
2- Zero Point of Charge
3- Mutual flocculation

چگالی بار منفی روی سطوح کلوئید ممکن است در اثر جذب ویژه آنیون ها، افزایش یابد. شانموگاناتان و ادز (۱۹۸۳a) نشان داده اند که افزودن برخی آنیون ها (مانند فسفات و فولوات) به خاک‌هایی که هماوری داشته اند منجر به مقداری پراکنش شده است. بنابراین، افزودن کودهای فسفاته ممکن است ویژگی های بار الکتریکی خاک سطحی را تغییر دهد.

۳-۲-۳-٤- عوامل پیوند دهنده

نیروهای دافعه ذرات رس در اثر مواد پیوند دهنده و مکش آب خاک خنثی می شوند (چایلدز، ۱۹٦۹). مواد آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم از جمله مهم‌ترین مواد پیوند دهنده محسوب می گردد.

۳-۲-۳-٤-۱ مواد آلی

مواد آلی، هم به عنوان پیوند دهنده و هم به عنوان عامل پراکنش در خاک عمل می کنند. آنیون های آلی طبیعی از تجزیه مواد آلی و تراوشات ریشه تولید می شوند. آنیونها با اسیدهای آلی (که دامنه ای از ساده ترین و شناخته شده ترین اسیدها مانند سیتریک، اگزالیک و تارتاریک تا اسید فولویک را شامل می گردند) همراه است (ادز، ۱۹۸٤). علاوه بر افزایش بار منفی روی سطح کلوئیدها، مواد آلی احتمالاً طی دو فرایند ذیل بر پراکنش تاثیر می گذارد:

۱) تشکیل کمپلکس با یون های فلزی سه و دو ظرفیتی که منجر به کاهش غلظت آنها در محلول می شود.
۲) بر هم کنش با جایگاه های بار مثبت حاوی فلزات سه ظرفیتی (آلومینیوم و آهن) که در لبه های شبکه رس وسطح اکسیدها قرار دارند (ادز، ۱۹۸٤).

گیلمان (۱۹۷٤) اثر پراکنشی مواد آلی را بر یک نیمرخ شدیداً هوازده خاک کراسنوزم تحت شرایط جنگل های بارانی بکر در کوئینزلند، تشریح نموده است. تا عمق دومتری، اکسیدهای آهن و آلومینیوم در جزء رس غالب بوده اند ومقداری کائولینایت هم به عنوان جزء فرعی مشاهده شده است. اسیدیته خاک عمقی درنزدیکی ZPC بوده و بار خالص برای تولید نیروهای دافعه میان ذرات رس نیز ندارد و لذا مقدار پراکنش رس آن اندک یا هیچ بوده است. اما در خاک سطحی، جذب سطحی مواد آلی با بار منفی بر روی جایگاه های سطح کانی باعث کاهش ZPC تا حد کمتر از pH خاک می گردد. در نتیجه، در لایه سطحی مقدار زیادی رس‌های قابل پراکنش در آب وجود دارد.

مواد آلی می توانند اثر هماوری آلومینیوم تبادلی را نیز خنثی کنند. امرسون (۱۹۷۱) تعلیق هایی از یک خاک زیر سطحی اسیدی حاوی کائولینایت را تهیه نمود که به سرعت در آب هماوری نشان دادند، در حالیکه تعلیق های

خاک سطحی پایدار مانده بود. به نظر می رسد که آلومینیوم جذب سطحی شده مسئول هماوری خاک زیر سطحی بوده، اما وجود مواد آلی در خاک سطحی باعث غربال و جدا ماندن آنها شده است.

به نظر می رسد که اثر پراکنشی مواد آلی حاوی بار منفی، با اثر پایدار کننده مواد آلی بر خاکدانه ها (که به خوبی شناخته شده است) مغایرت دارد. یک توضیح این مغایرت آشکار در آزمایشی که توسط امرسون (۱۹۵٤) انجام شده، ارائه گردیده است. خاکدانه‌های خاک سطحی با محلول NaCl شستشو داده شدند تا سدیم جایگزین اغلب کاتیونهای تبادلی موجود شود. سپس، خاکدانه ها با غلظت‌های کمتر NaCl به تعادل رسیدند. در خاکدانه های برداشت شده از زمین تحت کشت دایم، پراکنش هنگامی صورت گرفت که غلظت NaCl تا M ۰/۰۳۵ کاهش داده شد. متقابلاً، در خاکدانه های با ترکیب کانی مشابه که از علفزارهای دائمی برداشت شده بود، پیوندهای آلی حتی بعد از غوطه ور کردن خاکدانه ها در آب مقطر از پراکنش جلوگیری کردند. علیرغم پایداری بیشتر خاکدانه های دست نخورده علفزار، هماوری در تعلیق حاصل از این خاکدانه ها مستلزم غلظتی از NaCl معادل ۱۰ برابر غلظت مورد نیاز برای هماوری تعلیق نمونه های برداشت شده از خاک تحت کشت بود. توجیه چنین وضعیتی آن است که پیوندهای آلی می توانند در مقابل تنش اسمزی ایجاد شده بوسیله سدیم جذب سطحی شده، ذرات رس را در کنار هم نگهدارند (امرسون، ۱۹۷۷). در صورتیکه این پیوندها در اثر برش یا تنش[1] بشکنند (مانند شرایط آماده کردن تعلیق در آزمون پراکنش) و ذرات رس به اندازه کافی از هم دور شوند، آنیون های آلی بیش از آنکه پایدار کننده باشند، مانند عوامل پراکنشی عمل می کنند.

برای اصلاح شرایط سخت شوندگی، مواد آلی باید درخاک باقی بمانند تا پایداری ساختمانی افزایش یابد. سیستم های مدیریتی ای که شامل شخم متوالی همراه با افزایش اندک بقایای گیاهی آلی هستند نه تنها مقدار مواد آلی کمتری دارند بلکه ترکیب مواد آلی باقی مانده را نیز تغییر می دهند (ادز، ۱۹۸٤ و ۱۹۸۱). در چنین شرایطی نسبت اسید فولویک به اسید هومیک افزایش می یابد به طوری که حلالیت مواد آلی افزایش یافته و در مقایسه با خاک مشابه که دو تا سه برابر مواد آلی بیشتری دارد حاوی گروه‌های عامل اسیدی بیشتری می گردد. بنابراین، تلفات مواد آلی به واسطه افزایش نسبت اسید فولویک و اکسید شدن عوامل پیوند دهنده آلی، منجر به افزایش پراکنش رس می گردد.

آیلمور و سیلز (۱۹۸۲) اظهار داشته اند که پایداری و دوام پیوندهای ساختمانی آلی ممکن است با ترکیب کاتیون های تبادلی خاک در زمان افزودن بقایای آلی به خاک مرتبط باشد. گمان می رود که اسیدهای یولمیک و هومیک توسط کلسیم حاصل از ریشه های بقولات، به مواد سیمانی تبدیل می شوند. در صورتی که یون های سدیم کافی وجود داشته باشد، فرآیند سیمانی شدن می تواند کند شده و لذا منجر به کاهش ایجاد پیوند گردد.

1- Shearing

۳-۲-۳-٤-۲- اکسیدهای آهن و آلومینیوم

همراه بودن ساختمان پایدار خاک با مقدار زیاد اکسید آهن به دیدگاهی منجر شده است که اکسید آهن را عامل پیوند دهنده ذرات خاک می داند. ولاسکو- مولینا و همکاران (۱۹۷۱) اظهار داشته اند که پایداری خاکدانه ها در خاکی با ESP برابر ۲۲ بعلت مقدار زیاد آهن موجود در خاک (۱٤ درصد Fe_2O_3) می باشد؛ اما امرسون (۱۹۸۳) خاطر نشان کرده است که این، شاهد روشنی بر نقش اکسیدهای آهن در پیوند دادن ذرات رس موجود در خاکدانه ها محسوب نمی گردد. وی دریافت که در یک خاک قرمز- قهوه ای با ٦ درصد اکسید آهن (Fe_2O_3) آزاد، رسیدن به ESP برابر ۵ برای پراکنش خاکدانه ها در آب کفایت می کند. خاک‌های سرشار از اکسیدهای آهن با ساختمان پایدار (مانند اکسی سولز و کراسنوزم) معمولا حالت اسیدی دارند. احتمالاً بهتر آن است که پایداری ساختمانی به اثر pH اسیدی بر بار سطحی و آلومینیوم تبادلی نسبت داده شود و نه به پیوندهای حاصل از اکسیدهای آهن. یک اثر pH در خاک‌های فوق‌الذکر با این حقیقت نشان داده می شود که خاک های قرمز- قهوه ای مستعد پراکنش، خنثی بوده اند؛ در حالیکه پراکنش خاک های قرمز- قهوه ای اسیدی تر که حاوی مقدار قابل توجهی آلومینیوم تبادلی هستند، مستلزم رسیدن ESP به حد ۱۲ می باشد (امرسون و بکر، ۱۹۷۳). اکسیدهای آلومینیوم در خاک‌های اسیدی به شدت هوازده غالب اند و مانند اکسیدهای آهن تفکیک اثر پیوندهای احتمالی آن از اثرات pH، دشوار است.

۳-۲-۳-۵- ترکیب کانی رس

سرعت و مقدار پراکنش یک خاک بر حسب ترکیب کانی رس موجود در آن، متفاوت است. آرورا و کلمن (۱۹۷۹) دریافتند که کانی های رسی اشباع از سدیم حساسیت متفاوت نسبت به هماوری با بیکربنات سدیم ($NaHCO_3$) دارند که ترتیب آن چنین بوده است: کائولینایت < مونتموریلونایت < ورمیکولایت < ایلایت. غلظت های بحرانی بیکربنات سدیم برای این کانی ها بترتیب ۱۸۵، ۵۸، ٦۰-۲۸ و ۸ $mol_c m^{-3}$ بوده است.

استر و همکاران (۱۹۸۰) دریافتند که مقدار هماوری ایلایت حاوی سدیم ٤/٦ برابر مونتموریلونایت حاوی سدیم بوده است. از سوی دیگر، ولاسکو- مولینا و همکاران (۱۹۷۱) ترتیب پراکنش خاک ها را چنین گزارش کرده اند: خاک های مونتموریلونایتی > خاک های حاوی کائولینایت و هالویسایت> خاک های حاوی میکا. لیکن نکته قابل توجه آن است که خاک های حاوی میکا دارای کانی های کربناتی و سولفاتی نیز هستند که با آزاد کردن املاح در محلول، موجب افزایش هماوری می‌گردند.

۳-۲-۳-۵-۱- ایلایت

با وجود مشابه بودن نیروهای دافعه میان رس های ایلایتی و مونتموریلونایتی حاوی سدیم (استر و همکاران،۱۹۸۰) رس های حاوی ایلایت مقدار پراکنش بیشتر دارند که به کوچکتر بودن نیروهای جذب لبه به سطح آن نسبت داده شده است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نشان داده است که سطوح مستوی[1] ذرات ایلایت، نامنظم و تخت هستند (گرین و همکاران، ۱۹۷۸). با نزدیک شدن ذرات به یکدیگر، سطوح نامنظم تنها تماس ضعیفی را میان لبه ها و سطوح مستوی فراهم می کنند. چنین وضعیتی جذب لبه به سطح را تضعیف کرده و ممکن است هماوری، منوط به وجود غلظت بالای الکترولیت ها گردد.

انتظار می رود که خاک های ایلایتی به پراکنش رس حساس باشند. رنگاسامی (۱۹۸۳) صحت این نکته را برای خاک های قرمز- قهوه ای ایلایتی در استرالیا تایید نموده است. قسمتی از تمایل این خاک‌ها به پراکنش، به مستعد بودن آنها برای ایجاد شرایط سخت شوندگی نسبت داده شده است.

ایلایت به اثر ویژه منیزیم تبادلی بر پراکنش نیز حساسیت دارد (باکر و امرسون، ۱۹۷۳). رحمان و راول (۱۹۷۹) اثر ویژه منیزیم بر ایلایت، خاک ایلایتی، ورمیکولایت و خاک حاوی مخلوط ایلایت- مونتموریلونایت را گزارش نموده اند اما برای مونتموریلونایت خالص اطلاعاتی ارائه نکرده اند.

۳-۲-۳-۵-۲- مونتموریلونایت

استر و همکاران (۱۹۸۰) دریافته اند که مقدار هماوری مونتموریلونایت اشباع از کلسیم در اثر افزایش کوچکی در سدیم تبادلی، بسرعت افزایش می یابد. چنین اثر قابل توجهی ناشی از پدیده عدم اختلاط [2] است که به موجب آن، اولین افزایش سدیم به مونتموریلونایت حاوی کلسیم بر روی سطوح خارجی جذب می شود و سطوح داخلی، اشباع از کلسیم باقی می مانند. چنین توزیعی از یونها باعث گسترش لایه دوگانه در سطوح خارجی و پایدارتر شدن تعلیق در مقایسه با شرایط گسترش یکنواخت سدیم در تمامی سطوح می گردد.

۳-۲-۳-۵-۳- کائولینایت

اسکوفیلد و سامسون (۱۹۵٤) دریافتند که هماوری کائولینایت اشباع از سدیم در آبی با pH برابر ۵ رخ می دهد. سهولت هماوری به جاذبه میان لبه های حاوی بار مثبت و سطوح مستوی حاوی بار منفی نسبت داده می شود. با افزودن مقدار کمی از NaOH، رس کاملاً پراکنده می شود که ممکن است بارهای مثبت لبه ها را جابجا کند. همچنین، هماوری ذرات رس ممکن است به علت اثر پیوند دهنده آلومینیوم تبادلی باشد که در pH های زیر ۵ به وضوح افزایش می یابد.

1- Planar surfaces 2- Demixing

گزارش های متفاوتی در مورد اثر سدیم تبادلی بر خاک های حاوی کائولینایت ارائه شده است. اغلب مطالعات روی خاک های اسیدی انجام شده اند که در آنها پیوندهای لبه- سطح و پیوندهای ناشی از آلومینیوم تبادلی تنش های اسمزی را خنثی می کنند. اما فرنکل و همکاران (۱۹۷۸) دریافته اند که یک خاک حاوی کائولینایت با pH برابر ٦/٥ و ESP برابر ۱۰، وقتی با آب مقطر آبشویی گردد، دچار پراکنش می شود. در این pH، نیروهای پیوند دهنده ضعیف بوده اند.

۳-۲-۳-٦- تنش مکانیکی

خاکدانه های خشکی که هنگام غوطه وری در آب، پراکنده نمی شوند ممکن است در اثر اعمال تنش مکانیکی خرد گردند. حتی خاکی که همتافت تبادلی[1] آن با کلسیم اشباع شده، ممکن است در اثر تنش مکانیکی وارد بر خاکدانه ها در رطوبتی بالاتر از حد بحرانی (مقدار رطوبت لازم برای پراکنش) پراکنده گردد (امرسون، ۱۹۷۷). طی بررسی رفتار پراکنشی خاک های قرمز-قهوه ای استرالیا، رنگاسامی و همکاران (۱۹۸٤) دریافته اند که خاک های سطحی با مقدار SAR بزرگتر از ۳ (معادل ESP حدود ٦) خود به خود (بدون اعمال تنش مکانیکی) در آب مقطر پراکنده می شوند، در حالی که همان خاک ها با SAR کوچکتر از ۳، تنها پس از تکان دادن مکانیکی دچار پراکنش می گردند. لیکن از آنجایی که ایلایت، کانی غالب موجود در جزء رس است، این خاک ها حتی به اعمال نیروهای مکانیکی ضعیف نیز حساسیت داشته اند. رنگاسامی (۱۹۸۳) نشان داده است که در غیاب الکترولیت ها، فرایندهای فیزیکی صاف کردن با گذر از یک غشاء[2]و تعلیق مجدد متعاقب آن برای ایجاد پراکنش در خاک های قرمز- قهوه ای اشباع از کلسیم کفایت می کند.

راول و همکاران (۱۹٦۹) دریافته‌اند که مقدار پراکنش رس بسته به تنش مکانیکی اعمال شده بر خاک، متفاوت می باشد. وقتی مقدار تنش کوچک باشد، مقدار پراکنش رس تابع ESP است. تنش های بزرگ، حتی در مقادیر کم ESP نیز می تواند مقدار عمده رس موجود را پراکنده کند. اثر تنش مکانیکی احتمالاً مربوط به شکستن پیوندهای ناشی از مواد آلی است که ذرات رس را در کنار هم نگه می‌دارد (امرسون، ۱۹٦۸). هرچه پیوند میان ذرات موجود در خاکدانه قوی‌تر باشد، کار بیشتری برای شکستن آن باید انجام شود. راول و همکاران (۱۹٦۹) اثرات اعمال تنش مکانیکی را با مفهوم انرژی پتانسیل تشریح نموده اند. هنگامی که یک رس منبسط شده در تعادل با محلول الکترولیت قرار می گیرد، ذرات رس در پایین ترین سطح انرژی پتانسیل خود قرار دارند

1- Exchange complex
2- Dialysis

و بوسیله سد[1] پتانسیل –انرژی از حرکت و دور شدن آنها از یکدیگر جلوگیری می شود. لیکن اعمال تنش های مکانیکی می تواند این سد را از میان برداشته و باعث وقوع پراکنش گردد. با افزایش غلظت الکترولیت ها در محلول، بزرگی و قدرت سدها افزایش یافته و لذا تنش مکانیکی مورد نیاز برای از میان برداشتن آنها نیز افزایش می یابد. هنگام وقوع پراکنش، سد مذکور مانع هماوری مجدد ذرات می شود. خشک کردن می تواند فشار مورد نیاز برای کنار هم نگه داشتن ذرات را فراهم نماید.

به علت اثر تنش مکانیکی، غلظتی از الکترولیت که ممکن است پراکنش در آن رخ دهد دامنه ای گسترده دارد، به گونه ای که یک تفاوت صد برابری در غلظت (مولار) توسط راول و همکاران (۱۹٦۹) مشاهده شده است. خاک سطحی به واسطه خاک ورزی، عبور حیوانات، ضربه قطرات باران و حرکت آب درون خاک (بویژه در هنگام آبیاری) در معرض تخریب و بهم ریختگی مکانیکی می باشد. اثر چنین تنش هایی واجد پیچیدگی ها و مفاهیمی ضمنی است که عبارتند از:

۱) اگر خاک در شرایط خیس و در غلظت های اندک الکترولیت شخم زده شود، پتانسیل پراکنش و لذا سخت شوندگی آن افزایش خواهد یافت. بنابراین، ممکن است یک خاک ترد اما حساس به پراکنش ناشی از تنش مکانیکی، در اثر شخم به سرعت از خود رفتار سخت شوندگی نشان دهد.

۲) وقوع پراکنش حتی در غلظت های الکترولیت بالاتر از غلظت بحرانی (که در شرایط ثابت آزمایشگاهی بدست آمده) نیز امکان پذیر است. اگر مقادیر غلظت بحرانی به عنوان راهنمای ایمنی کاربرد آب آبیاری مورد استفاده قرار گیرد، تنش مکانیکی وارد بر خاک باید در حداقل حفظ شود (راول و همکاران، ۱۹٦۹) .

۳) پراکنش رس لزوماً با شرایط سدیمی همراه نیست. رنگاسامی و همکاران (۱۹۸٤) به نمونه های خاک قرمز– قهوه‌ای اشاره کرده اند که با SAR کوچکتر یا مساوی ۳ (معادل ESP حدود ٦) پس از اعمال تنش مکانیکی دچار پراکنش شده اند. چنین حالتی در خاک های کمی سدیمی[2] بیش از خاک های غیر سدیمی مشاهده شده است.

٤) به دست آوردن رابطه ای عام میان ESP و غلظت بحرانی الکترولیت ها امکان پذیر نیست، زیرا غلظت بحرانی نیز به مقدار تنش اعمال شده بستگی دارد.

۵) در آزمون‌های برآورد احتمال وقوع پراکنش در یک سیستم مدیریتی معین می بایست تنش هایی که یک خاک زراعی در معرض آن قرار می گیرد، در نظر گرفته شود. رنگاسامی و همکاران (۱۹۸٤) طرحی را برای شناسایی رفتار پراکنشی خاک‌ها ارائه نموده اند که در آن، مقدار SAR و غلظت کل کاتیون های موجود در محلول خاک به پراکنش خودبخودی و پراکنش مکانیکی مرتبط شده اند.

1- Barrier 2- Low sodic

آنها پیشنهاد کرده اند که پراکنش خودبخودی نمایانگر اثر حداقل بهم خوردگی مکانیکی (مانند شرایط کشت بدون خاک ورزی و یا وجود یک پوشش گیاهی روی خاک جهت جلوگیری از ضربه قطرات باران) باشد. بهم خوردگی مکانیکی ناشی از یک ساعت تکان دادن خاک به عنوان معرف اثرات تنش ضعیف تا متوسط در نظر گرفته شده است. مثالهای این شدت پراکنش عبارتند از : پراکنش ناشی از پیشروی آب آبیاری در سطح مزرعه یا وقوع بارندگی های با شدت معمول روی خاک‌های بدون پوشش در جنوب شرقی استرالیا. به منظور برآورد اثر نیروهای مکانیکی قوی (مانند خاک ورزی در شرایط خیس) ممکن است بهم زدن مکانیکی شدیدتر مورد نیاز باشد.

۳-۲-٤- اثر مقاومت خاک بر عملیات زراعی

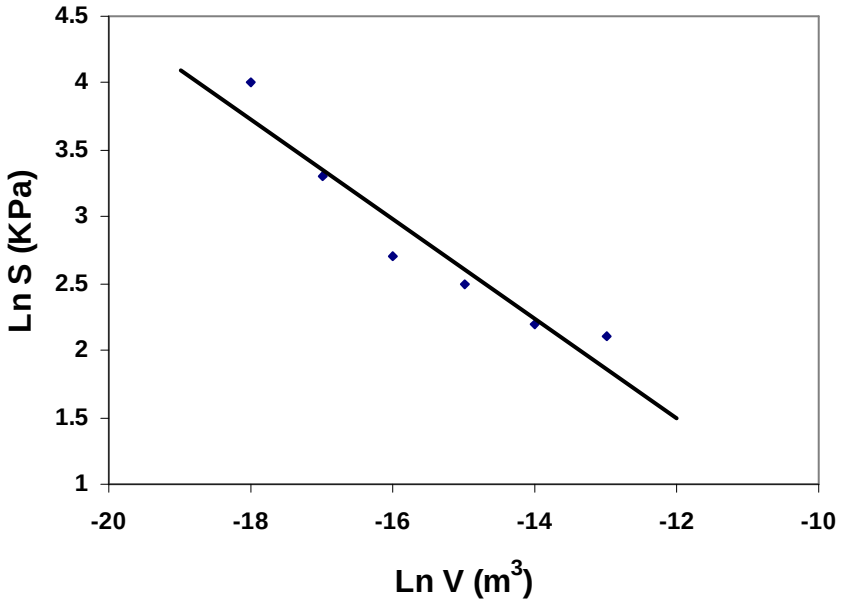
خاک‌های سخت شونده به علت مقاومت بالای خود چهار محدودیت زراعی را ایجاد می کنند. اولاً مقاومت زیاد خاک خشک ممکن است عملیات کشت بذر یا خاک ورزی را تا وقتی که خاک به اندازه کافی توسط باران یا آبیاری مرطوب گردد، به تاخیر اندازد. ثانیاً حتی وقتی که نیروی تراکتور برای خاک ورزی کافی باشد، ممکن است تهیه یک بستر بذر مطلوب مقدور نباشد. ثالثاً سله بستن سطح خاک پس از کاشت بذر می تواند مانع جوانه زنی شود (قسمت ۳-۲-۲-٤- را ببینید). رابعاً خشک شدن نیمرخ خاک توسط ریشه ممکن است رشد بعدی آنها را در پتانسیل های بسیار بالاتر از ۱/۵- مگاپاسکال (در حدود نقطه پژمردگی) محدود نماید.

۳-۲-٤-۱- زمان بندی خاک ورزی

در اقلیمی با بارندگی فصلی ممکن است لازم باشد که عملیات خاک‌ورزی (ویلکاکس، ۱۹۸۱) و بذرافشانی یا بذرکاری (لی و همکاران، ۱۹۸۱) تا اولین بارندگی و نرم‌تر شدن خاک به تاخیر افتد. این تاخیر می تواند به کاهش قابل توجهی در مقدار محصول منجر گردد. حتی در جایی که نیروی کششی برای خاک ورزی در شرایط خشک کفایت کند، بستر بذر کلوخه ای (با خاکدانه های بزرگ و سخت) ایجاد می‌شود (ویلکاکس، ۱۹۸۱؛ کوکرافت و مارتین، ۱۹۸۱). عملیات خاک‌ورزی مجدد نیز به شکستن خاکدانه ها و تبدیل آن به بستری از ذرات ریز و غبار منجر می‌شود که به طور خاص مستعد فروریزی ساختمانی و ممانعت از نفوذ آب است (تیسدل وادم، ۱۹۸٦؛ لنوین و پاولین، ۱۹۸۸).

در جایی که خاک ورزی اولیه امکان پذیر باشد، سهولت خاک ورزی ثانویه (به منظور خرد کردن کلوخه-های بزرگ و بدست آوردن دامنه مطلوبی از اندازه خاکدانه ها) به تردی خاک[1] بستگی دارد. اوتومو و دکستر (۱۹۸۱) آزمونی را ابداع کرده اند که در آن، تردی (k) به عنوان شیب خط در نمودار اندازه خاکدانه (V) نسبت به

مقاومت کششی آن (S) در مقیاس تمام لگاریتمی تعریف می شود (شکل ۲۵). بنابراین، در جایی که تغییرات مقاومت خاک با اندازه آن اندک یا هیچ باشد (k < ۰/۰۵)، خاکدانه ها ترد محسوب نمی‌شوند. از سوی دیگر، خاکدانه هایی با k < ۰/٤۰ چنان ترد هستند که « ناپایدار مکانیکی » نامیده می شوند. همانگونه که در روش آزمایش تشریح شده است (دکستر و کروزبرگن، ۱۹۸۵) اگرچه محدودیت های قابل توجهی برای تعیین دقیق k وجود دارد، اما k شاخص کمّی با ارزشی از سهولت تهیه بستر بذر مطلوب محسوب می گردد که به خوبی با شرایط واقعی مزرعه همخوانی دارد.



شکل ۲۵- نمونه ای از رابطه اندازه (حجم) و مقدار مقاومت کششی خاکدانه. مقدار تردی (k) برابر با شیب خط است (اوتومو و دکستر، ۱۹۸۱).

لی و همکاران (۱۹۸۸)، هادو (۱۹۸۸) و چان (۱۹۸۸) همگی کاهش مقدارk برای خاکدانه‌های خشک شده در هوا از خاک‌هایی که با خاک‌ورزی معمول در معرض ایجاد شرایط سخت شوندگی قرار گرفته‌اند را در مقایسه با سیستم‌های مدیریتی که خاک‌ورزی در آنها انجام نمی‌شود (مانند جنگلهای استوایی یا مرتع) گزارش نموده‌اند. مقدار کاهش، از k > ۰/۲ در خاک‌هایی که کمتر به‌هم ریخته‌اند تا k < ۰/۰۵ در تیمارهای با شخم معمول بوده است. مقدار تردی همچنین به مقدار رطوبت بستگی دارد وحداکثرمقدار آن در نمونه‌هایی که در پتانسیل ماتریک

1- Soil friability

حدود ۱۰۰- کیلوپاسکال به تعادل رسیده‌اند به‌دست آمده است (اوتومو و دکستر،۱۹۸۱؛ یانگ، ۱۹۷۸؛ لی و همکاران، ۱۹۸۸). در مقایسه با خاک های معمولی، خاک‌های سخت شونده در پتانسیل ۱۰۰- کیلوپاسکال (که در اغلب موارد با مقدار آب درحد پایینی خمیری قابل مقایسه است) ترد هستند، اما در حین خشک شدن از تردی شان کاسته می شود. این وضعیت می‌تواند محدودیت شدیدی را در زمان‌بندی خاک‌ورزی و میزان موفقیت خاک‌ورزی ثانویه ایجاد کند و شخم مکرر نیز ممکن است باعث افزایش قابل توجه و نامطلوب در نسبت ذرات ریز گردد.

۳-۲-٤-۲- محدودیت رشد ریشه

برخی محققان، عمق محدود رشد ریشه در خاک‌های سخت شونده را مورد توجه قرار داده اند (هامبلین و تنانت، ۱۹۷۹؛ نیکو و چوپارت، ۱۹۷۹؛ لی، ۱۹۸۸؛ یونگ و همکاران، ۱۹۸۸) اما تشخیص حداقل دو حالت آن حایز اهمیت می باشد. حالت اول آن است که در مناطق دیم که رواناب ناشی از خاک‌های سخت شونده، مقدار و عمق خیس شدن نیمرخ خاک را محدود می کند، محدودیت رشد ریشه را به سادگی می توان به تنش ناشی از کاهش تأمین آب قابل دسترس در نیمرخ، منتسب نمود. در این مرحله، ریشه ها اغلب در افق سخت (برای مثال در افق رسی یک خاک دو لایه) رشد کرده اند.

حالت دوم آن است که حتی وقتی بارندگی یا آبیاری قادرند نیمرخ خاک را تا عمق مطلوبی مرطوب کنند، جذب آب توسط ریشه و کاهش پتانسیل ماتریک حاصل از آن منجر به افزایش مقاومت خاک شده و ممکن است در حالیکه خاک هنوز در پتانسیل بالاتر از نقطه پژمردگی قرار دارد، باعث کاهش جدی یا حتی متوقف کردن رشد ریشه گردد. این همان فرایندی است که توسط بون (۱۹۸۸) تشریح شده است که طی آن، خاک می‌تواند همزمان دارای خلل و فرج اندک برای تهویه ریشه ها و مقاومت بسیار زیاد در مقابل رشد ریشه باشد. چنین توضیحی چندان دور از حقیقت نیست و شاهد آن، رشد نکردن علفهای هرز در برخی خاک‌های سخت شونده تحت آیش می باشد.

به دست آوردن مقداری از پتانسیل ماتریک که در آن، قرائت دستگاه فروسنج[1] در هر نقطه از یک افق سخت شونده از برخی مقادیر بحرانی تجاوز می کند، جالب توجه خواهد بود. یک دستگاه فروسنج با ظرفیت حدود ۳ مگاپاسکال مناسب به نظر می رسد زیرا مقادیری در این حد، توأم با ممانعت شدید یا جلوگیری از رشد ریشه هستند (گریسن و همکاران، ۱۹٦۹). یونگ (۱۹۸۷) و لی (۱۹۸۸) مقاومت به فروروی را در نمونه های دست نخورده آزمایشگاهی یک خاک سخت شونده که در پتانسیل های ماتریک متفاوت مرطوب شده بود، اندازه گیری

1- Penetrometer

کردند. آنها دریافتند که مقادیر اندازه گیری شده در رطوبت یکسان، بیش از مقدار اندازه گیری شده در مزرعه بوده است و لذا نتیجه گرفتند که بعلت اثرات خیس شدن خاک پیش از رسیدن به تعادل و انقباض آزادانه و همگن نمونه های استوانه ای، اندازه‌گیری های آزمایشگاهی بویژه در پتانسیل های پایین‌تر، غیر قابل اعتماد است. با کاربرد اندازه‌گیری های صحرایی، یونگ (۱۹۸۷) و لی (۱۹۸۸) مقادیری از پتانسیل ماتریک برابر ۰/۱ و ۰/۲ مگاپاسکال را بدست آورند که با مقدار ۳ مگاپاسکال در خاک های سخت شونده مطابقت دارد و نشان دهنده محدودیت های جدی برای رشد ریشه گیاهان زراعی می باشد.

اگر چه این مقدار (حتی در شرایط نسبتاً مرطوب) برای خاک‌ها غیر معمول نیست اما به منظور نشان دادن علت مقادیر بالای مقاومت به فروروی، ثابت شده است که در یک خاک فاقد ساختمان، مقدار مقاومت به فروروی به خوبی با سرعت رشد ریشه همبستگی دارد (گریسن، ۱۹٦۹). انجام مطالعات بیشتر شامل اندازه گیری همزمان مقاومت به فروروی و پتانسیل ماتریک در شرایط مزرعه برای مرتبط کردن محدودیت های رشد ریشه به ویژگی های خاک های سخت شونده، الزامی است. این پدیده ها ممکن است بویژه در دوره خشکی ابتدای فصل رشد که گیاه دارای سیستم ریشه ای کم عمق و محدود است حایز اهمیت باشد زیرا محدودیت جذب مواد غذایی و آب می تواند توسعه و رشد کل گیاه را کاملاً به تاخیر اندازد (هامبلین، ۱۹۸٤، یونگ و همکاران، ۱۹۸۸) اگر چه اثرات نهایی بر مقدار محصول ممکن است چندان قابل توجه نباشد.

یونگ و همکاران (۱۹۸۸) تفاوت آشکاری در رشد ریشه کلم را که روی دو خاک مشابه (که از نظر ساختمانی ناپایدار بوده و پس از خاک ورزی بصورت توده فاقد ساختمان بر جای می‌ماند) کاشته شده است، گزارش نموده اند. پنج هفته پس از نشاء، ریشه ها در خاک معمولی (کمتر تخریب شده) بخوبی در ترک‌های ساختمانی رشد کرده و دارای تراکم سطحی و عمق ریشه بیشتر (۰/۵m <) نسبت به خاک سخت شونده (عمق گسترش ریشه < ۰/۳ متر) بوده است. در خاک سخت شونده، تشکیل ترک مشاهده نشده بود. خاک‌های مورد آزمایش حاوی کانی های رس یکسان و توزیع اندازه ذرات مشابه بوده اند و علت تفاوت آشکار در ساختمان خاک‌ها مبهم باقی مانده است. تاریخچه کشت و مدیریت بلند مدت موجود، تفاوتهای آشکاری در مقدار محصول دو نوع خاک را نشان داده است (کوستیگان، ۱۹۸۳) که طبق آن خاک های تحت کشت مداوم گندم و حاوی مقادیر کمتر مواد آلی تا عمق ۰/۳٤ متری، مقدار محصول کمتری (۱٦g/kg در مقابل ۲۳g/kg) داشته و امکان رشد ریشه در آنها کمتر بوده است که می تواند نشانگر اثر مواد آلی در چنین وضعیتی باشد.

شناسایی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک که کنترل کننده مرحله توسعه و گسترش ساختمانی در ناحیه ریشه و در شرایط مزرعه هستند دارای اولویت مهمی است. این ویژگی ها مرز میان خاک‌های سخت شونده و

خاک دارای ساختمان را معین کرده و نشان دهنده چگونگی مدیریت خاک با هدف افـزایش احتمـال بهبـود مجـدد ساختمان آن می باشد.

۳-۳- طبقه بندی خاک و پراکندگی جغرافیایی خاک‌های سخت شونده

۳-۳-۱- تجارب به‌دست آمده در استرالیا

۳-۳-۱-۱- جنبه های تاریخی و تعریف

مفهوم «سخت شوندگی خاک سطحی» برگرفته از مطالعات انجام شده در استرالیا مـی باشـد کـه از اواخـر سال ۱۹۵۰ به منظور تهیه یک رده بندی خاک مناسب برای نقشه بـرداری اجمـالی خـاک‌هـای اسـترالیا (بـرای کـل خشکی های تاسمانی، جزیزه کانگوروها و سایر جزایر) صورت گرفته است. رده بندی بر اساس گروه‌هـای بـزرگ خاک که در استرالیا موجود بود دیگر قابل کاربرد نبود زیرا برای خاک‌های موجود در آن زمـان تهیـه شـده و در آن، اطلاعات زراعی بسیار محدودی وجود داشت که برای منطقه دیگر قابل تعمیم نبود. برای مثـال، در رده خـاک هـای قرمز – قهوه ای، خاک های لوم شنی ریز اوربرا[1] که موسسه تحقیقات کشاورزی ویت[2] در آن قرار دارد، خـاک‌هـای غیرسدیمی وجود دارد که به راحتی با عملیات مختلف کشاورزی و باغبانی سازگار می شـود، در حـالی کـه برخـی خاک‌های سطحی مشابه در شمال ویکتوریا[3] و جنوب نیوساوت ولز[4] که به عنوان خـاک‌هـای قرمـز – قهـوه ای رده بندی شده اند، محدودیت های شدیدی برای زراعت و باغبانی دارند که قسمتی از آن به طبیعت سدیمی آنها نـسبت داده می شود (نورثکات، ۱۹۸۱). با توجه به چنین شرایطی، یک روش جدید رده بنـدی خـاک مـورد توجـه قـرار گرفت که نتیجه آن ارائه « کلید شناسایی خاک‌های استرالیا[5] » در سال ۱۹۶۰ بود که اطلاعات آن توسط خاکـشناسان مختلف به نقشه خاک‌های استرالیا تبدیل و با عنوان « اطلس خاک‌های استرالیا[6] » طی سالهای ۶۸-۱۹۶۰ چـاپ شـد (نورثکات و همکاران، ۱۹۷۵). در پی آن « توصیفی از خاک های استرالیا[7] » در سال ۱۹۷۵ به چاپ رسید (نورثکات و همکاران، ۱۹۷۵). برای تهیه « کلید رده بندی[8] » که از این پس « کلید » نامیده می شود، حدود ۵۰۰ نیمـرخ خـاک در کل استرالیا مورد مطالعه قرار گرفت. پیش از شناسایی مفهوم « سخت شوندگی » در علوم خاک، یـادآوری رونـد و جزئیات ارائه « کلید» الزامی است. مبنای کلید، مفهوم « شکل نیمرخ[9] » می‌باشد. «شکل نیمرخ» مبین تعامل کلـی و مشهود ویژگی های فیزیکی در همراهی نزدیک یکی با دیگری، و در چارچوب سولوم خاک می باشد. بنابراین،

1- Urrbrae
2- Waite
3- Victoria
4- New South Wales
5- A Factual Key for the Recognition of Australian Soils
6- Atlas of Australian Soils
7- A Description of Australian Soils
8- Factual Key
9- Profile form

خاک به عنوان یک سیستم در نظر گرفته می شود که ویژگی های فیزیکی آن مشهود و قابل ثبت بوده و ممکن است نماینده سایر کیفیت ها و ویژگی های فیزیکی، شیمیایی یا زیستی باشد که بعنوان مقادیر بحرانی متمایز کننده میان گروه ها در هر مرحله از طبقه بندی کلید به کار می‌روند. تنها استثناء، کاربرد روند تغییرات pH خاک است.

ویژگی‌های مورد نظر پس از مطالعه ۵۰۰ نیمرخ خاک با استفاده از روش ساده آزمون و خطا گزینش شده و آنهایی که برای گروه بندی خاک‌های با نیمرخ مشابه کاربرد ساده‌تری دارند، انتخاب گردید. نکته قابل توجه آن است که این ویژگی‌ها ممکن است مزیت دیگری به جز سهولت استفاده و اجرا در رده بندی نداشته باشند. اما باید توجه داشت که « موضوع مورد شناسایی بوسیله کلید، کل سولوم خاک است و نه فقط ویژگی های مورد استفاده در کلید رده بندی ». به عبارت دیگر، پس از شناسایی شکل نیمرخ، کل آن بعنوان موضوع مطالعه و کاربرد مورد توجه قرار می‌گیرد. یعنی کل یک خاک با شکل نیمرخ (سولوم) مشخص و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی معین که بعنوان محیط رشد گیاه یا مصالح سازه ای (مثلاً برای ساخت سد) به کار می رود، مورد نظر است و نه ویژگی های منفرد آن. ویژگی های مورد استفاده در تهیه کلید، ویژگی های معمول فیزیکی، مورفولوژیکی خاک هستند که برای تمام خاکشناسان در شرایط صحرایی شناخته شده بوده و در حال حاضر برای نقشه برداری تفصیلی خاک به منظور آبیاری و انواع دیگر کاربری اراضی به کار می‌رود. از جمله ویژگی‌های مورفولوژیکی، به نظر می رسد که بافت خاک برجسته‌تر باشد زیرا به رفتار خاک و احتمالاً مقدار رطوبت آن که در استرالیا حایز اهمیت است، مرتبط می گردد. علاوه بر این، بافت خاک یکی از اولین مواردی است که هر خاکشناس ماهر تعیین می کرده و اکنون نیز تعیین می کند.

تمامی خاک‌های معدنی را می توان به سه شکل نیمرخ اولیه تقسیم نمود :

U : در کل سولوم خاک، بافت ثابت یا یکنواختی وجود دارد.

G : افزایش تدریجی و آشکار در مقدار رس از سطح به عمق (به عبارت دیگر، وجود یک نیمرخ دارای بافت درجه بندی شده در سولوم خاک).

D : افزایش ناگهانی و آشکار مقدار رس از سطح به عمق خاک (به عبارت دیگر، وجود یک بافت دو لایه در سولوم خاک).

سولوم، معادل است با خاک سطحی یا افق سطحی A به علاوه افق زیر سطحی B.

شکل نیمرخ اولیه آلی نیز به موارد فوق اضافه شد که در آن بقایای گیاهی غالب اند و به این ترتیب کل خاک‌ها به چهار بخش یا شکل نیمرخ اولیه مشخص تقسیم گردید که تعریف آنها در کلید (نورثکات، ۱۹۶۰ و ۱۹۷۱ و ۱۹۷۹) آمده است. این تقسیم بندی به طور غیرمستقیم، حجم کل داده های خاک را کاهش می دهد.

نیمرخ خاک‌های معدنی بر اساس تشریح پروفیل شان به سه دسته G, U و D تقسیم شدند که رده بندی در هریک از آنها بطور "جداگانه " امکان پذیر بوده است. تجربیات حاصل از مطالعات تفصیلی نشان داده اند که خاک‌های D نسبت به خاک‌های دیگر زهکشی و تهویه بهتری داشته و رنگ افق B آنها راهنمای کلی خوبی محسوب می گردد. نتایج حاصله به روش گروه بندی آزمون و خطای پروفیل های D و با استفاده از کارت‌های پانچ کددار، تجزیه و تحلیل شده و پنج تحت رده به نامهای Dd, Dy, Db, Dr و Dg بدست آمد. هریک از این تحت رده ها نماینده دامنه ای از ویژگی‌های زهکشی هستند که به ترتیب از Dr تا Dg متراکم‌تر (با نفوذپذیری کمتر) می شوند (Dg نشانگر خاک ماندابی[1] به رنگ آبی خاکستری و سبز- خاکستری است). افزون بر این، از آنجا که هر تحت رده عملاً نشانگر یک توالی زهکشی است ، هر توالی را با استفاده از ویژگی‌های شاخص خاک مانند حضور یا فقدان یک لایه زیر سطحی با رنگ روشن تر، یا افق A2 نیز می‌توان متمایز نمود تا نشانگر شرایط ماندابی متناوب باشد. طی چنین فرایندی، رده بندی را سطح به سطح و به طور کلی بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی بکار رفته در چارچوب شکل نیمرخ و با استفاده از روش های ساده آزمون و خطا (که تعیین کننده ساده ترین ویژگی مناسب برای گروه بندی خاک‌های مشابه است) می توان پیش برد. هدف رده بندی، دستیابی به مفهوم "شکل نیمرخ اصلی[2]" بوده است که به نظر می رسید برای نقشه برداری خاک‌ها و منظر اراضی در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰۰۰ مناسب باشد. چنین مناسبتی تائید شده، اما پیش از پایان مطلوب، مشکلاتی بروز کرد زیرا فارغ از چگونگی ترتیب ویژگیهای خاک Dr، پس از مقایسه با هر استاندارد طبقه بندی، گروه بندی های حاصله معمولاً بسیار تغییر پذیر بودند مگر بر اساس ویژگی‌های مورفولوژیکی مورد استفاده در رده بندی. بازبینی مجدد تمام خاک‌های Dr موجود نشان داد که اگر چه آنها تقریباً دارای شکل نیمرخ مشابه هستند، اما مقدار املاح، مواد آلی، کاتیون‌های تبادلی و ... در خاک سطحی شان متفاوت می باشد. در چنین شرایطی، مراجعه به اطلاعات صحرایی ضرورت یافت زیرا ظاهراً تمام ویژگی‌های مورد نظر روی کارت‌های پانچ کد دار ثبت نشده بود. بنابراین، شناخت ویژگی‌های پوسته‌های نازک خاک سطحی در خاک‌های با لایه سطحی سخت، و خاک‌های سطحی بدون شرایط سخت‌شوندگی ضرورت می‌یابد. هنگامی که ویژگی‌های خاک سطحی در سطوح رده‌بندی کلید وارد شود (مثلاً برای رده‌بندی خاکDr) طرح کلی خاک‌ها به‌طور غیرمستقیم مانند یک جورچین، کامل می‌شود. این ویژگی‌ها برای سایر تحت رده‌های خاک D و همچنین در مطالعات صحرایی مربوط به تهیه نقشه‌های جامع[3] نیز قابل کاربرد می‌باشد. به عبارت دیگر، طبیعت خاک سطحی یک ویژگی مهم در رده‌بندی خاک است که اهمیت آن معادل ویژگی کاربری اراضی می‌باشد. یک نتیجه کلی و غیر مترقبه که پیش از این مورد توجه کافی قرار نگرفته است،

1- Gleyed soil
2- Principal profile form
3- Atlas

تمرکز بر ویژگی‌های سخت شوندگی دربرخی خاک‌های استرالیاست. خواص سخت شوندگی خاک سطحی توسط نورثکات (۱۹۷۹، ۱۹۷۱و ۱۹۶۰) به این صورت تعریف شده است: «افق A هنگامی به عنوان سخت شونده در نظر گرفته می‌شود که متراکم و سخت بوده و به طور متناوب در طی خشک شدن خاک شرایط ظاهری فقدان ساختمان در آن حاکم گردد». در واقع، صفت «سخت‌شوندگی» ممکن است سبب‌شود که افقA1 بعضی خاک‌ها پس‌از قرار گرفتن‌مداوم آنها در معرض مقاطع و آبکندهای ناشی‌از فرسایش، به چشمگیرترین جنبه آن خاک‌ها تبدیل گردد. در خاک های زراعی، کلوخه ها معمولاً ویژگی سخت شوندگی خود را تا خرد شدن کامل با خاک‌ورزی مکرر حفظ می کنند.

به علاوه، این تعریف در قالب مفهوم «شرایط خاک سطحی» ارائه شده است یعنی به شرایط طبیعی افق A و عکس العمل آن به دوره های معمولی خشک و تر شدن دلالت دارد. از آنجائی که دوره‌های خشک و تر در مناطق مختلف استرالیا و در طول هر سال متفاوت است، استفاده از واژه «متناوب» در تعریف مربوطه معقول به نظر می رسد. نکته دیگر آن است که «عملیات کاشت معمولاً شرایط خاک سطحی را تغییر می دهند اما شرایط مذکور (از جمله سخت شوندگی) هنگامی که خاک دست نخورده می‌ماند، بهبود می‌یابد». در واقع، اکنون معلوم شده است که عملیات کشت نامناسب و یا شدید به طور فزاینده ای باعث بدتر شدن شرایط سخت شوندگی می گردند. دو نکته قابل ذکر دیگر عبارتند از:

۱)خاکی که سله های سطحی در آن تشکیل می‌شود لزوماً سخت شونده محسوب نمی گردد یعنی وجود سله معیار و شاخصی برای شرایط سخت شوندگی نیست.

۲) اغلب خاک‌های استرالیا که در نواحی اقلیمی ترـ خشک قرار دارند، در فصل خشک، سخت می شوند. خاک هایی که سخت شونده نیستند، در حالت خشک نیز مانند حالت تر، دانه ای (مانند ماسه) هستند.

مک دونالد و همکاران (۱۹۸٤) شرایط سخت شوندگی را به صورت «ایجاد شرایط متراکم، سخت وسفت و حالت فقدان ساختمان آشکار در اثر خشک شدن» تعریف کرده اند. سطح چنین خاکی با فشار انگشت اشاره خرد یا فرورفته نمی شود. تشکیل سله لزوماً با وجود شرایط سخت شوندگی همراه نیست. تعریف مک دونالد و همکاران(۱۹۸٤) صرفنظر از ترتیب پدیده ها با نظریه ارائه شده توسط نورثکات (۱۹۷۹،۱۹۷۱و ۱۹۶۰) مطابقت داشته و تاکید بیشتری بر ویژگی «سختی» اینگونه خاک‌ها دارد که با عبارت «فرو نرفتن انگشت اشاره در خاک» بیان می گردد. اگر چه چنین بیانی از برخی جهات عقلایی است اما ممکن است مفهوم «شدن» (Setting) در این پدیده، در آن مغفول بماند که در جای خود اساسی و حائز اهمیت است . تمامی خاک‌ها و از جمله خاک‌های سخت شونده در رطوبت بهینه خود (یعنی رطوبتی که مدت کوتاهی پس از زهکشی طبیعی خاک وجود دارد) ترد

هستند. این واقعیت، راه حل ساده ای را برای کندن یا کارکردن روی خاک‌های سخت شونده در شرایط گلخانـه ای یا باغ‌های کوچک فراهم می نماید. خاک‌های معمولی دیگر که ویژگـی سـخت شـوندگی ندارنـد، حتـی در حالـت خشک هم ترد می مانند و این فرق نمایان بین شرایط خاک سطحی، امکان تشخیص آسان خاک‌های سخت شـونده را در مزرعه فراهم می کند.

آزمـایش هـای فـشار در واقـع بـرای انـدازه گیـری «درجـه سـختی» انجـام مـی شـود کـه مـی توانـد از نظر زراعی مهم باشد. حذف تناوب وقوع از این پدیده ممکن است باعث بروز دشـواری هـایی در شناسـایی خـاک هایی می شود که کم و بیش بطور دائم خشک اند و لذا به جز هنگام مرطوب شدن اتفاقی، در اغلب سال ها سـخت باقی می مانند. نمونه این وضعیت، خاک های توده ای (G_n2) در مناطق بیابانی استرالیا می باشد.

۳-۳-۱-۲- وضعیت کنونی

در حال حاضر، اطلاعات مربوط به طبیعت و پراکندگی خاک‌های سخت شونده در استرالیا از نشریه «توصیف خاک‌های استرالیا» که توسط نورثکات طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۸ تهیه شده، قابل دستیابی است. مهمترین خاک‌های سخت شونده، خاک‌های دو لایه سخت (جدول ۷) هستند که در مجموع ۱۲ تا ۱۳ درصد از اراضی استرالیا را تشکیل می دهند و عمدتاً در نواحی پرباران با بارندگی قابل اعتماد واقع شده اند.

جدول ۷- گستره نسبی خاک‌های دو لایه در استرالیا [نورثکات و همکاران،۱۹۷۵**].**

خاک‌های دو لایه	درصد
(a) سخت: D_g2 ، D_d2 ، D_d1 ، D_y3 ، D_y2 ، D_b1 ، D_r3 ، D_r2	۱۲-۱۳
(b) ترد: D_g4 ، D_b3 ، D_r4	۱
(c) شنی: D_g5	۲

خاک‌های دو لایه بدون لایه سخت سطحی یعنی خاک‌های ترد و خاک‌های شنی مجموعا ۳ درصد از اراضی را اشغال می‌کنند و در شرایط بارندگی مشابه واقع گردیده‌اند. افزون بر این، نکته قابل توجه آن است که برخی خاک-های دیگر نیز ممکن است حاوی لایه سطحی سخت باشند اما به عنوان سخت شونده طبقه بندی نشده اند. علت آن است که صفت «سخت شوندگی» در آغاز به عنوان یک شاخص مورفولوژیک/خاک شناختی مهم برای طبقه بندی انواع خاک‌های دو لایه شناسایی و مورد استفاده بوده و اهمیت آن در کشاورزی در مراحل بعدی مورد توجه قرار

گرفت. خاک‌های دیگر را می توان بدون توجه به ویژگی سخت شوندگی، شناسایی و رده بندی نمود که برخی از آنها در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸- گستره نسبی خاک‌های سخت شونده استرالیا بدون در نظر گرفتن خاک‌های دو لایه [نورثکات و همکاران،۱۹۷۵**].**

خاک‌ها	درصد
ماسه با رنگ روشن: Uc4 با بافت لوم شنی	۳
خاک‌های لومی: تمام خاک‌های Um بجز Um4.4 و Um6 و Um7	۱۲
رس های بدون ترک: Uf6.4 و Uf6.5 و Uf6.6 و Uf6.7	< ۱
رس های ترک‌دار سنگین: Ug5.4 و Ug5.5	< ۱
خاک‌های توده‌ای یا متراکم: Gn2	۱۷

اغلب خاک‌های U کم عمق بوده ومعمولاً در صورت مجاورت با خاک‌های دو لایه سخت شونده، برای کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد. گروه قابل توجه دیگر از خاک‌ها که ممکن است برخی انواع آن واجد ویژگی سخت شوندگی باشند، خاک‌های توده ای (متراکم) هستند که ۱۷ درصد از مساحت اراضی را اشغال می کنند. مساحتی از این خاک‌ها که ممکن است سخت شونده باشند، معلوم نیست. افزون بر این، مشخصه سخت شوندگی که در برخی از این خاک‌ها وجود دارد احتمالاً نمایانگر وجود شرایط متفاوت با وضعیت مورد انتظار می باشد. برای مثال، در نواحی خشک تا نیمه خشک، خط آهن با ظرفیت حمل و نقل گسترده از روی خاک‌های متراکم لومی عبور کرده است که هیچ مشکلی ایجاد نکرده مگر هنگام بارندگی متناوب که خاک را بسیار نرم کرده است. چنین وضعیتی را می توان به حالت توده ای اما بسیار متخلخل ساختار خاک نسبت داد (نورثکات و همکاران، ۱۹۷۵). در نواحی نیمه خشک تا مرطوب، وضعیت سخت شوندگی در اراضی توده ای مشاهده نشده است مگر در خاک‌های دو لایه سخت که در آنها این وضعیت در اثر انجام عملیات کشت در دوره‌ای طولانی پدید می‌آید. همچنین، ویژگی سخت شوندگی در اراضی مسطح و خاکدانه‌ای و دارای ساختمان خوب (Gn3) تنها پس از برداشت محصول و کشت مداوم گسترش می یابد و انواعی از آن که به رنگ‌های قهوه ای، زرد و خاکستری هستند از خاک Gn3 قرمز برای ظهور نشانه های سختی مستعدترند.

جدول ۹ برخی از تفاوت های مورفولوژیکی خاک سطحی در خاک های سخت شونده و خاک های معمولی را نشان می دهد. مشهودترین تفاوتها در ساختمان و پایداری خاک‌ها مشاهده می شود که هر دوی این ویژگی‌ها در خاک‌های سخت شونده چندان مورد توجه قرار نگرفته اند.

جدول ۹- مقایسه برخی ویژگی‌های مورفولوژیک خاک‌های سطحی (افق A1 یا ۱۵ سانتی متر بالای خاک) در انواع خاک‌های دو لا یه سخت، ترد و شنی [نورثکات و همکاران،۱۹۷۵**].**

خاک دو لایه	رنگ	بافت	ساختمان	پایداری
سخت	خاکستری – قهوه ای تیره یا خاکستری تا قهوه ای، قرمز – قهوه ای خاکستری – قهوه ای یا خاکستری رنگ در حالت مرطوب: Chroma>3	شن لومی لومی شنی لوم، لوم رس	مرطوب: مکعبی ضعیف چند وجهی یا ورقه ای a خشک: توده‌ای یا توده‌ای کلوخه‌دار	مرطوب: ترد در مقدار رطوبت بهینه خشک: سخت
ترد	قهوه ای بسیار تیره یا قرمز – قهوه ای بسیار تیره تا سیاه رنگ در حالت مرطوب Chroma<3	اغلب لوم و لوم رسی	مرطوب: کروی متخلخل، دانه‌ای ریز اندازه چند وجهی ۱۲-۱۰ mm یا کمتر خشک: حالت دانه‌ای غالب است	مرطوب: نرم و ترد خشک: محکم و ترد
شنی	خاکستری مایل به قهوه ای روشن تا قهوه-ای مایل به خاکستری تیره	شن تا شن لومی	مرطوب: چسبنده تا بسیار ضعیف خشک: دانه های منفرد	مرطوب: ضعیف خشک: ضعیف

a: دانه های متخلخل ضعیف در ۲ سانتی متری بالای خاک‌های تحت پوشش گیاهی طبیعی

در شرایط مرطوب، خاک‌های سخت شونده حتی ممکن است خاکدانه ای و نرم و قابل کشت[1] به نظر برسند، اما چنین وضعیت مطلوبی پس از خشک شدن از دست می رود و خاک سخت می شود. این حالت در خاک‌های دو لایه ترد که معمولا تیره رنگ ترند (درجه روشنایی و درجه خلوص رنگ کمتر در مقیاس مانسل) واقع نمی‌شود. بافت خاک سطحی از شن لومی تا لوم رسی تغییر می کند و به نظر می‌رسد که درجه سختی با افزایش مقدار رس، افزایش می یابد.

۳ـ۳ـ۲ـ پراکندگی جغرافیایی در نقاط دیگر جهان

یکی از راه‌های به دست آوردن وسعت تقریبی خاک‌های سخت شونده در کشورهای دیگر، مرتبط کردن و تطبیق خاک‌های سخت شونده شناسایی شده توسط کلید رده‌بندی با گروه‌ها یا واحدهای موجود در رده‌بندی‌های دیگر خاک می باشد. انجام چنین کاری ممکن است سبب ناسازگاری و غیر منطقی شدن مقایسه گردد زیرا اگر چه ویژگی‌های مورد استفاده در رده بندی خاک ممکن است مشابه باشد اما این ویژگی‌ها در سطوح متفاوت هر روش رده بندی می تواند بکار رود . بنابر این همبستگی میان روش‌های مختلف رده بندی تنها می تواند به عنوان یک نتیجه تقریبی در نظر گرفته شود . جدول ۱۰ برخی از این مطابقت ها را نشان می‌دهد.

1- Tilth

جدول ۱۰- همبستگی های تقریبی میان خاک‌های دو لایه سخت شونده، ترد و شنی استرالیا با روش های رده‌بندی گروه های بزرگ خاک، رده بندی آمریکایی و واحد های نقشه خاک های جهان.

کلید رده بندی (استرالیا)	گروه های بزرگ خاک a	رده بندی آمریکایی b	نقشه خاک‌های جهان c
خاک‌های دو لایه سخت: Ub1 و Ur3 و Ur2 Ud1 و Uy3 و Uy2 Ug2 و Ud2	خاک‌های پدزولی، خاک‌های آهکی قهوه‌ای، خاک‌های قرمز – قهوه‌ای، خاک‌های سولوت، سولودی، سولونتز و سولودیک	آلفی سولز	لووی سولز، پلانوسولز، سولونتز
خاک‌های دو لایه ترد : Dg4 و Db3 و Dr4	خاک‌های شکلاتی، اوکروزم، خاک‌های قرمز پدزولی، و احتمالاً خاک هیومیک گلی	مالی سولز، اینسپتی سولز، و احتمالاً اولتی سولز	لووی سولز، فائوزمز، آکری سولز، پلانوسولز
خاک‌های دو لایه ماسه ای: Dy5	خاک‌های پدزولی، خاک‌های سولوت، سولودی، سولونتز و سولودیک	آلفی سولز	پلانو سولز، سولونتز، لووی سولز

a: استیس و همکاران (۱۹٦۸)

b: سازمان نقشه برداری خاک آمریکا (۱۹۷۵)

c: دودال (۱۹۷۰)

تعداد زیاد گروه های بزرگ موجود در جدول ۱۰ دور از انتظار نیست زیرا ویژگی سخت شوندگی (همراه با ویژگی های دیگر) هنگام ارائه این رده بندی ها، ناشناخته بوده است .

رابطه نزدیک‌تری میان کلید رده بندی استرالیا با روش رده‌بندی آمریکایی وجود دارد. علت آن ممکن است ناشی از تعریف ارائه شده در هر روش طبقه بندی باشد. برای مثال، خاک های آلفی سولز همبستگی بیشتری با خاک های دو لایه سخت شونده دارند زیرا در بند دوم از تعریف این خاک چنین آمده است: «حاوی یک اپی‌پدون توده ای و سخت در حالت خشک یا دارای رژیم رطوبتی اکوئیک، یودیک یا زریک می باشد». از آنجایی که اپی-پدون نام ویژه ای برای خاک سطحی است، بخش اول این تعریف، درست مطابق تعریف خاک‌های سخت شونده است. انتظار می رود خاک هایی که با روش‌های دیگر رده بندی شده اند نیز (که شرایط خاک سطحی را به طریقی مشابه تشریح کرده اند) با خاک‌های سخت شونده همبستگی داشته باشد. بنابراین، همانگونه که در جدول ۱۰ مشاهده می شود، خاک آلفی سولز به خوبی با خاک‌های دو لایه سخت شونده معادل شده است. لیکن، قسمت دوم از بند دوم تعریف آلفی سولز با تمام موارد آن (بجز آریدیک و توریک که هر دو برای یک رژیم رطوبتی به کار می روند و در تعریف ذکر نشده اند) استفاده از قسمت اول تعریف را منتفی می کند! البته چنین وضعیتی دلیل همبستگی خاک دو لایه ماسه‌ای با آلفی سولز محسوب می‌گردد. همانگونه که در کلید رده بندی استرالیا نشان داده

شده است، شباهت های زیادی میان خاک دو لایه ماسه‌ای (Dy5) و برخی خاک‌های دو لایه سخت شونده (Dy3) وجود دارد، با این تفاوت که خاک Dy3 حاوی سطح سخت شونده می باشد. لیکن، هر دو آنها بسته به آنکه در قسمت های جنوبی یا شمالی استرالیا واقع شده باشند، می‌توانند به ترتیب به عنوان natrixeralf یا natriustalf رده بندی گردند. مشکل عبارت دوم استفاده از «یا» است. اگر «و» به کار رفته بود چنین وضعیتی که چند خاک متفاوت در یک گروه بزرگ با هم آورده می شود، پیش نمی‌آمد.

در رده بندی نقشه خاک‌های جهان، همبستگی کمتری مشهود است که باز هم به سبب تعاریف و ساختار رده‌بندی آن است. تنها در تعریف chromic luvisols مفهوم سخت شوندگی به صورت مشخص ذکر شده است: «افقی... که هنگام خشک شدن، سخت می‌گردد» . لیکن، این خاک‌ها دارای «افق Argilluvic B قهوه ای تیره یا قرمز» هستند که مفهوم آن این است که خاک‌های دو لایه سخت شونده با افق B حاوی رس قرمز یا قهوه ای (خاک های Dg,Dd, Dy) باید در قسمت دیگر رده بندی (معمولاً در پلانوسولز یا سولونتز) قرار گیرند. واقعیت آن است که نقشه خاک‌های جهان به عنوان روش رده‌بندی خاک مزیت آشکاری از نظر مفهوم و تشریح واحدها بر روش قدیمی تر گروه‌های بزرگ خاک ندارد. علاوه بر این، برخی واحدهای نقشه خاک‌های جهان حاوی افق A اومبریک یا اکریک هستند که به معنای احتمال وجود خاک‌های سخت شونده در برخی از این خاک‌ها است زیرا در هر دو افق سطحی مذکور، ممکن است شرایط سخت و توده ای شدن خاک در حالت خشک ایجاد گردد.

خاک‌های سخت شونده با هر دو روش رده‌بندی آمریکایی و نقشه خاک‌های جهان تا حدی قابل شناسایی-اند. بنابراین، معقول است که برای مثال بگوئیم که تمام اراضی‌ای که در روش نقشه خاک‌های جهان به عنوان لووی سولز، پلانوسولز یا سولونتز یا در روش رده بندی آمریکایی به عنوان آلفی سولز رده بندی شده اند، ممکن است حاوی خاک‌های سخت شونده یا مستعد سخت شدن باشند. وجود خاک‌های لووی سولز، پلانوسولز و سولونتز در نقشه خاک‌های جهان به طور بسیار کلی در جدول ۱۱ آمده است. موارد ذکر شده در جدول ۱۱ لزوماً بدان معنا نیست که همه این خاک‌ها (حتی در روش نقشه خاک‌های جهان) باید با هم رده‌بندی شوند. برای مثال، خاک Chronomic luvisols در نواحی مدیترانه‌ای احتمالاً تباین آشکاری در بافت خاک مانند آنچه در خاک‌های مشابه در استرالیا (خاک‌های دو لایه قرمز سخت شونده) دیده می‌شود، نشان نمی دهد. این مثال نشان می دهد که دامنه بزرگتری از خاک‌ها نسبت به آنچه قبلاً در نظر گرفته شده بود، ممکن است کم و بیش حاوی ویژگی‌های سخت شوندگی باشند. نکته مهم آن است که در نقشه خاک‌های جهان، بارها به عمومیت فرسایش خاک در چنین مناطقی اشاره شده است. فرسایش خاک معمولاً با شرایط سخت شوندگی همراه می باشد.

جدول ۱۱- پراکندگی جغرافیایی خاک‌های سخت شونده – لووی سولز، پلانوسولز و سولونتز – بر اساس نقشه خاک های جهان (FAO-UNESCO, ۱۹۷٤).

مناطق موردنظر در نقشه خاکهای جهان	لووی سولز	پلانوسولز	سولونتز
آمریکای شمالی	معمولی تا گسترده	جزئی – ناشناخته در کانادا	جزئی
مکزیک و آمریکای مرکزی	گسترده	جزئی	بسیار جزئی – در هیچ منطقه ای غالب نیست
آمریکای جنوبی[a]	گسترده، بویژه در شمال شرقی برزیل، مرکز شیلی، کلمبیا، بولیوی	در مناطق وسیعی از آرژانتین و برزیل	در مناطق وسیعی از آرژانتین
اروپا	گسترده، اما بطور خاص در نواحی مدیترانه ای معمول است	جزئی اما قابل توجه در اسپانیا، یوگوسلاوی و رومانی	جزئی اما قابل توجه در مجارستان
آفریقا	گسترده	گسترده	معمول در برخی مناطق
جنوب آسیا	گسترده، بویژه در جنوب هندوستان، اسرائیل، لبنان، سوریه	جزئی	گسترده، بویژه در شمال هند و سوریه
شمال و مرکز آسیا	معمولی تا گسترده، مثل شرق چین	جزئی – در برخی مناطق بصورت پراکنده	معمولی، مثلاً در آسیای مرکزی
جنوب شرقی آسیا	گسترده، اما در نواحی نسبتاً کوچک	موجود نیست	موجود نیست
استرالیا – آسیا	گسترده، بویژه در استرالیا	گسترده، بویژه در استرالیا	معمول، بویژه در استرالیا

a با توجه خاص به سخت شدن برخی خاکها (chromic luvisols) در حین خشک شدن،

۳-۳-۳- تعریف زراعی از سخت شوندگی خاک

اگر چه تعریف موجود خاک‌های سخت شونده برای نقشه‌برداری خاک‌ها در استرالیا کفایت می‌کند اما در حال حاضر توجه بیشتری بر جنبه‌های زراعی این خاک‌ها متمرکز شده است و لذا این قسمت به تجدید نظر در تعریف ارائه شده برای این خاک‌ها از دیدگاه زراعی و رشد گیاه اختصاص یافته است.

۳-۳-۳-۱- شرایط «بی ساختمانی ظاهری»

حتی درخاک با ساختمان توده ای، می‌توان ترک‌های عمودی را البته بندرت مشاهده نمود. در جایی که ریشه گیاهان دائمی (مانند درخت اکالیپتوس) در افق سخت شونده رشد کرده است، امکان مشاهده برخی ترک‌ها

توام با ریشه های بزرگ وجود دارد. اما برای گیاهان یک ساله، در صورت وجود لایه سخت شونده در نیمرخ خشک خاک و عدم رشد ریشه ها در عمق و فقدان ترک‌های ریز، خاک از نظر رشد گیاه فاقد ساختمان تلقی می گردد. رشد ریشه تنها در شرایط مقاومت ضعیف (و لذا در حالت مرطوب) خاک امکان پذیر است.

۳-۳-۳-۲- مقدار سختی و «سخت شوندگی»

هر تعریفی از سخت شوندگی که بر شرایط خاک سطحی تاکید کند ممکن است در تمایز میان سختی یک سله که خاک زیر آن سخت شونده نیست و سخت شوندگی حقیقی ناموفق باشد. بنابراین، توجه به شرایط خاک در عمق کاشت بذر و زیر آن (۰/۰٤ تا ۰/۱ متر) که سخت بودن آن می تواند منجر به ایجاد مشکلات اضافی علاوه برمشکلات ناشی از سله گردد، ضرورت دارد.

دانستن پتانسیل ماتریکی که در آن مقاومت خاک به فروروی به حد بحرانی برای رشد ریشه(حدود۳ مگاپاسکال) می‌رسد، مطلوب است اما عملاً چنین پتانسیلی آسان به دست نمی‌آید. بنابراین، به دست آوردن یک برآورد ساده صحرایی از مقاومت کششی یا برشی با خرد کردن یک نمونه خاک در میان انگشتان دست یا در زیر پا یا با دستگاه قابل حمل آزمون فشردگی محصور نشده (چاندلر و استافورد، ۱۹۸۷) مورد توجه قرار گرفته است. برای معنی دار بودن داده های حاصل، چنین آزمایش هایی نباید روی کلوخه های ناشی از خاک ورزی انجام گیرد زیرا چنین نمونه هایی ممکن است در نتیجه خشک و تر شدن سست شوند. آزمایش باید روی نمونه های کوچک برداشت شده از خاک زیر سطحی انجام گیرد. خرد کردن یک نمونه مکعبی خاک نیز نامناسب است زیرا در چنین حالتی، گاهی نمونه در معرض گسیختن در حالت کشش قرار می گیرد که طی آن گسیختگی برشی واقع شده و سطح گسیختگی از دو انتهای نمونه خواهد گذشت. لیکن خرد کردن طولی نمونه استوانه ای خاک (که قطر آن دو برابر طول آن یا بیشتر باشد) برای اندازه گیری مقاومت فشاری محصور نشده و یا خرد کردن جانبی استوانه برای اندازه گیری مقاومت کششی (به روش لی و همکاران، ۱۹۸۸) می تواند قابل قبول باشد. نتایج بدست آمده از چنین آزمایش هایی می تواند مقیاسی کمّی برای مقاومت خاک‌های سخت شونده خشک شده در هوا محسوب گردد. ضمناً تعریف «خاکی که با فشار انگشت اشاره خرد یا فرو رفته نمی شود» (مک دونالد و همکاران، ۱۹۸٤) در صورت کاربرد آن در بدنه نیمرخ خشک و در ۰/۱ متری زیر سطح خاک، می تواند شاخص مقاومت قابل قبولی برای خاک‌های سخت شونده فراهم نماید.

۳-٤- مدیریت و اصلاح خاک‌های سخت شونده

۳-٤-۱- نیاز به سیستم های مدیریت پایدار خاک

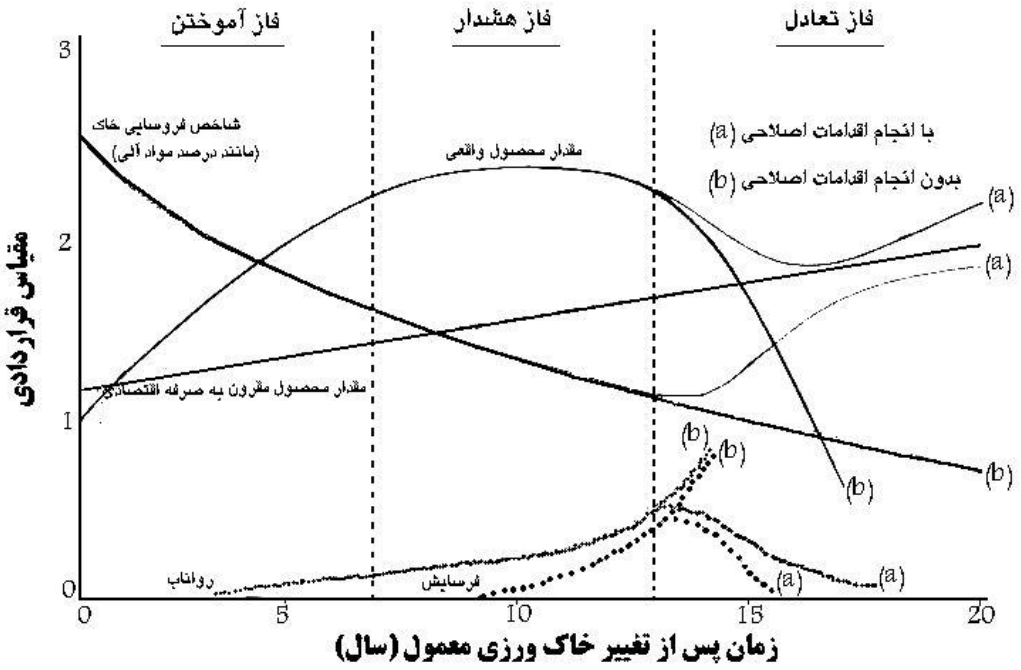
یک سیستم کشاورزی پایدار الگویی از کشت و مدیریت خاک است که قادر به حفظ سطح ثابت یا افزایش مقدار محصول (با کشت گونه های اصلاح شده، کاربرد مقدار بیشتر کود و ...) برای آینده قابل پیش بینی (بیش از ۵۰ سال) می باشد. مفهوم ضمنی این تعریف آن است که سطوحی از فرسایش خاک که به طور قابل توجهی بیشتر از مقدار فرسایش اراضی بکر یا مرتعی باشد با کشاورزی پایدار سازگار نیست، اگر چه اثرات زیان آور فرسایش خاک بر مقدار محصول ممکن است طی زمانی طولانی ظهور کند. این نکته ممکن است با مراجعه به شکل ۲٦ بهتر درک شود که به سه فاز تقسیم شده است :

۱) فاز آموختن : در این فاز، با کسب تجربه و آموختن موثرترین راه مدیریت خاک برای کسب سود کوتاه مدت از سوی کشاورزان، افزایش سریعی در مقدار محصول ایجاد می‌شود. مقدار کل محصول لازم برای بقای اقتصادی نیز در امتداد افزایش هزینه‌ها (واریته‌های جدید، کود، ادوات، علف‌کش وآفت‌کش) افزایش می‌یابد.

۲) فاز هشدار : در این فاز، فروسایی خاک به حدی پیش می رود که برای آغاز کاهش جدی مقدار محصول بالقوه کفایت می کند. لیکن، اثرات فروسایی ممکن است تنها در سال‌های خاصی نمایان شود و اگر آب و هوا در این فاز مناسب باشد، کشاورزان ممکن است از تخریب تدریجی ویژگی‌های فیزیکی خاک غافل بمانند. چنین وضعیتی اهمیت پایش ویژگی های فیزیکی خاک را به همان اندازه توجه به مقدار محصول روشن می‌کند. در صورتی که کشاورز عملیات بهسازی و اصلاح کافی را تا پایان این فاز انجام ندهد، امکان دارد بازگرداندن و اصلاح اراضی به یک سیستم زراعی پایدار غیرممکن یا غیر اقتصادی گردد .

۳) فاز تعادل : با فرض آنکه اتخاذ عملیات اصلاحی کافی امکان پذیر باشد، وضعیت تعادل نشان دهنده نیل به یک سیستم کشاورزی پایدار می باشد.

مقیاس زمانی در شکل ۲٦ بر مبنای تجارب بدست آمده از شمال نیوساوت ولز در استرالیا می‌باشد، اما بسته به حساسیت خاک، خشونت اقلیم و تفاوت کلی میان سیستم مدیریت موجود و مطلوب، می‌تواند کوتاه‌تر یا طولانی‌تر باشد. فرشایش لزوماً علت نهایی غیرقابل استفاده شدن اراضی نیست. در جایی که فرسایندگی باران زیاد نباشد، دشواری‌های مدیریت و مقدار کم و متغیر محصول همراه با وجود شرایط سخت شوندگی ممکن است دلیلی برای غیرقابل استفاده شدن اراضی باشد.



شکل ٢٦- نمودار فرضی برای تشریح نظریه سیستم کشاورزی پایدار در خاک‌های مستعد فروسایی.

۳-٤-۲- تجربه استرالیا

۳-٤-۲-۱- پیشینه

در جنوب استرالیا به طور معمول، محصولات مختلف پس از آیش یا در تناوب با علوفه خانواده بقولات کشت می‌شوند. در سیستم آیش، گندم (*Triticum aestivum*) یا سایر غلات پس از ۱۰-۸ ماه (آیش طولانی) تا ۵-۱ ماه (آیش کوتاه مدت) کشت می شوند. در آیش طولانی، خاک ورزی با مساعد شدن آب و هوا (معمولاً پس از اول ژانویه) آغاز می‌شود. کشاورزان، آیش طولانی را برای حفظ آب، معدنی شدن ازت و کنترل علف‌های هرز و بیماری‌های گیاهی اعمال می‌کنند. آیش کوتاه مدت معمولاً در جنوب شرقی استرالیا که بارندگی تابستانه و پاییزه معمول‌تر است، انجام می شود. استاندارد مشخصی برای خاک‌ورزی در آیش طولانی یا کوتاه مدت وجود ندارد اما معمولاً زمین پس از دیسک زدن، چند مرتبه شخم سطحی شده و سپس با یک شخم سبک، اقدام به کاشت محصول مورد نظر می‌گردد.

در سیستم تناوب، معمولاً یک یا دو محصول در پی یک یا چند سال کاشت گونه های شبدر زیرزمینی (*Trifolium subterraneum*) یا یونجه (*Medicago*) یکساله، کشت می شوند. در اراضی دیمکاری واقع در شیب های شمال غرب نیوساوت‌ولز، گندم محصول اصلی است که در تناوب با جو (*Hordeum vulgare*)،

سورگوم (*Sorghum vulgare*) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) قرار می‌گیرد. به منظور حداکثر ذخیره آب، بلافاصله پس از برداشت محصول قبلی، آیش آغاز می شود.

به سبب خسارات ناشی از خاک ورزی بر ساختمان خاک و افزایش خطر فرسایش و فراهم شدن علف-کش‌های جدید برای کنترل علف‌های هرز، روشهای شخم کاهش یافته یا کاشت مستقیم به تدریج جایگزین روشهای آیش با خاک‌ورزی معمول می گردد. روش شخم کاهش یافته شامل هر سیستمی با عملیات کمتر نسبت به روش معمول می شود. چنین وضعیتی می تواند در حد یک بار خاک‌ورزی با کاربرد علف‌کش پیش و پس از کاشت محصول انجام گیرد. در روش کاشت مستقیم، ادوات مورد استفاده (مانند حفار بشقابی[1] ، بذرکار شیاری[2] ، کمباین اصلاح شده[3] یا بیل دوار[4]) بذر را در خاک دست نخورده فرو می کند. به هم خوردگی خاک با این ادوات از شیارهای کم عمق تا خاک ورزی اندک در اطراف بذر تغییر می کند و بقایای گیاهی نیز ممکن است باقی بماند یا سوزانده شود. با وجود چنین دامنه وسیعی از سیستم ها، دور از انتظار نیست که واکنش خاک و گیاه بی ثبات و متناقض بوده و تعمیم آن تنها در منطقه معین و زمان مشخصی از سال معتبر باشد.

۳-٤-۲-۲- اثر مدیریت خاک بر رشد گیاه و مقدار محصول

اغلب تحقیقات انجام شده در جنوب شرقی استرالیا مقدار محصول بیشتری را در آیش طولانی نسبت به آیش کوتاه مدت نشان داده اند، اما مقدار محصول هر کدام به میزان بارندگی در آن سال بستگی داشته است. در شرایطی که بارندگی فصلی کمتر از ٤٤٠ میلی‌متر بوده و آب به مقدار زیاد ذخیره شده است، آیش طولانی معمولاً منجر به افزایش محصول شده است (فرنچ، ۱۹۷۸). در خاک‌های قرمز– قهوه‌ای جنوب استرالیا، آیش طولانی به طور متوسط ۵۵ میلی‌متر و در منطقه لاکهارت در نیوساوت ولز، ۳۵ میلی متر آب اضافی را ذخیره می کند (فرنچ، ۱۹۷۸؛ میسون و فیشر، ۱۹۸٦). مقدار بیشتر محصول برداشت شده از اراضی آیش، همچنین به آماده کردن بهتر بستر بذر، کنترل بهتر علف‌های هرز و نماتدها یا مقدار بیشتر ازت خاک، نسبت داده شده است.

در یک آزمایش تناوب چند ساله در منطقه ویکتوریان کشور مالی، مقدار محصول کل تناوب‌ها در بیست سال اول، نسبت به ۱/۲ t/ha در سال مبدا افزایش یافته است (الیوت و جاردین، ۱۹۷۲). چنین وضعیتی به افزایش معدنی شدن ازت در اثر خاک ورزی نسبت داده شده است. در این آزمایش، آیش طولانی دو ساله نسبت به آیش طولانی سه ساله و چهار ساله به مقدار محصول کمتری منجر شده است. در آیش طولانی دو ساله، مقدار محصول در سال بیستم به حداکثر خود (۱/٦ t/ha) رسید و در سال بیست و هشتم تا حد ۱/۲ t/ha کاهش یافت

1- Disc drill
2- Slot seeder
3- Modified combine
4- Rotary hoe

که علت آن ممکن است کاهش مواد آلی و تخریب ساختمان خاک باشد. در آیش طولانی سه ساله و چهار ساله، مقدار محصول در سال بیستم t/ha ۲–۱/۹ و در سال بیست و هشتم t/ha ۲/۳–۱/۹ بوده است.

در اغلب موارد، کشت مستقیم محصولات نسبت به روش معمول خاک ورزی منجر به کندتر شدن رشد در اوایل فصل می گردد (جدول ۱۲، ریوز و الینگتون، ۱۹۷٤؛ چان و همکاران، ۱۹۸۷؛ مورفی و همکاران، ۱۹۸۷).

جدول ۱۲– اثر مدیریت خاک لوم شنی نرم اوربرا بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و میزان رشد گندم

(وایتلی و دکستر، ۱۹۸۲).

ویژگی	عمق (mm)	تعداد روز پس از کاشت	خاک ورزی معمول	روش کاشت مستقیم
مقدار آب (kg/kg خاک خشک)	۵۰–۱۰۰	۸–۱۰	۰/۱۵۷	۰/۱۵۸
مقاومت به نفوذ (MPa)	۵۰–۱۰۰	۸–۱۰	۰/۳	۲/٤
جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	۲۰–۱۰۰	۲۵–۳۵	۱/۲	۱/٦
طول کل ریشه (گیاه /mm)	–	۱۵–۱۸	٤۸۸	۳۳۰
کل ماده خشک (g/m^2)	–	هنگام برداشت	۹۷۵	۱۰۰٤

از جمله دلایل ارائه شده برای چنین وضعیتی، کاهش معدنی شدن و قابلیت جذب ازت، دمای کمتر خاک، کاهش قابلیت دسترسی به آب، موانع مکانیکی برای رشد ریشه و ساقه، شرایط ماندابی خاک، کنترل ضعیف علف های هرز، مواد سمی حاصل از تجزیه بقایای آلی، بیماری‌های خاکزاد، طول مدت آزمایش و بارندگی را می‌توان نام برد. همچنین، گونه های مختلف گیاهی به طور متفاوتی به سیستم‌های گوناگون واکنش نشان داده اند. برخی اوقات، کاشت بذر در حین خاک ورزی با تاخیر صورت گرفت زیرا خاک بسیار مرطوب بود یا در مورد کشت مستقیم، تاخیر کاشت به علت بسیار خشک بودن خاک بود که در هر دو حالت، مقدار محصول کاهش یافت. لیکن، با وجود کاهش رشد در مراحل اولیه کاشت، مقدار محصول دانه تفاوت اندکی با سیستم های معمول خاک ورزی داشته است (جدول ۱۳، چان و همکاران، ۱۹۸۷؛ مورفی و همکاران، ۱۹۸۷).

جدول ۱۳- اثر مدیریت خاک بر مقدار محصول گندم.

مدت آزمایش (سال)		مقدار محصول (t/ha) خاک ورزی معمول	خاک ورزی کاهش یافته	کشت مستقیم [a]	کشت مستقیم [b]	منطقه	مرجع
۱		۲/٤	–	۲/٦	–	Ruthergton, Vic	ریوز و الینگتون (۱۹۷٤)
۳		۱/۹	–	۲/۹	–		
۸ [c]	-N	۰/٦	۰/۷	۰/۸	۰/۸	Waggawagga, NSW	ازبرن و همکاران (۱۹۷۸)
	+N	۱/٥	۱/۷	۱/٥	۱/٦		
۱		۱/۷	–	۱/۸	۱/۸	Aronded, WA	هامبلین و تنانت (۱۹۷۹)
۱		۳	۲/۳	–	۲/٦	Canberra. ACT	گیتز و همکاران (۱۹۸۱)
۱		۲/۸	–	۲/٥	۲/٥	Lockart, NSW	بورچ و همکاران (۱۹۸٦)
۳		٤/۳	–	۳/۷	۳/۷		

a: خاک تا عمق cm ٥-۰ کاملاً بهم خورده است.

b: قسمتی از خاک تا عمق cm ٥-۰بهم خورده است.

C: N- بدون کاربرد کود ازته؛ N+ کاربرد kg/ha ۸۰ کود ازته در هر سال.

۳-٤-۲-۳- اثر مدیریت مزرعه بر ویژگی های خاک

۳-٤-۲-۳-۱- مواد آلی و پایداری خاکدانه‌ها

در طول مدت آیش مقدار کمی از بقایای گیاهی به خاک افزوده شده و غالباً خاک ورزی صورت می‌گیرد، لذا در مقایسه با خاک شخم نشده مقدار بیشتری از مواد آلی تجزیه می شود (روویرا و گریسن، ۱۹۵۷). در خاک-های مرتعی شخم نشده، بقایای گیاهی پیوسته به خاک اضافه می شود که منجر به بالا رفتن درصد کربن آلی می گردد (تیسدل و ادز، ۱۹۸۰). بنابراین، پس از چند سال سطح کربن آلی معمولاً در خاک‌های تحت خاک ورزی معمول کمتر از خاک مرتعی، خاک تحت کشت مستقیم یا با خاک ورزی کاهش یافته (به ویژه در صورت باقی گذاشتن کاه و کلش) می باشد (جدول ۱٤).

در منطقه آوندال در غرب استرالیا و در ششمین سال آزمایش، درصد کربن آلی در خاک تحت خاک ورزی معمول، خاک ورزی کاهش یافته و کشت مستقیم به ترتیب ۱/۳، ۱/٥و ۱/٦ درصد بوده است (هامبلین، ۱۹۸۷). در آزمایش تناوب دائمی در موسسه تحقیقات کشاورزی ویت در آدلاید، خاک های مرتعی بیش از ۲/۳ درصد، خاک-

های تحت آیش کمتر از ۱/٦ درصد و بقیه خاک‌ها در حدی میان این دو مقدار، مواد آلی داشته انـد (تیـسدل و ادز، ۱۹۸۰).

جدول ١٤- ویژگی های فیزیکی یک خاک قرمز – قهوه ای در لاکهارت، نیوساوت ولز، پس از سه سال مدیریت خاک (بورچ و همکاران، ١٩٨٦).

تیمار	کربن آلی (g/kg)		پایداری خاکدانه‌ها [a] (%)	
	۰–۵۰ [b]	۵۰–۱۰۰ [b]	۰–۵۰ [b]	۵۰–۱۰۰ [b]
خاک ورزی معمول	۲۰	۱۵	۳۸	۲٦
خاک ورزی کاهش یافته	۲۱	۱٦	٤۲	۳٤
کشت مستقیم	۲۰	۱۵	٤٦	۳۲
کشت مستقیم همراه با حفظ کاه وکلش	۲۱	۱٦	٤۸	۲۸

a: قطر ۰/۲ mm < b: عمق (mm)

تجمع کربن آلی در خاک‌های سخت شونده معمولا با مقدار خاکدانـه‌هـای پایـدار در آب همبـستگی دارد (جدول ١٤؛ گریسن و همکاران، ۱۹۷۲؛ هامبلین، ١٩٨٤). در خاک لوم شنی نرم اوربرا در موسسه ویـت، بـازای هـر ۰/۱ درصد افزایش کربن آلی، ۲ درصد به خاکدانه‌های درشت پایدار (با قطر بزرگتر از ۲۵۰ μm) افزوده می شـود. فعالیت ریشه ها و هیف قارچ ها این خاکدانه‌هـای درشـت را پایـدار مـی کنـد (تیـسدل و ادز، ۱۹۸۰). در اراضـی فاریاب شمال ویکتوریا که حد نهایی دوره‌های خشک و تر شدن در تابستان واقع می‌شود، خاکدانـه‌هـای پایـدار در آب (با قطر بزرگتر از ۲۵۰ μm) برای خاک‌های مرتعی و تحت کشت گوجـه فرنگـی بـه ترتیـب برابـر ۹۰ و ۵۸ درصد و کربن آلی به ترتیب برابر ۱/۸ و ۱/۵ درصد بوده است (ادم و تیـسدل، ١٩٨٤). در صـورت افـزایش بقایـای آلی، خاک باید برای مدت طولانی مرطوب بماند تا فرصت تولید مواد پایدار کننده برای ریز جانداران فـراهم گـردد (تیسدل و همکاران، ۱۹۷۸). همچنین وجود کرم های خاکی و سایر جـانوران خـاکزی بـرای مخلـوط کـردن کامـل بقایای گیاهی با خاک ضرورت دارد (بارلی و کلینینگ، ١٩٦٤؛ تیسدل، ۱۹۷۸). با زوال ساختمان خاک در طـی سـال های متمادی خاک ورزی معمول، کار روی خاک و تهیه یک بـستر بـذر خـوب اغلـب دشـوارتر مـی شـود. چنـین وضعیتی منجر به تماس ضعیف بذر با خاک و آب شده و از مقدار جوانه زنی می کاهد.

در یک خاک قرمز – قهوه ای منطقه مردین در غرب استرالیا، در ششمین سال خاک ورزی معمول،

شاخص خرد شدن/پراکنش[1] خاک (عمق صفر تا ۱۰ سانتی متر) برابر ۱۳/۷ و تحت کشت مستقیم برابر ۹/۹ بوده است (هامبلین، ۱۹۸٤). در شرایط خاک ورزی معمول در مقایسه با کشت مستقیم، بستر بذر کلوخه ای تر و خشک تر باعث تاخیر جوانه زنی گندم تا ٤۰ درصد و از بین رفتن جوانه ها و تاخیر رسیدن دانه تا ۳ هفته می گردد. در عین حال، روش کشت مستقیم به ویژه در صورت حفظ بقایای گیاهی ممکن است باعث افزایش ابتلا به بیماری های قارچی یا سمیت ناشی از ترشحات بقایای گیاهی[2] گردد (کیمبر، ۱۹۷۳). در جنوب استرالیا و در یک خاک لوم شنی تحت کشت مستقیم با اندکی تجزیه مواد آلی در طول تابستان، ابتلا به عامل پوسیدگی ریشه ریزوکتونیا در اوایل فصل رشد گندم حدود ۷۰ درصد بوده است (روویرا و ون، ۱۹۸۵). به همین ترتیب، کشت مستقیم ممکن است ابتلا به بیماری در خاک‌های سخت شونده را نیز افزایش دهد.

۳-٤-۲-۳-۲- آب خاک

خاک ورزی شدید، اغلب منجر به تشکیل سله های سطحی با نفوذپذیری اندک (جدول ۱۵) پس از بارندگی شدید یا آبیاری غرقابی می گردد و از نفوذ پذیری خاک و جوانه زنی بذر بشدت می کاهد.

جدول ۱۵- هدایت هیدرولیکی (k_s) خاک پس از ۲۳ mm بارش مصنوعی در مدت ۳۰ دقیقه

[مک ایتایر، ۱۹۵۸].

خاک	k_S (ms^{-1})	نسبت
پوسته رسی	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۵	۱
لایه سطحی با خاکدانه های تخریب شده	۰/۰۰۰۰۰۰۰۵	۱۰
کل خاک زیرین	۰/۰۰۰۰۱	۲۰۰۰

هر چه خاک ورزی شدیدتر و بستر حاصله ریزدانه تر باشد، تشکیل سله های سطحی شدیدتر بوده (براوناک و دکستر، ۱۹۸۸) و در صورت تجمع آب آزاد در سطح خاک، تشکیل سله شدیدتر خواهد بود زیرا خاک پراکنده شده سریع تر از خاک بهم پیوسته خشک و متراکم می شود و تا عمق حدود ۳ میلی متر فاقد خلل و فرج درشت می باشد (امرسون، ۱۹۷۷). سله‌های سطحی نه تنها نفوذپذیری را محدود می کند، بلکه در صورت وقوع بارندگی سنگین و پیوسته می تواند تا چند هفته خاک سطحی را در حالت اشباع نگاه دارد. دراین شرایط، سله هایی که قدرت تهویه اندکی دارند گاهی اوقات باعث کاستن از جوانه زنی بذر، رشد جوانه و رشد اولیه گندم می شوند

1- Slaking/Dispersion 2- Phytotoxicity

(مک اینتایر، a ۱۹۵۸؛ میلینگتون، ۱۹۵۹). خاک ورزی شدیدتر در حین هر دوره تناوب، اثرات شدیدتری بـر جـای خواهد گذاشت. برای مثال، نفوذپذیری سله های سطحی در اراضی تحت تناوب گندم – آیش بسیار کمتر از اراضی تحت تناوب علوفه – علوفه – آیش – گندم بوده است. سله های سطحی همچنین می تواننـد آغـازگر فرسـایش در اراضی شیب دار باشند به صورتی که با افزایش رواناب، فرسایش خاک سطحی تشدید شده و به خاک زیـر سـطحی می رسد که این، آغاز فرایند تشکیل خندق است.

در مقایسه سیستم های مختلف خاک ورزی با استفاده از دستگاه باران ساز، هر قدر خاک کمتر بهم خـورده بود دارای نفوذپذیری بیشتر و رواناب کمتر بود (جدول ١٦؛ هـامبلین، ١٩٨٤؛ مـورفی و همکـاران، ١٩٨٧؛ هـامبلین، ١٩٨٧). در ششمین سال یک آزمایش در منطقه مردین در غرب استرالیا، پس از بارنـدگی در قطعـات تحـت کـشت مستقیم و یا شخم کاهش یافته در مقایسه با قطعات تحت خاک ورزی معمول، عمـق بیـشتری از نیمـرخ (٦ cm–٤ عمیق تر) تا بالای افق B مرطوب شده است (هامبلین، ١٩٨٤).

جدول ١٦– اثر مدیریت خاک بر آب گرفتگی و رواناب ناشی از باران مصنوعی با شدت ٥٦ میلی متر در ساعت به مدت ٤٠ دقیقه[بورچ و همکاران، ١٩٨٦].

تیمار	زمان آب گرفتگی (ثانیه)	سرعت رواناب (mm/h)
خاک ورزی معمول	١٤١	١٧/٩
کشت مستقیم [a]	١٧١	٩/٣
کشت مستقیم [b]	٢٣٥	٨/٢

a: خاک تا عمق cm ٥–٠ کاملاً بهم ریخته است.

b: خاک تا عمق cm ٥–٠ تا حدی بهم ریخته است.

در منطقه کوورا در نیوساوت ولز و در اراضی تحت کشت مستقیم نسبت به خـاک ورزی معمـول، پـس از گذشت شش سال، مقدار آب بیشتری در نیمرخ خاک ذخیره شـده و مـورد اسـتفاده قـرار گرفتـه اسـت (مـورفی و همکاران، ١٩٨٧). در دوره گلدهی تا برداشت، عمقی از خاک که ریشه از آن آب جذب کرده بود، برای خاک تحت کشت مستقیم (٨٠ cm) دو برابر خاک تحت خاک ورزی معمول (٤٠cm) بوده است که مؤید رشد عمیق تر ریـشه در خاک تحت کشت مستقیم می باشد. نرخ رشد بیشتر در آخر فصل در شرایط کشت مـستقیم، بـه فراهمـی بیـشتر آب برای گیاه نسبت داده شده است.

پس از دو سال خاک ورزی معمول در اراضی منطقه کوورا در نیوساوت ولز، تقریباً تمامی باران های مصنوعی نفوذ یافته (با شدت ۱۹/۸ میلی متر در ساعت) در ۲۰۰mm بالایی خاک ذخیره شده اند، در حالیکه در قطعات تحت کشت مستقیم، ۲۸ درصد باران به اعماق زیر ۲۰۰mm نفوذ کرده است (مید و چان، ۱۹۸۸). چنین وضعیتی به تعداد خلل و فرج درشت که تا سطح ادامه دارند، مرتبط شده است. آزمون نفوذپذیری با آب رنگی نشان داده است که در عمق ۱۲۰mm تعداد خلل و فرج درشت (۰/۵mm <) در خاک تحت خاک ورزی معمول نصف کشت مستقیم است که ۸ درصد آنها رنگی شده، در حالیکه خاک تحت کشت مستقیم دارای ۵۵ درصد خلل و فرج رنگی بوده است (چان و مید، ۱۹۸۸، مکاتبه شخصی). در چنین وضعیتی، مرطوب شدن ماتریکس خاک ممکن است بیشتر ناشی از وجود خلل و فرج پیوسته باشد تا مرطوب شدن خاک سطحی (اسمتم، ۱۹۸٦).

خاک ورزی همراه با برداشت بقایای گیاهی منجر به از میان رفتن منبع غذای جانوران و تسریع خشک شدن خاک می شود و بنابراین غالباً جمعیت‌های جانوری را درخاک کاهش می دهد (تیسدل، ۱۹۷۸). چنین وضعیتی به نوبه خود ممکن است باعث کاهش خلل و فرج درشت ممتد تا سطح و لذا کاهش نفوذ پذیری و تهویه خاک گردد. در موسسه ویت، تعداد کرم های خاکی در خاک شخم شده کمتر از خاک مرتعی بوده است (بارلی، ۱۹۵۹). در ایستگاه های مختلف غرب استرالیا، خاک ورزی اراضی زراعی در مقایسه با خاک بکر مجاور، جانورانی مانند موریانه، مورچه و سوسک ها را تقریباً نابود کرده و تعداد نقب های این جانوران و مقدار نفوذ را کاهش داده است (آبوت و همکاران، ۱۹۷۹). روویرا و همکاران (۱۹۸۷) در خاک تحت کشت مستقیم در منطقه کاپوندا در جنوب استرالیا تعداد کرم های خاکی را ٦/٦ عدد در ۲۰۰ cm^3 گزارش کرده اند در حالی که سه سال خاک ورزی معمول، تعداد کرم های خاکی را به نصف کاهش داده است. تعداد حفرات ناشی از فعالیت جانوران (بزرگتر از ۲mm و به عمق ۱۰ cm) تغییر نیافته است. چنین وضعیتی ممکن است در طول زمان تغییر کند. اراضی فاریاب شمال ویکتوریا که تحت کشت مستقیم قرار گرفته و کود گاوی به آنها افزوده شده، حاوی ۵۱ کرم خاکی در متر مربع با چهار برابر حفرات ناشی از فعالیت جانوران خاکزی (به قطر mm ۱۰-۲ و عمق mm ۵۰) و چهار برابر سرعت نفوذ نسبت به خاک شخم شده بدون افزایش کود گاوی (با ٦ کرم خاکی در متر مربع) بوده است (تیسدل، ۱۹۸۵). حیوانات علفخوار نیز با متراکم کردن خاک باعث کاهش مقدار نفوذ در خاک شخم خورده به روش معمول و خاک تحت کشت به روش شخم کاهش یافته گردیده اند (بورچ و همکاران، ۱۹۸٦).

۳-٤-۲-۳-۳- تخلخل و مقاومت مکانیکی

اندک زمانی پس از خاک ورزی معمول، تخلخل و مقدار خلل و فرج درشت خـاک در مقایـسه بـا حالـت خاک ورزی کاهش یافته یا خاک تحت کشت مستقیم بیشتر و خاک نرم تر می شود (مورفی و همکاران، ۱۹۸۷؛ هید و چان، ۱۹۸۸؛ جدول ۱۲). لیکن، مورفی و همکاران (۱۹۸۷) فروریزی خـاک‌هـای تحـت خـاک ورزی معمـول در حین فصل رشد را نشان داده اند. هنگام کاشت بذر، جرم مخصوص ظاهری خـاک تحـت کـشت مـستقیم و خـاک ورزی معمول به ترتیب برابر ۱/۲ و ۱ تن بر متر مکعب بوده است. شصت روز بعد، پس از ۷٦ میلی متر بارش کـل، جرم مخصوص ظاهری خاک تحت کشت مستقیم درهمان حد t/m^3 ۱/۲ باقی ماند در حالی که خاک تحت خـاک ورزی معمول تا t/m^3 ۱/٦ افزایش یافته بود. همچنین، در منطقه کوورا با خاک قرمز – قهـوه ای، جـرم مخـصوص ظاهری پیش از خاک ورزی برابر t/m^3 ۱/٦ بوده است اما خاکی که به تازگی شخم شده (جرم مخـصوص ظـاهری t/m^3 ۱/۲) پس از کاربرد ۱۹/۸ میلی متر باران مصنوعی در مدت یک ساعت، تا عمـق ۱۰۰ میلـی متـر، حـدود ۲۱ میلی متر فرو نشسته و جرم مخصوص ظاهری آن به t/m^3 ۱/۷ رسیده است (مید و چان، ۱۹۸۸).

افزایش فعالیت جانوران خاکزی در اراضی تحت کشت مستقیم یا خاک های مرتعـی غالبـاً تعـداد خلـل و فرج پیوسته تا سطح خاک (قسمت قبلی را ببینید) را افزایش می‌دهد که این به نوبه خود منجر به زهکشی سـریع‌تـر نسبت به خاک تحت خاک ورزی معمول می گردد. برای مثال، در کوورا، تخلخل هوایی پس از یک سـاعت بـارش مصنوعی در عمق ۵۰–۰ میلی متری خاک تحت خـاک ورزی معمـول برابـر ۱٤/۸ درصـد، در خـاک تحـت کـشت مستقیم برابر ۱۹/۹ درصد، و در خاک مرتعی برابر ۲۹/٤ درصد و در عمق ۱۰۰–۵۰ میلی متری، تخلخـل هـوایی بـه ترتیب برابر ۹/۳، ۱۷/۹ و ۲۵/۲ درصد بوده است. پس از ۲٤ ساعت، عمق ۵۰–۰ میلی متری هر سه خاک، زهکـشی شد اما در عمق ۱۰۰–۵۰ میلی متر، تخلخل هوایی در خاک تحت خاک ورزی معمول برابر ۱۷/۹ درصـد، در خـاک تحت کشت مستقیم برابر ۱۷/٦ درصد و در خاک مرتعی برابر ۲٦/۱ درصد بوده است (چان و مید، ۱۹۸۸).

اگر چه خاک‌های شخم خورده در اثر بارندگی سنگین فرو می ریزند، حرکت ماشـین هـای کـشاورزی یـا چرای دام نیز باعث متراکم شدن و افزایش مقاومت خاک مرتعی یا تحت کشت می گردد (ویـلات و پـولار، ۱۹۸٤؛ کلی، ۱۹۸٤؛ بورچ و همکاران، ۱۹۸٦؛ ماکین، ۱۹۸۷). ماکین (۱۹۸۷) برآورد نموده است که در طـول یـک عملیـات خاک ورزی، ۱۵تا ۵۵ درصد (بسته به نوع ادوات مورد استفاده) یک مزرعه در منطقه وریبی ویکتوریا، با اثر بـه جـا مانده از چرخ ادوات پوشیده شده است. در منطقه روترگلن ویکتوریا، عبور یک تراکتـور (بـه وزن ۹۲۰۰ کیلـوگرم) روی یک خاک قرمز – قهوه ای (که به تازگی تا عمق ۳۰۰ میلی متری شخم شده اسـت) خـاک را در طـول نیمـرخ متراکم کرده و مقاومت آن را افزایش داد. برای مثال، در عمق ۷۵ میلی متری، جرم مخصوص ظاهری از ۱/۲ بـه ۱/٤

t/m^3 افزایش یافته و مقاومت به فرو روی از ۰/۲ به ۱/۷ مگاپاسکال رسید. شخم بعدی تنها اثر عبور چرخ را پر کرد بدون آنکه نیمرخ خاک را نرم کند.

برخی خاک‌های سخت شونده صرف نظر از آنکه شخم زده شوند یا نه، با خشک شدن سخت تر می شوند. برای مثال، مقاومت خاک قرمز – قهوه ای در موسسه ویت با هر ۲/۵ درصد کاهش مقدار وزنی آب، دو برابر می‌شود (دکستر، ۱۹۸۸) اما در مورد خاک لوم رسی شنی قرمز در منطقه آوندال در غرب استرالیا چنین نیست (همبلین و تنانت، ۱۹۷۹). حتی در مقدار رطوبت مشابه، خاکی که کمتر بهم خورده، سخت تر بوده است (جدول ۱۲). در عمق ۱۰ سانتی متری خاک واقع در آوندال و در مکش ماتریک ۰/۵MPa، مقاومت به فروروی در قطعات با کشت مستقیم برابر ۳ MPa، شخم کاهش یافته برابر ۲/٦ MPa و در خاک ورزی معمول برابر ۲ MPa بوده است. مقاومت ممکن است در طول فصل تغییر نماید. در کوورا، هنگام کاشت بذر، مقاومت به فرو روی در قطعات با خاک‌ورزی معمول و کشت مستقیم به ترتیب برابر۲۰ و۵۰ کیلوپاسکال و پس از اعمال ۷٦ میلی‌متر باران، به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۸۰ کیلوپاسکال بوده است (مورفی و همکاران، ۱۹۸۷).

۳-٤-۲-٤-۳- دما

دمای خاک معمولاً تحت سیستم های مدیریتی مختلف اندازه گیری نمی شود. در عین حال، در منطقه موروموباتمان در نیوساوت ولز، هر عمق از خاک تحت خاک ورزی معمول غالباً در روز گرمتر و در شب سردتر از همان عمق از خاک با شخم کاهش یافته یا تحت کشت مستقیم همراه با کاربرد کلش بوده است (آستون و فیشر، ۱۹۸٦). برای مثال، پیش از کاشت بذر، حداکثر دمای خاک در قطعات تحت کشت مستقیم، در سطح خاک ۱۲ درجه سانتی گراد، درعمق یک سانتی متری ۸ درجه سانتیگراد و در عمق ۵ سانتی‌متری ٤ درجه سانتی گراد کمتر از قطعات تحت خاک ورزی معمول بوده است. مقدار رشد اولیه بیشتر گندم در قطعات با خاک ورزی معمول به تفاوت دما نسبت داده شده است. در اراضی فاریاب منطقه تاتورای ویکتوریا، حداکثر دمای ثبت شده تابستان در عمق ۳ سانتی متری خاک برابر ۳۲ درجه سانتی گراد در خاک‌های پوشش دار و ٤۱ درجه سانتی گراد در خاک‌های بدون پوشش بوده است (تیسدل و ادم، ۱۹۸٦a).

۳-٤-۲-٤- کاربرد گچ

گچ، ماده ای ارزان قیمت و سهل الوصول است که به کندی حل شده و برای اصلاح برخی خاک‌های سخت شونده به طور مستقیم یا همراه با آب آبیاری به کار می رود. کاربرد گچ منجر به اصلاح ویژگی های فیزیکی خاک شده و مقدار و سرعت جوانه زنی، رشد گیاه و مقدار محصول را افزایش می دهد و ضمناً زهکشی و آبشویی

خاک را نیز بهبود می بخشد (جدول ۱۱؛ ماتسون، ۱۹٦۹؛ رود، ۱۹۷٤؛ لاودی، ۱۹۸۱). گچ همچنین تعداد پنجه بازای هر گیاه و مقدار جذب عناصر غذایی را افزایش می دهد (جدول ۱۷).

جدول ۱۷- اثر گچ بر واکنش گندم به شرایط سدیمی خاک لوم شنی[شانموگاناتان و ادز، ۱۹۸۳b].

گچ (g/kg)	درصد جوانه زنی	میانگین روز جوانه زنی	تعداد پنجه	ازت[a]	فسفر[a]
۰	۷٦	۱۰/۲	٤/٥	٦/۲	۰/۲۸
۸	۸٤	۸/۲	٦/۷	۸/۲	۰/٤٤

a: g/kg ازت یا فسفر در بافت گیاه

گچ، به واسطه کاهش خفگی (Throttle) ناشی از پراکنش شدید در خاک سطحی و کند کردن فرایند خشک شدن خاک در اطراف بذر، موجب افزایش جوانه‌زنی می شود (لاودی و اسکاتر، ۱۹٦٦؛ گریرسون، ۱۹۷۸؛ لاودی، ۱۹۸۱). گچ، همچنین باعث افزایش خاکدانه‌های پایدار در آب، تخلخل درشت، هدایت هیدرولیکی، عمق نفوذ آب و درصد آب قابل جذب وکاهش مقاومت خاک گردیده و کار روی خاک را آسان تر می نماید (اسکاتر و لاودی، ۱۹٦٦؛ لاودی، ۱۹۸۱؛ چاترس، ۱۹۸٥) برای مثال، در یک خاک لوم شنی با درصد سدیم تبادلی (ESP) برابر ۹، کاربرد گچ (۰/۸ درصد w/w) منجر به کاهش شاخص پراکنش از ٥ به ۱ و افزایش هدایت هیدرولیکی از ۳/۱ به ٤/۷ cm/h گردیده ومقدار تردی را نیز ٦٦ درصد افزایش داده است (شانموگاناتان و ادز، ۱۹۸۳b).

در صورت آبشویی کلسیم از لایه های سطحی خاک، اثر مستقیم گچ دیری نخواهد پایید (گرین و فورد، ۱۹۸٥؛ گریرسون، ۱۹۷۸؛ چارترز و همکاران، ۱۹۸٥). مقطع های میکرومورفولوژیکی نشان داده‌اند که گچ به‌کار رفته در خاک‌های قرمز – قهوه ای سدیمی در ویکتوریای شمالی در هر دو مقدار ٥ و ۱٥ تن در هکتار باعث کاهش پراکنش رس و کم شدن سله‌بندی می گردد و از فرو ریختن خلل و فرج درشت تشکیل شده در اثر خاک‌ورزی جلوگیری می کند. با شسته شدن گچ از لایه های سطحی در اثر بارندگی (بسته به مقدار گچ به کار رفته، مقدار شستشو برابر یک تن در هکتار به ازای ۳٦۰-۱۲٥ میلی متر بارندگی) تخلخل درشت کاهش یافته و سله تشکیل می شود (گرین و فورد، ۱۹۸٥؛ چارترز و همکاران، ۱۹۸٥). از این رو، کاربرد گچ باید به صورت متناوب و در فواصل زمانی معین صورت گیرد. لیکن، در هر آبیاری محصول یونجه که روی خاک قرمز – قهوه ای منطقه تاتورا در ویکتوریا کشت شده و گچ به کار رفته در آن در سه سال قبل تا عمق ۰/۳ متری شسته شده است، در مقایسه با شرایط عدم کاربرد گچ، آب به اعماق بیشتری از خاک نفوذ کرده است. چنین وضعیتی به پایدارسازی خلل و فرج خاک توسط ریشه ها و موجودات زنده خاک نسبت داده شده است که احتمالاً با کاربرد گچ تقویت می شود (تیلور و اولسون، ۱۹۸۷).

همه خاک‌های سخت شونده به کاربرد گچ واکنش نشان نمی دهند (لاودی، ۱۹۸۱). گریریسون (۱۹۷۸) دریافته است که تنها ٤ تا ۱۰ نوع از این خاک‌ها به کاربرد گچ واکنش نشان داده اند. در خاک های سدیمی (ESP>15) کاربرد گچ، ساختمان خاک و مقدار محصول را بهبود می بخشد؛ در حالیکه در خاک سدیمی با ESP برابر ۸ و درصد منیزیم تبادلی (EMgP) برابر ۲۸، کاربرد گچ تنها ساختمان خاک را اصلاح می کند. مقدار زیاد مواد آلی، پوشش خاک، کشت مستقیم، pH خنثی، مقدار کم مولکول های آلی جذب شده در سطح ذرات رس، خشکی شدید، وجود آهک (کربنات کلسیم) ممکن است موجب کاسته شدن از واکنش خاک به کاربرد گچ گردد (امرسون، ۱۹۸۳؛ رنگاسامی و همکاران، ۱۹۸٤). برخی خاک‌ها که با اندکی پراکنش، خرد می شوند نیز «سخت شونده» محسوب گردیده و سله می بندند (رنگاسامی و همکاران، ۱۹۸۷). مقرون به صرفه بودن کاربرد گچ می‌تواند به زمان هم وابسته باشد (لاودی، ۱۹۸۱). در سال هایی که بارندگی کمتر از حد میانگین است، افزایش جوانه زنی به علت کاربرد گچ، ممکن است در ادامه فصل رشد به کاهش آب قابل دسترس منجر شود. برای محصولات فاریاب تابستانی که افزایش نفوذپذیری و آب ذخیره شده موثرتر است، کاربرد گچ می تواند مقدار محصول را نسبت به فصل های خشک تر افزایش دهد.

در گذشته، از آنجایی که خاک‌های اشباع از کلسیم غالباً پایدارتر و نفوذپذیرتر از خاک های اشباع از سدیم بوده است، تصور می شد که کاربرد گچ به واسطه تبادل کلسیم با سدیم روی کلوئیدها، منجر به بهبود ویژگی های فیزیکی خاک می‌گردد (جدول ۱۸).

جدول ۱۸- اثر کاتیونهای تبادلی بر سرعت نفوذ پس از ١٦ دقیقه بارندگی مصنوعی با شدت یک میلی متر در ثانیه (رز، ١٩٦٢).

خاک	میانگین سرعت نفوذ (mms^{-1})
طبیعی	۱/٦
اشباع از کلسیم	۱/۳
اشباع از سدیم	۰/۱

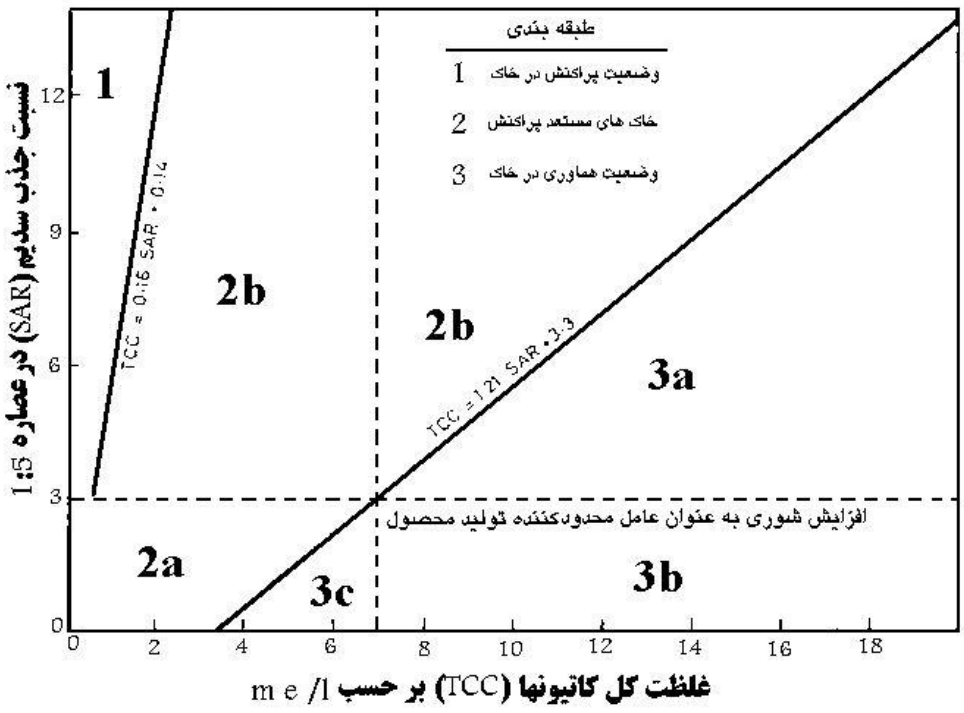
در برخی انواع خاک‌های سخت شونده سدیمی، باافزودن گچ، مقدار پراکنش متناسب با کاهش ESP، کاهش می یابد. همچنین، ٥٤ درصد تغییر پذیری داده های مقاومت در خاک‌های سخت شونده در غرب استرالیا، با مقدار ESP توجیه می شود (آیلمور و سیلز، ۱۹۸۲).

«نیاز گچی» یک خاک، جایگزینی کامل سدیم با کلسیم یا جایگزینی تا حد مشخص و در عمق معین خاک را هدف قرار داده است، اما کلسیم به کار رفته معمولاً به طور کامل تا عمق مطلوب جایگزین نمی‌شود. با کاربرد ۱۲/۵ تن گچ در هکتار برای یک خاک قرمز – قهوه‌ای بینابینی[1] ، تنها ٤٠ تا ٥٠ درصد از کلسیم در ٤٠-٣٠ cm بالایی خاک جایگزین شد که نیمی از آن با سدیم و نیمی دیگر با منیزیم مبادله شده است (لاودی، ۱۹۸۱). برای مثال، در لایه ۲۵-۱۰ cm ، کاربرد ۱۵ تن گچ در هکتار، درصد سدیم تبادلی (ESP) را به نصف کاهش داده، در صورتی که درصد منیزیم تبادلی (EMgP) تغییرات اندکی داشته است.

اعمال تنش برشی در حالت خیس (مانند شرایط بارندگی سنگین یا تردد زیاد حیوانات) و فقدان الکترولیت ها، حتی رس‌های حاوی کلسیم را دچار پراکنش می کند (رنگاسامی، ۱۹۸۲). بسته به مقدار ESP، غلظت آستانه ای از الکترولیت برای هماوری رس و افزایش نفوذپذیری الزامی است (لاودی، ۱۹۸۱). افزودن مقدار متوسطی از گچ در حدود ۵ تا ۷/۵ تن در هکتار می تواند برای افزایش غلظت الکترولیت تا حدود ۸ تا ۱۲ میلی اکی والان در لیتر کفایت کند. این غلظت برای حفظ نفوذپذیری خاک‌های با ESP در حدود ۲۰ کافی است (لاودی، ۱۹۷٤). پس از ٤٤۲ میلی متر بارندگی (در حدود بارندگی متوسط سالانه در گندم زارهای جنوب استرالیا)، کاربرد ۰/۲ درصد گچ در سال برای حفظ غلظت لازم الکترولیت جهت پایدار شدن یک خاک لوم شنی، ضرورت دارد. کاربرد مقادیر بیشتر گچ منجر به هدر رفتن آن شده و در اصلاح وضعیت خاک یا گیاه نیز تاثیری ندارد (شانموگاناتان و ادز، ۱۹۸۳).

رنگاسامی و همکاران (۱۹۸٤) طرحی را برای تمایز میان اثرESP و غلظت الکترولیت و در نتیجه مقدار گچ لازم برای پایدار کردن خاک ارائه نموده اند. آنها لایه های سطحی اراضی قرمز – قهوه ای دیم و فاریاب ونحوه مدیریت آنها را بر اساس مقدار پراکنش، نسبت جذب سدیم یا SAR (که در حدود نصف ESP است) و غلظت کل کاتیونها (TCC) در تعلیق ۱:۵ رده بندی نمودند (شکل ۲۷). طبق این طرح، خاک هایی که خود به خود پراکنده می‌شوند (SAR>3) حتی در شرایط کشت مستقیم یا مرتفع نیز دچار پراکنش می گردند. از آنجا که اساساً ESP کنترل کننده پایداری این خاک هاست، لذا یون کلسیم باید آنقدر ESP را کاهش دهد تا غلظت الکترولیت لازم برای هماوری تامین گردد. همچنین، خاک هایی با SAR بین صفر تا ۳ که مستعد پراکنش هستند، برای حفظ هماوری نیازمند غلظت کافی از الکترولیت می باشند؛ لیکن خارج کردن تمامی یون های سدیم از سطح رس غیر موثر و احتمالاً غیر ممکن است. خاک‌هایی با SAR بزرگتر از ۳ که مستعد پراکنش اند به مقادیر کافی از یون کلسیم نیاز دارند تا غلظت الکترولیت را افزایش دهد و مقدار ESP را تا حد ممکن به کمتر از ٦ برساند.

1- Transitional



شکل ۲۷- طرح طبقه بندی برای پیش بینی رفتار پراکنشی افق هایی از خاک قرمز – قهوه ای[رنگاسامی و همکاران، ۱۹۸٤].

۳-٤-۲-۵- سیستم جامع مدیریت خاک[1]

در استرالیا برخی آزمایش‌های ارزشمند (اغلب چند ساله) برای مقایسه اثرات کاربرد ماشین‌های مختلف یا سیستم‌های مدیریت متفاوت بر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و مقدار محصول انجام گرفته است. ماشین‌ها و سیستم هایی که غالباً در خارج از استرالیا تکامل یافته، با تغییرات اندک برای خاک‌های ترد استرالیا یا بر حسب نیازهای محصولات زراعی مورد استفاده قرار گرفته اند. به علت وجود تکرار زیاد در آزمایش‌های مقایسه ای سیستم های مدیریت، عملیات زراعی ممکن است به تاخیر افتاده و سیستم جدید را نامطلوب نماید. علیرغم سال‌های متمادی تحقیق و مدیریت، حاصلخیزی اراضی استرالیا غالباً کمتر از حد بالقوه است (فرنچ و شولتز، ۱۹۸٤). نتایج بدست آمده حتی برای یک محل، متناقض و ناهماهنگ است و لذا کاربرد عام آن مناسب نمی باشد. در منطقه تاتورا، یک سیستم توسط تیسدل و ادم (۱۹۸۸) بر مبنای ویژگی های فیزیکی مشخص خاک که مقدار نفوذ آب، جوانه زنی بذر و رشد ریشه را محدود نمی کنند، اجرا شده است (جدول ۱۹) که باید به طور کلی و عمومی به کار روند.

1- Integrated System of Soil Management

جدول ۱۹- مشخصات مورد نظر برای ویژگی های خاک، به علاوه سطوح اندازه گیری شده در لایه سطحی خاک قرمز – قهوه ای تحت سیستم تاتورا [تیسدل و ادم، ۱۹۸۸].

ویژگی	شاخص	مقدار مطلوب	سطوح اندازه گیری شده در سیستم تاتورا
نفوذ آب به خاک	خاکدانه‌های کوچکتر از ۰/۵ mm	< ٪٦	۵ درصد [a]
جوانه زنی	خاکدانه‌های ۰/۵b -۲ mm	٪۱۰۰	۲۱ درصد
	مکش ماتریک	< ۲٤ KPa	۲۵ KPa[c]
رشد ریشه	تخلخل درشت [b]	٪۱۵	< ۱۵ درصد [e]
	مقاومت به فرو روی	< ۱ MPa	< ۱ MPa[e]
	مکش ماتریک	< ۳۰ KPa	< ٤۰ KPa[e]
	خاکدانه‌های به قطر ۱۰-۱ mm	٪۱۰۰	٪۲۳ [a]
فعالیت کرم خاکی	مکش ماتریک	۱۰۰ Kpa > برای کمتر از ثلث زمان	< ٤۰ KPa[e]
	بقایای آلی	۱۰ تن در هکتار در سال	۱۰ تن در هکتار در سال
فعالیت میکروبی	بقایای آلی	۱۰ تن در هکتار در سال	۱۰ تن در هکتار در سال

a: در ابتدای آماده کردن بستر
b: ۲۰ درصد قطر دانه های ذرت؛ کشت در اطراف دانه ها
c: اطراف دانه های ذرت، یک روز پس از کاشت
d: درصد خلل و فرج بزرگتر از ۳۰ میکرومتر
e: اواخر تابستان، شش روز پس از استقرار سیستم تاتورا

ویژگی های مورد نظر برای فعالیت نامحدود کرم های خاکی و ریزجانداران در اراضی فاریاب قرمز – قهوه‌ای جنوب شرقی استرالیا نیز تعیین گردیده است. مدیریت در کل مزرعه یکنواخت نبوده اما هر عملیات (مانند مراحل اولیه جوانه زنی، حرکت و ذخیره آب و تردد ماشین‌ها) متناسب با ناحیه معینی از خاک برای مقصود مشخص و در زمان خاص انجام شده است. داده های علمی لازم، ماشین‌ها و سیستم مورد نظر با هدف ایجاد یا نگهداری مشخصه مطلوب در هر ناحیه، تعریف شده یا بسط یافته است.

در اولین پاییز پس از استقرار سیستم جدید، بستر بذر توسط پشته ساز[1] آماده می شود. یک کولتیواتور دندانه فنری[2] بستر قبلاً مرطوب شده را به منظور ایجاد یک بستر زبر با نفوذپذیری، قدرت تهویه و رشد ریشه مطلوب، تقریبا در حد خمیری شخم می زند. سپس یک بذرکار بشقابی[3] بذر یکی از غلات را در قسمتی از بستر آماده شده

1- Hiller
2- Spring-tined cultivator
3- Disk seeder

جوی ها می کارد. در سال بعد، بذر غله در قسمت شخم نشده بستر کاشته می شود. به محض برداشت غله، یک بیل دوار[٤] کوچک که جلوی بذرکار بسته شده، بستر نرمی را روی خط کاشت برای ایجاد تماس خوب میان آب و بذر محصولات تابستانه فراهم می نماید. چنین کاری منجر به بهبود جوانه زنی و رشد مناسب جوانه می گردد. پوشش گیاهی باقی مانده از محصول قبلی، آب را در اطراف بذر نگه می‌دارد و در تابستان دمای خاک را در کمتر از حد مرگ‌آور حفظ می کند. ریشه‌ها و بقایای محصول قبلی، فعالیت کرم‌های خاکی و تولید مواد پایدار کننده میکروبی را افزایش می‌دهد. چرخ‌های کم عرض تمام ادوات مورد استفاده در کف جوی‌های دائمی حرکت می‌کنند و عملیات مختلف در یک عبور انجام می شود که منجر به صرفه جویی در وقت و کاهش تراکم بستر می‌گردد. بستر آماده شده، با استفاده از آب موجود در عمق ٥ سانتی‌متری جوی بوسیله حرکت موئینگی مرطوب می شود تا تخریب دیواره های جانبی به حداقل برسد.

در قطعه ای که با سیستم تاتورا مدیریت شده است، ده محصول طی شش سال رشد کرده اند و خاک، پایدار، نفوذ پذیر و نرم باقی مانده و ویژگی های فیزیکی خاک تقریباً مطلوب (جدول ١٩) بوده است. مقدار کل برداشت محصولات چندگانه تحت سیستم تاتورا بسیار بیشتر از سیستم های سنتی که در ٣ سال متوالی بیش از ٣ محصول از آنها برداشت نشده و در پی آن حداقل ١٠ سال تحت پوشش مرتعی بوده اند، برآورد شده است.

٣-٤-٢-٦- نتیجه گیری

برخی آزمایش ها که اثرات مدیریت خاک را در محصولات و خاک‌های مختلف مقایسه نموده اند، گران و محتاج نیروی کار زیاد می باشند. مقدار برداشت محصول زیر حد بالقوه آن است و برخی نتایج بدست آمده نیز غیر قطعی‌اند که نشانگر آن است که برخی مکانیسم های حاصلخیزی اراضی هنوز به خوبی درک نشده است. تحقیقات آینده باید محدودیت های فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای نیل به محصول بیشتر در خاک (شامل خاک عمقی) را تعیین و برطرف نماید. چنین تحقیقاتی علاوه بر خاک باید شامل شناخت مشخصات فیزیولوژی محصولات زراعی نیز باشد. پس از آن، سیستم های جدید مدیریت جامع خاک باید به گونه ای توسعه یابد که ضمن حفظ ساختمان خوب خاک، به افزایش محصول منجر گردد.

٣-٤-٣- خاک‌های سخت شونده در کشورهای دیگر

از آنجا که جنبه هایی از رفتار خاک‌های سخت شونده (از جمله محدودیت رشد ریشه و دشوار بودن خاک ورزی) با انواع خاک‌های دیگر مشترک است، حصول اطمینان از آنکه خاک‌های دارای محدودیت مذکور در

برخی گزارش‌ها به راستی «سخت شونده» باشند، دشوار است. به ویژه برخی گزارش های مربوط به سله بندی، اشاره ای به وضعیت خاک سطحی زیر سله نمی کنند و اشارات آنها به ساختمان و جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی نیز در صورت فقدان اطلاعات در مورد زمان آخرین خاک ورزی و مقدار و شدت هر بارندگی واقعی، تفسیر و تعبیر نتایج را دشوار می‌سازد. حتی در مواردی که تخریب و فروریزی لایه شخم ثبت شده است، مشاهدات متعاقب آن در مورد ساختمان (یا فقدان ساختمان) و ویژگی های مقاومت خاک، غالباً فاقد جزئیات کافی است، به طوری که شناسایی قطعی خاک های سخت شونده مقدور نمی باشد. در جدول ۲۰، برخی مثال های ویژه از بعضی رفتارهای سخت شوندگی که با وضوح تعریف شده‌اند، ارائه گردیده است.

الصویفی و همکاران (۱۹۸۵) در مروری بر مدیریت خاک در مناطق نیمه خشک گرمسیری اظهار داشته اند که ثلث مساحت این مناطق شامل خاک‌های آلفی سولز تحت کشت دیم است. مشخصه خاک‌های آلفی سولز این مناطق، فقدان تکامل ساختمانی است و به‌علت دشواری کار روی خاک خشک، عملیات کشت تنها پس از شروع فصل بارانی آغاز می‌شود. درجایی که ادوات سنگین به کار رفته باشد، کلوخه‌های بزرگ و سخت ایجاد می‌گردد. آنها همچنین شاخص های ویژه ای برای رفتار سخت شوندگی برخی از این خاک های آلفی سولز ارائه نموده اند که چنین بیان شده است: «سله بندی ممکن است بلافاصله تا اعماق بیشتری از خاک سطحی گسترش یابد که نتیجه آن تحکیم یا سفت شدن[1] نیمرخ خاک، فروروبزی و سخت شدن[2] است».

درگنی (۱۹۷٦) در کتاب «خاک‌های مناطق خشک» شاخص‌های ویژه‌ای را در مورد ساختمان توده‌ای و سخت شدن در حالت خشک خاک های آلفی سولز آفریقا و سخت شدن لایه سطحی خاک‌های آلفی سولز در شمال برزیل ارائه نموده است.

در هندوستان، افزودن مواد زائد آلی شرایط فیزیکی خاک را بهبود بخشیده و لذا مقدار محصول بادام زمینی، ارزن، ذرت و سورگوم در خاک‌های سخت شونده موسوم به «چاکا» را افزایش داده است (گوپتا و همکاران، ۱۹۸٤؛ ردی و همکاران، ۱۹۸۵) در حالی که در زامبیا، زراعت فشرده و تجاری با مصرف نهاده های زیاد شامل کاربرد ساقه های خرد شده ذرت پس از برداشت نیز برای اصلاح رفتار سخت شوندگی موفقیت آمیز بوده و دستیابی به مقدار محصول ثابتی در حدود ٦ تن در هکتار را امکان پذیر ساخته است. لیکن، مناطق دیگری وجود دارند که به دلایل مختلف (سوزاندن بقایای گیاهی، چرای دام، مقدار محصول اندک) مواد آلی برگردانده شده به خاک بسیار کمتر از ۸-٦ تن در هکتار در سال است که توسط لعل (۱۹۷۸a) به عنوان حد لازم و کافی برای اصلاح ویژگی های فیزیکی خاک وکنترل فرسایش پیشنهاد شده است.

1- Consolidation
2- Slumping and Hardening

جدول ۲۰- مراجع مربوط به خاک‌های سخت شونده یا احتمالاً حاوی افق های سخت در کشورهایی به جز استرالیا.

کشور	مرجع	ملاحظات/ نام محلی
زامبیا	لنوین و پاولین (۱۹۸۸) لنوین و همکاران (۱۹۸۷) اسپااگارن (۱۹۸٦)	خاک‌های سخت شونده حداقل ۱۲٪ سطح اراضی را اشغال کرده است.
بوتسوانا	ویلکاکس (۱۹۸۱) سینکلیر (۱۹۸۵)	سطوح گسترده ای از اراضی تحت کشت با سیستم های مدیریت جاری، ظاهراً واجد ویژگی سخت شوندگی می باشند.
تانزانیا	لی (مکاتبه شخصی)	-
سنگال	شارو و نیکو (۱۹۷۱)	خاک‌های موسوم به Dek واجد ویژگی های سخت شوندگی می باشند.
گامبیا	ویلیامز (۱۹۷۱)	-
سودان	رزیق (۱۹۷۸)	خاک‌های Gardud موجود در غرب سودان.
هندوستان	گوپتا و همکاران (۱۹۸٤) ردی وهمکاران (۱۹۸۵) الصویفی و همکاران (۱۹۸۵)	خاک‌های Chalka مساحت وسیعی از ایالت اندراپرادش را اشغال نموده است. برخی خاک‌ها در رده آلفی سولز قرار دارند.
نیجریه	لی (۱۹۸۸) لی و همکاران (۱۹۸۸)	خاک‌های آلفی سولز تخریب شده در IITA، ایبادان، واجد ویژگی های سخت شوندگی شده اند.
برزیل	درگنی (۱۹۷٦)	برخی خاک‌های آلفی سولز
آمریکا	کاسل (۱۹۸۳)	خاک‌های شن لومی نورفولک (Typic Paleudult).
انگلستان	مولینز و همکاران (۱۹۸۷) یونگ (۱۹۸۷) یونگ و همکاران (۱۹۸۸)	برخی خاک‌های تخریب شده سالویک و خاک‌های سری افورد، واجد ویژگی های سخت شوندگی شده اند.

شارو و نیکو (۱۹۷۱) در خاک‌های شنی سنگال، رفتار مشخص سخت شوندگی را به صورت افزایش سریع مقدار مقاومت به فروروی با کاهش مقدار رطوبت گزارش نموده اند. در این خاک‌ها، رشد ریشه و مقدار برداشت محصول واکنش مثبتی به خاک ورزی نشان داده‌اند (نیکو و چوپارت، ۱۹۷۹). ویلیامز (۱۹۷۹) محدودیت رشد ریشه، مقدار بالای مقاومت به فروروی و جرم مخصوص ظاهری زیاد (در حدود ۱/٦ Mg/m^3) در خاک‌های غیررسوبی گامبیا را گزارش نموده است. وی متذکر شده است که تمامی خاک‌ها (در حاشیه قاره ای) ساختمان ضعیفی دارند و پایداری آنها در حالت خشک به صورت سخت یا خیلی سخت طبقه بندی می شود.

سینکلیر (۱۹۸۵) رفتار سخت شوندگی را در تعدادی از خاک‌های شنی تحت کشت بوتسوانا و چگونگی تشدید آن در اثر شخم، با فاصله زیاد پس از آغاز فصل بارانی و خیس شدن خاک، گزارش نموده است. در اینجا، تاخیر شخم به علت ضرورت بازیابی قدرت بدنی گاوهای شخم زنی با تعلیف از سبزه هایی است که بعد از باران رشد می کنند (ویلکاکس، ۱۹۸۱). ویلکاکس (۱۹۸۱) فواید مسلم شخم و تهیه بستر بذر با تراکتور پیش از شروع فصل بارانی و افزایش استفاده موثر از باران توسط گیاه را تشریح نموده است. وی همچنین اظهار داشته است که خاک‌ورزی‌ای که منجر به سست کردن اعماق بیشتری از خاک شود امکان رشد عمیق تر ریشه را نیز فراهم می نماید. در یک سال خشک با تنها ۲۳۳ میلی‌متر بارندگی، وی رابطه همبستگی معنی‌داری میان عمق خاک‌ورزی و مقدار محصول سورگوم به دست آورد. مقدار محصول در چنین شرایطی به ترتیب برابر ۰/۵ تا ۱/۵ تن در هکتار برای عمق شخم ۰/۱ تا ۰/۳ متر بوده است. جونز (۱۹۸٦) تناقضات و مشکلات اجتماعی – اقتصادی کنونی را در مسیر بهبود حاصلخیزی و معکوس کردن روند فروسایی خاک در بوتسوانا (که اقتصاد آن عمدتاً متکی بر دامپروری است) تشریح نموده است.

لنوین و پاولین (۱۹۸۸) ویژگی های فیزیکی دو خاک Paleustalfs را (در نزدیکی شهر لوزاکا) مقایسه نموده اند که تحت سیستم های مدیریت یکسان، انواع مختلف محصولات با کوددهی و در شرایط دیم و فاریاب در آنها کشت شده بود. در خاکی که به عنوان «سخت شونده» شناخته شده و در ۰/۲۵ متر بالایی خاک دارای جرم مخصوص ظاهری بیشتر از Mg/m^3 ۱/۷ بوده است، همواره مقدار محصول کمتری نسبت به خاک دیگر که جرم مخصوص ظاهری کمتر از Mg/m^3 ۱/۵ داشته، به دست آمده است. همچنین، لنوین و همکاران (۱۹۸۷) مقدار هدر رفت زیاد خاک (۸ تن در هکتار تحت کشت ذرت) و حدود ۲۰ درصد میانگین رواناب در فصل رشد را در خاک‌های سخت شونده که طی۴۰ سال گذشته تحت کشت بوده است، مشاهده نموده‌اند. پیشنهادات مدیریتی آنان شامل نرم کردن[1] خاک پس از برداشت محصول است که در پی آن خاک ورزی حفاظتی همراه با ایجاد پوشش به منظور بهبود شرایط فیزیکی خاک سطحی و کاهش رواناب و فرسایش صورت می گیرد.

لی (۱۹۸۸) و لی و همکاران (۱۹۸۸) یک خاک Oxic Paleustalf را در منطقه IITA در جنوب نیجریه مورد مطالعه قرار داده اند که پس از نابودی جنگل های بارانی با کاربرد دستگاه درخت کن / ریشه جمع کن[2] و شش سال خاک ورزی، رفتار سخت شوندگی از خود نشان داده است. جرم مخصوص ظاهری (در عمق ۰/۰٤ تا ۰/۰۸ متر) که بلافاصله پس از برداشت (اما بدون تردد ادوات چرخدار) اندازه گیری شد برابر Mg/m^3 ۱/٦ بود. لیکن، در قطعه ای که با دست جنگل تراشی شده و یک فصل ذرت در آن کشت شده بود، جرم مخصوص ظاهری

1- Loosening

2- Treepusher/root rake

از Mg/m^3 ۱/۲ تجاوز نکرد. خاکی که ٦ سال خاک ورزی شده و رفتار سخت شوندگی داشت دچار فرسایش قابل توجه و رواناب زیاد شده بود که خیس شدن نیمرخ خاک در آغاز فصل بارانی را به تاخیر می اندازد. چنین وضعیتی توام با مقاومت زیاد خاک به مفهوم آن است که کارهای مربوط به کشت گیاه (با نهال کار یا بذرکار) موفقیت آمیز نبوده وکاشت گیاه حدود دو هفته در مقایسه با قطعات کمتر فروسائیده مجاور آن، به تاخیر می افتد (لی و همکاران، ۱۹۸۸). در همین خاک، لعل (۱۹۸۵ و ۱۹۸٤a) در مقایسه با یک سیستم بدون شخم، فروسایی ویژگی‌های فیزیکی خاک (ده برابر شدن رواناب، ٤۲ برابر افزایش فرسایش، و کاهش حداکثر سرعت نفوذ به یک سوم) و کاهش مقدار برداشت محصول را پس از ٥ سال کشت ذرت (دو محصول در سال) همراه با شخم توسط گاوآهن برگرداندار معمولی و صاف کردن با دیسک، گزارش نموده است. در دوازدهمین کشت، مقدار محصول در قطعات شخم شده برابر یک تن در هکتار و در قطعات بدون شخم برابر ۳ تن در هکتار بوده است.

اثرات مفید رشد Mucuna به عنوان پوشش که بلافاصله پس از جنگل تراشی رشد می کند در مقایسه با ذرت، شامل تخلخل کل و نفوذپذیری بیشتر خاک سطحی (صفر تا ۰/۱ متر) بوده است. لیکن، تنها ۳/۸ تن در هکتار از Mucuna در قطعاتی که با دستگاه درخت کن / ریشه جمع کن جنگل تراشی شده‌اند، رشد کرده است در حالی که ۸/٥ تن در هکتار از آن در قطعات جنگل تراشی شده با دست رشد نموده، که نشان دهنده اثرات مفید کمتر در قطعات جنگل تراشی شده با ماشین می باشد (هولوگال و همکاران، ۱۹۸٦).

اندازه‌گیری‌های دیگر در همان محل روی خاک‌های مشابه اما دارای بافت شنی‌تر که تحت کشت ذرت بوده‌اند (خاک لومی شنی در مقایسه با خاک لوم رسی شنی که توسط لی مورد مطالعه قرار گرفته است) به طور کلی تفاوت قابل توجهی در مقدار محصول را بین تیمار بدون شخم همراه با پوشش با تیمارهای خاک ورزی مختلف نشان داده است. لیکن، مقدار ذخیره رطوبت در تیمار بدون شخم بیشتر بوده ومقدار محصول متناسب با افزایش شدت خاک ورزی ماشینی کاهش یافته است (لعل، ۱۹۸٦).

آدئوی (۱۹۸٦) نیز افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی (۳۰-۰ و ۷۰-۳۰ میلی متر) در یک خاک شن لومی نرم (Typic Paleustalf) را پس از یک بارندگی سنگین در منطقه سامارو در شمال نیجریه، مشاهده نموده است. دو هفته پس از دیسک زدن تا عمق ۰/۱ متر، جرم مخصوص ظاهری در ۳ تیمار برابر Mg/m^3 ۱/۱٥-۱/۲۰ بود. در طول ۱٤ هفته بعدی، جرم مخصوص ظاهری به تدریج تا Mg/m^3 ۱/۳ در تیمار پوشش‌دار افزایش یافته اما در تیمار عاری از پوشش به Mg/m^3 ۱/٥-۱/٦ نیز رسید. در طول این دوره، ۲۱ بارندگی بیشتر از ۲۰ میلی‌متر با انرژی بزرگتر از ٦۰۰ ژول بر متر مربع رخ داد. حتی در تیماری که در فواصل دو هفته‌ای شخم شده، جرم مخصوص ظاهری تا Mg/m^3 ۱/٤-۱/٥ افزایش یافت. این نتایج به وضوح سودمندی پوشش سطحی را ثابت می

کند اگر چه ویژگی های مقاومت خاک به علت مقدار کم سیلت و رس موید آن است که خاک‌های مورد آزمایش در مرز شرایط سخت شوندگی قرار داشته اند (لی و همکاران، ۱۹۸۸). همچنین طبق یافته‌های آیک (۱۹۸٦) تفاوت اندکی در مقدار برداشت محصول میان تیمارهای بدون شخم و شخم شده در این محل وجود داشته است.

کاسل (۱۹۸۳) مطالعه دقیقی را درباره رفتار یک خاک شن لومی نورفولک (Typical Paleudult) در دشت های ساحلی اقیانوس اطلس در آمریکا انجام داده است. این خاک، یک ماه پیش از کاشت تا عمق ۰/۲۵ متری با گاوآهن برگرداندار شخم شده و سپس سه مرتبه بلافاصله پیش از کاشت محصول ردیفی (نوعی لوبیا) دیسک زده شد. جرم مخصوص ظاهری در ناحیه دیسک خورده (صفر تا ۰/۱٤ متر) و عمق شخم (پایین تر از عمق شخم ثانویه در ۰/۱٤ تا ۰/۲۸ متر) اندازه گیری شده است. جرم مخصوص ظاهری لایه بالایی در ۳ هفته اول پس از کاشت با ۱۳ درصد افزایش به Mg/m^3 ۱/٦۳ رسید. این فروریزی به وقوع دو بارندگی ۲٦ و ۳۹ میلی متری نسبت داده شده است. این نظریه مستند به مشاهداتی است که نشانگر فرو ریختن ستون هایی از خاک دست نخورده در اثر وزن خود آنها، پس از خیس کردن برای تعیین ویژگی های آبدهی[1] می باشد.

در ناحیه شخم و زیر عمق خاک ورزی ثانویه، جرم مخصوص ظاهری Mg/m^3 ۱/۷۳ بوده که در دوره هفت هفته‌ای پس از دیسک زدن، افزایش معنا داری نیافت. چنین جرم مخصوص زیادی امکان ندارد که پس از شخم به وجود آید مگر آنکه خاک ناپایدار بوده و در حین شخم فرو ریخته باشد. دو احتمال دیگر آن است که بارندگی پیش از عملیات دیسک زدن سبب فروریزی خاک شده و یا در اثر حرکت چرخ تراکتور درحین دیسک زدن و کاشت، خاک متراکم شده باشد. توجیه اخیر توسط کاسل (۱۹۸۳) ارائه شده است، اگر چه مقادیر زیاد جرم مخصوص در محل عبور چرخ‌ها در دوبار دیسک زدن و کاشت (که همگی آنها محدود به مسیرهای مشابه هستند) به طور معنی داری از ردیف های کشت یا فواصل میان ردیف ها که تراکتور از روی آن عبور نکرده، بیشتر نبود. بنابراین، فروریزی لایه شخم به احتمال زیاد به تراکم خاک کمک کرده است.

علیرغم وجود مقدار کم سیلت و رس (به ترتیب ۱۱٤ و ۳٦ گرم در کیلوگرم)، این خاک در عمق ۰/۲۸-۰/۱٤ متر و هفت هفته پس از کاشت (که پتانسیل ماتریک در عمق ۰/۲ متری در حدود ٦۰ KPa- بوده) دارای مقاومت به فروروی معادل ۱٤/٤ MPa بود، در حالیکه پتانسیل ماتریک در عمق ۰/۲ متری به حدود ۱۰۰KPa- می رسید. از آنجا که خاک تقریباً فاقد ساختمان گزارش شده است، احتمالاً تا پیش از رسیدن به نقطه پژمردگی گیاه، در مقابل رشد ریشه نفوذناپذیر می شود و لذا به عنوان خاک سخت شونده طبقه بندی می گردد. محدودیت رشد ریشه در

1- Water-release

این خاک به عنوان مشکلی مرتبط با وجود کفه شخم شناخته می شود اما نتایج به دست آمده کاسل (۱۹۸۳) به وضوح نشانگر آن است که احتمالاً ناحیه شخم، خود یکی از مشکلات موجود است.

مقایسه دو خاک لوم شنی مالی سولز در انگلستان توسط یونگ و همکاران (۱۹۸۸) ارائه شده که قبلا به تفصیل به آن اشاره گردید. نکته قابل توجه آن است که ویژگی های مقاومت این خاک‌ها در هر پتانسیل معین از بدترین حالت خاک IITA (لی و همکاران، ۱۹۸۸) یا هر یک از خاک‌های سخت شونده استرالیا که توسط مولینز ومک لئود (نتایج منتشر نشده، ۱۹۸٤) مورد مطالعه قرار گرفته اند، بیشتر است. لیکن، در شرایط انگلستان با وجود بارندگی متناوب اما کم شدت پیش از فصل رشد و درحین آن، محدودیت های زراعی که می تواند تحت شرایط اقلیمی نامطلوب اثر منفی قاطع داشته باشد، تاثیر قابل توجه اما نسبتاً کمتری بر مدیریت مزرعه و مقدار محصول بر جای می گذارند.

۳-٤-٤- اثر جانوران موجود در خاک

لعل (۱۹۸۷b) مرور جامعی بر وضعیت جانوران موجود در خاک‌های مناطق حاره، تاثیرشان بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و ارتباط آنها با مدیریت خاک ارائه نموده است. این بخش شامل قسمت های جداگانه در مورد کرم های خاکی، موریانه ها ومورچه هاست و به جز مواردی که مرجع آن ذکر شده، قسمت‌های مختلف مرور جامع لعل که مرتبط با ویژگی های فیزیکی خاک های سخت شونده می‌باشد، در آن خلاصه شده است.

۳-٤-٤-۱- کرم های خاکی

سه نوع کرم خاکی وجود دارد: آشغال زی[1] ، خاکزی و آشغال خوار[2] ، خاکزی و هوموس‌خوار[3] . همه گونه-های کرم خاکی نقب[4] نمی زنند یا خاکدانه های کروی[5] نمی سازند اما توجه عمده در تحقیقات خاک متمرکز بر آنهایی است که چنین می کنند. ساخت نقب، هم با فشردن خاک به اطراف و هم با بلعیدن خاک صورت می گیرد و سپس خاکدانه های کروی به خارج از سطح خاک یا در خلل و فرج درشت خاک دفع می شوند. خاکدانه های کروی حاصل اختلاط کامل خاک، مواد آلی، فضولات دفع شده از بدن کرم خاکی و میکروارگانیسم ها می‌باشد و لذا نسبت به خاک اطراف خود از نظر مواد آلی و عناصر غذایی غنی تر بوده و دارای پایداری ساختمانی بیشتری

1- Litter-dwelling
2- Soil-dwelling and Litter-feeding
3- Soil-dwelling and Humus-feeding
4- Burrow
5- Cast

می باشد. این خاکدانه های کروی حاوی ذرات بزرگتر از حد قابل بلع (تقریباً ۰/۱ میلیمتر) بوده و غالباً مقدار سیلت آنها بیشتر از خاک اطراف است. خاک موجود در خاکدانه های کروی ممکن است از عمق ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر یا بیشتر آورده شود و لذا این عمل، در هر سال ضخامت بیش از ٤۰mm از خاک عمقی را به سطح می آورد. مقادیر حدود ٤ mm در سال معمولاً در خاک های حاوی جمعیت قابل قبول کرم خاکی مشاهده شده است. در صورتی که این خاک از لایه ای به ضخامت ۱۰۰mm برداشته شود، می‌تواند نمایانگر کاهش سالانه ٤ درصد از جرم مخصوص ظاهری محسوب گردد.

در اثر ساخته شدن خاکدانه های کروی، جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی پیوسته کاهش می‌یابد، زبری سطح افزایش یافته و مجاری قائم عمیقی ایجاد می گردد که توسط مایعات بدن کرم‌ها پوشش داده شده است (اگر چه چنین مجاری ای تنها توسط معدودی از گونه های کرم خاکی ایجاد می‌شود). برخی نویسندگان، افزایش سرعت نفوذ ناشی از وجود این مجاری را در خاک‌های مناطق حاره و معتدله مشاهده نموده اند. تمامی این اثرات لزوماً در اصلاح رفتار سخت شوندگی اهمیت قابل توجه دارند. افزون بر این، به علت آنکه خاک‌های اسیدی برای کرم های خاکی مناسب نیست، خاک های آلفی سولز سخت شونده نسبت به بقیه خاک‌ها که اسیدی تر بوده و در نواحی حاره وجود دارند می بایست محیط مناسب تری برای زندگی کرم‌ها فراهم کند.

خاک ورزی می تواند به واسطه صدمه زدن مکانیکی (جسمی)، در معرض قرار دادن کرمها برای پرندگان و شکارچی ها، کاهش تامین غذا (در جایی که بقایای گیاهی برداشت شده یا سوزانده می شوند) و تغییر حد بالایی و پایینی رژیم دمایی و رطوبتی در خاک نزدیک به سطح، جمعیت کرم های خاکی را به شدت کاهش دهد. بالعکس، زراعت بدون شخم همراه با نگهداری کاه و کلش و یا استفاده از پوشش یا کود حیوانی و قرار دادن علوفه یا بقولات در تناوب کشت، بر جمعیت و فعالیت کرم‌ها می‌افزاید. لیکن، برخی مواد شیمیایی مورد استفاده در کشاورزی ممکن است اثر مهمی بر جمعیت کرم‌های خاکی بر جای بگذارد. به ویژه، حشره کش کاربامات و قارچ کش بنومیل هر دو برای کرم های خاکی سمی هستند.

بلاک ول (۱۹۸۸) پایداری کانال های مدور قائم با قطر بزرگتر از ۲mm را تحت بار تک محوری ٤۰۰KPa گزارش نموده است. برخی گزارش‌ها نیز موید وجود و باقی ماندن سرعت زیاد نفوذ آب در خاک‌های زراعی بدون شخم به عنوان نتیجه دیرپای کانال‌های کرم خاکی بوده، اما در عین حال جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی در چنین خاک‌هایی در مقایسه با خاک‌هایی که به تازگی شخم خورده‌اند، بیشتر است. بنابراین، اشاره نکردن به وجود یا فقدان کرم های خاکی در برخی منابع که به اثرات مفید زراعت بدون شخم بر ویژگی های فیزیکی خاک پرداخته اند، شگفت انگیز است.

از آنجایی که کرم ها ممکن است علت عمده اصلاح خاک‌های سخت شونده با مدیریت بدون شخم باشند، فقدان دوراندیشی در کاربرد آفت کش ها ممکن است کرم ها را نابود کند. عوامل موثر بر جمعیت کرم های خاکی و اثر آنها بر رفتار سخت شوندگی، شایسته انجام مطالعات بیشتر است.

۳-٤-٤-۲- موریانه ها

موریانه ها در دو سوم سطح اراضی زمین دیده شده اند. در حال حاضر حدود ۲۰۰۰ گونه موریانه شناسایی شده است که ٦۰۰ گونه آنها در آفریقا ثبت شده است. برخی گونه ها می توانند در جاهای مشابه زندگی کنند و لذا برای غذا در رقابت هستند. درجایی که پوشش طبیعی به منظور زراعت از بین رفته است، توازن گونه ها و جمعیت آنها تغییر می کند. لانه برخی موریانه ها شامل راهروهایی در چوب و خاک است، در حالیکه لانه برخی دیگر از آنها مجموعه ای از گنبدهای گلی کوچک در رو و زیر زمین می باشد که ممکن است از چند سانتی متر تا ۱۹ متر ارتفاع داشته و محیط پایه آن تا ۳۰ متر برسد. سرعت جابجایی خاک بر اثر فعالیت موریانه ها در حدود ۰/۰۱ تا ۰/۵ میلی متر در سال است اما غالباً مقدار آن کمتر از ۰/۱ میلی متر در سال گزارش شده است. بنابراین، پس از گذشت صدها یا هزارها سال، موریانه‌ها مانند کرم های خاکی می توانند عامل موثر مهمی در شکل دادن نیمرخ خاک باشند.

گنبدهای گلی موریانه‌ها از دانه‌های شنی ساخته شده که موریانه ها آنها را به دهان گرفته و جابجا کرده‌اند و با استفاده از مواد بلعیده شده ریزتر (عمدتاً در حدود اندازه رس) که بعداً در بدنه گنبد دفع شده، به هم چسبیده است. در اغلب خاک‌ها به ویژه آنها که بافت شنی تر دارند، مقدار رس بیشتری در گنبدها وجود دارد و متقابلاً مقدار قلوه سنگ و ماسه در خاک زیر آن بیشتر است. در اغلب گنبدها نسبت رس به ماسه بیشتر از خاک اطراف آن است. رس مورد استفاده از مسافت های بسیار دور از لانه یا از خاک عمقی فراهم می شود. گنبدهای متروک موریانه‌ها در معرض فرسایش هستند که اولین اثر آن، شستشوی رس از سطوح بیرونی گنبدهاست. بنابر این، اثرات کلی فعالیت موریانه ها بر چرخه رس (و سیلت) اعمال می شود که در عمق خاک انباشته می شود. همچنین، موریانه‌ها مسئول قسمت عمده ای از عدم یکنواختی در بافت خاک سطحی که مشخصه برخی خاک‌های مناطق حاره است، می باشند.

بافت خاک ویژگی مهمی برای ساخت گنبدهای گلی توسط موریانه هاست و از این جهت، خاک‌های شنی که حاوی مقادیر اندکی سیلت یا رس هستند و همچنین خاک‌های با پتانسیل انقباض – انبساط بالا مانند خاک‌های ورتیسولز برای این کار مناسب نیستند. در واقع، اغلب خاک‌های سخت شونده دارای بافت ایده آلی برای ساخت

گنبدهای گلی موریانه ها می باشند، زیرا سطح خارجی سخت گنبدها عمداً از مواد سخت شونده ساخته شده است و علت احتمالی استحکام آن نیز همین است. گاهی پیوندهای حاصل از مواد آلی مسئول استحکام زیاد گنبدهای گلی موریانه ها به شماره آمده است، اگر چه لایه خارجی یا پوسته گنبد معمولاً نسبت به قسمت های دیگر و خاک اطراف آن حاوی مواد آلی کمتری می باشد. لی (داده‌های چاپ نشده، ۱۹۸۷) مقاومت فشاری نمونه‌های دست نخورده با رطوبت تعادلی ۱۰۰- کیلو پاسکال را از قسمت‌های بیرونی یک گنبد موریانه‌ای از منطقه موکوا در نیجریه اندازه گیری نموده است. مقاومت اندک نمونه های اشباع گنبد با مقاومت خاک سخت شونده دارای توزیع اندازه ذرات مشابه قابل مقایسه بوده که نشانگر آن است که این نوع از گنبدها به واسطه نوع ساختمان خود، واقعاً موادی سخت شونده هستند، و احتمالاً توسط مواد آلی محکم نشده اند.

لایه خارجی گنبدهای موریانه ای بسیار فشرده است و لذا نفوذ ناپذیر و فاقد خلل و فرج درشت می‌باشد. جرم مخصوص ظاهری گنبدها معمولاً زیاد و بزرگتر از خاک اطراف آن است. راهروهای زیرزمینی تا ۵۰ متر گسترش یافته و تا ۱۵ متر عمق دارند. در لانه غیر متروک، این راهروها که مستقیماً به سطح خاک متصل نیستند برای جلوگیری از آب ماندگی طراحی شده است، اما در گنبدهای متروک که هوازده شده اند، این راهروها ممکن است به سطح خاک متصل شده و نفوذپذیری را بهبود بخشند. طبقه بندی تمایزهای موجود میان ویژگی های فیزیکی و شیمیایی گنبدهای متروک و خاک اطراف آن امکان پذیر نیست. در اغلب مناطق، شرایط گنبدهای متروک برای رشد گیاه مساعد است اما نمونه های مغایر با آن نیز وجود دارد. برای مثال، ویلیامز (۱۹۷۹) در گامبیا گنبدهای متروک قدیمی را یافت که نفوذپذیری سطحی و نفوذ عمقی آنها بسیار کاهش یافته بود اما هنگامی که سطح گنبد از حالت محدب به مقعر تبدیل شده، با جمع شدن آب، پوشش گیاهی انبوهی به وجود آورده است.

موریانه‌ها به گونه‌های درختی و محصولات بومی حمله نمی کنند، ولی گیاهان غیربومی و جدید به طور خاص در معرض حمله موریانه ها قرار می گیرند. اثرات بالقوه زیان آور دیگر شامل نابودی پوشش گیاهی محلی، تثبیت عناصر غذایی، و تشدید فرسایش خاک می‌گردد. اثرات احتمالاً مفید نیز شامل جابجایی خاک عمقی و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، تجزیه ضایعات، بهبود تخلخل خاک، و اصلاح توزیع اندازه خاکدانه ها در عمق نیمرخ خاک می‌باشد.

از آنجا که لانه سازی موریانه ها در خاک‌های سخت شونده به خوبی انجام می شود و تغییر توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک سطحی و اثرات آن بر پایداری خاکدانه‌ها احتمالاً اثر قابل توجه بر رفتار سخت شوندگی دارد، می توان گفت که موریانه ها بسته به گونه موریانه، نوع خاک، اقلیم و پوشش گیاهی ممکن است اثر ویژه مفید یا مضر قابل توجهی بر خاک‌های در معرض سخت شدن داشته باشند. مطالعه اثرات فعالیت موریانه ها در رابطه با

ویژگی سخت شوندگی، و جنبه هایی از مدیریت خاک مرتبط با فعالیت موریانه ها، مستلزم داشتن دیدگاهی برای شناسایی و یافتن مزایای اثرات مفید و به حداقل رساندن اثرات نامطلوب آن می باشد.

۳-٤-٤-۳- مورچه ها

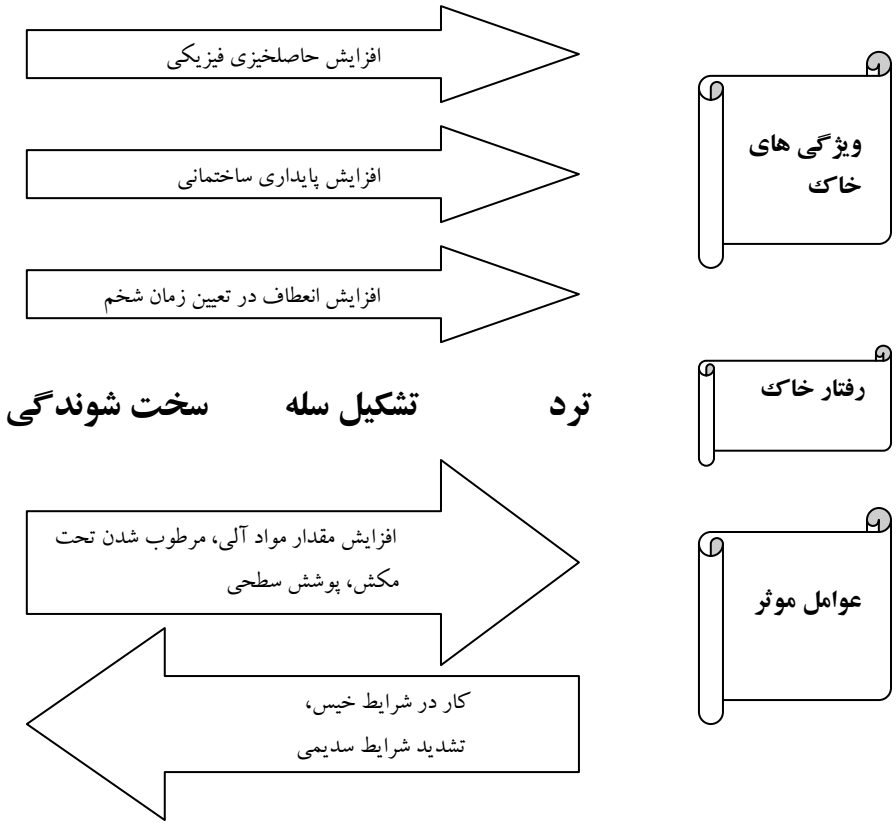
تنوع و تراکم جمعیت مورچه‌ها از جنگل‌های مرطوب تا بیابان‌های ساوانا کاهش می‌یابد. برخی گونه‌ها در درختان لانه می‌سازند؛ گونه های دیگر لانه های تپه ای یا گنبدی می سازند یا خاک برداری می کنند؛ و بعضی گونه های دیگر شبکه ای از تونل ها و اتاقک های متصل بهم احداث می نمایند. اثر ویژه فعالیت مورچه ها جابجایی و مخلوط کردن خاک است اما اطلاعات موجود برای اظهار نظر قاطع در مورد اهمیت این جابجایی (به عنوان منبع مواد لانه) و ویژگی های فیزیکی و تغذیه ای آن ناکافی است. درمقایسه با لانه موریانه ها، تفاوت اندکی میان توزیع اندازه خاکدانه ها در لانه مورچگان با خاک اطراف آن وجود دارد و به نظر می‌رسد که مورچه‌ها نسبت به کرم های خاکی یا موریانه‌ها اثر بسیار کمتری بر ویژگی‌های خاک بر جای می‌گذارند. لیکن مشاهدات نایز (Nye's, 1955) در نیجریه و در جایی که تعدادی کرم خاکی نیز وجود داشته، نشانگر آن است که لایه سطحی خاک که توسط مورچه ها تشکیل شده ممکن است اثر مهمی بر ویژگی‌های سطحی خاک‌های سخت شونده داشته باشد. به دست آوردن داده‌های کمّی تر در مورد اثر مورچه‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و تاثیر سیستم های مختلف مدیریت بر تنوع و جمعیت مورچه ها بسیار ضروری است.

۳-٥-٤- نتیجه گیری

از آنجایی که وقوع و شدت شرایط سخت شوندگی به سیستم مدیریت، نوع خاک، اقلیم، توالی وقوع بارندگی پیش از و در حین دوره رشد بستگی دارد، دستورالعمل یگانه ای برای مدیریت موفق در تمام موقعیت ها وجود ندارد. لیکن، در مرحله نخست باید جنبه هایی از شرایط سخت شوندگی که مشکل سازند تعیین شده و آنهائی که در سیستم مدیریت فعلی بطور مشخص وجود دارند شناسائی گردد. در جائی که فرسایش و رواناب مشکلی جدی ایجاد کرده، اقدام اصلاحی دیر شده است اما در حال حاضر برخی راه حل‌های مناسب توسط برخی نویسندگان (از جمله لعل، ۱۹۸٤) بررسی شده است.

در مورد فواید خاک ورزی در خاک‌های سخت شونده اظهار نظرهای متفاوتی وجود دارد زیرا چنین خاک هایی از نظر شرایط نفوذپذیری یا رشد ریشه نا مطلوب هستند و لذا به سست کردن خاک واکنش مثبتی نشان می دهند، در حالی که خاک‌های دیگر ممکن است از خاک ورزی آسیب ببینند. مشکل خاک های سخت شونده، حتی

در غیاب تراکم ناشی از تردد، نه حصول تخلخل کافی بلکه چگونگی حفظ تخلخل خاک است. شکل ۲۸ عوامل مختلف مورد بحث را نشان می دهد.



شکل ۲۸- عوامل موثر بر گرایش خاک به سخت شوندگی و اصلاح آن [مولینز و همکاران، ۱۹۸۷].

در صورت فقدان شرایط سدیمی، ساده‌ترین روش اصلاح مستلزم افزایش یا تشکیل بیشتر مواد آلی (یا جلوگیری از نابودی آن) می باشد. واضح است که به جز عملیات ضروری سست کردن خاک و کنترل علف‌های هرز، خاک‌ورزی باید به علت اثرات منفی آن بر قابلیت تجزیه مواد آلی، فروریزی و پراکنش خاک، و جمعیت کرم-های خاکی؛ تا حداقل ممکن کاهش یافته و زمان آن به دقت کنترل گردد. راه‌های نو که شامل شخم همراه با افزودن مواد آلی به قسمت‌های محدودی از سطح خاک که در مجاورت گیاه هستند، حتی در جایی که بقایای آلی، به مقدار کم وجود دارد، مستعد رفع مشکلات سخت شوندگی می باشند.

۳-۵- اولویت های پژوهشی

۳-۵-۱- شناسایی مشکل

شناسایی خاک‌های سخت شونده به عنوان شرایط فیزیکی ویژه خاک و متمایز نمودن آنها از خاک‌های با سله سطحی ضرورت فوری دارد. مشابه پدیده سله‌بندی، شرایط سخت شوندگی باید به وضوح و بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای رفتار یک خاک معین تحت یک کشت مشخص و سیستم مدیریت معلوم و بدون توجه به طبقه‌بندی انجام شده برای آن خاک تعریف گردد. در این زمینه، سیستم های موجود رده بندی خاک تا آن حد مورد استفاده قرار می گیرند که نشان دهند یک خاک در وضعیت طبیعی خود «سخت شونده» است یا پس از خاک ورزی در معرض شرایط سخت شوندگی قرار گرفته است. روشن کردن تعریف سخت شوندگی ضروری است به گونه ای که با اطمینان، توسط کشاورزان، مروجان و متخصصان زراعت به کار رود. همچنین، مقیاس ساده ای برای نشان دادن درجه سختی مورد نیاز است (به بخش ۳-۳-۳-۲- مراجعه شود).

۳-۵-۲- ضرورت یک روش تشخیصی

به علت تنوع گسترده در شرایط فیزیکی مرتبط با شرایط سخت شوندگی که بالقوه محدود کننده اند، استفاده از یک روش تشخیصی برای شناسایی مشکلات فیزیکی ویژه‌ای که مانع مدیریت و رشد گیاه در هر وضعیت معین می گردد، ضروری است. مشکلات مربوط به افق های زیر سطحی (مانند رفتار یک افق رسی سدیمی یا محدودیت های ریشه در اثر سمیت آلومینیوم در خاک اسیدی) نیز در چنین روشی در نظر گرفته می شود.

روش تشخیصی به‌ویژه برای خاک‌های سخت شونده، ضرورت دارد زیرا انجام آزمایش‌های مربوط به مقایسه سیستم‌های کشت / مدیریت مختلف و ارائه توصیه‌های موثق، گران و مستلزم اجرا در چندین سال می باشد. همچنین، این آزمایش‌ها غالباً نتیجه قطعی نمی دهند؛ به ویژه در مورد خاک‌های سخت شونده ای که بسته به زمان، مقدار و شدت بارندگی پس از کاشت، ممکن است جنبه های مختلفی از مشکل در آنها ظاهر گردد. برای مثال، پایش منظم شرایط فیزیکی خاک در رابطه با رشد یک محصول زراعی می تواند مستنداتی از مشکلات مربوط به شرایط سخت شوندگی (مانند عمق محدود خیس شدن نیمرخ خاک و استقرار کُند گیاه) را فراهم نماید که معمولاً برای سال‌هایی که ضمن بارندگی خوب پس از استقرار گیاه، کاهش محصول دیده شده، معتبر نخواهد بود. از جمله روش هایی که تکمیل و آزمون آنها سودمند است، مدل های برآورد جرم مخصوص ظاهری، تخلخل درشت (گیبز و رید، ۱۹۸۸) و ویژگی های مقاومت می باشد. چنین مدل هایی ممکن است در ابتدا کاملاً نامناسب به نظر برسند اما این خود ممکن است به ارزیابی مجدد اثر عوامل مختلف که تعیین کننده ویژگی های فیزیکی خاک اند منجر شود و فهم بهتری از چگونگی کاربری مناسب خاک را بدست دهد.

۳-۵-۳- سیستم های مدیریت خاک

الف) تحقیق روی خاک‌های سخت شونده در مناطق گرم و خشک به ویژه در جایی که افزودن مقدار زیاد مواد آلی تازه برای اصلاح شرایط سخت شوندگی امکان پذیر نیست و کرم های خاکی برای بهبود نفوذپذیری وجود ندارد، ضروری است. راه های جدید اصلاح خاک، به ویژه سیستم های مدیریت جامع که در آن برای پایدار ساختن و حفظ یک ناحیه اصلاح شده تنها در قسمتی از خاک عملیاتی انجام می شود، شایان توجه بیشتری است. این سیستم‌ها شامل کاربرد موضعی بقایای آلی در مساحت محدودی از خاک سطحی، ایجاد بسترهای دائمی، و شیار زدن خاک[1] می‌گردد (بلاک ول، ۱۹۸۸). مخلوط کردن خاک نیز مورد توجه قرار گرفته است اما پیش از ترویج روش، فهم مبانی فیزیکی و شیمیایی آن ضرورت دارد. همچنین، سیستم های مدیریت اصلاح شده باید در صورت لزوم پیوسته بوده و با یک طرح شامل کنترل رواناب و فرسایش (مانند کشت روی خطوط تراز و احداث کانال های انتقال رواناب) توام باشد.

ب) در شرایط مرطوب‌تر و در جایی که نگهداری مقادیر بالایی از مواد آلی خاک برای اصلاح شرایط سخت شوندگی امکان‌پذیر است؛ طیف وسیعی از عملیات مدیریتی انجام‌پذیر می‌باشد. لیکن، در صورت کاربری متمرکز اراضی (مانند وقتی که مناطق جدیدی برای اولین بار تحت کشت مکانیزه قرار گرفته اند) احتمال بهبود و بازگشت خاک به وضعیت مطلوب، تنها می‌تواند متکی بر حدس و گمان باشد. از آنجایی که پیشرفت مراحل ابتدایی فروسایی ویژگی‌های فیزیکی خاک ممکن است کُند و نتایج آن غافلگیر کننده باشد، اجرای آزمایش‌های دراز مدت پایش مقدار محصول و تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک، ضرورت دارد. همچنین، ابداع آزمایش ها و دستورالعمل هایی برای پیشگیری از ناپایداری هر سیستم، ضروری است.

ج) اگر چه کشاورزی مکانیزه به سرعت مستعد ایجاد فروسایی مشهود خاک می باشد اما شرایط سخت شوندگی می‌تواند بدون کاربرد ماشین های کشاورزی و در اثر مدیریت نادرست نیز ایجاد گردد. بنابراین، آگاهی وسیع‌تر از جنبه‌های نامناسب سیستم‌های مدیریت که شامل خاک‌ورزی های مکرر یا کار روی خاک خیس و حفظ نکردن مواد آلی خاک می‌شود، ضرورت دارد. اثرات سیستم‌های مدیریت بر جمعیت و فعالیت جانوران خاک، به‌ویژه کرم‌های خاکی و موریانه‌ها و اثر فعالیت جانوران بر نفوذپذیری و شرایط سخت شوندگی شایان توجه بیشتری می باشد. در کشورهایی که زمین سودآور است و شرایط سخت شوندگی چنان زمین را می فرساید که از حیز انتفاع خارج می شود، ممکن است مشکل اراضی، بیشتر به عملکرد نامناسب سیستم اجتماعی – اقتصادی مربوط باشد تا فقدان سیستم های مدیریت جایگزین پایدار، و لذا راه حل در عرصه اجتماعی و سیاسی قرار می‌گیرد؛ اما در عین حال ضرورت شناسایی خاک‌های سخت شونده یا مستعد سخت شدن، همچنان وجود دارد.

1- Soil slotting

د) مدیریت خاک‌های سخت شونده برای سیستم‌های تولید فشرده فاریاب با چالش علمی بزرگی مواجه است. سیستم موفق تاتورا (بخش ۳-٤-۲-۵-) مجموعه ای از راه‌حل‌های ممکن را که در هر جای دیگر نیز می تواند به کار رود، ارائه نموده است. طراحی این سیستم بر مبنای روش تشخیص تحلیلی بوده است که مثالی را در مقابل مدل فراهم کرده وسعی در سازگار نمودن یا تغییر سیستم‌های نامناسب مدیریت آبیاری در خاک‌های سخت شونده می نماید.

ه) دانستن اینکه شرایط سدیمی خاک، عامل اصلی در رفتار سخت شوندگی است یا نه، ضرورت دارد. الگوی ارائه شده توسط رنگاسامی و همکاران (۱۹۸٤) راهنمای مناسبی را برای تصمیم گیری در مورد لزوم کاربرد گچ برای کاهش پراکنش رس فراهم می نماید.

۳-۵-٤- تحقیقات راهبردی

در بسیاری از مناطق، دسترسی محدود به علف‌کش‌های موثر و ماشین‌های ویژه، نوعی از شخم خاک سطحی برای کنترل علف‌های هرز را ضروری ساخته است. حتی در شرایط کشت مستقیم یا کاشت جب[1] ، خاک دست نخورده اطراف بذر می بایست محیط فیزیکی مناسبی را برای رشد بذر فراهم کند. بنابراین، تحقیقات بیشتر در مورد فرایند سخت شوندگی (شامل مراحل فروریزی ساختمانی، خرد شدن خاکدانه‌ها و افزایش مقاومت) ضروری است تا بتوان مراحلی را شناسایی کرد که با دخالت در آنها، تغییر مقاومت خاک یا بهبود و تکامل ساختمان آن با سهولت بیشتری مقدور است.

1- Jab planting

مراجع

Abbott, I., C.A. Parker, and I.D. Sills. 1979. Changes in the abundance of large soil animals and physical properties of soil following cultivation. Aust. J. Soil Res.17:343-353.

Adem, H.H. , and J .M. Tisdall. 1984. Management of tillage and crop residues for double-cropping in fragile soils of south-eastern Australia. Soil Tillage Res. 4:577-589.

Adeoye, K.B. 1986. Physical changes induced by rainfall in the surface layer of an Alfisol, northern Nigeria. Geoderma 39: 59-66.

Agassi, M., I. Shainberg, and J. Morin. 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:848-851.

Amdt, W. 1985. Factors affecting the nature and impedance of soil surface seals at Katherine, N.T. CSIRO Aust. Div. Soils Div. Rept. No.79.

Arora, H.S., and N. T. Coleman. 1979. The influence of electrolyte concentration on flocculation of clay suspensions. Soil Sci. 127: 134-139.

Aston, A.R. , and R.A. Fischer. 1986. The effect of conventional cultivation, direct drilling and crop residues on soil temperatures during the early growth of wheat at Murrumbateman, New South Wales. Aust. J. Soil Res. 24: 49-60.

Aylmore, L.A.G., and I.D. Sills. 1982. Characterization of soil structure and stability using modulus of rupture-exchangeable sodium percentage relationships. Aust. J. Soil Res. 20:213-224.

Bakker, A.C., and W. W. Emerson. 1973. The comparative effects of exchangeable calcium, magnesium, and sodium on some physical properties of red-brown earth subsoils. III. The permeability of Shepparton soil and comparison of methods. Aust. J. Soil Res. 11: 159-165.

Bakker, A.C., W. W. Emerson, and J.M. Oades. 1973.1;he comparative effects of exchangeable calcium, magnesium, and sodium on some physical properties of red-brown earth subsoils. I. Exchange reactions and water contents for dispersion of Shepparton soil. Aust. J. Soil Res. 11: 143-150.

Barley, K.P. 1959. The influence of earthworms on soil fertility: I. Earthworm populations found in agricultural land near Adelaide. Aust. J. Agric. Res. 10:171-178.

Barley, K.P., and C.R. Kleinig. 1964. The occupation of newly irrigated lands by earthworms. Aust. J. Sci. 26:290-291.

Blackmore, A. V. 1976. Salt sieving within soil clay aggregates. Aust. J. Soil Res. 11:149-158.

Blackwell, P .S. 1988. The influence of soil geometry on soil compaction under wheels. Proc. 11th Int. Soil Tillage Res. Organization Conf, Edinburgh 1 :203-208.

Blackwell, P.S., A. Cass, and S. Gusli. 1988. Personal communication.

Boone, F.R. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop
responses to tillage and traffic Soil Tillage Res. 11: 283-324.

Braunack, M. V. , and A.R. Dexter. 1988. The effect of aggregate size in the seedbed on surface crusting and growth and yield of wheat (Triticum aestivum L. cv. Halberd) under dryland conditions. Soil Tillage Res. 11: 133-145.

Braunack, M.V., J.S. Hewitt, andA.R. Dexter. 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. J. Soil Sci. 30: 653-667.
Burch, G.J., I.B. Mason, R.A. Fischer, and I.D. Moore. 1986. Tillage effects on soils: Physical and hydraulic responses to direct drilling at Lockhart, N.S. W. Aust. J. Soil Res. 24: 377-391.

Cassel, D.K. 1983. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 196-201.

Chan, K. Y. 1989. Friability of a hardsetting soil under different tillage and land use practices. Soil Tillage Res. 13, 287-298.

Chan, K.Y., and J.A. Mead. 1989. Surface physical properties of a hardsetting sandy loam under different tillage practices. Aust. J. Soil Res. (accepted for publication).

Chan, K.Y., J.A. Mead, and W.P. Roberts. 1987. Poor early growth of wheat under direct drilling. Aust. J. Agric. Res. 38: 791-800.

Chandler, H. W., and J. V. Staffofd. 1987. A simple field test for predicting ease of cultivation. Soil Tillage Res. 10:269-275.

Charreau, C., and R. Nicou. 1971. L'amelioration du profile cultural dans les sols sableux et able-argileux de la zone tropicale seche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. L Agronomie Tropicale, Paris 26: 209-255.

Chartres, C.J. , R.S. Greene, G .W. Ford, and P. Rengasamy. 1985. The effects of gypsum on macroporosity and crusting of two red duplex soils. Aust. J. Soil Res. 23:467-479.

Childs, E.C. 1940. The use of soil moisture characteristics in soil studies. Soil Sci. 50:239-252.

Childs, E.C. 1942. Sability of clay soils. Soil Sci. 53: 79-92.

Childs, E.C. 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. Wiley, London.

Childs, E.C., and E.G. Youngs. 1958. The use of soil moisture characteristics in assessing the soil stability of opencast coal sites. Medelingen Landbouwhogesch staat gent. 24: 415-421.

Cockroft, B., and F.M. Martin. 1981. Irrigation. pp. 133-149. In: J.M. Oades, D.G. Lewis, and K. Norrish (eds.), Red-brown earths of Australia. Waite Agr. Res. Inst. and CSIRO Div. Soils, Adelaide, South Australia.

Collis-George, N. , and B.S. Figueroa. 1984. The use of high energy moisture characteristics to assess soil stability. Aust. J. Soil Res. 22: 349-356.

Collis-George, N., and R.S.B. Greene. 1979. The effect of aggregate size on the infiltration behaviour of a slaking soil and its relevance to ponded irrigation. Aust.J. Soil Res. 17:65-73.

Collis-George, N. , and Lal, R. 1971. Infiltration and structural changes as influenced by initial moisture content. Aust. J. Soil Res. 9: 107-116.

Costigan, P.A., D.J. Greenwood, and T. McBurney. 1983. Variation in yield between two similar sandy loam soils. I. Description and measurement of yield differences. J. Soil Sci. 34: 621-637.

Daniel, H., R.J. Jarvis, and L.A.G. Aylmore. 1988. Hardpan development in loamy sand and its effect upon soil conditions and crop growth. Proc. 11th Int. Soil Tillage Res. Organization Conf., Edinburgh 1 :233-238.

Dexter, A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Res. 11:199-238.

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

Dregne, H.E. 1976. Soils of arid regions. Elsevier, Amsterdam.

Dudal, R. 1970. Key to soil units for the Soil Map of the World. AGL: SM/70/2, FAO, Rome.

Eck, H.V., and P.W. Unger. 1985. Soil profile modification for increasing crop production. Adv. Soil Sci. 1: 65-122.

Elliott, B.R. , and R. Jardine. 1972. The influence of rotation systems on long-term trends in wheat yields. Aust. J. Agric. Res. 23: 935-944.

El-Swaify, S.A., P. Pathak, T.J. Rego, and S. Singh. 1985. Soil management for optimized productivity under rainfed conditions in the semi-arid tropics. Adv. Soil Sci. 1: 1-64.

Emerson, W .W .1954. The determination of the stability of soil crumbs. J. Soil Sci. 5:235-250.

Emerson, W.W. 1964. The slaking of soil crumbs as influenced by clay mineral composition. Aust. J. Soil Res. 2:211-217.

Emerson, W .W .1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. Aust. J. Soil Res. 5: 47-57.
Emerson, W .W .1968. The dispersion of clay from soil aggregates. Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci. 1: 617-626.

Emerson, W .W .1971. Determination of the contents of clay-size particles in soils.I. Soil Sci. 22: 50-59.

Emerson, W.W. 1977. Physical properties and structure. pp. 78-104. In: J.S. Russell and E.L. Greacen (eds.), Soil factors in crop production in a semi-arid environment. Queensland University Press, Brisbane.

Emerson, W .W .1983. Inter-particle bonding. pp. 477-498. In: Soils: an Australian viewpoint. CSIRO, Melbourne/Academic Press, London.

Emerson, W.W ., and A.C. Bakker. 1973. The comparative effects of exchangeable calcium, magnesium, and sodium on some physical properties of red-brown earth subsoils. II. The spontaneous dispersion of aggregates in water. Aust. J. Soil Res. 11:151-157.

Emerson, W.W., and C.L. Chi. 1977. Exchangeable calcium, magnesium, and sodium and the dispersion of illites in water. Aust. J. Soil Res. 15: 255-262.

FAO-UNESCO. 1974. Soil Map of the World i: 5000000. 1-X. Unesco, Paris. French, R.J. 1978.

French, R.J. 1978. The effect of fallowing on the yield of wheat. II. The effect on grain yield. Aust. J. Agric. Res. 29: 669-684.

French, R.J. 1981. Management under low rainfall (South Australia). pp. 97-116. In: J.M. Oades, D.G. Lewis, and K. Norrish (eds.), Red-brown earths of Australia. Waite Agr. Res. Inst. and CSIRO Div. Soils, Adelaide. South Australia.

French, R.J. , and J .E. Schultz. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. Some limitations to efficiency. Aust. J. Agric. Res. 35: 765-775.

Frenkel, H., J.O. Goertzen, and J.D. Rhoades. 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 32-39.

Gates, C.T., D.B. Jones, W.J. Muller, and J.S. Hicks. 1981. The interaction of nutrients and tillage methods on wheat and weed development. Aust. J. Agric. Res.32:227-241.

Ghavami, M., J. Keller, and I.S. Dunn. 1974. Predicting soil density following irrigation. Trans. ASAE 17: 166-171.

Gibbs, R.J., and J.B. Reid. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. Adv. Soil Sci. 8: 123-149.

Gillman, G.P. 1974. The influence of net charge on water dispersible clay and sorbed sulphate. Aust. J. Soil Res. 12: 173-176.

Greacen, E.L., K.P. Barley, and D.A. Farrell. 1969. The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution pp. 265-269. In: W.J. Whittington (ed.), Root growth. Butterworths, London.

Greene, R.S.B., and G. W. Ford. 1985. The effect of gypsum on cation exchange in two red duplex soils. Aust. J. Soil Res. 23: 61- 74.

Greene, R.S.B. , A.M. Posner, and J .P .Quirk. 1978. A study of the coagulation of montmorillonite and illite suspensions by calcium chloride using the electron microscope. pp. 35-40. In: W. W .Emerson, R.D. Bond, and A.R. Dexter (eds.), Modification of soil structure. Wiley, NY.

Grierson, I. T .1978. Gypsum and red-brown earths. pp. 315-324. In: W .W .Emerson, R.D. Bond, and A.R. Dexter (eds.), Modification of soil structure. John Wiley, NY.

Grierson, I.T., J.W. Jijne, and D.J. Greenland. 1972. Changes in some physical properties of red-brown earths of different texture associated with increasing content of organic matter. Exp. Record 6: 16-22.

Gupta, R.P., S. Kumar, and T. Singh. 1984. Soil management to increase crop production. Report of All India Coordinated Research Projects on Improvement of Soil Physical Conditions to Increase Agricultural Production of Problematic Areas. indian Council Agr. Res. , New Delhi.

Haddow, P. 1988. Friability of hardsetting soils. Honours Project, Soil Science Dept., Aberdeen University.

Hamblin, A.P. 1984. The effect of tillage on soil surface properties and the water balance of a xeralfic alfisol. Soil Tillage Res. 4: 543-559.

Hamblin, A.P. 1987. The effect of tillage on soil physical conditions pp. 128-170. In: P.S. Cornish and j.E. Pratley (eds.), Tillage. New directions in Australian agriculture. Inkata Press, Melbourne.

Hamblin, A.P., and D. Tennant. 1979. Interactions between soil type and tillage level in a dryland situation. Aust. J. Soil Res. 17: 177-189.

Hulme, P. 1983. Honours Project. Dept. of Agronomy and Soil Science, Univ. of New England, Armidale, Australia.

Hulugalle, N .R. , R. Lal, and C.H.H. Ter Kuile. 1986. Amelioration of soil physical properties by mucuna after mechanized land clearing of a tropical rain forest. Soil Sci. 141: 219-224.

Ike, I.F. 1986. Soil and crop responses to different tillage practices in a ferruginous soil in the Nigerian savanna. Soil Tillage Res. 6: 261-272.

Jones, M.j. 1986. The dryland farming projects, Botswana, 1971-1985. pp. 62-67. In: The agricultural dilemma in Africa. Overseas Development Administration, London.

Kazman, Z. , I. Shainberg, and M. Gal. 1983. Effect of low levels of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. Soil Sci. 135: 184-192.

Kelly, K.B. 1984. Root zone limitations in the Goulburn Valley. II Effects of soil modification and treading on pasture growth. pp. 319-328. In: W .A. Muirhead and E. Humphreys (eds.), Root zone limitations to crop production on clay soils. CSIRO, Melbourne.

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.

Kemper, W.D., R.C. Rosenau, andA.R. Dexter. 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 860-867.

Kimber, R. W .L. 1973. Phytotoxicity from plant residues. II. Effect of time of rotting of straw from some grasses and legumes on the growth of wheat seedlings. Plant Soil 38 : 341-361.

LaI, R. 1984a. Mechanized tillage systems effects on soil erosion from an alfisol in watersheds cropped to maize. Soil Tillage Res. 4: 349-360.

Lal, R. 1984b. Soil erosion from tropical arable lands and its contol. Adv. Agron. 37:183-248.

Lal, R. 1985. Mechanized tillage systems effects on properties of a tropical alfisol in watersheds cropped to maize. Soil Tillage Res. 6: 149-161.

Lal, R. 1986. Effects of eight tillage treatments on a tropical alfisol: Maize growth and yield. J. Sci. Food Agric. 37: 1073-1082.

Lal, R. 1987a. Managing the soils of sub-Saharan Africa. Science 236: 1069-1076.

Lal, R. 1987b. Tropical ecology and physical edaphology. Wiley, Chichester.

Lal, R. , B.j. Bridge, and N. Collis-George. 1970. The effect of column diameter on the infiltration rate into a swelling soil. Aust. J. Soil Res. 8: 185-193.

Lenvain, j.S., V.R.N. Chinene, K.S. Gill, and P.L.L. Pauwelyn. 1987. Aspects of compaction, water transmissibility, and erosion on a kaolinitic clay soil. In: Proc. 2nd Regional IBSRAM workshop on land development and management of acid soils in Africa, Lusaka, Zambia.

Lenvain, j .S. , and P .L. Pauwelyn. 1988. Comparison of the physical properties of two Zambian soils. pp. 379-389. In: The red soils of east and southern Africa. Proc. Int. Symp., Harare, Zimbabwe, 1986. Manuscript Report, IDRC-MRl 70e. IDRC, Ottawa, Canada.

Ley, G .1. 1988. A study of hard-setting behavior of structurally weak tropical soils. Ph.D. thesis, Aberdeen University, Aberdeen, UK.

Ley, G.I., C.E. Mullins, and R. Lal. 1989a. Hard-setting behavior of some structurally weak tropical soils. Soil Tillage Res. 13:365-381.

Ley, G.I., C.E. Mullins, and R. Lal. 1989b. A comparison between theoretical predictions and the measured strengths of undisturbed soil cores. (In preparation.)

Loveday, I. 1974. Recognition of gypsum-responsive soils. Aust. J. Soil Res. 25:87-96.

Loveday, I.1981. Soil management and amelioration. pp. 39-57. In: T.S. Abbot, C.A. Hawkins, and P.G. Searle (eds.), National Soils Conference 1980 review papers. Aust. Soc. Soil Sci., Sydney, Australia.

Loveday, I., and D.R. Scotter. 1966. Emergence response of subterranean clover to dissolved gypsum in relation to soil properties and evaporative conditions. Aust. J. Soil Res. 4: 55-68.

Makin, A. W. 1987. The measurements of some soil properties under tractor wheels. pp 158-161. In: K.I. Coughlan and P.N. Truong (eds.), Effects of management practices on soil physical properties. Proc. Natl. Workshop, Toowoomba, Queensland, Australia, September 7-10, 1987.

Mason, I.B., and R.A. Fischer. 1986. Direct-drilling effects on wheat growth and yield in southern New South Wales: I. Lockhart, a 450 mm rainfall site. Aust. J. Exp. Agric. 26: 457-468.

Matheson, W.E. 1969. Gypsum for hardsetting soils. J. Agric. South Australia 72:402-406.

McDonald, R.C., R.F. Isbell, I.G. Speight, I. Walker, and M.S. Hopkins. 1984. Australian soil and land survey field handbook. Inkata Press, Melbourne.

McIntyre, D.S. 1958a. Permeability measurements of soil crusts formed by rain-drop impact. Soil Sci. 85: 185-189.

McIntyre, D.S. 1958b. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Sci. 85.261-266.

McIntyre, D.S. 1979. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. Aust. J. Soil Res. 17: 115-120.

Mead, I.A., and K. Y. Chan. 1989. The effect of deep tillage and seeded preparation on the growth and yield of wheat on a hard-setting soil. Aust. J. Exp. Agric.(accepted for publication).

Millington, R.I. 1959. Establishment of wheat in relation to apparent density of the surface soil. Aust. J. Agric. Res. 10: 487-494.

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.

Mullins, C.E., I.M. Young, A.G. Bengough, and G.I. Ley. 1987. Hardsetting soils. Soil Use Management 3: 79-83.

Mullins, C.E., D.A. MacLeod, K.H. Northcote, J.M. Tisdall, and I.M. Young. 1990. Hardsetting soils: Behavior, occurrence, and management. In: Lal, R. and B.A. Stewart (eds.). Advances in soil science, Vol. 11. Springer-Verlag, New York, USA.

Murphy, B. W., G.I. Hamilton, and I.J. Packer. 1987. Seasonal variation in the soil physical condition of the surface layer (0-10 cm) of a structurally degraded soil and possible effects on the growth of wheat. pp. 52-55. In: K.I. Coughlan and P .N .Truong (eds.), Effects of management practices on soil physical properties. Proc. Natl. Workshop, Toowoomba, Queensland, September 7-10,1987.

Nicou, R. and Chopart, j .L. 1979. Root growth and development in sandy and sandy clay soils of Senegal. pp. 373-384. In: R. Lal and D.j. Greenland (eds.), Soil physical properties and crop production in the tropics. Wiley Interscience, Chichester .

Norrish, K., and j.G. Pickering. 1983. Clay minerals. pp. 281-308. In: Soils: An Australian viewpoint. CSIRO, Melbourne.

Northcote, K.B. 1960, 1971, 1979. A factual key for the recognition of Australian soils, 1st, 3d, and 4th eds. Rellim Tech. Pub., Adelaide, South Australia.

Northcote, K.B. 1981. Morphology, distribution and classification. In: j.M. Oades, D.G. Lewis, and K. Norrish (eds.), Red-brown earths of Australia. Monograph, CSIRO Div. Soils, South Australia.

Northcote, K.B. 1982. Soil: A national resource. In: Man and the Australian environment. W. Banley, and M. Cooper (eds.), Mcaraw-Rill, Australia.

Northcote, K.B., with O.O. Beckman, E. Bettany, B.M. Churchward, D.C. van Dijk, G.M. Dimmock, G.D. Bubble, R.F. Isbell, W.M. McArthur, O.O. Murtha, K.D. Nicolls, T.R. Paton, C.B. Thompson, A.A. Webb, and M.j. Wright. 1960-1968. Atlas of Australian soils. Sheets 1-10, with explanatory booklets. CSIRO and Melbourne Univ. Press, Melbourne.

Northcote, K.B., G.D. Bubble, R.F. Isbell, C.B. Thompson, and E. Bettenay. 1975. A description of Australian soils. CSIRO Div. Soils, Australia.

Nye, P.B. 1955. Some soil-forming processes in the humid tropics, IV. The action of the soil fauna. J. Soil Sci. 6: 73-83.

Oades, j.M. 1981. Organic matter in the Urrbrae soil. pp. 63-81. In: j.M. Oades, D.G. Lewis, and K. Norrish (eds.), Red-brown earths of Australia. Waite Agric. Res. Inst. and CSIRO Aust. Div. Soils, Adelaide, South Australia.

Oades, j .M. 1984. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. Plant Soil 76 : 319-337.

Osborne, G.j., D.L. Rowell, and P.G. Mat thews. 1978. Value and measurement of soil structure under systems of reduced and conventional cultivation. pp. 379-385. In: W.W. Emerson, R.D. Bond, and A.R. Dexter (eds.), Modification of soil structure. Wiley, Chichester .

Oster, j.D. 1982. Gypsum usage in irrigated agriculture: A review. Fertilizer Res. 3:73-89.

Oster, j.D., and F.W. Schroeder. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. Soil Sci. Soc. Am. I. 43: 444-447.

Oster, j.D., I. Shainberg, and j.D. Wood. 1980. Flocculation value and gel structure of sodium/calcium montmorilonite and illite suspensions. Soil Sci. Soc. Am. I. 44: 955-959.

Pupisky, B., and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:429-433.

Quirk, j .P ., and R.K. Schofield. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. J. Soil Sci. 6: 163-178.

Rahman, W.A., and D.L. Rowell. 1979. The influence of magnesium in saline and sodic soils: A specific effect or a problem of cation exchange? J. Soil Sci. 30: 535-546.

Razig, a. 1978. Pedological studies of selected "Gardud" soils from Kordofan Provinces, western Sudan. Ph.D. thesis, Aberdeen University, Aberdeen, UK.

Reddy, D.S., A.P. Raju, and M.S. Reddy. 1985. Management of physically problematic soils of Andhra Pradesh. Consolidated report of the co-ordinated soil physics project Hyderabad for 1967-1983. Andhra Pradesh Agricultural Univ. Rajendranagar, Hyderabad.

Reeves, T.G., and A. Ellington. 1974. Direct drilling experiments with wheat. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. 14: 237-240.

Rengasamy, P. 1982. Dispersion of calcium clay. Aust. J. Soil Res. 20: 153-157.

Rengasamy, P. 1983. Clay dispersion in relation to changes in the electrolyte composition of dialysed red-brown earths. I. Soil Sci. 34: 723- 732.

Rengasamy, P., G.W. Ford, andR.S.B. Greene. 1987. Classification of aggregate stability. pp. 97-101. In: K.j. Coughlan and P.N. Truong (eds.), Effects of management practices on soil physical properties, Proc. Natl. Workshop, Toowoomba, Queensland, Australia, September 7-10, 1987.

Rengasamy, P., R.S.B. Greene, G.W. Ford, and A.H. Mehanni. 1984. Identification of dispersive behavior and the management of red-brown earths. Aust. J. Soil Res. 22:413-431.

Rhoades, j.D., D.B. Krueger, and M.j. Reed. 1968. The effect of soil-mineral weathering on the sodium hazard of irrigation waters. Soil Sci. Soc. Am. J. 32:643-647.

Rose, C. W .1962. Some effects of rainfall, radiant drying, and soil factors on infiltration under rainfall into soils. J. Soil Sci. 13: 286-298.

Rovira, A.D. , and E.L. Greacen. 1957. The effect of aggregate disruption on the activity of microorganisms in soil. Aust. J. Agric. Res. 8: 659-673.

Rovira, A.D., K.R.j. Smettem, and K.E. Lee. 1987. Effect of rotation and conservation tillage on earthworms in a red-brown earth under wheat. Aust. J. Agric. Res. 38: 829-834.

Rovira, A.D., and N.R. Venn. 1985. Effect of rotation and tillage on take-all and Rhizoctonia root rot in wheat. pp. 255-258. In: C.A. Parker, A.D. Rovira, K.j. Moore, P. T.W. Wong, and j.F. Kollmorgen (eds.), Ecology and management of soilborne plant pathogens. Am. Phytopathol. Soc. , St. Paul, MN .

Rowell, D.L., D. Payne, and N. Ahmad. 1969. The effect of the concentration and movement of solutions on the swelling, dispersion, and movement of clay in saline and alkaline soils. J. Soil Sci. 20: 176-188.

Rudd, C.L. 1974. More about gypsum. J. Agric. South Australia 77: 70- 72.

Rycroft, D.W., and A.A. Thorburn. 1974. Water stability tests for clay soils in relation to mole draining. Soil Sci. 117: 306-310.

Schofield, R.K., and H.R. Samson. 1954. Flocculation of kaolinite due to the attraction of oppositely charged crystal faces. Disc. Faraday Soc. 18: 135-145.

Scotter, D.R., and j. Loveday. 1966. Physical changes in seedbed material resulting from the application of dissolved gypsum. Aust. J. Soil Res. 4: 69-75.

Shainberg, I. , and M. Gal. 1982. The effect of lime on the response of soils to sodic conditions. J. Soil Sci. 33: 489-498.

Shainberg, I., j.D. Rhoades, and R.j. Prather. 1980. The effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:273-277.

Shanmuganathan, R. T ., and j .M. Oades. 1983a. Influence of anions on dispersion and physical properties of the A horizon of a red-brown earth. Geoderma 29:257-277.

Shanmuganathan, R. T. , and j .M. Oades. 1983b. Modification of soil physical properties by addition of calcium compounds. Aust. J. Soil Res. 21: 285-300.

Sinclair, j. 1985. Crusting, soil strength and seedling emergence in Botswana. Ph.D. thesis, Aberdeen University, UK.

Smettem, K.R.j. 1986. Analysis of water flow from cylindrical macropores. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1139-1142.

Snyder, V.A., and R.D. Miller. 1985. Tensile strength of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 58-65.

Soil Survey Staff. 1975. Soil taxonomy. U.S. Dept. Agric. Handbook No.436. Spaagaren, 0. 1986. (Personal communication: Hardsetting soils are mapped as unit no.9 on: Soil map of Zambia, 1983 ed. , compiled by W .j .Veldkamp, Soil Survey, Mt. Makulu, Zambia.)

Stace, H.C.T., G.D. Bubble, R. Brewer, K.H. Northcote, j.R. Sleeman, M.j. Mulchay, and E.G. Hallsworth. 1968. A handbook of Australian soils. Rellim Tech. Pub., Adelaide, South Australia.

Suarez, D.L., j.D. Rhoades, R. Lavado, and C.M. Grieve. 1984. Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 50-55.

Taylor, A.j. , and K.A. Olsson. 1987. Effect of gypsum and deep ripping on lucerne(Medicago sativa L.) yields on a red-brown earth under flood and spray irrigation. Aust. J. Exp. Agric. 27: 841-849.

Tisdall, j.M. 1978. Ecology of earthworms in irrigated orchards. pp. 297-303. In: W.W. Emerson, R.D. Bond, and A.R. Dexter (eds.), Modification of soil structure. Wiley, Chichester.

Tisdall, j .M. 1985. Earthworm activity in irrigated red-brown earths used for annual crops in Victoria. Aust. J. Soil Res. 23: 291-299.

Tisdall, j .M. , and H.H. Adem. 1986a. The effect of reduced tillage of an irrigated silty soil and of a mulch on seedling emergence, growth and yield of maize (Zea mays) harvested for silage. Soil Tillage Res. 6: 365-375.

Tisdall, j .M. , and H.H. Adem. 1986b. Effect of water content of soil at tillage on size-distribution of aggregates and infiltration. Aust. J. Exp. Agric. 26: 193-195.

Tisdall, j.M., and H.H. Adem. 1988. An example of custom prescribed tillage in south eastern Australia. J. Agric. Eng. Res. 40:23-32.

Tisdall, j.M., B. Cockroft, and N.C. Uren. 1978. The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. Aust. J. Soil Res. 16:9-17.

Tisdall, j .M. , and j .M. Oades. 1980. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. Aust. J. Soil Res. 18: 423-433.

Trapnell, C.G., and R. Webster. 1986. Microaggregates in red earths and related soils in East and Central Africa, their classification and occurrence. J. Soil Sci. 37:109-123.

U.S. Salinity Laboratory Staff (L.A. Richards, ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Handbook 60, U .S. Salinity Lab., Riverside, CA.

Utomo, W .H. , and A.R. Dexter. 1981. Soil friability. J. Soil Sci. 32: 203-213.

Velasco-Molina, H.A., A.R. Swoboda, and C.L. Godfrey. 1971. Dispersion of different mineralogy in relation to sodium adsorption ratio and electrolyte concentration. Soil Sci. 111: 282-287.

Whiteley, G.M., and A.R. Dexter. 1982. Root development of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. Soil Tillage Res. 2: 379-393.

Willat, S.T., and D.M. Pullar. 1984. Changes in soil physical properties under grazed pastures. Aust. J. Soil Res. 22: 343-348.

Willcocks, T.J. 1981. Tillage of clod-forming sandy loam soils in the semi-arid climate of Botswana. Soil Tillage Res. 1: 323-350.

Williams, J.B. 1979. Soil water investigation in the Gambia. Tech. Bull. 3, Land Resource Development Centre, ODA, UK.

Young, I.M. 1987. Soil strength and hard-setting behaviour of some structurally unstable British soils. Ph.D. thesis, Aberdeen University, Aberdeen, UK.

Young, I.M., P.A. Costigan, and C.E. Mullins. 1988. Physical properties of two structurally sensitive soils and their effects on crop growth. Proc. 11th Int. Soil Tillage Res. Organisation Conf, Edinburgh 2: 933-938.