

تک نگاشت:

# فشرده‌گی خاک تشخیص و راه کارهای کاهش آن

نویسنده: علی اکبر صلح جو

شماره:

۵۲



AERI

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**فشردگی خاک**

**تشخیص و راه کارهای کاهش آن**



وزارت جهاد کشاورزی  
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

عنوان نوشتار:	فشردگی خاک، تشخیص و راه کارهای کاهش آن
نگارنده:	علی اکبر صلح جو
ناشر:	مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
زمان انتشار:	۱۳۹۴
ویراستار:	نیکروز باقری
صفحه‌آرا:	سمیه وطن دوست
شماره ثبت:	۴۹۸۹۴

مسئولیت صحت مطالب با نگارنده است.  
تک نگاشت حاضر با شماره ثبت ۴۹۸۹۴ طی نامه مورخ ۹۵/۵/۵ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع رسانی کشاورزی به ثبت رسیده است.

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۸۴۵،  
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی  
تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶)، دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)  
بایگه اطلاعاتی مؤسسه: [www.aeri.ir](http://www.aeri.ir)

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۳	فصل دوم: تشریح فشردگی خاک
۳	۱-۲- خاک
۳	۲-۲- ساختمان خاک
۴	۳-۲- فشردگی خاک
۶	۴-۲- وضعیت فشردگی خاک در مزارع
۷	فصل سوم: عوامل ایجاد کننده فشردگی خاک
۷	۱-۳- تردد ماشین‌های کشاورزی
۹	۲-۳- نقش رطوبت در فشردگی خاک
۱۰	۳-۳- انجام عملیات شخم با گاوآهن برگردان دار در یک عمق ثابت
۱۱	۴-۳- وضعیت طبیعی خاک
۱۱	۵-۳- انتقال ذرات رس از لایه‌های سطحی به عمق خاک
۱۱	۶-۳- عدم رعایت تناوب زراعی
۱۲	فصل چهارم: اثرات منفی فشردگی خاک
۱۲	۱-۴- کاهش خلل و فرج خاک
۱۲	۲-۴- کاهش نفوذ آب در خاک
۱۲	۳-۴- کاهش رشد ریشه
۱۳	۴-۴- از بین رفتن جانداران خاک‌زی
۱۳	۵-۴- کاهش نیتروژن قابل جذب گیاه
۱۴	۶-۴- تخریب محیط زیست
۱۴	۱-۶-۴- اثر گلخانه‌ای زمین
۱۵	۲-۶-۴- آلودگی آب‌های سطحی
۱۵	۳-۶-۴- آلودگی آب‌های زیرزمینی
۱۶	۷-۴- رشد نامناسب غده‌های زیرزمینی
۱۶	۸-۴- افزایش شیوع بیماری‌های قارچی

- ۱۶ ۴-۹- کاهش تولید محصول
- ۱۸ فصل پنجم: نحوه تشخیص فشردگی خاک
- ۱۹ ۵-۱- جرم مخصوص ظاهری خاک
- ۱۹ ۵-۲- شاخص مخروطی خاک
- ۲۱ ۵-۳- حفر پروفیل در خاک
- ۲۲ ۵-۴- القاء الکترومغناطیسی
- ۲۳ ۵-۵- روش‌های مشاهده ای جهت تشخیص اولیه فشردگی خاک
- ۲۳ ۵-۵-۱- باقی ماندن آب بر روی سطح مزرعه
- ۲۳ ۵-۵-۲- زرد شدن محصول
- ۲۳ ۵-۵-۳- شکل نامناسب غده‌های زیرزمینی
- ۲۴ ۵-۵-۴- عدم نفوذ مناسب ادوات خاک ورزی در داخل خاک
- ۲۴ ۵-۵-۵- کاهش عمق نفوذ ریشه
- ۲۴ ۵-۵-۶- کاهش عملکرد محصول
- ۲۵ فصل ششم: راه کارهای جلوگیری از ایجاد فشردگی خاک
- ۲۵ ۶-۱- کاهش تردد تراکتور و ماشین‌های کشاورزی در مزرعه
- ۲۵ ۶-۲- کاهش میزان وزن تراکتور و ماشین‌های کشاورزی تا حد امکان
- ۲۶ ۶-۳- کاهش تردد ماشین‌های کشاورزی در خاک مرطوب
- ۲۶ ۶-۴- کاهش فشار باد لاستیک تا حد امکان
- ۲۶ ۶-۵- استفاده از کودهای آلی
- ۲۷ ۶-۶- افزایش سطح تماس چرخ‌های تراکتور با خاک
- ۲۷ ۶-۷- باقی گذاشتن بقایای گیاهی در سطح خاک
- ۲۷ ۶-۸- جلوگیری از لغزش بیش از حد چرخ‌های تراکتور
- ۲۷ ۶-۹- کنترل ترافیک در مزرعه
- ۲۸ ۶-۱۰- فعالیت کرم‌های خاکی
- ۲۸ ۶-۱۱- استفاده از گیاهان با ریشه عمیق
- ۲۹ ۶-۱۲- زیرشکنی خاک

- ۳۰ - ۱-۱۲-۶ - ساختمان زیرشکن
- ۳۳ - ۲-۱۲-۶ - تنظیم فاصله بین تیغه‌های زیرشکن
- ۳۴ - ۳-۱۲-۶ - تنظیم عمق کار زیرشکن
- ۳۵ - ۴-۱۲-۶ - نحوه اجرای عملیات زیرشکنی خاک
- ۳۸ - ۵-۱۲-۶ - اثرات مثبت زیرشکنی خاک
- ۳۸ - تاثیر زیرشکنی خاک در بهبود شرایط فیزیکی خاک
- ۴۱ - تاثیر زیرشکنی خاک بر رشد ریشه محصول
- ۴۳ - تاثیر زیرشکنی خاک بر بیماری‌های قارچی
- ۴۵ - تاثیر زیرشکنی خاک بر نیتروژن قابل جذب گیاه
- ۴۵ - تاثیر زیرشکنی خاک بر عملکرد محصول
- ۴۷ - تاثیر زیرشکنی خاک بر کارایی مصرف آب
- ۴۸ - تاثیر زیرشکنی خاک بر تنش‌های آبی وارده به محصول
- ۴۸ - تاثیر زیرشکنی خاک بر افزایش درآمد کشاورزان
- ۴۹ - ۶-۱۲-۶ - اثرات منفی زیرشکنی خاک
- ۴۹ - نیاز به تراکتورها ی پر قدرت
- ۴۹ - افزایش آب مصرفی در مرحله خاک آب
- ۵۰ - خاک‌های خیلی اسیدی یا بازی
- ۵۰ نتیجه‌گیری
- ۵۱ منابع مورد استفاده



## پیش‌گفتار

سال‌ها بر آن بودم که کتابی در خصوص فشردگی خاک، تشخیص و راه کارهای کاهش آن تدوین نمایم که بتواند نیازهای کارشناسان را در مزرعه برآورده سازد. سپاس خدای را که اکنون این خواسته جامعه عمل پوشیده و مولف کتاب با بهره‌گیری از تجربیات سال‌ها تحقیق در خصوص فشردگی خاک، توفیق یافته‌ام که این کتاب را تقدیم به علاقه‌مندان نمایم. در این کتاب کوشش شده است که در هر مورد علاوه بر اصول علمی بر جنبه‌های عملی آن نیز تأکید شود.

از استادان و محققین محترم، کارشناسان عزیز و سایر صاحب نظران که این کتاب را مورد استفاده قرار می‌دهند تقاضا دارم که اگر اشکالی در کتاب ملاحظه می‌فرمایند که نیاز به اصلاح دارد با اطلاع به اینجانب مرا قرین امتنان فرمایند.

دکتر علی اکبر صلح‌جو

استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

آبان ماه ۱۳۹۴

## فصل اول

### مقدمه

استفاده فزاینده تراکتورها در سراسر جهان به خصوص در کشورهای در حال توسعه نشانه اهمیت روزافزون منابع مولد توان در کشاورزی مدرن و مکانیزه بوده و استفاده از آن در اجرای عملیات مختلف زراعی ضروری است. در قرن اخیر، به دلیل رشد سریع جمعیت در جهان و نیاز بشر به تأمین غذا، سطح زیرکشت مزارع افزایش یافته که منجر به نیاز به ادوات بزرگ‌تر و تراکتورهای سنگین‌تر با توان بیشتر شده است.

به دلیل اینکه عوامل زیادی در افزایش بهره‌وری و به صرفه بودن کاربرد ماشین در کشاورزی به طور عام و استفاده از آن در تهیه بستر برای کاشت به طور خاص دخالت دارند، لازم است که این عوامل به درستی شناخته شوند. بدیهی است موفقیت بیشتر وقتی عاید خواهد شد که مزایا و معایب استفاده از ماشین‌ها نیز شناخته شوند و نقاط قوت آن تقویت و نقاط ضعف برطرف شود. یکی از اثرات نامطلوب تردد و کار ماشین‌ها، فشردگی خاک است که بخشی از این وضعیت در عملیات خاک‌ورزی و بخش دیگر در مراحل کاشت، داشت و برداشت محصول اتفاق می‌افتد. بررسی فشردگی و تراکم خاک‌های زراعی به دلیل تأثیر منفی آن بر میزان رشد و تولید محصول اهمیت زیادی داشته به طوری که در چند دهه اخیر به طور جدی به آن پرداخته شده است و تلاش فراوانی نیز صورت گرفته تا راه‌های کاهش این اثرات منفی ارزیابی و معرفی شوند. بنابراین لازم است به منظور کاهش هزینه‌ها و اثرات منفی ماشین بر خاک، این موضوع از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. حفاظت خاک در شرایط مطلوب بستگی زیادی به کاربرد صحیح ماشین‌های کشاورزی دارد. خاک می‌باید محیطی طبیعی برای نگهداری بذر و رشد گیاه و تأمین کننده رشد آن باشد.

خاک بخشی از پوسته خارجی جامد زمین است که در آن ترکیبات معدنی و مواد آلی تجزیه



شده در لایه‌های افقی، شکل گرفته و دارای خصوصیتی است که از اثر آب و هوا و موجودات زنده بر روی مواد اولیه به وجود آمده و این خصوصیات تحت تأثیر پستی و بلندی در طول مدت زمان تعدیل و تعیین شده اند. خاک یکی از منابع طبیعی بسیار با ارزشی است که تأمین کننده غذا و پوشاک بشر و همچنین محیطی مناسب برای رشد گیاه است. شناختن عوامل مخرب خاک برای دستیابی به حداکثر بهره‌برداری از خاک و حفظ این منبع مهم حیات بشری برای نسل‌های آینده، بسیار مهم است.

تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه در عملیات مختلف کشاورزی، پس از مدتی به تدریج عمق مؤثر خاک زراعی را کاهش می‌دهد. مهمترین گام برای کنترل فشردگی، شناخت این پدیده است. برای شناختن فشردگی خاک، نیاز به داشتن اطلاعاتی در مورد عوامل ایجاد کننده فشردگی خاک است. فشار وارده از سوی چرخ‌های تراکتور و ماشین‌های کشاورزی از جمله عوامل به وجود آورنده فشردگی خاک و افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک به شمار می‌آید. از دیگر عوامل مهم فشردگی خاک استفاده از تراکتور و ماشین‌های کشاورزی در خاک مرطوب است که می‌تواند باعث سرعت بخشیدن به فشردگی خاک در مزارع شود. یکی از روش‌های مکانیکی پیشنهاد شده برای حل مشکل فشردگی خاک، استفاده از زیرشکن است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که زیرشکنی در اعماق مختلف نیم‌رخ خاک سبب کاهش فشردگی خاک و افزایش عملکرد محصول می‌شود.

## فصل دوم

### تشریح فشردگی خاک

#### ۲-۱- خاک

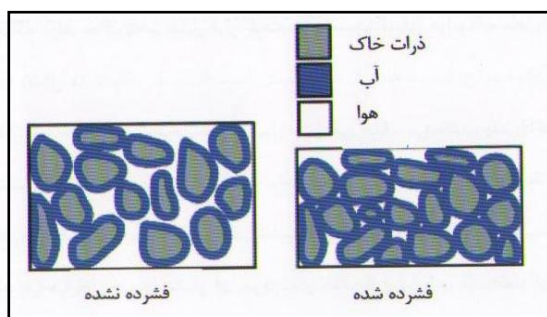
خاک جسمی متخلخل است که از ذرات ریز و درشت با نسبت‌های متفاوتی از خلل و فرج تشکیل شده و دارای سه بخش جامد، مایع و گاز است. بخش جامد خاک مجموعه‌ای بسیار پیچیده از مواد معدنی و آلی بوده و ترتیب قرارگرفتن ذرات، کمیت و کیفیت ویژگی‌هایی از قبیل تخلخل، ساختمان و جرم مخصوص ظاهری خاک را تعیین می‌کند. مواد آلی در خواص فیزیکی خاک تأثیر داشته و فراوانی یا کمبود آن در نفوذ آب به خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت و کیفیت آب در خاک و ایجاد خاک دانه‌ها مؤثر است (بای بوردی، ۱۳۶۸).

#### ۲-۲- ساختمان خاک

ذرات خاک به ندرت به صورت منفرد و جداگانه در خاک‌های زراعی موجود است و کانی‌های رسی و سایر ترکیبات، این ذرات را به یکدیگر پیوند داده و اشکال مختلفی ایجاد می‌کنند که خلل و فرج بین این واحدهای ساختمانی مبین ساختمان خاک و دگرگونی‌های آن در طول زمان است. واژه ساختمان خاک، تعریف مشخص، دقیق و عامه پسندی ندارد. جرم مخصوص ظاهری خاک دارای ساختمان، از جرم مخصوص ظاهری همان خاک که فاقد ساختمان باشد کمتر است. زیرا انهدام ساختمان خاک با از بین رفتن خلل و فرج موجود و پرشدن آن توسط ذرات خاک توأم بوده و موجب افزایش وزن در واحد حجم می‌شود. بنابراین اندازه پایداری و توزیع فضایی خلل و فرج، معیاری است برای تشخیص خاک با ساختمان از خاک بدون ساختمان.

## ۲-۳- فشردگی خاک

فشردگی خاک باعث کاهش خلل و فرج موجود در خاک می شود (شکل ۲-۱). در پی فشردگی، جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش می یابد. خاک با فشار استاتیکی، دینامیکی و یا با لرزش فشرده می شود. اگر هوا از خلل و فرج خاک خارج شود، تراکم و اگر آب خارج شود تحکیم صورت گرفته است. در اثر اعمال فشار ابتدا خروج هوا و سپس خروج آب روی می دهد. از نظر کشاورزی زمانی که مجموع خلل و فرج خاک آن قدر کم شود که تهویه محدود و نفوذ ریشه کند شود، لایه های خاک فشرده می شوند. مقداری از فشردگی خاک به طور طبیعی، در اثر برخورد قطرات باران یا در نتیجه بافت و رژیم رطوبتی روی می دهد. ولی علت اصلی فشردگی خاک نیروهای مکانیکی است که توسط انسان و ماشین های کشاورزی وارد می شود.



شکل ۲-۱- تاثیر فشردگی بر خلل و فرج خاک (شریفی و جوادی، ۱۳۸۶)

از حدود ۵۰ سال پیش پژوهش های جدی در زمینه ارزیابی اثرات ماشین بر خاک و روابط متقابل آن شروع شده است که هنوز ادامه دارد. خاک جسمی متخلخل است که از ذرات ریز و درشت با نسبت های متفاوتی از خلل و فرج تشکیل شده و دارای سه بخش جامد، مایع و گاز است. وقتی که خاک در شرایط رطوبتی مناسب تحت فشار قرار بگیرد فشرده می شود. در اثر فشار یا وزن اعمال شده به خاک مقداری هوا و آب از خاک خارج می شود و ذرات جامد با فاصله کمتری نسبت به هم قرار می گیرند. واضح است که هر قدر ذرات به هم نزدیک تر باشند، جرم مخصوص ظاهری آن بیشتر می شود و چنین خاکی برای رشد و توسعه ریشه گیاه نامناسب خواهد بود.

در یک دوره کشت، ماشین‌ها و تجهیزات کشاورزی و خوروهای باری از سطح مزرعه عبور می‌نمایند. به این ترتیب با وجود رطوبت خاک و اعمال نیرو یا وزن از طرف چرخ ماشین‌های در حال تردد در سطح مزرعه، خاک فشرده می‌شود. به همین دلیل خاک‌های زراعی به طور دائم دست خوش تغییرات نامطلوبی می‌شوند.

فشردگی ایجاد شده در خاک به وسیله ماشین‌های کشاورزی یک عامل اصلی در کاهش رتبه و پست شدن خاک‌های کشاورزی است و بین عوامل مؤثر در تخریب خاک<sup>۱</sup>، عامل فشردگی خاک دارای بیشترین تأثیر است. میزان فشردگی خاک تحت تأثیر مستقیم شرایط رطوبتی خاک قرار دارد و از این رو مدیریت شرایط رطوبتی خاک در زمان تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه یک نقش اصلی را در میزان فشردگی خاک ایفا می‌کند.

بخش عمده‌ای از فشردگی خاک به وسیله تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه ایجاد می‌شود که نتیجه آن تخریب ساختمان خاک در لایه‌های بالایی<sup>۲</sup> و پایینی خاک<sup>۳</sup> است (Alakukku, 1996). در فشردگی خاک، نه تنها نیروهای استاتیکی بلکه نیروهای دینامیکی همانند لرزش موتور، انتقال وزن حاصل از اتصال ادوات به تراکتور و لغزش چرخ‌ها نیز نقش دارد. انتقال وزن ادوات سوارشونده به چرخ‌های تراکتور می‌تواند باعث افزایش فشردگی خاک گردد. همچنین لغزش بیش از ۱۵-۱۰ درصد (حد مجاز) می‌تواند باعث افزایش فشردگی خاک شود.

در طول چند دهه اخیر، در اروپای مرکزی تعداد ماشین‌های کشاورزی و میزان تردد چرخ‌ها در مزارع در حدود ۳۰۰ درصد افزایش یافته است. در اروپا، همچنین با توجه به استفاده از ماشین‌های سنگین کشاورزی، مقادیر زیادی از خاک‌های منطقه تنزل رتبه داشته است. بهبود خصوصیات فیزیکی خاک فشرده شده به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ زیرا تنها قسمتی از خاک فشرده شده قابل احیای مجدد است. علاوه بر این، اصلاح خاک فشرده شده هزینه بر است، به طوری که نیازمند مقدار زیادی سوخت برای اجرای عملیات خاک‌ورزی مناسب و مقدار بسیار زیادی مواد آلی به منظور افزایش هوموس خاک است. از طرف دیگر پس از کاهش فشردگی خاک سطحی، خاک به علت کاهش پایداری مجدداً فشرده می‌شود.

1- Soil degradation

2- Top-soil

3- Sub-soil

## ۲-۴- وضعیت فشردگی خاک در مزارع

اطلاعات دقیقی از میزان فشردگی خاک در مزارع ایران موجود نیست ولی پژوهش‌های انجام شده در شهرستان‌های استان فارس نشان می‌دهد که بیشترین میزان فشردگی خاک با ۶۱/۵ درصد مزارع مربوط به شهرستان داراب و کمترین آنها با ۳۳/۳ و ۳۴/۱ درصد به ترتیب مربوط به شهرستان‌های فسا و اقلید است (جدول ۲-۱). این نتایج نشان می‌دهد که به طور میانگین مشکل فشردگی خاک در ۴۲ درصد مزارع استان فارس وجود دارد که نشان دهنده جدی بودن مشکل فشردگی خاک است. بنابراین نیاز است تا عوامل ایجاد کننده فشردگی خاک را شناخت و با مدیریت صحیح، فشردگی خاک را در مزارع کاهش داد.

جدول ۲-۱- وضعیت فشردگی خاک در مزارع گندم در شهرستان‌های استان فارس (زارع و همکاران، ۱۳۸۳)

ردیف	نام شهرستان	تعداد مزارع بررسی شده	درصد مزارع دارای تراکم خاک
۱	مرودشت	۴۲	۳۸/۱a
۲	داراب	۵۲	۶۱/۵b
۳	فسا	۴۲	۳۳/۳a
۴	اقلید	۴۴	۳۴/۱a
۵	سروستان	۳۴	۴۴/۱a
	استان فارس	۲۱۴	۴۲/۲

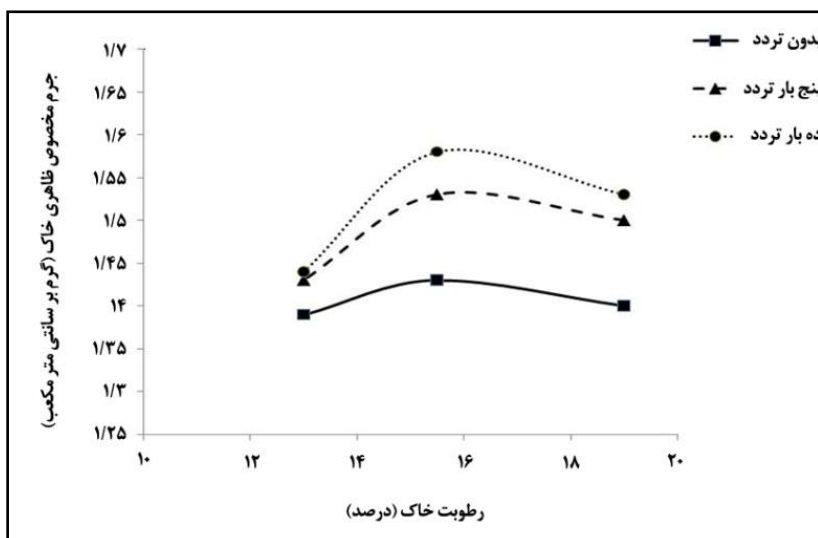
## فصل سوم

### عوامل ایجاد کننده فشردگی خاک

از مهم ترین عوامل ایجاد کننده فشردگی خاک در مزارع کشاورزی می توان به تردد ماشین های کشاورزی، رطوبت خاک، شخم زنی با گاو آهن برگردان دار در یک عمق ثابت، وضعیت طبیعی خاک، انتقال ذرات رس از لایه سطحی به عمق خاک و عدم رعایت تناوب زراعی اشاره نمود.

#### ۳-۱- تردد ماشین های کشاورزی

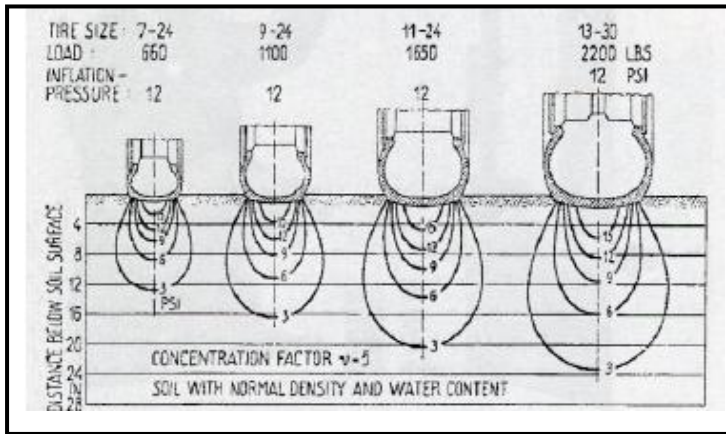
با افزایش تعداد تردد ماشین های کشاورزی در سطح مزرعه میزان فشردگی خاک افزایش می یابد (شکل ۳-۱). از همین رو، نیاز است تا از تردد زیاد ماشین های کشاورزی در سطح مزرعه جلوگیری به عمل آید و سیستم خاکورزی سنتی فعلی را که در بعضی مواقع ۱۰ تا ۱۲ بار عبور تراکتور برای خاکورزی و کاشت محصول صورت می گیرد را به سمت حداقل خاکورزی و یا کاهش خاکورزی سوق داد.



شکل ۳-۱- جرم مخصوص ظاهری خاک تحت تأثیر تعداد دفعات عبور تراکتور در شرایط مختلف رطوبتی (صلح جو، ۱۳۷۶)

شکل ۳-۲ نشان می دهد که توزیع فشردگی خاک در زیر چرخ بستگی به بار اعمالی، فشار باد چرخ و سطح مقطع تماس چرخ با خاک (اندازه چرخ) دارد. در بار اعمالی یکسان و فشار باد ثابت چرخ، میزان فشردگی خاک با کاهش سطح مقطع تماس چرخ با خاک بیشتر می شود. از طرف دیگر با افزایش بار چرخ، سطح مقطع تماس چرخ با خاک (جهت یک چرخ با اندازه ثابت) کمتر شده که می تواند در بار اعمالی ثابت، باعث افزایش فشردگی خاک گردد. همچنین افزایش بار اعمالی بر روی چرخ در فشار باد و سطح مقطع ثابت چرخ می تواند باعث افزایش فشردگی خاک شود. افزایش بار اعمالی روی چرخ می تواند باعث افزایش فشردگی خاک در عمق های پایین تر از ۲۰ سانتی متر شده که می تواند باعث ایجاد مشکلات جدی برای ساختمان خاک و رشد محصول شود.





شکل ۳-۲- تغییرات فشردگی خاک با عمق خاک در اثر افزایش بار اعمال شده بر روی چرخ  
(Sohne, 1958)

### ۳-۲- نقش رطوبت در ایجاد فشردگی خاک

همان طور که شکل ۳-۱ نشان داده شده است، متوسط جرم مخصوص ظاهری خاک با افزایش رطوبت، افزایش پیدا می کند ولی در رطوبت ۱۷-۱۴ درصد مقدار این افزایش بیشتر است. برای یک نیروی تراکمی معین، درصد رطوبت تقریباً ثابتی وجود دارد که حداکثر تراکم را به وجود می آورد. این درصد رطوبت خاک، رطوبت بهینه نامیده می شود. به عبارت دیگر، برای یک مقدار نیروی تراکمی معین، درصد رطوبت بهینه ای وجود دارد که در آن جرم مخصوص ظاهری خاک یا فشردگی آن به حداکثر می رسد.

همان طور که در شکل ۳-۱ مشاهده می شود، میزان جرم مخصوص ظاهری خاک در تردهای مختلف در رطوبت حدود ۱۴-۱۲ درصد ناچیز بوده ولی در رطوبت های بالاتر و به ویژه در رطوبت ۱۷-۱۴ درصد، تفاوت در جرم مخصوص ظاهری خاک در تردهای مختلف بیشتر است که نشان دهنده تأثیر درصد رطوبت خاک بر روی جرم مخصوص ظاهری خاک است. همچنین با افزایش میزان تردد، جرم مخصوص ظاهری خاک نیز افزایش یافته است.

برای اینکه خاک فشرده شود، می باید موقعیت نسبی ذرات تغییر نماید. به این معنی که ذرات از محل خود حرکت کرده و با لغزش و دوران در جهت تقریباً موازی با هم قرار گیرند تا حجم کمتری اشغال شود و تراکم صورت پذیرد. هر چه خاک خشک تر باشد حرکت دادن ذرات و در حقیقت لغزاندن آنها روی همدیگر مشکل تر است و با اعمال نیروی بسیار زیادتری انجام

می پذیرد. حال اگر مقداری آب به توده خاک اضافه شود ضخامت لایه آب در اطراف ذرات افزایش یافته و گرانبوی این آب کمتر می شود و بنابراین گوشه های ذرات با سهولت بیشتری در امتداد لغزیده و به وضعیت موازی با هم قرار می گیرند. می توان بیان نمود که افزایش آب و در نتیجه افزایش ضخامت لایه آب در اطراف ذرات رس، مانند روغنی است که در محل تماس دو سطح فلزی باعث سهولت لغزش این دو روی هم گردیده و باعث متراکم شدن ذرات روی یکدیگر خواهد شد. اما باید توجه داشت که این افزایش آب تا حد معینی باعث بهتر متراکم شدن ذرات خاک می گردد. زیرا چنانچه این مقدار آب از حد معینی بگذرد، آب موجود در اطراف ذرات به حالت آب کاملاً آزاد درآمده و حفره های بین ذرات را پر و قسمت اعظم انرژی تراکمی را می گیرد و چون نفوذپذیری خاک کم است خروج آب تحت فشار امکان پذیر نبوده و در عمل تراکم صورت نمی گیرد. از طرف دیگر از آنجاکه آب خود حجمی دارد، جای مقداری از ذرات خاک را گرفته و در نتیجه در حجم معینی از خاک باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می شود.

جهت کاهش میزان فشردگی خاک حاصل از عبور تراکتور و ماشین های کشاورزی بهتر است از تردد ماشین های کشاورزی در رطوبت زیاد خاک اجتناب نمود (شکل ۳-۱). نتایج پژوهش ها نشان می دهد که کمترین تأثیر فشردگی خاک مزرعه هنگامی است که عبور تراکتور در شرایط رطوبتی کم خاک صورت گیرد. انجام عملیات شخم در رطوبت زیاد خاک و عبور ماشین های حمل بار با وزن های زیاد در زمان برداشت محصول، به ویژه در حالتی که خاک نیز مرطوب باشد باعث افزایش میزان فشردگی خاک می شود.

### ۳-۳- انجام عملیات شخم با گاوآهن برگردان دار در یک عمق ثابت

باتوجه به اینکه عملیات شخم برای تهیه بستر بذر در اکثر نقاط ایران با گاوآهن برگردان دار انجام می شود و عمق شخم نیز معمولاً ثابت است، طی سالیان باعث فشرده شدن خاک زیرین عمق کار گاوآهن برگردان دار شده و در نهایت پس از چند سال، سخت لایه های در عمق زیرین عمق شخم ایجاد می شود. این سخت لایه معمولاً در عمق حدود ۲۰ تا ۲۵ سانتی متری خاک مزارع تشکیل می شود. از همین رو، برای جلوگیری از تشکیل سخت لایه فوق بهتر است عمق شخم به طور سالیانه تغییر یابد.

### ۳-۴- وضعیت طبیعی خاک

در بعضی از مناطق کشاورزی یک لایه متراکم شده خاک به طور طبیعی در عمق معینی از خاک وجود دارد که مربوط به نحوه تشکیل خاک در میلیون‌ها سال قبل است. این سخت لایه ممکن است در بعضی از مزارع نزدیک به سطح خاک بوده و باعث ایجاد مشکلات خاصی در فعالیت‌های زراعی و کاهش عملکرد محصول شود.

### ۳-۵- انتقال ذرات رس از لایه سطحی به عمق خاک

در اثر آبیاری محصول و همچنین بارندگی، آب در داخل خاک نفوذ کرده و ضمن پیشروی به اعماق خاک، به مرور زمان ذرات ریز رس را نیز به همراه خود انتقال داده و باعث پرشدن خلل و فرج در عمق خاک می‌شود. از طرف دیگر با افزایش درصد رس در اعماق خاک، شرایط برای متراکم شدن این لایه‌ها بیشتر مهیا می‌شود. جهت کاهش انتقال ذرات رس از لایه سطحی به عمق خاک می‌توان موارد زیر را مد نظر قرار داد:

- جلوگیری از تخریب ساختمان خاک

- استفاده بهینه از آب آبیاری

- افزایش درصد ماده آلی خاک

ایجاد ذرات ریز خاک توسط عملیات خاک‌ورزی نشان دهنده تخریب ساختمان خاک است و درصد ماده آلی خاک نیز افزایش می‌یابد. ایجاد ذرات ریز خاک و آبیاری مزرعه (به ویژه با حجم زیاد) باعث حرکت ذرات ریز رس به اعماق خاک شده و شرایط را جهت تراکم بیشتر خاک فراهم می‌کند.

### ۳-۶- عدم رعایت تناوب زراعی

رعایت تناوب زراعی باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک می‌شود. در صورت عدم رعایت تناوب زراعی و استمرار در کاشت یک محصول خاص، عمق نفوذ ریشه ثابت بوده و پس از پوسیده شدن ریشه‌ها، منافذ حاصل از پوسیدگی ریشه‌ها در یک عمق خاص از خاک ایجاد شده که باعث کاهش فشردگی خاک آن لایه می‌شود. این در حالی است که در صورت رعایت تناوب زراعی و استفاده از گیاهانی که عمق نفوذ ریشه مختلفی دارند، فشردگی خاک در عمق بیشتری از خاک کاهش می‌یابد.

## فصل چهارم

### اثرات منفی فشردگی خاک

در اثر فشردگی خاک، خلل و فرج آن کاهش یافته و ابتدا خروج هوا و سپس خروج آب روی می‌دهد. از نظر کشاورزی زمانی که مجموعه خلل و فرج خاک آن قدر کم شود که تهویه محدود شده و نفوذ ریشه کند گردد، لایه‌های خاک متراکم می‌شود. فشردگی خاک در مزارع کشاورزی، اثرات منفی را به همراه خواهد داشت که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

#### ۴-۱- کاهش خلل و فرج خاک

در اثر فشردگی خاک‌های زراعی و متراکم شدن آنها، درصد خلل و فرج خاک کاهش یافته و در نتیجه میزان تهویه خاک نیز کاهش می‌یابد. این اثر منفی می‌تواند باعث تغییر در فعالیت میکروارگانیزم‌های خاک از حالت هوازی به حالت بی‌هوازی شود.

#### ۴-۲- کاهش نفوذ آب در خاک

با افزایش فشردگی خاک، درصد خلل و فرج خاک کاهش و در نتیجه میزان نفوذ آب در خاک نیز کاهش می‌یابد. این عامل باعث کاهش ذخیره رطوبتی خاک و همچنین افزایش روان آب در سطح خاک می‌شود (Chyba et al., 2014).

#### ۴-۳- کاهش رشد ریشه

در اثر فشردگی خاک، درصد خلل و فرج خاک کاهش می‌یابد. بنابراین رشد ریشه گیاه محدود شده و برای افزایش رشد طولی و عرضی خود نیاز به صرف انرژی بیشتری نسبت به

حالت عادی دارد و در صورتی که خاک خیلی فشرده شده باشد، رشد ریشه متوقف شده و قادر به عبور از لایه متراکم شده نمی باشد.

#### ۴-۴- از بین رفتن جانداران خاکزی

در بین جانداران خاکزی، احتمالاً کرم خاکی مهم ترین آنها جهت حفظ ساختمان و حاصل خیزی خاک است. زیرا آنها می توانند در خاک حرکت کنند و به طور فیزیکی خاک را انتقال داده و تونل هایی را در داخل خاک ایجاد نمایند. در اثر فشردگی خاک حاصل از عملیات زراعی، تونل های کرم های خاکی خسارت دیده و تعدادی از آنها نیز از بین می روند. در فقدان کرم های خاکی، حاصل خیزی فیزیکی خاک کاهش پیدا می کند. بعضی از کرم های خاکی قادرند در سخت لایه حاصل از کارکرد سالیانه گاواهن در یک عمق ثابت خاک، نفوذ نمایند. این توانایی به ویژه از آن جهت مهم است که اجازه می دهد تا ریشه گیاهان در تونل های ایجاد شده رشد نموده و بتوانند سریع تر از میان لایه های سخت خاک عبور نمایند و خود را به خاک مناسب تر برسانند. در ضمن لاشه کرم های خاکی می توانند باعث افزایش ماده آلی خاک شوند.

#### ۴-۵- کاهش نیتروژن قابل جذب گیاه

با افزایش میزان فشردگی خاک، درصد خلل و فرج خاک کاهش یافته و با توجه به کاهش تهویه خاک، شرایط غیرهوازی جایگزین شرایط هوازی می شود. بنابراین عمل دی نیتریفیکاسیون به وسیله باکتری های غیرهوازی افزایش یافته و باعث خروج نیتروژن خاک به صورت گاز  $N_2$  می گردد. یکی از دلایل کمبود نیتروژن مورد نیاز گیاه در مکان هایی که چرخ های تراکتور عبور کرده و در حقیقت عمل فشردگی خاک صورت گرفته، افزایش میزان دی نیتریفیکاسیون و خروج نیتروژن خاک به صورت گاز  $N_2$  است. مصرف زیاد کود نیتروژن در کشور ما و جهان را می توان به گونه ای به عمل دی نیتریفیکاسیون مرتبط دانست. تقریباً به ازاء هر ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن داده شده در آمریکا، ۵۰ درصد آن در محصول برداشت شده، ۲۵ درصد آن به همراه آب شسته شده، ۵ درصد آن به همراه بارندگی جاری شده و ۲۰ درصد دیگر تلفات ناشی از عمل دی نیتریفیکاسیون بوده است.

نتایج پژوهش های انجام شده در ایران نشان می دهد که به طور میانگین میزان کود اوره مصرفی در مزارع گندم شهرستان های استان فارس که خاک آنها فشرده بوده، بیشتر است. در

مزارع دارای فشردگی خاک به طور میانگین در حدود ۴۷ کیلوگرم در هکتار کود اوره بیشتر مصرف شده است (جدول ۴-۱). این نتایج نشان می‌دهد که حدود ۱۲ درصد از تلفات کود اوره مصرفی در مزارع گندم ناشی از عمل دی‌نیتریفیکاسیون بوده است.

جدول ۴-۱- وضعیت میزان کود اوره مصرفی در مزارع گندم دارای فشردگی خاک در استان فارس (زارع و همکاران، ۱۳۸۳)

ردیف	تراکم خاک	تعداد مزارع بررسی شده	میانگین کود اوره مصرفی (کیلوگرم در هکتار)
۱	دارد	۸۳	۴۰۱/۸
۲	ندارد	۸۴	۳۵۴/۹

#### ۴-۶- تخریب محیط زیست

فشردگی خاک می‌تواند تأثیرات منفی بر محیط زیست داشته باشد که به طور اختصار به تعدادی از آنها اشاره می‌شود:

#### ۴-۶-۱- اثر گلخانه‌ای زمین

فعالیت‌های کشاورزی بر روی خروج گازهای مؤثر در اثر گلخانه‌ای زمین همانند دی‌اکسیدکربن، متان و اکسیدهای نیتروژن تأثیر می‌گذارند. پیش‌بینی می‌شود خروج گازهای فوق از سطح زمین در تغییرات آب و هوایی مؤثر بوده و باعث گرم شدن بیشتر زمین شوند. به طور کلی در اثر فعالیت‌های کشاورزی، خروج گازهای مؤثر در اثر گلخانه‌ای زمین ۱۴ درصد افزایش داشته و این رقم در مورد قطع درختان جنگلی در حدود ۹ درصد بوده است. یکی از گازهای مؤثر در اثر گلخانه‌ای زمین گاز دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) است که در حدود نیمی از اثر گلخانه‌ای را به آن نسبت می‌دهند. از طرف دیگر در اثر فعالیت‌های کشاورزی به ویژه مصرف سوخت‌های فسیلی در موتورهای دیزل کشاورزی، میزان تولید دی‌اکسیدکربن افزایش می‌یابد. به خصوص در زمانی که خاک متراکم است، سوخت مصرفی بیشتر و در نهایت تولید گازهای مضر به اتمسفر نیز بیشتر می‌شود (صلح جو و لغوی، ۱۳۷۷).

از دیگر گازهای مؤثر در اثر گلخانه‌ای زمین گاز متان ( $CH_4$ ) است که تأثیر آن بر روی اثر

گلخانه‌های زمین ۲۰ برابر بیشتر از تأثیر گاز دی‌اکسیدکربن است. ۱۸ درصد از اثر گلخانه‌ای زمین مربوط به گاز متان است. تولید گاز متان در خاک به وسیله باکتری‌های غیرهوازی انجام می‌شود؛ بنابراین در شرایط رطوبتی بالا و کاهش خلل و فرج ناشی از فشردگی خاک، خروج این گاز از خاک بیشتر می‌شود. به طوری که در اثر فشردگی خاک، تا حدود ۵۲ درصد خروج گاز متان به اتمسفر جهانی بیشتر می‌شود. اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) وارد شده به اتمسفر به صورت باران‌های اسیدی به سطح زمین بر می‌گردند. فشردگی خاک به افزایش مصرف سوخت در عملیات زراعی منتهی شده و در نهایت باعث افزایش خروج گازهای اکسید نیتروژن می‌شود.

#### ۴-۶-۲- آلودگی آب‌های سطحی

فشردگی خاک روی هر دو عامل مقدار و شرایط ایجاد آبشویی در مزارع کشاورزی مؤثر است و علت اصلی آن نیز کاهش نفوذپذیری آب در خاک به دلیل افزایش فشردگی خاک است. در اثر آبشویی خاک، آب گل آلوده شده و باعث آلودگی آب‌های سطحی می‌شود که نتیجه آن کاهش مقدار اکسیژن محلول در آب و در نهایت مرگ بسیاری از جانداران آبی به خصوص ماهی‌ها است. با افزایش میزان فشردگی خاک، آبشویی بیشتر و آلودگی آب‌های سطحی نیز بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که با افزایش میزان آبشویی در مزارع کشاورزی، میزان ورود نیتروژن و سموم مصرف شده در کشاورزی نیز به آب‌های سطحی بیشتر شده و باعث آلودگی بیشتر آب‌های فوق می‌شود.

#### ۴-۶-۳- آلودگی آب‌های زیرزمینی

پژوهش‌های انجام شده در کشورهای مختلف نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی در بعضی از مناطق آلوده به نیترات است که علت آن مصرف بی رویه کود ازت می‌باشد. در جایی که ریشه گیاه به علت فشردگی خاک نمی‌تواند نفوذ مناسبی داشته باشد، نیترات اضافی خاک به آب‌های زیرزمینی انتقال یافته و باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. از طرف دیگر در اثر فشردگی خاک، میزان آبشویی در مزارع کشاورزی افزایش یافته و درصدی از این آب‌های سطحی که حامل نیتروژن و سموم مصرفی می‌باشند به مکان‌هایی که نفوذپذیری آب در خاک خوب است، منتقل شده و سپس به عمق خاک نفوذ می‌نماید که پس از رسیدن به آب‌های زیرزمینی باعث آلودگی آنها می‌شود.



#### ۴-۷- رشد نامناسب غده‌های زیرزمینی

در اثر فشردگی خاک و ایجاد سخت لایه در عمق خاک، نفوذ ریشه محدود شده و باعث می‌شود تا غده‌های زیرزمینی از لحاظ طولی و عرضی، رشد مناسبی نداشته و در نهایت غده‌های بدشکلی ایجاد گردد که ضمن کاهش وزن غده‌ها، بازپسندی آنها نیز کاهش یافته و در نهایت باعث کاهش ارزش اقتصادی آن می‌گردد. در محصول چغندر قند، ریشه‌ها در اثر فشردگی خاک چند ریشه‌ای شده و طول و قطر ریشه آن کاهش یافته و در نهایت درصد قند تولیدی آن نیز کاهش می‌یابد. لذا در محصولات زراعی که دارای غده‌های زیرزمینی است، مشکل فشردگی خاک را باید با جدیت بیشتری پیگیری نمود.

#### ۴-۸- افزایش شیوع بیماری‌های قارچی

با افزایش میزان فشردگی خاک، نفوذپذیری آن کاهش یافته و تخلیه آب سطحی با تأخیر انجام می‌شود. این عامل باعث افزایش رطوبت سطحی خاک می‌شود. با افزایش میزان رطوبت سطحی خاک، شرایط رطوبتی مناسبی برای تکثیر و انتشار بیماری‌های قارچی ایجاد می‌گردد که در نهایت می‌تواند سبب سرعت بخشیدن به آلوده شدن مزرعه به بیماری‌های قارچی شود. لذا در مزارعی که بیماری‌های قارچی در آن شدت زیادی دارد، نیاز است تا وضعیت فشردگی خاک آن مزرعه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

#### ۴-۹- کاهش تولید محصول

کلیه اثرات منفی حاصل از فشردگی خاک که در قبل بیان شد، هر کدام به نحوی بر روی رشد و نمو محصولات زراعی تأثیر گذاشته و در نهایت باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (جدول ۴-۲). لذا نیاز است تا راه‌های تشخیص فشردگی خاک را مورد بررسی قرار داده و مزارعی را که دارای مشکل فشردگی خاک هستند مشخص نموده و جهت رفع این مشکل اقدامات لازم را انجام داد.

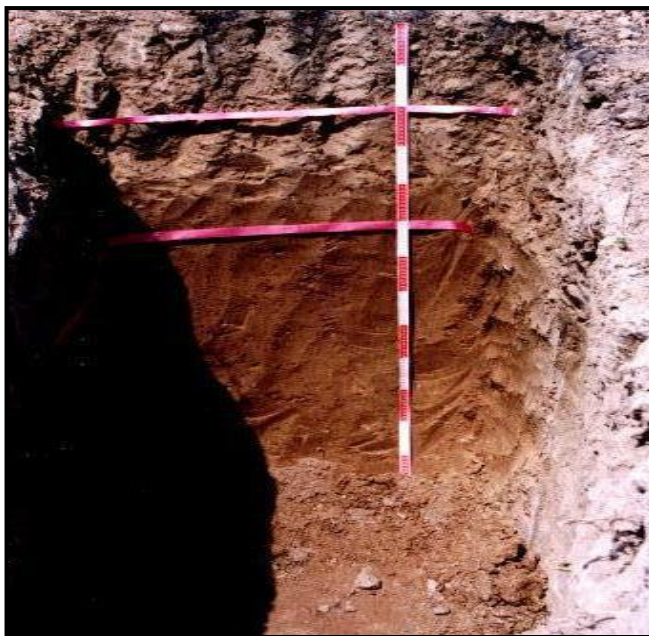
جدول ۴-۲- تاثیر فشردگی خاک بر کاهش عملکرد در محصولات مختلف (بی نام، ۱۳۷۵)

درصد کاهش عملکرد	میزان محصول در خاک فشرده (تن در هکتار)	میزان محصول در خاک غیر فشرده (تن در هکتار)	نوع خاک	نوع محصول
۲۹/۶	۴/۰۹	۵/۷۷	رسی	گندم
۵۳/۱	۲/۲۳	۷/۷۵	شنی	
۴۴/۳	۲/۹۶	۵/۳۲	رسی	
۴۹/۱	۱/۷۷	۳/۴۹	شنی	جو بهاره
۵۱/۹	۱/۵۱	۳/۱۲	لومی شنی	
۶۵/۴	۱/۲۶	۲/۶۴	لومی شنی	
۵۸/۹	۱/۹۱	۴/۶۴	رسی	یولاف بهاره
۴۸/۹	۲/۲۸	۴/۴۷	شنی	
۵۸/۸	۲۳/۵۹	۵۷/۱۹	لومی شنی	
۵۷/۵	۱۷/۳۲	۴۰/۷۵	شنی لومی	
۲۵	۹	۱۲	شنی	چغندر قند
۵۷/۵	۱۷/۳۲	۴۰/۷۵	سیلتهی رسی لومی	
۴۵/۷	۱۴/۶۱	۲۶/۳۶	رسی	
۵۷/۱	۱۱/۴۲	۲۶/۶۱	لای-لوم	سیب زمینی
۶۴/۷	۰/۹۳	۲/۶۴	رسی	
۶۷/۵	۰/۸۳	۲/۶۲	شنی	
۶۶/۷	۰/۸۸	۲/۶۴	شنی لومی	نخود فرنگی
۴۱/۵	۱۵/۸	۲۷	سیلتهی رسی لوم	
۲۸/۶	۲۲/۲۹	۳۱/۶۳	لومی پیت	پیاز

## فصل پنجم

### نحوه تشخیص فشردگی خاک

جهت تعیین میزان فشردگی خاک در مزارع (شکل ۵-۱)، راه‌های مختلفی وجود دارد که در بین آنها پنج روش تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک و شاخص مخروط خاک (جهت عمق‌های صفر تا ۵۰ سانتی متری خاک)، حفر پروفیل در خاک، القاء الکترومغناطیس و روش‌های تجربی جهت تشخیص اولیه فشردگی خاک بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۵-۱- نیم‌رخ خاک که در آن سخت لایه موجود در عمق ۵۰-۲۰ سانتی متری خاک به صورت دو نوار افقی، نشان داده شده است

## ۱-۵ - جرم مخصوص ظاهری خاک

به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک از سیلندره‌های نمونه‌گیری<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. برای نفوذ این سیلندره‌های توخالی در خاک، از یک سیلندر توخالی مادر استفاده می‌شود که روی سیلندر توخالی مورد نظر قرار گرفته و از طریق ضربات چکش به داخل خاک نفوذ می‌کند. پس از بیرون آوردن سیلندر تو خالی از خاک، سطح بالا و پایین آن از طریق یک کارد صاف شده و خاک موجود در سیلندر به عنوان نمونه دست نخورده در نظر گرفته می‌شود. به کمک این سیلندره‌های نمونه‌گیری، نمونه‌های دست نخورده از عمق‌های مختلف خاک تهیه شده و سپس نمونه‌ها به مدت حداقل ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون خشک و سپس توزین می‌گردد. با کمک رابطه زیر جرم مخصوص ظاهری خاک محاسبه می‌شود (صلح جو، ۱۳۹۳):

$$BD = \frac{W_d}{V} \quad (1-5)$$

که در آن،

$BD$  = جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر متر مکعب)؛  $W_d$  = جرم خاک خشک (گرم)؛ و

$V$  = حجم کل خاک داخل سیلندر نمونه‌گیری (سانتی‌متر مکعب) است.

لازم به ذکر است که با افزایش فشردگی خاک، میزان جرم مخصوص ظاهری خاک نیز

افزایش می‌یابد.

## ۲-۵ - شاخص مخروطی خاک

یکی از راه‌های تشخیص فشردگی خاک، استفاده از دستگاه نفوذسنج مخروطی است (شکل

۲-۵) که به علت ساده بودن و استفاده آسان و راحت از آن، گسترش وسیعی در سطح جهان

داشته است. دستگاه نفوذسنج مخروطی یک وسیله جهت اندازه‌گیری مقاومت خاک است

(Odey et al., 2014). اگر نیروی وارده از طرف خاک بر سطح مقطع مخروط تقسیم شود،

---

1- Core sampler

کمیت حاصل را شاخص مخروطی خاک<sup>۱</sup> می گویند و آن را با CI نشان می دهند. واحد شاخص مخروطی خاک کیلو پاسکال (kPa) یا مگا پاسکال (MPa) می باشد (ASAE, 1995).

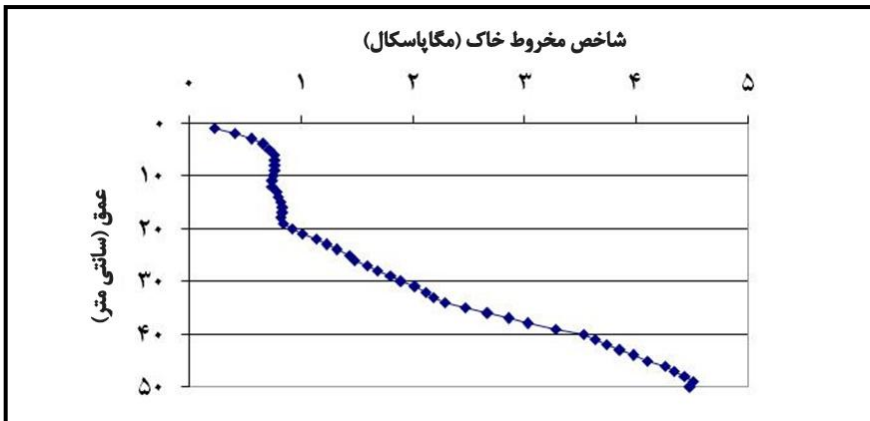
جهت تعیین میزان فشردگی خاک در عمق های مختلف، معمولاً از دستگاه نفوذسنج مخروطی تا عمق ۵۰ سانتی متری (بیشترین عمق کارکرد دستگاه) استفاده می شود (شکل ۳-۵). پس از محاسبه شاخص مخروطی خاک و رسم نمودار آن با توجه به عمق خاک، وضعیت فشردگی خاک در عمق های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. افزایش میزان شاخص مخروطی خاک، نشان دهنده افزایش فشردگی خاک است (شکل ۴-۵). از آنجا که میزان شاخص مخروطی خاک (CI) متأثر از رطوبت خاک است و با افزایش رطوبت خاک میزان آن کاهش می یابد (شکل ۴-۵). بنابراین بهتر است تا از دستگاه نفوذ سنج مخروطی در رطوبت بهینه<sup>۲</sup> استفاده شود. می توان این رطوبت بهینه خاک را حدود ۹۰-۸۰ درصد ظرفیت مزرعه ای خاک (FC) در نظر گرفت (صلح جو و لغوی، ۱۳۷۷). به منظور تفسیر اعداد مربوط به شاخص مخروطی و جرم مخصوص ظاهری خاک نیاز به کارشناسان متخصص فشردگی خاک است. از همین رو، معمولاً این اندازه گیری ها توسط کارشناسان متخصص انجام گرفته و نتایج آن نیز توسط آنها مورد تفسیر و ارزیابی قرار می گیرد.



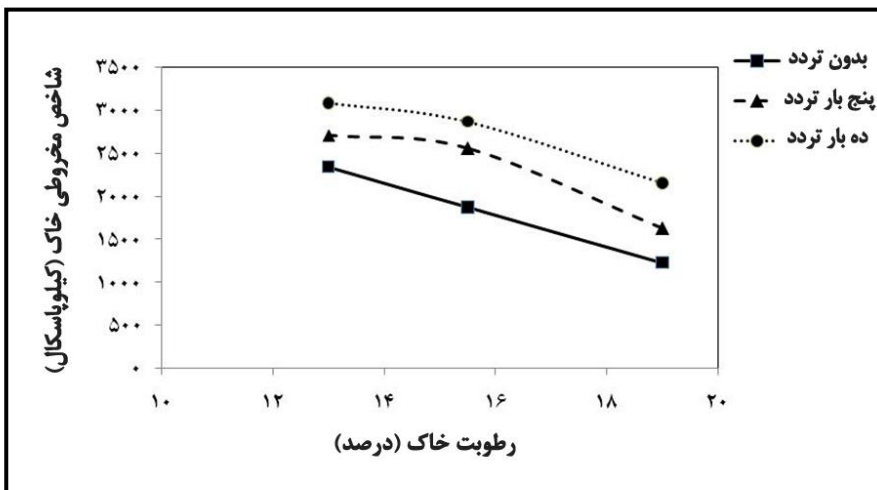
شکل ۳-۵- دستگاه نفوذ سنج مخروطی

1- Cone Index

2- Optimum moisture



شکل ۳-۵- تغییرات شاخص مخروطی خاک نسبت به عمق خاک قبل از انجام عملیات خاک ورزی



شکل ۴-۵- تغییرات شاخص مخروطی خاک نسبت به رطوبت خاک (صلح جو، ۱۳۷۶)

### ۳-۵- حفر پروفیل در خاک

یکی دیگر از راه‌های تشخیص فشردگی خاک، حفر پروفیل در خاک است (شکل ۵-۱). حفر پروفیل توسط کارگر و به ابعاد حدود یک متر عرض، دو متر طول و یک متر عمق انجام می‌شود. سپس از طریق یک چکش به لایه‌های مختلف خاک در عمق‌های مختلف ضربه وارد کرده و بر اساس نیروی وارده به دست (حاصل از عکس‌العمل ضربه چکش به خاک) میزان

فشردگی خاک در عمق‌های مختلف تعیین می‌گردد. جهت تشخیص فشردگی خاک در این روش نیاز به کارشناس با تجربه می‌باشد.

#### ۵-۴- القاء الکترومغناطیس

از دستگاه‌های جدید ساخته شده برای اندازه‌گیری فشردگی خاک می‌توان به دستگاه EM38 (شکل ۵-۴) اشاره نمود که از خاصیت هدایت الکتریکی خاک جهت تعیین میزان فشردگی خاک استفاده می‌نماید. اصول کار این دستگاه به این گونه است که از طریق ایجاد یک میدان مغناطیسی ناشی از سیم پیچ‌های قرار گرفته در دو طرف دستگاه و نفوذ این جریان الکترومغناطیس در داخل خاک، میزان فشردگی خاک در عمق‌های مختلف ارزیابی می‌گردد. از این وسیله جهت اندازه‌گیری فشردگی خاک در حالت بدون تماس با خاک استفاده می‌شود. نوع جدیدتر این دستگاه قابلیت نصب در قسمت عقب ماشین یا تراکتور را داشته و می‌تواند به صورت پیوسته و سریع‌تر وضعیت فشردگی خاک را در عمق‌های مختلف تعیین نماید (شریفی و جوادی، ۱۳۸۶).



شکل ۵-۴- بررسی فشردگی خاک به وسیله دستگاه EM38 (شریفی و جوادی، ۱۳۸۶)



## ۵-۵- روش‌های مشاهده‌ای جهت تشخیص اولیه فشردگی خاک

روش‌های پیشین تعیین فشردگی خاک به صورت علمی بوده و دقت آن نیز زیاد می‌باشد ولی نیاز به دستگاه‌هایی همانند دستگاه نفوذسنج مخروطی یا دستگاه EM38 جهت اندازه‌گیری آنها می‌باشد. در صورتی که در روش‌های مشاهده‌ای زیر که با مشاهدات داخل مزرعه انجام می‌شود، احتمال وجود فشردگی خاک در مزرعه را می‌توان پیش‌بینی نمود و سپس با استفاده از روش‌های علمی وجود یا عدم وجود و همچنین موقعیت سخت لایه را تعیین نمود.

### ۵-۵-۱- باقی ماندن آب بر روی سطح مزرعه

در صورتی که نفوذ آب در خاک مناسب نباشد، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا آب در داخل خاک نفوذ کند. برای مثال اگر در دو مزرعه کنار هم، در یکی آب به راحتی در خاک نفوذ کند و در دیگری آب با تأخیر نفوذ کند، احتمالاً مزرعه‌ای که آب با تأخیر در آن نفوذ می‌کند دارای مشکل فشردگی خاک بوده و بهتر است از لحاظ فشردگی خاک مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گیرد.

### ۵-۵-۲- زرد شدن محصول

در صورتی که رنگ گیاه در قسمت‌هایی و یا اکثریت مزرعه زرد رنگ شده باشد (به طور غیر طبیعی)، احتمالاً مزرعه فوق دارای فشردگی خاک است. لذا بهتر است این گونه مزارع نیز از لحاظ فشردگی خاک و وجود سخت لایه در عمق خاک مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند.

### ۵-۵-۳- شکل نامناسب غده‌های زیرزمینی

در صورتی که غده‌های زیرزمینی دارای شکل‌های مرسوم نبوده و تغییر شکل نامناسب پیدا کرده و یا کوچک باقی مانده باشند (مثل سیب زمینی) و یا ریشه‌های اصلی آنها به صورت چند ریشه‌ای و ابعاد غده‌ها نیز کوچک‌تر از حالت مرسوم باشد (مثل چغندر قند)، بهتر است مزرعه فوق از لحاظ فشردگی خاک مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

### ۵-۵-۴- عدم نفوذ مناسب ادوات خاک‌ورزی در خاک

در صورتی که راننده تراکتور در زمان شخم زدن دقت نماید، متوجه می‌شود که با وجود سالم بودن گاوآهن برگردان‌دار و تیغه‌های آن، گاوآهن به خوبی در خاک نفوذ نکرده و در یک عمق خاص، ثابت می‌ماند و اگر هم بیشتر از عمق شخم مرسوم نفوذ کند، یک مرتبه قدرت مورد نیاز تراکتور افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند نشان دهنده وجود یک سخت لایه به ویژه سخت لایه حاصل از کارکرد گاوآهن در یک عمق ثابت، در چند سال متوالی باشد. در این مورد نیز بهتر است مزرعه از لحاظ فشردگی خاک مورد بررسی قرار گیرد.

### ۵-۵-۵- کاهش عمق نفوذ ریشه

در صورتی که ریشه گیاه به خوبی در خاک نفوذ نکرده و عمق نفوذ آن کمتر از عمق نفوذ مرسوم باشد، احتمالاً ریشه گیاه به یک لایه سخت برخورد کرده که از رشد طولی ریشه جلوگیری می‌نماید. بنابراین بهتر است این گونه مزارع از لحاظ فشردگی خاک مورد بررسی قرار گیرد.

### ۵-۵-۶- کاهش عملکرد محصول

همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، فشردگی خاک باعث تأثیرات منفی در خاک می‌شود که این تأثیرات در نهایت روی رشد گیاه اثر گذاشته و باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود. لذا در صورتی که عملکرد محصول مزرعه‌ای مناسب نباشد، ممکن است یکی از عوامل ایجادکننده آن وجود فشردگی خاک در مزرعه باشد که باید از لحاظ علمی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد (جدول ۴-۲).

## فصل ششم

### راه کارهای جلوگیری از ایجاد فشردگی خاک

از جمله مهم ترین راه کارهای عملی جلوگیری از افزایش فشردگی خاک، می توان به موارد کاهش تردد تراکتور و ماشین های کشاورزی در مزرعه، کاهش میزان وزن تراکتور و ماشین های کشاورزی تا حد امکان، کاهش تردد ماشین های کشاورزی در خاک مرطوب، کاهش فشار باد لاستیک تا حد امکان، استفاده از کودهای آلی، افزایش سطح تماس چرخ های تراکتور با خاک، باقی گذاشتن بقایای گیاهی در سطح خاک، جلوگیری از لغزش بیش از حد چرخ های تراکتور، کنترل ترافیک در مزرعه، فعالیت کرم های خاکی و استفاده از گیاهانی با ریشه عمیق و زیرشکنی خاک اشاره نمود (Unger et al., 1994).

#### ۶-۱- کاهش تردد تراکتور و ماشین های کشاورزی در مزرعه

با افزایش تردد ماشین های کشاورزی در مزارع، فشردگی خاک افزایش می یابد (شکل ۵-۴)، لذا جهت کاهش فشردگی خاک، می توان تعداد تردد ماشین های کشاورزی در مزارع را کاهش داد و سیستم خاک ورزی را به سمت حداقل خاک ورزی و بدون خاک ورزی هدایت نمود. به ازاء هر بار عبور، خاک فشرده تر شده و این فشردگی خاک می تواند از سطح تا عمق خاک (با توجه به شرایط خاک و وزن ماشین مورد استفاده) افزایش یابد.

#### ۶-۲- کاهش میزان وزن تراکتور و ماشین های کشاورزی تا حد امکان

هر چقدر وزن تراکتور و ماشین های کشاورزی استفاده شده در مزارع بیشتر باشد، میزان فشردگی خاک نیز افزایش می یابد. در این خصوص باید به این نکته توجه نمود که با افزایش وزن تراکتور و ماشین های کشاورزی، میزان فشردگی خاک در عمق خاک نیز افزایش می یابد.

به عبارت دیگر با افزایش وزن و وسیله مورد نظر، فشردگی خاک از لایه‌های سطحی خاک به عمق خاک پیشرفت می‌کند. به عنوان مثال، زمانی که یک کامیون خالی جهت حمل و نقل چغندر قند وارد مزرعه می‌گردد، میزان فشردگی حاصل از آن بیشتر در سطح خاک متمرکز است ولی زمانی که این کامیون کاملاً پر شده و وزن آن افزایش می‌یابد، در اثر حرکت آن در مزرعه، خاک مزرعه بیشتر فشرده شده و اثر فشردگی آن تا عمق بیشتر از ۴۰ سانتی‌متر گسترش می‌یابد. بنابراین باید تا آنجا که ممکن است از عبور تراکتور و ماشین‌های کشاورزی با وزن زیاد در سطح مزارعه جلوگیری شود.

### ۶-۳- کاهش تردد ماشین‌های کشاورزی در خاک مرطوب

در صورتی که تراکتور و ماشین‌های کشاورزی در خاک مرطوب در سطح مزرعه تردد نمایند، اثر فشردگی خاک آنها بیشتر از حالتی است که همان وسیله در خاک خشک حرکت کند (Davies et al., 1993). از همین رو، بهتر است تا آنجا که مقدور است از تردد ماشین‌های کشاورزی در خاک مرطوب اجتناب ورزید.

### ۶-۴- کاهش فشار باد لاستیک تا حد امکان

افزایش فشار باد لاستیک باعث کاهش سطح تماس لاستیک با زمین شده که می‌تواند میزان فشردگی خاک حاصل از عبور وسیله فوق را بیشتر نماید. بنابراین، بهتر است فشار باد لاستیک تراکتور با توجه به دستورالعمل فنی آن تنظیم شود و از افزایش بیشتر فشار باد لاستیک‌ها، جلوگیری شود.

### ۶-۵- استفاده از کودهای آلی

با افزایش میزان درصد ماده آلی خاک، میزان فشردگی خاک حاصل از تردد ماشین‌های کشاورزی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه درصد ماده آلی خاک‌های زراعی ایران به طور معمول کمتر از یک درصد است، لذا پیشنهاد می‌گردد تا آنجا که برای کشاورزان امکان پذیر است، مصرف کودهای آلی را افزایش داده تا ضمن کاهش تأثیر فشردگی خاک ناشی از تردد ماشین‌های کشاورزی، باعث بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک گردند.

## ۶-۶- افزایش سطح تماس چرخ‌های تراکتور با خاک

هر چقدر میزان سطح تماس چرخ‌های تراکتور با خاک بیشتر باشد، نیروی حاصل از وزن تراکتور، روی سطح بیشتری توزیع شده و در نهایت باعث کاهش اثر فشردگی خاک می‌گردد. بنابراین جهت کاهش اثر فشردگی خاک حاصل از عبور تراکتور و ماشین‌های کشاورزی، می‌توان تعداد و یا عرض لاستیک‌های مورد استفاده را افزایش داد. در صورت افزایش قطر لاستیک‌های مورد استفاده نیز، فشردگی خاک حاصل از عبور وسیله فوق کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش قطر لاستیک‌ها، سطح تماس چرخ‌ها با خاک بیشتر شده و در نتیجه اثر آن بر فشردگی خاک کاهش می‌یابد.

## ۶-۷- باقی گذاشتن بقایای گیاهی در سطح خاک

در صورتی که بقایای گیاهی در سطح خاک قرار گیرد، میزان فشردگی خاک در اثر تردد تراکتور و ماشین‌های کشاورزی بر روی بقایای گیاهی و افزایش سطح تماس و توزیع بار وارده از طرف تراکتور و ماشین‌های کشاورزی به خاک، کاهش می‌یابد. لذا بهتر است حداقل مقداری از بقایای گیاهی در سطح خاک باقی بماند تا ضمن کاهش اثر فشردگی خاک حاصل از عبور تراکتور و ماشین‌های کشاورزی، از تابش مستقیم نور خورشید بر سطح خاک نیز جلوگیری به عمل آمده و رطوبت خاک حفظ گردد. همچنین باقی گذاشتن مقداری از بقایای گیاهی بر سطح خاک می‌تواند از فرسایش‌های بادی و آبی خاک نیز جلوگیری نماید.

## ۶-۸- جلوگیری از لغزش بیش از حد چرخ‌های تراکتور

میزان لغزش چرخ‌های تراکتور در فشردگی خاک مؤثر است، به طوری که با افزایش درصد لغزش چرخ‌های تراکتور، میزان فشردگی خاک نیز افزایش می‌یابد. بهتر است درصد لغزش چرخ‌های تراکتور در محدوده مناسب آن (۱۵-۱۰ درصد) باشد و از افزایش بیشتر آن اجتناب گردد.

## ۶-۹- کنترل ترافیک در مزرعه

تردد تراکتورها در سطح مزرعه باعث افزایش فشردگی خاک می‌گردد. جهت کاهش

فشردگی خاک در سطح مزرعه می‌تواند یک نواحی خاصی از مزرعه را جهت عبور تراکتور در نظر گرفت تا به جای اینکه تمام مزرعه تحت تأثیر فشردگی خاک قرار گیرد، فقط نواحی خاصی متراکم شوند. لازم به ذکر است که در این روش در ناحیه‌ای که تردد در آن بیشتر است، خاک فشرده‌تر می‌شود. از این روش می‌توان برای کاشت بر روی پشته‌های ثابت و دائم استفاده نمود. به طوری که تردد تراکتور جهت انجام کلیه عملیات در داخل فارورترها انجام شده و در قسمت پشته‌ها در طول چندین سال، هیچگونه ترددی انجام نشده و ریشه گیاه به راحتی می‌تواند رشد نماید.

### ۶-۱۰- فعالیت کرم‌های خاکی

هر نوع فشردگی ناشی از انجام عملیات زراعی، به تونل‌های کرم خاکی خسارت رسانده و تعدادی از آنها را نیز می‌کشد. در فقدان کرم‌های خاکی حاصل خیزی فیزیکی خاک کاهش می‌یابد. نوعی کرم خاکی به نام *L. terrestries* می‌تواند به لایه‌های سخت حاصل از حرکت گاواهن در خاک نفوذ نماید. این توانایی از آن جهت مهم است که اجازه می‌دهد تا ریشه گیاهان در تونل‌های ایجاد شده رشد کنند و بتوانند سریع‌تر از میان لایه‌های سخت خاک عبور کرده و خود را به خاک مناسب‌تر برسانند. بنابراین افزایش تعداد کرم‌های خاکی در مزرعه باعث بهبود ساختمان خاک و کاهش فشردگی خاک می‌شود.

### ۶-۱۱- استفاده از گیاهانی با ریشه عمیق

بعضی از گیاهان زراعی به خوبی در عمق خاک نفوذ کرده و از لایه‌های سخت خاک نیز عبور می‌کنند. از جمله این گیاهان می‌توان به یونجه و شبدر شیرین اشاره نمود که قابلیت نفوذ به سخت لایه‌های حاصل از کارکرد سالبانه گاواهن برگردان در یک عمق ثابت را دارا می‌باشند. پس از نفوذ ریشه گیاهان فوق به عمق خاک و پوسیده شدن آنها، ریشه محصولات دیگر می‌تواند به راحتی از طریق منافذ باقی مانده از ریشه‌های قبلی، از سخت لایه خاک عبور نموده و محیط مناسب‌تری را جهت استفاده، در اختیار گیاه قرار دهند.

## ۶-۱۲- زیرشکنی خاک

جهت کاهش میزان فشردگی خاک می توان از زیرشکن<sup>۱</sup> استفاده نمود. زیرشکن جزء ادوات خاک ورزی اولیه می باشد که برای شکستن لایه های سخت و فشرده شده در عمق خاک و بهبود شرایط فیزیکی خاک، استفاده می شود. امروزه زیرشکن ها اغلب از نوع سوارشونده بوده و با توجه به عمق کار و قدرت تراکتور، تعداد شاخه های آن بین یک تا ۱۳ عدد متغیر است. زیرشکن های مرسوم در ایران معمولاً بین یک تا ۵ شاخه و اکثراً از نوع ۳ شاخه می باشند (شکل ۶-۱). لازم به ذکر است که با افزایش عمق کار و یا تعداد شاخه ها، قدرت مورد نیاز زیرشکن ها نیز افزایش می یابد. معمولاً با توجه به اینکه عمق بیشتر سخت لایه های تشکیل شده در محدوده ۲۵-۵۰ سانتی متر خاک است، لذا بهتر است از به کارگیری زیرشکن در عمق های بیشتر از ۵۰ سانتی متر و بدون نظر کارشناسان صاحب نظر خودداری گردد (صلح جو، ۱۳۹۳).

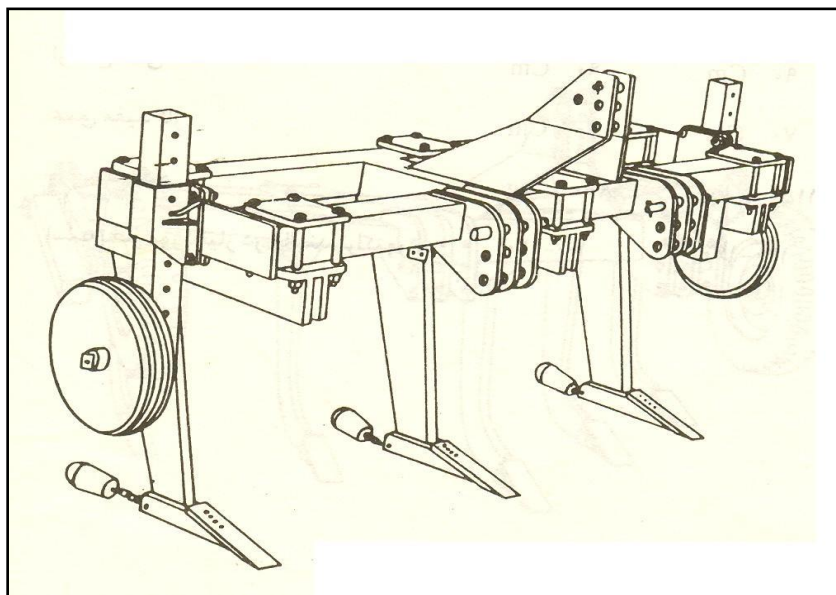


شکل ۶-۱- زیرشکن ۵ شاخه با قاب V شکل و شاخه های C شکل

1- Subsoiler

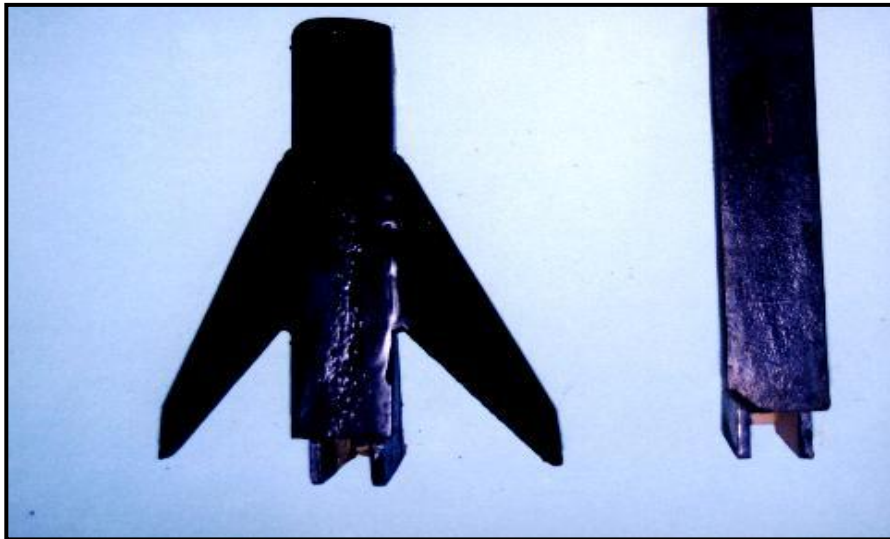
## ۶-۱۲-۱ - ساختمان زیرشکن

زیرشکن از دو قسمت شاخه‌ها و قاب تشکیل شده است. شاخه‌ها معمولاً در دو فرم C یا L شکل (شکل‌های ۱-۶ و ۲-۶) ساخته می‌شوند. هر شاخه از قطعاتی چون ساقه، کفش و تیغه ناخن تشکیل شده است. قاب‌های زیرشکن نیز معمولاً در دو فرم ساده (مستقیم) و یا V شکل ساخته می‌شوند. بعضی از زیرشکن‌ها دارای سنبه زهکشی<sup>۱</sup> هستند که به انتهای کفش متصل می‌شود (شکل ۲-۶). سنبه‌های زهکشی جهت ایجاد کانال‌های موقت زهکشی و معمولاً در شرایط خاک مرطوب مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً تیغه‌های زیرشکن از دو نوع ساده یا بالهدار هستند (شکل ۳-۶).



شکل ۶-۲ - زیرشکن ۳ شاخه با قاب ساده (مستقیم) و شاخه‌های L شکل به همراه سنبه زهکشی  
(بی نام، ۱۳۷۶)

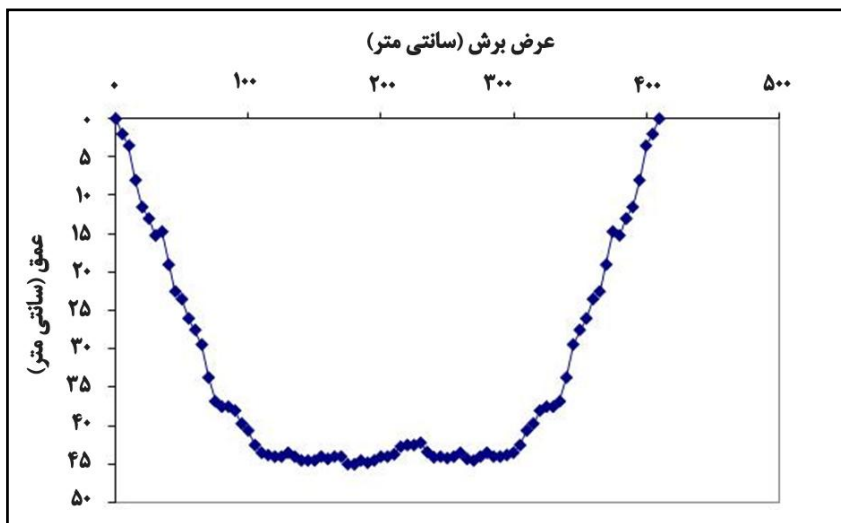




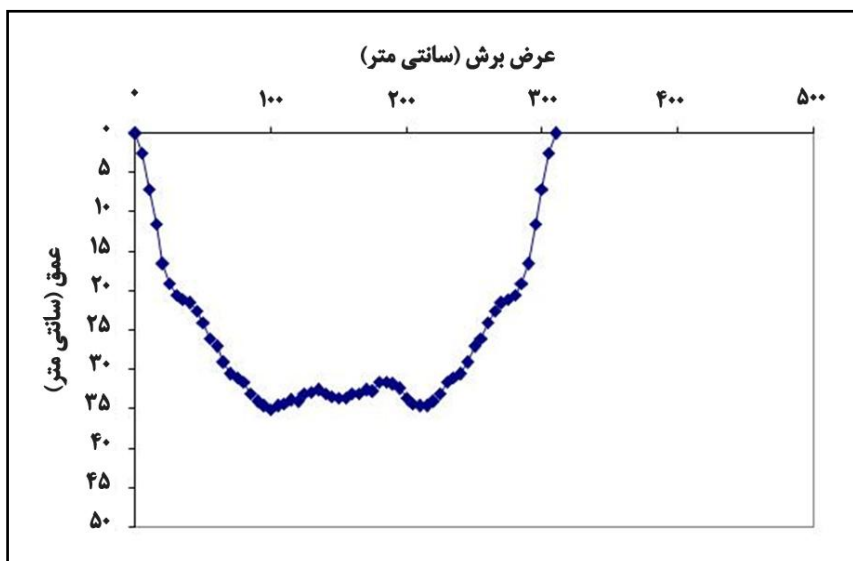
شکل ۶-۳- تیغه‌های ساده و بالهدار زیرشکن

باتوجه به دلایل ذیل پیشنهاد می‌شود که در صورت وجود لایه سخت از زیرشکنی خاک با تیغه‌های بالهدار استفاده گردد:

- ۱- سطح خردشدگی خاک بیشتر است.
  - ۲- عمق مؤثر خرد شده، در قسمت زیرین خاک بیشتر است.
  - ۳- بالا آمدن خاک و ایجاد ناهمواری در سطح خاک کمتر است.
  - ۴- در یک عمق کار ثابت، عمق بحرانی به علت افزایش سطح تیغه افزایش می‌یابد.
  - ۵- در مدت زمان کمتری می‌توان یک هکتار زمین را زیرشکن زد (با توجه به افزایش فاصله بین تیغه‌ها، عرض مؤثر کار دستگاه نیز افزایش می‌یابد).
  - ۶- پایداری خاک بیشتر می‌شود.
  - ۷- مقاومت ویژه در تیغه‌های بالهدار کمتر است بنابراین در این نوع زیرشکن به ازای واحد سطح به هم خورده نیروی کششی کمتری مصرف می‌شود.
- شکل‌های ۴-۶ و ۵-۶ نمودار سطح مقطع خاک به هم خورده (شیار) حاصل از زیرشکنی خاک در عمق‌های ۳۵-۳۰ و ۴۵-۴۰ سانتی‌متر با تیغه بالهدار را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۴- نمودار سطح مقطع شیار حاصل از زیرشکنی خاک در عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر با تیغه بالهدار



شکل ۶-۵- نمودار سطح مقطع شیار حاصل از زیرشکنی خاک در عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر با تیغه بالهدار

۶-۱۲-۲- تنظیم فاصله بین تیغه‌های زیرشکن

الف- تیغه‌های ساده (بدون بال)

جهت تعیین فاصله بین تیغه‌های ساده در زیرشکن از فرمول ۱ تا ۱/۵ برابر عمق کار استفاده می‌شود (Spoor & Godwin, 1978):

$$S = (1/0 - 1/5) d \quad (1-6)$$

که در آن،

$S$  = فاصله بین مراکز دو تیغه متوالی زیرشکن (سانتی‌متر)؛ و  $d$  = عمق کار زیرشکن (سانتی‌متر) است.

مثال ۱- برای زیرشکنی خاک با تیغه ساده تا عمق ۳۵ سانتی‌متری فاصله بین دو تیغه متوالی را چقدر باید در نظر گرفت؟

$$S = (1 - 1/5) d \rightarrow S = (1/25) 35 \rightarrow S = 43/8 \text{ cm}$$

مثال ۲- اگر بخواهیم در مزرعه‌ای عملیات زیرشکنی خاک را با تیغه‌های ساده و در عمق ۴۵ سانتی‌متری خاک انجام دهیم، فاصله بین تیغه‌های متوالی زیرشکن را چند سانتی‌متر باید در نظر بگیریم؟

$$S = (1 - 1/5) d \rightarrow S = (1/25) 35 \rightarrow S = 56/3 \text{ cm}$$

ب- تیغه‌های بالهدار

جهت تعیین فاصله بین تیغه‌های بالهدار در زیرشکن از فرمول ۱/۵ تا ۲ برابر عمق کار استفاده می‌شود (Spoor & Godwin, 1978):

$$S = (1/5 - 2) d \quad (2-6)$$

که در آن،

$S$  = فاصله بین مراکز دو تیغه متوالی زیرشکن (سانتی‌متر)؛ و  $d$  = عمق کار زیرشکن (سانتی‌متر) است.

مثال ۳- در صورتی که بخواهیم عملیات زیرشکنی خاک را با تیغه‌های بالهدار و به عمق ۳۵

سانتی متر انجام دهیم، فاصله بین دو تیغه متوالی را چند سانتی متر باید در نظر بگیریم؟

$$S = (1/5 - 2) d \rightarrow S = (1/75) 35 \rightarrow S = 61/3 \text{ cm}$$

مثال ۴- اگر بخواهیم زیرشکنی خاک به عمق ۴۵ سانتی متر و با تیغه باله دار انجام دهیم، فاصله بین دو تیغه متوالی را چند سانتی متر باید در نظر بگیریم؟

$$S = (1/5 - 2) d \rightarrow S = (1/75) 45 \rightarrow S = 78/8 \text{ cm}$$

### ۶-۱۲-۳- تنظیم عمق کار زیرشکن

جهت تنظیم عمق کار زیرشکن از چرخ های تنظیم عمق (تثبیت عمق) استفاده می شود. چرخ های تنظیم عمق معمولاً دو عدد می باشند که در اطراف شاسی زیرشکن قرار داده می شوند (شکل ۶-۱). معمولاً چرخ ها به گونه ای طراحی شده است که بتوان با توجه به سوراخ های ایجاد شده بر روی آنها، عمق مورد نظر را تنظیم کرد. برای مثال جهت تنظیم عمق ۳۵ سانتی متر، باید فاصله بین سطح خاک تا زیرسطح چرخ تنظیم عمق ۳۵ سانتی متر باشد. تنظیم عمق باید برای دو چرخ یکسان و بر روی یک سطح صاف انجام گیرد.

در نقاط اتصال دستگاه زیرشکن به تراکتور، معمولاً سه سوراخ متوالی وجود دارد (شکل ۶-۱) که هر یک جهت عمق و کار خاصی استفاده می شود. سوراخ هایی که به سطح زمین نزدیک تر هستند، معمولاً جهت حمل و نقل در بین مزارع استفاده می شود تا زیرشکن بتواند در بالاترین فاصله نسبت به سطح زمین قرار گرفته و در موقع حمل و نقل، تیغه های زیرشکن در اثر برخورد با موانع آسیب نبیند. از طرف دیگر سوراخ هایی که از سطح زمین بیشترین فاصله را دارند، جهت عمق کار زیاد زیرشکن استفاده می شوند. برای مثال اگر بخواهیم از زیرشکن در عمق ۴۵ سانتی متر استفاده گردد، باید نقاط اتصال به تراکتور را در بالاترین سوراخ ها قرار داد. همان طور که در شکل ۶-۱ ملاحظه می شود، این زیرشکن دارای سه سوراخ در هر یک از نقاط اتصال آن به تراکتور است. سوراخ های اول از سطح زمین جهت راهپیمایی، سوراخ های دوم (وسط) جهت عمق کم زیرشکنی خاک (۳۰-۳۵ سانتی متر) و سوراخ های سوم که بیشترین فاصله را تا سطح زمین دارند برای عمق کار زیاد زیرشکن استفاده می شود.

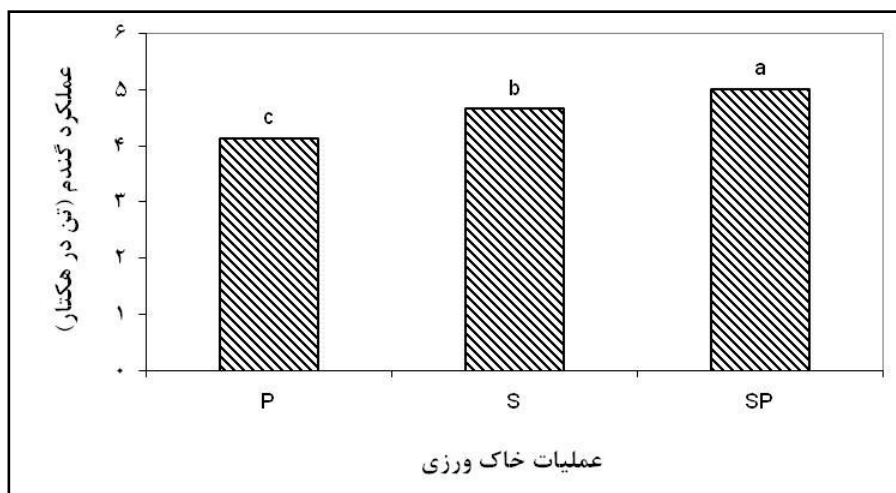
## ۶-۱۲-۴- نحوه اجرای عملیات زیرشکنی خاک

- ۱- عمق کار زیرشکن در مزارع باتوجه به آزمون فشردگی خاک تعیین می گردد و نباید بیشتر از ۵۰ سانتی متر باشد مگر با نظر کارشناسان متخصص فشردگی خاک.
- ۲- جهت اجرای عملیات زیرشکنی خاک بهتر است از تیغه های باله دار استفاده گردد.
- ۳- حداقل فاصله بین چرخ های تراکتور و ردیف زیرشکن زده شده باید ۵۰ سانتی متر باشد تا باعث فشردگی مجدد خاک نگردد.
- ۴- در مزارع از زیرشکن های تک شاخه استفاده نگردد.
- ۵- جهت زیرشکنی خاک در مزارع از زیرشکن های سه شاخه و یا با تعداد شاخه های بیشتر استفاده گردد.
- ۶- فاصله بین تیغه های زیرشکن با توجه به عمق کار تنظیم گردد.
- ۷- بهتر است عملیات زیرشکنی خاک در فصل تابستان و در مزارعی انجام گردد که قبل از کاشت محصول مورد نظر، یک فصل بارندگی از آن گذشته باشد.
- ۸- در سطوح شیب دار، اجرای عملیات زیرشکنی خاک در جهت عمود بر شیب باشد.
- ۹- پس از اجرای خط اول زیرشکنی خاک، با حفر پروفیل در جهت عمود بر مسیر حرکت، نحوه توزیع شکستگی خاک کنترل گردد.
- ۱۰- در صورت کاشت محصول بلافاصله بعد از زیرشکنی خاک، رطوبت مناسب جهت اجرای عملیات زیرشکنی خاک در حدود ۱۳-۱۰ درصد است. در این حالت در اثر زیرشکنی ضمن شکستگی خاک، کلوخه های بزرگی نیز ایجاد نمی شود. در صورتی که کاشت محصول پس از گذشت یک فصل زمستان از زمان زیرشکنی انجام می گردد، انجام عملیات زیرشکنی در خاک خشک بهتر است.
- ۱۱- در مزارعی که دارای شوری و زهکش روباز هستند، زیرشکنی خاک همراه با شخم با گاواهن برگردان دار باعث کاهش شوری خاک و افزایش عملکرد محصول تا فاصله ۱۵۰ متری از محور زهکش روباز می گردد، لذا کاربرد آن تا این محدوده توصیه می شود (شکل های ۶-۶ و ۶-۷).

فشرده‌گی خاک، تشخیص و راه کارهای کاهش آن



شکل ۶-۶- تاثیر فاصله از محور زهکش بر عملکرد گندم (صلح جو و نیازی، ۱۳۸۶)  
 50 = فاصله ۵۰ متری از محور زهکش، d100 = فاصله ۱۰۰ متری از محور زهکش، d150 = فاصله ۱۵۰ متری از محور زهکش



شکل ۶-۷- تاثیر عملیات خاک‌ورزی بر عملکرد گندم در مزرعه با زهکش روباز (صلح جو و نیازی، ۱۳۸۶)

P = بدون زیرشکنی خاک + شخم با گاواهن برگردان‌دار، S = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متر، SP = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متر + شخم با گاواهن برگردان‌دار

۱۲- استفاده از زیرشکن با تیغه‌های بالهدار و استفاده از تیغه‌هایی با عمق کار کمتر در جلو زیرشکن می‌تواند باعث کاهش نیروی کششی زیرشکن، کاهش ابعاد کلوخه‌های ایجاد شده، کاهش هزینه زیرشکنی خاک و افزایش سطح مقطع شیار حاصل از زیرشکنی خاک شود (شکل ۶-۸).



شکل ۶-۸- زیرشکن با تیغه بالهدار به همراه سه ردیف تیغه با عمق کارهای ۲۰، ۳۰ و ۱۰ سانتی‌متر در جلو (حمزه و اندرسون، ۲۰۰۵)

۱۳- در صورتی که خاک زیر سخت لایه، خیلی اسیدی یا بازی باشد ممکن است به ریشه گیاه آسیب برساند، لذا از کاربرد زیرشکن در این نوع خاک‌ها باید اجتناب گردد.

۱۴- در صورتی که بعد از زیرشکنی خاک نیاز به اجرای عملیات شخم باشد، بهتر است عملیات شخم در جهت عمود بر مسیر زیرشکنی خاک انجام شود.

۱۵- اثر زیرشکنی خاک در حدود ۳-۵ سال باقی می‌ماند، لذا در مدت فوق نیازی به اجرای مجدد زیرشکنی خاک نیست.

۱۶- در صورتی که خاک زیر سخت لایه، خاک سست یا سبک باشد، انجام عملیات زیرشکنی خاک ممکن است باعث افزایش مصرف آب گردد، لذا کاربرد زیرشکن در این نوع خاکها توصیه نمی‌شود.

۱۷- از به کارگیری زیرشکن در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالا است اجتناب گردد.

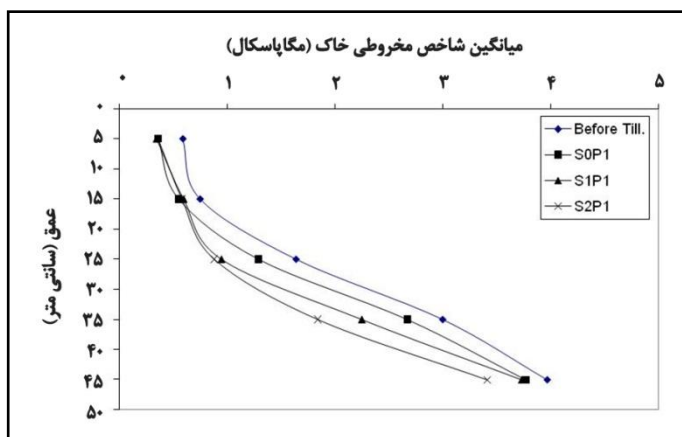
### ۶-۱۲-۵- اثرات مثبت زیرشکنی خاک

از اثرات مثبت زیرشکنی خاک می‌توان به بهبود شرایط فیزیکی خاک، رشد مناسب ریشه محصول، کاهش بیماری‌های قارچی و افزایش عملکرد محصول اشاره نمود.

#### - تاثیر زیرشکنی خاک در بهبود شرایط فیزیکی خاک

شاخص مخروطی خاک (CI)

زیرشکنی خاک باعث کاهش شاخص مخروطی خاک، به ویژه در عمق پایین‌تر از عمق شخم مرسوم می‌شود (شکل ۶-۹). باتوجه به اینکه شاخص مخروطی خاک بیان کننده میزان مقاومت خاک است، بنابراین با اجرای زیرشکنی خاک، مقاومت خاک و در نتیجه فشردگی خاک کاهش پیدا کرده و خلل و فرج خاک افزایش می‌یابد.



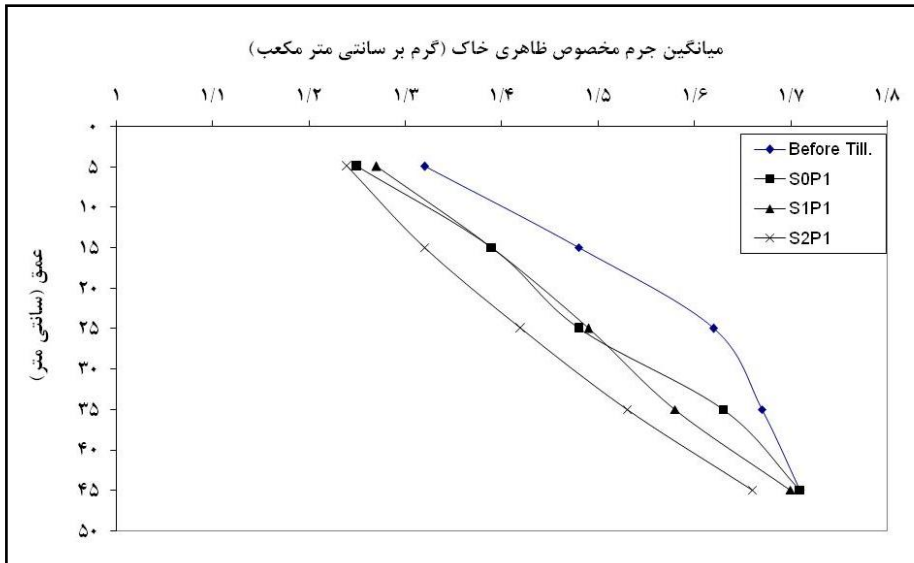
شکل ۶-۹- تغییرات میانگین شاخص مخروطی خاک با عمق در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی (صلح جو، ۱۳۸۴)

Before Till = قبل از خاک‌ورزی، S0P1 = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S1P1 = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار، S2P1 = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار



جرم مخصوص ظاهری خاک

زیرشکنی خاک باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک به ویژه در عمق پایین تر از عمق شخم مرسوم می شود (شکل ۶-۱۰). کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک باعث کاهش مقاومت خاک و افزایش تهویه خاک می گردد.



شکل ۶-۱۰- تغییرات میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک با عمق در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی (صلح جو، ۱۳۸۴)

Before Till = قبل از خاک‌ورزی، S0P1 = بدون زیرشکنی خاک + گاو آهن برگردان دار، S1P1 = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاو آهن برگردان دار، S2P1 = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاو آهن برگردان دار

نفوذ آب در خاک

زیرشکنی خاک باعث افزایش خلل و فرج خاک و در نتیجه افزایش نفوذ آب در خاک می گردد. زیرشکنی خاک هم چنین باعث کاهش آب گرفتگی در سطح خاک و در نتیجه کاهش فرسایش خاک و بیماری های قارچی می شود.

رطوبت خاک

زیرشکنی خاک با کاهش جرم مخصوص ظاهری و شاخص مخروطی خاک، باعث افزایش

## فشرده‌گی خاک، تشخیص و راه کارهای کاهش آن

خلل و فرج خاک و در نهایت باعث افزایش حفظ رطوبت خاک می‌شود (جدول ۶-۱). این موضوع به ویژه در مزارع دیم دارای اهمیت ویژه‌ای است و باعث استفاده بهینه از آب باران می‌شود.

جدول ۶-۱- مقایسه میانگین تیمارهای مختلف خاک‌ورزی از نظر فاکتور رطوبت خاک (درصد) در عمق‌های صفر تا ۵۰ سانتی‌متر در مزرعه گندم دیم (افضلی نیا، صالح جو و اسکندری، ۲۰۱۱)

تیمارهای خاک‌ورزی				عمق خاک (سانتی‌متر)
S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	
بعد از کاشت گندم				
۱۴/۸۵ a	۱۴/۵۰ a	۱۴/۶۶ a	۱۴/۰۸ a	۲۰-۰
۱۶/۰۹ a	۱۵/۹۱ a	۱۶/۰۰ a	۱۴/۹۲ b	۳۰-۲۰
۱۵/۷۸ a	۱۵/۶۰ ab	۱۴/۸۰ bc	۱۴/۳۳ c	۴۰-۳۰
۱۴/۶۲ a	۱۴/۴۹ ab	۱۳/۹۷ b	۱۳/۰۴ c	۵۰-۴۰
مرحله ساقه دهی				
۱۲/۵۷ a	۱۲/۱۵ a	۱۲/۲۶ a	۱۱/۷۸ a	۲۰-۰
۱۳/۶۶ a	۱۳/۶۶ a	۱۳/۵۶ a	۱۲/۸۲ a	۳۰-۲۰
۱۳/۹۷ a	۱۳/۹۵ a	۱۳/۷۸ a	۱۳/۰۵ a	۴۰-۳۰
۱۳/۹۰ a	۱۳/۴۷ a	۱۳/۳۹ ab	۱۲/۴۵ b	۵۰-۴۰
قبل از برداشت				
۷/۷۳ a	۷/۸۱ a	۷/۸۷ a	۷/۰۶ a	۲۰-۰
۱۱/۰۷ a	۱۱/۱۳ a	۱۰/۷۸ a	۱۰/۴۴ a	۳۰-۲۰
۱۲/۴۸ a	۱۲/۲۳ ab	۱۲/۱۳ ab	۱۱/۵۷ b	۴۰-۳۰
۱۲/۱۱ a	۱۲/۳۳ a	۱۱/۹۹ a	۱۱/۴۸ a	۵۰-۴۰

در هر ردیف میانگین‌هایی که دارای حروف غیرمشترک می‌باشند، اختلاف معنی‌دار دارند (دانکن ۵ درصد)

S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک+گاواهن برگردان‌دار

S<sub>1</sub> = فاصله بین دو عامل خاک‌ورز برابر عمق کار زیرشکنی خاک+گاواهن برگردان‌دار

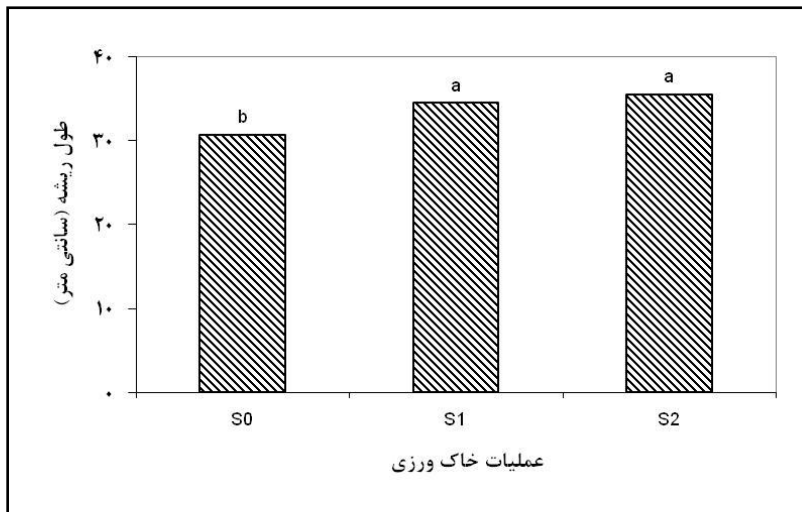
S<sub>2</sub> = فاصله بین دو عامل خاک‌ورز ۱/۵ برابر عمق کار زیرشکنی خاک+گاواهن برگردان‌دار

S<sub>3</sub> = فاصله بین دو عامل خاک‌ورز ۲ برابر عمق کار زیرشکنی خاک+گاواهن برگردان‌دار

تأثیر زیرشکنی خاک بر رشد ریشه محصول

طول ریشه

زیرشکنی خاک باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک و کاهش مقاومت خاک می‌گردد که در نهایت منجر به بهبود شرایط برای رشد طولی ریشه می‌شود. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که زیرشکنی خاک باعث افزایش طول ریشه چغندر قند به میزان ۱۵ درصد شده است (شکل ۶-۱۱).



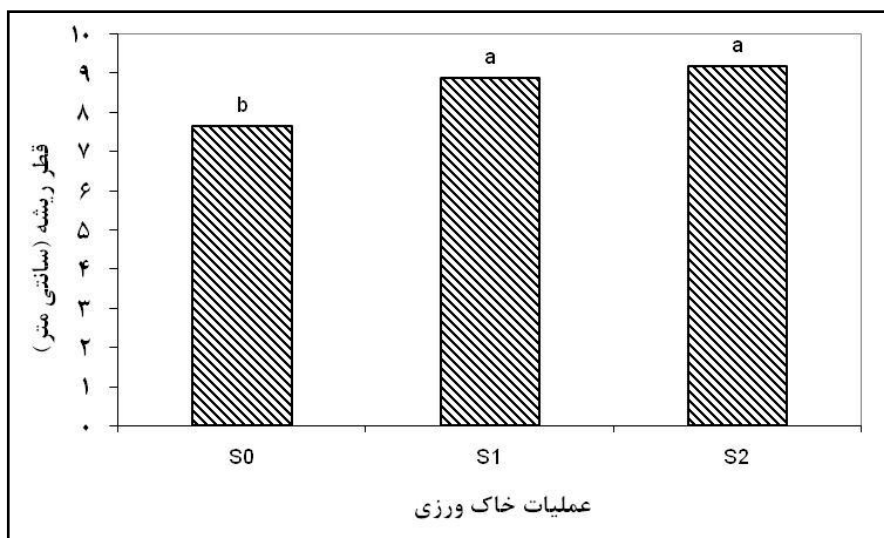
شکل ۶-۱۱ - تأثیر زیرشکنی خاک بر طول ریشه چغندر قند (صلح جو، ۱۳۸۴)

S0 = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S1 = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن

برگردان دار، S2 = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار

قطر ریشه

زیرشکنی خاک به تنهایی باعث افزایش قطر ریشه چغندر قند نسبت به گاواهن برگردان دار است. علت آن شکسته شدن سخت لایه موجود در زیر عمق شخم و نفوذ مناسب تر ریشه به عمق خاک و در نهایت دسترسی بیشتر گیاه به آب و مواد غذایی مورد نیاز است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که زیرشکنی خاک باعث افزایش بزرگترین قطر ریشه چغندر قند به میزان ۲۰ درصد شده است (شکل ۶-۱۲).



شکل ۶-۱۲- تاثیر زیرشکنی خاک بر قطر ریشه چغندرقد (صلح جو، ۱۳۸۴)

S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>1</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن

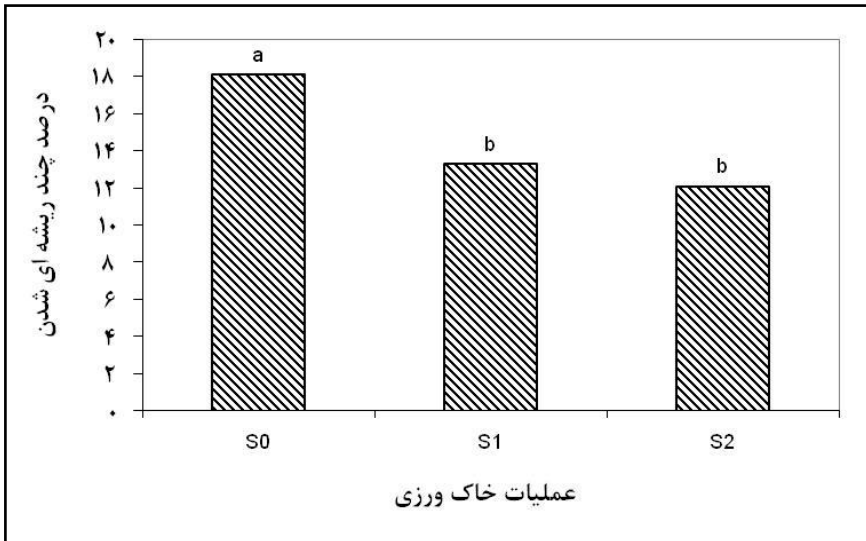
برگردان دار، S<sub>2</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار

#### چند ریشه‌ای شدن

وجود سخت لایه در زیر عمق شخم باعث افزایش درصد چند ریشه‌ای شدن می‌شود. زیرشکنی خاک باعث شکسته شدن سخت لایه موجود در زیر عمق شخم و کاهش جرم مخصوص ظاهری و شاخص مخروطی خاک می‌گردد که در نهایت باعث کاهش مقاومت به نفوذ ریشه و کاهش درصد چند ریشه‌ای شدن چغندرقد می‌شود. زیرشکنی خاک باعث کاهش ۳۳ درصدی چند ریشه‌ای شدن چغندرقد می‌شود (شکل ۶-۱۳).

#### رشد غده‌های زیرزمینی

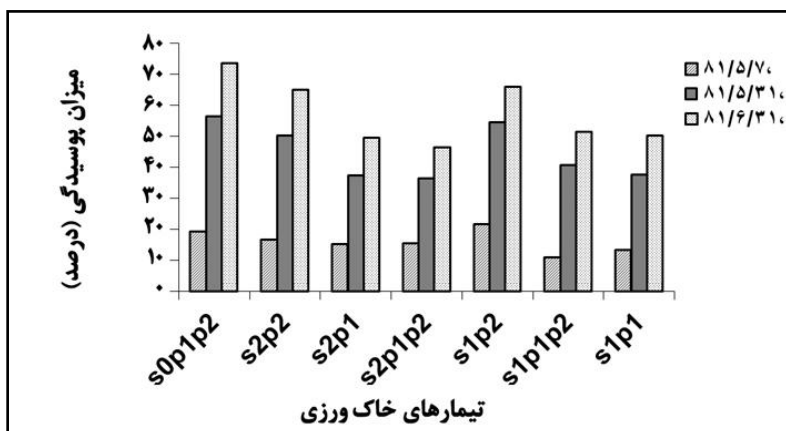
در اثر فشردگی خاک و ایجاد سخت لایه در عمق خاک، نفوذ ریشه گیاه محدود شده و غده‌های زیرزمینی از لحاظ طولی و عرضی رشد مناسبی نخواهند داشت. با اجرای عملیات زیرشکنی خاک رشد طولی و عرضی ریشه مناسب‌تر شده و باعث کاهش شکل نامناسب غده‌های زیرزمینی و افزایش بازارپسندی آنها می‌شود.



شکل ۶-۱۳- تأثیر زیرشکنی خاک بر درصد چند ریشه ای شدن چغندر قند (صلح جو، ۱۳۸۴)  
 $S_0$  = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار،  $S_1$  = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار،  $S_2$  = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار

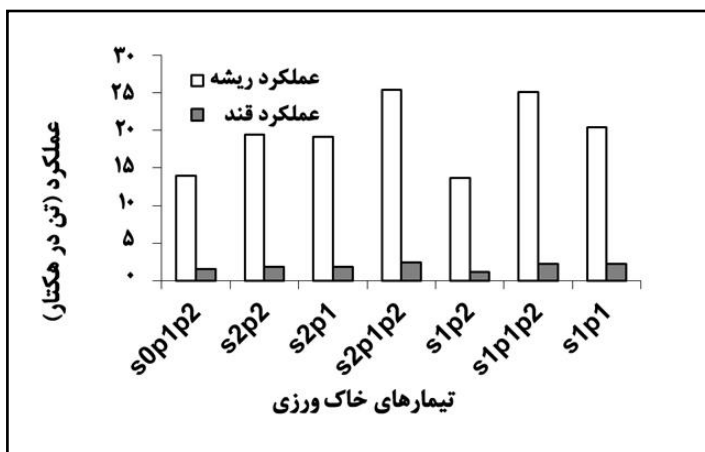
#### - تأثیر زیرشکنی خاک بر بیماری های قارچی

زیرشکنی خاک باعث افزایش نفوذپذیری آب در خاک می شود. بنابراین زیرشکنی خاک موجب کاهش رطوبت سطحی خاک شده و شرایط رطوبتی مناسب جهت تکثیر و انتشار بیماری های قارچی را کاهش می دهد. زیرشکنی خاک در مزارع دارای پوسیدگی ریشه چغندر قند، باعث کاهش این بیماری و افزایش عملکرد چغندر قند شده است (شکل های ۶-۱۴ و ۶-۱۵).



شکل ۶-۱۴- تأثیر عملیات خاک ورزی بر پوسیدگی ریشه چغندر قند در شهرستان مرودشت (فصیحیانی، ۱۳۸۳)

s0p1p2 = گاواهن برگردان دار در پاییز و بهار (شاهد)، S2p2 = زیرشکن به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر+گاواهن برگردان دار در بهار، S2p1 = زیرشکن به عمق ۴۵-۵۰ سانتی متر+گاواهن برگردان دار در پاییز، S2p1p2 = زیرشکن به عمق ۴۵-۵۰ سانتی متر+گاواهن برگردان دار در بهار و پاییز، S1p2 = زیرشکن به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر+گاواهن برگردان دار در بهار، S1p1p2 = زیرشکن به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر+گاواهن برگردان دار در پاییز و بهار، S1p1 = زیرشکن به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر+گاواهن برگردان دار در پاییز



شکل ۶-۱۵- تأثیر عملیات خاک ورزی بر عملکرد ریشه و میزان قند در مزرعه آلوده در شهرستان مرودشت استان فارس (فصیحیانی، ۱۳۸۳)

**- تأثیر زیرشکنی خاک بر نیتروژن قابل جذب گیاه**

با زیرشکنی خاک فشردگی آن کاهش یافته و درصد خلل و فرج خاک افزایش می یابد. بنابراین تهویه خاک افزایش یافته و شرایط برای فعالیت باکتری های غیرهوازی کاهش می یابد که نتیجه آن کاهش عمل دی نیتریفکاسیون و افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه است. معمولاً در مزارعی که از زیرشکن استفاده می شود، زردی محصول ناشی از کمبود نیتروژن قابل جذب کمتر مشاهده می شود.

**- تأثیر زیرشکنی خاک بر عملکرد محصول**

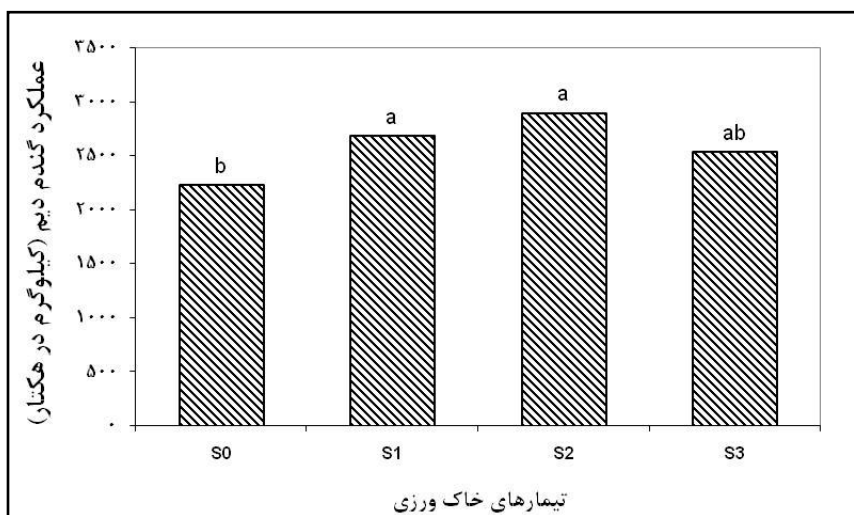
زیرشکنی خاک باعث افزایش عملکرد محصول می شود. نتایج پژوهش های انجام شده در این زمینه نشان می دهد که زیرشکنی خاک باعث افزایش عملکرد چغندر قند به میزان ۲۱ درصد (شکل ۶-۱۶)، عملکرد گندم به میزان ۲۴ درصد (شکل ۶-۱۷)، عملکرد ذرت ۷ درصد (محمدی مزرعه و خلیلی، ۱۳۸۳) و عملکرد گندم آبی به میزان ۴ درصد (شکل ۶-۱۸) شده است. همان طور که مشاهده می شود، محصولات مختلف نسبت به فشردگی خاک دارای حساسیت های متفاوتی هستند؛ به طوری که محصولات ریشه ای همانند چغندر قند و محصولات دیم مثل گندم دیم بیشترین حساسیت را داشته و در اثر کاربرد زیرشکن بیشترین افزایش عملکرد را نشان می دهند.



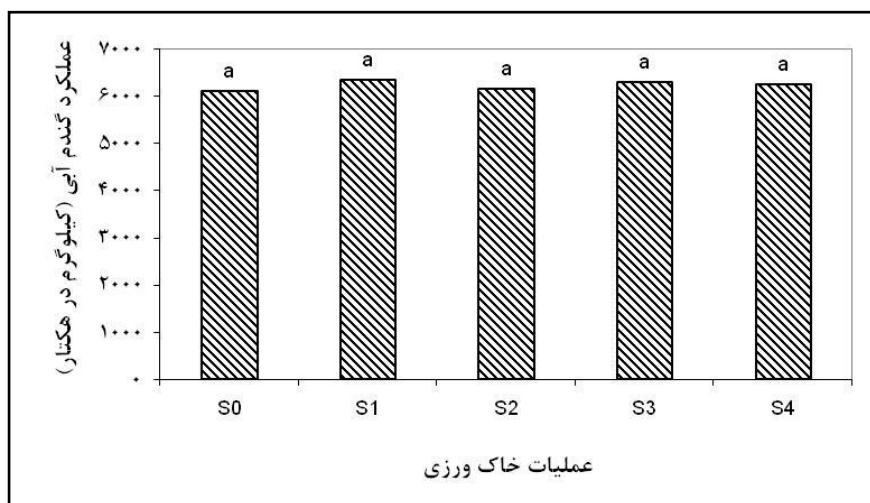
شکل ۶-۱۶- تأثیر زیرشکنی خاک بر عملکرد ریشه چغندر قند (صلح جو، ۱۳۸۴)

S0 = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S1 = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن

برگردان دار، S2 = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار



شکل ۶-۱۷- تأثیر زیرشکنی خاک بر عملکرد گندم دیم (افضلی نیا، صلح جو و اسکندری، ۲۰۱۱)  
 S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>1</sub> = فاصله بین دو عامل خاک‌ورز برابر عمق کار زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>2</sub> = فاصله بین دو عامل خاک‌ورز ۱/۵ برابر عمق کار زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>3</sub> = فاصله بین دو عامل خاک‌ورز ۲ برابر عمق کار زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار

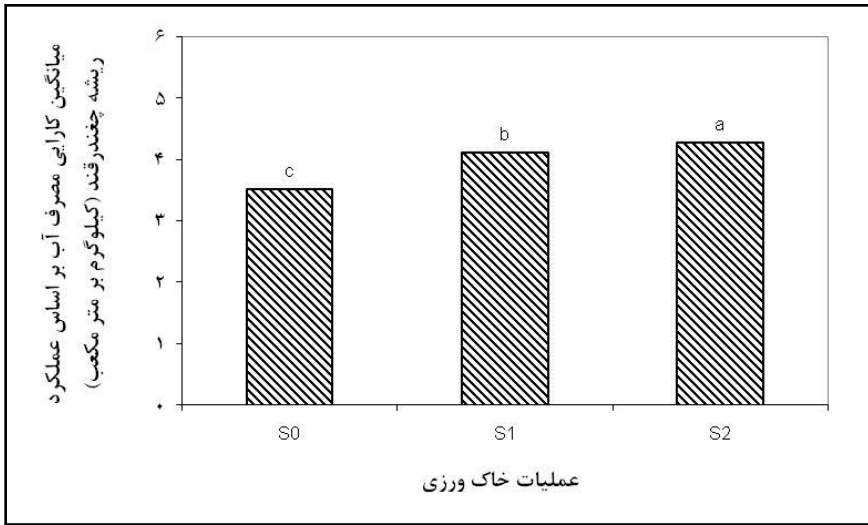


شکل ۶-۱۸- تأثیر زیرشکنی خاک بر عملکرد گندم آبی (صلح جو و نیازی، ۱۳۸۰)  
 S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>1</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی‌متر + گاواهن برگردان دار، S<sub>2</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی‌متر بدون گاواهن برگردان دار، S<sub>3</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی‌متر + گاواهن برگردان دار، S<sub>4</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی‌متر بدون گاواهن برگردان دار



**- تاثیر زیرشکنی خاک بر کارایی مصرف آب**

زیرشکنی خاک از یک طرف باعث افزایش عملکرد محصول و از طرف دیگر با افزایش خلل و فرج خاک موجب افزایش ذخیره رطوبتی خاک می شود که در نهایت باعث افزایش کارایی مصرف آب می شود (Chen-yan *et al.*, 2014) (شکل های ۶-۱۹ و ۶-۲۰). نتایج پژوهش های انجام شده نشان می دهد که زیرشکنی خاک باعث افزایش کارایی مصرف آب براساس عملکرد ریشه چغندر قند به میزان ۲۲ درصد شده است.



شکل ۶-۱۹- تاثیر زیرشکنی خاک بر کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد ریشه چغندر قند (صلح جو، ۱۳۸۴)

S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>1</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار، S<sub>2</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار



شکل ۶-۲۰- تاثیر زیرشکنی خاک بر کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد قند ناخالص (صلح جو، ۱۳۸۴)

S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک + گاواهن برگردان دار، S<sub>1</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار، S<sub>2</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی متر + گاواهن برگردان دار

#### - تأثیر زیرشکنی خاک بر تنش های آبی وارده به محصول

با زیرشکنی خاک می توان دور آبیاری را افزایش و گیاه را در مقابل تنش های آبی مقاوم تر کرد. بنابراین زیرشکنی خاک می تواند باعث بیمه محصول در مقابل تنش آبی در رویدادهای موقتی حاصل از قطع سیستم آبیاری همانند خرابی پمپ آب گردد، به ویژه در جایی که مشکل تنش آبی ممکن است تا چند روز ادامه یابد (Cassel & Edwards, 1985) و (صلح جو و همکاران، ۱۳۸۴).

#### - تأثیر زیرشکنی خاک بر افزایش درآمد کشاورزان

زیرشکنی خاک باعث افزایش درآمد کشاورزان و سود بیشتر برای آنها می شود (صلح جو و سی سختی، ۱۳۸۳). براساس نتایج جدول ۶-۲، تیمار زیرشکنی خاک به عمق ۴۵-۴۰ سانتی متر همراه با گاو آهن برگرداندار و دور آبیاری ۱۰ روزه (S<sub>2</sub>I<sub>10</sub>) بیشترین سود ناخالص را نسبت به تیمار شاهد و به میزان ۵۷۵۱۴۷۵ ریال در هکتار دارد. تیمارهای S<sub>2</sub>I<sub>7</sub> و S<sub>1</sub>I<sub>14</sub> به ترتیب در مراحل بعدی و تیمار گاواهن برگردان دار و بدون زیرشکنی خاک و دور آبیاری ۱۴ روزه (S<sub>0</sub>I<sub>14</sub>) در ردیف آخر و موجب ضرر است، بنابراین سودمندترین تیمار S<sub>2</sub>I<sub>10</sub> است.

جدول ۶-۲- ارزش خالص تغییرات بازده برنامه‌ای تیمارهای مختلف نسبت به تیمار شاهد- (ریال بر هکتار) (صلح جو و محمدی، ۱۳۸۶)

دور آبیاری (روز)	تیمارهای خاک‌ورزی		
	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
۷ (I <sub>7</sub> )	-	۳۴۶۶۸۸۹/۲	۴۱۲۰۹۷۱/۶
۱۰ (I <sub>10</sub> )	۵۴۳۲۷۳/۵	۲۹۷۹۳۴۵/۲	۵۷۵۱۴۷۵/۴
۱۴ (I <sub>14</sub> )	- ۱۵۰۴۴۷۸/۴	۳۴۷۹۷۶۵/۸	۳۴۵۹۴۹۰/۳

S<sub>0</sub> = بدون زیرشکنی خاک+گاواهن برگردان دار، S<sub>1</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۳۰-۳۵ سانتی‌متر+گاواهن برگردان دار، S<sub>2</sub> = زیرشکنی خاک به عمق ۴۰-۴۵ سانتی‌متر+گاواهن برگردان دار

### ۶-۱۲-۶- اثرات منفی کاربرد زیرشکن

- نیاز به تراکتورهای با توان بالا

جهت اجرای عملیات زیرشکنی نیاز به تراکتورهایی با قدرت زیاد است. معمولاً جهت زیرشکنی خاک در عمق ۴۵-۴۰ سانتی‌متر با استفاده از یک زیرشکن سه شاخه با تیغه‌های باله‌دار نیاز به تراکتوری با توان بالای ۱۰۰ اسب بخار است. هزینه اجرای عملیات زیرشکنی در سال اول اجرا در مزرعه زیاد است ولی با توجه به اینکه اثر زیرشکنی خاک در حدود ۳-۵ سال باقی می‌ماند و در این مدت نیازی به اجرای مجدد زیرشکنی خاک نیست، هزینه فوق قابل قبول است.

### - افزایش آب مصرفی در مرحله خاک آب

در صورتی که محصول مورد نظر بلافاصله بعد از زیرشکنی خاک کاشته شود، به علت افزایش خلل و فرج خاک در اثر زیرشکنی، مصرف آب در مرحله خاک آب تا حدود دو برابر افزایش می‌یابد. این آب در داخل خاک ذخیره شده و باعث افزایش رطوبت خاک و در نتیجه افزایش دور آبیاری می‌شود که در نهایت باعث کاهش دفعات آبیاری در مزرعه زیرشکن زده شده نسبت به مزرعه بدون زیرشکنی می‌گردد.

جهت کاهش آب مصرفی در مرحله خاک آب، پیشنهاد می‌گردد که زیرشکنی خاک در تابستان اجرا و پس از گذشت یک فصل زمستان، کاشت محصول انجام شود تا به وسیله آب بارندگی خلل و فرج خاک پر گردد. به عنوان مثال برای کشت چغندر قند بهتر است زیرشکنی

خاک در تابستان انجام گردد و کاشت چغندر قند، بعد از گذشت فصل زمستان و در اسفند ماه یا فروردین ماه صورت گیرد.

### – خاک‌های خیلی اسیدی یا بازی

در صورتی که در زیرسخت لایه موجود در عمق خاک مزرعه، خاک خیلی اسیدی یا بازی وجود داشته باشد، بعد از شکسته شدن سخت لایه فوق توسط زیرشکن، ممکن است ریشه گیاه به خاک‌های خیلی اسیدی یا بازی رسیده و باعث صدمه دیدن گیاه گردد. بنابراین بهتر است در این مواقع از به کارگیری زیرشکن اجتناب گردد.

### نتیجه گیری

پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که فشردگی خاک از یک طرف باعث کاهش تولید محصول و از طرف دیگر باعث صدمات جبران ناپذیری به محیط اطراف ما می‌شود. فشردگی خاک باعث تخریب محیط و در نهایت تأثیرات منفی در اتمسفر، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی، جانداران خاک‌زی و منابع عمومی خاک می‌گردد. بنابراین با توجه به گسترش میزان فشردگی خاک در سطح جهانی، معضل فوق دارای اهمیتی ویژه است که با مدیریت صحیح مکانیزاسیون و آب و خاک باید به حداقل ممکن کاهش یابد.

کلیه عملیات زراعی بر فشردگی خاک‌های سطحی و عمقی تأثیر گذاشته و باعث متراکم شدن خاک زراعی می‌شوند. جهت کاهش فشردگی خاک در مزارع از زیرشکن استفاده می‌شود. زیرشکنی خاک باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک، حفظ رطوبت خاک، افزایش رشد طولی و عرضی ریشه و در نهایت باعث افزایش عملکرد محصول و کارایی مصرف آب می‌شود، بنابراین نیاز است تا در مزارعی که فشردگی خاک دارند از زیرشکن استفاده گردد. جهت زیرشکنی خاک بهتر است از زیرشکن‌های سه شاخه با تیغه‌های بالهدار استفاده شود و عمق زیرشکنی خاک نیز بیشتر از ۵۰ سانتی متر نباشد (مگر با نظر کارشناسان متخصص). بهتر است زیرشکنی خاک در تابستان انجام شود و بعد از گذشت یک فصل زمستان، کاشت محصول انجام گردد. با توجه به اینکه اثر زیرشکنی خاک در حدود ۳-۵ سال باقی می‌ماند و پس از گذشت زمان فوق مجدداً نیاز به زیرشکنی خاک است، پیشنهاد می‌گردد با مدیریت صحیح مکانیزاسیون و آب و خاک از فشرده شدن خاک‌های زراعی جلوگیری به عمل آید.

## منابع مورد استفاده

- بای بوردی، م. ۱۳۶۸. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران.
- بی نام. ۱۳۷۶. راهنمای استفاده از انواع دکمپکتور و ساب سویلر. شرکت قطعات آهنگری خراسان.
- بی نام. ۱۳۷۵. خاک ورزی و پدیده فشردگی خاک در کشاورزی. مجله آب خاک ماشین. ۱۳-۲۳: ۱۹.
- زارع، ا. ش. شجری، ع. ا. صلح جو، ح. امین، م. جمالی، ز. خوگر، م. تقی زاده، س. ا. دهقانپان و ب. منصوری. ۱۳۸۳. بررسی عوامل مؤثر بر تولید و کارایی گندم کار آن در استان فارس. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی کارگروه پژوهش، آمار و فناوری اطلاعات استان فارس، گروه کارشناسی امور کشاورزی و آب، شماره ۸ / ۴۷۳۸۴ / ۳۰۰.
- شریفی، ا. و ا. جوادی. ۱۳۸۶. فشردگی خاک، مشکلات، راه حل ها، روش های اندازه گیری. نشریه فنی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، شماره ۱، ۳۷ ص.
- صلح جو، ع. ا. ۱۳۸۴. بررسی تأثیر عملیات زیرشکن، تداوم اثر و دور آبیاری روی تولید چغندر قند. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۵۹ ص.
- صلح جو، ع. ا. ۱۳۷۶. تعیین مدل ریاضی شاخص مخروط (مقاومت به نفوذ) در منطقه زرقان فارس. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- صلح جو، ع. ا. ۱۳۹۳. زیرشکن و استفاده بهینه از آن. نشریه فنی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، شماره ۴۶، ۲۹ ص.
- صلح جو، ع. ا. و م. لغوی. ۱۳۷۷. بررسی اثر تراکم خاک بر محیط. مجله آب، خاک، ماشین، ۱۷: ۳۰-۳۴.
- صلح جو، ع. ا. و م. لغوی. ۱۳۷۹. رطوبت مناسب خاک جهت اندازه گیری شاخص مخروط خاک، توسط دستگاه نفوذسنج مخروطی. مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۱۷: ۴۳-۵۰.
- صلح جو، ع. ا. و ج. نیازی. ۱۳۸۰. تأثیر عملیات زیرشکن بر خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد گندم آبی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۷: ۶۵-۷۸.
- صلح جو، ع. ا. و ج. نیازی. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر کاربرد زیرشکن در فواصل مختلف از زهکش های روباز بر شوری زدایی خاک و عملکرد گندم آبی. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی کارگروه پژوهش، آمار و فناوری اطلاعات استان فارس، ۳۱ ص.

- صلح جو، ع. ا. و د. محمدی. ۱۳۸۶. مقایسه فنی- اقتصادی زیرشکنی خاک و خاک‌ورزی مرسوم در دوره‌های آبیاری بر تولید چغندرقد. پژوهش و سازندگی، ۷۷: ۱۹۱-۱۸۲.
- صلح جو، ع. ا. و ع. سی سختی. ۱۳۸۳. تأثیر عملیات زیرشکن بر افزایش عملکرد چغندرقد در شهرستان اقلید استان فارس. گزارش نهایی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، ۲۵ ص.
- صلح جو، ع. ا. س. ا. دهقانیان، ع. سپاسخواه و م. نیرومند جهرمی. ۱۳۸۴. تأثیر عملیات زیرشکن و دور آبیاری بر خواص فیزیکی خاک و عملکرد چغندرقد. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۲۵: ۱۴۴-۱۳۱.
- فصیحیانی، ع. ۱۳۸۳. بررسی تأثیر عملیات زیرشکن بر پوسیدگی ریشه چغندرقد. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، ۳۳ ص.
- محمدی مزرعه، ح. و م. خلیلی. ۱۳۸۳. تأثیر عملیات زیرشکنی خاک و دور آبیاری بر عملکرد ذرت دانه‌ای. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۲۱: ۴۸-۳۷.
- Afzlinia, S., A. A. Solhjoui and I. Eskandari. 2011. Effects of subsoiling on some soil physical properties and wheat yield in a dry land ecological condition. *J. of Agric. Sci. and Tech.*, A1: 842-847.
- Alakukku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long- term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil and Till. Res.*, 37:223-238.
- ASAE. 1995. Soil cone penetrometer. ASAE standard S313. 2. Agricultural Engineering Year Book, P. 683.
- Cassel, D. K. and E. C. Edwards. 1985. Effects of subsoiling and irrigation on corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 (4): 996-1001.
- Chen-yan, Z., Y. U. Zhen-wen, S. Yu, C. U. I. Shi-ming, W. Dong, Z. Yong-li and Z. Jun-ye. 2014. Effects of tillage practices on water consumption, water use efficiency and grain yield in wheat field. *Journal of Integrative Agriculture*, 13: 60733-60739.
- Chyba, J., M. Kroulik, K. Kristof, P. A. Misiewicz and K. Chaney. 2014. Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate on grassland. *Agronomy Research*, 12 (1): 59-64.

- Davies, D. B., D. J. Eagle and J. B. Finney. 1993. Soil Management. Farming Press Publication. 280 P.
- Hamza, M. A. and W. K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems a review of nature, causes and possible solutions. *Soil and Till. Res.*, 82: 121-145.
- Odey, S. O., S. L. Manuwa and O. C. Ademosum. 2014. Effect of tractor traffic and moisture content on cone index in a crop-cultivated land. Proceedings of the International Soil and Tillage Research Organization (ISTRO), Nigeria Symposium, Akure, 2014 November 3-6, Akure, Nigeria.
- Söhne, W.H. 1958. Pressure distribution in and deformability of agricultural soil. Translation 37 from *Kolloid Zeitschrift*, 131: 89-96, NIAE, Silsoe, England.
- Soane, B. D. and C. Van Quwerkerk. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Till. Res.* 35: 2-22.
- Spoor, G. and R. J. Godwin. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. Agric. Eng. Res.* 23: 243-258.
- Unger, P. W. and T. C. Kaspar. 1994. Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.* 86: 759-766.