



Long-term crop management and formation of plow pan: its consequences on soil physico-chemical properties

Alireza Raheb¹  | Ahmad Heidari² 

1. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: araheb@ut.ac.ir

2. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ahaidari@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 24, 2022

Revised: March. 3, 2023

Accepted: March. 4, 2023

Published online: March. 21, 2023

Keywords:

Food Security,
Irrigation,
Semi-Arid Regions,
Soil Degradation,
Soil Quality,
Sustainable Agriculture,
Yield Reduction.

ABSTRACT

Soil compaction and formation of plow pan in Iranian agricultural soils became a serious problem, which threatens regional productivity. The formation of plow pan due to the long-term use of tillage tools at a constant depth, is a common consequence of conventional tillage, which limits crop growth. In order to prove the existence of plow pan and its effect on physical and chemical soil characteristics, 32 soil profiles (eight soil profiles in each region) were analyzed in Qazvin, Golestan, Markazi and Khuzestan provinces. In all four regions and in 70% of the soils, plow pan with an average thickness of 24 cm was observed at 16 to 64 cm below the surface. Total porosity and the amount of bulk density showed respectively about 7-19% decrease and 5-14% increase in the plow pan compared to other horizons. The depth of the formation of this layer and its vertical expansion as well as the intensity of compaction in the soils of the studied areas have been different. The presence of the plow pan (except for Abyek region of Qazvin) had caused the accumulation of 14 to 40% of dissolved salts and the creation of a relatively saline layer under the surface horizon (Ap). The most important reason for the high compaction of the plow pan in the Gonbad agricultural area compared to the other three areas, was the high average percentage of silt (about 60%) in this area. In addition to the effect of soil texture, the predominance of submerged irrigation, despite the aridity of the climate, intensifies the compaction and resistance to root penetration especially in the agricultural areas of Golestan, Khuzestan and Markazi provinces, because annual plowing at constant depths along with heavy irrigation with a large volume of water leads to the eluviation of clay and silt particles from the surface and illuviation in depth.

Cite this article: Raheb, A. R., & Heidari, A., (2023). Long-term crop management and formation of plow pan: its consequences on soil physico-chemical properties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (1), 33-48. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352817.669418>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352817.669418>



اثرات مدیریت زراعی درازمدت در تشکیل سخت لایه شخم: پیامدهای آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

علیرضا راهب^۱ | احمد حیدری^۲^۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: araheb@ut.ac.ir^۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ahaidari@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱/۱

واژه‌های کلیدی:

آبیاری،

امنیت غذایی،

تخریب خاک،

کاهش عملکرد،

کشاورزی پایدار،

کیفیت خاک،

مناطق نیمه‌خشک.

فشرده‌گی خاک و تشکیل سخت لایه شخم در خاک‌های کشاورزی ایران به یک معضل جدی تبدیل شده که بهره‌وری منطقه را تهدید می‌کند. تشکیل سخت لایه شخم به دلیل کاربرد درازمدت ادوات خاک‌ورزی در یک عمق ثابت، پیامد مهم شیوه خاک‌ورزی مرسوم در اراضی زراعی است که رشد محصول را کاهش می‌دهد. برای اثبات وجود سخت لایه شخم و درک نقش آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ۳۲ خاک‌رخ (۸ خاک‌رخ در هر منطقه) در چهار استان قزوین، گلستان، مرکزی و خوزستان با اقلیم نیمه‌خشک حفر، تشریح و نمونه‌برداری گردید. در هر چهار منطقه و در ۷۰ درصد از خاک‌رخ‌ها، سخت لایه شخم با ضخامت متوسط ۲۴ سانتی‌متر در ۱۶ تا ۶۴ سانتی‌متری زیر سطح خاک مشاهده شد. در سخت لایه شخم نسبت به سایر افق‌ها مقدار تخلخل کل خاک از ۷ تا ۱۹٪ کاهش و میزان جرم مخصوص ظاهری خاک بین ۵ تا ۱۴٪ افزایش داشت. عمق تشکیل این لایه و گسترش عمودی آن و همچنین شدت تراکم آن در خاک‌های مناطق مختلف، متفاوت بوده است. وجود سخت لایه شخم (به‌غیر از منطقه آبیک قزوین) باعث تجمع ۱۴ تا ۴۰ درصدی املاح محلول و ایجاد یک لایه نسبتاً شور در زیر افق سطحی (Ap) شده بود. مهمترین دلیل تراکم بودن سخت لایه شخم در منطقه زراعی گنبد نسبت به سه منطقه دیگر، بالا بودن میانگین درصد سیلت (حدود ۶۰ درصد) در این منطقه بود. در کنار اثر بافت خاک، غالب بودن روش آبیاری غرقابی در هر چهار منطقه علی‌رغم خشک بودن اقلیم نیز باعث تشدید تراکم و غیرقابل نفوذ شدن سخت لایه شخم به ویژه در مناطق زراعی استان‌های گلستان، خوزستان و مرکزی شده است، زیرا شخم سالانه در اعماق ثابت در کنار آبیاری سنگین با حجم زیاد آب، سبب شستشوی ذرات رس و سیلت از سطح خاک و تجمع در عمق تراکم شده می‌گردد.

استناد: راهب؛ علیرضا، حیدری؛ احمد، (۱۴۰۲). اثرات مدیریت زراعی درازمدت در تشکیل سخت لایه شخم: پیامدهای آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک. مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱)، ۴۸-۳۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352817.669418>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352817.669418>

مقدمه

شیوه‌های مدیریت کشاورزی، اغلب تغییراتی در ویژگی‌های خاک ایجاد می‌کنند که به طور معمول منجر به کاهش کیفیت فیزیکی خاک شده و تعادل موجود در روابط آب و خاک را در مقیاس‌های مختلف مطالعات خاک تحت تاثیر قرار می‌دهد (Bertolino *et al*, 2010). عملیات خاک‌ورزی (شخم و شیار) و نحوه اجرای آن اثرات مختلفی بر کیفیت خاک، جذب و نگهداری آب، میزان تولید محصول، زمان و هزینه، و در نهایت افزایش بهره‌وری آب دارد (Peng *et al*, 2019). در کشاورزی پایدار برای کاهش هرچه بیش‌تر دست‌خوردگی و جابجایی خاک، استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی^۱ و کم‌خاک‌ورزی^۲) مرسوم و متداول است (Brennan *et al*, 2014; Peng *et al*, 2019). قهرمانپور و همکاران، (۱۳۹۷). تاثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، روند ثابتی ندارد (Strudley *et al*, 2008). روش‌های مرسوم^۳ و غیرحفاظتی خاک‌ورزی باعث به هم‌خوردگی زیاد، تخریب ساختمان و خرد شدن خاکدانه‌ها، کاهش مواد آلی و کلوخه‌های شدن خاک می‌شود. خاک‌ورزی غیرحفاظتی همچنین سبب افزایش تبخیر، مصرف زیاد آب، ناهموار شدن سطح زمین، فرسایش بادی و آبی، و ایجاد سخت لایه در زیر لایه شخم می‌شود (Jat *et al*, 2019). الموتی و همکاران، (۱۳۹۸). این نوع خاک‌ورزی، به علت عدم توجه به مدیریت بقایای گیاهی و انتقال خاک مرطوب زیرین به سطح، باعث اتلاف ذخیره رطوبتی خاک می‌گردد (Biazin *et al*, 2015; Temesgen, 2007; Gronle *et al*, 2011).

فشردگی خاک در زیر لایه شخم که منجر به تشکیل لایه سخت می‌شود، پدیده‌ای رایج در زمین‌های کشاورزی با بهره‌برداری درازمدت است (Jeřábek *et al*, 2017). شخم مکرر و خاک‌ورزی طولانی مدت موجب تخریب ساختمان خاک شده و در پی آن لایه‌های سخت در زیر لایه سطحی ایجاد می‌شود. عوامل مختلفی از قبیل شرایط اقلیمی، سیستم خاک‌ورزی (Pagliai *et al*, 2004) و ماشین آلات مورد استفاده (Pagliai *et al*, 2003) می‌توانند منجر به افزایش یا کاهش فشردگی خاک گردند. از عوامل تاثیرگذار در تشکیل سخت لایه^۴ شخم می‌توان به استفاده گسترده از گاو آهن برگردان‌دار، دیسک‌زدن مکرر و به‌کارگیری ماله جهت تسطیح اشاره کرد (Sang *et al*, 2019; Li *et al*, 2019; Dong *et al*, 2017; Sip *et al*, 2013; 2016). برآورد شده که تخریب خاک ناشی از تراکم، حدود ۶۸ میلیون هکتار از زمین‌های جهان را تحت تاثیر قرار داده است. از بین بردن این لایه بسیار مشکل و با صرف هزینه و انرژی زیاد همراه است. سخت لایه شخم نفوذ آب به عمق بیشتر خاک و لایه‌های زیرین کاهش داده و علاوه بر این، سد راه نفوذ ریشه به زیر سخت‌لایه شده و بر عملکرد تاثیر منفی می‌گذارد (Jeřábek *et al*, 2017). عدم رشد مناسب ریشه یکی از خطرناک‌ترین اثرات این لایه متراکم گزارش شده است و در نتیجه آن زیست‌توده و عملکرد گیاهی در لایه متراکم شده کاهش می‌یابد (Lipiec *et al*, 2012; Colombi *et al*, 2016).

خاک تحتانی می‌تواند مقادیر زیادی آب و مواد مغذی را ذخیره کرده و نیاز تغذیه‌ای محصولات را حتی در شرایط خشکسالی تامین کند (Schneider *et al*, 2017). با این حال، سخت‌لایه شخم مانع دسترسی ریشه محصولات به آب، کود و عناصر غذایی خاک تحتانی شده و تبادل گاز و گرما بین خاک سطحی و خاک زیرین را محدود می‌نماید و در نتیجه تولید محصول را کاهش می‌دهد (Dong *et al*, 2017; Zhai *et al*, 2017). سخت‌لایه‌های شخم باعث کاهش تخلخل (Radford *et al*, 2000; Motavalli *et al*, 2003)، افزایش چگالی ظاهری (Xu and Mermoud, 2001)، زهکشی نامطلوب، کاهش تهویه خاک، کاهش حرکت عمودی آب (Martínez *et al*, 2008; Bertolino *et al*, 2010) و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع (Arvidsson, 2001) شده و از طریق افزایش رواناب سطحی موجب هدررفت عناصر غذایی، کاهش حاصلخیزی خاک و تلفات گازی عناصر غذایی (Brussaard and Van Faassen, 1994) و در نهایت کاهش رشد محصول می‌شود (Liu *et al*, 2015; Zhai *et al*, 2017).

کشاورزان از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از زیرشکن، تناوب زراعی مناسب و استفاده از ماشین‌آلات ترکیبی برای اصلاح سخت‌لایه شخم استفاده می‌کنند (Ma *et al*, 2015). در این میان، استفاده از ادوات زیرشکن نقش مهمی در شکستن کارآمد سخت‌لایه شخم در مدیریت مزرعه ایفا می‌کند (Cai *et al*, 2014). خاک‌ورزی عمیق تا عمق ۵۰ سانتی‌متر می‌تواند محتوای آب خاک را افزایش دهد و دسترسی به خاک زیرین را برای گیاه بهبود بخشد (Brennan *et al*, 2014). از این گذشته، این عمل تاثیرات بارزی بر شکل ظاهری ریشه داشته و مقاومت آن را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد (Cai *et al*, 2014). در نهایت، عملیات آماده‌سازی زمین زراعی باعث افزایش رشد ریشه، جذب مواد مغذی (Guan *et al*, 2014) و بهبود عملکرد محصول می‌شود (Lin *et al*, 2016). البته باید در نظر

1-No tillage

2-Reduced tillage

3-Conventional tillage

4 Plow pan or Ploughpan

داشت که شکستن بی‌رویه و پی در پی سخت‌لایه شخم در زمین‌های کشاورزی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای اثر منفی خواهد گذاشت (Li *et al*, 2016; Wang *et al*, 2008; Zhang *et al*, 2007). شکستن سخت‌لایه شخم، از طرفی به طور جزئی یا کامل سرعت خالص فتوسنتز، بازده مصرف آب و بازده مصرف نیتروژن را افزایش داده و می‌تواند سبب کاهش انتشار N_2O شود؛ اما از طرف دیگر، این عمل ممکن است انتشار گاز CO_2 را افزایش دهد (Li *et al*, 2019).

علی‌رغم اینکه ایران یکی از کشورهای عمده تولید کننده محصولات کشاورزی در منطقه است، اما عملکرد محصولات زراعی کشور، یعنی میزان تولید در هکتار، پایین‌تر از متوسط عملکرد منطقه است (یوسف گمرکچی، ۱۴۰۰؛ سبزواری و همکاران، ۱۳۹۹). طی چند دهه اخیر، مسئله فشرده‌گی خاک‌های زراعی و سخت‌لایه شخم به عنوان یک عامل منفی در عملکرد محصولات مختلف معرفی شده و تلاش زیادی در این زمینه به عمل آمده است تا راه‌های کاهش این اثرات منفی، ارزیابی و معرفی گردد. اما متأسفانه هنوز اثرات سخت‌لایه شخم بر خصوصیات مختلف خاک به خوبی شناخته نشده است (صلح جو، ۱۳۹۳؛ شریفی و جوادی، ۱۳۹۵). مطالعات معدودی که در ارتباط با سخت‌لایه شخم در کشور صورت پذیرفته، بیشتر بر تاثیر ماشین آلات کشاورزی، نوع شخم و تناوب کشت بر ایجاد سخت‌لایه شخم اشاره دارند. در سال‌های اخیر فشرده‌گی خاک در اثر افزایش اندازه و تردد بیش از پیش ماشین‌آلات و ادوات در کنار کم توجهی به تناوب‌های زراعی، مشکلات زیادی را در کاهش عملکرد محصولات زراعی به وجود آورده است (شریفی و جوادی، ۱۳۹۵). عظیم‌زاده و همکاران (۱۳۸۱) روش‌های مختلف شخم بر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت خاک و عملکرد گندم در شرایط دیم را بررسی نمودند. جعفرپیشه و همکاران (۱۳۸۸) نیز برخی خصوصیات فیزیکی و میکرومورفولوژیکی سخت‌لایه‌های موجود در خاک‌های ورتی‌سول استان اصفهان را مطالعه نمودند. جوادی و شهیدزاده (۱۳۸۴)، صلح جو (۱۳۹۳) و الموتی و همکاران (۱۳۹۴) به ترتیب اثر کاربرد گاواهن برگرداندار، استفاده از زیرشکن و نقش سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی بر ایجاد و یا حذف سخت‌لایه شخم در اراضی زراعی کشور را مورد بررسی قرار دادند. عباسیان و همکاران (۱۳۹۴) تاثیر ادوات خاک‌ورزی، زمان و تعداد شخم دوم (ایجاد لایه گل‌خراش و سخت‌لایه شخم) را بر عملکرد برنج مورد بررسی قرار دادند. شریفی و جوادی (۱۳۹۵) نیز در مطالعات خود به بررسی اثرات منفی ناشی از وجود سخت‌لایه شخم بر عملکرد محصولات زراعی مختلف پرداختند. صادقی و همکاران (۱۳۹۸) و همچنین قهرمان‌پور و همکاران (۱۳۹۸) اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر شاخص‌های کیفیت خاک و فعالیت بیولوژیکی و آنزیمی خاک را مطالعه نمودند.

حذف و اصلاح سخت‌لایه شخم یکی از مراحل کلیدی برای دستیابی به شرایط مطلوب جهت تولید بیشتر و برخورداری از مزایای زیست‌محیطی بهتر می‌باشد. با توجه به جایگاه اقتصادی، استراتژیک و اهمیت گیاهان زراعی در کشور و جهان، به منظور دستیابی به عملکرد بالاتر، علاوه بر افزایش سطح زیر کشت، استفاده از روش‌های اصلاحی خاک و انجام تحقیقات گسترده در این زمینه نیز سودمند می‌باشد. با در نظر گرفتن مطالب فوق، هدف از این پژوهش اثبات وجود سخت‌لایه شخم در خاک‌های زراعی چهار استان پیشرو در زراعت آبی کشور بوده تا تاثیر آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، و نیز نقش این سخت‌لایه شخم در مدیریت پایدار خاک مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مناطقی با کاربری زراعت آبی (هر کدام با وسعت تقریبی ۲۰۰۰ هکتار) واقع در چهار استان قزوین، خوزستان، گلستان و مرکزی با اقلیم نیمه‌خشک صورت گرفت (شکل ۱، جدول ۱). پس از تهیه نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع منطقه با استفاده از DEM^۱ و تعیین زمین‌شناسی هر یک از واحدهای شکل زمین براساس نقشه زمین‌شناسی، ۳۲ خاک‌رخ (۸ خاک‌رخ در هر منطقه) انتخاب، حفرو، تشریح و نمونه‌برداری گردید (شکل ۲). از نظر توپوگرافی مناطق مورد مطالعه کاملاً مسطح بوده و میزان شیب و تغییرات آن حداقل می‌باشد؛ اما با توجه به شرایط فرسایشی و رسوبی و زمان، عمق خاک‌ها از کم عمق تا بسیار عمیق متغیر بودند. تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک برداشت شده پس از هواخشک کردن و عبور دادن از الک ۲ میلی‌متری با استفاده از روش‌های زیر انجام گردید: بافت به روش هیدرومتر، pH و EC عصاره اشباع (Carter and Gregorich, 2008)، کربن آلی بر مبنای روش والکلی-بلاک، درصد کربنات کلسیم معادل (CCE)^۲ با استفاده از روش کلسیمتری (Sparks, 1996). برای اندازه‌گیری تغییرات جرم مخصوص ظاهری با عمق نیز نمونه‌های خاک

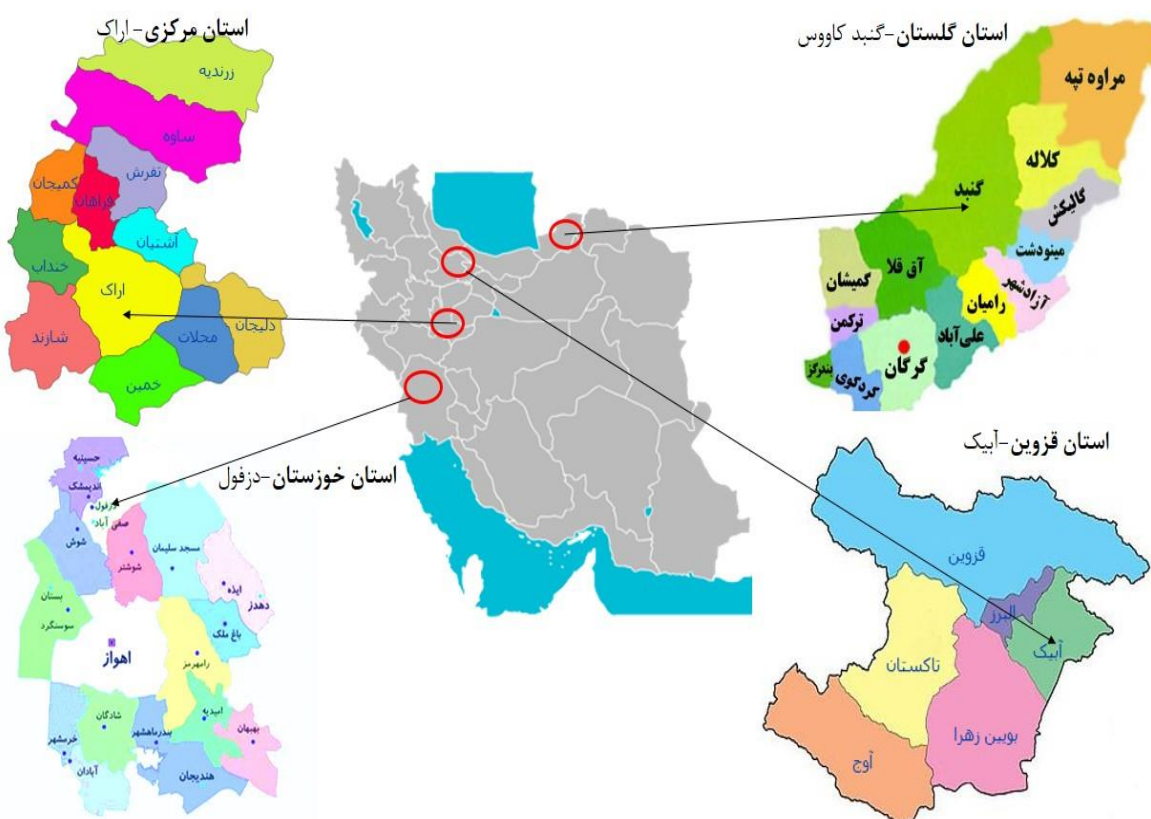
1. Digital Elevation Model
2. Calcium Carbonate Equivalent

دست‌نخورده توسط استوانه فلزی با حجم مشخص برداشت شد (Kunze and Dixon, 1986). تشریح خاک‌ها براساس روش‌های استاندارد (Soil survey manual, 2017) و رده‌بندی خاک‌ها نیز براساس رده‌بندی آمریکایی (Soil Survey Staff, 2022) صورت پذیرفت.

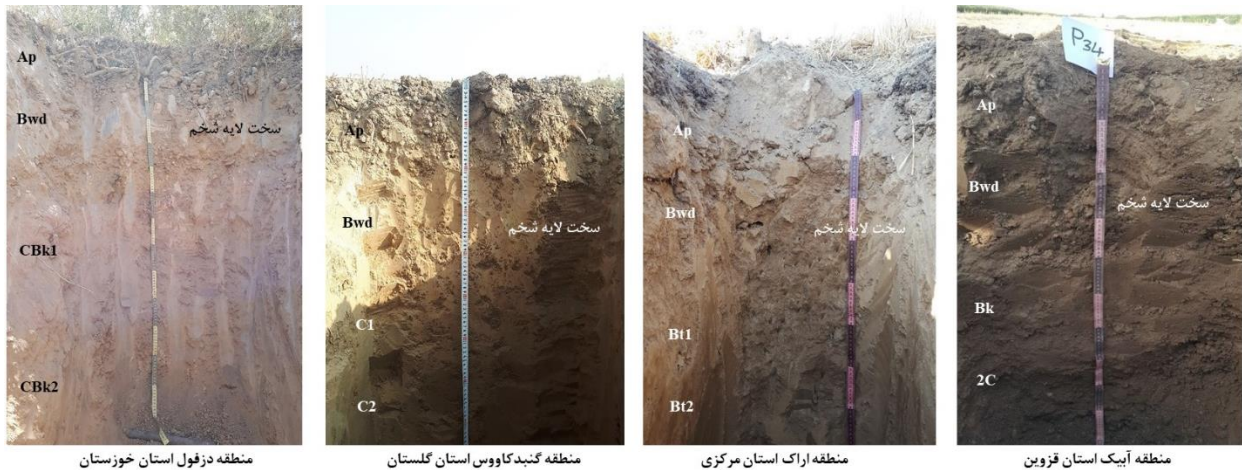
جدول ۱. خصوصیات زمین شناسی، اقلیمی و رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در مناطق مورد مطالعه

منطقه	مواد مادری	کاربری/کشت غالب	منبع تامین آب / شوری متوسط (dSm ⁻¹)	رژیم رطوبتی [*]	رژیم حرارتی	ارتفاع ^{**} (m.a.s.l)	میانگین بارندگی (mm)	میانگین دما (°C)
آبیک قزوین	رسوبات آبرفتی/کوهرفتی	زراعت آبی/گندم، ذرت علوفه ای، کلزا	سد طالقان/کمتر از ۱ dSm ⁻¹	اریدیک	ترمیک	۱۲۴۰-۱۲۸۵	۲۵۹	۱۵/۳
اراک مرکزی	رسوبات آبرفتی	زراعت آبی/گندم، جو، ذرت علوفه ای	چاه عمیق/بیشتر از ۴ dSm ⁻¹	اریدیک	ترمیک	۱۶۷۵-۱۷۱۹	۳۴۵	۱۴/۴
گنبد کاووس گلستان	رسوبات لسی	زراعت آبی/جو، هندوانه آجیلی	چاه عمیق/بیشتر از ۴ dSm ⁻¹	یوستیک	ترمیک	۳۳-۴۵	۲۵۴	۱۸/۸
دزفول خوزستان	رسوبات آبرفتی	زراعت آبی/ گندم، ذرت علوفه ای، چغندرقد	سد کرخه/کمتر از ۱ dSm ⁻¹	یوستیک	هایپرترمیک	۸۱-۹۵	۳۴۸	۲۴

^{*} رژیم حرارتی و رطوبتی مناطق مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار (۲۰۱۲) jNSM^۱ تعیین گردیده است (USDA-NRCS, 2012).
^{**} ارتفاع بر حسب متر از سطح دریای آزاد



شکل ۱. موقعیت مناطق مورد مطالعه روی نقشه ایران



شکل ۲. تصاویر برخی از خاک‌رخ‌های چهار منطقه مورد مطالعه

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

نتایج حاصل از بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برخی خاک‌رخ‌های چهار منطقه مورد مطالعه نشان داد که خاک‌های مناطق مورد مطالعه به ترتیب فراوانی در چهار رده اینسپتی‌سول، ایریدی‌سول، مالی‌سول و آلفی‌سول رده‌بندی شدند (جدول ۲). افق‌های مشخصه شناسایی شده در این خاک‌ها شامل افق‌های سطحی اکریک و مالیک و افق‌های زیر سطحی آرجیلیک، کلسیک و کمبیک می‌باشند. خاک‌های مورد مطالعه دارای دامنه تغییرات قابل توجهی از نظر بافت خاک بودند و در کلاس‌های بافت لوم سیلتی < سیلتی رسی < لوم رسی < رسی < لوم < لوم شنی قرار داشتند (جدول ۲). pH اندازه‌گیری شده در عصاره اشباع در تمام نمونه‌های مورد مطالعه قلیایی (میانگین ۸/۲۱) بود و مقادیر EC عصاره اشباع نیز از حداقل ۰/۵۱ dSm^{-1} در اعماق خاک‌رخ‌های منطقه استان خوزستان تا ۲۱/۴ dSm^{-1} در خاک‌رخ‌های استان گلستان متغیر بود (جدول ۲). مقدار کربن آلی در هر چهار منطقه مورد مطالعه در افق‌های سطحی بیشتر از افق‌های زیرین به دست آمد و با افزایش عمق کاهش یافت. دامنه تغییرات کربن آلی خاک در نمونه‌های مورد مطالعه بین حداقل ۰/۰۶ تا ۱/۴ درصد بود و حداکثر مقدار آن در افق سطحی خاک‌رخ‌های منطقه استان قزوین با رده اینسپتی‌سول و حداقل آن در افق‌های زیرسطحی خاک‌رخ‌های منطقه دزفول استان خوزستان با رده مالی‌سول مشاهده شد. مقدار کربنات کلسیم معادل در هر چهار منطقه مورد مطالعه برخلاف تغییرات کربن آلی، در افق‌های سطحی کمتر از افق‌های زیرین بود و با افزایش عمق افزایش یافت. دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل بین مقادیر بسیار ناچیز (۰/۷۳) تا ۳۳/۳ درصد متغیر بود (جدول ۲).

سخت‌لایه شخم در اکثر خاک‌رخ‌های مطالعه شده در عمق ۱۶ تا ۶۴ سانتی‌متری از سطح خاک به صورت لایه‌ای فاقد سنگریزه و ریشه، دارای تخلخل ریز تا خیلی ریز تشکیل شده بود. جرم مخصوص ظاهری از ۵ تا ۱۴٪ افزایش و درصد تخلخل از ۷ تا ۱۹٪ کاهش نشان داد (جدول ۲). افق Bwd که یک افق متراکم شده است در اکثر خاک‌رخ‌های مورد مطالعه مشاهده شد (جدول ۲). با توجه به سابقه تسطیح اراضی در مناطق مورد مطالعه که در طی آن خاک سطحی کنار زده شده و پس از تسطیح مجدداً به سطح خاک برگردانده شده است، متراکم شدن خاک طبیعی است. به‌علاوه چند دهه عملیات زراعی و آبخوبی و متعاقباً انتقال ذرات رس نیز متراکم شدن هرچه بیشتر سخت‌لایه را تشدید کرده است. میانگین درصد رس در سخت‌لایه شخم نسبت به لایه سطحی خاک از حداقل مقدار در منطقه دزفول استان خوزستان تا ۳۴ درصد در منطقه گنبد کاووس استان گلستان افزایش نشان داد (جدول ۲). شخم خوردگی خاک سطحی باعث بهم‌خوردگی و تخریب ساختمان خاک شده و در اثر آبیاری و ورود حجم زیاد آب ناشی از آبیاری غرقابی به خاک، ذرات ریز خاک به اعماق منتقل می‌شود و در انتهای لایه سخت‌ناشی از شخم‌زدن مکرر در عمق ثابت تجمع می‌یابد. حرکت ذرات ریز می‌تواند از یک افق به افق دیگر انجام شود یا در درون یک افق صورت گیرد. تحرک رس تحت تاثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد. در خاک‌هایی که به صورت دوره‌ای خشک هستند، ذرات ریز و رس به طرف پایین حرکت می‌کنند و در خاک تحت‌الارضی خشک با جذب محلول خاک متوقف می‌شوند. در طی جذب محلول خاک، سطح خاکدانه مانند یک فیلتر عمل می‌نماید و ذرات ریز را در ورود به خاکدانه متوقف می‌کند. از طرف دیگر وجود تضاد شدید بافتی و همچنین انواع لایه‌های با نفوذپذیری کم می‌تواند سبب تجمع این ذرات گردد (Buol et al, 2011).

جدول ۲. نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برخی خاک‌های چهار منطقه مطالعه شده

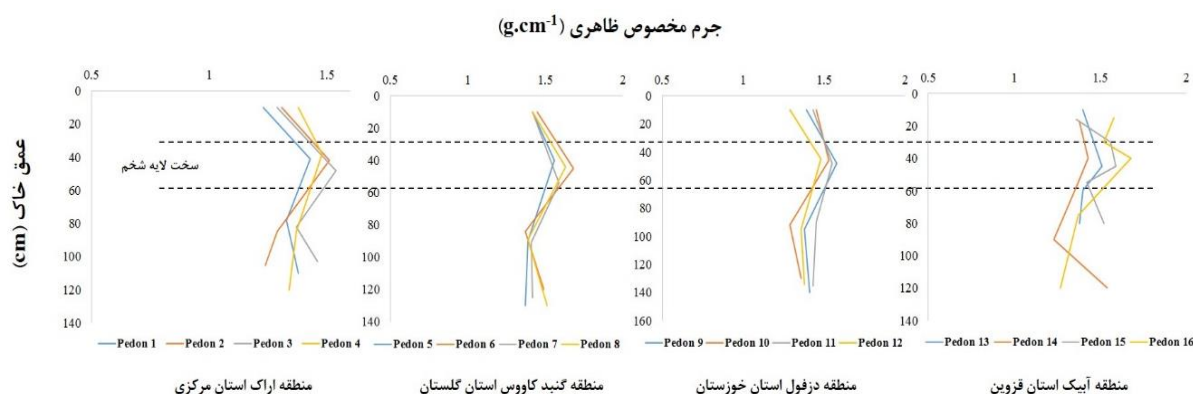
کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	بافت خاک	سیلت	رس	شن	تخلخل کل	جرم مخصوص ظاهری (gcm ⁻³)	E _{Ce} (dSm ⁻¹)	pHe	ضخامت cm	افق	
%		%										
منطقه اراک استان مرکزی												
Fine, Mixed, semiactive, Thermic, Typic Haplocambids												
۲۶/۹	-/۴۱	Si.L	۶۲	۲۵	۱۳	۵۴	۱/۲۳	۶/۶۹	۸/۲	۰-۲۶	Ap	
۲۲/۸	-/۱۶	Si.C.L	۵۲	۳۷	۱۱	۴۶	۱/۴۳	۱۲/۵۰	۸/۲	۲۶-۵۱	Bw1d	
۲۴/۱	-/۱۶	Si.C	۵۴	۴۱	۵	۵۰	۱/۳۳	۱۵/۷۰	۸/۳	۵۱-۷۸	Bw2	
۲۳/۴	-/۱۶	Si.C.L	۶۰	۳۷	۳	۵۱	۱/۳۱	۱۸/۵۰	۸/۱	۷۸-۱۳۲	Bw3	
Very fine, Mixed, semiactive, Thermic, Typic Haplargids												
۲۷/۵	-/۹۵	Si.C	۴۳	۴۷	۱۰	۵۱	۱/۳۱	۲/۰۴	۸/۵	۰-۲۵	Ap	
۲۶/۸	-/۶۲	Si.C	۴۰	۵۳	۷	۴۳	۱/۵۱	۲/۲۵	۸/۵	۲۵-۵۲	Bwd	
۲۹/۲	-/۳۲	C	۲۹	۶۵	۶	۵۱	۱/۲۹	۲/۳۹	۸/۶	۵۲-۸۵	Bt1	
۳۳/۳	-/۲۲	C	۲۸	۶۵	۷	۵۳	۱/۲۴	۲/۰۶	۸/۶	۸۵-۱۱۵	Bt2	
Very fine, Mixed, semiactive, Thermic, Typic Haplocambids												
۲۳/۴	-/۳۰	Si.C.L	۵۵	۳۶	۹	۵۱	۱/۲۹	۱۰/۳۰	۸/۱	۰-۲۴	Ap	
۲۱/۵	-/۱۷	C	۳۷	۶۲	۱	۴۲	۱/۵۴	۶/۳۵	۸/۷	۲۴-۵۸	Bw1d	
۲۰/۷	-/۱۶	C	۳۳	۶۶	۱	۴۸	۱/۳۷	۷/۲۶	۸/۹	۵۸-۸۲	Bw2	
۲۲/۰	-/۱۲	C	۳۵	۶۲	۳	۵۱	۱/۳۱	۶/۸	۸/۸	۸۲-۱۱۶	Bw3	
Fine, Mixed, semiactive, Thermic, Typic Haplocambids												
۲۵/۵	-/۶۳	Si.C	۴۶	۴۵	۹	۴۸	۱/۲۸	۲/۸۴	۸/۷	۰-۲۵	Ap	
۲۸/۹	-/۱۳	Si.C	۵۶	۴۲	۲	۴۶	۱/۴۳	۳/۷۸	۹/۱	۲۵-۴۹	Bwd	
۲۷/۶	-/۰۹	Si.C	۵۷	۴۱	۲	۴۸	۱/۳۷	۵/۵۴	۹/۱	۴۹-۸۵	Bt1	
۲۴/۱	-/۱۰	Si.C.L	۵۶	۳۹	۵	۵۴	۱/۲۳	۷/۴۵	۹/۰	۸۵-۱۲۳	Bt2	
منطقه گنبد کاووس استان گلستان												
Fine silty, Mixed, active, Thermic Typic Calcustepts												
۱۲/۲	۱/۳	L.Si	۵۷	۲۲	۲۱	۴۹	۱/۳۶	۳/۱۹	۸/۲	۰-۲۶	Ap	
۱۷/۹	-/۱۸	L.C.Si	۵۲	۳۳	۱۵	۴۱	۱/۵۶	۵/۲۴	۸/۴	۲۶-۵۰	CBk1d	
۱۷/۳	-/۱۰	L.Si	۵۷	۲۶	۱۷	۴۸	۱/۳۹	۴/۹۱	۸/۲	۵۰-۹۰	CBk2	
۱۷/۰	-/۰۸	L.Si	۶۰	۲۰	۲۰	۴۸	۱/۳۷	۴/۸۱	۷/۹	۹۰-۱۵۰	C	
Fine silty, Mixed, active, Thermic, Typic Haplustepts												
۱۳/۱	-/۷۱	L.Si	۵۷	۲۳	۲۰	۴۵	۱/۴۵	۳/۸۶	۸/۴	۰-۲۸	Ap	
۱۶/۹	-/۲۴	L.C.Si	۵۵	۲۹	۱۶	۳۷	۱/۶۷	۴/۳۲	۸/۲	۲۸-۵۵	Bwd	
۱۶/۹	-/۱۱	L.Si	۵۸	۲۶	۱۶	۴۸	۱/۳۷	۷/۹۳	۸/۱	۵۵-۸۴	C1	
۱۶/۹	-/۱۱	L.Si	۵۷	۲۳	۲۰	۴۹	۱/۳۵	۹/۰۵	۸/۰	۸۴-۱۲۰	C2	
Fine silty, Mixed, active, Thermic Typic Calcustepts												
۱۳/۴	-/۷۴	L.Si	۶۰	۲۳	۱۷	۴۶	۱/۴۲	۶/۴۴	۸/۲	۰-۳۲	Ap	
۱۴/۳	-/۴۴	L.Si	۵۹	۲۶	۱۵	۴۰	۱/۵۹	۹/۲۴	۸/۳	۳۲-۶۴	Bwd	
۱۷/۳	-/۱۰	L.Si	۵۹	۲۶	۱۵	۴۷	۱/۴۱	۱۷/۱	۸/۰	۶۴-۹۱	CBk1	
۱۵/۷	-/۱۱	L.Si	۶۰	۲۳	۱۷	۴۷	۱/۴۱	۲۱/۴	۸/۰	۹۱-۱۴۰	CBk2	
Fine silty, Mixed, active, Thermic, Typic Haplustepts												
۱۳/۰	-/۷۹	L.Si	۶۰	۲۳	۱۷	۴۶	۱/۴۲	۵/۹۳	۸/۲	۰-۲۹	Ap	
۱۹/۳	-/۲۳	L.C.Si	۵۵	۳۴	۱۱	۳۸	۱/۶۳	۸/۴۸	۸/۸	۲۹-۵۴	Bwd	
۱۷/۹	-/۱۲	L.Si	۵۹	۲۶	۱۵	۴۶	۱/۴۳	۹/۳۲	۸/۲	۵۴-۸۹	C1	
۱۵/۴	-/۱۲	L.Si	۶۰	۲۱	۱۹	۴۸	۱/۳۹	۱۹/۳	۸/۰	۸۹-۱۴۵	C2	
منطقه دزفول استان خوزستان												
Fine loamy, mixed, active, hyperthermic, Calcic Haplustalfs												
۲۵/۲	-/۹۲	C.L	۴۱	۲۵	۲۴	۴۸	۱/۳۹	۱/۵۰	۷/۶	۰-۳۲	Ap	
۲۶/۴	-/۴۳	C.L	۳۹	۲۹	۳۲	۴۰	۱/۵۸	۱/۷۲	۷/۶	۳۲-۵۸	Bwd	
۲۷/۳	-/۱۶	C.L	۴۱	۲۹	۳۰	۴۸	۱/۲۸	-/۷۴	۷/۶	۵۸-۹۵	Bk	



کربنات کلسیم معادل	کربن آلی %	بافت خاک	سیلت	رس	شن	تخلخل کل	جرم مخصوص ظاهری (gcm ⁻³)	ECe (dSm ⁻¹)	pHe	ضخامت cm	افق
			%								
۲۷/۸	-/۱۶	Si.C.L	۴۷	۳۵	۱۸	۴۷	۱/۴۱	-/۸۱	۷/۸	۹۵-۱۵۰	Bt
Fine, mixed, active, hyperthermic, Typic Calcustepts											
۲۹/۲	-/۷۹	C	۳۷	۴۳	۲۰	۴۹	۱/۳۴	۱/۶۵	۸/۳	۰-۳۲	Ap
۲۹/۵	-/۴۵	C	۳۷	۴۹	۱۴	۴۲	۱/۵۳	۱/۹۲	۸/۰	۳۲-۵۶	Bwd
۳۰/۲	-/۵۱	C	۳۳	۵۴	۱۳	۵۱	۱/۲۹	-/۹۵	۸/۰	۵۶-۹۲	Bk1
۳۱/۳	-/۲۵	C	۳۴	۵۳	۱۳	۵۳	۱/۲۴	-/۹۶	۷/۹	۹۲-۱۴۰	Bk2
Fine, mixed, active, hyperthermic, Typic Haplustepts											
۲۷/۹	-/۸۶	C.L	۴۶	۳۳	۲۱	۴۹	۱/۳۶	۱/۳۵	۸/۲	۰-۳۰	Ap
۲۸/۵	-/۴۵	C.L	۴۳	۳۳	۲۴	۴۱	۱/۵۵	۱/۲۲	۸/۳	۳۰-۵۸	Bw1d
۲۸/۵	-/۱۷	Si.C	۴۵	۵۱	۴	۴۵	۱/۴۵	-/۵۴	۸/۳	۵۸-۹۰	Bw2
۲۹/۰	-/۱۷	Si.C	۴۹	۴۵	۶	۴۶	۱/۴۳	-/۶۹	۸/۳	۹۰-۱۴۰	Bt
Fine loamy, mixed, superactive, hyperthermic, Typic Calcistolls											
۲۶/۳	-/۵۱	C.L	۴۶	۳۳	۲۱	۴۹	۱/۳۴	۱/۲۷	۸/۰	۰-۳۲	Ap
۲۷/۸	-/۲۷	C.L	۴۰	۲۹	۳۱	۴۶	۱/۴۴	۱/۷۵	۸/۲	۳۲-۵۵	Bwd
۳۰/۲	-/۱۲	C.L	۴۷	۳۰	۲۳	۵۰	۱/۳۲	-/۵۱	۸/۴	۵۵-۹۵	Bk1
۲۹/۷	-/۰۶	C.L	۴۳	۲۸	۲۹	۳۵	۱/۲۱	-/۵۴	۸/۳	۵۵-۱۴۷	Bk2
منطقه آبیگ استان قزوین											
Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic Typic Haploxerepts											
۶/۸	۱/۴	L	۳۹	۱۴	۴۷	۴۷	۱/۴۰	۲/۰۶	۸/۲	۰-۱۰	Ap
۶/۲	-/۵۵	L	۳۵	۲۰	۴۵	۴۳	۱/۵۱	-/۸۲	۸/۲	۱۰-۳۵	Apd
۶/۶	-/۵۵	L	۳۵	۲۰	۴۵	۴۷	۱/۴۰	-/۹۱	۸/۳	۳۵-۶۰	Bwd
۶/۶	-/۴۹	L	۳۱	۲۲	۴۷	۴۸	۱/۳۸	-/۷۴	۸/۲	> ۶۰	C
Fine-loamy, mixed, superactive, thermic Calcic Haploxerepts											
۶/۲	-/۴۹	L	۴۰	۲۰	۴۰	۴۸	۱/۳۸	۱/۰۴	۸/۴	۰-۲۵	Ap
۶/۲	-/۵۳	L	۳۵	۲۳	۴۲	۴۶	۱/۴۳	-/۸۸	۸/۳	۲۵-۴۰	Bwd
۸/۳	-/۳۴	L	۴۸	۲۶	۲۲	۴۸	۱/۳۷	-/۸۸	۸/۲	۴۰-۶۰	Bk1
۸/۳	-/۲۶	Si.L	۵۲	۲۶	۲۲	۵۴	۱/۲۳	-/۵۶	۸/۱	۶۰-۹۰	Bk2
۷/۸	-/۱۷	L	۳۷	۲۳	۴۰	۴۲	۱/۵۴	-/۶۸	۸/۲	۹۰-۱۲۰	2C
Fine-loamy, mixed, superactive, thermic Calcic Haploxerepts											
۶/۰	-/۵۹	L	۴۰	۲۰	۴۰	۴۹	۱/۳۶	۱/۰۴	۸/۴	۰-۱۶	Ap
۵/۱	-/۵۷	C.L	۲۷	۳۲	۴۱	۴۱	۱/۵۶	-/۶۱	۸/۵	۱۶-۳۱	Bwd
۵/۷	-/۴۸	C.L	۳۵	۳۰	۳۵	۴۰	۱/۵۹	-/۷۵	۸/۴	۳۱-۴۵	Bk1
۵/۲	-/۲۶	C.L	۲۹	۳۲	۳۹	۴۶	۱/۴۲	-/۸۲	۸/۲	۴۵-۶۵	Bk2
۵/۷	-/۱۶	C.L	۳۳	۲۸	۳۹	۴۳	۱/۵۲	-/۵۳	۸/۳	۶۵-۸۲	2C
Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic Calcic Haploxerepts											
۰/۷	-/۰۷	S.L	۲۷	۱۵	۵۸	۴۰	۱/۵۸	۵/۷	۸/۳	۰-۲۰	Ap1
۴/۲	-/۳۹	S.L	۳۲	۱۵	۵۳	۴۳	۱/۵۲	-/۶۲	۸/۳	۲۰-۳۲	Ap2
۶/۲	-/۲۸	S.L	۳۲	۱۵	۵۳	۳۷	۱/۶۸	-/۷۶	۸/۲	۳۲-۵۵	Bwd
۸/۱	-/۲۴	L	۳۸	۲۵	۳۶	۴۸	۱/۳۷	۱/۵۷	۸/۱	۵۵-۷۵	CBk
۸/۶	-/۱۷	S.L	۲۰	۱۲	۶۸	۵۲	۱/۲۷	-/۹۴	۸/۲	۷۵-۱۲۰	C

جرم مخصوص ظاهری در برخی از افق‌های متراکم شده به $1/68 \text{ gcm}^{-3}$ رسیده است (شکل ۳)، که در برخی موارد حدود $0/3 \text{ gcm}^{-3}$ نسبت به لایه‌های فوقانی افزایش نشان داد. این میزان تغییر باعث کاهش تقریباً ۱۹-۷ درصدی تخلخل در افق Bwd شده است. فشردگی خاک با فرآیند افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک همراه است؛ به طوریکه باعث کاهش حجم هوای خاک و تخلخل کل می‌شود، در حالی که حجم آب بدون تغییر باقی می‌ماند (شریفی و جوادی، ۱۳۹۵). نتایج مطالعات صحرائی و تشریح خاک‌رخ‌ها و نتایج مورفولوژیکی نشان داد که عدم وجود ریشه و یا کاهش تعداد ریشه انواع محصولات زراعی تأییدی بر افزایش تراکم بسیار زیاد در سخت‌لایه شخم در

مناطق مورد مطالعه است. استفاده از ادوات کشاورزی ترکیبی از دو جنبه سخت لایه شخم را تحت تاثیر قرار می دهد. از یک طرف جرم مخصوص ظاهری را به میزان معنی داری در عمق ۲۰-۴۰ سانتیمتری کاهش می دهد و از طرف دیگر باعث افزایش تخلخل و کاهش مقاومت به نفوذ در خاک به میزان حدود ۴۰ درصد می شود (جوادی و شهیدزاده، ۱۳۸۴).



شکل ۳. اثبات وجود سخت لایه شخم در اثر افزایش جرم مخصوص ظاهری

میانگین جرم مخصوص ظاهری در سخت لایه شخم خاک های زراعی استان گلستان بیشتر از سه منطقه دیگر به دست آمد (جدول ۳) و به عبارت دیگر سخت لایه موجود در این منطقه دارای تراکم بیشتری می باشد. این وضعیت به دلیل مقادیر بالای سیلت (میانگین ۵۷/۸۱٪) ناشی از غالبیت رسوبات لسی در خاک های استان گلستان است که شخم سالانه در اعماق ثابت در کنار آبیاری سنگین با حجم زیاد آب، سبب شستشوی ذرات سیلت از سطح خاک و تجمع در عمق متراکم شده می گردد. بافت خاک در فشردگی آن تاثیر دارد، به گونه ای که خاک های یکنواخت (با ذرات هم اندازه) نسبت به خاک های غیر یکنواخت (با اندازه ذرات مختلف) کمتر فشرده می شوند. ذرات کوچکتر فضای بین ذرات بزرگتر را پر می کنند و خاک متراکم تر تشکیل می دهند. یک خاک لومی و با درصد سیلت بالا مستعدترین خاک برای فشرده شدن است (شریفی و جوادی، ۱۳۸۴) و مقاومت نفوذ با افزایش محتوای سیلت افزایش می یابد (Usaborisut and Ampanmanee, 2015). چرا که خاک های سیلتی نسبت به دیگر انواع خاکها تمایل بیشتری برای تشکیل پوسته دارند و انجام عملیات کشاورزی در شرایط رطوبتی نامناسب در اراضی منطقه گنبد باعث ایجاد پوسته هایی می شود که پس از خشک شدن استحکام این پوسته افزایش و موجب فشرده شدن خاک می گردد. از طرف دیگر حیدری (۱۳۹۴) در ارتباط با برآورد صحرایی جرم مخصوص ظاهری در خاک های معدنی بیان نمود که در خاک های سیلتی و لومی با مقدار رس کم، وقتی بدون ساختمان و یا با ساختمان ضعیف باشند، جرم مخصوص ظاهری فوق العاده زیاد است. به همین دلیل انجام عملیات کشاورزی در شرایط رطوبتی نامناسب در اراضی منطقه گنبد با توجه به بافت سیلتی (مواد مادری لسی) به طور طبیعی باعث افزایش دانسیته و افزایش تراکم آرایشی^۱ می شود که در حالت خشک استحکام آن افزوده شده و سخت لایه مقاومتری ایجاد می کند.

بسته به عمق شخم ادوات و نوع کشت، سخت لایه شخم در مناطق مختلف در اعماق متفاوتی قرار گرفته است (سخت لایه شخم با ضخامت متوسط ۲۴ سانتی متر در ۱۶ تا ۶۴ سانتی متری زیر سطح خاک مشاهده شد). در منطقه آبیگ قزوین سخت لایه شخم در اعماق کمتری نسبت به سه منطقه دیگر قرار گرفته بود که مهمترین دلیل آن، عمق شخم حدود ۲۰ سانتی متری (به دلیل کشت گندم و جو) بود، در حالی که در سه منطقه دیگر عمق شخم حدود ۳۰ سانتی متر (به دلیل کشت ذرت علوفه ای) مشاهده گردید.

یکی دیگر از عواملی که بر تشدید سخت لایه شخم موثر است، استفاده از روش های سنتی آبیاری در زراعت آبی مناطق مورد مطالعه می باشد. به گونه ای که در خاکرخی های منطقه نیمه خشک استان مرکزی به دلیل وجود آبیاری تلفیقی سنتی (غرقابی) و آبیاری مکانیزه (آبیاری کلاسیک ثابت) نسبت به مناطق دیگر که بیشتر تحت تاثیر آبیاری سنتی (غرقابی) بودند، سخت لایه شخم دارای تراکم کمتری می باشد. مقدار آب موجود در خاک عامل بحرانی در پتانسیل فشردگی خاک است. خاک خشک به دلیل وجود اصطکاک بین ذرات براحتی فشرده نمی شود. آب به عنوان یک روغن بین ذرات خاک عمل می کند و باعث می شود تا خاک براحتی فشرده شود. در هر حال هر چه

مقدار آب موجود در خاک افزایش یابد، به نقطه‌ای می‌رسد که اکثر خلل و فرج خاک به جای هوا توسط آب پر شده است (شریفی و جوادی، ۱۳۹۵). به همین دلیل در چهار منطقه مورد مطالعه علی‌رغم خشک بودن اقلیم، روش آبیاری غرقابی باعث افزایش شدت تراکم و همچنین غیرقابل نفوذ شدن سخت لایه شخم شده است.

پایین بودن میانگین کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه (کمتر از ۰/۴ درصد) یکی از مهمترین دلایل مستعد بودن این خاک‌ها به تشکیل سخت‌لایه شخم می‌باشد. خاک‌های حاوی مواد آلی زیاد، ساختمان بهتری نسبت به خاک‌هایی با مواد آلی کم دارند و در مقابل فشردگی مقاومترند، چرا که مواد آلی، خاکدانه‌های بزرگتر و محکمتری را بوجود می‌آورد (شریفی و جوادی، ۱۳۹۵). کشت ذرت علوفه‌ای به عنوان کشت دوم (کشت بهاره) در منطقه گنبد استان گلستان و استفاده از کود دامی پوسیده به صورت موضعی در منطقه آبیک استان قزوین سبب افزایش درصد کربن آلی خاک (بالاتر از ۱ درصد) در تعداد محدودی از نمونه‌های مورد مطالعه شده است. حجم بیشتر باقیمانده ذرت علوفه‌ای نسبت به سایر محصولات پس از برداشت از یک طرف و شخم زدن و مخلوط شدن این بقایا با خاک سطحی تا حدود ۳۰ سانتیمتری جهت آماده سازی کشت پاییزه، سبب افزایش درصد کربن آلی خاک سطحی شده است.

جدول ۳. حداقل، حداکثر و میانگین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سخت‌لایه‌های شخم در خاک‌های مناطق مورد مطالعه

جرم مخصوص ظاهری سخت لایه شخم (g.cm ⁻³)	تخلخل کل سخت لایه شخم (%)	سیلت (%)	رس (%)	کربن آلی (%)	
منطقه اراک استان مرکزی					
۱/۴۳	۴۱/۸۹	۲۸/۰۰	۲۵/۰۰	۰/۰۹	حداقل
۱/۵۴	۴۶/۰۴	۶۲/۰۰	۶۶/۰۰	۰/۹۵	حداکثر
۱/۴۸	۴۴/۲۵	۴۶/۴۴	۴۷/۶۹	۰/۲۹	میانگین
منطقه گنبد استان گلستان					
۱/۵۶	۳۶/۹۸	۵۲/۰۰	۲۰/۰۰	۰/۰۸	حداقل
۱/۶۷	۴۱/۱۳	۶۰/۰۰	۳۴/۰۰	۱/۳۰	حداکثر
۱/۶۱	۳۹/۱۵	۵۷/۸۱	۲۵/۲۵	۰/۳۴	میانگین
منطقه دزفول استان خوزستان					
۱/۴۴	۴۰/۳۸	۳۳/۰۰	۲۸/۰۰	۰/۰۶	حداقل
۱/۵۸	۴۵/۶۶	۴۹/۰۰	۵۴/۰۰	۰/۹۲	حداکثر
۱/۵۳	۴۲/۴۵	۴۱/۷۵	۳۸/۰۶	۰/۳۹	میانگین
منطقه آبیک استان قزوین					
۱/۴۳	۴۱/۱۳	۲۰/۰۰	۱۲/۰۰	۰/۰۷	حداقل
۱/۵۶	۴۶/۰۴	۵۲/۰۰	۳۲/۰۰	۱/۴۰	حداکثر
۱/۵۱	۴۳/۲۱	۳۵/۰۰	۲۲/۰۵	۰/۴۲	میانگین

نتایج خاک‌های مورد مطالعه نشان داد که به غیر از منطقه قزوین در سایر مناطق با افزایش عمق، مقدار شوری خاک افزایش می‌یابد. از طرفی وجود سخت‌لایه شخم در این مناطق به ویژه در استان گلستان مانع از حرکت و انتقال املاح به پایین شده است. تجمع املاح در سخت لایه باعث ایجاد یک لایه نسبتاً شور در اعماق ۶۰-۳۰ سانتیمتری شده است. نتایج میانگین شوری افقی سطحی نسبت به شوری سخت‌لایه شخم در مناطق چهارگانه گویای افزایش ۴۰ درصدی این نسبت در منطقه گنبد استان گلستان، افزایش ۱۴ درصدی آن در منطقه اراک استان مرکزی، افزایش ۱۵ درصدی منطقه زراعی دزفول و کاهش ۳۸ درصدی در منطقه زراعی آبیک است. با توجه به اقلیم نیمه‌خشک مناطق مورد مطالعه در کنار عامل تبخیر از سطح و صعود مویینه نمک، نتایج موید تاثیر سخت‌لایه شخم بر روی افزایش شوری خاک در این لایه می‌باشد. چرا که آبیاری سنتی و مکانیزه سبب شده که نمک‌های موجود در سطح توسط آب آبیاری حل شوند و به اعماق انتقال یابند. ولی وجود سخت‌لایه شخم مانع از ادامه حرکت املاح محلول شده و باعث تجمع و تمرکز آنها در محدوده سخت‌لایه شخم شده است. شوری خاک سطحی (افق Ap خاک سطحی) با هر بارندگی و یا آبیاری شسته می‌شود و با انتقال به لایه‌های زیرین باعث افزایش تجمع املاح و شوری بیشتر می‌گردد (Xiong et al, 2012). (Ying et al, 2021) گزارش دادند که وجود شوری در خاک می‌تواند به طور قابل توجهی بر استحکام و یا افزایش تراکم خاک تأثیر بگذارد و تجمع املاح در لایه‌های متراکم بیشتر از لایه‌های با تراکم پایین تر است. برخلاف خاک‌های مناطق آبیک قزوین و دزفول خوزستان، شوری در اعماق زیر سخت‌لایه شخم در خاک‌های مورد مطالعه در

منطقه اراک استان مرکزی (میانگین $8/21$ dSm⁻¹) و گنبد کاووس استان گلستان (میانگین $11/72$ dSm⁻¹)، افزایش یافت. مهمترین علت افزایش شوری در اعماق، شوری آب آبیاری چاه‌های عمیق در دو منطقه است (میانگین شوری آب بیشتر از 4 dSm⁻¹). وجود مواد مادری انتقالی دارای نمک‌های محلول (رسوبات لسی در استان گلستان و رسوبات آبرفتی در استان مرکزی) در درجه دوم اهمیت قرار دارد. از طرف دیگر آبیاری با آب غیر شور و با کیفیت سد طالقان در اراضی آبیک استان قزوین (میانگین شوری آب کمتر از 1 dSm⁻¹) و سد کرخه در اراضی دزفول استان خوزستان (میانگین شوری آب کمتر از 1 dSm⁻¹)، دلیل کاهش محسوس میانگین شوری در زیر سخت لایه شخم در این مناطق است (میانگین $0/72$ و $0/83$ dSm⁻¹ به ترتیب در اراضی دزفول و قزوین).

بررسی میدانی در مناطق مورد مطالعه نشان داد که کشاورزان عمدتاً از وجود سخت لایه (کفه شخم) در مزارع خود مطلع هستند و در برخی موارد دیده شد که از زیرشکن هم برای حل مشکل استفاده می‌کنند، هر چند زیرشکن‌های موجود در منطقه تنها تا عمق 40 سانتی‌متر نفوذ می‌کنند. تکرار چندباره عملیات کاشت و داشت و برداشت در هر سال که عمدتاً محدود به عمق 30 سانتی‌متری خاک است از یک طرف و آبیاری مداوم خاک‌های شخم‌خورده، در نهایت منجر به تشکیل و تحکیم هر چه بیشتر کفه شخم شده است. استفاده از زیرشکنی که حداکثر تا 40 سانتی‌متر نفوذ می‌کند نیز به توسعه هر چه بیشتر این کفه شخم در اعماق 35 تا 60 سانتی‌متر کمک کرده است. به طور کلی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که عملیات زیرشکنی در زمان مناسب و در عمق مناسب باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک به ویژه در عمق پایین‌تر از عمق شخم مرسوم می‌گردد. کاهش جرم مخصوص ظاهری، سبب کاهش مقاومت خاک در برابر نفوذ آب و هوا و ریشه، افزایش خلل و فرج و به تبع آن افزایش تهویه خاک، افزایش نفوذپذیری آب در خاک، حفظ رطوبت خاک، کاهش بیماری‌های قارچی ناشی از آب‌ماندگی و عدم زهکشی و در نهایت افزایش عملکرد محصول از طریق افزایش طول ریشه، افزایش قطر ریشه و رشد غده‌های زیر زمینی می‌گردد (Cassel and Edwards, 1985; Gronle et al, 2015). زیرشکنی خاک باعث افزایش عملکرد چغندرقد به میزان 21 درصد، عملکرد گندم دیم به میزان 24 درصد، عملکرد ذرت 7 درصد و عملکرد گندم آبی به میزان 4 درصد شده است (صلح جو و نیازی، 1380 ، صلح جو، 1384). تجربه موفق استفاده از زیرشکن در اراضی زراعی منطقه گنبد استان گلستان تا عمق 80 سانتی‌متری نیز موید افزایش دو برابری عملکرد گندم نسب به اراضی فاقد زیرشکنی بوده است (میانگین 4 تن در هکتار در اراضی زیرشکن شده در مقابل میانگین 2 تن در هکتار در اراضی فاقد زیرشکنی) (راهب، 1399).

نتیجه‌گیری

خشکسالی‌های چندسال اخیر و مقدار کم مواد آلی خاک از یک طرف و تردد غیراصولی و زیاد ماشین‌های کشاورزی در مراحل مختلف کاشت تا برداشت محصول از طرف دیگر باعث شده است تا تراکم خاک ناشی از سخت لایه شخم یکی از مشکلات مهم در کشاورزی به ویژه زراعت آبی باشد. روش‌ها و راه‌حل‌های متفاوتی با توجه به شرایط خاص هر ناحیه برای تشخیص و رفع این مشکل در دنیا ارائه شده است. اما در ایران آمار و ارقامی که بتواند گویای وضعیت فشرده‌گی خاک‌های مناطق مختلف در کشور باشد، به‌سختی یافت می‌شود. با توجه به یکسان بودن شرایط اقلیمی در مناطق مورد مطالعه، مهمترین دلیل برای تشکیل سخت لایه شخم، انجام عملیات زراعی مکرر و عدم رعایت مدیریت‌های علمی در طولانی مدت می‌باشد که موجب تخریب ساختمان، پراکنده شدن ذرات اولیه و آبشویی آن‌ها به زیر لایه شخم و ایجاد لایه متراکم می‌شود. پایین بودن میزان کربن آلی خاک‌های مورد مطالعه یکی دیگر از مهمترین دلایل ناپایداری خاکدانه‌ها و مستعد بودن این خاک‌ها برای ایجاد لایه متراکم است. استفاده از روش‌های خاک‌ورزی سنتی در زمان نادرست و عمق ثابت شخم به توسعه لایه متراکم در بیش از 70 درصد از خاک‌های مورد مطالعه منتهی شده است، ولی عمق تشکیل این لایه و ضخامت آن و همچنین میزان تراکم در خاک‌های مناطق مختلف مورد مطالعه متفاوت است. نتایج گویای کاهش مقدار تخلخل کل خاک به میزان تقریبی $19-7$ درصد در سخت لایه شخم نسبت به سایر افق‌های خاک‌های مورد مطالعه شده است. سخت لایه ایجاد شده به ترتیب میزان تراکم، در خاک‌های استان گلستان < استان مرکزی < استان خوزستان < استان قزوین مشاهده شد. از مهمترین دلایل مدیریتی در میزان تراکم کمتر و ضخامت کمتر سخت لایه در منطقه آبیک می‌توان به کیفیت مناسب آب آبیاری، استفاده مداوم از کودهای دامی و همچنین انجام عملیات زیرشکنی در برخی از اراضی مورد مطالعه اشاره نمود. در حالی که در منطقه گنبد، بافت خاک، کیفیت پایین آب آبیاری و روش آبیاری غرقابی مهمترین علل بالا بودن تراکم در سخت لایه شخم است. انجام عملیات کشاورزی در شرایط رطوبتی نامناسب در اراضی منطقه گنبد با توجه به بافت سیلتی (مواد مادری لسی) به طور طبیعی باعث افزایش دانسیته و افزایش تراکم آرایشی می‌شود که در حالت خشک، سخت لایه مقاوم‌تری ایجاد می‌کند. با توجه به اقلیم نیمه‌خشک مناطق مورد مطالعه در کنار عامل تبخیر از سطح و صعود مویینه نمک، نتایج موید تاثیر سخت لایه

شخم بر روی افزایش شوری در عمق شخم خاک‌های مطالعه شده می‌باشد. وجود سخت‌لایه شخم در مناطق مورد مطالعه (به استثنای منطقه آبیگ قزوین)، باعث تجمع املاح و ایجاد لایه نسبتاً شور در زیر افق سطحی شخم‌خورده شده است. در پایان هرچند فشرده شدن خاک در اراضی زراعی اجتناب‌ناپذیر است، اما با اتخاذ روش‌های مدیریتی می‌توان از تشکیل آن جلوگیری کرده و تشکیل آن را به حداقل رساند. بهترین تصمیم برای جلوگیری از فشردگی خاک می‌تواند کاهش دفعات عملیات زراعی و ممانعت از تخریب ساختمان خاک و افزایش مواد آلی خاک باشد. طبق نتایج بدست آمده، مدیریت اعمال شده در منطقه آبیگ قزوین (اصلاح روش آبیاری غرقابی به روش‌های آبیاری مکانیزه و همچنین استفاده از تناوب زراعی مناسب، استفاده از زیرشکن برای از بین بردن سخت‌لایه شخم، استفاده بهینه از کودهای آلی همچون کود دامی پوسیده شده) باعث کاهش مشکلات ناشی از ایجاد سخت‌لایه شخم شده است که می‌تواند الگوی مناسبی جهت رفع این مشکل برای افزایش عملکرد در اراضی زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- الموتی، محمد؛ صلح جو، علی اکبر؛ شریفی، احمد؛ جوادی، ارژنگ؛ اشرفی زاده، سید رضا و تکی، اورنگ (۱۳۹۸). *راهنمای خاکورزی حفاظتی و کاربرد آن*. تهران: نشر آموزش کشاورزی.
- جوادی، ارژنگ و شهیدزاده، مرتضی (۱۳۸۴). بررسی اثر کاربرد گاوآهن برگرداندار مرکب بر شکست سخت لایه شخم. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۶ (۲۴)، ۹۵-۱۱۰.
- حیدری، احمد (۱۳۹۴). تشکیل و طبقه‌بندی خاک مبتنی بر پایگاه جهانی منابع خاک (WRB, 2014). تهران: نشر جهاد دانشگاهی.
- راهب، علیرضا (۱۳۹۹). مطالعات خاکشناسی، ارزیابی تناسب اراضی و تهیه نقشه حاصلخیزی (مطالعه موردی: شرکت توسعه کشاورزی میثاق پایدار شمال واحدهای ثامن الائمه گنبد و ایمر علی آباد استان گلستان).
- سبزواری، علیرضا؛ رجیب‌پور، علی؛ باقری، نیکروز و امید، محمود (۱۳۹۹). تعیین الگوی کشت محصولات زراعی به عنوان راهکاری برای کاهش مخاطرات امنیت غذایی کشور، *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۷ (۱)، ۳۸-۲۳.
- شریفی، احمد و جوادی، ارژنگ (۱۳۹۵). *فشرده‌گی خاک (مشکل‌ها، راه حل‌ها و روش‌های اندازه‌گیری)*. تهران: نشر آموزش کشاورزی.
- صادقی، سعیده؛ کیانی، فرهاد؛ اسدی، محمد اسماعیل؛ کامکار، بهنام و ابراهیمی، سهیلا (۱۳۹۸). بررسی اثر سیستم‌های مختلف خاکورزی بر فعالیت بیولوژیکی و آنزیمی خاک. *مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۹ (۲)، ۱۶۴-۱۵۱.
- صلح جو، علی اکبر و نیازی، (۱۳۸۰). تاثیر عملیات زیرشکن بر خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد گندم آبی. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۷، ۷-۷۸.
- صلح جو، علی اکبر (۱۳۸۴). *بررسی تاثیر عملیات زیرشکن، تداوم اثر و دور آبیاری روی تولید چغندر قند*. گزارش‌هایی طرح تحقیقاتی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. موسسه تحقیقات و آموزش کشاورزی.
- عباسیان، ابودر؛ بخشی‌پور، سعید و فتوکیان، محمدحسین (۱۳۹۴). تاثیر ادوات خاک‌ورزی، زمان و تعداد شخم دوم بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج، *پژوهش‌های کاربردی زراعی (پژوهش و سازندگی)*، ۱۰۹، ۹۹-۹۳.
- عظیم زاده، سیدمرتضی؛ کوچکی، علیرضا و پالا، مصطفی (۱۳۸۱). بررسی اثر روش‌های مختلف شخم بر وزن مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت خاک و عملکرد گندم در شرایط دیم. *علوم زراعی ایران*، ۴ (۳)، ۲۳۳-۲۱۸.
- قهرمان پور، رامین؛ گرجی، منوچهر؛ پوربابایی، احمدعلی و فرح بخش، محسن (۱۳۹۷). بررسی تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی و کم خاک‌ورزی بر شاخص‌های کیفیت خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۹ (۶)، ۱۳۶۴-۱۳۵۵.
- یوسف گمرکچی، افشین (۱۴۰۰). برآورد عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد محصولات عمده زراعی در ترکیب کشت شبکه آبیاری قزوین، مهندسی منابع آب، ۱۴ (۵۰)، ۸۸-۷۵.

REFERENCES

- Abbasian, A., Bakhshipour, S. & Fotoukian, M. H. (2016). Effect of Type of Tools, Time and Number of Puddling on Yield and Yield Components of Rice. *Applied Field Crops Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 109, 93-99. (in persian).
- Alamouti, M., Solhjoui, A. A., Sharifi, A., Javadi, A., Ashrafzadeh, S. R. & Taki, O. (2019). *Guide to conservation tillage and its application*. Agriculture Education Publication, 86p. (in persian).
- Arvidsson, J. (2001). Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden: I. Soil

- physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil Tillage Res*, 60(1-2), 67-78.
- Azimzadeh, S. M., Koochakie, A. & Pala, M. (2002). Effect of Different Tillage Methods on Soil Bulk Density, Soil Porosity, Soil Moisture Content and Yield of Wheat Under Dryland Condition. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 4 (3), 218-233. (in persian).
- Bertolino, A. V., Fernandes, N. F., Miranda, J. P., Souza, A. P., Lopes, M. R. & Palmieri, F. (2010). Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *J Hydrol*, 393, 94-104.
- Biazin, B., Stroosnijder, L., Temesgen, M., AbdulKedir, A. & Sterk, G. (2011). The effect of long-term Maresha ploughing on soil physical properties in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Soil Tillage Res*, 111(2), 115-122.
- Brennan, J., Hackett, R., McCabe, T., Grant, J., Fortune, R. A. & Forristal, P. D. (2014). The effect of tillage system and residue management on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat in a cool Atlantic climate. *Eur. J. Agron*, 54, 61-69.
- Brussaard, L. & Van Faassen, H. G. (1994). *Effects of compaction on soil biota and soil biological processes*. In Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C. (eds.) *Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier, vol 11, pp 215-235.
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C. & McDaniel, P. A. (2011). *Soil Genesis and Classification* (6th ed.). New York: Wiley.
- Cai, H., Ma, W., Zhang, X., Ping, J., Yan, X., Liu, J., Yuan, J., Wang, L. & Ren, J. (2014). Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *Crop J*, 2, 297-307.
- Cassel, D. K. & Edwards, E. C. (1985). Effects of subsoiling and irrigation on corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 49 (4), 996-1001.
- Carter, M. R. & Gregorich, E. G. (2008). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2nd ed.). Canadian Society of Soil Science.
- Colombi, T., Braun, S., Keller, T. & Walter, A. (2017). Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Sci. Total Environ*, 574, 1283-1293.
- Dong, W. C., Fu, Q., Wang, Q. J. & Cao, C. P. (2017). Effect of plough pans on the growth of soybean roots in the black-soil region of northeastern China. *J. Integr. Agric*, 16, 2191-2196.
- Ghahramanpoor, R., Gorji, M., Pourbabaee, A. A. & Farahbakhsh, M. (2019). Investigating the effects of conservation and reduced tillage systems on soil quality indices. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(6), 1355-1364. (in persian).
- Gronle, A., Lux, G., Böhm, H., Schmidtke, K., Wild, M., Demmel, M. & Heß, J. (2015). Effect of ploughing depth and mechanical soil loading on soil physical properties, weed infestation, yield performance and grain quality in sole and intercrops of pea and oat in organic farming. *Soil Tillage Res*, 148, 59-73.
- Heidari, A (2015). *Soil genesis and Classification According to World Reference Base For Soil Resources 2014*. Tehran: Academic Jihad Publications.
- Jat, R. K., Singh, R. G. Kumar, M., Jat, M. L., Parihar, C. M., Bijarniya, D., Sutaliya, J. M., Jat, M. K., Parihar, M. D., Kakraliya, S. K. & et al. (2019). Ten years of conservation agriculture in a rice-maize rotation of Eastern Gangetic Plains of India: Yield trends, water productivity and economic profitability. *Field Crops Res*, 232, 1-10.
- Javadi, A. & Shahidzadeh, M. (2005). The effect of a combined moldboard plow to break plow pan. *J Agri. Engin. Res*, 24(6), 95-110. (in persian).
- Jeřábek, J., Zúmr, D. & Dostál, T. (2017). Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. *Soil Tillage Res*, 174, 231-240.
- Kunze, G. W. & Dixon, J. B. (1986). *Pretreatments for Mineralogical Analysis*. In Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Ed. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp 91-100.
- Li, H. W., Gao, H. W., Wu, H. D., Li, W. Y., Wang, X. Y. & He, J. (2007). Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China. *Aust. J. Soil Res*, 45, 344-350.
- Li, Y., Zhai, Z., Cong, P., Zhang, Y., Pang, H., Dong, G. & Gao, J. (2019). Effect of plough pan thickness on crop growth parameters, nitrogen uptake and greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions in a wheat-maize double-crop rotation in the Northern China Plain: A one-year study. *Agric. Water Manag*, 213, 534-545.
- Lin, P., Qi, H., Li, C. & Zhao, M. (2016). Optimized tillage practices and row spacing to improve grain yield and matter transport efficiency in intensive spring maize. *Field Crop Res*, 198, 258-268.



- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J. & Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Tillage Res*, 121, 74-81.
- Liu, X. W., Zhang, X. Y., Chen, S. Y., Sun, H. Y. & Shao, L. W. (2015). Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat. *Agric. Water Manage*, 154, 59-67.
- Ma, S. Y., Yu, Z. W., Shi, Y., Gao, Z. Q., Luo, L. P., Chu, P. F. & Guo, Z. J. (2015). Soil water use, grain yield and water use efficiency of winter wheat in a long-term study of tillage practices and supplemental irrigation on the North China Plain. *Agric. Water. Manage*, 150, 9-17.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., Silva, P., Valle, S. & Acevedo, E. (2008). Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil Tillage Res*, 99(2), 232-244.
- Motavalli, P. P., Anderson, S. H. & Pengthamkeerati, P. (2003). Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability, and physical properties of a claypan soil. *Field crops Res*, 84, 303-318.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N. & Pellegrini, S. (2003). Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Tillage Res*, 73, 119-129.
- Pagliai, M., Vignozzi, N. & Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil Tillage Res*, 79, 131-143.
- Peng, Z., Wang, L., Xie, J., Li, L., Coulter, J. A., Zhang, R. & Choudhary, S. (2019). Conservation tillage increases water use efficiency of spring wheat by optimizing water transfer in a semi-arid environment. *Agronomy*, 9(10), 583.
- Radford, B. J., Bridge, B. J., Davis, R. J., McGarry, D., Pillai, U. P., Rickman, J. F., Walsh, P. A. & Yule, D. F. (2000). Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil Tillage Res*, 54(3-4), 155-170.
- Raheb, A. R (2021). Soil and Land Evaluation Studies with Fertility Maps (case study: North Sustainable Misagh Agricultural Development Co.-Golestan Province). 221 p. (in persian).
- Sabzevari, A., Rajabipour, A., Bagheri N. & Omid, M. (2020). Determining the Cropping Pattern of Agricultural Products as a Strategy to Reduce Food Security Disaster in Iran, *Journal of environmental hazards and management*, 7 (1), 23-38. (in persian).
- Sadeghi, S., Kiani, F., Asadi, M. E., Kamkar, B. & Ebrahimi, S. (2019). Effect of different tillage systems on the biological and enzymatic activity of soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(2), 151-164. (in persian).
- Sang, X. G., Wang, D. & Lin, X. (2016). Effects of tillage practices on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under different soil moisture conditions. *Soil Tillage Res*, 163, 185-194.
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O. & Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield - What do we really know? *Soil Tillage Res*, 174, 193-204.
- Sharifi, A. & javadi, A. (2016). *Soil compaction-problems, solutions and measurement methods*. Agriculture Education Publication, 32 p. (in persian).
- Sip, V., Vavera, R., Chrpova, J., Kusa, H. & Ruzek, P. (2013). Winter wheat yield and quality related to tillage practice, input level and environmental conditions. *Soil Tillage Res*, 132, 77-85.
- Solhjou, A. & Niazi, J. (2001). *Investigating the effect of subsoiling operations on the production of wheat products*. Research report of Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, No. 195. (in persian).
- Solhjou, A. (2005). *Investigating the effect of subsoiler, continuity of effect and irrigation cycle on sugar beet production*. Research report of Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, No. 1053. (in persian).
- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual*. USDA handbook 18.
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13nd ed.). United States Department of Agriculture. NRCS.
- Sparks, D. L. (1996). *Method of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. American Society of Agronomy.
- Strudley, M. W., Green, T. R. & Ascough, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Tillage Res*, 99, 4-48.
- Temesgen, M. (2007). Conservation tillage systems and water productivity implications for smallholder farmers in semi-arid Ethiopia. Ph.D. Thesis. Taylor and Francis/Balkema, Leiden, Netherlands.
- Uossef Gomrokchi, A. (2021). Estimation of Potential Yield and Yield Gap of Major Crops in Qazvin Irrigation Network. *Water Resources Engineering Journal*, 14 (50), 75-88. (in persian).
- Usaborisut, P., & Ampanmanee, J. (2015). Compaction properties of silty soils in relation to soil texture,

moisture content and organic matter. *Am. J. Agri. Bio. Sci.*, 10, 178-185.

USDA-NRCS. (2012). *jNSM: Java Newhall Simulation Model*. Version 1.6.0. User guide-part 1. National Soil Survey Center.

Wang, Q. L., Bai, Y. H., Gao, H. W., He, J., Chen, H., Chesney, R. C., Kuhn, N. J. & Li, H. W. (2008). Soil chemical properties and microbial biomass after 16 years of no-tillage farming on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 144, 502-508.

Xiong, X., Araya, A., Zhang, H., Araya, K., Teramoto, C., Ohmiya, K. & Zhang, Z. (2012). Improvement of Salt-affected Soils by Deep Tillage- Part 1: Large-scale Field Tests in a Saline Soil (Solonchak) Region. *Eng. Agric. Environ. Food.*, 5(1), 20-28.

Xu, D. & Mermoud, A. (2001). Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. *Soil Tillage Res*, 60, 11-19.

Ying, Z., Cui, Y. J., Benahmed, N. & Duc, M. (2021). Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 13(4), 855-863.

Zhai, L. C., Xu, P., Zhang, Z. B., Li, S. K., Xie, R. Z., Zhai, L. F. & Wei, B. H. (2017). Effects of deep vertical rotary tillage on dry matter accumulation and grain yield of summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Soil Tillage Res*, 170, 167-174.



Long-term crop management and formation of plow pan: its consequences on soil physico-chemical properties

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil compaction and formation of plow pan in Iranian agricultural soils became a serious problem, which threatens regional productivity. The formation of plow pan due to the long-term use of tillage tools at a constant depth, is a common consequence of conventional tillage, which limits crop growth due to decline soil physical quality. The aim of the present work was to prove the existence of plow pan in selected agricultural soils and its effect on physical and chemical soil characteristics as well as sustainable crop production.

Materials and Methods

Thirty-two soil profiles (eight soil profiles in each region) were analyzed on irrigated agriculture fields in Qazvin, Golestan, Markazi and Khuzestan provinces.

Results and Discussion

Presence of plow pan was observed in about 70% of the studied profiles, which is an active process and soon or later will be found in all other studied soils if the current land management is ongoing. The average thickness of the plow pan was 24 cm, which was usually extended between 16 to 64 cm below the surface. Total porosity and the amount of bulk density showed respectively about 7-19% decrease and 5-14% increase in the plow pan compared to other horizons. The depth of the formation of this layer and its vertical expansion as well as the intensity of compaction in the soils of the studied areas have been different.

Conclusion

The presence of the plow pan in the studied agricultural lands except for the Abyek region in Qazvin province (due to the less compaction of this layer and proper agricultural management) caused the accumulation of soluble salts and formation of a relatively saline layer below the surface horizon (Ap). The relatively high compaction in the plow pan of Gonbad agricultural area, Golestan province, compared to other regions was related to an average of about 60% silt. Because silty soils have a greater tendency to form crusts than other types of soils, and agricultural operations in unsuitable moisture conditions of this region, create crusts that cause soil compaction after drying. In addition, the predominance of submerged irrigation, despite the aridity of the climate, intensifies the compaction and resistance to root penetration especially in the agricultural areas of Golestan, Khuzestan and Markazi provinces. Because annual plowing at constant depths along with heavy irrigation with a large volume of water and relatively wet soil leads to the eluviation of clay and silt particles from the surface and illuviation in depth. The agricultural management applied in the Abyek region (including the modification of the irrigation method, the application of appropriate crop rotation, sub-soiling operation and optimal use of organic fertilizers) reduced the problems of plow pans.

Keywords: Food Security, Irrigation, Semi-Arid Regions, Soil Degradation, Soil Quality, Sustainable Agriculture, Yield Reduction.