

## Investigating Effects of types of Tillage and Cover Plant on the Gompertz Model Coefficients and Confined Compression Curve

Hossein Bayat<sup>1</sup>, Farhad Bayazidi<sup>2</sup>, Eisa Ebrahimi<sup>3\*</sup>, Javad Hamzei<sup>4</sup>

(Received: January 2023      Accepted: September 2023)

### Abstract

Tillage reduces soil compaction while increasing soil porosity. Cover plants are fast-growing plants with great impacts on the physical and chemical properties of soil. The confined compression curve indicates the relationship between stress and void ratio. This research evaluated the impact of tillage types and cover plants on Gompertz model coefficients. In this research, a factorial experiment in a randomized complete block design was conducted with three replications in Hamadan province. Experimental factors were tillage at three levels, including conventional tillage, conservation tillage, or minimum tillage and no-tillage systems, with cover plant factor at three levels of *Vicia*, *Lathyrus sativus*, and no cover plant. Samples were taken at the end of the growing season. To measure the confined compression curve, intact samples were used at 6, 30, and 1500 kPa. The effect of treatments on the coefficients of the confined compression curve revealed that coefficients, b, and c were reduced in *Lathyrus sativus* and *Vicia*, respectively compared to the crop plant due to the higher organic matter content. Also, there was a reduction in the soil compressibility of these plants (*Lathyrus sativus* and *Vicia*). The pre-compaction stress in different treatments ranged between 2.46 and 2.58 kPa, with the highest value in *Vicia* under minimum tillage treatment. In general, the results demonstrated that the use of cover plants and conservation tillage leads to not only a decrease in soil compaction but also an improvement in the physical and mechanical properties of the soil, decreasing soil compressibility.

**Keywords:** Compression, Stress, Chisel, *Vicia*, *Lathyrus sativus*

Bayat H., Bayazidi F. Ebrahimi E. and Hamzei J. 2024. Investigating effects of types of tillage and cover plant on the Gompertz Model coefficients and confined compression curve. *Applied Soil Research*, 12(2): 79-95.

1- Assoc. Prof. Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2- Former M.Sc. Student, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

3- Ph. D, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht

4- Assoc. Prof. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\* Corresponding Author Email: [Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com](mailto:Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com)

## بررسی اثر انواع خاکورزی و کشت گیاهان پوششی بر ضرایب مدل گمپرتز و منحنی تراکم محصور

حسین بیات<sup>۱</sup>، فرهاد بایزیدی<sup>۲</sup>، عیسی ابراهیمی\*<sup>۳</sup>، جواد حمزه‌ای<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

### چکیده

خاک‌ورزی سبب کاهش تراکم و افزایش تخلخل خاک می‌گردد. گیاهان پوششی گیاهانی سریع‌الرشد بوده که تاثیر بسیاری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارند. منحنی تراکم محصور بیان‌کننده رابطه بین تنش و نسبت پوکی است. این پژوهش برای بررسی اثر انواع خاک‌ورزی و گیاهان پوششی بر ضرایب مدل گمپرتز انجام شد. در این پژوهش آزمون فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در استان همدان انجام شد. فاکتور خاک‌ورزی در سه سطح خاک‌ورزی مرسوم، حداقل و بدون خاک‌ورزی و فاکتور گیاه پوششی در سه سطح گیاه پوششی خلر، ماشک و بدون گیاه پوششی اعمال شدند. نمونه‌برداری در پایان فصل رشد صورت گرفت. برای اندازه‌گیری تراکم محصور از نمونه‌های دست‌نخورده در مکش‌های ۶، ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال استفاده شد. در بررسی تأثیر تیمارها بر ضرایب مدل منحنی تراکم مشاهده شد که ضرایب b و c در تیمارهای گیاه پوششی خلر و سپس ماشک به دلیل بیشتر بودن ماده آلی نسبت به تیمار بدون گیاه پوششی، کاهش یافتند. همچنین قابلیت تراکم خاک‌های این دو نوع گیاه پوششی کاهش یافت. دامنه تغییرات تنش پیش‌تراکمی در تیمارهای مختلف بین ۲/۴۶ تا ۲/۵۸ کیلوپاسکال به دست آمد که بیشترین مقدار آن در تیمار خاک‌ورزی حداقل با گیاه ماشک بود. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از گیاهان پوششی و خاک‌ورزی‌های حفاظتی سبب کاهش تراکم در خاک شد و باعث بهبود شرایط فیزیکی و مکانیکی خاک و کاهش قابلیت تراکم خاک گردید.

واژه‌های کلیدی: تراکم، تنش، چیزل، خلر، ماشک

بیات ح، بایزیدی ف، ابراهیمی ع، حمزه‌ای ج. ۱۴۰۳. بررسی اثر انواع خاکورزی و کشت گیاهان پوششی بر ضرایب مدل گمپرتز و منحنی تراکم محصور. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۲. صفحه: ۷۹-۹۵.

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳- دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، (مکاتبه کننده)

۴- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* پست الکترونیک: [Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com](mailto:Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com)

## مقدمه

متغیر و ثابت را کاهش می‌دهد. به طور میانگین، عملکرد محصولات، در روش بی‌خاک‌ورزی قابل رقابت با کشت خاک‌ورزی است. بنابراین، سود خالص افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، حتی عملکرد پایین‌تر روش بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با روش‌های خاک‌ورزی سنتی، بدون کاهش سود خالص، قابل قبول است. با توجه به اثرات مثبت زیست محیطی این روش، برتری آن نسبت به کشت سنتی در آینده بیشتر نمایان خواهد شد. ملاکا و همکاران (Matecka *et al.*, 2015) بیان کردند که خاک‌ورزی مرسوم سبب کاهش میزان ماده آلی، نیتروژن و فسفر خاک می‌شود. در مقابل بدالیکوف و بارتولوف (Badalikova & Bartlova, 2014) با بررسی اثرات خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دریافتند که خاک‌ورزی مناسب سبب بهبود جرم مخصوص ظاهری، نسبت کربن به ازت و نگهداشت رطوبت و تخلخل می‌گردد. تأثیر عملیات‌های خاک‌ورزی بر رفتار خاک اساساً به تأثیر بر ساختمان خاک (Bronick & Lal, 2005) و ماده آلی (Ramos *et al.*, 2011) مربوط می‌شود.

سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی و کاشت گیاهان پوششی دو عامل مهم در مدیریت پایداری گیاهان زراعی می‌باشند (Derpsch *et al.*, 2010). گیاهان پوششی، گیاهانی کوتاه و سریع‌الرشد هستند که حداکثر رشد طولی آنها یک متر می‌باشد. بقایای گیاهان پوششی نسبت به شیوه‌های تولید پایدار به ویژه در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی مزایای بسیاری دارند (Russo *et al.*, 2006). از جمله مزایای کشت گیاهان پوششی می‌توان به جلوگیری از آبرشویی نیتروژن در پاییز و زمستان، بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، کنترل علف‌های هرز و بیماری‌های خاک، حفظ رطوبت خاک، افزایش ماده آلی خاک، تعدیل درجه حرارت روزانه خاک، افزایش تنوع زیستی و در نهایت افزایش عملکرد محصولات زراعی اشاره کرد (Gabriel & Quemada, 2011). نتایج بررسی تازدال (Teasdal *et al.*, 1998) نشان داد که در بی‌خاک‌ورزی کاشت گیاه پوششی ماشک به دلیل آزاد سازی مواد مضر برای دیگر گیاهان از ریشه‌های این گیاه، موجب کاهش جمعیت گونه‌های مختلف علف هرز شد. روزا و همکاران (Rosa *et al.*, 2012) بیان کردند که کاشت گیاهان پوششی در زمستان

خاک‌ورزی یکی از عملیات بسیار مهم در کشاورزی برای تهیه شرایط مناسب رشد بذرها است (Jabro *et al.*, 2015; Bameri *et al.*, 2021). در صورت به کارگیری خردمندانه، خاک‌ورزی می‌تواند یک شیوه اصلی در برطرف کردن برخی محدودیت‌های خاک مانند فشردگی، سله بستن، نفوذپذیری پایین، زهکشی ضعیف، رطوبت نامطلوب خاک و رژیم‌های دمایی برای تولید گیاه باشد. در مقابل، خاک‌ورزی نامناسب می‌تواند منجر به تخریب ساختمان، کاهش نفوذپذیری، ایجاد رواناب و فرسایش تشدید، آلودگی آب و تخریب خاک و محیط زیست شود (Elder & Lal, 2008). خاک‌ورزی دارای انواع متفاوت است که می‌توان خاک‌ورزی مرسوم<sup>۱</sup> (CT)، خاک‌ورزی حداقل<sup>۲</sup> (MT) و بی‌خاک‌ورزی<sup>۳</sup> (NT) را نام برد. خاک‌ورزی مرسوم خاک‌ورزی است که به عنوان روش اصلی تهیه بستر بذر و کنترل علف‌های هرز در فرآیند کشت استفاده می‌شود. خاک‌ورزی مرسوم به عنوان هر روش خاک‌ورزی و کاشتی که کمتر از ۱۵ درصد بقایای بعد از کاشت، به عنوان پوشش باقی‌مانده در کشت بعدی، وجود داشته باشند، تعریف شده است (Conservation Tillage Information Center, 2004). در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم، بقایای محصول قبلی به زیر خاک برگردانده و یا سوزانده می‌شوند (Hagblade *et al.*, 2003). در روش خاک‌ورزی حداقل، عملیات بر حسب نوع گیاه و میزان بقایای محصول قبلی، تا عمق کافی (۱۵-۸ سانتی‌متر) برای قرار دادن کود و بذر و مخلوط کردن بقایا با لایه سطحی انجام می‌گیرد (Derpsch *et al.*, 2010). در روش بی‌خاک‌ورزی، هیچ نوع عملیات خاک‌ورزی صورت نمی‌پذیرد و تنها ماشین کاشت، کود و بذر را با حداقل به هم خوردگی در خاک قرار می‌دهد (Derpsch *et al.*, 2010). در پژوهش‌های طولانی مدت (به مدت ۱۸ سال) که در دانشگاه گیسن<sup>۴</sup> انجام گرفت، تبروگ و بوهرنسن (Tebrugge & Bohrsen, 1997) به این نتیجه رسیدند که کشت بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با کشت سنتی بسیار سودمند است، زیرا صرفه جویی در هزینه ماشین‌آلات باعث کاهش هزینه عملیاتی می‌شود. کشت بی‌خاک‌ورزی، هزینه‌های خرید، نیروی مورد نیاز تراکتور، مصرف سوخت، تعداد کارگران مورد نیاز و همچنین هزینه‌های

3- No tillage  
4- Giessen University

1- Conventional tillage  
2- Minimum tillage

گزارش شده است. این مدل‌ها دارای ضرایب متفاوتی بوده و در واقع رفتار خاک را توصیف می‌کنند. ضرایب مدل منحنی تراکم محصور نشان‌دهنده مشخصه‌های مقاومتی خاک هستند و تغییر آن‌ها تغییر رفتار خاک را نشان می‌دهند. با توجه با تاثیر عملیات مدیریتی بر مشخصه‌های مقاومتی خاک و ضرایب مدل منحنی تراکم محصور، تاکنون اثر گیاهان پوششی و نوع عملیات خاک‌ورزی بر روی آن‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر انواع خاک‌ورزی، گیاه پوششی و اثر متقابل این دو بر ویژگی‌های منحنی تراکم و ضرایب مدل گمپرتز مربوطه بود.

### مواد و روش‌ها

#### نمونه‌برداری و طرح آزمایش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا- همدان، دست‌جرد اجرا شد. استان همدان واقع در غرب ایران دارای بارندگی سالانه ۳۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه برابر با  $9/74^{\circ}\text{C}$  است. برای بررسی تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع گیاه پوششی بر مشخصه‌های مقاومتی ( $C_c^2$ ,  $C_s^3$  و  $P_c^4$ ) و ضرایب مدل منحنی تراکم محصور، فاکتور گیاه پوششی در سه سطح ماشک ( $C_1$ ) (با نام علمی *Vicia*)، خلر ( $C_2$ ) (با نام علمی *Lathyrus sativus*) و بدون گیاه پوششی ( $C_3$ ) و فاکتور خاک‌ورزی نیز در سه سطح خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی حداقل و بی‌خاک‌ورزی به صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی متوالی (۸۹ - ۹۰ و ۹۰ - ۹۱) اجرا شد. به طوری که در این پژوهش ۲۷ واحد آزمایشی، هر یک به ابعاد  $12 \times 22$  متر ایجاد شد. در خاک‌ورزی مرسوم از گاواهن برگرداندار با عمق حداکثر ۳۰ سانتی‌متر و در خاک‌ورزی حداقل از چیزل (خاک‌ورزی سطحی با عمق کمتر از ۱۰ سانتی‌متر) استفاده شد. گیاه پوششی خلر و ماشک در اسفند ماه سال ۸۹ کاشته شد و در خرداد ماه ۹۰ قبل از رسیدن کامل گیاه پوششی با رعایت دقیق تیمارهای خاک‌ورزی برداشت شد. در خاک‌ورزی مرسوم گیاه پوششی به طور کامل با خاک مخلوط و در بی‌خاک‌ورزی گیاه پوششی بر روی سطح خاک باقی‌مانده و در خاک‌ورزی با چیزل به صورت

به دلیل تاثیر مکانیکی ریشه‌ها و ترشح مواد چسبنده از آنها می‌تواند به افزایش خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک منجر شود. سایر پژوهشگران نیز عنوان کرده‌اند که کاربرد گیاهان پوششی از تخریب ساختمان خاک و فرسایش آن جلوگیری کرده و ترددپذیری خاک نسبت به ماشین آلات را بهبود می‌بخشد (Virto et al., 2012). افزایش نفوذپذیری خاک نسبت به آب یکی دیگر از پیامدهای مثبت گیاهان پوششی است. این امر ناشی از بهبود ثبات خاکدانه‌ها توسط این گیاهان و در نتیجه جلوگیری از تشکیل سله در سطح خاک (Gomez et al., 2009)، حفاظت خاک از برخورد مستقیم قطرات باران و نیز افزایش تعداد خلل و فرج‌های موجود در خاک می‌باشد (Deurer et al., 2009) که به افزایش میزان نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب منجر می‌شود (Celette et al., 2005). پینه‌پرو و همکاران (Pinheiro et al., 2004) و زوتارلی و همکاران (Zotarelli et al., 2007) بیان کردند که گیاهان پوششی به منظور بهبود کیفیت خاک و تولید محصول راهکار مناسبی هستند.

منحنی تراکم خاک نشان‌دهنده رابطه بین مقدار تنش اعمال شده و برخی از پارامترهای وابسته به وضعیت تراکم خاک، مانند نسبت پوکی است. به طوری که رفتار مکانیکی خاک تحت تراکم و یا منحنی تراکم<sup>۱</sup> به صورت یک رابطه نیمه‌لگاریتمی بین لگاریتم مقدار تنش و نسبت پوکی بیان می‌شود. پیرا و همکاران (Pereira et al., 2007) بیان کردند که نسبت پوکی کل و کربن آلی، در پلات بی‌خاک-ورزی در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متر بیشتر از خاک‌ورزی سطحی، خاک‌ورزی مرسوم و حتی بی‌خاک‌ورزی در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر بود. ولی با افزایش مقدار اولیه نسبت آب، اختلاف نسبت پوکی کل بین انواع خاک‌ورزی بیشتر شد. این پژوهشگران گزارش کردند که در همه انواع خاک-ورزی نسبت پوکی با افزایش مقدار تنش عمودی به صورت خطی کاهش یافت. استنگل (Stengel, 1990) بعد از ۲۰ سال آزمایش گزارش کرد که نسبت پوکی ساختمانی (آن بخش از نسبت پوکی که تحت تأثیر نحوه آرایش ذرات ثانویه و ساختمان خاک است) در خاک خاک‌ورزی شده به طور معنی‌داری بیشتر از خاک بی‌خاک‌ورزی است. مدل‌های متعددی برای توصیف منحنی تراکم محصور

3- Swell index  
4- Pre-compression stress

1- Compression curve  
2- Compression Index

محل در یکی از مکش‌های ۶، ۳۰ و ۱۵۰۰ kPa در داخل دستگاه صفحات تحت فشار به تعادل رسیدند. در مرحله بعد آزمایش تراکم محصور بر روی آنها انجام شد. برای انجام آزمایش تراکم محصور، از دستگاه تک محوری<sup>۲</sup> (CBR) استفاده شد. در این آزمایش خاک در درون سیلندر فلزی توسط پیستون متحرک به سمت پایین متراکم شده و تنش روی پیستون و تغییر حجم خاک به‌طور پیوسته ثبت می‌شود (Koolen, 1974). اعمال بار بر نمونه با نرخ بارگذاری یک میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. این آزمایش در دو مرحله بارگذاری و باربرداری صورت می‌گیرد. به این صورت که در مرحله بارگذاری تعداد ۱۰۰ قرائت با فواصل ۰/۰۱ میلی‌متری که در هر یک از این فاصله‌ها به اندازه ۱۰ کیلو پاسکال به نیروی وارد شده بر نمونه اضافه می‌شود و در مرحله باربرداری تعداد ۳۳ قرائت با فواصل ۰/۰۳ میلی‌متری انجام شد. زمانی که نشان‌گر رینگ نیرو یک دور کامل بزند مرحله بارگذاری تمام و مرحله باربرداری آغاز شد. همچنین در برخی نمونه‌ها خروج آب از خاک به‌عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته می‌شود (Koolen, 1974).

با استفاده از فرمول نشست (فرمول ۱) مقدار نسبت پوکی معادل با هر تنش بدست آمد. در نهایت از تنش قائم لگاریتم گرفته و با رسم آن در مقابل نسبت پوکی منحنی تراکم محصور به دست آمد. این آزمایش، منحنی تنش- کرنش خاک در حالت غیر اشباع را بیان می‌کند و کرنش حجمی ایجاد شده به دلیل خروج هوا از خاک است (Koolen & Kuipers, 1989).

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (1)$$

H ارتفاع نمونه،  $e_0$  نسبت پوکی اولیه،  $\Delta e$  تغییرات نسبت پوکی و  $\Delta H$  تغییرات ارتفاع نمونه می‌باشد.

#### مدل گمپرتز

مدل گمپرتز (Gompertz, 1825) یکی از معادلات رایج برای برازش بر منحنی تراکم محصور است، که نسبت به مدل‌های دیگر دارای دقت برازش بالایی است (Gregory et al., 2006).

$$e = a + c \exp \left\{ -\exp [b(\log \sigma - m)] \right\} \quad (2)$$

در معادله ۱،  $e$ ، نسبت پوکی و  $\sigma$  تنش بر حسب کیلوپاسکال و  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $m$  ضرایب تجربی مدل گمپرتز بوده که با برازش

سطحی خاک‌ورزی انجام گرفت. در این مطالعه از گیاه ذرت دانه‌ای به عنوان گیاه اصلی استفاده شده است و به صورت ردیفی با فاصله ردیفی ۷۵ سانتی‌متر کاشت شد، و خلر و ماشک به عنوان گیاه پوششی استفاده شد. عملیات مشابه در سال ۹۰ - ۹۱ تکرار شد. سپس نمونه‌برداری در پایان مرحله برداشت محصول (گیاه ذرت)، از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری در سال ۹۱ انجام شد. برای برداشت نمونه‌ها ابتدا بقایای گیاهی باقیمانده روی سطح خاک را کنار زده و سپس از خاک مزرعه نمونه‌برداری صورت گرفت. برای برداشت نمونه‌های دست‌نخورده سیلندرهای نمونه‌برداری از جنس استیل با قطر ۵/۳ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر استفاده شد. از عمق سطحی هر محل نمونه‌برداری تعداد ۳ نمونه دست‌نخورده به وسیله سیلندر و یک نمونه دست‌خورده برداشت شد.

#### آزمایش‌ها

بافت خاک با استفاده از هیدرومتر تعیین شد (Gee & Or, 2002). اسیدیته خاک در عصاره ۵:۱ خاک به آب به کمک دستگاه pH متر دیجیتال متره<sup>۱</sup> مدل ۸۲۷ اندازه‌گیری شد (Thomas, 1996). رسانایی الکتریکی خاک در عصاره ۵:۱ خاک به آب و با هدایت سنج الکتریکی متره<sup>۱</sup> مدل ۷۱۲ اندازه‌گیری گردید (Roades, 1996). ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیم (یاور) اندازه‌گیری شد (Rowell, 1994). کربنات کلسیم به روش تیتراسیون برگشتی اندازه‌گیری گردید (Sims, 1996). اندازه‌گیری ماده آلی نمونه‌های خاک به روش اکسیداسیون تر انجام گرفت (Walkey & Black, 1934). برای به دست آوردن جرم مخصوص ظاهری، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای استیل برداشته شد و سیلندر در داخل پلاستیک نگه داشته شدند. نمونه‌ها قبل و بعد از آون خشک شدن در دمای ۱۰۵ و به مدت ۴۸ ساعت وزن شدند و جرم مخصوص ظاهری با استفاده از تقسیم وزن خاک خشک بر حجم سیلندر به دست آمد. واحد جرم مخصوص ظاهری به دست آمده در این روش برابر با گرم بر سانتی‌متر مکعب است (Grossman & Reinsch, 2002).

#### تراکم محصور

برای انجام این آزمایش از نمونه‌های دست‌نخورده استفاده شد. به طوری که هر یک از سه سیلندر برداشت شده از هر

2- California bearing ratio

1- Metrohm

مدل بر داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند.

برازش مدل گمپرتز بر داده‌های اندازه‌گیری شده

مدل گمپرتز (Gompertz, 1825)، ( فرمول ۲) با استفاده از نرم‌افزار Solver Excel 2010 بر داده‌های بارگذاری تراکم محصور برازش شد و ضرایب تجربی مدل گمپرتز (a, b, c) و (m) به دست آمدند. در نهایت تاثیر تیمارها بر a, b, c و m مدل گمپرتز بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد صورت گرفت.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل گمپرتز از آماره‌های ضریب تبیین، میانگین مربعات خطا، میانگین خطا و معیار اطلاعات اکائیک استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(e_{meas} - e_{pre})^2}{\sum(e_{meas} - e_{mean})^2} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum(e_{meas} - e_{fit})}{N} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(e_{meas} - e_{fit})^2}{N}} \quad (5)$$

$$AIC = N \ln\left(\frac{\sum(e_{pre} - e_{meas})^2}{N} + 2q\right) \quad (6)$$

$e_{fit}$  و  $e_{meas}$  به ترتیب نسبت پوکی اندازه‌گیری و برازشی در مکش یکسان و N تعداد نقاط اندازه‌گیری هستند.  $e_{pre}$  نسبت پوکی برازش شده و q در فرمول AIC بیانگر تعداد ضرایب مدل است. ضریب تبیین یا ضریب تشخیص Coefficient Of Determination قدرت توضیح دهنده مدل را نشان می‌دهد. ضریب تبیین نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. تغییرات کل متغیر وابسته برابر است با تغییرات توضیح داده شده توسط رگرسیون بعلاوه تغییرات توضیح داده نشده. ضریب تبیین نمی‌تواند تعیین کند که آیا مدل به دست آمده اریب است یا نه، از این رو از معیار RMSE نیز برای تکمیل بررسی دقت مدل استفاده شد. معیار RMSE بیانگر خطای یا اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر اندازه‌گیری است. برای تعیین بیش برآوردی یا کم برآوردی از معیار ME استفاده

می‌شود (Nazarian et al., 2022). ایده‌آل‌ترین مقدار برای ضریب تبیین مقادیر نزدیک به یک است، برای RMSE و ME مدل نیز هر چقدر این مقدار به صفر نزدیک باشد دارای دقت بیشتری است. معیار AIC، روشی نسبی برای تعیین مدل مناسب است. در این صورت محاسبه AIC برای یک مدل به تنهایی معنی ندارد و مقدار آن باید با AIC مدل‌های دیگر مقایسه شود. در بین مدل‌ها، کوچکترین مقدار AIC مدل مناسب را تعیین می‌کند.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

در جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه نمایش داده شده است. بافت این خاک لوم سیلتی بود. اسیدیته خاک مورد مطالعه بیشتر از خنثی بوده و در دامنه قلیائیت معتدل قرار داشت (Bruse & Rayment, 1982). هدایت الکتریکی نشان داد که خاک مورد نظر غیرشور (Rhoades et al., 1992) و با توجه به اسیدیته خاک که کمتر از ۸/۵ بود، در کلاس خاک‌های نرمال قرار گرفت. گنجایش تبادل کاتیونی کم (Metson, 1961) و مقدار بالای آهک خاک، آن را جزء خاک‌های آهکی قرار داد (Hazelton & Murphy, 2007). میزان سنگریزه و پایداری خاکدانه‌های خاک مورد مطالعه کم (Kemper & Rosenau, 1986) و میزان جرم مخصوص ظاهری خاک مورد بررسی برابر با میزان جرم مخصوص ظاهری خاک‌های کشاورزی بود (Cresswell & Hamilton, 2002) و دارای مقدار مناسبی برای رشد گیاهان است. هانت و گیلکس (Hunt & Gilkes, 1992) و وورل و همکاران (Worrall et al., 1987) بیان کردند که مقدار جرم مخصوص ظاهری معادل  $1/4 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$  در بافت خاک متوسط از نظر کیفی در کلاس مناسب قرار می‌گیرد در صورتی که بافت خاک رسی باشد این مقدار در کلاس فشرده قرار خواهد گرفت. در همین راستا پووریل و همکاران (Peveiril et al., 1999) بیان کرده است که کم و زیاد بودن جرم مخصوص ظاهری سبب کاهش رشد گیاهان خواهد شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه.

Table 1. Some physical and chemical characteristics of the studied soil

Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture	pH	EC ( $\mu\text{S m}^{-1}$ )	CEC (meq/100 g soil)	BD ( $\text{g cm}^{-3}$ )	MWD (mm)	Gravel (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)
27.56	65.44	7.00	Silt	7.85	176.84	10.90	1.43	1.50	8.00	19.88

## loam

رطوبت نزدیک اشباع اندازه‌گیری می‌شوند در مقایسه با نمونه‌های با رطوبت کمتر دارای تغییرات بیشتری در دقت اندازه‌گیری هستند. کمترین مقدار  $R^2$  نیز در مکش ۶ کیلوپاسکال به دست آمده است.

#### اثر تیمارهای خاک‌ورزی و گیاه پوششی بر ضرایب مدل گمپرتز در مکش ۶ کیلوپاسکال

در جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس اثر نوع خاک‌ورزی و نوع گیاه پوشش بر ضرایب مدل گمپرتز در مکش شش کیلوپاسکال نمایش داده شده است. ضریب  $a$  تحت تأثیر تیمارهای متفاوت خاک‌ورزی و گیاه پوششی قرار نگرفت (جدول ۳). تیمار خاک‌ورزی و گیاه پوششی بر ضریب  $b$  در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین تیمارها در جدول (۴) نشان داد که تأثیر این تیمارها (خاک‌ورزی و گیاه پوششی) بر ضریب  $b$  معنی‌دار بوده و سیستم بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم مقدار این ضریب را افزایش داده و همچنین وجود گیاه پوششی  $C_2$  نسبت به  $C_3$  نیز تأثیر افزایش‌دهی بر ضریب مذکور داشت.

#### دقت برازش مدل گمپرتز بر منحنی تراکم محصور در مکش‌های مختلف

در جدول ۲ مشخصات دقت برازش مدل گمپرتز بر داده‌های تجربی منحنی تراکم محصور نشان داده شده است. با توجه به معیار مجذور میانگین مربعات خطا، با افزایش مکش دقت برازش افزایش یافته و در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال بیشترین دقت برازش به دست آمد. در مکش‌های کم به دلیل وجود رطوبت بیشتر، خطا در آزمایش‌ها به مقدار جزئی افزایش یافت. زمانی که رطوبت در خاک وجود دارد و خاک در حالت غیر اشباع قرار دارد برخی از منافذ، عمدتاً منافذ ریز دارای آب هستند و منافذ درشت خالی از آب بوده و از هوا پر می‌باشند. بنابراین وجود آب در نمونه باعث تغییر در الگوی تنش وارد شده به ذرات خاک شده و آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. چرا که خروج آب از نمونه و متراکم شدن آن (که تحکیم نام دارد) نیاز به مدت زمان بیشتری است، در صورتیکه آزمایش تراکم در مدت زمان کمی اتفاق می‌افتد (Hemmat *et al.*, 2009). وجود آب در خاک در حالت غیر اشباع دارای الگوی مشخصی در منافذ نیست. بنابراین نمونه‌هایی که در

جدول ۲- مقایسه دقت برازش مدل گمپرتز بر منحنی تراکم محصور در مکش‌های مختلف

Table 2. Comparison fit accuracy of the Gompertz model to the confined compression curve in different suction

Suction (kPa)	Statistical	$R^2$	RMSE	ME	AIC
6	Mean	0.989	0.010	0.000	-935.2
	Max	0.999	0.022	0.001	-748.8
	Min	0.945	0.003	-0.002	-1179.9
	CV (%)	1.3	46.7	-1044	-11.1
30	Mean	0.997	0.004	0.000	-1110
	Max	1.000	0.011	0.001	-887.8
	Min	0.967	0.002	0.000	-1288.5
	CV (%)	0.70	57.9	546.8	-9.3
1500	Mean	0.995	0.003	0.000	-1184
	Max	1.000	0.011	0.000	-900.3
	Min	0.944	0.001	0.000	-1335.9
	CV (%)	1.1	61.9	-466.6	-8.10

آوردند. کرایوز و کرایوز (Krause & Krause, 2003) بیان کردند که گیاه خلر دارای ریشه گسترده و نافذ است، بنابراین تأثیر بسزای در ساختمان خاک و خصوصیات مکانیکی خاک دارد و از این طریق بر منحنی تراکم مؤثر است. چرا که سوان و ون اورکرک (Soane & van Ouwerkerk, 1994) و چان و همکاران (Chan *et al.*,

بین سه سطح گیاه پوششی در خاک‌ورزی مرسوم ( $CTC_1$ ،  $CTC_2$ ،  $CTC_3$ ) و بی‌خاک‌ورزی ( $NTC_1$ ،  $NTC_2$ ،  $NTC_3$ ) اختلاف معنی‌داری نبود، اما در  $MTC_2$  مقدار این ضریب نسبت به  $MTC_3$  افزایش یافت. بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2018) نیز برای خاک‌های کشاورزی میانگین پارامتر  $m$  و  $c$  را معادل  $3/25$  و  $0/64$  به ترتیب به دست

همانگونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است با افزایش مقدار ضریب  $c$  نسبت پوکی افزایش یافته و در مقابل تراکم‌پذیری نیز افزایش یافته است. دکستر و همکاران (Dexter *et al.*, 2008) بیان کردند که نسبت پوکی خاک تحت تاثیر ساختمان خاک است. در همین راستا دکستر (Dexter, 1988) و هورن (Horn, 2004) بیان کردند که خصوصیات مکانیکی خاک از جمله پارامترهای منحنی تراکم نیز تحت تاثیر ساختمان خاک هستند. بنابراین روش‌های خاک‌ورزی که موجب می‌شوند تراکم‌پذیری خاک افزایش یابد دارای ضریب  $c$  بیشتری خواهند بود. در بین اثرات برهم‌کنش نیز تیمار  $MTC_3$  سبب افزایش معنی‌دار ضریب  $c$  نسبت به دو تیمار دیگر گیاه پوششی در خاک‌ورزی حفاظتی شد. اما بین سه سطح گیاه پوششی در دو تیمار دیگر خاک‌ورزی اختلاف معنی‌دار نبود (جدول ۴). افزایش ضریب  $c$  منحنی را به حالت سیگموئیدی نزدیک‌تر کرده و تراکم‌پذیری خاک را افزایش می‌دهد. شاید کمبود مواد آلی در تیمار  $MTC_3$  نسبت به دو تیمار دیگر گیاه پوششی در خاک‌ورزی حفاظتی سبب افزایش معنی‌دار تراکم‌پذیری و در نتیجه ضریب  $c$  شده است.

تیمار خاک‌ورزی بر ضریب  $m$  تاثیر معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) داشت. اما گیاه پوششی تاثیر معنی‌داری بر ضریب  $m$  نداشت (جدول ۳). بین انواع گیاه پوششی در سطوح متفاوت خاک‌ورزی اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. اما سیستم بی‌خاک‌ورزی مقدار  $m$  را نسبت به  $CT$  افزایش داد (جدول ۴). افزایش این ضریب باعث جابجایی موقعیت نمودار به سمت تنش‌های بالا می‌شود و سبب افزایش مقاومت مکانیکی خاک می‌شود (شکل D-1). علت افزایش مقاومت مکانیکی خاک با افزایش ضریب  $m$  در تیمار بی-خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به افزایش پایداری ساختمان خاک، افزایش مواد موثر در پایداری خاکدانه‌ها مانند ماده آلی و مقاومت بیشتر خاک (مقاومت در برابر فروری و مقاومت برشی) در این روش خاک‌ورزی نسبت داد (Sharratt *et al.*, 2006). کوهنا و همکاران (Kuhna *et al.*, 2016) بیان کردند که سیستم بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم باعث افزایش ماده آلی شده است و از طرف دیگر نیز اکیو (Ekwue, 1990) بیان کرد که افزایش ماده آلی باعث افزایش مقاومت مکانیکی خاک می‌شود کی و ون‌دن‌بیگارت (Kay & VandenBygaart, 2002) گزارش کردند که با اینکه بی‌خاک

(2006) نیز بیان کردند که خصوصیات مکانیکی خاک تابعی از ساختمان آن است. علت دیگر این نتیجه را می‌توان به نقش ماده آلی در پارامترهای مرتبط با تراکم خاک نسبت داد. به این صورت که در خاک‌ورزی مرسوم ماده آلی خاک کم است و در بی‌خاک‌ورزی نیز ماده آلی عمدتاً در سطح خاک است اما در روش خاک‌ورزی حداقل نسبت به دو سیستم دیگر ماده آلی ارتباط بیشتری با خاک و خاکدانه‌ها داشته و تاثیر بیشتری بر پایداری خاک تحت تنش و بهبود ضرایب مرتبط با تراکم خاک دارد (Derpsch *et al.*, 2006; Lal, 1989; Peixoto *et al.*, 2010). در همین راستا ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2005) و کوان و همکاران (Kuan *et al.*, 2007) بیان کردند که با کاهش مقدار ماده آلی میزان تراکم خاک افزایش خواهد یافت و خصوصیات منحنی تراکم تحت تاثیر مقدار ماده آلی هستند. بنابراین در روش‌هایی از خاک‌ورزی که موجب افزایش ماده آلی می‌شوند خصوصیات منحنی تراکم تغییر کرده و تراکم در خاک به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. تاثیر عملیات خاک‌ورزی بر رفتار خاک عمدتاً به تاثیر بر ساختمان خاک مربوط می‌شود (Bronick & Lal, 2005). همچنین چان و همکاران (Chan *et al.*, 2006) نیز بیان کردند که تراکم خاک تاثیر پذیری بالایی از وضعیت ساختمان خاک دارد. خاک‌ورزی حفاظتی و بی‌خاک‌ورزی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها تاثیر می‌گذارد. این دو عملیات خاک‌ورزی جایگزین مناسبی برای خاک‌ورزی مرسوم، جهت کاهش اثرات زیست محیطی می‌باشند. از طرف دیگر، سیستم بی‌خاک‌ورزی تاثیر زیادی بر ساختمان خاک داشته و موجب بهبود مقاومت خاک می‌شود (Chaplain *et al.*, 2011). به طور کلی برهم‌کنش بین گیاه پوششی و نوع خاک‌ورزی موجب افزایش معنی‌دار ضریب  $b$  در  $MTC_2$  و  $NTC_2$  نسبت به  $MTC_3$  و  $CTC_3$  شد.

ضریب  $c$  مدل گمپرتز در سطح احتمال ۱ درصد تحت تاثیر گیاهان پوششی قرار گرفت در حالیکه تیمار خاک‌ورزی بر این ضریب تاثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۳). مقایسه میانگین ضریب  $c$  نشان داد که تیمار خاک‌ورزی مرسوم سبب افزایش معنی‌دار این ضریب نسبت به بی‌خاک‌ورزی شده است. علت این موضوع را می‌توان به تخریب بیشتر ساختمان خاک توسط روش خاک‌ورزی مرسوم نسبت به روش بی‌خاک‌ورزی نسبت داد (Corbeels *et al.*, 2013).



است) در خاک خاک‌ورزی شده به طور معنی‌داری بیشتر از خاک بی‌خاک‌ورزی است. پیتکا (Pytka, 2001) نیز بیان کرد که تأثیر تغییر عملیات خاک‌ورزی بر تغییر شکل خاک معنی‌دار بود. به طوری که فاکتور تغییر شکل در خاک‌ورزی مرسوم به طور چشم‌گیری بیشتر از خاک‌ورزی حفاظتی بود که دلیل آن می‌تواند ضعیف‌تر بودن ساختمان، سستی ذرات و کشش کمتر در خاک‌ورزی مرسوم باشد. خاک‌ورزی حداقل به دلیل برنگرداندن خاک ویژگی‌های فیزیکی را بهبود می‌بخشد.

ورزی مقدار جرم مخصوص ظاهری را بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم افزایش می‌دهد ولی توزیع و پیوستگی منافذ در سیستم بی‌خاک‌ورزی به دلیل فعالیت‌های بیولوژیکی افزایش می‌یابد. برخی پژوهشگران معتقدند که کاربرد بی‌خاک‌ورزی سبب تشکیل ساختمان مناسب‌تر، درصد خاکدانه پایدار، مقاومت بیشتر و تخلخل درشت خاک و پیوستگی خلل و فرج بیشتری می‌شود (Mahboubi & Lal, 1998). استنگل (Stengel, 1990) بعد از ۲۰ سال آزمایش گزارش کرد که نسبت پوکی ساختمانی (آن بخش از نسبت پوکی که تحت تأثیر نحوه آرایش ذرات ثانویه و ساختمان خاک

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای منحنی تراکم محصور در مکش ۶ کیلوپاسکال

Table 3. Results of analysis variance of the Gompertz model coefficient at suction 6 kPa

S.O.V	df	MSE			
		m	$\sqrt{c}$	$\sqrt{b}$	a
Repeat	2	0.037 <sup>(ns)</sup>	0.005 <sup>(ns)</sup>	0.001 <sup>(ns)</sup>	0.0004 <sup>(ns)</sup>
Tillage	2	6.96*	0.084 <sup>(ns)</sup>	0.123*	0.00023 <sup>(ns)</sup>
Cover crop	2	2.75 <sup>(ns)</sup>	0.35**	0.133*	0.00028 <sup>(ns)</sup>
Tillage × cover crop	4	1.03 <sup>(ns)</sup>	0.049 <sup>(ns)</sup>	0.028 <sup>(ns)</sup>	0.00068 <sup>(ns)</sup>
Error	16	1.49	0.0315	0.0293	0.0005

a, b, c, m ضرایب مدل گمپرتز؛ df، درجه آزادی. \*، نشان دهنده تأثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ \*\*، نشان دهنده تأثیر معنی‌دار در سطح ۱ درصد؛ (ns)، بدون تأثیر معنی‌دار می‌باشند. S.O.V به معنای منبع تغییرات است (Sources of Variations).

a, b, c, m The Gompertz model coefficients; df, degree of freedom. \* Indicates a significant effect at the 5% level; \*\* indicates a significant effect at 1% level; (ns) without significant effect. S.O.V means the source of the changes (Sources of Variations).

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین ضرایب مدل گمپرتز در مکش ۶ کیلوپاسکال

Table 4. Results of comparison mean of the Gompertz model coefficient at suction 6 kPa.

Treatment	m	$\sqrt{c}$	$\sqrt{b}$
CT	1.84 <sup>b</sup>	1.08 <sup>a</sup>	0.862 <sup>b</sup>
MT	2.33 <sup>ab</sup>	1.01 <sup>ab</sup>	0.969 <sup>ab</sup>
NT	3.55 <sup>a</sup>	0.894 <sup>b</sup>	1.09 <sup>a</sup>
C <sub>1</sub>	2.58 <sup>a</sup>	0.923 <sup>b</sup>	0.974 <sup>ab</sup>
C <sub>2</sub>	3.13 <sup>a</sup>	0.850 <sup>b</sup>	1.09 <sup>a</sup>
C <sub>3</sub>	2.02 <sup>a</sup>	1.22 <sup>a</sup>	0.854 <sup>b</sup>
CTC <sub>1</sub>	1.71 <sup>b</sup>	1.02 <sup>bc</sup>	0.864 <sup>bc</sup>
CTC <sub>2</sub>	1.80 <sup>b</sup>	1.01 <sup>bc</sup>	0.884 <sup>abc</sup>
CTC <sub>3</sub>	2.02 <sup>ab</sup>	1.22 <sup>ab</sup>	0.838 <sup>bc</sup>
MTC <sub>1</sub>	2.39 <sup>ab</sup>	0.940 <sup>bc</sup>	0.950 <sup>abc</sup>
MTC <sub>2</sub>	3.02 <sup>ab</sup>	0.720 <sup>c</sup>	1.19 <sup>a</sup>
MTC <sub>3</sub>	1.35 <sup>b</sup>	1.38 <sup>a</sup>	0.762 <sup>c</sup>
NTC <sub>1</sub>	3.64 <sup>ab</sup>	0.804 <sup>c</sup>	1.10 <sup>ab</sup>
NTC <sub>2</sub>	4.32 <sup>a</sup>	0.818 <sup>c</sup>	1.21 <sup>a</sup>
NTC <sub>3</sub>	2.69 <sup>ab</sup>	1.06 <sup>bc</sup>	0.962 <sup>abc</sup>

CT، MT و NT به ترتیب؛ خاک‌ورزی مرسوم (برگرداندن)، خاک‌ورزی حداقل (چیزل) و بدون خاک‌ورزی، C<sub>1</sub>، گیاه پوششی ماشک؛ C<sub>2</sub>، گیاه پوششی خلر؛ C<sub>3</sub> بدون گیاه پوششی؛ C<sub>n</sub> (CTC<sub>n</sub>، MTC<sub>n</sub>، NTC<sub>n</sub>)، برهم‌کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاک‌ورزی و گیاه پوششی؛ a، b، c، m، ضرایب مدل گمپرتز؛ در هر بخش از هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

CT, MT and NT; Conventional tillage (moldboard), Minimum tillage (Chisel) and non-tillage; C<sub>1</sub>; Vicia cover plant; C<sub>2</sub>; Lathyrus sativus cover plant; C<sub>3</sub>; without cover plant; (CTC<sub>n</sub>, MTC<sub>n</sub>, NTC<sub>n</sub>) C<sub>n</sub>, interactions between different levels of tillage and cover plant, b, c and m, Gompertz model coefficients; in each section of each column, the meanings with the same letters do not have a significant difference.

ضریب b نشان داد که مقدار آن در تیمار  $MTC_3$  افزایش معنی داری نسبت به تیمار  $CTC_2$  داشت (جدول ۶). با توجه به شکل (B-1) افزایش ضریب b باعث افزایش شیب نمودار در امتداد خط تراکم بکر شده و شدت تغییرات نسبت پوکی را در برابر تنش افزایش می دهد.

ضریب c تحت تأثیر اثرات مستقل خاکورزی و گیاه پوششی قرار نگرفت در حالی که در مقایسه میانگین برهم-کنش ها،  $NTC_3$  افزایش معنی داری نسبت به  $NTC_2$  (کشت دارای خلر) داشت (جدول ۶). کوان و همکاران (Kuan et al., 2007) بیان کردند که با کاهش مقدار ماده آلی تراکم پذیری خاک افزایش می یابد، بنابراین در تیمارهایی که مقدار ماده آلی در آنها پایین است انتظار بر این است که خاصیت تراکم پذیری بالاتری داشته باشند. آراگونان و همکاران (Arangoan et al., 2000) نیز دریافتند که یک رابطه منفی بین حداکثر تراکم پذیری خاک و مقدار ماده آلی وجود دارد. مصدقی و همکاران (Mosaddeghi et al., 2000) گزارش کردند که ماده آلی علاوه بر افزایش دامنه تردد پذیری تراکم پذیری خاک را کاهش داده و سبب کاهش فشردگی خاک در خاک های زیرین نیز می شود.

ضریب m در اثر تیمارهای گیاه پوششی و خاکورزی تغییر معنی داری نداشت (جدول ۵) به طوری که مقایسه میانگین-ها نیز اختلاف معنی داری نشان ندادند. عدم تأثیر پذیری این ضریب از دو فاکتور خاکورزی و گیاه پوششی احتمالاً به دلیل تأثیر این ضریب بر کل نمودار بوده و این تغییرات نیازمند گذشت زمان بیشتری می باشد.

**اثر تیمارهای خاکورزی و گیاه پوششی بر ضرایب مدل گمپرتز در مکش ۳۰ کیلوپاسکال**

با توجه به جدول (۵) اثر تیمارهای خاکورزی و گیاه پوششی بر ضریب a مدل گمپرتز معنی دار نبود. ولی بر اساس آزمون مقایسه میانگین ها، میانگین این ضریب در خاکورزی مرسوم نسبت به بی خاکورزی به طور معنی دار افزایش یافت. بین سطوح متفاوت گیاه پوششی در انواع خاکورزی اختلاف معنی داری نبود. برهمکنش انواع خاکورزی و گیاه پوششی نشان داد که تیمار  $CTC_1$  نسبت به  $NTC_1$  و  $NTC_3$  ضریب a را به طور معنی داری افزایش داد (جدول ۶). افزایش این ضریب (شکل A-1) منجر به بیشتر شدن نسبت پوکی شده و شیب نمودار تراکم در اثر تغییر ضریب a تغییر نمی کند. افزایش نسبت پوکی در تیمار خاکورزی مرسوم بعد از دو سال به دلیل تأثیر گاوآهن برگردان دار بر کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش خلل و فرج خاک می باشد (Ellis et al., 1997). بیات و همکاران (Bayay et al., 2018) در مکش یک بار برای اراضی کشاورزی مقدار پارامتر a را برابر با ۰/۲۱ گزارش کردند. فرانزلوبرس و استیودمان (Franzluebbers & Stuedemann 2008) گزارش کردند که نیم سال بعد از اعمال خاکورزی، جرم مخصوص ظاهری در تیمار خاکورزی مرسوم در محدوده عمق ۳۰ سانتی متر بیشتر از بی-تیمار بود. در حالی که یک سال بعد از گذشت اعمال تیمارها، خاکورزی مرسوم مقدار جرم مخصوص ظاهری را بیشتر از بی خاکورزی کاهش داد. فاکتورها بر ضریب b تأثیر معنی داری نداشتند (جدول ۵). ولی مقایسه میانگین

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای منحنی تراکم محصور در مکش ۳۰ کیلوپاسکال

Table 5. Results of analysis variance of the Gompertz model coefficient at suction 30 kPa

S.O.V	df	MSE			
		m	c	$\sqrt{b}$	$\sqrt{a}$
Repeat	2	1.14 <sup>(ns)</sup>	0.0053 <sup>(ns)</sup>	0.0237 <sup>(ns)</sup>	0.030 <sup>(ns)</sup>
Tillage	2	4.68 <sup>(ns)</sup>	0.0224 <sup>(ns)</sup>	0.0346 <sup>(ns)</sup>	0.104 <sup>(ns)</sup>
Cover crop	2	0.700 <sup>(ns)</sup>	0.0551 <sup>(ns)</sup>	0.0146 <sup>(ns)</sup>	0.0023 <sup>(ns)</sup>
Tillage × cover crop	4	0.103 <sup>(ns)</sup>	0.0166 <sup>(ns)</sup>	0.0336 <sup>(ns)</sup>	0.099 <sup>(ns)</sup>
Error	40	4.87	0.022	0.0178	0.044

a, b, c, m The Gompertz model coefficients; df, degree of freedom. (ns) without significant effect. S.O.V means the source of the changes (Sources of Variations).

برهمکنش ها بر ضریب c در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، تیمار  $MTC_3$  موجب افزایش معنی دار ضریب c نسبت به تیمارهای  $MTC_1$  و  $MTC_2$  شد. در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال گیاه پوششی باعث تغییر معنی دار تراکم پذیری در سطح ۵ درصد گردید (جدول ۷). افزایش ضرایب b و c

**اثر تیمارهای خاکورزی و گیاه پوششی بر ضرایب مدل گمپرتز در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال**

تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای اعمال شده تأثیر معنی داری بر ضرایب a، b و c در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال نداشتند (جدول ۷). ولی در مقایسه میانگین اثرات

باعث بیشتر شدن شیب نمودار تراکم خاک شده و شدت تغییرات نسبت پوکی را در برابر تنش وارده افزایش می-دهند، بنابراین در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال کشت بدون گیاه پوششی بر اساس ضریب c قابلیت تراکم را افزایش داده است (جدول ۸).

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین ضرایب مدل گمپرتز در مکش ۳۰ کیلوپاسکال

Table 6. Results of comparison mean of the Gompertz model coefficient at suction 30 kPa.

Treatment	c	$\sqrt{b}$	$\sqrt{a}$
CT	0.853 <sup>a</sup>	1.21 <sup>a</sup>	0.372 <sup>a</sup>
MT	0.783 <sup>a</sup>	1.30 <sup>a</sup>	0.318 <sup>ab</sup>
NT	0.826 <sup>a</sup>	1.27 <sup>a</sup>	0.221 <sup>b</sup>
C <sub>1</sub>	0.794 <sup>a</sup>	1.29 <sup>a</sup>	0.296 <sup>a</sup>
C <sub>2</sub>	0.784 <sup>a</sup>	1.25 <sup>a</sup>	0.317 <sup>a</sup>
C <sub>3</sub>	0.884 <sup>a</sup>	1.25 <sup>a</sup>	0.298 <sup>a</sup>
CTC <sub>1</sub>	0.816 <sup>ab</sup>	1.29 <sup>ab</sup>	0.450 <sup>a</sup>
CTC <sub>2</sub>	0.854 <sup>ab</sup>	1.17 <sup>b</sup>	0.326 <sup>abc</sup>
CTC <sub>3</sub>	0.889 <sup>ab</sup>	1.19 <sup>ab</sup>	0.339 <sup>abc</sup>
MTC <sub>1</sub>	0.753 <sup>ab</sup>	1.32 <sup>ab</sup>	0.271 <sup>abc</sup>
MTC <sub>2</sub>	0.775 <sup>ab</sup>	1.23 <sup>ab</sup>	0.248 <sup>abc</sup>
MTC <sub>3</sub>	0.821 <sup>ab</sup>	1.35 <sup>a</sup>	0.435 <sup>ab</sup>
NTC <sub>1</sub>	0.812 <sup>ab</sup>	1.28 <sup>ab</sup>	0.167 <sup>bc</sup>
NTC <sub>2</sub>	0.723 <sup>b</sup>	1.34 <sup>ab</sup>	0.377 <sup>abc</sup>
NTC <sub>3</sub>	0.942 <sup>a</sup>	1.20 <sup>ab</sup>	0.121 <sup>c</sup>

CT, MT and NT: خاک‌ورزی مرسوم (برگرداندار)، خاک‌ورزی حداقل (چیزل) و بدون خاک‌ورزی، C<sub>1</sub>: گیاه پوششی ماشک، C<sub>2</sub>: گیاه پوششی خلر، C<sub>3</sub>: بدون گیاه پوششی؛ C<sub>n</sub> (CTC<sub>n</sub>, MTC<sub>n</sub>, NTC<sub>n</sub>): برهم‌کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاک‌ورزی و گیاه پوششی؛ a, b و c، ضرایب مدل گمپرتز؛ در هر بخش از هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

CT, MT and NT: Conventional tillage (moldboard), Minimum tillage (Chisel) and non-tillage; C<sub>1</sub>; Vicia cover plant; C<sub>2</sub>; Lathyrus sativus cover plant; C<sub>3</sub>; without cover plant; (CTC<sub>n</sub>, MTC<sub>n</sub>, NTC<sub>n</sub>) C<sub>n</sub>, interactions between different levels of tillage and cover plant, b, c and m, Gampartz model coefficients; in each section of each column, the meanings with the same letters do not have a significant difference.

افزایش پیدا می‌کند (Howard *et al.*, 1981). خاک‌های غنی از نظر ماده آلی نسبت به خاک‌های فقیر، به سختی متراکم می‌شوند، که بیانگر تأثیر ماده آلی بر تراکم خاک است (Greacen Sands *et al.*, 1979; Mulqueen, 1973) (and Sands, 1980).

ضریب m تحت تأثیر تیمارهای اعمال شده در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تغییر معنی‌داری نشان نداد (جدول ۷) به طوری که مقایسه میانگین ضریب مذکور در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال نشان داد که بین میانگین‌های آن در تیمارهای مختلف نیز اختلاف معنی‌داری نبود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). شیب نمودار تراکم در بخش تورم تحت تأثیر ماده آلی بوده به طوری که کلر و همکاران (Keller *et al.*, 2011) دریافتند که افزایش ماده آلی شیب این ناحیه از نمودار را افزایش می‌دهد. اعمال گیاهان پوششی علاوه بر افزایش ماده آلی سبب بهبود ساختمان، خاکدانه‌سازی و فعالیت میکروبی می‌شود (Folorunso *et al.*, 1992). سوان (Soane, 1990) بیان کرد که تأثیر ماده آلی بر تراکم خاک و سایر ویژگی‌های مکانیکی بیشتر مربوط به رطوبت‌های بالا

همانطور که در مکش‌های پایین‌تر اشاره شد گیاهان پوششی به علت افزایش قابلیت کشسانی خاک تراکم‌پذیری را کاهش می‌دهند و تیمار C<sub>3</sub> بیشتر مستعد تراکم می‌باشد. پژوهشگران روابط متفاوتی را بین مقدار ماده آلی، تراکم-پذیری و جرم مخصوص ظاهری حداکثر گزارش کرده‌اند. ون هیوستن (Van Huysteen, 1989) رابطه خاصی را بین ماده آلی و تراکم خاک گزارش نکرد، که دلیل آن را فقیر بودن خاک‌های مورد استفاده از نظر ماده آلی دانست. در حالیکه راب و همکاران (Rab *et al.*, 1998) گزارش کردند که همه خصوصیات مکانیکی خاک وابسته به ماده آلی بوده و خاک عمقی به دلیل کمبود ماده آلی در مقدار رطوبت بحرانی کمتری نسبت به خاک سطحی به حداکثر مقدار جرم مخصوص ظاهری می‌رسد. آرویدسون (Arvidsson, 1998) گزارش کرد که ماده آلی سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری، تراکم‌پذیری و افزایش تخلخل بعد از تراکم شده که سرانجام آسیب‌پذیری خاک کاهش می‌یابد. مقدار ماده آلی نقش مهمی را در قابلیت تراکم خاک ایفا می‌کند، به طوری-که قابلیت تراکم خاک در نتیجه کاهش مقدار ماده آلی

و تنش‌های پایین می‌باشد.

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای منحنی تراکم محصور در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال

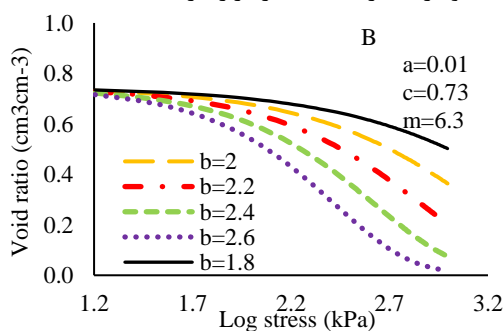
Table 7. Results of analysis variance of the Gompertz model coefficient at suction 1500 kPa

S.O.V	df	MSE			
		m	c	b	$\sqrt{a}$
Repeat	2	0.48 <sup>(ns)</sup>	0.0022 <sup>(ns)</sup>	0.091 <sup>(ns)</sup>	0.048 <sup>(ns)</sup>
Tillage	2	0.87 <sup>(ns)</sup>	0.034 <sup>(ns)</sup>	0.151 <sup>(ns)</sup>	0.009 <sup>(ns)</sup>
Cover crop	2	0.35 <sup>(ns)</sup>	0.063 <sup>(ns)</sup>	0.048 <sup>(ns)</sup>	0.011 <sup>(ns)</sup>
Tillage × cover crop	4	0.53 <sup>(ns)</sup>	0.050 <sup>(ns)</sup>	0.075 <sup>(ns)</sup>	0.025 <sup>(ns)</sup>
Error	16	0.9902	0.027	0.1184	0.026

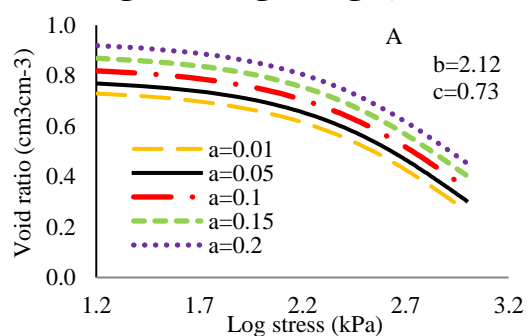
a, b, c, m ضرایب مدل گمپرتز؛ df، درجه آزادی. \*، نشان دهنده تاثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ (ns)، بدون تاثیر معنی‌دار می‌باشند. S.O.V به معنی منبع تغییرات است (Sources of Variation).

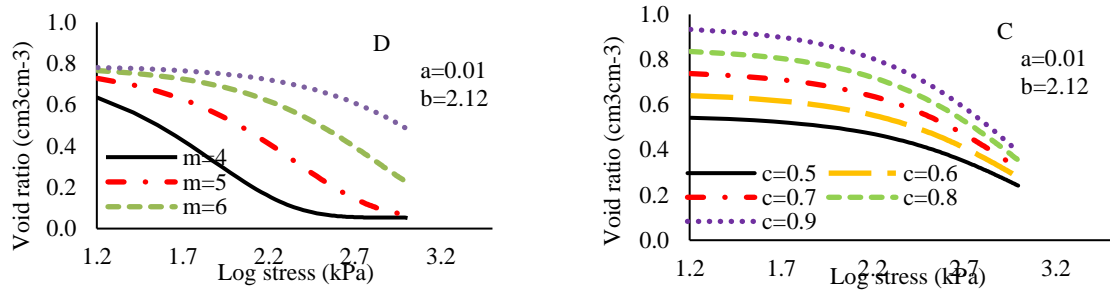
a, b, c, m The Gompertz model coefficients; df, degree of freedom. (ns) without significant effect. S.O.V means the source of the changes (Sources of Variations).

شیب نمودار را در ناحیه پلاستیک تغییر داده و افزایش آن سبب افزایش شیب و انحنای نمودار گشته و کاهش ضریب مذکور نمودار را به خط راست نزدیک می‌کند. تغییرات ضریب c مدل گمپرتز منحنی را بیشتر در ناحیه الاستیک تحت تأثیر قرار داده و افزایش آن سبب بالا رفتن منحنی و افزایش نسبت پوکی می‌شود. به طوری که در یک تنش ثابت افزایش این ضریب مقدار نسبت پوکی را افزایش می‌دهد. ولی تغییرات آن در ناحیه پلاستیک بر موقعیت نمودار تغییرات کمتری ایجاد کرد. می‌توان گفت که این ضریب در ارتباط با نسبت پوکی اولیه است و بالا بودن آن شاخصی از بالا بودن نسبت پوکی اولیه می‌باشد. اما ضریب m بر موقعیت نمودار تاثیر زیادی داشته و افزایش آن باعث جابجا شدن نمودار به سمت تنش‌های بیشتر شده و شکل نمودار کمتر تحت تاثیر قرار گرفته است.



اثر تغییرات ضرایب مدل گمپرتز بر شکل منحنی تراکم همانطور که در معادله ۳ بیان شد مدل گمپرتز دارای ضرایب برازشی بوده که این ضرایب بر بخش‌های مختلف نمودار تأثیر گذار می‌باشند. جهت بررسی تاثیر هر کدام از ضرایب بر شکل و موقعیت نمودار، سایر ضرایب ثابت نگه‌داشته شده و ضریب مورد بررسی تغییر داده شد. لازم به ذکر است که این شکل صرفاً یک شکل تئوریک بوده و جهت نشان دادن اثر تغییرات ضرایب بر شکل منحنی رسم شده است و جزء نتایج این تحقیق نیست. نتایج این بررسی برای چهار ضریب مدل گمپرتز در شکل ۱ نشان داده شده است. ضریب برازشی a بر شکل نمودار مؤثر نبوده و فقط موقعیت نمودار را تغییر می‌دهد (شکل ۱). با توجه به شکل (۱) افزایش ضریب a باعث جابجایی منحنی به سمت نسبت پوکی بالاتر می‌شود. در حالی که ضریب b





شکل ۱- تأثیر ضرایب مدل گمپرتز بر منحنی تراکم

Figure 1. The effect of Gompertz's model coefficients on the confined compression curve

(Lal, 1989) بیان کرد که افزایش ماده آلی در نتیجه وجود گیاهان پوششی، بقایای گیاهی و سیستم بدون خاک‌ورزی امکان پذیر می‌باشد. نسبت پوکی نهایی و باربرداری در اثر تیمارهای اعمال شده اختلاف معنی‌دار نداشتند. شاخص انبساط باربرداری در کشت بدون گیاه پوششی افزایش معنی‌داری نسبت به دو سطح دیگر گیاه پوششی نشان داد و در بین اثرات برهمکنش نیز خاک‌ورزی مرسوم بدون گیاه پوششی سبب افزایش معنی‌داری نسبت به خاک‌ورزی حداقل با گیاه خمر گردید. این نتیجه متناقض کاهش نسبت پوکی در کشت خمر نسبت به بدون گیاه پوششی ممکن است به دلیل افزایش مکش آب و عدم تأثیر گذاری تیمارها در رطوبت‌های خیلی کم و یا دلایل ارائه شده در مکش‌های پایین‌تر باشد. سوان (Soane, 1990) بیان کرد که تأثیر ماده آلی بر تراکم خاک و سایر خصوصیات مکانیکی بیشتر مربوط به رطوبت‌های بالا و تنش‌های پایین می‌باشد.

#### مولفه‌های منحنی تراکم

نسبت پوکی اولیه، نهایی، باربرداری و شاخص انبساط بارگذاری در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در نتیجه تیمارهای خاک‌ورزی و گیاه پوششی تفاوت معنی‌دار نداشتند (جدول ۸) اما شاخص انبساط باربرداری در سطح ۵ درصد تحت تأثیر گیاه پوششی اختلاف معنی‌دار داشت. مقایسه میانگین نسبت پوکی اولیه نشان داد که در بین تیمارهای متفاوت، کشت با گیاه پوششی خمر تیمار خاک‌ورزی حداقل مقدار آن را بیشتر از ماشک در همان تیمار بدون خاک‌ورزی افزایش داد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش پیش تراکمی ( $P_c$ ) در تیمار خاک‌ورزی حداقل با گیاه ماشک ( $MTC_1$ ) برابر با ۲/۵۸ کیلوپاسکال به دست آمد. همچنین مشاهده شد که بیشترین مقدار شاخص تراکم نیز در تیمار خاک‌ورزی حداقل بدون گیاه پوششی ( $MTC_3$ ) برابر با ۰/۷۵۴ بود. دامنه تغییرات شاخص انبساط بارگذاری بین ۰/۱۹ تا ۰/۲۹ به دست آمد. لال

جدول ۸- مقایسه میانگین ضرایب مدل گمپرتز و مشخصه‌های منحنی تراکم در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر)  
Table 8. Comparison mean of coefficients of the Gompertz model and the characteristics of the compression curve in the suction of 1500 kPa (depth 0 to 10 cm)

Treatment	Expansion index loading	Void ratio loading	Final Void ratio	Initial void ratio	Compression index	$P_c$ (kPa)	c
CT	0.026 <sup>a</sup>	0.707 <sup>a</sup>	0.873 <sup>a</sup>	0.969 <sup>a</sup>	0.665 <sup>a</sup>	2.48 <sup>a</sup>	0.829 <sup>a</sup>
MT	0.023 <sup>a</sup>	0.566 <sup>a</sup>	0.635 <sup>a</sup>	0.902 <sup>a</sup>	0.602 <sup>a</sup>	2.51 <sup>a</sup>	0.707 <sup>a</sup>
NT	0.025 <sup>a</sup>	0.654 <sup>a</sup>	0.726 <sup>a</sup>	0.926 <sup>a</sup>	0.606 <sup>a</sup>	2.48 <sup>a</sup>	0.786 <sup>a</sup>
C <sub>1</sub>	0.023 <sup>b</sup>	0.611 <sup>a</sup>	0.678 <sup>a</sup>	0.854 <sup>a</sup>	0.570 <sup>b</sup>	2.51 <sup>a</sup>	0.725 <sup>a</sup>
C <sub>2</sub>	0.023 <sup>b</sup>	0.593 <sup>a</sup>	0.660 <sup>a</sup>	0.982 <sup>a</sup>	0.593 <sup>b</sup>	2.47 <sup>a</sup>	0.626 <sup>a</sup>
C <sub>3</sub>	0.028 <sup>a</sup>	0.724 <sup>a</sup>	0.806 <sup>a</sup>	0.961 <sup>a</sup>	0.709 <sup>a</sup>	2.49 <sup>a</sup>	0.871 <sup>a</sup>
CTC <sub>1</sub>	0.024 <sup>ab</sup>	0.743 <sup>a</sup>	0.813 <sup>a</sup>	0.943 <sup>ab</sup>	0.707 <sup>ab</sup>	2.50 <sup>ab</sup>	0.891 <sup>ab</sup>
CTC <sub>2</sub>	0.024 <sup>ab</sup>	0.640 <sup>a</sup>	0.710 <sup>a</sup>	0.984 <sup>ab</sup>	0.560 <sup>abc</sup>	2.46 <sup>b</sup>	0.751 <sup>ab</sup>
CTC <sub>3</sub>	0.029 <sup>a</sup>	0.740 <sup>a</sup>	0.826 <sup>a</sup>	0.980 <sup>ab</sup>	0.726 <sup>ab</sup>	2.48 <sup>b</sup>	0.845 <sup>ab</sup>
MTC <sub>1</sub>	0.024 <sup>ab</sup>	0.520 <sup>a</sup>	0.590 <sup>a</sup>	0.895 <sup>ab</sup>	0.521 <sup>bc</sup>	2.58 <sup>a</sup>	0.610 <sup>b</sup>
MTC <sub>2</sub>	0.019 <sup>b</sup>	0.436 <sup>a</sup>	0.493 <sup>a</sup>	0.829 <sup>ab</sup>	0.530 <sup>bc</sup>	2.48 <sup>b</sup>	0.574 <sup>b</sup>
MTC <sub>3</sub>	0.027 <sup>ab</sup>	0.743 <sup>a</sup>	0.823 <sup>a</sup>	0.980 <sup>ab</sup>	0.754 <sup>a</sup>	2.46 <sup>b</sup>	0.938 <sup>a</sup>
NTC <sub>1</sub>	0.021 <sup>ab</sup>	0.570 <sup>a</sup>	0.633 <sup>a</sup>	0.725 <sup>b</sup>	0.483 <sup>c</sup>	2.46 <sup>b</sup>	0.675 <sup>ab</sup>
NTC <sub>2</sub>	0.025 <sup>ab</sup>	0.703 <sup>a</sup>	0.776 <sup>a</sup>	1.130 <sup>a</sup>	0.689 <sup>ab</sup>	2.48 <sup>b</sup>	0.853 <sup>ab</sup>
NTC <sub>3</sub>	0.027 <sup>ab</sup>	0.690 <sup>a</sup>	0.770 <sup>a</sup>	0.922 <sup>ab</sup>	0.645 <sup>abc</sup>	2.52 <sup>ab</sup>	0.830 <sup>ab</sup>

CT, MT و NT به ترتیب؛ خاکورزی مرسوم (برگرداندن)، خاکورزی حداقل (چیزل) و بدون خاکورزی، C<sub>1</sub>، گیاه پوششی ماشک؛ C<sub>2</sub>، گیاه پوششی خلر؛ C<sub>3</sub>، بدون گیاه پوششی؛ C<sub>n</sub> (CTC<sub>n</sub>، MTC<sub>n</sub>، NTC<sub>n</sub>)، برهم کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاکورزی و گیاه پوششی؛ P<sub>c</sub>، تنش پیش تراکمی؛ c، ضریب مدل گمپرتز؛ در هر بخش از هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

CT, MT and NT; Conventional tillage (moldboard), Minimum tillage (Chisel) and non-tillage; C<sub>1</sub>; Vicia cover plant; C<sub>2</sub>; Lathyrus sativus cover plant; C<sub>3</sub>; without cover plant; (CTC<sub>n</sub>, MTC<sub>n</sub>, NTC<sub>n</sub>) C<sub>n</sub>, interactions between different levels of tillage and cover plant, c, Gampartz model coefficient; in each section of each column, the meanings with the same letters do not have a significant difference.

## نتیجه‌گیری کلی

گیاهان مختلف بهتر نشان داده‌اند. ویژگی‌های تراکمی خاک وابستگی بالایی با مقدار رطوبت موجود در خاک دارند و با افزایش مقدار رطوبت تغییرات آنها به طور معنی‌داری قابل مشاهده است. بنابراین کاهش قابلیت تراکم خاک‌های دارای این دو سطح از گیاه پوششی نتیجه‌گیری می‌شود. اما بیشترین تأثیر این گیاهان در کاهش تراکم‌پذیری خاک مربوط به مکش‌های پایین می‌باشد. به طور کلی منحنی تراکم خاک در همه مکش‌ها کمتر تحت تأثیر خاکورزی بود. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که خاک-ورزی‌های حفاظتی باعث بهبود خصوصیات مکانیکی خاک شده است، بهبود وضعیت مکانیکی خاک سبب کاهش فرسایش، افزایش علمکرد و افزایش حاصلخیزی خاک خواهد شد. به طور کلی نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از خاکورزی‌های حفاظتی شامل بی‌خاکورزی و خاکورزی حداقل سبب بهبود وضعیت تراکم خاک می‌شود و گیاهان پوششی نیز تأثیر مهمی بر ارتقای پایداری خاک دارند. همچنین نتایج نشان داد که برهمکنش خاکورزی-های حفاظتی و نوع گیاه پوششی باعث افزایش پایداری خاک و کاهش تخریب‌های ناشی از تراکم خاک می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود در اراضی دارای اقلیم نیمه خشک، همانند بخش عمده‌ای از اراضی ایران، از خاکورزی حفاظتی و گیاهان پوششی در تناوب زراعی جهت بهبود وضعیت تراکمی خاک و جلوگیری از سایر عوامل مخرب استفاده گردد.

در این پژوهش اثر سه نوع مختلف خاکورزی شامل خاک-ورزی مرسوم، خاکورزی حداقل و بدون خاکورزی و همچنین دو نوع گیاه پوششی ماشک و خلر بر روی ویژگی‌های منحنی تراکم محصور و ضرایب مدل گمپرتز در سه مکش ۶، ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اثر متقابل خاکورزی حداقل به‌مراه گیاه ماشک (MTC<sub>1</sub>) بیشترین مقدار تنش پیش تراکمی (P<sub>c</sub>) را به‌همراه داشت. ضرایب a و m مدل گمپرتز به صورت متفاوت تحت تأثیر تیمارهای خاکورزی و گیاه پوششی قرار گرفتند. اما در مکش‌های بالا (۱۵۰۰ کیلوپاسکال) این ضرایب نسبت به مکش‌های پایین کمتر تحت تأثیر قرار گرفتند. به طور کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که در مکش پایین، یعنی ۶ کیلوپاسکال، نسبت به دو مکش دیگر ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اختلاف بین ویژگی‌های تراکمی به خوبی مشخص می‌شود. تعداد پارامترهایی که در مکش ۳۰ کیلوپاسکال و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تحت تأثیر تیمارها قرار گرفتند، نسبت به مکش ۶ کیلوپاسکال، بسیار کمتر هستند. علت این موضوع را می‌توان به تغییر مقدار رطوبت نسبت داد، چراکه ویژگی‌های مکانیکی خاک به شدت تابع مقدار رطوبت هستند. در مکش ۶ کیلوپاسکال مقدار رطوبت بیشتر بوده و ویژگی‌های مکانیکی خاک اختلاف خود را در اثر سیستم‌های کشت و

## References

- Aragoan A., Garcõ Aa M.G., Filgueira R.R., and Pachepsky Y.A. 2000. Maximum compatibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research*, 56: 197-204.
- Arvidsson J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil and Tillage Research*, 49: 159-170
- Badalikova B., and Bartlova J. 2014. Effect of soil tillage and digestate application on some soil properties. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 1: 7-11.
- Bameri A., Lotfi M., and Khaleghi M. 2022. The Effect of Tillage and Pudding on Some Soil Physical Properties and Rice Yield in Paddy Lands (Case study: Ghaemshahr City). *Applied Soil Research*, 10(3): 30-42. (In Persian)
- Bayat H, Ebrahimi E, Fallah M. 2018. Estimation of soil moisture using confined compression curve parameters. *Geoderma*, 318: 64-77
- Bronick C.J., and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.

- Bruce R.C., and Rayment G.E. 1982. Analytical methods and interpretations used by the Agricultural Chemistry Branch for Soil and Land Use Surveys.
- Celette F., Wery J., Chantelot E., Celette J., and Gary C. 2005. Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.) tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system: water relations and growth. *Plant and Soil*, 276: 205–217.
- Chan K.Y., Oates A., Swan A.D., Hayes R.C., Dear B.S., and Peoples M.B. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 89: 13–21.
- Chaplain V., De fossez P., Richard G., Tessier D., and Roger-Estrade J. 2011. Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 111: 105-111.
- Conservation Tillage Information Center (CTIC). 2004. National crop residue management survey, West Lafayette.
- Corbeels M., de Graaff J., Ndah T.H., Penot E., Baudron F., Naudin K., Andrieu N., Chirat G., Schuler J., Nyagumbo I., Rusinamhodzi L., Traore K., Mzoba H.D., and Adolwa I.S. 2013. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: a multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187: 155–170.
- Cresswell H.P., and Hamilton G.J. 2002. Bulk density and pore space relations. In Soil physical measurement and interpretation for land evaluation: A laboratory. Eds McKenzie N.J., Cresswell H., and Coughlan K. CSIRO Publishing: *Melbourne handbook*, 58-35
- Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., and Hongwen L. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3: 1-25.
- Deurer M., Grinev D., Young I., Clothier B.E., and Müller K. 2009. The impact of soil carbon management on soil macropore structure: a comparison of two apple orchard systems in New Zealand. *European Journal of Soil Science*, 60: 945–955.
- Dexter A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11: 199–238.
- Dexter A.R., Czyz E.A., Richard G., and Reszkowska A. 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143: 143-253.
- Ekwue E.I. 1990. Organic-matter effects on soil strength properties. *Soil and Tillage Research*, 16: 289-297.
- Elder J.W., and Lal R. 2008. Tillage effects on physical properties of agricultural organic soils of north central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 98 (2): 208–210.
- Ellis F.B., Elliot J.G.E., Barnes B.T., and Howse K.R. 1997. Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals. *Cambridge Science*, 89: 631-642.
- Folorunso O.A., Rolston D.E., Prichard T., and Louie D.T. 1992. Soil surface strength and infiltration rate as affected by winter crops. *Soil Technology*, 5: 189–197.
- Franzluebbers A.J., and Stuedemann J.A. 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil and Tillage Research*, 100, 141–153.
- Gabriel J.L., and Quemada M. 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertilizer fate. *European Journal of Agronomy*, 34: 133-143.
- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size and analysis. In: Warren A.D. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods*. Madison. WI, USA: *Soil Science Society of America Journal*, 255-295.
- Gomez J., Sobrinho T., Gir'aldez J., and Fereres E. 2009. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil and Tillage Research*, 102: 5–13.
- Gompertz B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philos.*
- Greacen E.L., and Sands R. 1980. A review of compaction of forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, 18: 163-189.
- Gregory A.S., Whalley W.R., Watts C.W., Bird N.R.A., Hallett P.D., and Whitmore A.P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89: 45–57.
- Grossman R.B., and Reinsch T.G. 2002. In: Dane J.H. Clarke, T.G (Ed). *Methods of soil analysis part Physical Methods. Soil Science Society of America Journal*, Madison. WI. 255-295.
- Haggblade S., and Tembo G., 2003. Conservation farming in Zambia, IFPRI, Washington, DC, 108, P 112.
- Hazelton P.A., and Murphy B.W. 2007. Interpreting soil test results: what do all the numbers mean? CSIRO publishing.
- Hemmat A., Tahmasebi M., Vafaeian M., and Mosaddeghi M.R. 2009. Relationship between pre-compaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosystems Engineering*, 102: 219-226.

- Horn R. 2004. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1131–1137.
- Howard R.F., Singer M.J., and Frantz G.A. 1981. Effects of soil physical properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 231-236.
- Hunt N., and Gilkes R. 1992. Farm Monitoring Handbook – A practical down-to-earth manual for farmers and other land users. (University of Western Australia: Nedlands W.A., and Land Management Society: Como, W. A.)
- Jabro J.D., Iversen W.M., Stevens W.B., Evans R.G., Mikha M.M., and Allen B.L. 2015. Effect of three tillage depths on sugarbeet response and soil penetrability resistance. *Agronomy Journal*, 107: 1481–1488.
- Kay B.D., and VandenBygaart A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66: 107–118.
- Keller T., Lamandé M., Schjønning P., and Dexter A.R. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163: 13–23.
- Kemper W. D., and Rosenau C.R. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed., Agron. Monog. 9. ASA and *Soil Science Society of America Journal*, Madison, WI., 425-442.
- Koolen A. 1974. A method for soil compactibility determination. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19: 271-278.
- Koolen A.J., and Kuipers H. 1989. Soil deformation under compressive force. PP: 37-52. In: Larson W.E., Blacke G.R., Allmaras R.R., Voorhess W.B., and Gupta S.C. (Eds). *Mechanics and Related Processes in structured Agricultural Soils*. Proceeding of 2th Workshop, NATO ASI Series, Kluwer, Dordrecht.
- Krause D., and Krause I. 2003. New green manuring Lathyrus sativus variety AC Greenfix available in USA. *Lathyrus Lathyrism Newsletter*. 3
- Kuan H.L., Hallett P.D., Griffiths B.S., Gregory A.S., Watts C.W., and Whitmore A.P. 2007. The biological and physical stability and resilience of a selection of Scottish soils to stresses. *European Journal of Soil Science*, 58: 811–821.
- Kuhna N.J., Hua Y., Bloemertza L., Heb J., Lib H., and Greenwooda P. 2016. Conservation tillage and sustainable intensification of agriculture: regional vs. global benefit analysis, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216: 155–165.
- Lal R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Advances in Agronomy*, 42: 85–197.
- Mahboubi A.A., and Lal R. 1998. Long term tillage effects on changes in structural properties of two soil in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 45: 107-118.
- Małecka I., Blecharczyk A., Sawinska Z., Swedrzyńska D., and Piechota T. 2015. Winter wheat yield and soil properties response to longterm non-inversion tillage. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17: 1571-1584.
- Metson A.J. 1961. Methods of chemical analysis for soil survey samples. Soil Bureau Bulletin No. 12, New Zealand Department of Scientific and Industrial Research. Government Printer: *Wellington, New Zealand*, 168–175.
- Mosaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., Hemmat A., and Afyuni M. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 55(1-2): 87-97.
- Mulqueen J. 1973. A soil mixing reclamation technique on a pseudogley in North Central Ireland. In: Pseudogley and Gley, Trans Commun. Int. *Soil Science Society of America Journal*, V and VI, 713-717.
- Nazarian A., Vishkaei R.M., Shahzad M., Ebrahimi E., and Adlparvar A. 2023. Assessing key factors for sporting industry sustainable development through multilayer artificial perceptron neural network approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1): 1176-1188.
- Peixoto R.S., Coutinho H.L.C., Madari B., Machado P.L., Rumjanek N.G., Van Elsas J.D., Seldin L., and Rosado A.S. 2006. Soil aggregation and bacterial community structure as affected by tillage and cover cropping in the Brazilian Cerrados. Data. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1038-1044.
- Pereira J.O., De fossez P., Richard G. 2007. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *European Journal of Soil Science*, 58: 34–44.



- Peverill K.I., Sparrow L.A., and Reuter D.J. 1999. Soil analysis: *an interpretation manual*. CSIRO publishing.
- Pinheiro E.F.M., Pereira M.G., Anjos L.H.C., Machado P.L.O.A. 2004. Densimetric fractionation of organic matter in soil under different tillage and vegetation cover in Paty do Alferes, State of Rio de Janeiro (Brazil). *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 28: 731–737.
- Pytka J. 2001. Load effect upon soil stress and deformation state in structured and disturbed sandy loam for two tillage treatments.
- Rab M.A., Bauhus J., Lacey S., and Raison J. 1998. Protocol of sampling and measuring soil organic matter and physical properties following harvesting of native forests. Draft report. WAPIS Soil Indicators Project.
- Ramos M.E., Robles A., Sánchez-Navarro A.B., and González-Rebollar J.L. 2011. Soil responses to different management practices in rainfed orchards in semiarid environments, *Soil and Tillage Research*, 112: 85–91.
- Rhoades J.D., Kandial A., and Mashali A.M. 1992. The use of saline water for crop production. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome. 48.
- Roades J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Method of soil analysis, parts: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA. Pp: 417-436.
- Rosa H.A., Secco D., Veloso G., Santos R.F., Souza S.N.M., Marins A.C., and Borosi A. 2012. Effects of the use of cover crops in the structure of an oxisol managed by a no-till farming system in the west of Paran. *Brazilian Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10: 1278-1280.
- Rowell D.L. 1994. Soil science methods and Application, part 7. measurement of the composition of soil solution, 146.
- Russo V.M., Kindiger B., and Webber C.L. 2006. Pumpkin yield and weed populations following annual ryegrass. *Journal of Sustainable Agricultural Sciences*, 28: 85-96.
- Sands R., Greacen E.L., and Gerard C.J. 1979. Compaction of sandy soils in radiata pine forests. I. A penetrometer study. *Australian Journal of Soil Research*, 17: 101-13.
- Sharratt B., Zhang M., and Sparrow S. 2006. Twenty years of tillage research in subarctic Alaska I. Impact on soil strength, aggregation, roughness, and residue cover. *Soil and Tillage Research*, 91: 75–81.
- Sims J.T. 1996. Lime requirement method of soil analysis, parts. chemical methods. Madison, Wisconsin. USA. 491.
- Soane B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, 16: 179–201.
- Soane B.D., and van Ouwerkerk C. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B.D. van Ouwerkerk, C. (Eds.), Soil Compaction and Crop Production. *Developments in Agricultural Engineering*, 11: 1–21.
- Stengel P. 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In: La Structure Du Sol et Son Evolution: Conséquences Agronomiques, Maîtrise Par L'agriculteur, Les Colloques de l'INRA, no. 53 (ed. J. Boiffin). 15–36.
- Teasdale J.R., Beste C.E., and Pottes W.E. 1998. Response of weeds to tillage and cover crop residue. *Weed Science*, 39: 195-199.
- Tebrugge F., and Böhrnsen A. 1997. Experience with the applicability of no-tillage crop production in the West-European countries. *Wissenschaftlicher Fachverlag, Giessen*, 25-43.
- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity in methods of soil analysis. Klute A. (Ed). Part3. Chemical methods. Madison, wisconsin, USA. 475-490.
- Van Huysteen L. 1989. Quantification of the soil compaction problem of selected vineyard soils and a critical assessment of methods to predict soil bulk density from soil texture. *Unpublished PhD Thesis, Univ. of Stellenbosch*.
- Virto I., Imaz M.J., Fernandez-Ugalde O., Urrutia I., Enrique A., and Bescansa P. 2012. Soil quality evaluation following the implementation of permanent cover crops in semi-arid vineyards. Organic matter, physical and biological soil properties. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10: 1121-1132.
- Walkey A., and Black I.A. 1934. An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29–38.
- Worrall R.J., Lamont G.P., O'Connell M.A., and Nicholls P.J. 1987. The growth response of container-grown woody ornamentals to controlled-release fertilizers. *Scientia Horticulturae*, 32(3-4): 275-286.
- Zhang B. Horn R. and Hallett P.D. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 69: 864–871.
- Zotarelli L., Alves B.J.R., Urquiaga S., Boddey R.M., and Six J. 2007. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two oxisols. *Soil and Tillage Research*, 95: 196–206.