Plant Production Technology/ Volume 26/ Issu 1/ Pages 163-184/ Spring and Summer 2026
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32935.2190

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Impacts of Tillage and Cropping Systems on Water Flow and Chloride Leaching under Saturated Conditions

Bayat[1*], H. Zangeneh Bighash[2], Z. and Hamzei[3], J.

1. Prof. (Ph. D.), Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Former M.Sc. Student of Soil Science, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Associate Prof. (Ph. D.), Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

*: Corresponding Author Email: h.bayat@basu.ac.ir

Received: 2026/07/21 Accepted: 2026/09/14

Introduction
A wide range of factors influence the movement of salts in soils. Among these, cropping systems are key physical determinants governing salt transport processes. Soil structure plays a pivotal role in controlling water flow and solute transport by affecting pore-size distribution, pore tortuosity and connectivity, as well as the soil hydraulic conductivity. Tillage management is another critical factor that significantly affects the leaching of chemicals and contaminants in agricultural systems. Different types of vegetation, particularly cover crops, influence solute transport through multiple mechanisms, including increasing soil organic matter, enhancing nutrient availability for subsequent crops, improving soil physical properties, reducing soil erosion, and suppressing weed growth. The present study was conducted to evaluate the effects of different tillage practices, cover crops, and cropping patterns on chloride transport, which was employed as a conservative tracer to represent the movement of salts and contaminants in soil.

Materials and Methods
The experiment was conducted at the research farm of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. A factorial split-plot arrangement within a randomized complete block design (RCBD) with three replications was employed. Tillage system and cover cropping were assigned to main plots, while cropping pattern was allocated to subplots. Tillage was evaluated at two levels: conventional tillage and minimum tillage. Cover cropping was also considered at two levels: presence of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) and absence of cover crop. Cropping pattern consisted of three treatments: (i) summer squash (Cucurbita pepo), (ii) sole green bean (*Phaseolus vulgaris* L.), and (iii) additive intercropping with a 50% increase in green bean density combined with summer squash (Cucurbita pepo).
Prior to the initiation of the experiment, the field had been managed under a rotation of grass pea (as a cover crop) and maize for three consecutive years; the present study was implemented in the fourth year. The cover crop was sown in March. Before reaching full maturity, it was either retained on the soil surface or incorporated into the soil using moldboard plowing, depending on the tillage treatment. The main crops (summer squash and green bean) and their intercropping treatment were established simultaneously in June. Both species are characterized by taproot systems. At the end of the growing season, undisturbed soil samples were collected from the 0–25 cm depth. Sampling was performed using 36 cylindrical columns made of galvanized iron, with an inner diameter of 16 cm and a height of 32 cm. Care was taken to preserve the soil structure during sampling. A potassium chloride (KCl) solution with a constant concentration of 0.01 M was applied to the suface of the soil columns under the steady-state saturated flow conditions. The imposed flow rate corresponded to the saturated hydraulic conductivity of each treatment. Leaching was continued until approximately four pore volumes had passed through the columns. Effluent samples were collected at intervals of 0.2 pore volumes, and chloride concentration was determined for each fraction. Breakthrough curves (BTCs) were constructed by plotting the relative concentration (C/C_0) against the number of pore volumes for chloride. These curves were used to characterize solute transport behavior under different treatments. All data were analyzed using SAS software (version 9.1). Mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at the 5% significance level.

Results and Discussion
Duncan's multiple range test revealed that tillage system, cover cropping, and cropping pattern exerted significant effects on the saturated hydraulic conductivity (K_s) of undisturbed soil columns. The minimum tillage–cover crop (Lathyrus)–50% intercropping treatment exhibited the highest K_s among all treatments. This increase was statistically significant compared with both the minimum tillage–no cover crop– summer squash monoculture and the conventional tillage–no cover crop– summer squash monoculture treatments. The enhancement in saturated hydraulic conductivity

can be primarily attributed to improvements in soil structural attributes, including aggregate stability and pore continuity. Moreover, tillage practice, cover cropping, and cropping pattern significantly influenced chloride transport behavior in the soil profile. Under saturated flow conditions, breakthrough curve analysis indicated the earliest chloride breakthrough for the minimum tillage–cover crop–50% intercropping treatment, followed by the conventional tillage–cover crop–50% intercropping treatment. In subsequent ranks, the minimum tillage–no cover crop–50% intercropping and conventional tillage–no cover crop–50% intercropping treatments also demonstrated relatively early breakthrough. This pattern can be ascribed to the beneficial role of 50% intercropping in enhancing soil organic matter content, which in turn promotes aggregate stabilization and the development of a more continuous and functionally effective pore network, thereby facilitating advective solute transport under saturated conditions.

Conclusion

The findings of this study demonstrated that tillage practices, cover cropping, and cropping patterns exert significant influences on chloride transport under saturated soil conditions. Among the evaluated treatments, the combination of minimum tillage with grass pea (*Lathyrus sativus* L.) as a cover crop and an intercropping system was identified as the most effective management strategy. This treatment enhanced the connectivity of macropores, thereby facilitating preferential flow pathways and resulting in a greater mass of chloride leached compared to other treatments. The results obtained after four years of implementing the experimental treatments further indicated that integrated management involving conservation tillage and grass pea cover cropping provided the most favorable conditions for improving soil structural quality. Based on these findings, the long-term adoption of integrated conservation practices, particularly the combined use of cover crops and reduced tillage systems, is strongly recommended for sustainable soil management and improved soil structural stability in agricultural systems.

Keywords: Breakthrough curve; Moldboard plow; Sandy loam soil; Solute transport.

Citations: Bayat, H., Zangeneh Bighash, Z. and Hamzei, J. **(**2026). Impacts of Tillage and Cropping Systems on Water Flow and Chloride Leaching under Saturated Conditions. *Plant Production Technology*, 26(1), 163-184. https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32935.2190
© 2022 The Author(s). Bu- Ali Sina University Publication. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Online ISSN: 2476-5651 **Print ISSN:** 2476-6321

فنآوری تولیدات گیاهی/ جلد بیست و ششم/ شمارهٔ اول/ صفحات ۱۶۳-۱۸۴/ بهار و تابستان ۱۴۰۵
https://doi.org/10.22084/ppt.2026.32935.2190

تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی و کشت بر جریان آب و آبشویی کلرید در شرایط اشباع

Impacts of Tillage and Cropping Systems on Water Flow and Chloride Leaching under Saturated Conditions

حسین بیات[1*]، زینب زنگنه بیغش[2] و جواد حمزه‌ای[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳
(مقاله پژوهشی)

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی نقش شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی، حضور گیاه پوششی و نوع الگوی کشت در نحوه انتقال کلرید در خاک طراحی و اجرا شد. در این تحقیق، تیمارهای خاک‌ورزی در دو سطح (مرسوم و حداقل) در کنار وضعیت گیاه پوششی در دو حالت (وجود خلر و فقدان پوشش گیاهی) به‌عنوان عامل‌های اصلی، و سه الگوی کشت شامل کشت خالص کدو، لوبیا سبز و کشت مخلوط افزایشی (۵۰ درصد لوبیا سبز همراه با کدو) به‌عنوان عامل‌های فرعی، در قالب طرح فاکتوریل اسپلیت‌پلات و بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. پس از اتمام فصل زراعی، نمونه‌گیری از خاک دست‌نخورده با استفاده از ۳۶ سیلندر فلزی انجام شد. محلول کلرید پتاسیم با غلظت ۰/۰۱ مولار به‌صورت پالسی در شرایط جریان اشباع پایدار به ستون‌های خاک اعمال گردید و سپس منحنی‌های رخنه کلرید ترسیم شدند. یافته‌ها نشان دادند که ترکیب خاک‌ورزی حداقل، حضور خلر و کشت مخلوط ۵۰ درصد، با بهبود ویژگی‌های ساختمانی خاک، موجب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در مقایسه با سایر تیمارها گردید. همچنین در این تیمار و پس از آن در تیمار خاک‌ورزی مرسوم، خلر و کشت مخلوط ۵۰ درصد، پدیده خروج زودتر کلرید از ستون خاک مشاهده شد که می‌توان آن را به بهبود پایداری ساختمان خاک و افزایش ماده آلی ناشی از کشت مخلوط نسبت داد. به‌طور کلی، نتایج حاصل بیانگر آن است که تغییر در روش‌های مدیریتی خاک، استفاده از گیاه پوششی و انتخاب الگوی مناسب کشت، می‌تواند به‌طور معنی‌داری بر الگوی حرکت کلرید در خاک تأثیرگذار باشد.

واژه‌های کلیدی: انتقال املاح، خاک لوم شنی، گاوآهن برگردان‌دار، منحنی رخنه

ارجاع به مقاله: بیات، ح.، زنگنه بیغش، ز. و حمزه‌ای، ج (۱۴۰۵). تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی و کشت بر جریان آب و آبشویی کلرید در شرایط اشباع، *مجله فنآوری تولیدات گیاهی*، ۲۶(۱)، ۱۶۳-۱۸۴.
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32935.2190/

حق نشر متعلق به نویسنده (گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) به مجله اجازه می‌دهد مقاله‌ی چاپ شده را در سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۶-۵۶۵۱ **شاپا چاپی:** ۲۴۷۶-۶۳۲۱

۱. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۳. دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
*: نویسنده مسئول Email: h.bayat@basu.ac.ir

۱. مقدمه

ایران ازجمله کشورهایی به شمار می‌رود که بخش قابل‌توجهی از اراضی آن با مشکل شوری مواجه است. به‌طوری‌که حدود ۵/۲۳ میلیون هکتار، معادل ۲/۱٤ درصد از کل مساحت و نزدیک به ۳۰ درصد از اراضی دشتی کشور، تحت تأثیر این پدیده قرار دارند (Sotoodehnia and Jafarei, 2016). از سوی دیگر، افزایش جمعیت و به‌تبع آن نیاز روزافزون به تأمین منابع غذایی، اهمیت این مسئله را دوچندان کرده است. در نتیجه، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در کشور روندی افزایشی یافته و این امر به برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی شیرین منجر شده است (Latifi *et al.*, 2022).

املاح موجود در خاک، بسته به ماهیت و ترکیب شیمیایی خود، می‌توانند نقش‌های متفاوتی در پایداری (Moghadas *et al.*, 2019) یا تخریب (Farahani *et al.*, 2020; Gholami and Emami, 2021) ساختمان خاک ایفا کنند؛ به‌طوری‌که برخی از آن‌ها موجب تقویت و تثبیت ساختمان خاک شده، در حالی که گروهی دیگر باعث فروپاشی و تضعیف آن می‌شوند. جابه‌جایی این املاح در محیط خاک، یکی از عوامل کلیدی در تغییر کیفیت منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی و سطحی، محسوب می‌شود. فرآیند آبشویی سبب انتقال نمک‌ها، کودها و سایر آلاینده‌ها به اعماق نیمرخ خاک شده و در نتیجه، آن‌ها را از محل اصلی کاربردشان دور می‌سازد که این امر می‌تواند به افت کیفیت آب‌های زیرزمینی منجر شود. از این‌رو، ارزیابی کمی میزان انتقال و تجمع املاح در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Shabanpoor Shahrestani, 2002).

مدیریت خاک‌ورزی یکی از عوامل کلیدی و اثرگذار در فرآیند آبشویی ترکیبات شیمیایی و انتقال آلاینده‌ها در سامانه‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود. به‌طور کلی، خاک‌ورزی به مجموعه عملیات مکانیکی اطلاق می‌شود که با هدف ایجاد بستر مناسب برای کشت، حفاظت از منابع آب و خاک، کاهش فشردگی و کنترل علف‌های هرز، موجب دگرگونی فیزیکی خاک می‌گردد (Mosaddeghi *et al.*, 2009). این عملیات با تغییر در ویژگی‌های ساختمانی خاک، از جمله توزیع اندازه منافذ، میزان تخلخل درشت و پیوستگی شبکه منافذ، بر خصوصیات هیدرولیکی خاک تأثیر می‌گذارد؛ ویژگی‌هایی که نقش تعیین‌کننده‌ای در حرکت آب و انتقال املاح دارند (Benjamin, 1993). پژوهش‌های متعددی تأثیر عملیات مدیریتی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را نشان داده‌اند. پنگ و همکاران (Peng *et al.*, 2025) گزارش کردند که کشت طولانی‌مدت به‌طور قابل‌توجهی بر ساختار تخلخل خاک تأثیر می‌گذارد. پرویزی و همکاران (Parvizi *et al.*, 2024) با مطالعه تأثیر مدیریت‌های مختلف خاک بر پایداری ساختمان خاک، نتیجه‌گیری کردند که عملیات حفاظت خاک موجب افزایش سهم خاکدانه‌های درشت و بهبود ساختمان خاک گردید. حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh *et al.*, 2025) گزارش کردند که تیمار کشت مستقیم (بی‌خاک‌ورزی)، موجب افزایش میزان فسفر قابل استفاده برای گیاه و فعالیت تنفسی میکروارگانیسم‌ها گردید و از این طریق ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی را بهبود بخشید. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که سامانه‌های خاکورزی حفاظتی، افزون بر ارتقای کیفیت زیستی خاک، ظرفیت بالایی برای به‌کارگیری به‌عنوان الگویی کارآمد در کشاورزی پایدار، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، دارا هستند. داشادی (Dashadi, 2025) گزارش کرد که به‌کارگیری کشاورزی حفاظتی با تمرکز بیشتر بر بی‌خاک‌ورزی و همراهی آن با مصرف بهینه کودهای نیتروژنه و فسفره، علاوه بر افزایش نسبی عملکرد، موجب کاهش اثرات منفی ناشی از مصرف بی‌رویه کودها شده و با کاهش هزینه‌های تولید در نظام‌های کم‌خاک‌ورزی، در نهایت به بهبود پایداری تولید و افزایش سود خالص منجر می‌شود.

اصطلاح گیاهان پوششی[1] به گونه‌هایی اطلاق می‌شود که سطح زمین را بپوشاند و بتواند باروری خاک را افزایش داده و رشد علف‌های مزاحم را کاهش دهد (Ghorbani, 2009; McCauley *et al.*, 2022). این گیاهان علاوه بر نقش حفاظتی، در افزایش ماده آلی خاک، بهبود دسترسی عناصر غذایی برای گیاهان زراعی، ارتقای ویژگی‌های فیزیکی خاک، کاهش فرسایش و کنترل علف‌های هرز نیز مؤثر هستند (Bond, 2003; Liebman and Davis, 2000) و می‌توانند بر الگوی جابه‌جایی نمک‌ها در خاک تأثیر بگذارند (Caron et al., 1996). افزون بر این، این گیاهان قابلیت آن را دارند که نقش

1. Cover crop

یک شخم‌زننده زنده را ایفا کنند؛ چراکه نفوذپذیری خاک را بالا برده و با ایجاد تغییرات در لایه‌های مختلف، به بهبود ساختمان خاک کمک می‌کنند (Samadani and Montazeri., 2009). بنابراین، اتخاذ راهبردهای صحیح در زمینه مدیریت خاکورزی و استقرار گیاهان پوششی، می‌تواند گامی بنیادین در جهت حفظ شاخص‌های فیزیکی خاک، تأمین نیازهای تغذیه‌ای آن و در نهایت تحقق کشاورزی پایدار محسوب شود. به همین دلیل، بررسی تأثیر اقدامات مدیریتی نظیر خاکورزی و کاربرد گیاهان پوششی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

رمضانی اعتدالی و همکاران (Ramezani Etedali *et al.*, 2022) نیز با مقایسه مقادیر شوری میان دو تیمار کنترل و مالچ گیاهی با اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مقادیر املاح در عمق‌های خاک، گزارش کردند که تأثیر مالچ در کاهش تجمع نمک قابل توجه است. گیاهان پوششی باعث افزایش ماده آلی در خاک می‌شوند. جوزای و همکاران (Jozay *et al.*, 2023) گزارش کردند که مواد آلی، فراهمی آب و مواد غذایی را افزایش داده و بر تخلخل کل، جرم مخصوص ظاهری، درصد حجم هوا و اسیدیته خاک تاثیر زیادی دارد. ویژگی‌های مذکور به شدت انتقال املاح در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

کشت مخلوط[1] به استقرار هم‌زمان دو یا چند گونه گیاهی در یک واحد سطح طی یک فصل یا سال زراعی اطلاق می‌شود (Sullivan *et al.*, 2003). این شیوه به‌عنوان یکی از ارکان مهم کشاورزی پایدار شناخته می‌شود و در مقایسه با نظام‌های تک‌کشتی، مزایای متعددی به همراه دارد؛ از جمله کاهش شیوع آفات و بیماری‌ها (Gomez and Gurevitch, 1998; Mazaheri, 2008)، حفاظت بهتر از خاک (Ghanbari-Bonjar, 2000; Mazaheri, 2008)، افزایش کارایی بهره‌برداری از منابع و محدودسازی رشد علف‌های هرز (Mazaheri, 2008).

با وجود اهمیت هر یک از عوامل مدیریتی نظیر خاک‌ورزی، استفاده از گیاهان پوششی و انتخاب الگوی کشت، تاکنون بررسی هم‌زمان و یکپارچه اثر این عوامل بر جریان آب در خاک و انتقال کلرید ـ به‌عنوان شاخصی برای ردیابی جابه‌جایی آلاینده‌ها ـ در شرایط اشباع خاک به‌طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تبیین نقش ترکیبی این سه عامل مدیریتی در فرآیند انتقال آب و آلاینده‌ها در خاک اشباع طراحی و اجرا گردید.

۲. مواد و روش‌ها

موقعیت و محل اجرای آزمایش

این آزمایش طی چهار سال زراعی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا، واقع در روستای دستجرد و در فاصله ۳۷ کیلومتری شهر همدان، به اجرا درآمد. موقعیت جغرافیایی محل اجرای پژوهش در طول شرقی ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه و عرض شمالی ۳۵ درجه و ۱ دقیقه، با ارتفاع ۱۶۹۰ متر از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱).

اجرای طرح

به‌منظور بررسی تأثیر شیوه‌های متفاوت مدیریت خاک شامل نوع خاک‌ورزی، کاربرد گیاه پوششی و الگوهای کشت بر خصوصیات یک خاک با بافت لوم‌شنی، یک آزمایش مزرعه‌ای در قالب طرح فاکتوریل با آرایش اسپلیت‌پلات و بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار (در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی) طراحی و اجرا گردید. در این چارچوب، تیمارهای مرتبط با خاک‌ورزی در دو سطح شامل خاک‌ورزی مرسوم (اجرای شخم با گاوآهن برگرداندار تا عمق حداکثر ۳۰ سانتی‌متر؛MP) و خاک‌ورزی حداقلی (استفاده از چیزل با عمق کمتر از ۱۰ سانتی‌متر؛CP) تعریف شدند. این تیمارها همراه با عامل گیاه پوششی در دو وضعیت حضور (خلر) و عدم حضور، در کرت‌های اصلی قرار گرفتند. در ادامه، الگوی کشت به‌عنوان عامل فرعی در سه سطح شامل کشت تک‌محصولی کدوی پوست‌کاغذی، کشت تک‌محصولی لوبیا سبز و سیستم کشت مخلوط افزایشی (افزایش ۵۰ درصد لوبیا سبز در کنار کدوی پوست‌کاغذی) در کرت‌های فرعی قرار گرفت تا برهم‌کنش این عوامل مدیریتی بر ویژگی‌های خاک به‌صورت دقیق ارزیابی شود.

پیش از آغاز اجرای این طرح، به‌مدت سه سال در منطقه مورد مطالعه کشت گیاه پوششی خلر و محصول ذرت انجام شده بود و سال چهارم به اجرای آزمایش حاضر اختصاص یافت. گیاه پوششی در اسفندماه کشت گردید و پیش از رسیدن

1. Intercropping

به مرحله برداشت کامل، بسته به نوع تیمار خاک‌ورزی، بقایای آن یا بر سطح خاک باقی ماند و یا در اثر عملیات شخم با خاک مخلوط شد. کاشت کدوی پوست‌کاغذی، لوبیا سبز و نیز تیمارهای کشت مخلوط آن‌ها به‌صورت هم‌زمان در خردادماه انجام گرفت. شایان ذکر است که هر دو گیاه مورد استفاده دارای سیستم ریشه‌ای راست (محوری) بودند.

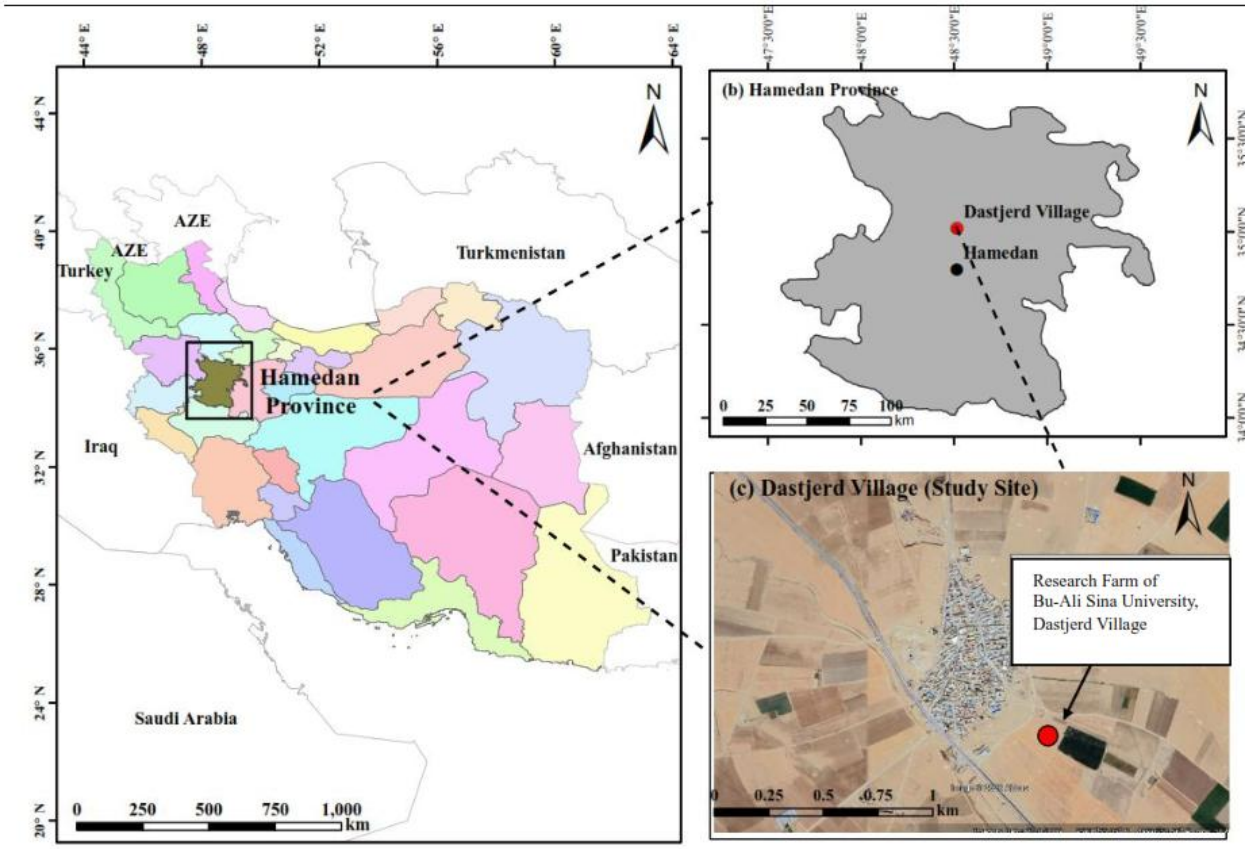


Fig. 1: Location of the research farm of Bu-Ali Sina University in the Dastjerd Village

نمونه‌برداری خاک

در پایان دوره رشد، نمونه‌برداری از خاک به‌صورت دست‌نخورده از لایه ۰ تا ۲۵ سانتی‌متری انجام شد. برای این منظور، از ۳۶ سیلندر فلزی ساخته‌شده از آهن گالوانیزه با ضخامت ۳ میلی‌متر، قطر داخلی ۱۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر استفاده گردید. پس از استخراج ستون‌های خاک، بخش زیرین سیلندرها با استفاده از پارچه و توری فلزی پوشانده شد و نمونه‌ها با دقت به آزمایشگاه انتقال یافتند. در طول اجرای آزمایش‌های آبشویی، به‌منظور جلوگیری از خشک‌شدن نمونه‌ها، سیلندرها بر روی ظروف حاوی آب قرار داده شدند تا رطوبت از طریق خاصیت موئینگی به داخل ستون‌های خاک نفوذ کرده و شرایط رطوبتی پایدار حفظ شود.

هدایت هیدرولیکی اشباع

هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌های دست‌نخورده در مقیاس بزرگ با استفاده از روش بار ثابت و براساس دستورالعمل ارائه‌شده توسط کلوت و دیرکسن (Klute and Dirksen, 1986) تعیین گردید (شکل ۲).

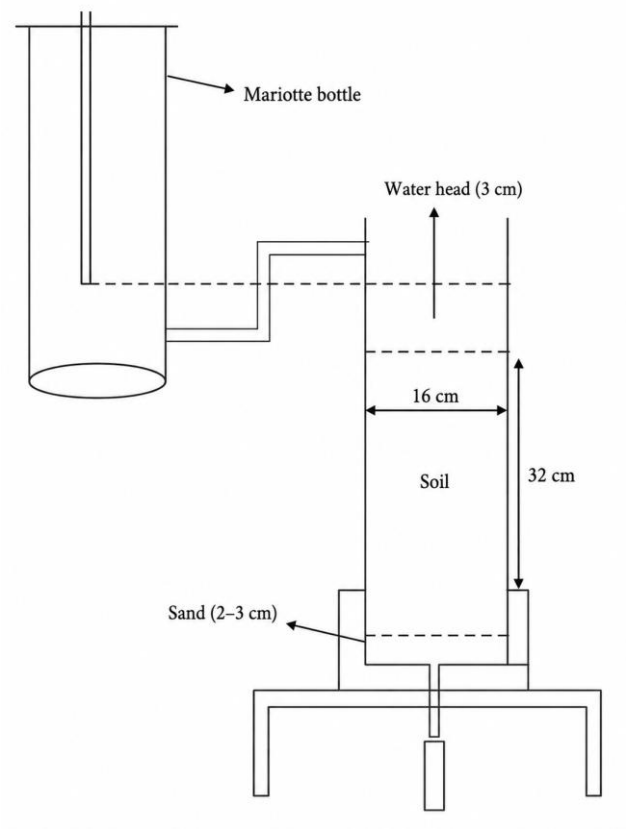


Fig. 2. Schematic of saturated hydraulic conductivity measurement

حجم آب منفذی ستون‌های خاک در شرایط اشباع

حجم آب منفذی به بخشی از حجم کل خاک اطلاق می‌شود که توسط آب اشغال شده است. به‌منظور محاسبه این پارامتر در شرایط جریان اشباع پایدار، از رابطه ارائه‌شده توسط کرکهام و پاورز (۱۹۷۲) استفاده گردید (معادله ۱):

معادلهٔ ۱ $$V_0 = \theta_s \times V_t$$

که در این رابطه V_0، حجم آب منفذی خاک (cm^3)؛ θ_s، مقدار حجمی رطوبت اشباع خاک ($cm^3 cm^{-3}$)، و V_t، حجم کل خاک دست‌نخورده (cm^3) در سیلندهای بزرگ می‌باشند.

استقرار ستون‌های خاک و ایجاد شرایط اشباع ماندگار برای آبشویی ستون‌ها

برای ایجاد شرایط جریان اشباع پایدار، محلول سولفات کلسیم با غلظت ۰/۰۱۳ مولار به‌وسیله بطری ماریوت در ستون‌های خاک برقرار شد (شکل ۳). سپس، حجم آب خروجی از نمونه‌های خاک در بازه‌های زمانی یکسان اندازه‌گیری گردید. در فرآیند آبشویی ستون‌های خاک تحت شرایط اشباع، بیشینه مقدار هدایت هیدرولیکی به‌دست‌آمده از تکرارهای هر تیمار، به‌عنوان مبنای اعمال جریان به ستون‌های متناظر همان تیمار در نظر گرفته شد.

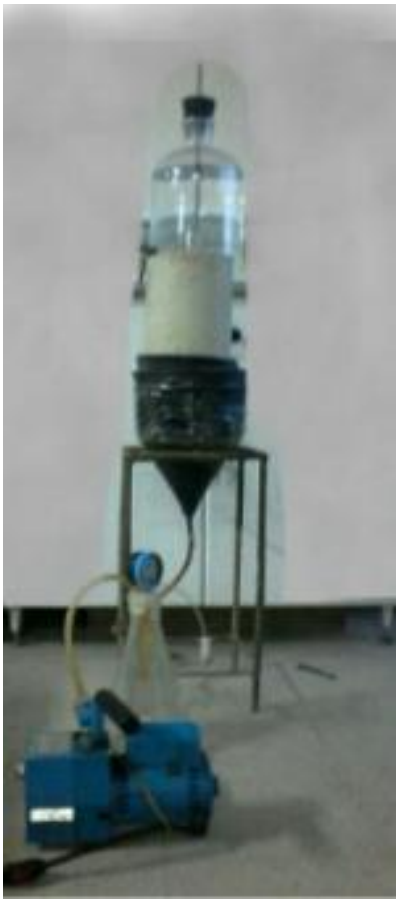


Fig. 3. View of soil column leaching.

آزمایش‌های آبشویی

پس از برقراری جریان اشباع پایدار با استفاده از محلول سولفات کلسیم ۰/۰۱۳ مولار، محلول جایگزین کلرید پتاسیم با غلظت ۰/۰۱ مولار به‌صورت یک پالس مشخص و به حجم ۱۲۵۰ میلی‌لیتر به ستون‌های خاک اعمال گردید. بلافاصله پس از پایان اعمال پالس، فرآیند آبشویی با محلول سولفات کلسیم ۰/۰۱۳ مولار و با همان شدت جریان ادامه یافت.

فرآیند آبشویی تا زمانی ادامه پیدا کرد که حجم محلول عبوری به حدود چهار برابر حجم آب منفذی ستون‌ها (V_0 ٤ و P_v=٤) برسد. در این مدت، نمونه‌برداری از زه‌آب خروجی تا رسیدن به این حجم ادامه یافت و در مجموع ١٦ نمونه در طول آزمایش جمع‌آوری شد.

غلظت یون کلرید در نمونه‌های خروجی با استفاده از روش موهر (Skoog, 2004) و از طریق تیتر کردن با نیترات نقره تعیین و بر حسب ppm گزارش گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور ارزیابی اثر تیمارها، تغییرات غلظت نسبی کلرید خروجی از ستون‌های خاک در مقادیر مشخص حجم آب منفذی شامل ۰/۵ PV، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ٤ به‌همراه هدایت هیدرولیکی اشباع، با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۱ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز با بهره‌گیری از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 صورت پذیرفت. همچنین، به‌منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، آزمون کولموگروف–اسمیرنوف در محیط نرم‌افزار SAS 9.1 به‌کار گرفته شد. در مواردی که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کردند، تبدیل‌های مناسب از جمله لگاریتمی (log) و کسینوسی (cos) بر روی آن‌ها اعمال گردید.

۳. نتایج و بحث

تأثیر فاکتورهای خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت بر هدایت هیدرولیکی اشباع

براساس یافته‌های حاصل از تحلیل واریانس داده‌ها، مشخص شد که تأثیر متقابل دوسویه عامل «نوع گیاه پوششی» و «الگوی کشت» بر مقدار هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع در

ستون‌های خاک دست‌نخورده، در سطح احتمال ۵ درصد از نظر آماری معنی‌دار است. در مقابل، اثرات اصلی هر یک از فاکتورها شامل روش خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت، همچنین برهم‌کنش‌های دوگانه خاک‌ورزی با گیاه پوششی، خاک‌ورزی با الگوی کشت، و نیز اثر متقابل سه‌گانه ترکیب خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت، همگی فاقد اثر معنی‌دار بر روی این شاخص (هدایت هیدرولیکی اشباع در نمونه‌های دست‌نخورده) بودند (**Error! Reference source not found.**).

Table 1: Analysis of variance (ANOVA) results for the effects of tillage, cover crop, and cropping pattern on saturated hydraulic conductivity of undisturbed soil columns

Source of Variation	df	Mean Squares
Replication	2	10.33 ns
Tillage	1	2.34 ns
Cover Crop	1	8.05 ns
Tillage × Cover Crop	1	1.00 ns
Main Plot Error	6	13.00
Cropping Pattern	2	1.22 ns
Tillage × Cropping Pattern	2	9.66 ns
Cover Crop × Cropping Pattern	2	30.43 *
Tillage × Cover Crop × Cropping Pattern	2	11.89 ns
Subplot Error	16	7.43

ns and * indicate non-significant and significant at 5% level, respectively

بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در خصوص اثر تیمارهای مختلف شامل خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت بر هدایت هیدرولیکی اشباعدر ستون‌های خاک دست‌نخورده نشان داد که در اثر برهم‌کنش سه‌گانه خاک‌ورزی × گیاه پوششی × الگوی کشت، تیمار مربوط به خاک‌ورزی حداقل همراه با خلر و کشت مخلوط ۵۰ درصد، بالاترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع را در مقایسه با سایر تیمارها ایجاد کرده است. این افزایش در قیاس با دو تیمار خاک‌ورزی حداقل بدون گیاه پوششی با کشت خالص کدو و خاک‌ورزی مرسوم بدون گیاه پوششی با کشت خالص کدو، از نظر آماری معنی‌دار گزارش شد (شکل ۵).

به‌طورکلی، هدایت هیدرولیکی شاخصی از توانایی خاک در انتقال آب محسوب می‌شود و افزایش مقدار آن بیانگر بهبود ظرفیت انتقال آب در محیط خاک است (Abbasi, 2014). این ویژگی از جمله پارامترهای بسیار متغیر در خاک به‌شمار می‌آید، به‌طوری‌که دامنه تغییرات آن می‌تواند بین ۵۰ تا ۲۰۰ درصد و حتی بیشتر نیز گزارش شود (Nielsen *et al.*, 1973). پیرس و همکاران (Pires *et al.*, 2024) نیز گزارش کردند که نمونه‌های مربوط به خاک‌ورزی کاهش‌یافته در مقایسه با جنگل ثانویه از ساختمان مناسبی برخوردار بودند. طبق گزارش مدیروس و همکاران (Medeiros *et al.*, 2023)، عملیات شخم‌زنی با به‌هم‌زدن ساختار فیزیکی خاک، زمینه‌ساز از دست رفتن کربن آلی از بستر خاک می‌گردد. این پدیده به نوبه‌ی خود، استحکام خاکدانه‌ها را در برابر عوامل تخریب‌کننده به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (Yin *et al.*, 2018). کاهش استحکام خاکدانه‌ها موجب کاهش هدایت هیدرولیکی در خاکورزی مرسوم می‌گردد. بنابراین، خاک‌ورزی کاهش‌یافته می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد حفاظتی مناسب برای حفظ کیفیت ساختار فیزیکی خاک در نظر گرفته شود.

نتایج مقایسه بین خاک‌های مورد مطالعه حاکی از آن بود که در تیمار خلر-کشت مخلوط ۵۰ درصد (نتایج گزارش نشده)، افزایش قابل توجه ماده آلی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک ایفا کرده است. این بهبود عمدتاً از طریق تقویت فرآیندهای تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها (نتایج گزارش نشده) صورت گرفته و در نهایت منجر به ارتقای کیفیت ساختمان خاک در این تیمار شده است؛ پیامد مستقیم این تغییرات ساختمان، افزایش هدایت هیدرولیکی در خاک مذکور بوده است.

به‌عبارت‌دیگر، تجمع بیشتر مواد آلی در خاک نه‌تنها موجب درشت‌تر شدن واحدهای ساختمانی خاک می‌شود، بلکه با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و تقویت پایداری آن‌ها، شرایطی را فراهم می‌آورد که شبکه خلل و فرج خاک

توسعه‌یافته‌تر و کارآمدتر عمل کند. این تغییرات در مقیاس ریزساختاری، نقش مهمی در بهبود انتقال آب در محیط خاک دارند. در همین راستا، گزارش شده است که ماده آلی از طریق بهبود آرایش و سازمان‌یافتگی ذرات خاک (Gao *et al.*, 2017) و همچنین افزایش میزان تخلخل مؤثر، بستر مناسبی برای تسهیل حرکت آب فراهم کرده و در نتیجه باعث افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع می‌شود (Nemes *et al.*, 2005).

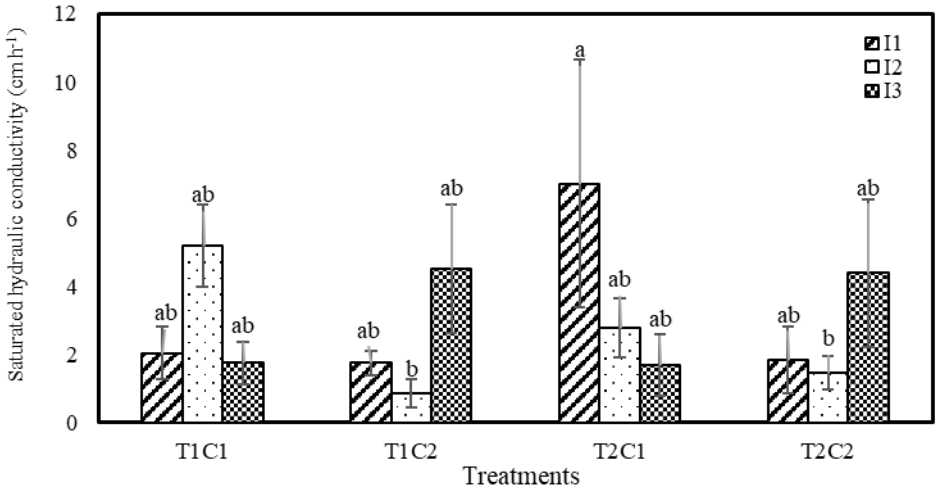


Fig. 4. Results of the three-way interaction effect of tillage × cover crop × cropping pattern on saturated hydraulic conductivity. In this figure, treatments T1 and T2 represent conventional (moldboard plow) and minimum (chisel) tillage, respectively. Likewise, C1 and C2 correspond to the cover crop *Lathyrus sativus* (grass pea) and the control treatment, respectively, while I1, I2, and I3 denote 50% intercropping, sole summer squash cultivation, and sole green bean cultivation, respectively. The symbol TC indicates the interaction effect between tillage and cover crop treatments. Columns sharing the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's multiple range test. Furthermore, the vertical bars on each column represent data variability expressed as standard deviation

تأثیر فاکتورهای خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت بر جرم کلرید خروجی در حجم‌های آب منفذی (PV) ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ٤ تحت شرایط اشباع

نتایج حاصل از تحلیل واریانس داده‌ها بیانگر آن بود که اثرات اصلی تیمارها در سطوح مختلف حجم آب منفذی (PV) رفتارهای متفاوتی از نظر معنی‌داری آماری نشان دادند. به‌طوری‌که اثر مستقل عامل خاک‌ورزی در سطح احتمال ۵ درصد تنها در PV برابر با ۰/۵ بر جرم کلرید خروجی (mg) معنی‌دار بود. در مقابل، عامل گیاه پوششی تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد در PV های ۱ و ۱/۵ نشان داد و همچنین در سطح ۵ درصد در PV های ۰/۵ و ۲ نیز اثر آن معنی‌دار ارزیابی گردید. از سوی دیگر، عامل الگوی کشت بیشترین گستره تأثیرگذاری را نشان داد؛ به‌گونه‌ای که در سطح احتمال ۱ درصد در PV های ۱، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ و در سطح ۵ درصد در PV ۱/۵، اثر آن بر جرم کلرید خروجی معنی‌دار بود. بررسی اثرات متقابل دوگانه نشان داد که برهم‌کنش بین خاک‌ورزی و گیاه پوششی در سطح ۵ درصد در PV های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ دارای اثر معنی‌دار است. همچنین، اثر متقابل گیاه پوششی و الگوی کشت نیز در سطح ۵ درصد در PV های ۲/۵ و ۳ معنی‌دار گزارش شد. با این حال، برهم‌کنش بین خاک‌ورزی و الگوی کشت، و نیز اثر متقابل سه‌گانه خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت، هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر جرم کلرید خروجی (mg) نشان ندادند (**Error! Reference source not found.**).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها بر پایه آزمون دانکن نشان داد که الگوی کشت تأثیر قابل توجهی بر مقدار جرم کلرید خروجی در حجم‌های آب منفذی ۱، ۱/۵، ۲ و ۳/۵ دارد. به‌گونه‌ای که تیمار کشت مخلوط ۵۰ درصد در اغلب این سطوح، موجب افزایش معنی‌دار جرم کلرید خروجی نسبت به تیمارهای کشت خالص کدو و کشت خالص لوبیا گردید؛ هرچند در حجم‌های آب منفذی ۱ و ۱/۵، اختلاف بین کشت مخلوط ۵۰ درصد و کشت خالص لوبیا از نظر آماری معنی‌دار

نبود (**Error! Reference source not found.**).

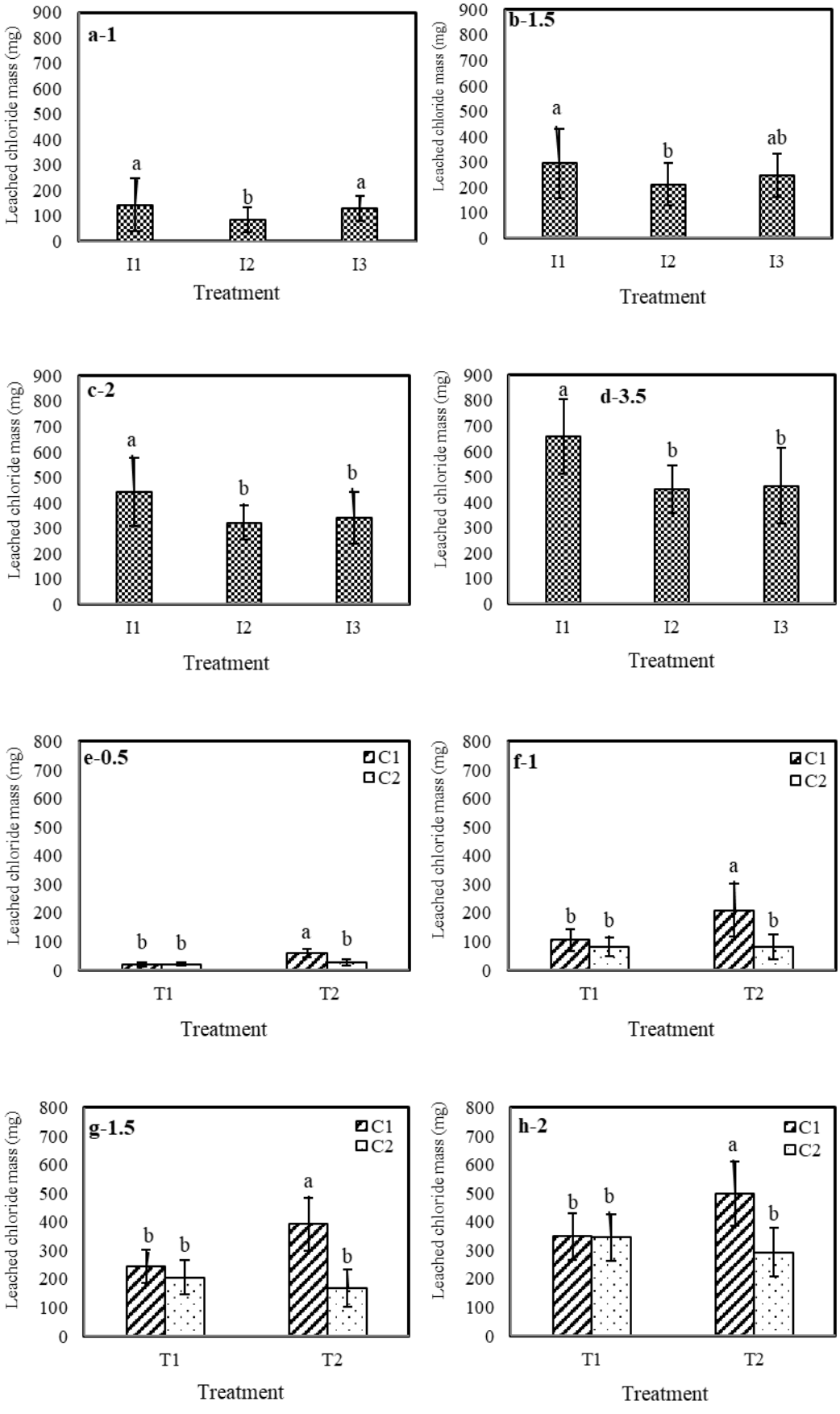
این رفتار را می‌توان به مقدار بیشتر ماده آلی در تیمار کشت مخلوط ۵۰ درصد نسبت داد؛ عاملی که از طریق بهبود پایداری ساختمان خاک (Gao *et al.*, 2017) و افزایش میزان پیوستگی شبکه منافذ، شرایط را برای تسهیل جابه‌جایی املاح در خاک فراهم می‌کند. در نتیجه، انتقال کلرید در این تیمار با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. این در حالی است که ماده آلی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر در تشکیل خاک‌دانه‌ها و افزایش پایداری آن‌ها شناخته می‌شود (Angers, 1998). پیرس و همکاران (Pires *et al.*, 2024) نیز گزارش کردند که ساختمان منافذ نقش اساسی در جریان سیالات و انتقال مواد محلول در خاک ایفا می‌کند. حشمتی و همکاران (Heshmati *et al.*, 2025) نیز نتیجه‌گیری کردند که استفاده از خاکورزی حفاظتی توأم با حفظ پسماندهای گیاهی روی سطح زمین، توانسته است به میزان معنی‌داری مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک – یعنی مقدار کربن آلی، وزن مخصوص ظاهری و نسبت خاکدانه‌های درشت – را ارتقا دهد. آن‌ها، روش بی‌خاکورزی (کشت مستقیم) همراه با نگهداشت یک‌سوم از بقایای گیاهی (معادل ۳۳ درصد) را به‌عنوان برترین گزینه‌ی شخم برای شرایط کشت دیم معرفی کردند. بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2024) نیز گزارش کردند که خاکورزی حفاظتی و گیاهان پوششی ماشک و خلر باعث کاهش قابلیت تراکم خاک و بهبود شرایط فیزیکی و مکانیکی خاک شدند. بنابراین الگوی کشت با تاثیرگذاری بر ساختار منافذ خاک، انتقال املاح را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

بررسی نتایج مربوط به اثر متقابل دوگانه خاک‌ورزی × گیاه پوششی در حجم‌های آب منفذی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ نشان داد که تیمار خاک‌ورزی حداقل همراه با خلر، بیشترین مقدار جرم کلرید خروجی (mg) را در مقایسه با سایر تیمارهای این بخش ایجاد کرده و این افزایش از نظر آماری معنی‌دار بوده است (**Error! Reference source not found.**). توجیه این رفتار را می‌توان در ویژگی‌های ساختمان خاک تحت این تیمار جستجو کرد؛ به‌طوری‌که در شرایط خاک‌ورزی حداقل همراه با گیاه پوششی خلر، تعداد منافذ درشت افزایش یافته و این منافذ از پیوستگی بیشتری برخوردارند. علاوه‌براین، پایداری این شبکه منفذی در طول فرآیند عبور آب نسبت به سایر تیمارها بیشتر است. چنین ساختمانی موجب تسهیل حرکت محلول در خاک شده و در نهایت به افزایش انتقال کلرید در حجم‌های آب منفذی مذکور منجر می‌گردد. چراکه کاربرد روش‌های حفاظتی دارای مزایای متعددی است که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش حاصلخیزی خاک، کاهش فرسایش، بهبود نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره‌سازی آب در خاک اشاره نمود (Telles *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021). تأثیر سامانه‌های گوناگون خاک‌ورزی، همراه با کاربرد بقایای گیاهی از منابع مختلف شامل ماشک علوفه‌ای، چغندر، و ترکیب چغندر با ماشک علوفه‌ای – که همگی پس از کشت محصولات اصلی (ذرت و گندم) در زمین باقی ماندند – بر ویژگی‌های خاک توسط اردل و باریک (Erdel and Barik, 2023) مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های این گروه نشان داد که به‌کارگیری گیاهان پوششی در کنار سامانه کشت مستقیم (بدون شخم)، نقش چشمگیری در اصلاح شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک داشته و می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر در جهت بهبود ساختمان خاک و ارتقای کیفیت آن در سرزمین‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مدنظر قرار گیرد. به‌گزارش آنان، استفاده از پسماندهای گیاهی همراه با روش‌های خاکورزی حفاظتی، به افزایش معنی‌دار ماده آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها و فسفر قابل جذب برای گیاه انجامید (Erdel and Barik, 2023).

Table 2. Analysis of variance (ANOVA) for the effects of tillage, cover crop, and cropping pattern on chloride mass leached from soil columns at different pore volumes (PV) under saturated flow conditions.

Source of Variation	df	PV0.5	PV1	PV1.5	PV2	PV2.5	PV3	PV3.5	PV4
				Mean Squares					
Replication	2	58 ns	815 ns	2109 ns	2037 ns	2247 ns	3374 ns	7279 ns	8391 ns
Tillage	1	3487 *	15760 ns	14588 ns	12025 ns	31372 ns	54501 ns	65141 ns	39394 ns
Cover Crop	1	2070 *	43361 **	131002 **	84994 *	41959 ns	35545 ns	28860 ns	19791 ns
Tillage × Cover Crop	1	2092 *	18011 *	59810 *	71119 *	38210 ns	21012 ns	7818 ns	38125 ns
Main Plot Error	6	335	3226	6052	8909	16503	27529	36331	41031
Cropping Pattern	2	1226 ns	12523 **	18001 *	33704 **	73181 **	103708 **	121948 **	73456 ns
Tillage × Cropping Pattern	2	516 ns	2213 ns	278 ns	1280 ns	778 ns	1187 ns	2092 ns	1411 ns
Cover Crop × Cropping Pattern	2	65 ns	3629 ns	5864 ns	15392 ns	18640 *	25449 *	28570 ns	15755 ns
Tillage × Cover Crop × Cropping Pattern	2	315 ns	5244 ns	5972 ns	8749 ns	5744 ns	4311 ns	2974 ns	5727 ns
Subplot Error	16	398	1476	2811	3988	4604	6307	8460	15854

ns, * and ** indicate non-significant, significant at 5%, and significant at 1% levels, respectively.


a-1
b-1.5
c-2
d-3.5
e-0.5
f-1
g-1.5
h-2
Leached chloride mass (mg)
Treatment
I1
I2
I3
T1
T2
C1
C2

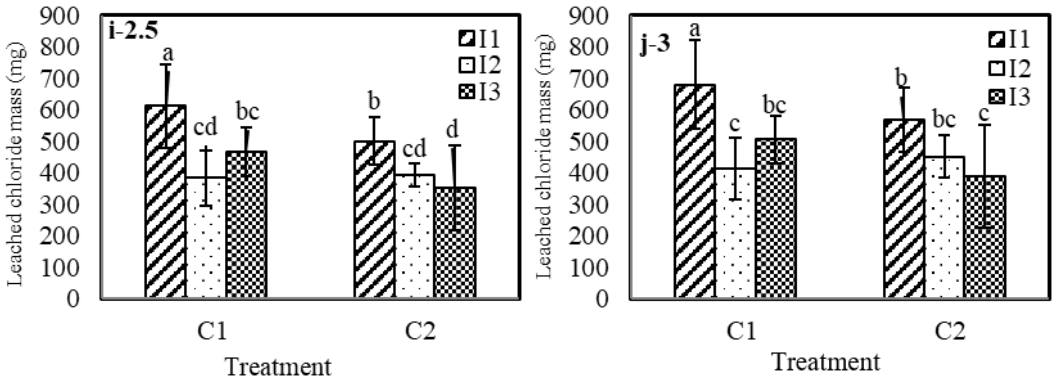


Fig. 5. Comparison of the effect of cropping pattern on the mass of chloride in the effluent Aat different pore volumes (PV): (a) 1, (b) 1.5, (c) 2, and (d) 3.5. Comparison of the two-way interaction effect of tillage × cover crop on chloride mass in the effluent (mg) at PV: (e) 0.5, (f) 1, (g) 1.5, and (h) 2. Comparison of the two-way interaction effect of cover crop × cropping pattern on chloride mass in the effluent (mg) at PV: (i) 2.5 and (j) 3. Treatments T1 and T2 represent conventional (moldboard plow) and minimum (chisel) tillage, respectively. Likewise, C1 and C2 correspond to the cover crop *Lathyrus sativus* (grass pea) and the control treatment, respectively, while I1, I2, and I3 denote 50% intercropping, sole summer squash cultivation, and sole green bean cultivation, respectively. Columns sharing the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's multiple range test. Furthermore, vertical bars on each column indicate data variability expressed as standard deviation

مواد آلی حاصل از کشت گیاه پوششی خلر با ایجاد تغییرات در ساختار فیزیکی خاک، به‌ویژه از طریق افزایش سهم تخلخل‌های درشت، موجب گسترش حجم آب قابل تحرک در محیط خاک می‌شوند. این تغییرات ساختاری شرایطی را فراهم می‌آورد که جریان توده‌ای با کارایی بیشتری انجام شده و در نتیجه، انتقال املاح در خاک با سرعت بیشتری صورت گیرد (Angulo-Jaramillo *et al.*, 1996). همچنین، تأثیر سیستم‌های مختلف مدیریت خاک بر هندسه منافذ، که نقش اصلی را در انتقال املاح بر عهده دارند، توسط محققان دیگری نیز مورد تایید قرار گرفته است (Farahani *et al.*, 2022; Müller *et al.*, 2018).

پیترسن و همکاران (Petersen *et al.*, 2001) افزایش سرعت نسبی جابه‌جایی برمید در ستون‌های خاک با خاک‌ورزی صفر یا حداقل را به توسعه بیشتر منافذ درشت و تداوم و پیوستگی بالاتر این منافذ نسبت دادند. در مقابل، خاک‌ورزی متداول معمولاً از طریق اعمال تنش‌های مکانیکی مستقیم یا به‌طور غیرمستقیم با کاهش کربن آلی، موجب تخریب ساختمان خاک‌دانه‌ها می‌شود (Kay, 1990). این در حالی است که در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی، به‌دلیل کاهش شدت دستکاری خاک و همچنین افزایش ورودی مواد آلی ناشی از باقی‌ماندن بقایای گیاه پوششی خلر در سطح خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد (Paustian *et al.*, 1997). نائل و همکاران (Nael *et al.*, 2023) نیز گزارش کردند که گیاهان پوششی باعث افزایش ماده آلی خاک می‌گردند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که سیستم کم خاکورزی با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و تجمع بقایای گیاهی باعث افزایش مواد آلی در خاک شده و ویژگی‌های کیفی خاک را بهبود داد. قربی و همکاران (Ghorbi *et al.*, 2024) نیز گزارش کردند که گیاه پوششی باقلا موجب کاهش اثرات منفی تنش کم آبی از طریق رهاسازی نیتروژن می‌گردد.

بررسی نتایج مربوط به اثر متقابل دوگانه گیاه پوششی × الگوی کشت در حجم‌های آب منفذی ۲/۵ و ۳ نشان داد که تیمار خلر–کشت مخلوط ۵۰ درصد، بیشترین مقدار جرم کلرید خروجی (mg) را در مقایسه با سایر تیمارها ایجاد کرده و این افزایش از نظر آماری معنی‌دار بوده است (شکل ۵). همچنین، در حجم آب خروجی ۲/۵، تیمار بدون گیاه پوششی–کشت مخلوط ۵۰ درصد نسبت به تیمارهای خلر–کدوی خالص، بدون گیاه پوششی–کدوی خالص و بدون گیاه پوششی–لوبیای خالص، افزایش معنی‌داری در جرم کلرید خروجی نشان داد. در همین راستا، در حجم آب خروجی ۳ نیز همین تیمار در مقایسه با تیمارهای خلر–کدوی خالص و

بدون گیاه پوششی-لوبیای خالص، منجر به افزایش معنی‌دار خروج کلرید شد.

از نظر مکانیزمی، مواد آلی با تولید ترکیبات چسبنده و دارا بودن بارهای منفی، موجب تجمع و اتصال ذرات ریز خاک شده و از این طریق تشکیل خاک‌دانه‌های درشت‌تر را تسهیل می‌کنند. این فرآیند به افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها، توسعه تخلخل و در نهایت بهبود وضعیت فیزیکی خاک منجر می‌شود (Gao *et al.*, 2017; Hernando *et al.*, 1989). در نتیجه، حضور مواد آلی بیشتر در تیمارهای خلر و کشت مخلوط ۵۰ درصد، علاوه بر ارتقای کیفیت خاک، با افزایش بارهای منفی وابسته به pH ، شرایطی را فراهم می‌آورد که دفع و خروج آنیون کلرید با شدت بیشتری انجام گیرد.

در پژوهشی که توسط ژائو و همکاران (Zhou *et al.*, 2020) انجام شد، اثر انواع الگوهای کشت بر پایداری ساختار خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از تناوب‌هایی مانند ذرت–سویا و ذرت–آیش در مقایسه با کشت پیوسته ذرت، موجب بهبود معنی‌دار ویژگی‌هایی نظیر میانگین وزنی و قطر هندسی خاکدانه‌ها و همچنین افزایش سهم خاکدانه‌های پایدار در آب می‌شود؛ افزون بر این، این سیستم‌ها باعث کاهش میزان تخریب خاکدانه‌ها نیز می‌گردند. قیان و همکاران (Qian *et al.*, 2024) نیز گزارش کردند که در مقایسه با کشت مداوم ذرت، کشت مداوم سویا موجب افزایش تخلخل حاصل از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس همراه با ایجاد بیوپورهای بزرگ‌تر شد. بنابراین الگوی کشت هندسه منافذ و انتقال کلرید در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

تأثیر فاکتورهای خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت بر منحنی رخنه کلرید در شرایط اشباع

شکل ٦ نمایانگر منحنی‌های رخنه کلرید تحت تأثیر تیمارهای مختلف خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت (بر اساس میانگین سه تکرار) در شرایط اشباع رطوبتی است. مفهوم این منحنی‌ها بر این اساس استوار است که در صورت ورود محلولی با غلظت اولیه C_0 به یک ستون خاک، می‌توان تعیین کرد که پس از عبور چه حجمی از آب، غلظت محلول خروجی (C) به مقدار C_0 خواهد رسید (Abbasi, 2014). در مطالعات تجربی، جین و همکاران (Jin 2004) با استفاده از ردیاب برمید لیتیوم، حرکت آلاینده‌ها را در شرایط اشباع و غیر اشباع در ستون‌های خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که این ردیاب با سرعت بالایی در خاک حرکت کرده و این موضوع با ظهور یک پیک تیز در منحنی غلظت برمید نمایان شد. در میان آنیون‌های مختلف، کلرید به‌دلیل تحرک بالا، قابلیت آبشویی سریع و عدم مشارکت در واکنش‌های شیمیایی و زیستی، به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین ردیاب‌ها برای بررسی انتقال نمک‌ها در خاک شناخته می‌شود.

بررسی منحنی‌های رخنه در شرایط اشباع نشان می‌دهد که در تیمار خاک‌ورزی حداقل همراه با خلر و کشت مخلوط ۵۰ درصد، رفتار انتقال کلرید نسبت به سایر تیمارها متمایز بود. در این تیمار، بیشینه غلظت نسبی کلرید خروجی در حدود PV برابر با ۰/۹ ثبت شد که مقدار آن به ۰/۸۵ رسید و از نظر مقدار، بالاتر از سایر تیمارها بود. همچنین، روند تغییرات منحنی رخنه از ابتدای PV صفر آغاز شده و در حدود PV برابر با ٤/۵ به حالت تکمیل‌شده رسید (**Error! Reference source not found.**-A-sat). پیش‌رس بودن خروج کلرید در این شرایط را می‌توان علاوه بر ویژگی‌های ساختمان خاک، به پدیده دفع آنیونی نیز نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که بارهای منفی ناشی از مواد آلی حاصل از گیاه پوششی خلر و کشت مخلوط، سبب رانده‌شدن یون کلرید از سطوح ذرات خاک شده و آن را به سمت نواحی مرکزی منافذ هدایت می‌کنند، جایی که انتقال با سرعت بیشتری انجام می‌شود. از سوی دیگر، ضریب تأخیر برای یون کلرید برابر با یک در نظر گرفته می‌شود، زیرا این یون به‌عنوان یک ردیاب غیرواکنشی، در فرآیندهای جذب، تبادل و رسوب‌گذاری دخالتی ندارد.

با این‌حال، عدم دستیابی نسبت غلظت خروجی به مقدار واحد ($C/C_0 = 1$) را می‌توان ناشی از به‌دام افتادن بخشی از یون‌های کلرید در منافذ بسته یا کم‌دسترس دانست. همچنین، شیب تند منحنی در حوالی PV برابر با ۰/٦ بیانگر آن است که انتقال املاح عمدتاً تحت تأثیر جریان توده‌ای انجام شده و نقش فرآیندهای پخش و انتشار در این شرایط بسیار محدود بوده است. این الگوی رفتاری را می‌توان به تأثیر سیستم خاک‌ورزی حداقل بر تشدید آبشویی املاح نسبت داد.

در شرایط اشباع، رفتار منحنی رخنه در تیمار خاک‌ورزی مرسوم–خلر–کشت مخلوط ۵۰ درصد نشان‌دهنده دینامیک

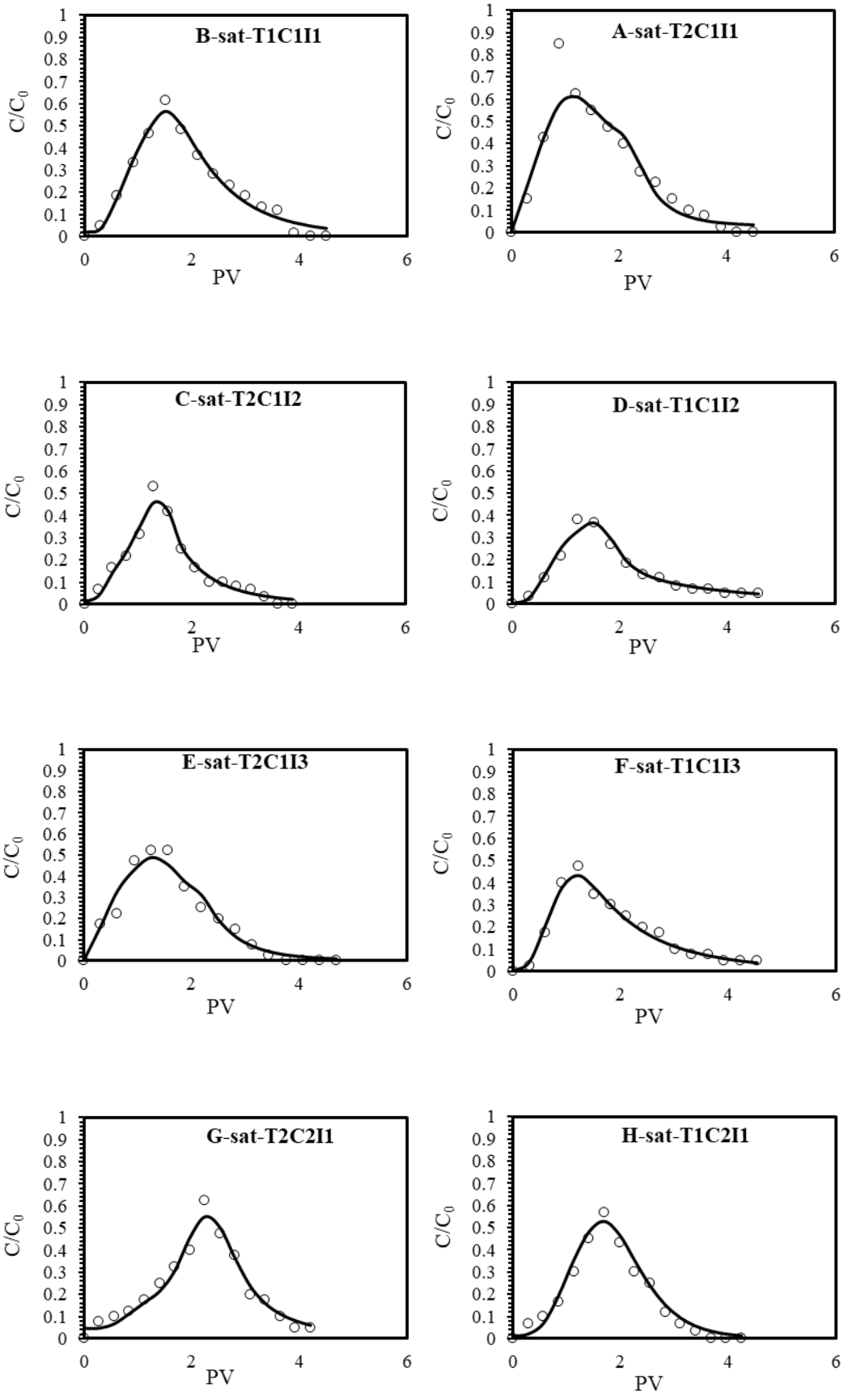
متفاوتی از انتقال کلرید در مقایسه با سایر تیمارها است. اوج منحنی در این تیمار در حدود PV برابر با ۱/۵ رخ داده و مقدار بیشینه غلظت نسبی (C/C_0) معادل ۰/۶۲ در این نقطه ثبت شده است. شروع منحنی از PV صفر و رسیدن آن به حالت پایدار در حدود PV ۴/۵ (**Error! Reference source not found.**-B-sat)، بیانگر یک فرآیند انتقال تدریجی‌تر نسبت به تیمار خاک‌ورزی حداقل است.

مقایسه این تیمار با حالت خاک‌ورزی حداقل–خلر–کشت مخلوط ۵۰ درصد نشان می‌دهد که نوع خاک‌ورزی نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل رژیم جریان و الگوی انتقال املاح ایفا می‌کند. در شرایط خاک‌ورزی حداقل، افزایش پیوستگی منافذ درشت و شکل‌گیری مسیرهای جریان ترجیحی، منجر به کاهش زمان اقامت محلول و افزایش سهم جریان توده‌ای می‌شود. این موضوع در قالب جابه‌جایی سریع‌تر جبهه رخنه و ثبت مقادیر بالاتر C/C_0 در حجم‌های آب منفذی پایین‌تر (برای مثال PV ۰/۹) نمایان می‌شود، به‌طوری‌که اختلاف قابل توجهی بین دو تیمار خاک‌ورزی حداقل و مرسوم مشاهده می‌گردد (۰/۸۵ در برابر ۰/۳۳) (**Error! Reference source not found.**-A-sat و B-sat). هرچند واله و همکاران (Vuaille *et al.*, 2024) گزارش کردند که نشت آفت‌کش‌ها به زهکش‌ها از نظر سیستماتیک بین کشاورزی حفاظتی و شخم مرسوم تفاوت معنی‌داری نداشت. ولی مالچ و پوشش گیاهی موجب تسریع تجزیه آفت‌کش‌ها گردید. زنگنه بیغش و همکاران (Zangeneh *et al.*, 2018) با مطالعه تاثیر روش‌های خاکورزی و گیاه پوششی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک نتیجه‌گیری کردند که خاک‌ورزی حفاظتی و کاربرد گیاه پوششی، از میان مجموعه راهکارهای مدیریتی که با هدف بهسازی ساختار فیزیکی خاک به‌کار گرفته شدند، بیش از سایرین در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بالا بردن مقاومت کششی آن‌ها نقش تعیین‌کننده داشتند.

از منظر فیزیک خاک، تأخیر در رسیدن به اوج منحنی در تیمار خاک‌ورزی مرسوم بیانگر افزایش سهم فرآیندهای پخش و انتشار و کاهش کارایی مسیرهای جریان سریع است. خاک‌ورزی مرسوم با برهم‌زدن ساختمان خاک و کاهش پیوستگی منافذ درشت، موجب افزایش ناهمگنی موضعی و کاهش پیوستگی شبکه منفذی می‌شود که در نهایت به کاهش شدت جریان ترجیحی و افزایش زمان اختلاط محلول منجر می‌گردد.

از سوی دیگر، نقش مواد آلی در هر دو تیمار، به‌ویژه در حضور گیاه پوششی خلر و کشت مخلوط، در تنظیم رفتار الکتروشیمیایی و ساختمانی خاک قابل توجه است. سهم عمده مواد آلی در ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه خاک، همراه با ماهیت بار متغیر آن‌ها، شرایطی را فراهم می‌آورد که در pH های بالاتر از نقطه با بار صفر (حدود ۳)، بار منفی غالب شده و فرآیند دفع آنیونی تشدید گردد (Abbasi, 2014). این افزایش بار منفی ناشی از تفکیک گروه‌های عاملی، منجر به رانده‌شدن یون‌های کلرید از سطوح جامد و هدایت آن‌ها به نواحی با سرعت جریان بالاتر (مرکز منافذ) می‌شود.

در مجموع، برهم‌کنش بین ساختار منفذی، ویژگی‌های هیدرولیکی و رفتار الکتروشیمیایی خاک تعیین‌کننده شکل و موقعیت منحنی رخنه است. در این چارچوب، تیمار خاک‌ورزی حداقل با ایجاد شرایط مناسب برای توسعه جریان ترجیحی و کاهش تخریب خاکدانه‌ها، انتقال سریع‌تر و کارآمدتر کلرید را تسهیل می‌کند، در حالی‌که خاک‌ورزی مرسوم با تضعیف این مسیرها، انتقال را کندتر و توزیع غلظت را یکنواخت‌تر می‌سازد. همچنین، منحنی‌های رخنه سایر تیمارها در شرایط اشباع در شکل‌های ۶- C-sat تا L-sat ارائه شده‌اند که الگوهای متفاوتی از برهم‌کنش این عوامل را نشان می‌دهند.


B-sat-T1C1I1
A-sat-T2C1I1
C-sat-T2C1I2
D-sat-T1C1I2
E-sat-T2C1I3
F-sat-T1C1I3
G-sat-T2C2I1
H-sat-T1C2I1
C/C0
PV

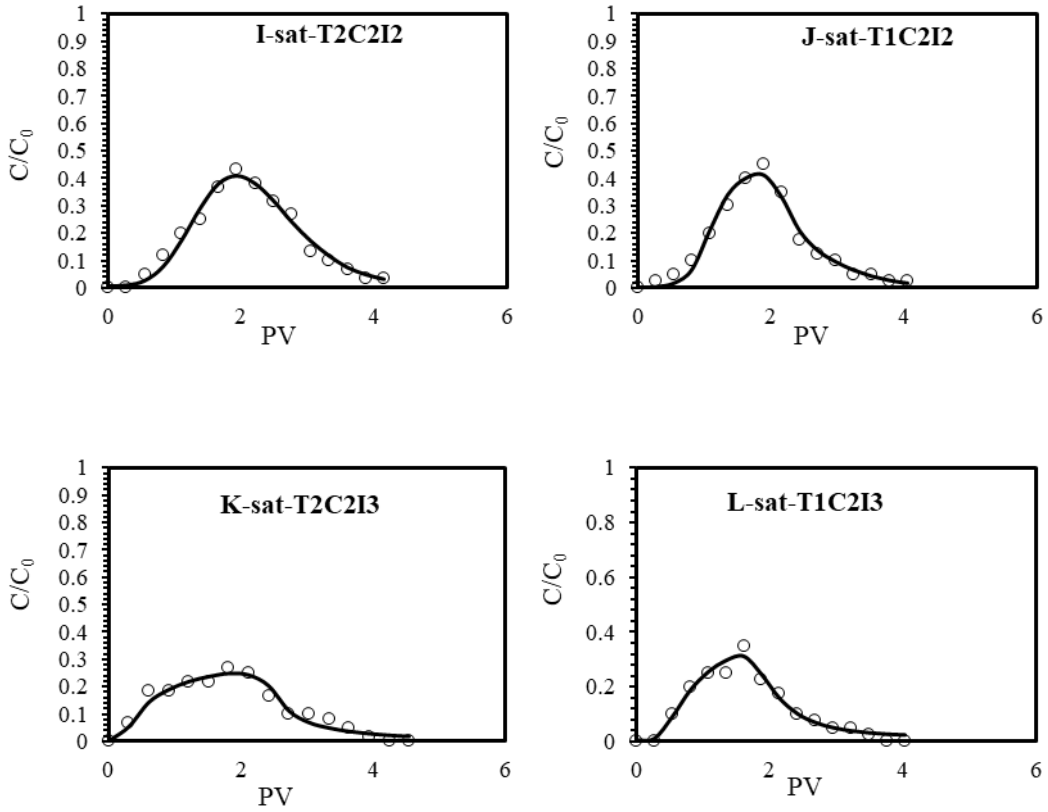


Fig. 6. Chloride breakthrough curves under saturated conditions. T1 and T2 represent conventional (moldboard plow) and minimum (chisel) tillage, respectively. C1 and C2 denote the cover crop *Lathyrus sativus* (grass pea) and the control treatment, respectively. I1, I2, and I3 correspond to 50% intercropping, sole summer squash cultivation, and sole green bean cultivation, respectively

به‌طورکلی، الگوی منحنی‌های رخنه در شرایط اشباع نشان داد که در تمامی سطوح الگوی کشت، تیمارهای دارای گیاه پوششی خلر (در هر دو سیستم خاک‌ورزی حداقل و مرسوم) نسبت به تیمارهای فاقد گیاه پوششی، با پیشروی سریع‌تر جبهه رخنه و وقوع زودهنگام خروج کلرید همراه بوده‌اند (**Error! Reference source not found.**–A-sat تا F-sat و G-sat تا L-sat). این تفاوت رفتاری را می‌توان به تغییرات بنیادین در ساختار فضایی شبکه منفذی و بهبود کیفیت ساختمان خاک در حضور گیاه پوششی نسبت داد.

افزایش ورودی ماده آلی ناشی از خلر، با تقویت فرآیندهای خاک‌دانه‌سازی و ایجاد پیوستگی بیشتر میان منافذ درشت، منجر به شکل‌گیری مسیرهای انتقال کارآمدتر برای جریان محلول شده است. در چنین شرایطی، سهم جریان همرفتی (توده‌ای) در انتقال املاح افزایش یافته و در نتیجه، جابه‌جایی آنیون کلرید با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد. این امر به‌صورت جابه‌جایی زودتر منحنی رخنه به سمت مقادیر کمتر PV و افزایش شیب بخش ابتدایی منحنی قابل‌مشاهده است.

از منظر فرآیندهای شیمیایی، افزودن مواد آلی به خاک و تجزیه تدریجی آن‌ها، منجر به تولید اسید کربنیک و سایر اسیدهای آلی شده و در نتیجه pH خاک را کاهش می‌دهد (Hervas *et al.*, 1989). این تغییرات شیمیایی، همراه با افزایش سطح ویژه و فعالیت کلوئیدهای آلی، شرایط مناسبی را برای بهبود تجمع ذرات خاک فراهم می‌کند. در همین راستا، گزارش شده است که افزایش ماده آلی باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها می‌شود و این امر به ارتقای پایداری خاک‌دانه‌ها و تقویت ساختمان خاک منجر می‌گردد. کیانی و همکاران (Kiani *et al.*, 2025) با اجرای تیمارهای خاکورزی در طی ٤ سال، گزارش کردند که تیمارهای بدون خاکورزی و کم خاکورزی موجب افزایش نیتروژن کل و ماده آلی خاک بعد از ٤ سال شدند. یعنی تیمارهای حفاظتی تلفات نیتروژن خاک را کاهش می‌دهند. همچنین کیانی و همکاران (Kiani *et al.*, 2025) نتیجه‌گیری کردند که برای مشخص شدن اثر تیمارهای

خاکورزی نیاز به زمان بیشتری می‌باشد. چراکه، جنبه‌های قابل توجهی از فعل و انفعالات خاک، گیاه و آب وجود دارد که اکنون قابل تشخیص نبوده و احتمالا با گذر زمان مشخص خواهند شد. آن‌ها همچنین نتیجه‌گیری کردند که عوامل زیادی مانند مقدار تخریب خاک در گذشته، در دسترس بودن نهاده های تولید، مکانیزاسیون کشاورزی، شرایط کشاورزی، پایگاه دانش کشاورز و سامانه های پشتیبانی، می‌توانند نحوه اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر خاک را تحت تاثیر قرار دهند.

در مجموع، برآیند این تغییرات فیزیکی و شیمیایی، در گذر زمان، به افزایش هدایت هیدرولیکی خاک و در پی آن تشدید فرآیند آبشویی املاح، به‌ویژه کلرید، منجر شده است. این نتایج بیانگر آن است که حضور گیاه پوششی، از طریق اثرگذاری همزمان بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، می‌تواند رژیم انتقال املاح را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد.

٤. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط اشباع، هدایت هیدرولیکی اشباع و الگوی انتقال و آبشویی کلرید در ستون‌های خاک دست‌نخورده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهم‌کنش عوامل مدیریتی شامل خاک‌ورزی، گیاه پوششی و الگوی کشت قرار می‌گیرد. در این میان، تیمار خاک‌ورزی حداقل–خلر–کشت مخلوط ۵۰ درصد، بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع، جرم کلرید خروجی و بالاترین غلظت نسبی را در مقایسه با سایر تیمارها به خود اختصاص داد. این رفتار را می‌توان به بهبود ساختمان خاک، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و توسعه شبکه‌ای پیوسته از منافذ درشت نسبت داد، که خود ناشی از افزایش ماده آلی در اثر حضور گیاه پوششی (خلر) و الگوی کشت مخلوط است. منافذ درشت و پیوسته از یک‌سو هدایت هیدرولیکی اشباع را افزایش داده و از سوی دیگر انتقال همرفتی را تسهیل کرده و زمان اقامت محلول را کاهش می‌دهد. خاک‌ورزی کاهش‌یافته به‌عنوان راهبردی مؤثر در حفظ کیفیت فیزیکی خاک و جلوگیری از کاهش هدایت هیدرولیکی می‌باشد. در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با تخریب ساختمان خاک و کاهش کربن آلی، باعث افت هدایت هیدرولیکی اشباع می‌شود. همچنین، به‌طور کلی، ترکیب خاک‌ورزی حداقل با گیاه پوششی خلر، با ایجاد تغییرات همزمان در ویژگی‌های ساختمانی و هیدرودینامیکی خاک، نقش کلیدی در تشدید انتقال کلرید ایفا می‌کند. از این‌رو، در شرایطی که کنترل شوری یا مدیریت آبشویی املاح مدنظر است، انتخاب چنین راهبردهایی می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی عملکرد خاک ایفا کند. در نهایت، ترکیب گیاه پوششی مناسب با الگوی کشت مخلوط و خاک‌ورزی حداقل، مؤثرترین راهکار در این مطالعه برای بهبود انتقال آب و املاح در خاک بود. با این حال، لازم است در کاربرد عملی این سیستم‌ها، ملاحظات مربوط به احتمال افزایش آبشویی عناصر غذایی نیز در نظر گرفته شود. بررسی اثرات بلندمدت این تیمارها بر پویایی کربن آلی خاک، تغییرات ساختار منفذی و پایداری هیدرولیکی از محورهای پیشنهادی برای تحقیقات آینده است. علاوه بر این، تعمیم نتایج به شرایط مزرعه‌ای و ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها در مقیاس‌های زمانی و مکانی گسترده‌تر، می‌تواند به توسعه راهبردهای مدیریتی پایدار کمک کند.

۵. منابع

Abbasi, F. (2014). *Advanced soil physics* (Vol. 108). University of Tehran press . (In Farsi)

Angers, D. A. (1998). Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil and Tillage Research*, *47*(1), 91-96. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00077-4

Angulo-Jaramillo, R., Gaudet, J.-P., Thony, J.-L. and Vauclin, M. (1996). Measurement of Hydraulic Properties and Mobile Water Content of a Field Soil. *Soil Science Society of America Journal*, *60*(3), 710-715. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030004x

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. https://doi.org/10.30466/asr.2024.121529 (In Farsi)

Benjamin, J. G. (1993). Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. *Soil and Tillage Research*, *26*(4), 277-288. https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90001-6

Bond, W., Turner, R. and Grundy, A. . (2003). A review of non-chemical weed management". *HDRA, the Organic Organisation, Ryton Organic Gardens, Coventry, UK* .

Caron, J., Banton, O., Angers, D. A. and Villeneuve, J. P. (1996). Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. *Geoderma*, *69*(3), 175-191. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00056-9

Dashadi, M. (2025). Evaluation of chickpea nitrogen and phosphorus requirement in wheat rotation under conservation tillage systems [Research]. *crop physiology journal*, *17*(66), 5-22. http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1688-en.html

Erdel, E. and Barik, K. (2023). Effects of Different Soil Management Practices on Some Soil Properties in a Semi-Arid Region, Igdir ,Turkey. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *25*(3), 733-745. https://doi.org/10.22034/jast.25.3.733

Farahani, E., Emami, H. and Forouhar, M. (2022). Effects of tillage systems on soil organic carbon and some soil physical properties. *Land Degradation and Development*, *33*(8), 1307-1320. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.4221

Farahani, E., Emami, H., Fotovat, A., Khorassani, R. and Keller, T. (2020). Soil available water and plant growth in relation to K:Na ratio. *Geoderma*, *363*, 114173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114173

Gao, L., Becker, E., Liang, G., Houssou, A. A., Wu, H., Wu, X., Cai, D. and Degré, A. (2017). Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon .*Geoderma*, *288*, 97-104. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.005

Ghanbari-Bonjar, A. (2000). Intercropped wheat and bean as a low-input forage, . *PhD thesis. Wye College. University of London, London* .

Gholami Jami, S., and Emami, H. (2021). Effect of organic matter and potassium chloride on soil structure stability indices. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, *11*(1), 83-100. https://doi.org/10.22069/ejsms.2021.18280.1969 (In Farsi)

Ghorbani, R., M. H. Rashed Mohassel, S. A .Hosseini, S. K. Mousavi, and K. Hajmohammadian Ghalibaf. (2009). "Sustainable weed management". *Ferdowsi University of Mashhad Press,* , 924 . (In Farsi)

Ghorbi, S., Ebadi, A., Khomari, S. and Hashemi, M. (2024). The effect of faba bean (Vicia faba L.) cover crop on corn (Zea mays L.) nitrogen efficiency under water deficit stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *17*(1), 159-174. https://doi.org/10.22077/escs.2023.5560.2157 (In Farsi)

Gomez, P. and Gurevitch, J. (1998). Weed community responses in a corn-soybean intercrop. *Applied Vegetation Science*, *1*(2), 281-288. https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1478958

Hernando, S., Lobo, M. C. and Polo, A. (1989). Effect of the application of a municipal refuse compost on the physical and chemical properties of a soil. *Science of The Total Environment*, *81-82*, 589-596. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90167-8

Hervas, L., Mazuelos, C., Senesi, N. and Saiz-Jimenez, C. (1989). Chemical and physico-chemical characterization of vermicomposts and their humic acid fractions. *Science of The Total Environment*, *81-82*, 543-550. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90162-9

Heshmati, M., Gheitury, M. and Parvizi, Y. (2025). Effects of tillage practice and crop residue retention on soil organic carbon, bulk density and aggregate and erodibility. *Watershed Engineering and Management*, *17*(3), 340-355. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2025.368337.2097 (In Farsi)

Hosseinzadeh, S., Fateh, E., Aynehband, A., Farzaneh, M. and Habibi Asl, J. (2025). The Effect of Different Tillage Methods and Application of Plant Residues on Yield, Protein and Nitrogen Percentage of Triticale Plant (X Triticosecale Wittmack) and Physical and Chemical Indicators of Soil. *Water and Soil*, *38*(6), 732-713. https://doi.org/10.22067/jsw.2025.89709.1433 (In Farsi)

Jin, L., Hamilton, S. and Walter, L. (2004). Water and Solute Mass Transport in Soils Developed on glacial Drift: A Br Tracer Investigation Using Instrumented Soil Monoliths at an Agricultural Long Term Ecological Research Site (Kellogg Biological Station, Hickory Corners, Southern Michigan). *AGU Fall Meeting Abstracts*.

Jozay, M., Kazemi, F. and Fotovat, A. (2023). Performance of Frankenia thymifolia as a ground cover plant species and its effect on physicochemical characteristics of recycled substrates in four different seasons in external green wall systems. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *18*(69), 1-25. https://doi.org/10.30495/iper.2022.1960747.1808

Kay, B. D. (1990). Rates of Change of Soil Structure Under Different Cropping Systems. In B. A. Stewart (Ed.), *Advances in Soil Science 12: Volume 12* (pp. 1-52). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3316-9_1

Kiani, B., Kiani, F., Rezaee, A., Ebrahimi, P. and Mahzari, S. (2025). Investigating the temporal changes in some soil quality properties in different tillage management in agricultural lands of western Golestan province. *Agricultural Engineering*, *48*(1), -. https://doi.org/10.22055/agen.2024.48218.1748 (In Farsi)

Klute, A. and Dirksen, C. (1986). Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis* (pp. 687-734). Wiley and Sons. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28

Latifi, M., Soltani, M. and Ramezani Etedali, H. (2022). Estimation of Soil Hydraulic and Solute Transport Parameters Using HYDRUS-2D (Case Study: Qazvin Interception Drain). *Irrigation Sciences and Engineering*, *45*(1), 99-115. https://doi.org/10.22055/jise.2021.36752.1962 (In Farsi)

Liebman, and Davis. (2000). Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research*, *40*(1), 27-47. https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2000.00164.x

Mazaheri, D. (2008). "Intercropping". *(2nd Ed.). Tehran, Iran. (In Farsi)* .

McCauley, C., Legleiter, T., Herman, R., Rasoulpour, R., Schroeder, J., Pilcher, T., Meinders, K. and Wright, T. (2022). Sustainable weed management – What is it and how are we doing? *Weed Technology*, *36*(6), 768-776. https://doi.org/10.1017/wet.2022.103

Medeiros, A. d. S., Cesário, F. V. and Maia, S. M .F. (2023). Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. *Journal of Arid Environments*, *218*, 105052. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105052

Moghadas, M., Raeesi Estabragh, A., Abdolahi Baik, J., Ghaziani, F., and Vakili, A. (2019). Stabilization of clay soil by electrokinetic method with CaCl2 solution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *49*(6), 1277-1287. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018248319,667818. (In Farsi)

Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Zandsalimi, S. and Unc, A. (2009). Influence of organic waste type and soil structure on the bacterial filtration rates in unsaturated intact soil columns. *Journal of Environmental Management*, *90*(2), 730-739. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.01.009

Müller, K., Dal Ferro, N., Katuwal, S., Tregurtha, C., Zanini, F., Carmignato, S., Wollesen de Jonge, L., Moldrup, P. and Morari, F. (2018). Effect of long-term irrigation and tillage practices on X-ray CT and gas transport derived pore-network characteristics. *Soil Research*, *57*(6), 657-669. https://doi.org/10.1071/sr18210

Nael, M., Salehi, S. S., Hamzei, J., and Zandi Baghche-Maryam, M. (2023). Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components. *Water and Soil*, *36*(6), 773-785. https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78321.1195 (In Farsi)

Nemes, A., Rawls, W. J. and Pachepsky, Y. A. (2005). Influence of Organic Matter on the Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, *69*(4), 1330-1337. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0055

Nielsen, D. R., Biggar, J. W. and Erh., K. T. (1973). "Spatial variability of field measured soil water properties". *Hilgardia*, *42*(7), 215–259. https://doi.org/https://doi.org/10.3733/hilg.v42n07p215

Parvizi, Y., Gerami, Z. and Arabkhedri, M. (2024). Indicators of soil structure stability and soil permeability affected by soil management and protection operations in Rezin watershed of Kermanshah Province. *Watershed Engineering and Management*, *16*(2), 201-223. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.362440.2023 (In Farsi)

Paustian, K., Collins, H. P. and Paul, E. A. (1997). Management controls on soil carbon. In E. A. Paul, Paustian, K.H., Elliott, E.T., and Cole, C.V. (Ed.), *Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America.* (pp. 15-49.). CRC Press, . https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780367811693

Peng, J., Geng, T., Wang, Q., Zhang, C., Wang, J. and Cai, C. (2025). Responses of soil pore structure and erosion resistance to long-term cultivation in the Mollisol region of Northeast China. *CATENA*, *261*, 109520. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109520

Petersen, C .T., Jensen, H. E., Hansen, S. and Bender Koch, C. (2001). Susceptibility of a sandy loam soil to preferential flow as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, *58*(1), 81-89. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00186-0

Pires, L. F ,.Ghanbarian, B., and Lin, Q. (2024). Physical, topological and hydraulic properties of an Oxisol under conservation practices: X-ray tomography imaging and pore-network simulation. *Soil and Tillage Research*, *239*, 106055. https://doi.org/https://doi.org/10.1/۰۱٦j.still.2024.106055

Qian, Y., Yang, X., Zhang, Z., Li, X., Zheng, J. and Peng, X. (2024). Estimating the permeability of soils under different tillage practices and cropping systems: Roles of the three percolating pore radii derived from X-ray CT. *Soil and Tillage Research*, *235*, 105903. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105903

Ramezani Etedali, H., Karimi, S. and Fakhar, M. S. (2022). Simulation of mulch effect on soil moisture and salinity distribution using HYDRUS-2D and AquaCrop .*Hydrogeology*, *7*(1), 1-10. https://doi.org/10.22034/hydro.2022.12702

Samadani, B. and Montazeri., M. (2009). "The use of cover crop in sustainable agriculture". *Iranian Research Institute of Plant Protection Press*, 186 pp. (In Farsi)

Shabanpoor Shahrestani, M. (2002). "Comparison of three solute transport models using bromide as a tracer". *Journal. Soil Research, , 15*(3), 261-272 .

Skoog, D. A. (2004). *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Thomson-Brooks/Cole. https://books.google.com/books?id=lXWmaOkIMXwC

Sotoodehnia, A. and Jafarei, M. (2016). Investigation of Qazvin Marshland Interceptor Drain Effects on Water Table Using Seep/w Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *47*(2), 237-245.

https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58330 (In Farsi)

Sullivan, E J., Reimus, P. W. and Counce, D. A. (2003). Transport of a reactive tracer in saturated alluvium described using a three-component cation-exchange model. *Journal of Contaminant Hydrology*, *62-63*, 675-694. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-77221-00182(02)

Telles, T. S., Reydon, B. P. and Maia, A. G. (2018). Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil. *Land Use Policy*, *76*, 124-129. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.053

Vuaille, J., Abrahamsen, P., Jensen, S. M., Diamantopoulos, E., Wacker, T. S. and Petersen, C. T. (2024). Modelling pesticide degradation and leaching in conservation agriculture: Effect of no-till and mulching. *Science of The Total Environment*, *929*, 172559. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172559

Yin, T., Zhao, C.-x., Yan, C.-r., Du, Z.-l. and He, W.-q. (2018). Inter-annual changes in the aggregate-size distribution and associated carbon of soil and their effects on the straw-derived carbon incorporation under long-term no-tillage. *Journal of Integrative Agriculture*, *17*(11), 2546-2557. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61925-2

Zangeneh, Z., Bayat, H., Bayazidi, F. and Hamzei, J. (2018). Effect of different tillage systems and cover crop on aggregate stability, aggregate tensile strength and penetration resistance of a silt loam soil in Hamedan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *48*(5), 1015-1029. https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.136721.667343 (In Farsi)

Zhang, Q., Peng, Y., Wang, J., Li, L ,.Yao, D., Zhang, A., Wang, W., Kuang, S., Liao, H., Zhu, Q. and Zhang, B. (2021). Improving Ecological Functions and Ornamental Values of Traditional Pear Orchard by Co-Planting of Green Manures of Astragalus sinicus L. and Lathyrus cicera L. *Sustainability.* 13 (23), 13092. https://www.mdpi.com/2071-1050/13/23/13092

Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Zeng, X. and Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*, *10*(1), 265. https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1