J. Soil Plant Interact. 2026; 17(3): 89–105. https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.22051

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Roots of Tall Fescue (Genotypes 75B and 75C), *Bromus inermis* and *Bromus tomentellus* on Soil Structural Stability and Water Repellency

Nasrin Saadati* and Mohammad Reza Mosaddeghi

Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* Corresponding author, Email: saadati.nas@gmail.com, n.saadati@ag.iut.ac.ir

(Received: 18 June 2026; Revised: 19 August 2026; Accepted: 23 August 2026)

Abstract

Background and Objective: Plants' root exudates have diverse effects on structural stability and water repellency of their surrounding soil. Few studies have been available about the effect of rangeland plants on soil physical quality. Therefore, this study was conducted to investigate the root zone's structural stability and water repellency of selected rangeland plants in a greenhouse experiment.

Methods: Tillers of tall fescue (*F. arundinacea* genotypes 75B and 75C), *B. inermis* and *B. tomentellus* were planted in the columns of a sandy clay loam soil with three replicates in a completely randomized design. Six months later, undisturbed soil samples were collected from the root zone and bulk soil in the planted and non-planted (control) columns, respectively. Soil water repellency was determined by the intrinsic sorptivity method. Soil structural stability was measured by high energy moisture characteristic (HEMC) and wet single-sieve methods.

Results: Presence of rangeland plants' roots increased ethanol sorptivity (S_E) and decreased water sorptivity (S_W) in the rhizosphere. Water repellency index (R) in the rhizosphere was, on average, about two times greater than that in the bulk soil. The highest R was recorded in the root zone of *B. inermis*, followed by tall fescue genotype 75C, *B. tomentellus*, and tall fescue genotype 75B, and the lowest value was measured in the non-planted soil. The HEMC indices were greater in the rhizosphere when compared to the control soil. The presence of plant roots significantly increased the percent of water-stable aggregates (WSA) in comparison with the control soil. The root zone of *B. inermis* had the highest WSA, while no significant difference with tall fescue was observed. The positive and significant correlation between HEMC and WSA indices with R indicates a strong linear relationship between sub-critical water repellency and soil structural stability.

Conclusion: The findings of this study indicated the beneficial influence of rangeland plants' roots on soil physical quality and structural stability. Slight (sub-critical) water repellency in the rhizospheric soil triggers aggregate stability against environmental stresses. Overall, *B. inermis* and tall fescue genotype 75C had greater effects on improving soil physical quality and structural stability among the studied species.

Keywords: Rhizosphere, Soil sorptivity, Water repellency index, High energy moisture characteristic, Soil stability ratio, Percent of water-stable aggregates.

How to Cite: Saadati, N., Mosaddeghi, M.R., 2026. Effect of roots of tall fescue (genotypes 75B and 75c), *Bromus inermis* and *Bromus tomentellus* on soil structural stability and water repellency. J. Soil Plant Interact. 17(3), 89–105 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.22051

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ (۳)۱۷: ۱۰۵-۸۹ https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.22051

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

اثر ریشه‌های فسکیوی بلند (ژنوتیپ‌های 75B و 75C)، *Bromus inermis* و *Bromus tomentellus* بر پایداری ساختمان و آب‌گریزی خاک

نسرین سعادتی* و محمد رضا مصدقی

گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saadati.nas@gmail.com و n.saadati@ag.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۱)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: ترشحات ریشه گیاهان آثار گوناگونی بر پایداری ساختمان و آب‌گریزی خاک اطراف خود دارند. در مورد اثر گیاهان مرتعی بر کیفیت فیزیکی خاک، پژوهش‌های کمی در دسترس است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی پایداری ساختمان و آب‌گریزی خاک در ناحیه ریشه برخی گیاهان مرتعی در قالب یک آزمایش گلخانه‌ای انجام شد.

روش‌ها: پنجه‌های گونه‌های مرتعی *F. arundinacea* (ژنوتیپ‌های 75B و 75C)، *B. tomentellus* و *B. inermis* در ستون‌های یک خاک لوم رسی شنی با سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی کاشته شد. پس از شش ماه، نمونه‌های خاک دست‌نخورده از ناحیه ریشه در ستون‌های دارای گیاه و از توده خاک در ستون‌های بدون گیاه (شاهد) برداشت شد. از روش جذب‌پذیری ذاتی برای تعیین آب‌گریزی خاک استفاده شد. همچنین پایداری ساختمان خاک با روش‌های منحنی مشخصه رطوبتی پرانرژی (HEMC) و تک-الک تر اندازه‌گیری شد.

نتایج: حضور ریشه گیاهان مرتعی سبب افزایش جذب‌پذیری اتانول (S_E) و کاهش جذب‌پذیری آب (S_W) ریزوسفر شد. میانگین شاخص آب‌گریزی (R) در ریزوسفر حدود دو برابر بیشتر از خاک شاهد بود. بیشترین مقادیر R در ناحیه ریشه گیاه *B. inermis* و به دنبال آن فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C، *B. tomentellus* و فسکیوی بلند ژنوتیپ 75B مشاهده شد و کمترین آن‌ها در خاک بدون گیاه اندازه‌گیری شد. شاخص‌های HEMC در ریزوسفر بیشتر از خاک شاهد بود. حضور ریشه گیاه سبب افزایش چشم‌گیر درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA) نسبت به خاک شاهد شد. ناحیه ریشه گیاه *B. inermis* بیش‌ترین مقدار WSA را داشت اما تفاوت معنی‌داری با فسکیوی بلند مشاهده نشد. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین شاخص‌های HEMC و WSA با R بیانگر ارتباط خطی قوی بین آب‌گریزی زیر-بحرانی و پایداری ساختمان خاک است.

نتیجه‌گیری کلی: یافته‌های پژوهش بیانگر اثر مفید ریشه گیاهان مرتعی بر کیفیت فیزیکی و پایداری ساختمان خاک بود. ایجاد آب‌گریزی خفیف (زیر-بحرانی) در خاک ریزوسفر، با افزایش پایداری خاکدانه‌ها در برابر تنش‌های محیطی همراه است. به‌طورکلی گیاهان *B. inermis* و فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C تأثیر بیشتری بر بهبود کیفیت فیزیکی و پایداری ساختمان خاک در میان گونه‌های مورد بررسی داشتند.

واژه‌های کلیدی: ریزوسفر، جذب‌پذیری خاک، شاخص آب‌گریزی، منحنی مشخصه رطوبتی پرانرژی، نسبت پایداری خاک، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

پایداری ساختمان خاک یکی از شاخص‌های مهم کیفیت خاک است و نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیندهایی مانند نفوذ آب، تهویه، رشد ریشه و مقاومت در برابر فرسایش ایفا می‌کند. عوامل بیولوژیک و شیمیایی متعددی از جمله ریزجانداران خاک، ریشه گیاهان، اسیدهای آلی و کربوهیدرات‌ها در ترشحات ریشه و حاصل از فعالیت‌های میکروبی و همچنین عوامل پیونددهنده آلی (مانند پلی‌ساکاریدها) و معدنی (مانند کربنات کلسیم، و اکسیدهای آهن و آلومینیوم) می‌توانند بر پایداری ساختمان و آب‌گریزی خاک تأثیر چشم‌گیری داشته باشند (Hallett et al., 1999; Baiamonte et al., 2019). حضور ترکیبات آلی آب‌گریز، ترشحات ریشه‌ای، فرآورده‌های متابولیکی ریزجانداران و پوشش‌های آب‌گریز روی سطح ذرات و خاکدانه‌ها پدیده آب‌گریزی خاک را ایجاد می‌کند. این پدیده می‌تواند بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی خاک، از جمله نفوذپذیری، نگهداشت آب، توزیع رطوبت و پایداری خاکدانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو، شناخت سازوکارهای مؤثر بر آب‌گریزی و پایداری ساختمان برای مدیریت پایدار منابع خاک ضروری است (Dekker et al., 2001).

مقدار و ترکیب بقایای گیاهی می‌تواند پایداری ساختمان خاک را تحت تأثیر قرار دهد (Kostka, 2000). هم‌چنین حضور ریشه گیاه و محیط پیرامون آن بر تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها مؤثر بوده و سبب قرارگیری و هم‌آوری ذرات خاک در کنار یکدیگر می‌شود (Bronick and Lal, 2005). یکی از ویژگی‌های ریشه گیاه که انتظار می‌رود توانایی ریشه برای جذب آب از خاک خشک را افزایش دهد، ترشح موسیلاژها است. موسیلاژ، مجموعه پلی‌مری است که توسط ریشه بسیاری از گیاهان ترشح می‌شود و بخش عمده آن از پلی‌ساکاریدها تشکیل شده است (Rillig et al., 2010). کارکردهای مختلفی به موسیلاژها نسبت داده می‌شود: بهبود تماس بین ریشه‌ها و ذرات خاک، کاهش اصطکاک برای نفوذ ریشه، تسهیل جذب آب با افزایش مقدار آب در ریزوسفر و جلوگیری از دهیدراته‌شدن بافت ریشه‌های در حال رشد (Carminati et al., 2011). ترشح‌های زیستی ریشه گیاهان و ریزجانداران خاک‌زی تأثیر زیادی بر خاکدانه‌سازی و مقاومت خاک در برابر تخریب ناشی از تنش‌های مکانیکی و هیدرولیکی دارد. این ترشح‌ها با داشتن رشته‌های پلی‌مری سبب اتصال ذرات خاک به یکدیگر و در نتیجه استحکام ساختمان خاک و افزایش پایداری آن می‌شوند (Rillig et al., 2010).

Passioura (1988) نشان داد که مواد فعال با منشأ زیستی در خاک وجود دارد که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول خاک (مانند افزایش گرانروی و کاهش کشش سطحی) می‌شوند. گیاهان ترکیب‌هایی مشابه این مواد را در ریزوسفر ترشح می‌کنند، که قادرند گرانروی (لزجت) و کشش سطحی آب خاک را به‌ترتیب افزایش و کاهش داده و توانایی ریشه را در جذب آب به ویژه در مکش‌های ماتریک زیاد (دامنه خشک) افزایش دهند. پژوهشگران گزارش کردند که ترکیبات آزادشده از ریشه سبب افزایش ذخیره آبی خاک و جذب آن توسط گیاه، افزایش هدایت هیدرولیکی خاک و جذب مواد غذایی، کاهش کشش سطحی آب خاک، افزایش توان رسوخ ریشه در خاک و افزایش فعالیت‌های میکروبی شدند (Read et al., 2002).

پدیده آب‌گریزی خفیف تا متوسط می‌تواند دارای پیامدهای مثبت باشد به‌طوری‌که سبب پایداری خاکدانه‌ها در برابر تنش‌های محیطی خاک می‌شود (Hallett et al., 2009). از مهم‌ترین منابع ایجاد پوشش‌های آب‌گریز در خاک می‌توان به ترشحات ریشه‌ای گیاهان شامل موسیلاژها و ترکیبات آلی، اسیدهای آلی و پلی‌ساکاریدهای حاصل از فعالیت‌های میکروبی، هیف‌های قارچی، و همچنین موم‌ها و مواد هیومیکی آزادشده از بقایای گیاهی در حال تجزیه اشاره کرد (Kostka, 2000). ترکیبات ترشح‌شده از ریشه گیاه از یک سو و تولید متابولیت‌های ثانویه میکروبی ناشی از تجزیه ترشحات ریشه از سوی دیگر سبب ایجاد سطوح مختلفی از آب‌گریزی در خاک اطراف ریشه می‌شوند (Hallett et al., 1999). حضور ترکیبات تجزیه‌پذیر و آب‌دوست مانند کربوهیدرات‌ها که طی تجزیه بقایای گیاهی ایجاد می‌شوند، به‌دلیل تقویت پیوندهای بین ذرات، سبب افزایش

پایداری خاکدانه می‌گردند (Piccolo and Mbagwu, 1999). دانشمندان نشان دادند که موسیلاژهای ترشح‌شده ریشه گیاهان سبب آب‌گریزی موقتی ریزوسفر در مسیر خشک‌شدن می‌شوند، و همچنین افزایش گنجایش نگهداشت آب در حضور موسیلاژها می‌تواند کاهش هدایت هیدرولیکی ریزوسفر در شرایط خشک را تعدیل کند (Ahmed et al., 2015). Moradi et al. (2012) گزارش کردند در ریزوسفر گیاه *Lupinus albus* زاویه تماس خاک-آب بیش از ۹۰ درجه شد که ناشی از ترشح موسیلاژ از ریشه‌های گیاه است. علاوه بر آن زاویه تماس خاک-آب در ریزوسفر نسبت به توده خاک به‌طور قابل توجهی بیش‌تر بود که نشان‌دهنده آب‌گریزی موقتی ریزوسفر پس از خشک‌شدن بود.

یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین پایداری ساختمان خاک، روش منحنی مشخصه رطوبتی پرانرژی[1] (HEMC) است که بر اساس مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک در بخش پرانرژی (دامنه مرطوب یا مکش ماتریک کم) استوار است (Levy and Mamedov, 2002). این روش HEMC به عنوان یک روش مناسب و کاربردی برای تعیین پایداری ساختمان خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک و هم‌چنین مناطق مرطوب مطرح شده است. در این روش حساسیت خاکدانه‌ها نسبت به فروپاشی ناشی از هوای محبوس در منافذ خاک با استفاده از شاخصی تحت عنوان نسبت پایداری سنجیده می‌شود (Mamedov and Levy, 2013; Mamedov et al., 2014). Levy and Miller (1997) هم‌بستگی معنی‌داری بین شاخص‌های پایداری ساختمان خاک به روش HEMC و شدت نفوذ آب در خاک و تشکیل روان‌آب مشاهده نمودند. پژوهشگران گزارش کرده‌اند که روش HEMC سازوکارهای حاکم بر پایداری خاکدانه در خاک‌های تحت شرایط مدیریتی مختلف را توجیه می‌کند (Mamedov and Levy, 2013). در پژوهشی مشاهده شد به‌دلیل افزایش ذخیره کربن آلی خاک، شاخص‌های HEMC و پایداری ساختمان ریزوسفر گیاه فسکیوی بلند نسبت به خاک دور از ریشه به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. همچنین ویژگی‌های شیمیایی، بیولوژیک و هیدرولیکی خاک ریزوسفر تحت تأثیر حضور ریشه گیاه قرار گرفت (Hosseini et al., 2015b).

گیاهان مختلف ترکیبات و ترشحات ریشه‌ای متفاوتی تولید می‌کنند که آثار گوناگونی بر پایداری ساختمان خاک و آب‌گریزی ریزوسفر و خاک اطراف خود دارند. در مورد اثر گیاهان مرتعی بر کیفیت فیزیکی خاک (پایداری ساختمان و آب‌گریزی خاک) پژوهش‌های کمی در دسترس است. فسکیوی بلند به‌دلیل توانایی رویش در خاک‌های مختلف، تنش آبی، شوری و قلیاییت خاک، تولید چمن انبوه، و سیستم ریشه‌ای گسترده برای تولید علوفه و حفاظت خاک استفاده می‌شود (Kirigwi et al., 2022; Saadati et al., 2023, 2025). *برموموس اینرمیس* یکی از مهم‌ترین گونه‌های چندساله گراس‌ها است؛ گراس بومی اروپا و آسیا بوده و سازگاری خوبی با آب و هوای معتدله دارد. این گیاه پراکنش و تنوع بسیار زیادی در ایران دارد و به سرما و خشکی مقاوم است (Kostopoulou et al., 2016). *برموموس تومنتلوس* یکی از گیاهان مرتعی علوفه‌ای مناسب برای ایجاد چراگاه و تولید علوفه است و منبع مناسبی برای تامین بخشی از خوراک دام کشور محسوب می‌شود (Gasch and Bingham; 2006, Saadati et al., 2023). گیاهان مختلف ترکیبات و ترشحات ریشه‌ای متفاوتی تولید می‌کنند که آثار گوناگونی بر پایداری ساختمان خاک و آب‌گریزی ریزوسفر و خاک اطراف خود دارند. همچنین در مورد اثر گیاهان مرتعی با ریشه‌های افشان بر کیفیت فیزیکی (پایداری ساختمان و آب-گریزی) خاک پژوهش‌های اندکی در دسترس است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تاثیر چهار گونه مرتعی بر پایداری ساختمان خاک و آب‌گریزی ریزوسفر، و همچنین بررسی ارتباط بین این ویژگی‌ها در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

کاشت گونه‌های مرتعی

خاک مورد استفاده در این پژوهش از لایه رویین (۰ تا ۳۰

1- High energy moisture characteristic

سانتی‌متری) مراتع مرکز ایران (شهر تیران در استان اصفهان) با مختصات جغرافیایی "۴۶/۲ '۴۶ °۳۲ عرض شمالی و"۳۳/۷ '۴۴ °۵۲ طول غربی جمع‌آوری شد. خاک مورد بررسی با ۵۳/۲ درصد شن، ۲۳/۶ درصد سیلت و ۲۳/۲ درصد رس، دارای کلاس بافت لوم رسی شنی بود. خاک در گروه خاک‌های غیرشور (EC_e برابر ۰/۷۵ dS m^{-1}) و خنثی تا اندکی قلیایی (pH برابر ۷/۵) و مقدار ماده آلی خاک برابر ۰/۲۹ درصد بود. لوله‌های PVC (۱۵ عدد) با قطر ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از این خاک پر شد و برای کشت گیاهان مورد استفاده قرار گرفت. انتهای ستون‌های خاک با توری فلزی و پارچه روی آن محکم بسته شد، و به منظور زهکشی مناسب یک لایه سنگریزه به ضخامت ۳ سانتی‌متر روی آن قرار داده شد. سه پنجه از هر یک از گونه‌های مرتعی *F. arundinacea* (ژنوتیپ‌های 75B و 75C)، *B. tomentellus* و *B. inermis* در ستون‌های خاک با سه تکرار کاشته شده و در گلخانه گروه پژوهشی روابط خاک و گیاه دانشگاه صنعتی اصفهان پرورش داده شد. بر اساس پژوهش‌های پیشین که پاسخ‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های فسکیوی بلند به شرایط مختلف محیطی مانند تنش‌های خشکی و شوری بررسی شد، دو ژنوتیپ 75B و 75C از بین ژنوتیپ‌های کشت‌شده در مزرعه انتخاب شدند که پاسخ‌های متفاوتی به تنش‌های محیطی بروز دادند (Sabzalian and Mirlohi, 2010).

در طول دوره رشد شش‌ماهه (مهر تا اسفند)، ستون‌های کاشته‌شده در گلخانه تحت دمای کنترل‌شده (میانگین دمای روز و شب به ترتیب ۲±۲۵ و ۲±۱۸ درجه سلسیوس)، نور طبیعی (۶۰۰۰ لوکس) با دوره نوری ۱۲ ساعت نگهداری شدند. رطوبت خاک در حدود گنجایش مزرعه‌ای (رطوبت در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتوپاسکال) با پایش روزانه وزن ستون‌ها نگهداری شد. در طول دوره رشد، هرس شاخساره گیاهان به طور مداوم انجام شد که شبیه‌سازی چرای دام در مراتع بوده و در نتیجه گیاهان به مرحله رشد زایشی و تولید بذر نرفتند. پس از شش ماه، نمونه‌های خاک دست‌نخورده و کلوخه (با کمترین بهم‌خوردگی) از ریزوسفر گونه‌های مرتعی در ستون‌های دارای گیاه (از لایه ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متری دارای بیشترین تراکم و فعالیت ریشه) و از توده خاک در ستون‌های بدون گیاه (از همان لایه) برای آزمایش‌های پایداری ساختمان و آب‌گریزی خاک برداشت شد.

اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک

از روش جذب‌پذیری ذاتی برای تعیین آب‌گریزی خاک استفاده شد. در این روش با اندازه‌گیری جذب‌پذیری دو سیال با زاویه تماس متفاوت با خاک (آب و اتانول)، شاخص آب‌گریزی خاک محاسبه می‌شود (Tillman et al., 1989). اساس اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک در این روش تفاوت جذب‌پذیری خاک برای آب و اتانول است. دو عامل آرایش (هندسه) منافذ و آب‌گریزی بر جذب‌پذیری آب (سیال قطبی) مؤثر است ولی جذب‌پذیری اتانول تنها از توزیع اندازه (هندسه) منافذ خاک تأثیر می‌پذیرد چون این سیال غیرقطبی تمامی سطوح ذرات خاک را مستقل از آب‌گریزی خیس می‌کند (Tillman et al., 1989; Hallett and Young, 1999). در ابتدا نمونه‌های خاک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا اثر رطوبت اولیه بر آب‌گریزی خاک به حداقل برسد. میزان جذب‌پذیری آب مقطر (S_w) و اتانول ۹۵٪ (S_E) در کلوخه‌های دست‌نخورده با استفاده از ریز–نفوذسنج مکشی بر اساس پژوهش Hallett and Young (1999) تعیین شد. نفوذ تجمعی سیال‌ها (آب و اتانول) در برابر زمان در مقادیر پتانسیل ماتریک ۲– و ۰/۷– هکتوپاسکال به‌ترتیب برای آب و اتانول به مدت ۱۸۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. به‌دلیل کشش سطحی و لزجت متفاوت دو سیال آب و اتانول، پتانسیل ماتریک اعمال‌شده برای این دو سیال یکسان نبود. شیب ناحیه خطی منحنی‌های نفوذ تجمعی در برابر زمان برابر دبی ماندگار (Q) تعیین شده و مقدار جذب‌پذیری (S) با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Tillman et al., 1989; Hallett and Young, 1999):

$$S = \sqrt{\frac{Qf}{4br}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه Q دبی ماندگار سیال ($cm^3\ s^{-1}$)، b پارامتر ثابت برابر با ۰/۵۵، r شعاع انتهای لوله نفوذسنج در تماس با خاک

(۰/۲ cm) و f تخلخل پر از هوای خاک ($cm^3\ cm^{-3}$) است. چون نمونه‌های خاک آون-خشک بوده‌اند، f برابر تخلخل کل خاک و از رابطه تخلخل با چگالی ظاهری و حقیقی خاک محاسبه شد. در نهایت شاخص آب‌گریزی (R، بی‌بعد) و زاویه تماس خاک-آب (β، درجه) به‌ترتیب با روابط زیر محاسبه شد:

$$R = 1.95 \times \frac{S_E}{S_W} \quad (۲)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{1}{R}\right) \quad (۳)$$

مقادیر R برابر ۱، ۱/۹۵-۱، ۵۰-۱/۹۵ و بزرگ‌تر از ۵۰ به ترتیب نشان‌دهنده خاک‌های کاملاً آب‌دوست، آب‌دوست، آب‌گریز زیر-بحرانی و شدیداً آب‌گریز است (Tillman et al., 1989; Hallett and Young, 1999; Lipiec et al., 2009).

اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک به روش منحنی مشخصه رطوبتی پرانرژی (HEMC)

مقدار ۵ گرم از خاکدانه‌های هوا-خشک با اندازه ۱-۰/۵ میلی‌متر در سیلندرهای پلاستیکی با ارتفاع و قطر ۲۰ میلی‌متری قرار گرفتند. برای هر تیمار و تکرار، دو سری نمونه آمده شد و خاکدانه‌ها با آب مقطر در دو حالت مرطوب‌شدن سریع و آهسته اشباع شدند (Poch and Antunez, 2010). برای مرطوب‌شدن سریع خاکدانه‌ها، نمونه‌ها یک‌باره در آب مقطر قرار گرفت و مدت ۲۴ ساعت از پایین اشباع شدند. برای مرطوب‌شدن آهسته از دستگاه جعبه شن استفاده شد و به‌صورت تدریجی خاکدانه‌ها اشباع شدند. منحنی مشخصه رطوبتی پرانرژی (HEMC) دو سری نمونه‌ها در دامنه مکش ماتریک صفر تا ۵۰ hPa توسط دستگاه جعبه شن اندازه‌گیری شد و به صورت رطوبت جرمی (θ, $g\ g^{-1}$) در برابر مکش ماتریک (h, hPa) ترسیم شد (Hosseini et al., 2015b).

برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها، مدل ون‌گنوختن اصلاح‌شده بر داده‌های HEMC برازش داده شد. سپس حجم منافذ قابل زهکشی[2] (VDP, $g\ g^{-1}$) برابر سطح محصورشده بین تابع گنجایش ویژه رطوبتی ($d\theta/dh$، شیب منحنی HEMC) و خط انقباض (مرتبط با کاهش حجم خاک با خشک‌شدن) به روش انتگرال‌گیری عددی ذوزنقه‌ای[3] به‌دست آمد. همچنین مکش ماتریک در نقطه عطف منحنی HEMC یا در نقطه اوج تابع $d\theta/dh$ که نظیر فراوان‌ترین منافذ خاک است، به عنوان مکش مدال[4] (h_{modal}, hPa) تعیین شد. پس از مدل‌سازی داده‌های HEMC، شاخص پایداری خاک (SI, hPa^{-1}) در دو حالت مرطوب‌شدن سریع و آهسته با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد (Pierson and Mullam, 1989; Hosseini et al., 2015b):

$$SI = \frac{VDP}{h_{modal}} \quad (۴)$$

با محاسبه مقادیر شاخص پایداری (SI) و حجم منافذ قابل زهکشی (VDP) در دو حالت مرطوب‌شدن سریع و آهسته، به‌ترتیب دو شاخص نسبت پایداری ساختمان (SR) و نسبت حجم منافذ قابل زهکشی (VDPR) برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها به کمک روابط زیر محاسبه شد (Pierson and Mulla, 1989; Hosseini et al., 2015b):

$$SR = \frac{SI_{FW}}{SI_{SW}} \quad (۵)$$

$$VDPR = \frac{VDP_{FW}}{VDP_{SW}} \quad (۶)$$

که در اینجا SI_{FW} و SI_{SW} یا VDP_{FW} و VDP_{SW} به‌ترتیب مقادیر SI یا VDP در دو حالت مرطوب‌شدن سریع و آهسته هستند.

همچنین مدل ون‌گنوختن (van Genuchten, 1980) بر داده‌های HEMC برازش داده شده و نسبت مقادیر شیب در نقطه عطف منحنی در دو حالت مرطوب‌شدن سریع و آهسته ($S_{i\text{-}FW}$ و $S_{i\text{-}SW}$) به عنوان شاخص نسبی پایداری ساختمان خاک (S_iR) با رابطه زیر محاسبه شد (Hosseini et al., 2015b):

$$S_iR = \frac{S_{i\text{-}FW}}{S_{i\text{-}SW}} \quad (۷)$$

شاخص‌های SR، VDPR و S_iR بی‌بعد با دامنه تغییرات بین صفر تا

2- Volume of drainable pores
3- Trapezoidal numerical integration
4- Modal suction

یک بوده مقادیر بزرگ‌تر آن‌ها نشان‌دهنده پایداری بیش‌تر ساختمان خاک است (Pierson and Mulla, 1989; Hosseini et al., 2015b).

اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک به روش الک تر

درصد خاکدانه‌های پایدار در آب[5] (WSA) با استفاده از دستگاه تک-الک به روش Kemper and Rosenau (1986) اندازه‌گیری شد. برای این منظور ۴ گرم (W_T) خاکدانه‌های با اندازه ۱-۰/۵ میلی‌متری بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متری دستگاه تک-الک ریخته شد. سپس الک‌ها با سرعت ۳۷ نوسان در دقیقه و دامنه نوسان یک سانتی‌متر به مدت ۳ دقیقه در آب مقطر تکان داده شدند. در ادامه خاکدانه‌های پایدار باقی‌مانده بر روی الک ۰/۲۵ (به همراه شن) در آون دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و وزن شدند (W_1). سپس با استفاده از محلول کالگون ۲۰ گرم در لیتر، ذرات شن از خاکدانه‌های پایدار جدا شده و وزن ذرات درشت شن بر روی الک (W_2) نیز تعیین شد. در نهایت WSA با رابطه زیر محاسبه شد:

$$\%\mathrm{WSA} = \frac{W_1 - W_2}{W_T - W_2} \times 100 \qquad (۸)$$

به‌منظور بررسی تاثیر تراکم ریشه بر شاخص‌های کیفیت خاک، میانگین تعداد ریشه‌ها (N_{root}) روی مقاطع عرضی در عمق‌های ۱۰ و ۲۵ سانتی‌متری ستون‌های خاک مورد بررسی که توسط Saadati et al. (2023) اندازه‌گیری‌شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. پس از اطمینان از نرمال‌بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها (آزمون LSD) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ (SAS Institute, v. 9.4, Cary, North Carolina, US) انجام شد. همچنین تجزیه همبستگی برای بررسی روابط بین ویژگی‌های مورد بررسی انجام شد.

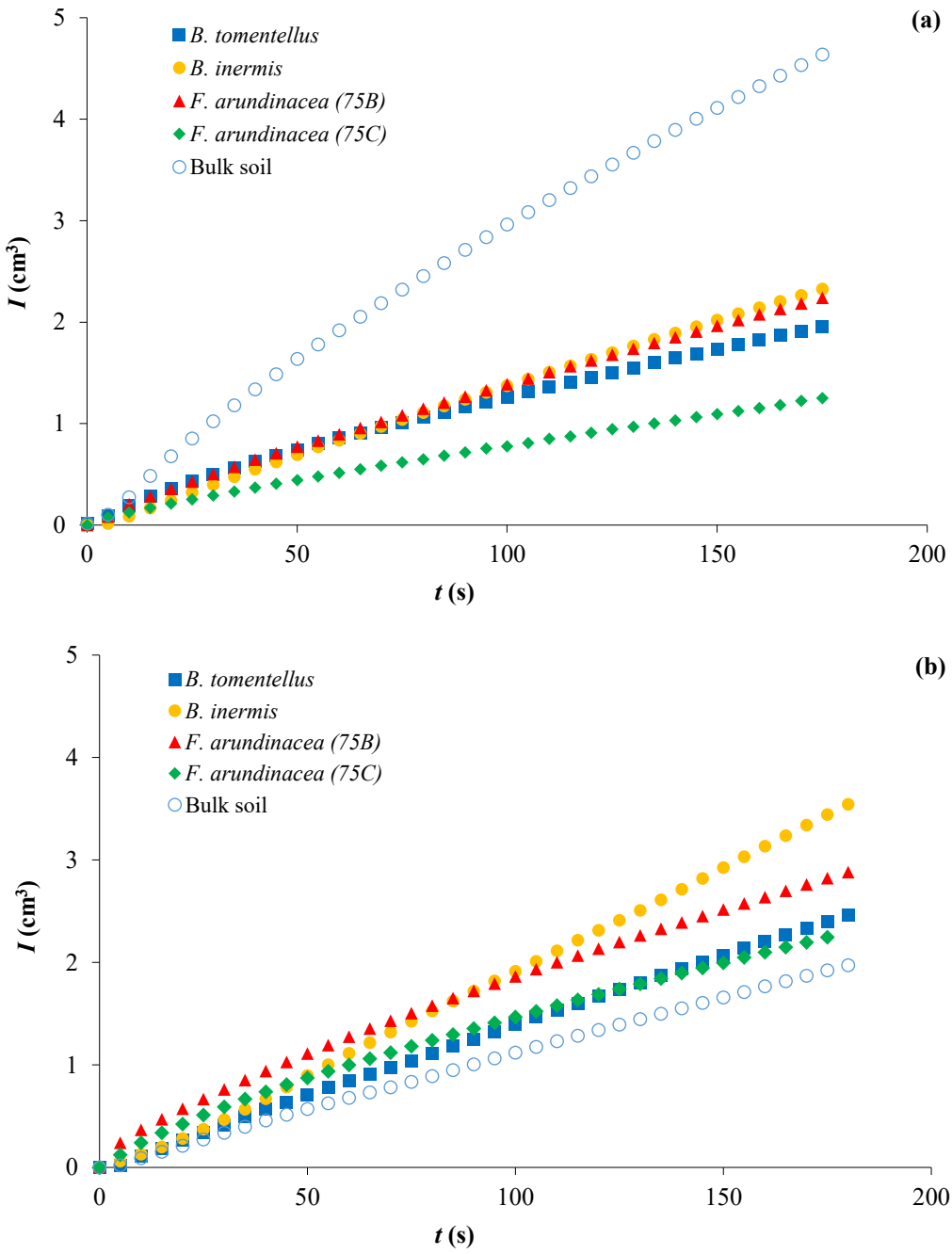
نتایج و بحث

میانگین داده‌های جذب تجمعی آب و اتانول در برابر زمان در تیمارهای مورد بررسی در شکل ۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که جذب آب در نمونه شاهد بیشتر و سریع‌تر بود، و پس از آن به‌ترتیب تیمارهای *F. arundinacea* ژنوتیپ 75B، *B. inermis*، *B. tomentellus* و *F. arundinacea* ژنوتیپ 75C قرار گرفتند. چون جذب آب علاوه بر هندسه منافذ، تحت تاثیر پوشش‌های آب‌گریز روی ذرات خاک نیز قرار می‌گیرد (Hallett and Young, 1999; Hallett et al., 2009)، جذب آب کمتر در خاک ریزوسفر قابل توجیه است. جذب اتانول توسط ریزوسفر *B. inermis* سریع‌تر بود، و پس از آن تیمارهای *F. arundinacea* ژنوتیپ 75B، *B. tomentellus* و *F. arundinacea* ژنوتیپ 75C و در نهایت خاک بدون کشت (شاهد) قرار گرفت. این یافته بیانگر تغییر توزیع اندازه (هندسه) منافذ خاک در اثر حضور ریشه است که می‌تواند نشانه‌ای از بهبود ساختمان خاک باشد (Hosseini et al., 2015a). بنابراین می‌توان گفت حضور ریشه گیاهان مرتعی سبب افزایش جذب‌پذیری اتانول (S_E) و کاهش جذب‌پذیری آب (S_W) ریزوسفر شده است. به همین دلیل ریزوسفر *B. inermis* دارای مقدار بزرگ‌تر S_E نسبت به سایر تیمارها بود. این نتایج را می‌توان به تعداد و تراکم بیشتر ریشه‌ها (N_{root}) در گونه مرتعی *B. inermis* در لایه نمونه‌برداری‌شده نسبت به سایر گونه‌های مرتعی مورد بررسی نیز ارتباط داد (Saadati et al., 2023).

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱)، گونه گیاهی تاثیر معنی‌داری بر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک شامل VDPR، SR و WSA، S_W، شاخص آب‌گریزی خاک (R) و زاویه تماس خاک-آب (β) داشت ولی اثر این تیمار آزمایشی بر S_E و S_iR معنی‌دار نبود.

مقایسه میانگین اثر گونه گیاهی بر S_W، S_E، R و β در جدول ۲ ارائه شده است. حضور ریشه گیاهان مرتعی سبب افزایش شاخص آب‌گریزی (R) به میزان حدود دو برابر نسبت به خاک شاهد شد. با توجه به مقدار R کمتر از ۱/۹۵، خاک شاهد آب-دوست بود ولی همه مقادیر R در تیمارهای گیاهی بیش از

5- Water-stable aggregates



شکل ۱. میانگین داده‌های جذب تجمعی (I) آب (a) و اتانول (b) در برابر زمان (t) توسط ریزوسفر گونه‌های گیاهی *F. arundinacea* (ژنوتیپ‌های 75B و 75C)، *B. inermis* و *B. tomentellus*، و توده خاک بدون گیاه (شاهد).

Fig. 1. Mean data for cumulative adsorption (I) of water (a) and ethanol (b) versus time (t) for the rhizosphere of plant species *F. arundinacea* (genotypes 75B and 75C), *B. inermis* and *B. tomentellus*, and the bulk soil without plant (control).

۱/۹۵ بوده و بیانگر آب‌گریزی زیر-بحرانی در ریزوسفر گیاهان مرتعی مورد بررسی است. بیشترین مقادیر R و β در ناحیه ریشه گیاه *B. inermis* و به دنبال آن فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C، *B. tomentellus* و فسکیوی بلند ژنوتیپ 75B مشاهده شد و کمترین آن‌ها در خاک بدون گیاه اندازه‌گیری شد. این نتایج را می‌توان به تعداد و تراکم بیشتر ریشه (N_{root}) و احتمالاً ترشحات

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر گونه گیاهی بر نسبت پایداری (SR)، نسبت حجم منافذ قابل زهکشی (VDPR)، نسبت مقادیر شیب در نقطه عطف HEMC (S_iR)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA)، جذب‌پذیری آب (S_W) و اتانول (S_E)، شاخص آب‌گریزی (R) و زاویه تماس خاک-آب (β).

Table 1. Analysis of variance (ANOVA) for the effects of plant species on stability ratio (SR), volume of drainable pores ratio (VDPR), ratio of slopes at the inflection point of HEMC (S_iR), percent of water-stable aggregates (WSA), water sorptivity (S_W), ethanol sorptivity (S_E), water repellency index (R) and soil-water contact angle (β).

β	R	S_E	S_W	WSA	S_iR	SR	VDPR	df	منابع تغییر
میانگین مربعات (Mean squares)									Sources of variation
334.2**	37.6*	1.15ns	3.63*	122.5**	2.11ns	3.3*	0.03*	4	گونه گیاهی Plant species
4.26	0.05	0.004	0.003	17.85	0.014	0.022	0.016	10	خطا Error

ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر اثر غیرمعنی‌دار و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and * * represent non-significant effect and significant effects at 5 and 1 percent probability levels, respectively.

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر گونه گیاهی بر نسبت پایداری (SR)، نسبت حجم منافذ قابل زهکشی (VDPR)، نسبت مقادیر شیب در نقطه عطف HEMC (S_iR)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA)، جذب‌پذیری آب (S_W) و اتانول (S_E)، شاخص آب‌گریزی (R) و زاویه تماس خاک-آب (β).

Table 2. Mean comparisons of the effects of plant species on stability ratio (SR), volume of drainable pores ratio (VDPR), ratio of slopes at the inflection point of HEMC (S_iR), percent of water-stable aggregates (WSA), water sorptivity (S_W), ethanol sorptivity (S_E), water repellency index (R) and soil-water contact angle (β).

β	R	S_E	S_W	WSA	S_iR	SR	VDPR	تیمار
(°)	–	---------- cm $s^{-0.5}$ ----------		%	–	–	–	Treatment
63.3^{c}	2.22^{b}	0.16^{a}	0.14^{ab}	83.6^{ab}	0.49^{a}	0.42^{bc}	0.37^{bc}	*F. arundinacea* 75B
70.7^{a}	3.03^{a}	0.14^{a}	0.09^{c}	82.0^{ab}	0.57^{a}	0.60^{ab}	0.42^{ab}	*F. arundinacea* 75C
71.9^{a}	3.19^{a}	0.18^{a}	0.11^{ab}	86.1^{a}	0.60^{a}	0.67^{a}	0.39^{b}	*B. inermis*
68.9^{b}	2.73^{b}	0.14^{a}	0.10^{bc}	77.0^{b}	0.58^{a}	0.46^{b}	0.49^{a}	*B. tomentellus*
44.8^{d}	1.40^{c}	0.13^{a}	0.18^{a}	22.3^{c}	0.40^{a}	0.36^{c}	0.27^{c}	شاهد (Control)

در هر ستون، اعداد با حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (LSD, $p <$ ۰/۰۵).

In each column, the numbers with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

بیشتر ریشه در ریزوسفر گونه مرتعی *B. inermis* نسبت به دیگر گونه‌های مرتعی مورد بررسی ارتباط داد (Saadati et al., 2023).

مقادیر S_E تفاوت معنی‌داری بین گیاهان مختلف نداشت اما S_W به‌طور معنی‌داری در تیمارهای مختلف تغییر یافته است (جدول ۲). تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در تیمارهای آزمایشی را می‌توان به تغییر در ساختار منافذ (S_E) و حضور پوشش‌های آب‌گریز روی سطح خاکدانه‌ها (S_W) نسبت داد. این دو عامل بستگی به ترکیب شیمیایی متابولیت‌های میکروبی و ترشحات ریشه دارند (Hallett and Young, 1999).

مقادیر R و β در ناحیه ریشه گیاه *B. inermis* به‌ترتیب حدود ۲/۲۷ و ۱/۶۰ برابر شاهد بدست آمد (جدول ۲). بنابراین افزایش در مقادیر R و β به‌دلیل افزایش پوشش‌های آب‌گریزی روی سطح ذرات خاک تفسیر شود که توسط S_W کمّی می‌شوند و به ترکیب شیمیایی متابولیت‌های میکروبی و ترشحات ریشه‌ای

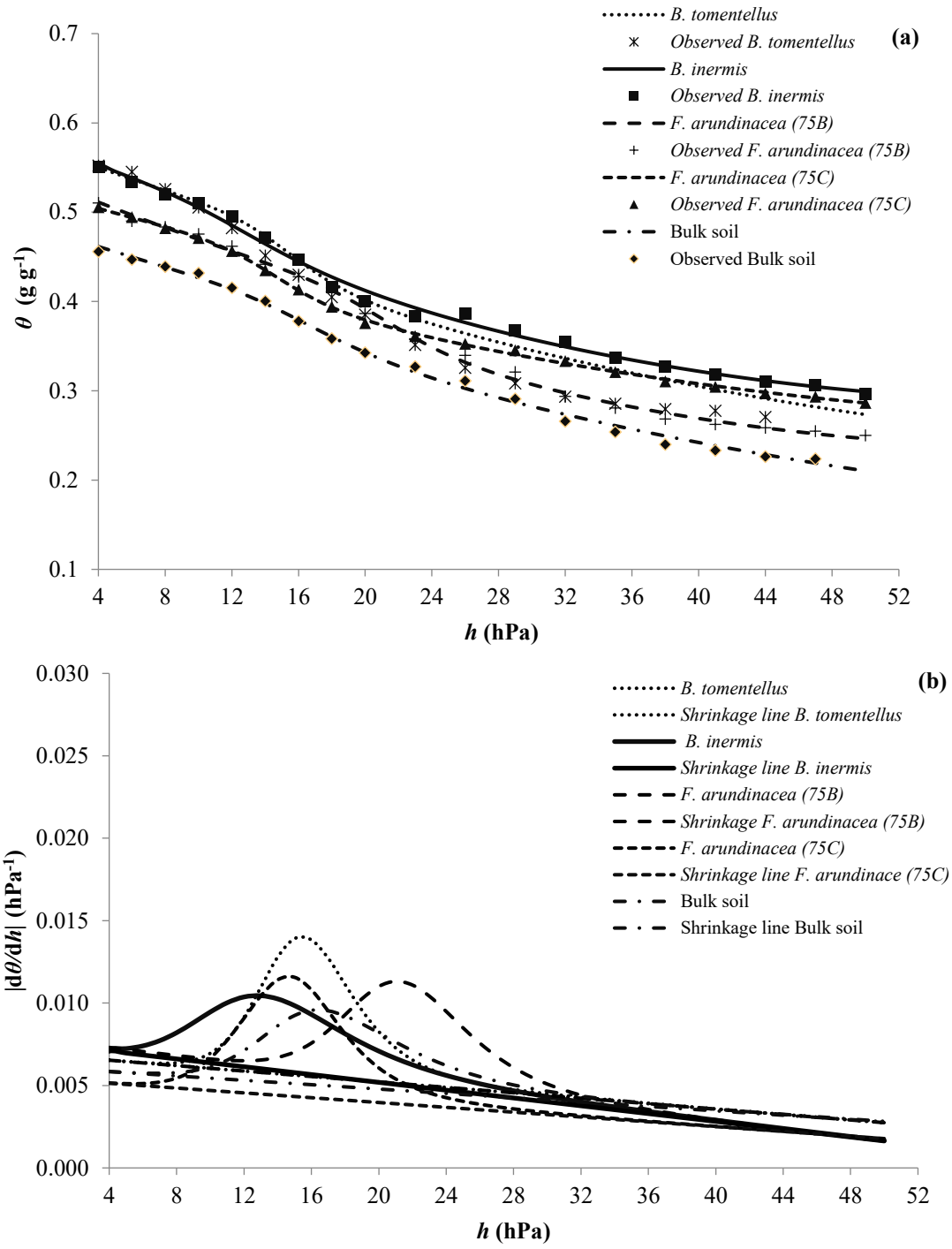
مربوط‌اند (Hallett and Young, 1999). برخلاف S_E، مقدار S_W وابستگی معنی‌داری به گونه گیاهی داشت. کم‌ترین مقدار S_W در ریزوسفر فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C مشاهده شد که احتمالاً به‌دلیل پوشش‌های آب‌گریز بیش‌تر در ریزوسفر آن است (جدول ۲). به‌طورکلی وجود ریشه گیاه و ترشحات ریشه در ریزوسفر سبب ایجاد پوشش‌های آب‌گریز و کاهش S_W و در نتیجه افزایش R می‌شود (Seaton et al., 2019). نتایج تجزیه همبستگی بیانگر روابط خطی مثبت و معنی‌داری بین R یا β و تعداد ریشه‌ها (N_{root}) بود؛ این یافته نشان می‌دهد افزایش تراکم ریشه‌ها سبب افزایش آب‌گریزی ریزوسفر می‌شود. همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین R و β و همبستگی منفی و معنی‌داری بین S_W با R و β وجود داشت (جدول ۳). این یافته نشان‌دهنده آن است که با افزایش آب‌گریزی، جذب‌پذیری آب کاهش می‌یابد که تأییدکننده نقش پوشش‌های آب‌گریز در کاهش نفوذ آب به خاک است.

در بین ریزجانداران خاک، قارچ‌ها نقش مهمی در آب‌گریزی خاک ایفا می‌کنند. مولکول‌های با وزن مولکولی زیاد به علت آب‌گریزی بیش‌تر، حلالیت کم‌تر و حضور حلقه‌های آروماتیک و کربوکسیلیک اسید، تمایل بیش‌تری برای جذب بر روی سطوح معدنی خاک نسبت به مولکول‌های با وزن مولکولی کم دارند. نوع ترکیبات آلی که از ریشه گیاهان آزاد می‌شود بسته به گونه و سن گیاه و شرایط محیطی مختلف (مانند خشکی، شوری و شرایط غرقابی) می‌تواند متفاوت باشد. اسیدهای آلی ترشح‌شده توسط ریشه گیاهان بسته به میزان انحلال و تعداد گروه‌های کربوکسیل‌شان، جذب سطوح معدنی می‌شوند (Jones, 1998). بنابراین ریزوسفر آب‌گریزتر گیاهان ژنوتیپ 75C فسکیوی بلند نسبت به ژنوتیپ 75B آن می‌تواند به‌دلیل فعالیت میکروبی (اسیدهای آلی و پلی‌ساکاریدهای میکروبی) و فعالیت قارچی (هیف‌ها) بیش‌تر در ناحیه ریزوسفر این ژنوتیپ باشد. همچنین این احتمال وجود دارد که ریشه فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C نسبت به ژنوتیپ 75B، اسیدهای آلی آب‌گریزتری با وزن مولکولی بیش‌تر به درون ریزوسفر آزاد می‌سازند. پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که آب‌گریزی با میزان کربن آلی خاک و ترکیبات ریشه هم‌بستگی مثبت دارد (Vogelmann et al., 2013)، این یافته‌ها نشان می‌دهد که کمّیت ماده آلی تنها عامل مؤثر بر آب‌گریزی خاک نبوده بلکه در برخی موارد کیفیت ماده آلی ممکن است اثر مهم‌تری بر آن داشته باشد (Goebel et al., 2011; Hosseini et al., 2015a).

اثر گونه گیاهی بر منحنی‌های HEMC و تابع گنجایش ویژه رطوبتی ($d\theta/dh$) در شکل‌های ۲ و ۳ (به‌ترتیب برای مرطوب‌شدن سریع و آهسته) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مدل اصلاح‌شده ون‌گنوختن به خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده HEMC برازش یافته است. سرعت مرطوب‌شدن خاکدانه‌ها اثر قابل توجهی بر شکل و شیب منحنی‌های HEMC در همه تیمارها داشت. به دلیل تخریب ساختمان و کاهش حجم منافذ در اثر جذب سریع آب، مقدار θ_s در حالت مرطوب‌شدن سریع کم‌تر از مرطوب‌شدن آهسته به دست آمد. تفاوت منحنی‌های HEMC در شرایط مرطوب‌شدن سریع و آهسته، ناشی از تفاوت در میزان آب‌گیری ذرات رس و حضور هوای محبوس در منافذ خاک است. این پدیده منجر به فروپاشی خاکدانه‌ها به‌ویژه در شرایط مرطوب‌شدن سریع می‌گردد (Norton et al., 2006, Hosseini et al., 2015a,b). نتایج نشان داد که مقادیر VDP (سطح محصور بین منحنی $d\theta/dh$ و خط انقباض) در حالت مرطوب‌شدن سریع به طور قابل‌توجهی کم‌تر از مقادیر آن‌ها در حالت مرطوب‌شدن آهسته است (شکل‌های ۲ و ۳ ب).

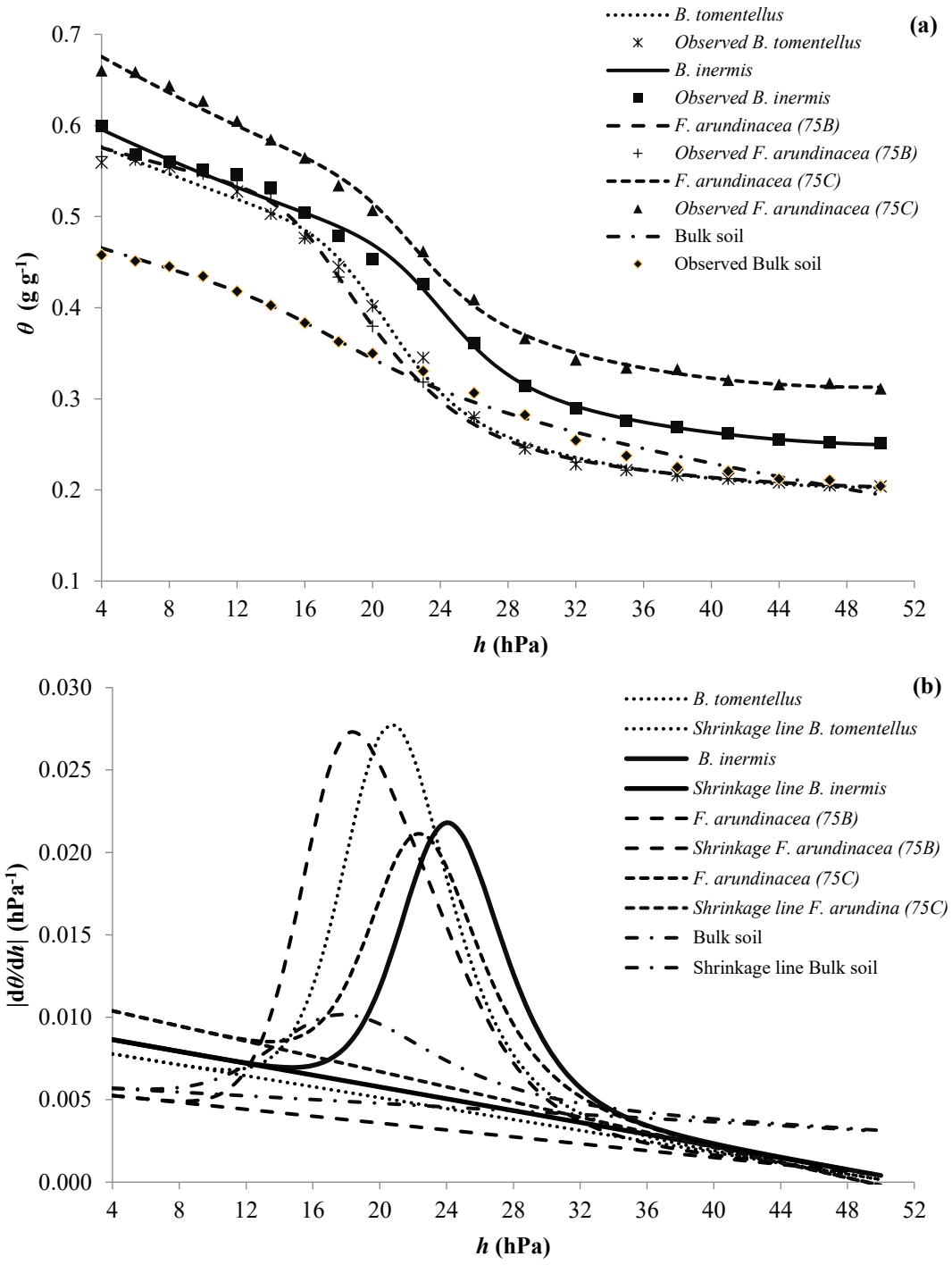
شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند که در اثر حضور ریشه گیاه مقدار رطوبت در دامنه پرانرژی (مکش‌های ماتریک کم) افزایش یافته که سبب افزایش VDP و در نتیجه SI به‌ویژه در حالت مرطوب‌شدن سریع شده است. در حالت مرطوب‌شدن سریع، افزایش VDP نشان‌دهنده افزایش پایداری ساختمان خاک است. این یافته به کاهش تخریب خاکدانه‌ها در اثر جذب آب و افزایش فشار هوای محبوس نسبت داده می شود (Mamedov et al., 2014).

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثر گونه گیاهی بر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک به روش HEMC (شامل



شکل ۲. منحنی‌های مشخصه رطوبتی پرانرژی (HEMC) در حالت مرطوب‌کردن سریع (a) و توابع گنجایش رطوبتی (|dθ/dh|) متناظر آن (b) در ریزوسفر گونه‌های گیاهی *B. tomentellus*، *B. inermis* و *F. arundinacea* (ژنوتیپ‌های 75C و 75B)، و خاک توده (شاهد).

Fig. 2. High energy moisture characteristic (HEMC) curves of fast-wetted aggregates (a) and corresponding specific water capacity (|dθ/dh|) curves (b) in the rhizosphere of plant species of *B. tomentellus*, *B. inermis* and *F. arundinacea* (genotypes 75B and 75C) and bulk soil (control).



شکل ۳. منحنی‌های مشخصه رطوبتی پرانرژی (HEMC) در حالت مرطوب‌کردن آهسته (a) و توابع گنجایش رطوبتی (|dθ/dh|) متناظر آن (b) در ریزوسفر گونه‌های گیاهی *B. tomentellus*، *B. inermis* و *F. arundinacea* (ژنوتیپ‌های 75C و 75B)، و خاک توده (شاهد).

Fig. 3. High energy moisture characteristic (HEMC) curves of slow-wetted aggregates (a) and corresponding specific water capacity (|dθ/dh|) curves (b) in the rhizosphere of plant species of *B. tomentellus*, *B. inermis* and *F. arundinacea* (genotypes 75B and 75C) and bulk soil (control).

جدول ۳. ضرایب هم‌بستگی پیرسون بین نسبت پایداری (SR)، نسبت حجم منافذ قابل زهکشی (VDPR)، نسبت مقادیر شیب در نقطه عطف HEMC (S_iR)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA)، جذب‌پذیری آب (S_W) و اتانول (S_E)، شاخص آب‌گریزی خاک (R)، زاویه تماس خاک–آب (β) و تعداد ریشه‌ها (N_{root}) (تعداد داده = ۱۵).

Table 3. Pearson pair-wise correlations between stability ratio (SR), volume of drainable pores ratio (VDPR), ratio of slopes at the inflection point of HEMC (S_iR), percent of water-stable aggregates (WSA), water sorptivity (S_W), ethanol sorptivity (S_E), water repellency index (R), soil-water contact angle (β) and number of roots (N_{root}) (number of data = 15).

N_{root}	β	R	S_E	S_W	WSA	S_iR	SR	VDPR	شاخص
								1.00	VDPR
							1.00	0.66^{**}	SR
						1.00	0.65^{**}	0.67^{**}	S_iR
					1.00	0.36^{ns}	0.42^{ns}	0.35^{ns}	WSA
				1.00	-0.44^{ns}	-0.43^{ns}	0.32^{ns}	-0.10^{ns}	S_W
			1.00	0.86^{**}	0.02^{ns}	-0.19^{ns}	-0.03^{ns}	0.14^{ns}	S_E
		1.00	-0.35^{ns}	-0.69^{**}	0.67^{**}	0.53^{*}	0.61^{*}	0.17^{ns}	R
	1.00	0.91^{**}	-0.17^{ns}	-0.61^{*}	0.89^{**}	0.56^{*}	0.59^{*}	0.34^{ns}	B
1.00	0.91^{**}	0.74^{**}	-0.02^{ns}	-0.44^{ns}	0.97^{**}	0.35^{ns}	0.43^{ns}	0.31^{ns}	N_{root}

* و ** به‌ترتیب بیانگر همبستگی معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

* and ** stand for significant correlations at 5 and 1 percents probability levels, respectively.

VDPR و SR) معنی‌دار بود. مقایسه میانگین اثر گونه گیاهی بر مقادیر VDPR، SR، S_iR، و WSA در جدول ۲ ارائه شده است. شاخص‌های پایداری ساختمان خاک به روش HEMC (شامل VDPR، SR و S_iR) به‌طور قابل توجهی در شرایط حضور ریشه‌های گیاهی افزایش یافتند اگرچه اثر گونه گیاهی بر S_iR معنی‌دار نشد. پژوهش‌گران با بررسی اثر فسکیوی بلند بر پایداری ساختمان خاک دریافتندکه به‌دلیل افزایش ذخیره کربن آلی در ریزوسفر (به‌ویژه در خاک‌های ریزبافت)، پایداری خاکدانه‌ها بهبود یافته و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک به روش HEMC افزایش یافت (Hosseini et al., 2015b).

بیش‌ترین مقدار VDPR در ریزوسفر گیاه *B. tomentellus* مشاهده شد که ۱/۸۱ برابر خاک شاهد بود. سپس مقادیر این شاخص به‌ترتیب نزولی در ریزوسفر فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C، *B. inermis* و فسکیوی بلند ژنوتیپ 75B، و خاک بدون گیاه (شاهد) بدست آمد. نتایج نشان داد بیش‌ترین مقدار SR در ریزوسفر *B. inermis* مشاهده شد که حدود ۱/۸۶ برابر خاک شاهد بود. سپس مقادیر این شاخص به‌ترتیب کاهشی در ریزوسفر *B. tomentellus*، فسکیوی بلند ژنوتیپ 75C، فسکیوی بلند ژنوتیپ 75B، و خاک بدون گیاه (شاهد) بدست آمد. ولی تفاوت معنی‌داری بین دو ژنوتیپ فسکیوی بلند از نظر شاخص‌های VDPR، SR و S_iR ریزوسفر وجود نداشت، اگرچه مقادیر میانگین این شاخص‌ها در ریزوسفر ژنوتیپ 75C در مقایسه با ژنوتیپ 75B بیشتر بود (جدول ۲). همبستگی ویژگی‌ها نشان داد رابطه مثبت و معنی‌دار بین VDPR با SR و S_iR وجود داشت (جدول ۳).

کاهش پایداری ساختمان خاک و تخریب خاکدانه‌ها در ارتباط با تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک است. اثر این فرآیندها به نوع خاک، شرایط زهکشی و فعالیت بیولوژیک خاک بستگی دارد (Krichel et al., 2019). هنگامی که خاک به سرعت مرطوب می‌شود، دو فرآیند فیزیکی اصلی انبساط و فروپاشی خاکدانه‌ها در تخریب خاکدانه‌ها نقش دارند (Levy and Mamedov, 2002). در مرحله ابتدایی اشباع‌شدن خاک، هنگامی که آب به درون خاکدانه‌ها وارد شده و هوای محبوس‌شده درون خاکدانه‌ها را فشرده می‌سازد، فرآیند فروپاشی منجر به شکست خاکدانه‌ها می‌شود. با افزایش مقدار رطوبت اولیه خاک، اهمیت فرآیند فروپاشی در تخریب خاکدانه‌ها کاهش یافته

و در خاک‌های رسی، شکست خاکدانه‌ها عمدتاً به‌دلیل فرآیند انبساط صورت می‌گیرد (Le Bissonnais, 1996).

نوع گیاه بر جمعیت و تنوع میکروبی، چرخه ماده آلی، حلالیت و فراهمی عناصر غذایی و انحلال و رسوب مواد معدنی اثر می‌گذارد (Delaune and Reddy, 2008). جانداران، ریزجانداران (هیف‌های قارچی و پلی‌ساکاریدهای میکروبی) و ریشه گیاهان از جمله عوامل موثر بر خاکدانه‌سازی هستند (Six et al., 2004). بنابراین با کاهش جمعیت میکروبی و به دنبال آن کاهش عوامل پیونددهنده ذرات خاک مرتبط با تشکیل خاکدانه‌های درشت، پایداری ساختمان خاک کاهش می‌یابد. مقدار و نوع ماده آلی خاک نیز در ارتباط با خاکدانه‌سازی است (Leelamanie et al., 2013). نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های پایداری ساختمان HEMC (VDPR، SR و S_iR) تحت شرایط نوع گیاه تغییر یافت، بنابراین اثر کیفیت و ماهیت ماده آلی بر پایداری ساختمان خاک مهم است. نوع ترکیبات آلی آزادشده از ریشه گیاهان به شرایط خاک و محیط بستگی دارد (Jones, 1998). محققان دریافتند مولکول‌های با وزن مولکولی زیاد، تمایل بیش‌تری به جذب روی سطوح معدنی خاک و به‌دنبال آن افزایش آب‌گریزی و پایداری ساختمان خاک نسبت به مولکول‌های با وزن مولکولی کم دارند (Delaune and Reddy, 2008). نتایج نشان داد همبستگی مثبت و معنی‌دار بین SR و S_iR با β و R برقرار بود (جدول ۳).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که گونه گیاهی بر درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA) اثر معنی‌دار داشت (جدول ۱). حضور ریشه گیاه سبب افزایش چشم‌گیر (حدود چهار برابر) در مقادیر WSA نسبت به خاک شاهد شد که نشان‌دهنده حساسیت این شاخص پایداری ساختمان خاک به اثر گیاهان و عوامل محیطی است. ناحیه ریشه گیاه *B. inermis* بیش‌ترین مقدار این ویژگی را داشت اما تفاوت معنی‌داری با فسکیوی بلند مشاهده نشد. بر خلاف روابط ضعیف بین شاخص‌های HEMC و N_{root}، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین WSA و N_{root} مشاهده شد که بیانگر نقش تراکم ریشه‌ها در پایداری ساختمان خاک است (جدول ۳). به‌طورکلی نتایج WSA تقریباً همراستا با نتایج شاخص‌های پایداری ساختمان خاک به روش HEMC بود (جدول ۲). همبستگی مثبت و معنی‌دار بین WSA با R و β (جدول ۳) بیانگر اهمیت آب‌گریزی زیر-بحرانی در پایداری ساختمان خاک است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر بیانگر اثر مفید ریشه گیاهان مرتعی مورد بررسی بر کیفیت فیزیکی و پایداری ساختمان خاک در یک آزمایش گلخانه‌ای بود که با افزایش شاخص آب‌گریزی، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب و شاخص‌های HEMC مشاهده شد. حضور ریشه گیاهان مرتعی بر ویژگی‌های خاک اطراف (ریزوسفر) تأثیر بسیاری داشت. ایجاد آب‌گریزی خفیف (زیر-بحرانی) در خاک ریزوسفر سبب پایداری بیش‌تر خاکدانه‌ها در برابر تنش‌های ناشی از مرطوب‌شدن سریع و افزایش پایداری خاکدانه‌ها شد. به‌طور کلی گونه مرتعی *B. inermis* با داشتن مقدار بیش‌تر شاخص آب‌گریزی، خاکدانه‌های پایدار در آب و اغلب شاخص‌های HEMC در ریزوسفر سبب بهبود و افزایش بیش‌تر کیفیت فیزیکی و پایداری ساختمان خاک نسبت به سایر گونه‌های مورد بررسی شد. همچنین گونه *B. tomentellus* بیشترین تاثیر را بر پایداری ریزساختار منافذ خاک داشت. با توجه به اثر مثبت حضور ریشه‌های گونه‌های مرتعی *B. inermis* و *F. arundinacea* ژنوتیپ 75C بر پایداری ساختمان خاک، و پژوهش‌های پیشین درباره اثر مثبت و موثر گونه‌های مرتعی *B. inermis* و *F. arundinacea* ژنوتیپ 75C بر تقویت مکانیکی و افزایش مقاومت برشی خاک (Saadati et al., 2023)، کشت ترکیبی *B. inermis* و *F. arundinacea* ژنوتیپ 75C در زمین‌های شیب‌دار و مستعد فرسایش برای برنامه‌های حفاظت خاک می‌تواند موثر باشد. با این وجود برهمکنش‌های رقابتی بین *B. inermis* و *F. arundinacea* در کشت مخلوط نیاز به بررسی دارد تا اطمینان حاصل شود که هر دو گونه می‌توانند با هم رشد نموده و مزایای مکمل ارائه دهند. با توجه به تاثیر مثبت ریشه‌های گونه مرتعی *F.*

arundinacea (ژنوتیپ‌های 75C و 75B) بر پایداری ساختمان خاک و با عنایت به این که ژنوتیپ 75C عمدتاً تقویت‌کننده لایه‌های رویین خاک و ژنوتیپ 75B عمدتاً تقویت‌کننده لایه‌های زیرین خاک بودند (Saadati et al., 2023)، کشت ترکیبی این دو ژنوتیپ می‌تواند برای اقدامات حفاظت خاک و برنامه‌های احیای زمین‌های شیب‌دار مستعد زمین‌لغزش‌های کم‌عمق پیشنهاد شود. پیشنهاد می‌شود به‌منظور بررسی جامع‌تر و اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر، پژوهش‌های میدانی در این زمینه انجام شود. همچنین بررسی اثر ریشه گیاهان مرتعی مورد بررسی و دیگر گیاهان مهم مرتعی (مانند ترکیب گون‌ها و بروموس‌ها) در عرصه‌های طبیعی برای ارزیابی جامع و معتبر پیشنهاد می‌شود.

تشکر و سپاسگزاری

از دانشگاه صنعتی اصفهان و بنیاد علم ایران (طرح پژوهشی شماره ۴۰۰۰۳۹۸) به خاطر حمایت‌های مالی از این پژوهش سپاسگزاری می‌گردد.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Ahmed, M.A., Holz, M., Woche, S.K., Bachmann, J., Carminati, A., 2015. Effect of soil drying on mucilage exudation and its water repellency: a new method to collect mucilage. J. Plant Nutr. Soil Sci. 178, 821–824. https://doi.org/10.1002/jpln.201500177.
2. Baiamonte, G., Crescimanno, G., Parrino, F., De Pasquale, C., 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a desert sandy soil. Catena 175, 294–303. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.019.
3. Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma 124, 3–22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005.
4. Carminati, A., Schneider, C.L., Moradi, A.B., Zarebanadkouki, M., Vetterlein, D., Vogel, H.-J.R., Hildebrandt, A., Weller, U., SchüLer, L., Oswald, S.E., 2011. How the rhizosphere may favor water availability to roots. Vadose Zone J. 10, 988–998. https://doi.org/10.2136/vzj2010.0113.
5. Delaune, R.D., Reddy, K.R., 2008. Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429155833.
6. Dekker, L.W., Doerr, S.H., Oostindie, K., Ziogas, A.K., Coen, J., 2001. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 65, 1667–1674. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1667.
7. Gasch, C., Bingham, R., 2006. A study of *Bromus tectorum* L. seed germination in the Gunnison Basin, Colorado. Bios. 77, 7–12. https://doi.org/10.2307/4608764.
8. Goebel, M.O., Bachmann, J., Reichstein, M., Janssens, I.A., Guggenberger, G., 2011. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition–is there a link to extreme climatic events? Glob. Change Biol. 17, 2640–2656. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02414.x.
9. Hallett, P., Young, I., 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. Eur. J. Soil Sci. 50, 35–40. https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00214.x.
10. Hallett, P.D., Feeney, D.S., Bengough, A.G., Rillig, M.C., Scrimgeour, C.M., Young, I.M., 2009. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport. Plant Soil. 314, 183–196 https://doi.org/10.1007/s11104-008-9717-y.
11. Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Sabzalian, M.R., 2015a. Aboveground fungal endophyte infection in tall fescue alters rhizosphere chemical, biological, and hydraulic properties in texture-dependent ways. Plant Soil. 388, 351–366. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2340-1.
12. Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Sabzalian, M.R., 2015b. Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils. Geoderma. 249, 87–99. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.013.
13. Jones, D. L., 1998. Organic acids in the rhizosphere–a critical review. Plant Soil. 205, 25–44. https://doi.org/10.1023/A:1004356007312.
14. Kemper, W., Rosenau, R., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 425–442.
15. Kirigwi, F.M., Saha, M.C., 2022. Screening of tall fescue genotypes for relative water content and osmotic potential under drought stress. Grassl. Res. 1, 84–93. https://doi.org/10.1002/glr2.12021.

16. Kostka, S.J., 2000. Amelioration of water repellency in highly managed soils and the enhancement of turfgrass performance through the systematic application of surfactants. J. Hydrol. 231, 359–368. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00208-0.
17. Kostopoulou, P., Karatassiou, M., 2016. Photosynthetic response of *Bromus inermis* in grasslands of different altitudes. Turk. J. Agric. For. 40, 642–653. https://doi.org/10.3906/tar-1602-50.
18. Krichels, A., Delucia, E.H., Sanford, R., Chee-Sanford, J., Yang, W.H., 2019. Historical soil drainage mediates the response of soil greenhouse gas emissions to intense precipitation events. Biogeochemistry 142, 425-442. https://doi.org/10.1007/s10533-019-00544-x.
19. Lipiec, J., Wojciga, A., Horn, R., 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. Soil Tillage Res. 103:170–177. https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.021.
20. Piccolo A., Mbagwu, J.S., 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 1801–1810. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361801x.
21. Le Bissonnais, Y.L., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. Eur. J. Soil Sci. 47, 425–437. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12311.
22. Leelamanie, D., Karube, J., Samarawickrama, U., 2013. Stability analysis of aggregates in relation to the hydrophobicity of organic manure for Sri Lankan Red Yellow Podzolic soils. Soil Sci. Plant Nutr. 59, 683–691. https://doi.org/10.1080/00380768.2013.826568.
23. Levy, G., Mamedov, A.I., 2002. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for seal formation. Soil Sci. Soc. Am. J. 66, 1603–1609. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1603.
24. Levy, G.J., Miller, W.P., 1997. Aggregate stabilities of some Southeastern US soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 61, 1176–1182. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040024x.
25. Mamedov, A.I., Levy, G. J., 2013. High energy moisture characteristics: linking between some soil physical processes and structure stability. pp. 41–74. In: Logsdon, S., Berli, M., Horn, R. (Eds.), Quantifying and Modeling Soil Structure Dynamics. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI. https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel3.c3.
26. Mamedov, A.I., B. Bar-Yosef, I., Levkovich, R., Rosenberg, A., Silber, P., Levy, G.J., 2014. Amending soil with sludge, manure, humic acid, orthophosphate and phytic acid: effects on aggregate stability. Soil Res. 52, 317–326. https://doi.org/10.1071/SR13334.
26. Norton, L., Mamedov, A.I., Huang, C., Levy, G., 2006. Soil aggregate stability as affected by long-term tillage and clay type. Adv. Geoecol. 38, 422–429.
27. Passioura, J.B., 1988. Water transport in and to roots. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 39, 245–265. https://doi.org/10.1146/annurev.pp.39.060188.001333.
28. Moradi, A.B., Conesa, H.M., Robinson, B., Lehmann, E., Kuehne, G., Kaestner, A., Oswald, S., Schulin, R., 2009. Neutron radiography as a tool for revealing root development in soil: capabilities and limitations. Plant Soil. 318, 243–255. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9834-7.
29. Pierson, F.B., Mulla, D.J. 1989. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 1825–1831. https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300060035x.
30. Poch, R., Antunez, M., 2010. Aggregate development and organic matter storage in Mediterranean mountain soils. Pedosphere 20, 702–710. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60060-4.
31. Rillig, M.C., Mardatin, N.F., Leifheit, E.F., Antunes, P.M., 2010. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. Soil Biol. Biochem. 42, 1189–1191. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.03.027.
32. Read, D.B., Bengough, A.G., Gregory, P.J., Crawford, J.W., Robinson, D., Scrimgeour, C.M., Young, I.M., Zhang, K., Zhang, X., 2002. Plant roots release phospholipid surfactants that modify the physical and chemical properties of soil. New Phytol. 157, 315–326. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00665.x.
33. Saadati, N., Mosaddeghi, M.R., Sabzalian, M.R., Jafari, M., 2023. Soil mechanical reinforcement by the fibrous roots of selected rangeland plants using a large soil-root shear apparatus. Soil Tillage Res. 234, 105852. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105852.
34. Saadati, N., Mosaddeghi M.R., Sabzalian M.R., Jafari, M., 2025, Impact of *Epichloë* fungal endophyte-tall fescue symbiosis on mechanical characteristics of rooted soil depending on the host genotype. Soil Tillage Res. 248, 106472. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106472.
35. Sabzalian, M. R. and Mirlohi., A. 2010. *Neotyphodium* endophytes trigger salt resistance in tall and meadow fescues. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 952–957. https://doi.org/10.1002/jpln.200900345.
36. Seaton, F., Jones, D.L., Creer, S., George, P.B.L., Smart, S.M., Lebron, I., Barrett, G., Emmett, B.A., Robinsona, D.A., 2019. Plant and soil communities are associated with the response of soil water repellency to environmental stress. Sci. Total. Environ. 687, 929–938. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.052.
37. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil Tillage Res. 79, 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008.

38. Tillman, R., Scotter, D., Wallis, M., Clothier, B., 1989. Water repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. Soil Res. 27, 637–644. https://doi.org/10.1071/SR9890637.
39. van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
40. Vogelmann, E.S., Reichert, J.M., Prevedello, J., Awe, G.O., 2013. Hydro-physical processes and soil properties correlated with origin of soil hydrophobicity. Cienc. Rural. 43, 1582–1589. https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000107.