

تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک تحت دبی‌های مختلف جریان در شیارهای کشت گندم دیم

جلال حیدری^۱، علی‌رضا واعظی^{۲*} و محمد امیر دلاور^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، ^۲ استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان و ^۳ دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۷

چکیده

گوناگونی عوامل مؤثر بر ویژگی‌های خاک منجر به تغییرات زمانی در فرایند فرسایش خاک می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی تغییرات زمانی تولید رواناب و هدررفت خاک در نوارهای کشت گندم دیم انجام گرفت. برای این منظور، سه گندم‌زار دیم با شیب متوسط ۱۵ درصد و تحت آیش در جنوب غربی استان کرمانشاه انتخاب و در هر زمین شیارهایی به طول پنج متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر ایجاد شد. برای بررسی تولید رواناب و هدررفت خاک، از چهار دبی برابر ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه استفاده شد و مقدار رواناب و هدررفت خاک از شیارها در بازه‌های زمانی پنج دقیقه طی ۶۰ دقیقه در سه تکرار اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، با افزایش دبی جریان، حجم رواناب و هدررفت خاک در شیارهای کشت افزایش یافت، به طوری که کمترین مقدار هدررفت خاک در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه (۲/۶۶ گرم بر متر مربع) و بیشترین مقدار آن در دبی دو لیتر بر دقیقه (۸۵/۳۳ گرم بر متر مربع) مشاهده شد. همچنین، حجم رواناب در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه کمترین مقدار (۰/۴۷ لیتر) و در دبی دو لیتر بر دقیقه بیشترین مقدار (۷/۶۵ لیتر) بود. مجموع کل رواناب تولیدی پس از مدت زمان ۶۰ دقیقه و همچنین، میانگین رواناب تولیدی در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۱۲/۳۳ و ۱/۰۳ لیتر و در دبی دو لیتر بر دقیقه به ترتیب ۴۳/۸۱ و ۶/۷۹ لیتر بود. تفاوت‌های معنی‌دار در تولید رواناب و هدررفت خاک طی زمان در دبی‌های مورد مطالعه مشاهده شد ($p < 0.01$). تولید رواناب در ابتدای آزمایش اندک بود و با گذشت زمان، بر مقدار آن افزوده شد. الگوی تغییرات زمانی هدررفت خاک متفاوت از تولید رواناب بود، به طوری که مقدار هدررفت خاک در آغاز آزمایش نسبت به زمان‌های پایانی بیشتر بود که علت آن را می‌توان به فراهمی زیاد ذرات خاک قابل انتقال در شیارها در ابتدای آزمایش نسبت داد. مقدار هدررفت خاک از آغاز آزمایش تا زمان ۲۵ دقیقه، کاهش شدیدی یافت و سپس، از الگوی کاهشی تدریجی پیروی کرد و در پایان به مقدار ثابتی رسید. نتایج نشان داد که فرسایش شیار به شدت تحت تأثیر شدت جریان قرار دارد و مقدار آن طی زمان تغییر می‌کند و این تغییرات مستقل از تولید جریان بوده، به فراهمی ذرات قابل انتقال در شیار وابسته است.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، حجم رواناب، فرسایش شیار، فراهمی ذرات خاک، الگوی کاهشی فرسایش

مقدمه

مناطق بالادست خطرناک است. وجود سازندهای حساس به فرسایش و در نتیجه فرسایش‌پذیری خاک بالادست و پوشش گیاهی ضعیف شرایط را برای وقوع

فرسایش شیار به‌عنوان یکی از اشکال مهم فرسایش خاک، به‌ویژه در دامنه‌های تحت کشت و

اثر گذار باشد و جدایش ذرات خاک را به صورت موضعی تحت تأثیر خود قرار دهد. وجود تصادفی این رسوبات فراهم در بخش‌های مختلف شیار که به وسیله برخی پژوهشگران نیز گزارش شده است (Heimsath و همکاران، ۲۰۰۱؛ Lisle و همکاران، ۱۹۹۸)، موجب افزایش تغییرات داده‌های رسوب شده است. Karimi و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی، ضریب تغییرات مکانی و زمانی هدرروی خاک تحت جریان متمرکز در شیارهای زراعت گندم دیم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ضریب تغییرات در بازه زمانی انتهایی و ابتدایی بیشتر از بازه میانی است، ولی بین این بازه‌ها تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. علت آن را می‌توان به وجود رسوبات فراهم در مراحل اولیه و زیرخوردگی و ریزش دیواره‌ها در مراحل پایانی نسبت داد. بررسی مکانی مقدار ضریب تغییرات نرخ جدایش نشان داد که این عامل در مقطع ابتدایی شیارها از مقاطع بعدی در سطح بسیار بیشتر بود، در حالی که بین مقاطع دیگر اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. نتایج مطالعه Vaezi و Foroumadi (۲۰۱۷) در زمینه تغییرات زمانی تولید جریان و فرسایش شیار در خاک مارنی تحت شدت‌های مختلف باران نشان داد که با تغییر شدت باران، آستانه وقوع فرسایش شیار و اوج آن طی بارندگی تغییر کرد. همچنین، روند تغییرات فرسایش شیار طی بارندگی، با افزایش شدت بارندگی شدت یافت. در زمان‌های اولیه بارندگی، وابستگی فرسایش شیار به دبی جریان بیشتر بود در حالی که در زمان‌های پایانی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات فرسایش‌پذیر در زمان‌های قبل، الگوی تغییرات فرسایش شیار شبیه به دبی جریان نیست.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد، مطالعات اندکی در مورد تغییرات زمانی فرایندهای رواناب و هدررفت خاک در شیارهای کشت انجام گرفته، اغلب تحقیقات مربوط به بررسی کلی این فرایندها در ابعاد حوزه آبخیز یا مقیاس رودخانه بوده است و اغلب پژوهش‌های صورت گرفته تغییرات مکانی را مدنظر قرار داده‌اند. با توجه به اهمیت فرسایش شیار در اراضی کشاورزی شیب‌دار، بررسی تغییرات زمانی فرایندهای فرسایش شیار در آن‌ها حائز

جریان‌های متمرکز روی دامنه‌ها به‌ویژه به هنگام بارندگی‌های شدید فراهم می‌آورد (Vaezi و Gharehdaghlili، ۲۰۱۳). ویژگی‌های خاک مانند ظرفیت نفوذ آب به خاک، محتوای رطوبتی و فرسایش‌پذیری خاک که مؤثر بر تولید رواناب و رسوب هستند، دچار تغییرات زیادی هستند (Seeger، ۲۰۰۷) و به دلیل تغییرات این ویژگی‌ها تولید رواناب و رسوب نیز غیریکنواخت و متغیر می‌باشد (Vaezi و همکاران، ۲۰۱۰). تخمین دقیق رواناب و رسوب از اهمیت بالایی برخوردار است و به دلیل گوناگونی عوامل مؤثر در ویژگی‌های خاک، فرایندهای تولید رواناب و رسوب نیز پیچیده است و دارای تغییرات مکانی و زمانی است (Li و Gao، ۲۰۱۵؛ Vaezi و همکاران، ۲۰۱۰؛ DE Sutter و همکاران، ۲۰۰۱). مطالعات نشان داده است که افزون بر این که تولید رواناب و رسوب تحت تأثیر تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک است، قابلیت خاک در تولید رواناب و رسوب طی زمان نیز ثابت نیست (Niu، ۲۰۲۰).

مطالعه Chalov و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد، سهم زیادی از انتقال رسوب (۸۰-۷۰ درصد) مربوط به زمان اوج جریان است. Yu و همکاران (۲۰۱۴) نیز با بررسی تغییرات جدایش ذرات خاک در زمین‌های کشاورزی در کشور چین، دریافتند که جدا شدن ذرات خاک به صورت معنی‌داری با گذشت زمان تغییر می‌کند. Franti و همکاران (۱۹۷۵) نشان دادند که فرسایش‌پذیری خاک پس از عملیات خاکورزی (مراحل اولیه فرسایش) بیشترین مقدار خود را دارد و این به دلیل سست شدن و از هم جدا شدن ذرات خاک در اثر شخم است. انتقال ذرات خاک بر اثر جریان متمرکز در فرسایش شیار در زمان‌های مختلف متفاوت است و در بازه‌های زمانی ابتدایی به دلیل فراهمی بیشتر ذرات خاک بیشتر است، زیرا انرژی رواناب صرف انتقال این ذرات خاک می‌شود (Giménez و همکاران، ۲۰۱۲؛ Wirtz و همکاران، ۲۰۱۲). Niu و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که جریان پس از رسیدن به گنجایش انتقال رسوب در طول شیار، تنها به انتقال رسوب بالادست می‌پردازد. این در حالی است که به عقیده Cremers و همکاران (۱۹۹۶) تغییرات موضعی و تصادفی بستر شیارها می‌تواند در عوامل هیدرولیکی

آزمایش در سه تکرار برای هر دبی جریان انجام گرفت. در دبی‌های کمتر از ۰/۵ لیتر بر دقیقه، هدررفت خاک مشاهده نشد و دبی‌های بالاتر، غیرواقعی بوده، با شرایط بارندگی‌های منطقه قابل وقوع نیستند (Vaezi و Heidari, ۲۰۱۹). از آنجا که مشخصات هیدرولیکی جریان و حتی جدا شدن ذرات خاک بسیار حساس به رطوبت اولیه خاک هستند، برای این منظور قبل از شروع آزمایش، شیارها ابتدا به‌وسیله گونی نخی پوشانده شدند و به‌صورت ثقلی اشباع شده، ۲۴ ساعت بعد که خاک به ظرفیت مزرعه رسید، آزمایش آغاز شد. ظرفیت زراعی بالاترین حد نگهداری رطوبت در خاک است و در این حد رطوبتی وقوع فرسایش شیاری تسهیل شده و مقایسه تأثیر رفتار جریان بر فرسایش شیاری ممکن می‌شود (Shen و همکاران، ۲۰۱۹).

به‌منظور جلوگیری از کنده شدن سر شیار و حرکات ذرات خاک در ابتدای شیار، حوضچه‌ای با پوشش پارچه‌ای یا گونی نخی (شکل ۲) ایجاد تا ورود جریان آب به شیارها آرام و ثابت صورت گیرد (Govers, ۲۰۰۷). در بازه زمانی ۶۰ دقیقه و به فواصل زمانی پنج دقیقه (پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ دقیقه) در انتهای هر یک از شیارهای مورد مطالعه نمونه‌های رواناب و رسوب در ظروف با حجم مشخص جمع‌آوری شد (شکل ۲). پس از انتقال نمونه‌های همگن رواناب و رسوب به آزمایشگاه، رسوب به‌وسیله کاغذ صافی واتمن از رواناب جدا و رسوب باقی‌مانده بر روی کاغذ صافی در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد (Auerswald و همکاران، ۲۰۰۹) به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس، رسوب اندازه‌گیری شده در واحد سطح شیار تقسیم شد و مقدار رسوب (هدررفت خاک) بر حسب گرم بر متر مربع گزارش شد.

در هر یک از زمین‌ها، نمونه‌برداری مرکب خاک (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) انجام شد. نمونه‌های خاک ابتدا خشک و پس از عبور دادن از الک دو میلی‌متری به آزمایشگاه منتقل شد. توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (Gee و Bauder, ۱۹۸۶)، چگالی ظاهری خاک به روش سیلندر فلزی (Blake و Hartge, ۱۹۸۶)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع به‌وسیله

اهمیت است. بدیهی است که مطالعه فرایندهای رواناب و هدررفت خاک تحت دبی‌های مختلف و طی زمان‌های مختلف کاری دشوار است. بنابراین، هدف از این تحقیق بررسی تغییرات زمانی تولید رواناب و هدررفت خاک در شیارهای کشت گندم دیم بود.

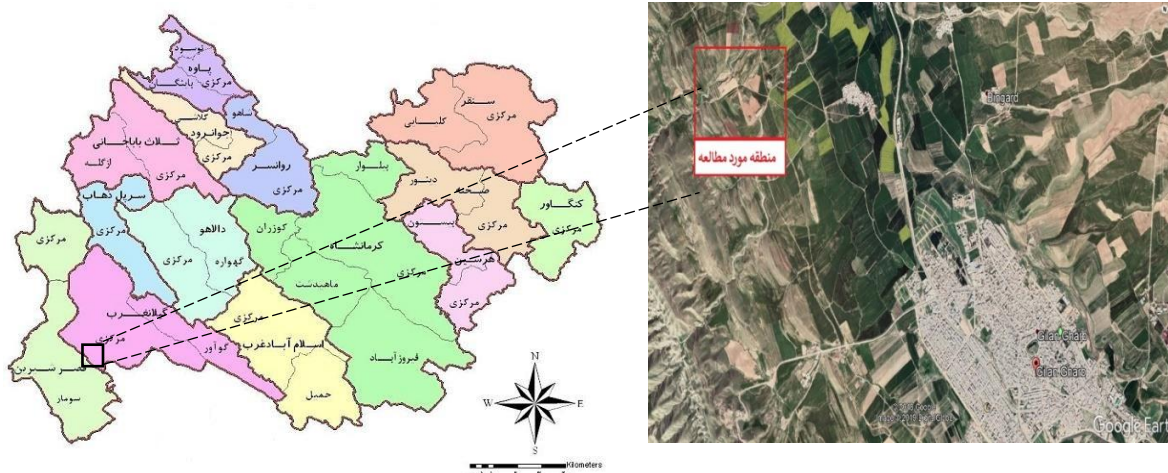
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در ۱۰ کیلومتری شهرستان گیلان‌غرب، در جنوب غربی استان کرمانشاه با طول جغرافیایی ۵۵° ۴۵' و عرض جغرافیایی ۷' ۳۴° واقع شده است (شکل ۱). گیلان‌غرب در ارتفاع ۸۰۴ متری از سطح دریا واقع شده و متوسط بارندگی بلندمدت آن ۳۸۴ میلی‌متر بوده، دارای اقلیم نسبتاً گرم و نیمه‌خشک می‌باشد. کشت غالب در منطقه مورد مطالعه گندم دیم است و در اراضی شیب‌دار عمدتاً خاکورزی در راستای شیب صورت می‌پذیرد. زمین‌های شیب‌دار منطقه در فصل بارندگی فاقد هرگونه پوشش بوده، با توجه به ایجاد شخم در راستای شیب به‌وسیله کشاورزان، مستعد فرسایش خاک هستند. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه و وضعیت خاکورزی آن را نشان می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه سه گندم‌زار دیم تحت شرایط آیش با شیب حدود ۱۵ درصد در جهت جنوبی انتخاب و در هر گندم‌زار ابتدا به‌وسیله گاواهن برگردان‌دار شخم به موازات شیب انجام گرفت. برای ایجاد نوارهای کشت، از ردیف‌کار استفاده و نوارها یا جویچه‌های کشت به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، فاصله ۳۰ سانتی‌متر (Vaezi و Heidari, ۲۰۱۹) و به طول پنج متر ایجاد شدند. لازم به ذکر است که با توجه به شیب‌دار بودن و همچنین، وجود غیریکنواختی در راستای شیب در گندم‌زارهای منطقه و همچنین، رسیدن جریان آب به حد بحرانی در شیارها، طول شیارها پنج متر در نظر گرفته شد.

برای بررسی تولید رواناب و هدررفت خاک از دبی‌های جریان برابر ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه استفاده شد. این دبی‌ها برای شبیه‌سازی سنجش فرسایش شیاری ناشی از بارندگی‌های منطقه مورد مطالعه با توجه به آمار بارندگی ۳۰ ساله آن منطقه لحاظ شده‌اند. برای شبیه‌سازی جریان آب داخل شیارها از مخازن آب مجهز به فشارسنج استفاده شد.

SPSS22 استفاده شد. ابتدا، نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها بر مبنای تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها انجام شد. برای بررسی تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های مورد آزمایش از تجزیه واریانس یک طرفه استفاده شد. سپس، مقایسه میانگین بین بازه‌های زمانی پنج دقیقه‌ای از نظر دبی جریان، حجم رواناب و هدررفت خاک تولیدی در شیارهای کشت به روش آزمون دانکن در سطح آماری ۹۵ درصد تعیین شد.

EC متر (Rhoades, ۱۹۹۶)، اسیدیته خاک در عصاره اشباع به وسیله pH متر (McLean, ۱۹۸۲)، ماده آلی خاک به روش واکلی بلاک (Walkly و Black, ۱۹۸۴)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال (Page, ۱۹۸۲) و ضریب آبگذری اشباع به روش استوانه مضاعف (Haise و همکاران, ۱۹۵۶) اندازه‌گیری شدند. پس از جمع‌آوری و ثبت داده‌ها در محیط نرم‌افزاری Excel برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه واقع در استان کرمانشاه، شهرستان گیلان غرب



شکل ۲- نمای از گندم‌زار و شیارهای تحت کشت (الف)، استقرار لوله و مخزن رواناب و رسوب در انتهای نوار کشت (ب) و حوضچه با پوشش پارچه‌ای (گونی نخی) در ابتدای شیار (ج)

شن (۲۹/۸ درصد)، سیلت (۵۴/۸ درصد) و رس (۱۵/۴ درصد)، خاک گندم‌زارهای مورد بررسی در طبقه بافتی لوم-سیلتی قرار گرفتند. توزیع اندازه ذرات خاک نشان‌دهنده مقادیر بالای سیلت (میانگین ۵۴/۸

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک گندم‌زار: نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک زمین‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به میانگین درصد

خاک و در نتیجه، کاهش رواناب را به دنبال خواهد داشت. ضریب تغییرات بسیاری از ویژگی‌های خاک به استثنای ماده آلی کم است که نشان از همگن بودن خاک‌های مورد مطالعه دارد. کربنات کلسیم معادل نیز از مقادیر بالایی برخوردار است (میانگین ۳۷/۷ درصد) و خاک کشتزار جزء خاک‌های آهکی به شمار می‌رود. Giménez و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که خاک‌های آهکی با میزان آهک عمدتاً در اندازه رس و سیلت فرسایش‌پذیری بیشتری دارند. این موضوع به حضور آهک در اندازه سیلت و عدم پایداری خاکدانه‌های بزرگ که منجر به تشکیل سله سطحی و پر شدن منافذ خاک می‌شود، ارتباط داده شده است.

درصد نسبت به شن و رس (به ترتیب میانگین ۲۹/۸ و ۱۵/۴ درصد) در اراضی کشاورزی دیم منطقه مورد مطالعه بود. با توجه به حساسیت بالای ذره سیلت به فرسایش می‌توان گفت، منطقه مورد مطالعه مستعد فرسایش آبی بود. از سویی دیگر، مقدار ماده آلی خاک اندازه‌گیری شده کمتر از یک درصد بود (میانگین ۰/۷۷ درصد) که به علت نقشی که ماده آلی در نفوذپذیری خاک و خاکدانه‌سازی دارد، می‌توان گفت که میزان نفوذپذیری خاک کم است و در نهایت، می‌تواند شرایط را برای تولید رواناب و فرسایش خاک فراهم کند. در این زمینه Siegrist و همکاران (۱۹۹۸) بیان کردند که وجود ماده آلی در خاک موجب افزایش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب و افزایش نفوذپذیری

جدول ۱- مشخصه‌های آماری متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه

متغیر	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
شن (درصد)	۲۶	۳۰	۲۹/۸	۲/۸۲	۹/۴۶
سیلت (درصد)	۴۹	۵۹	۵۴/۸	۳/۹۷	۷/۲۴
رس (درصد)	۱۴	۱۸	۱۵/۴	۱/۷۲	۱۱/۲۳
اسیدیته (pH)	۷/۲۷	۷/۵۵	۷/۴۱	۰/۰۸	۱/۱۵
هدایت الکتریکی (dS.m^{-1})	۰/۴۶۵	۰/۹۳۵	۰/۵۸۹	۰/۱۵	۲۵/۰۶
چگالی ظاهری (g.cm^{-3})	۱/۴۰	۱/۵۱	۱/۴۴	۰/۰۴	۲/۵۱
ماده آلی (درصد)	۰/۳۴	۱/۴۳	۰/۷۷	۰/۳۲	۴۲/۱۹
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۲۶/۳	۵۹/۷	۳۷/۷	۱۲/۰۷	۳۲/۰۱
ضریب آبگذری اشباع (cm.h^{-1})	۱/۹۱	۳/۴۲	۲/۶۸	۰/۶۲۸	۲۳/۴۰

بود (۰/۴۷ لیتر) و بیشترین حجم رواناب تولیدی در دبی دو لیتر بر دقیقه و برابر ۷/۶۵ لیتر ثبت شد. مجموع کل رواناب تولیدی طی مدت ۶۰ دقیقه در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه، ۱۲/۳۳ و در دبی دو لیتر بر دقیقه، ۶/۷۹ لیتر بود. همچنین، با توجه به نتایج جدول ۲ در دبی جریان ۰/۵ لیتر بر دقیقه با توجه به مدت زمان ۶۰ دقیقه از ابتدا تا انتهای آزمایش ۳۰ لیتر آب مصرف شد که ۱۲/۳۳ لیتر از آن به صورت رواناب (۴۱/۱ درصد) و ۱۷/۶۷ لیتر در خاک نفوذ کرد (۵۸/۹ درصد). افزون بر آن، در دبی جریان یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه با توجه به مدت زمان ۶۰ دقیقه از ابتدا تا انتهای آزمایش به ترتیب ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ لیتر آب مصرف شد که به ترتیب ۵۰/۳۵، ۷۴/۷۸ و ۸۱/۴۳ لیتر از آن به صورت رواناب (۸۴، ۸۳ و ۶۷/۸ درصد) و

رواناب و هدررفت خاک در شیارهای کشت: نتایج مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب و هدررفت خاک در شیارهای کشت در جدول ۲ ارائه شده است. کمترین مقدار هدررفت خاک مربوط به دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه و برابر با ۲/۶۶ گرم بر متر مربع بود و بیشترین مقدار هدررفت خاک تولیدی در دبی دو لیتر بر دقیقه و برابر ۸۵/۳۳ گرم بر متر مربع ثبت شد. مجموع کل هدررفت خاک پس از مدت زمان ۶۰ دقیقه از ابتدای شروع آزمایش و همچنین، میانگین هدررفت خاک در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۷۶/۳۴ و ۶/۳۶ گرم بر متر مربع و در دبی دو لیتر بر دقیقه به ترتیب ۳۶۰/۴۴ و ۳۰/۰۴ گرم بر متر مربع بود. همچنین، با توجه به نتایج جدول ۲ حجم رواناب مربوط به دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه دارای کمترین مقدار

در شیارهای کشت بیشتر از میزان افزایش رواناب تولیدی است، بنابراین می‌توان گفت که وابستگی هدررفت خاک به دبی جریان بیشتر از وابستگی تولید رواناب به دبی جریان است. این مسئله اهمیت تاثیر دبی جریان بر فرسایش شیاری و مدیریت آن در راستای جلوگیری گسترش فرسایش شیاری را به خوبی نشان می‌دهد (Niu و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج به‌دست آمده با یافته‌های Niu و همکاران (۲۰۲۰) که فرسایش شیاری را تحت جریان متمرکز شبیه سازی شده مورد بررسی قرار دادند، مطابقت دارد.

مابقی در خاک نفوذ کرد (به ترتیب ۱۶، ۱۷ و ۳۲/۲ درصد).

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، با تبدیل واحد میانگین هدررفت خاک، میزان هدررفت خاک در یک شیار به ابعاد طول پنج متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه برابر ۰/۷۳۶ تن در هکتار و میزان هدررفت خاک تحت دبی یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه به ترتیب برابر ۱/۵۲، ۲/۴۱ و ۳/۶۱ تن در هکتار است. همانگونه که مشخص است، با افزایش دبی جریان میزان هدررفت خاک و رواناب تولیدی افزایش یافت، لکن تاثیر افزایش دبی جریان بر هدررفت خاک

جدول ۲- مشخصه‌های آماری رواناب و هدررفت خاک تولیدی در شیارهای کشت در زمان و دبی‌های مختلف

متغیر	دبی (لیتر بر دقیقه)	کمترین	بیشترین	مجموع ۶۰ دقیقه	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
رواناب (لیتر)	۰/۵	۰/۴۷	۱/۶۵	۱۲/۳۳	۰/۴۶	۴۴/۷۸
	۱	۳/۴۷	۴/۹۵	۵۰/۳۵	۰/۴۵	۱۰/۸۲
	۱/۵	۵/۳۶	۶/۹۰	۷۴/۷۸	۰/۵۵	۸/۷۶
	۲	۵/۶۹	۷/۶۵	۸۱/۴۳	۰/۶۶	۹/۸۰
هدررفت خاک ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	۰/۵	۲/۶۶	۱۶/۰۱	۷۶/۳۴	۶/۲۷	۶۵/۷۳
	۱	۲/۶۶	۴۲/۰۳	۱۵۲/۴۴	۱۷/۹۳	۹۴/۱۱
	۱/۵	۶/۶۶	۵۹/۳۳	۲۴۱/۷۸	۳۰/۹۲	۸۴/۴۴
	۲	۱۱/۳۳	۸۵/۳۳	۳۶۰/۴۴	۴۵/۰۶	۷۸/۹۴

پایانی آزمایش به حداکثر خود رسید. این در حالی است که میزان هدررفت خاک در بازه‌های ابتدایی بیشینه مقدار را داشت و با گذشت زمان کاهش یافت و در بازه‌های زمانی پایان آزمایش به کمینه مقدار خود رسید.

افزایش دبی جریان از یک سو به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک، منجر به کاهش بیشتر نفوذ آب باران و در نتیجه، تولید سریع رواناب و افزایش میزان آن می‌شود. افزایش دبی جریان می‌تواند افزایش بیشتر رواناب، هدررفت خاک و در نتیجه تغییر غلظت هدررفت خاک را در پی داشته باشد. در پژوهشی Vaezi و Vatani (۲۰۱۴) نشان دادند که میزان رواناب و هدررفت خاک در شیارها طی بارندگی به شدت تغییر می‌کند و به‌طور کلی در اوایل بارندگی هدررفت خاک در شیارها کم بوده و با گذشت زمان با انتقال ذرات فرسایش‌پذیر، هدررفت خاک در شیارها افزایش

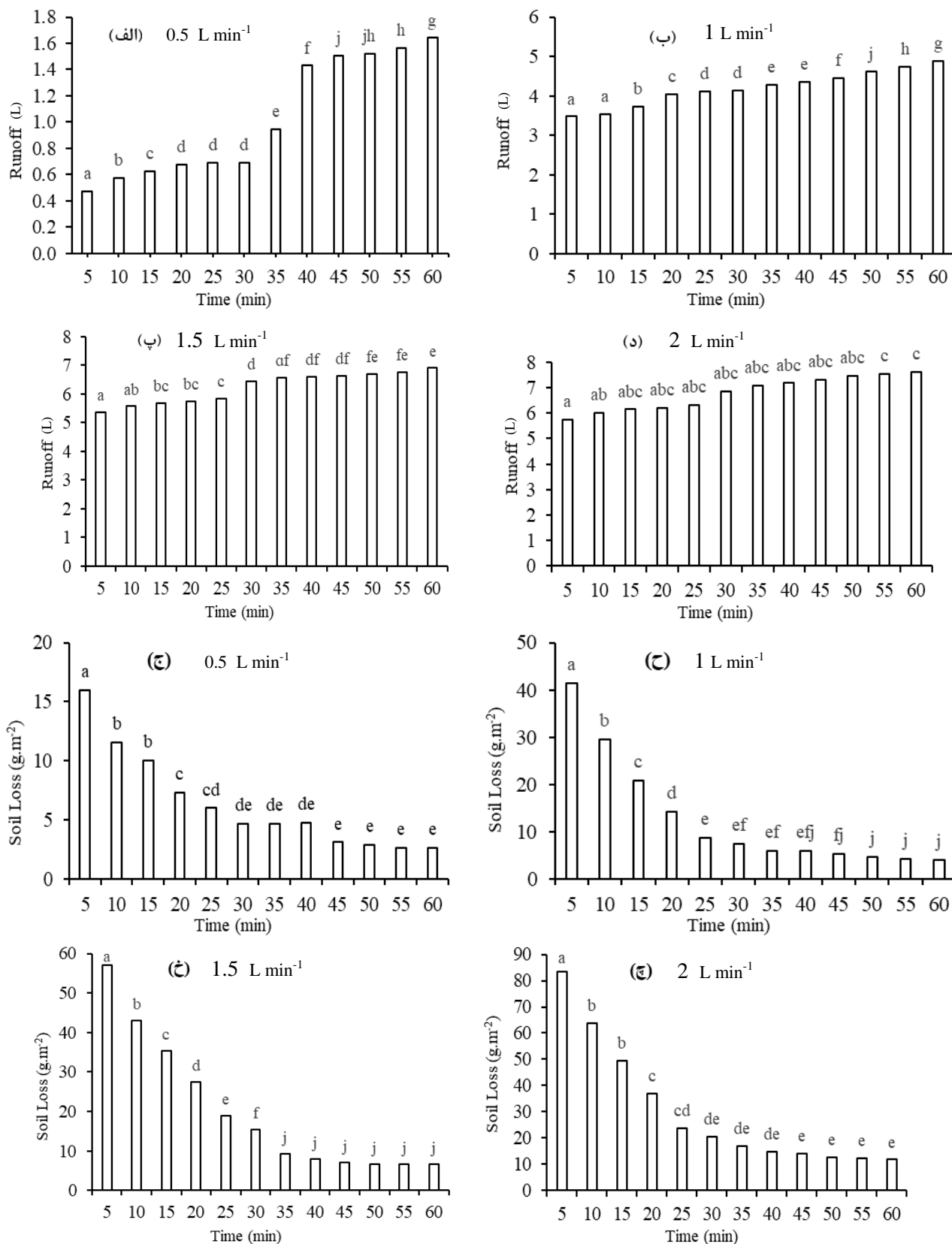
تفاوت تولید زمانی رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های مختلف جریان: نتایج تجزیه واریانس تفاوت زمانی متغیرهای رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه در جدول ۳ ارائه شده است. در تمامی دبی‌های مورد مطالعه تاثیر بازه‌های زمانی مختلف بر رواناب معنی‌داری است، همچنین، با توجه به جدول ۳ تاثیر بازه‌های زمانی مختلف بر هدررفت خاک تولیدی در تمامی دبی‌های تحت آزمایش معنی‌دار است. Yu و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تغییرات جدایش ذرات خاک در زمین‌های کشاورزی در کشور چین پرداختند. این پژوهشگران دریافتند که جدا شدن ذرات خاک به‌صورت معنی‌داری با گذشت زمان تغییر می‌کند. در پژوهش حاضر، در تمامی دبی‌های جریان مورد بررسی در شیارهای کشت، با گذشت زمان از آغاز آزمایش میزان رواناب اندازه‌گیری شده افزایش و در بازه زمانی

مختلف (پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ دقیقه) بر متغیرهای رواناب و هدررفت خاک به روش دانکن در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در همه دبی‌های جریان (۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه)، با گذشت زمان حجم رواناب تولیدی افزایش یافت. در دبی‌های پایین (۰/۵ لیتر بر دقیقه) روند افزایش حجم رواناب تولیدی در شیارهای کشت شدیدتر از دبی‌های بالاتر بود. به نظر می‌رسد، در جریان‌های شدیدتر، به دلیل کاهش سریع ظرفیت نفوذ از لحظه آغاز جریان، روند تغییرات زمانی آن تدریجی بود.

می‌یابد و مقدار غلظت رواناب افزایش پیدا می‌کند. در پژوهشی دیگر، Williams و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی خاک‌های منطقه تگزاس آمریکا نشان دادند که طی رخدادهای باران مقدار تولید رواناب نیز به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک افزایش یافت. در پژوهش حاضر نیز با گذشت زمان از آغاز آزمایش و همچنین، با افزایش دبی جریان به تدریج محتوی رطوبتی خاک افزایش و میزان نفوذ آب به خاک کاهش یافت که این عوامل در دبی‌های جریان بالا تأثیر زیادی بر تولید رواناب در شیارهای کشت گذاشت. نتایج مقایسات میانگین تأثیر بازه‌های زمانی

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر تغییرات زمانی بر متغیرهای رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های مختلف جریان

متغیر	دبی جریان	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
رواناب	۰/۵ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۰/۶۳	۲۴۱۰/۴۲	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۰/۰۰۰		
		کل	۳۵	۶/۹۹		
	۱ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۰/۶۱	۶۸۱/۰۱	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۰/۰۰۱		
		کل	۳۵	۶/۸۱		
	۱/۵ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۰/۸۹	۱۸۵/۶۳	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۰/۵۰۰		
		کل	۳۵	۹/۹۵		
	۲ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۱/۲۱	۴/۷۵	۰/۰۰۱
		درون گروه	۲۴	۰/۲۵۵		
		کل	۳۵	۱۹/۴۵		
هدررفت خاک	۰/۵ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۱۲۰/۸۱	۸۲/۰۶	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۱/۴۷۲		
		کل	۳۵	۱۳۶۴/۳۰		
	۱ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۹۶۴/۷۷	۴۶۹/۳۵	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۲/۰۵۶		
		کل	۳۵	۱۰۶۶۱/۸۸		
	۱/۵ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۱۵۵۲/۵۳	۶۹۶/۳۱	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۲/۸۰۶		
		کل	۳۵	۲۱۵۵۶/۲۲		
	۲ لیتر بر دقیقه	بین گروه	۱۱	۳۷۹۴/۵۳	۱۴۶۹/۰۱	۰/۰۰۰
		درون گروه	۲۴	۲/۵۸۳		
		کل	۳۵	۴۱۸۰۹/۸۸		



شکل ۳- مقایسه میانگین آزمایش بر رواناب و هدررفت خاک در بازه‌های زمانی مختلف، (الف) رواناب در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه، (ب) رواناب در دبی یک لیتر بر دقیقه، (پ) رواناب در دبی ۱/۵ لیتر بر دقیقه، (د) رواناب در دبی دو لیتر بر دقیقه، (ج) هدررفت خاک در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه، (ح) هدررفت خاک در دبی یک لیتر بر دقیقه، (خ) هدررفت خاک در دبی ۱/۵ لیتر بر دقیقه، (چ) هدررفت خاک در دبی دو لیتر بر دقیقه

جریان افزایش یافت، اما توانایی حمل جریان کاهش و مقدار هدررفت خاک معلق کمتر شد.

الگوی تغییرات هدررفت خاک تولیدی در دبی‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در ابتدای آغاز آزمایش به علت شستشوی ذرات خاک بستر شیاری ناشی از رواناب ایجاد شده مقادیر بالاتری نسبت به زمان‌های پایانی آزمایش دارد. با آغاز آزمایش تا زمان ۲۰ دقیقه پس از آن میزان هدررفت خاک تولیدی تغییرات کاهشی شدیدی را نشان می‌دهد و پس از آن تا پایان آزمایش الگوی کاهشی یکنواختی را دنبال و در زمان‌های پایانی آزمایش تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. نتایج به دست آمده با یافته‌های Giménez و همکاران (۲۰۱۲) و Wirtz و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. افزایش دبی جریان از یک سو به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک، منجر به کاهش بیشتر نفوذ آب به خاک و در نتیجه تولید سریع رواناب می‌شود. افزایش دبی جریان می‌تواند افزایش بیشتر هدررفت خاک و در نتیجه، تغییر غلظت هدررفت خاک را در پی داشته باشد. بررسی زمانی هدرروی خاک نشان داد که تغییرات در بازه زمانی ابتدایی بیشتر از بازه میانی و پایانی است که علت آن را می‌توان به وجود هدررفت خاکات فراهم در بستر شیاری در مراحل اولیه نسبت به مراحل میانی و پایانی آزمایش نسبت داد. Hogarth و همکاران (۲۰۰۴) با مطالعه تغییرات زمانی و مکانی هدررفت خاک ناشی از فرسایش به این نتیجه رسیدند که غلظت هدررفت خاک در زمان‌های اولیه رخداد فرسایشی زیاد است و با گذشت زمان به سرعت کاهش یافته و به حالت کم و بیش پایدار می‌رسد (Asadi و همکاران، ۲۰۰۷).

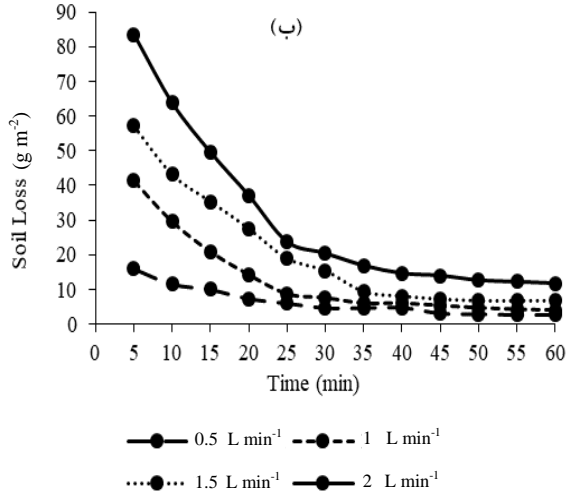
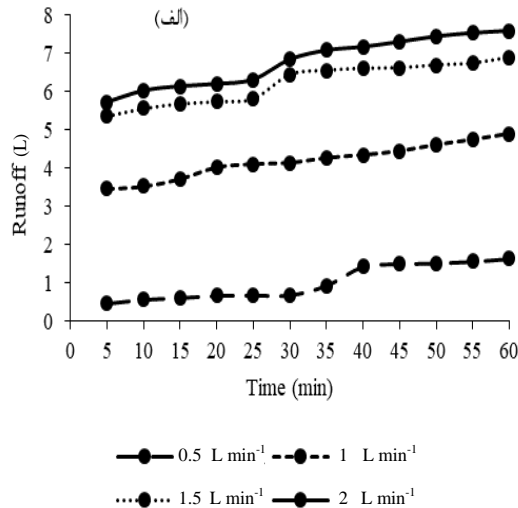
دلیل بالاتر بودن غلظت هدررفت خاک در ابتدای آزمایش را می‌توان ناشی از قرار داشتن جریان در حالت بیشینه توان حمل دانست، زیرا در این شرایط به دلیل عواملی چون شخم و دیسک زدن، فروکشی ناشی از مرطوب شدن ناگهانی خاک و دوره خشکی طولانی تابستانه، محدودیتی از نظر جدایش ذرات وجود ندارد (Morgan، ۲۰۰۵). به بیان دیگر، در ابتدای آزمایش به دلیل وفور ذرات ریز از قبل جدا شده، جریان می‌تواند در حد توان حمل خود ذرات

همچنین، نتایج تأثیر بازه‌های زمانی مختلف بر متغیرهای رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های جریان ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه نشان داد که با گذشت زمان از آغاز آزمایش برخلاف روند افزایشی رواناب، میزان هدررفت خاک تولیدی در جویچه‌های کشت کاهش یافت. روند کاهش هدررفت خاک در زمان‌های ابتدایی (حدود ۳۰ دقیقه اول) شدید و در ادامه تدریجی بود. کاهش فراهمی ذرات فرسایشی در زمان‌های آغازین دلیل موضوع بود و در ادامه با ایجاد شرایط پایدار در شکل شیاری (نوار)، تولید رسوب تغییرات زیادی نداشت. به طور کلی تغییرات زمانی هدررفت خاک بسیار بارزتر از تغییرات زمانی تولید رواناب بود که دلیل آن ایجاد شرایط پایدار در نفوذپذیری خاک و تأثیر آن بر تولید رواناب بود در حالی که تولید رسوب علاوه بر شدت جریان به فراهمی ذرات قابل انتقال در شیاری وابسته است.

الگوی تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک در

دبی‌های جریان: الگوی تغییرات رواناب و هدررفت خاک در شیاریهای کشت در دبی‌های ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه در زمان‌های پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ دقیقه در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی الگوی تغییرات زمانی رواناب نشان داد که مقادیر رواناب در تمامی دبی‌های مورد آزمایش در ابتدای آغاز آزمایش به علت خشک بودن خاک بستر شیاری و نفوذ آب در خاک از مقادیر کمی برخوردار است، لیکن با گذشت زمان و کاهش میزان نفوذ آب در خاک مقادیر رواناب افزایش یافت. افزون بر آن با توجه به شکل ۴، می‌توان گفت که دبی ۰/۵ و دو لیتر بر دقیقه به ترتیب کمترین و بیشترین تأثیر را بر رواناب تولیدی در شیاریهای کشت داشته‌اند. نتایج با یافته‌های Mohammadpour و همکاران (۲۰۱۵) که در زمینه رفتارشناسی فرسایش شیاری، رواناب و غلظت هدررفت خاک در طول شیاری مطالعه می‌کردند، مطابقت دارد. آن‌ها نشان دادند که سرعت رواناب در خاک مرطوب نسبت به خاک خشک بیشتر است. اولین رواناب جاری شده در خاک خشک با وجود حداقل سرعت جریان بیشینه مقدار غلظت هدررفت خاک را نشان داد. در طول زمان و افزایش طول شیاری سرعت

با اتمام ذرات از قبل جدا شده، به شرایط محدودیت جدایش تغییر فاز می‌یابد که با توجه به توان کم و بیش ثابت جداسازی جریان این حد ثابت می‌ماند.



شکل ۴- رابطه بین رواناب و زمان (الف) و هدررفت خاک و زمان (ب) در دبی‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر بر دقیقه

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، داده‌های هدررفت خاک در دو گروه شامل گروه اول مربوط به دبی ۰/۵، یک، ۱/۵ لیتر بر دقیقه و گروه دوم مربوط به دبی یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه قرار گرفتند که بیانگر آن است که میزان هدررفت خاک اندازه‌گیری شده در شیارهای کشت تنها در دبی ۰/۵ و دو لیتر بر دقیقه تفاوت معنی‌داری نشان داد و تفاوت میزان هدررفت خاک در سایر دبی‌های معنی‌دار نبود. نتایج همچنین نشان داد که افزایش حجم رواناب و مقدار هدررفت خاک با افزایش دبی جریان در شرایط ناپایدار اولیه (زمان پنج الی ۲۰ دقیقه) بسیار بیشتر از شرایط پایدار در زمان‌های انتهایی آزمایش است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان رواناب تولیدی در دبی ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه اختلاف معنی‌داری نداشتند، در حالی که میزان رسوب اندازه‌گیری شده در دبی ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه معنی‌داری نشان داد و میزان رسوب در دبی دو لیتر بر دقیقه بیشتر از دبی ۱/۵ لیتر بر دقیقه بود که علت آن را می‌توان به فراهمی ذرات خاک داخل شیار نسبت داد. همچنین، با افزایش دبی جریان ورودی به شیار، میزان رواناب تولیدی و انرژی برشی آن افزایش

خاک را منتقل کند. با گذشت زمان و کاهش میزان ذرات از قبل جدا شده، شرایط جریان از حالت حد توان حمل خارج شده، طی حدود ۲۰ تا ۲۵ دقیقه

تغییرات متغیرهای رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های مختلف جریان: نتایج تجزیه واریانس تأثیر دبی‌های متفاوت جریان (۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه) بر رواناب و هدررفت خاک در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تأثیر دبی جریان بر رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های متفاوت معنی‌دار است، لکن تأثیر دبی جریان بر رواناب بیشتر از هدررفت خاک در شیارهای کشت بود. مقایسات میانگین رواناب و هدررفت خاک در دبی‌های مختلف جریان به روش دانکن در سطح آماری ۹۵ درصد در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس شکل ۵، داده‌های رواناب در سه گروه شامل گروه اول مربوط به دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه، گروه دوم مربوط به دبی یک لیتر بر دقیقه و گروه سوم شامل دبی ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه جای گرفتند. حجم اندازه‌گیری شده رواناب در دبی ۰/۵ با میزان رواناب در دبی یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه تفاوت معنی‌دار دارد. همچنین، رواناب در دبی یک لیتر بر دقیقه با دبی ۰/۵، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه تفاوت معنی‌دار نشان داد. این در حالی است که میزان رواناب اندازه‌گیری شده در شیارهای کشت در دبی ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه تفاوت معنی‌داری نشان ندادند.

برای شبیه‌سازی فرسایش شیاری به‌وسیله جریان کانالی تمرکز یافته مطالعه می‌کردند، مطابقت دارد. نتایج حاصل از پژوهش این محققین نتایج نشان داد که میزان هدررفت خاک با افزایش سرعت جریان افزایش یافت که نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر فرسایش شیاری است. همچنین، میزان هدررفت خاک در بخش اولیه شیاری به سرعت افزایش یافت در حالی که افزایش غلظت هدررفت خاک در طول شیاری کاهش نشان داد (Chen و همکاران، ۲۰۱۴).

می‌یابد که سبب تضعیف ساختمان خاک و افزایش غلظت رسوب و هدررفت خاک می‌شود (Zhi-Qiang و همکاران، ۲۰۱۴).

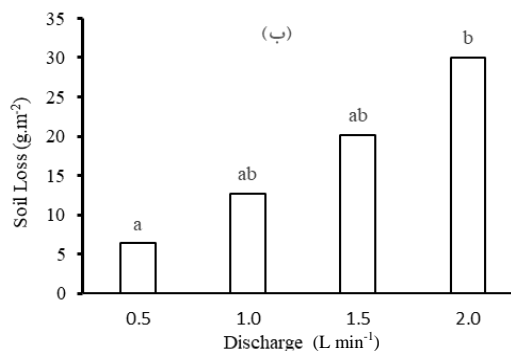
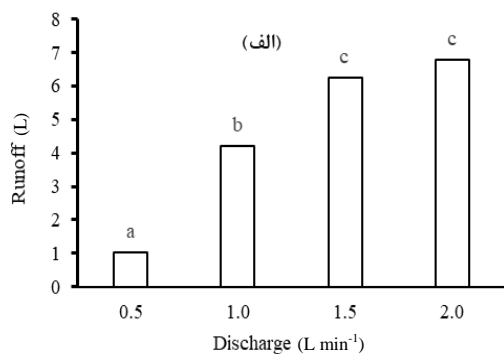
Ni و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی تغییرات رواناب و رسوب تحت بارندگی‌های مختلف دریافتند که میزان افزایش رواناب و رسوب با افزایش بارندگی بیشتر از میزان کاهش آن‌ها با کاهش بارندگی بود، همچنین، میزان حساسیت رواناب به تغییرات بارندگی بیشتر از رسوب بود. نتایج با یافته‌های Chen و همکاران (۲۰۱۴) که در زمینه ارائه روش تجربی بهبود یافته

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر تغییرات دبی جریان بر متغیرهای رواناب و هدررفت خاک

متغیر	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
رواناب	بین گروه	۳	۸۱/۴۹	۲۸۱/۳۳	۰/۰۰۰
	دون گروه	۴۴	۰/۲۹		
	کل	۴۷			
هدررفت خاک	بین گروه	۳	۲۸۰۰/۱۷	۴/۹۱	۰/۰۰۵
	دون گروه	۴۴	۵۶۹/۲۳		
	کل	۴۷			

ذرات قابل انتقال در بستر شیاری نیز عاملی دیگر است که موجب تفاوت بین دبی‌های جریان از نظر تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک می‌شود. به نظر می‌رسد، با افزایش دبی جریان، میزان تخریب خاکدانه‌های بستر شیاری در بازه‌های زمانی ابتدایی بیشتر است و در نتیجه ذرات قابل انتقال بیشتری در بستر شیاری در معرض جریان رواناب قرار می‌گیرند.

نتایج تجزیه واریانس تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک بین دبی‌های مختلف جریان نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین دبی‌های جریان از نظر تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک وجود دارد (جدول ۴). علت این موضوع به دلیل نقش مهم دبی جریان در افزایش تأمین آب در جویچه‌های کشت در بازه‌های زمانی پنج دقیقه و در نتیجه تولید رواناب بیشتر در شیاریها بود. تغییرات ساختمان خاک و میزان



شکل ۵- مقایسه میانگین رواناب (الف) و هدررفت خاک (ب) در دبی‌های ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه

نتیجه‌گیری

نسبت به مراحل میانی و پایانی آزمایش داشت. در زمان‌های ابتدایی وابستگی میزان هدررفت خاک به دبی جریان بیشتر است و در زمان‌های پایانی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات فرسایش‌پذیر در زمان‌های قبل، الگوی تغییرات فرسایش شیاری شبیه به الگوی تغییرات دبی جریان نیست. به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که پیش‌بینی تغییرات زمانی هدررفت خاک منوط به آگاهی از دبی جریان می‌باشد. با آگاهی از دبی جریان ایجاد شده بر اثر بارندگی یا آبیاری در شیارهای کشت، می‌توان زمان تولید بیشترین فرسایش شیاری را پیش‌بینی کرد. شناخت این موضوع می‌تواند در برنامه‌ریزی زمانی اقدامات مدیریتی برای کاهش فرسایش شیاری مانند عملیات خاکورزی و روش‌های آبیاری اراضی کشاورزی موثر باشد. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند به گسترش معادلاتی برای کمی‌سازی تغییرات زمانی فرسایش شیاری در دبی‌های مختلف جریان ناشی از بارندگی یا آبیاری اراضی کشاورزی و در نهایت مدل‌سازی دقیق این نوع فرسایش خاک کمک کند.

نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان میزان رواناب و هدررفت خاک تولیدی در شیارهای کشت افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه کمترین و دبی دو لیتر بر دقیقه بیشترین مقادیر رواناب و هدررفت خاک را در تمامی بازه‌های زمانی مورد مطالعه به خود اختصاص دادند. نتایج تغییرات میزان رواناب و هدررفت خاک در شیارهای کشت گندم در بازه‌های زمانی پنج دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه و در دبی‌های ۰/۵، یک، ۱/۵ و دو لیتر بر دقیقه نشان داد که روند تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک تحت دبی‌های مختلف جریان مشابه نیست. شدت تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک تولیدی با افزایش دبی جریان در شیارهای کشت افزایش می‌یابد. تولید رواناب در مراحل ابتدایی به علت نفوذ آب در بستر شیار کم و با گذشت زمان تا مراحل پایانی آزمایش افزایش نشان داد، این در حالی است که میزان هدررفت خاک تولیدی در تمامی دبی‌های مورد مطالعه در مراحل ابتدایی به دلیل فراهم بودن هدررفت خاک و شستشوی بستر شیار مقادیر بیشتری

منابع مورد استفاده

- Asadi, H., H.W. Ghadiri, C. Rose, B. Yu and J. Hussein. 2007. An investigation of flow-driven soil erosion with no inflow: a numerical solution with spatial and temporal effects of sediment settling velocity characteristics. *Journal of Hydrology*, 294: 229-240.
- Auerswald, K., P. Fiener and R. Dikau. 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany, a meta-analysis. *Geomorphology*, 111: 182-193.
- Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd Edition*. Agronomy Monograph, Vol. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, Pages 363-375.
- Chalov, S.R., J. Jarsjö, N.S. Kasimov, A.O. Romanchenko, J. Pietróń, J. Thorslund and E.V. Promakhova. 2014. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 73: 1-18.
- Chen, X.Y., Y. Zhao, B. Mo and H.X. Mi. 2014. An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *PLoS ONE*, 9(6): e99660. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099660>.
- Cremers, N., P. Van Dijk, A. De Roo and M. Verzaandvoort. 1996. Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modelling. *Hydrological Processes*, 10: 1035-1047.
- DE Sutter, R., R. Verhoeven and R. Krein. 2001. Simulation of sediment transport during flood events, laboratory work and field experiments. *Hydrological Sciences Journal*, 46(4): 599- 610.
- Franti, T.G., J.M. Lafflen and D.A. Watson. 1985. Soil erodibility and critical shear under concentrated flow. *American Society of Agricultural Engineers*, 42: 329-335.
- Gee, G.H. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In: A. Klute, (Ed.), *Methods of soil Analysis. Physical Properties*. SSSA, Madison, WI, Pages 383-411.
- Giménez, R., J. Casali, I. Grande, J. Díez, M.A. Campo, J. Álvarez-Mozos and M. Goni. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre, Spain. *Agricultural Water Management*, 110: 1-8.

11. Govers, G., R. Giménez and K. Van Oost. 2007. Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth-Science Reviews*, 84: 87-102.
12. Haise, H.R., W.W. Donnan, J.T. Phelan, L.F. Lawhon and D.G. Shockley. 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. Publ. ARS41 USDA. Agricultural Research Service and Soil Conservation Service, Washington DC.
13. Heimsath, A.M., W.E. Dietrich, K. Nishiizumi and R.C. Finkel. 2001. Stochastic processes of soil production and transport: erosion rates, topographic variation and cosmogenic nuclides in the Oregon Coast Range. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 531-552.
14. Hogarth, W.L., C.W. Rose, J.Y. Parlange, G.C. Sander and G. Carey. 2004. Soil erosion due to rainfall impact overland flow under four typical crops in the loess plateau of China. *Biosystems Engineering*, 122: 139-148.
15. Karimi, H., A. Lakzian, G. Haghnia, H. Emami and M. Sofi. 2014. Spatial and temporal coefficient of variations of soil loss under concentrated flow in furrows of dryland wheat. *Watershed Engineering and Management*, 7: 1-14 (in Persian).
16. Li, T., and Y. Gao. 2015. Runoff and sediment yield variations in response to precipitation changes: a case study of Xichuan Watershed in the Loess Plateau, China. *Water*, 7: 5638-5656.
17. Lisle, I., C. Rose, W. Hogarth, P. Hairsine, G. Sander and J.Y. Parlange. 1998. Stochastic sediment transport in soil erosion. *Journal of Hydrology*, 204: 217-230.
18. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin, USA, Pages 199-224.
19. Mohammadpor, S., H. Rohani, H. Ghorbani Vaghei and S.M. Sayedian. 2015. Understanding rill erosion in dry and wet soil conditions. *Environmental Erosion Research*, 6(21): 17-29.
20. Morgan, R.C.P. 2005. *Soil erosion and conservation*. Third Edition, Blackwell Publishing, UK, 316 pages.
21. Niu, Y., Z. Gao, Y. Li, Y. Lou, S. Zhang, L. Zhang, J. Du, X. Zhang and K. Luo. 2020. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: a field runoff plot experiment. *Soil and Tillage Research*, 202: 104-125.
22. Page, A.L. 1982. *Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties*. Soil Science Society of American, Madison, Wisconsin, USA.
23. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, chemical methods*, SSSA, Madison, Wisconsin, USA, Pages 417-436.
24. Seeger, M. 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena*, 71: 56-67.
25. Shen, N., Z. Wang, Q. Zhang, H. Chen and B. Wu. 2019. Modelling soil detachment capacity by rill flow with hydraulic variables on a simulated steep loessal hillslope. *Hydrology Research*, 50(1): 85-98.
26. Siegrist, S., D. Schaub, L. Pfiffner and P. Mader. 1998. Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 69: 253-264.
27. Vaezi, A.R. and A. Vatani. 2014. Determination of rill erodibility in some Zanjan soils under simulated rain. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 71: 59-67 (in Persian).
28. Vaezi, A.R. and H. Gharehdaghlili. 2013. Quantification of rill erosion development in marl soils of Zanjanrood Watershed in north-west of Zanjan, Iran. *Journal of Water and Soil*, 27: 872-881 (in Persian).
29. Vaezi, A.R. and M. Foroumadi. 2017. Temporal variation of runoff production and rill erosion in a marl soil under different rainfall intensities. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(1): 303-309.
30. Vaezi, A.R. and M. Heidari. 2019. Investigating the effect of wheat straw on soil loss by rill erosion in furrows in different growth stages of rainfed wheat. *Journal of Soil Research*, 23(2): 127-140.
31. Vaezi, A.R., H.A. Bahrami, S.H.R. Sadeghi and M.A. Mahdian. 2010. Modeling relationship between runoff and soil properties in dry-farming lands, NW Iran. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7: 2577-2607.
32. Walkly, A. and I.A. Black. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Science Society of America Journal*, 37: 29-38.
33. Williams, B.M., S. Martinez-Mena and L. Deeksb. 2004. Exponential distribution theory and aggregate erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 6: 382-391.
34. Wirtz, S., M. Seeger and J.B. Ries. 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91: 21-34.

35. Yu, Y.C., G.H. Zhang, R. Geng and L. Sun. 2014. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering*, 122: 139-148.
36. Zhi-Qiang, D., L.M.P. João, L. de and J. Hoon-Shin. 2008. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena*, 76: 54-62.