

## تأثیر اندوده سطحی بر فرسایش بین‌شیاری در شیب و شدت بارندگی مختلف در شرایط آزمایشگاهی

محمود سیفی<sup>1\*</sup>، محمد رضا نیشابوری<sup>2</sup>، حسن روحی پور<sup>3</sup> و عباس احمدی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 91/10/17 تاریخ پذیرش: 92/02/28

<sup>1</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2,4</sup> استاد و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>3</sup> استادیار بخش بیابان، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [mahmood\\_seifi2006@yahoo.com](mailto:mahmood_seifi2006@yahoo.com)

### چکیده

پیامد فرسایش بین‌شیاری در هدر رفت خاک و عناصر غذایی به خصوص در اراضی کشاورزی بسیار قابل توجه است. از این رو شناخت دقیق عوامل مؤثر بر آن ضروری است. یکی از این عوامل اندوده سطحی است که بیش‌تر در نواحی خشک و نیمه‌خشک رایج است. تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر اندوده سطحی بر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری ( $K_i$ ) صورت گرفت. به این منظور دو خاک لومی شنی ( $S_1$ ) و لومی رسی ( $S_2$ ) از منطقه ایلخچی و یک خاک رسی ( $S_3$ ) از منطقه کلیر با کاربری زراعی انتخاب شدند. بعد از اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، آزمایش شبیه‌سازی باران با اعمال چهار شدت بارندگی 21، 38، 50 و 81 میلی‌متر بر ساعت در سه شیب 5، 15 و 25 درصد روی هر خاک انجام گرفت. در هر ترکیبی از شیب و شدت بارش، زمان ( $t_{lim}$ ) رسیدن به سرعت نفوذ نهایی اندازه‌گیری و شاخص اندوده سطحی نسبی (RSI) محاسبه شد. نتایج نشان داد که خاک  $S_1$  با داشتن RSI برابر با  $2/23$  و  $t_{lim}$  برابر با 6 دقیقه، به عنوان خاک حساس به تشکیل اندوده سطحی و خاک  $S_3$  با داشتن RSI برابر با  $8/9$  و  $t_{lim}$  برابر با 102 دقیقه به عنوان خاک مقاوم یا با حساسیت کم به تشکیل اندوده سطحی هستند. بررسی فرض  $K_i$  ثابت در شیب‌ها و شدت‌های بارندگی مختلف نشان داد که در خاک‌های  $S_2$  و  $S_3$  تفاوت معنی‌داری بین  $K_i$  در شیب‌های مختلف وجود ندارد. به بیان دیگر فرض  $K_i$  ثابت درست بود. اما در خاک  $S_1$  که بسیار حساس به تشکیل اندوده سطحی بود، تفاوت معنی‌داری (در سطح احتمال 1%) بین  $K_i$  در شیب‌های مختلف مشاهده شد. اما بین  $K_i$ ها در شدت بارش‌های مختلف تفاوت معنی‌داری در هیچ کدام از خاک‌ها مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: اندوده سطحی، خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، شبیه‌ساز باران

## Effects of Surface Seal on Interrill Erodibility at Various Slopes and Rainfall Intensities under Laboratory Conditions

M Seifi<sup>\*1</sup>, MR Neyshabouri<sup>2</sup>, H Rouhipour<sup>3</sup> and A Ahmadi<sup>4</sup>

Received: 6 January 2013 Accepted: 18 May 2013

<sup>1</sup>Former M.Sc Student, Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2,4</sup> Prof., and Assist. Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Assist. Prof., Desert Division, RIF.Tehran, Iran

\*Corresponding Author Email: [mahmood\\_seifi2006@yahoo.com](mailto:mahmood_seifi2006@yahoo.com)

### Abstract

Consequence of interrill erosion is a considerable issue of soil and nutrient losses especially in farmlands. Thus, factors affecting interrill erosion must be well known. The aim of the current study was to investigate the effect of surface sealing on soil interrill erodibility factor ( $K_i$ ). Two sandy loam ( $S_1$ ) and clay loam ( $S_2$ ) soils from Ilkhichi farmlands with low organic matter and high  $K_i$  and one clay soil ( $S_3$ ) from Caleibar farmlands with high organic matter and low  $K_i$  were examined. Several pertinent chemical and physical characteristics of the three soils were measured. Rainfall simulation experiments were carried out on 200 kg of each soil sample under 5, 15, 25 % slopes and 21, 38, 50, and 81 mm/h rainfall intensities. Relative sealing index (RSI) and the time needed to reach to the final infiltration rate ( $t_{lim}$ ) were measured in every combination of slope and rainfall intensity. The results showed that  $S_1$  soil with RSI= 2.23 and  $t_{lim}$ = 6 min was the most sensitive and  $S_3$  with RSI= 8.9 and  $t_{lim}$ = 102 min was the least sensitive to surface sealing. The findings indicated that there were no significant differences among  $K_i$ 's at different slopes and the assumption of constant  $K_i$  for all soils was correct, except for soil  $S_1$ . There were also no significant differences among  $K_i$ 's at different rainfall intensities for the examined soils.

**Keywords:** Rainfall simulator, Semi-arid soils, Surface sealing

### مقدمه

انتقال این ذرات توسط پاشمان و جریان سطحی کم عمق می‌باشد (واتسون و لافلن 1986، کینل 2005). در مورد اهمیت فرسایش بین‌شیاری باید گفت که هرچند میزان هدر رفت خاک ناشی از فرسایش شیاری به مراتب بیش‌تر از فرسایش بین‌شیاری است، ولی به

فرسایش خاک در اراضی بالادست معمولاً به سه جزء فرسایش شیاری، بین‌شیاری و خندق‌تقسیم شده است (میر و همکاران 1975). فرسایش بین‌شیاری شامل جدا شدن ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران و

عنوان یک فاکتور اصلاحی در ضریب فرسایش‌پذیری  $K_i$  در نظر گرفته شده و در معادله اصلی ظاهر نمی‌شود:

$$D_i = K_{iadj} I_e Q_{ir} SDR_{RR} F_{nozzle} [R_s/W] \quad [3]$$

که در آن  $D_i$  شدت فرسایش بین‌شیاری یا جریان عرضی رسوب از نواحی بین‌شیاری  $(kg/m^2/s)$ ،  $K_{iadj}$  فرسایش‌پذیری اصلاح شده  $(kg/s/m^4)$  که با اعمال ضرایبی اصلاحی برای منظور نمودن اثر پوشش، ریشه، سله، شیب، یخ بستن و ذوب شدن از فرسایش‌پذیری بین‌شیاری پایه،  $K_{ib}$  به دست می‌آید،  $I_e$  شدت بارندگی موثر  $(m/s)$ ،  $Q_{ir}$  شدت رواناب بین‌شیاری  $(m/s)$ ،  $SDR_{RR}$  نسبت تحویل رسوب که تابعی از زبری تصادفی، شیب جانبی ردیف و توزیع اندازه ذرات است،  $F_{nozzle}$  یک فاکتور اصلاحی برای به حساب آوردن تغییرات انرژی برخورد قطرات در نازل‌های آبیاری بارانی،  $R_s$  فاصله بین شیارها  $(m)$  و  $W$  عرض شیار  $(m)$  است. فاکتور  $F_{nozzle}$  که یک پارامتر بدون بعد است بجز در آبیاری بارانی در بقیه شبیه‌سازی‌ها باران برابر 1 می‌باشد.

یکی از رخدادهای بسیار مهم که فاکتور فرسایش‌پذیری بین‌شیاری خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد، تشکیل اندوده سطحی است، اندوده سطحی عبارت از فشرده شدن لایه بسیار نازک سطحی خاک و مسدود شدن منافذ آن در اثر نفوذ آب گل‌آلود است که در خاک‌های حساس و در پی متلاشی خاکدانه‌های سطح خاک صورت می‌گیرد. تشکیل این لایه در سطح خاک منجر به تغییر رفتار خاک در مقابل برخورد قطرات باران و جریان رواناب شده و در نتیجه فرآیند فرسایش خاک را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. بررسی‌های میکرومورفولوژی و مطالعات هیدرولیکی نشان می‌دهد که تشکیل اندوده سطحی باعث کاهش تخلخل لایه سطحی و در نتیجه کاهش نفوذپذیری، کاهش زبری سطح خاک در نتیجه افزایش سرعت جریان و افزایش مقاومت برشی خاک در مقابل جریان می‌شود (اسدی و

طور کلی فرسایش بین‌شیاری در مکان‌هایی مانند اراضی مرتعی، زمین‌های شخم نخورده و یا زمین‌هایی که شیب آنها کم است، به عنوان فرآیند غالب فرسایش محسوب می‌شود. از آنجائی که فرسایش بین‌شیاری سهم زیادی در انتقال ذرات ریز خاک دارد، این فرآیند به طور عمده مسئول کاهش حاصلخیزی خاک و آلودگی آب‌های سطحی نیز می‌باشد (میلر و بهارالدین 1987).

فاکتور فرسایش‌پذیری خاک به عنوان یک خصوصیت ذاتی خاک بیانگر آسیب‌پذیری خاک در برابر جدا شدن ذرات و انتقال می‌باشد (رفاهی 1382). تفاوت در فرسایش‌پذیری خاک‌های مختلف با تفاوت در ویژگی‌های آنها در ارتباط است. در مدل‌هایی که در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌اند از جمله در مدل WEPP<sup>1</sup> فرسایش‌پذیری به دو فاکتور فرسایش‌پذیری شیاری  $(K_i)$  و فرسایش‌پذیری بین‌شیاری  $(K_{ib})$  تفکیک گردیده است.

مدل‌های اولیه ارائه شده در مورد این نوع فرسایش، شدت فرسایش بین‌شیاری را تابعی از شدت بارندگی بیان کرده‌اند (میر و هارمون 1984، لین و میر 1989). ولی مدل‌هایی که نقش رواناب را به طور جداگانه در نظر می‌گیرند، برآورد بهتری از فرسایش بین‌شیاری دارند. از این رو زانگ و همکاران (1998) معادله‌ی زیر را ارائه نمودند:

$$D_i = K_i I q^{0.5} S^{2/3} \quad [1]$$

$$K_i = D_i I^{-1} q^{-0.5} S^{-2/3} \quad [2]$$

در روابط مذکور  $S$  عامل شیب،  $I$  (شدت بارندگی)، تعیین کننده جدا شدن ذرات در اثر انرژی قطرات باران و عبارت  $q^{0.5} S^{2/3}$ ، تعیین کننده‌ی قابلیت انتقال رسوب توسط جریان ورقه‌ای است.

در نسخه‌های جدید مدل WEPP (فوستر و همکاران 1995) اثر شیب بر فرسایش بین‌شیاری به

<sup>1</sup>Water erosion prediction project

### مواد و روش‌ها

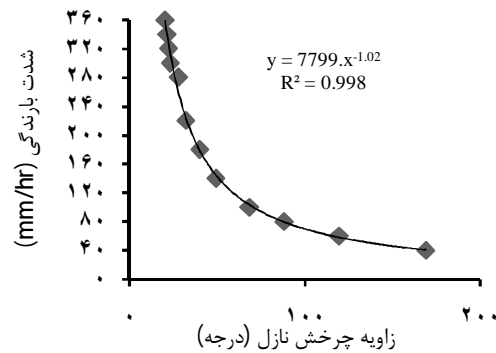
برای اجرای این تحقیق از سامانه شبیه‌ساز باران مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ساخت شرکت دلتا لب فرانسه استفاده شد. این دستگاه از نوع شبیه‌سازهای تحت فشار با نازل جارویی و مجهز به یک فلوم شیب‌پذیر به ابعاد  $1 \times 1$  متر می‌باشد. دستگاه مذکور قادر است باران‌های با شدت‌های مختلف در دامنه‌ی 20 تا 250 میلیمتر در ساعت را تولید نماید. تنظیم شدت بارندگی با تنظیم زاویه‌ی چرخش نازل بین 20 تا نزدیک به 360 درجه صورت می‌گیرد. تنظیم زاویه چرخش نازل توسط سیستم کنترل الکترونیک انجام می‌شود. قبل از شروع آزمایش‌های شبیه‌سازی باران، لازم است تا شدت بارندگی و زاویه‌ی چرخش نازل در دستگاه واسنجی شوند. به منظور تعیین رابطه‌ی بین شدت بارندگی و زاویه‌ی چرخش دستگاه، با استفاده از سینی غیر قابل نفوذ و بدون قرار دادن خاک در داخل آن با اعمال زاویه‌ی چرخش‌های مختلف به نازل دستگاه، میزان رواناب جمع شده در مدت زمان 5 دقیقه اندازه‌گیری و شدت بارندگی تعیین گردید. سپس منحنی مربوط به شدت بارش در زاویه‌های مختلف چرخش نازل رسم گردید (شکل 1).

از آنجائی که هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر اندوده سطحی بر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری بود لذا سعی شد تا خاک‌های انتخابی از نظر پایداری خاکدانه و بافت خاک متفاوت باشند. به این منظور سه نوع خاک زراعی به ترتیب از مزرعه‌ای دیم تحت آیش در روستای بارن‌لو منطقه ایلخچی ( $S_1$ )، مزرعه زیر کشت گندم در روستای مهدی‌لو منطقه ایلخچی ( $S_2$ ) و مزرعه زیر کشت گندم در حوالی منطقه کلیبر ( $S_3$ ) استان آذربایجان شرقی نمونه برداری و به آزمایشگاه منتقل گردید. قابل ذکر است که معیار انتخاب خاک‌ها بر اساس پایداری خاکدانه‌ها و ماده آلی بود که هر قدر مقادیر این دو بیشتر باشد خاک مقاوم‌تر به تشکیل اندوده سطحی بوده و هر قدر مقادیر آنها کمتر باشد، خاک حساس‌تر به تشکیل اندوده خواهد بود.

همکاران (1386). پوسن (1984) اعتقاد دارد که در خاکهای حساس به تشکیل اندوده سطحی، شدت رواناب ممکن است با افزایش شیب کاهش یابد. علت آن این است که در شیب‌های بالاتر میزان فرسایش زیاد شده و از تشکیل اندوده سطحی جلوگیری می‌شود و در نتیجه نفوذپذیری در مقایسه با شرایط وجود اندوده سطحی افزایش می‌یابد. کمپر و میلر (1974) تشکیل اندوده سطحی را یکی از فرآیندهای رایج در ارتباط با فرسایش در خاکهای نواحی خشک و نیمه خشک می‌دانند که به علت مواد آلی کم، سیلت زیاد و پایداری کم خاکدانه‌ها رخ می‌دهد.

در طول تشکیل اندوده که ساختمان و نفوذپذیری لایه سطحی خاک دچار تغییرات شدید می‌شود، فاکتور فرسایش‌پذیری بین‌شیاری ( $K_i$ ) خاک نیز تغییر می‌کند (آسولین و بن - هور 2006). در طول این فرایند ممکن است فرسایش‌پذیری بین‌شیاری افزایش، کاهش یا ثابت بماند (چاوز 1987، برنمن 1988، وست ونیرینگ 1988).

بررسی تأثیر تشکیل اندوده سطحی بر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری خاک در کشورهای کم باران، در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به علت دارا بودن پوشش گیاهی ضعیف و خاکدانه‌های سست می‌تواند بسیار مفید باشد. تشکیل اندوده سطحی در اکثر خاک‌های ایران یک پدیده رایج بوده و با توجه به تأثیری که این پدیده در فرآیندهای فرسایشی دارد، درک کامل آن می‌تواند رویکرد ما در استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش که بدون واسنجی استفاده می‌شوند تغییر دهد. هدف از این تحقیق، بررسی اثر اندوده سطحی بر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری در دو خاک لوم شنی و لوم رسی از منطقه ایلخچی با کاربری زراعی و یک خاک رسی از منطقه کلیبر با کاربری زراعی در سه شیب و در چهار شدت بارندگی در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل 1- منحنی واسنجی دستگاه شبیه‌ساز مورد استفاده در آزمایش‌ها.

رواناب گرفته شده و جرم رسوب داخل آن، غلظت رسوب برای هر آزمایش در زمان‌های مختلف به دست آمد. شدت فرسایش بین‌شیاری خاک ( $E_i$ ) از تقسیم نمودن وزن مواد جامد بر جای مانده از هر حجم رواناب بر فاصله‌ی زمانی جمع‌آوری نمونه و بر واحد سطح فلوم (سانتی‌متر مربع) محاسبه گردید. شدت تولید رواناب ( $Q_{ir}$ ) نیز از تقسیم حجم رواناب ایجاد شده بر مدت زمان جمع‌آوری نمونه و سطح مقطع سینی حاوی خاک در فلوم (سانتی‌متر مربع) تعیین گردید. ضریب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری خاک‌های مورد آزمایش از معادله استفاده شده در مدل WEPP محاسبه گردید.

$$K_i = \frac{E_i}{1Q_{ir}S_f} \quad [4]$$

در معادله مذکور،  $K_i$  بر حسب  $(kg/s/m)$ ،  $E_i$  شدت فرسایش بین‌شیاری  $(kg/m/s)$ ،  $Q_{ir}$  شدت تولید رواناب  $(m/s)$  در حالت پایدار تولید رسوب،  $I$  شدت بارندگی  $(m/s)$  و  $S_f$  فاکتور بدون بعد شیب می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است (لیبنو و همکاران 1990).

$$S_f = 1.05 - 0.85 \exp[-4 \sin(\theta)] \quad [5]$$

که در آن  $\theta$  زاویه شیب بر حسب درجه است.

در این مطالعه حساسیت خاک در مقابل تشکیل اندوده سطحی به وسیله‌ی شاخص اندوده سطحی

ابعاد سطح کرت مورد استفاده در آزمون‌های فرسایش بین‌شیاری حتی‌الامکان باید کوچک باشد تا فرایند تشکیل شیار اتفاق نیافتد. در منابع مختلف پلات‌های کوچک‌تر از یک مترمربع برای این منظور پیشنهاد شده است (احمدی و همکاران 2010، اسدی و همکاران 2008). در این مطالعه خاک بدون فشردگی (به خاطر آسیب نرساندن به خاکدانه‌های سطحی) به ارتفاع 20 سانتی‌متر به داخل فلوم آزمایشی با محدود ساختن سطح آن تا حد  $(0/5 \times 1)$  ریخته شد و از زیر به صورت تدریجی اشباع گردید. پس از 24 ساعت اشباع خاک‌ها، تیمارهای مورد نظر (شیب‌های 5، 15 و 25 درصد و شدت‌های بارندگی 21، 38، 50 و 81 میلی‌متر بر ساعت) اعمال شد. میزان رواناب و رسوب ایجاد شده ابتدا در زمان‌های 1، 3، 6، 10 دقیقه پس از شروع بارش و سپس هر پانزده دقیقه یکبار اندازه‌گیری گردید. در هر زمانی که شدت تولید رواناب به حالت پایدار (ثابت ماندن حجم رواناب تولیدی در هر 15 دقیقه) رسید آن زمان به عنوان خاتمه آزمایش در نظر گرفته شد (لال 1994). جهت تعیین شدت رواناب و فرسایش بین‌شیاری خاک، رواناب حاصل از یک بارندگی به طور پیوسته در فواصل زمانی مختلف پشت سر هم در ظروفی به طور جداگانه جمع‌آوری شد و پس از توزین برای تعیین جرم رسوب در دمای 105 درجه سانتیگراد در دستگاه آون به مدت 24 ساعت خشک گردید. بدین ترتیب با در دست داشتن حجم نمونه

سطحی در خاک‌های مورد مطالعه از شاخص RSI و همچنین بررسی روند نمودارهای رواناب و غلظت رسوب استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها در نرم‌افزار SPSS به وسیله تست کولموگرو اسمیرنو<sup>3</sup> مورد بررسی قرار گرفت که همه داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کردند.

### نتایج و بحث

نتایج مربوط به تجزیه فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در جدول 1 آمده است. بر اساس جدول مذکور نمونه‌های انتخاب شده دارای تمایز بافتی نسبتاً بالایی هستند. به طوری که خاک S<sub>1</sub> دارای ذرات درشت بیش‌تری ( $D_{75}=0.4 \text{ mm}$ ) نسبت به خاک‌های S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> (هر دو دارای  $D_{75}=0.04 \text{ mm}$ ) است. همچنین از نظر وضعیت پایداری خاکدانه بر اساس شاخص‌های MWD و WAS، خاک‌های مورد مطالعه دارای تفاوت زیادی هستند. به طوری که خاک S<sub>3</sub> با توجه به درصد رس و ماده آلی بالا نسبت به دو خاک S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> دارای MWD بالاتری است. مقدار ماده آلی در دو خاک S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> کم است ولی به دلیل بالا بودن مقدار رس در خاک S<sub>2</sub>، شاخص MWD آن بیش‌تر از خاک S<sub>1</sub> می‌باشد (جدول 1). مقدار مقاومت برشی در حالت اشباع برای خاک S<sub>1</sub> به دلیل کم بودن میزان مواد آلی (0/68 درصد) و رس (9/4 درصد) نسبت به دو خاک دیگر کمتر شده است (0/06 کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع). در خاک S<sub>3</sub> نیز به دلیل بالا بودن مقدار ماده آلی (5/32 درصد) و رس (46 درصد) مقدار مقاومت برشی بیش‌تر از دو خاک دیگر است (0/14 کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) (جدول 1).

مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان (بدون اصابت قطرات باران،  $K_c$ )، حداقل هدایت هیدرولیکی اشباع شبیه‌سازی باران (شدت 81 میلی‌متر

نسبی (RSI<sup>1</sup>) و زمان لازم برای رسیدن به مقدار حداقل هدایت هیدرولیکی ( $t_{lim}$ ) توصیف شد. این شاخص توسط پلا (1986) ابداع شده است و نسبت مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده در دو حالت تحت تاثیر ضربات قطرات باران با قطر 3 میلی‌متر و از ارتفاع 2/5 متری و با شدت 81 میلی‌متر بر ساعت ( $K_s$ ) و همچنین بدون اثر ضربات قطرات ( $K_c$ ) به روش بار افتان (هلیل 1998)، ( $RSI = K_c/K_s$ ) محاسبه می‌شود. هرچه مقدار شاخص RSI زیاد باشد خاک حساس‌تر به تشکیل اندوده سطحی خواهد بود. قابل ذکر است که شاخص RSI زمانی می‌تواند به تنهایی ملاک ارزیابی باشد که زمان بحرانی ( $t_{lim}$ ) کمتر از 10 دقیقه باشد در غیر این صورت از شاخص  $t_{lim}$  برای ارزیابی استفاده می‌شود که هرچه بالا باشد دلیل بر مقاوم بودن خاک به تشکیل اندوده سطحی است (پلا 1986، راموس و همکاران 2003).

بافت خاک به روش هیدرومتری با نه قرائت (گی و اور 2002)، میانگین هندسی (GMD) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش نیمو و پرکینز (2002) در حالت خشک (رد شده از الک 8 میلی‌متر) و مرطوب (رد شده از الک 4/76 میلی‌متر) با انجام تصحیح شن همراه، WAS به روش کمپر و روزنا (1986) و درصد رطوبت اشباع در خاک عبور داده شده از الک 2 میلی‌متر تعیین شدند. مقدار کربن آلی به روش والکی و بلک اصلاح شده (نلسو و سامرز 1982)، درصد کربنات کلسیم به روش تیتراسیون، EC و pH عصاره گل اشباع به روش‌های متداول در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند.

با استفاده از نرم‌افزار SPSS اثر شیب و شدت بارندگی بر فاکتور فرسایش‌پذیری بین‌شیاری به طور جداگانه از آزمون t تست جفت شده<sup>2</sup> مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی تشکیل یا عدم تشکیل اندوده

<sup>1</sup>Relative sealing index

<sup>2</sup>Paired samples t test

<sup>3</sup>Kolmogorov-Smirnov

تنهایی برای بررسی اندوده سطحی استفاده کرد که زمان لازم برای رسیدن به این مقدار حداقل کمتر از حد بحرانی (10 دقیقه) باشد و در غیر این صورت خود زمان بحرانی ( $t_{lim}$ ) به عنوان معیار ارزیابی خواهد بود که هرچقدر این زمان بیشتر باشد خاک مقاوم‌تر به تشکیل اندوده خواهد بود (پلا 1986، راموس و همکاران 2003). خاک  $S_1$  نیز چون دارای زمان لازم برای رسیدن به این مقدار حداقل برابر با 6 دقیقه هست لذا از زمان لازم برای رسیدن به این مقدار بحرانی (10 دقیقه) ارئه شده توسط پلا (1986) و راموس (2003) کمتر بوده پس جزء خاک‌های حساس به اندوده سطحی به حساب می‌آید.

در ساعت، ( $K_s$ ) و زمان لازم برای رسیدن به این مقدار حداقل، در جدول 2 ارائه شده است. همان گونه که در جدول 2 نشان داده شد گرچه خاک  $S_2$  و  $S_3$  دارای RSI بزرگ‌تری نسبت به خاک  $S_1$  می‌باشند اما نمی‌توان به طور قطع اظهار کرد که بالا بودن مقدار RSI در خاک  $S_3$  و  $S_2$  دلیل بر حساس‌تر بودن این خاک‌ها به اندوده سطحی، نسبت به خاک  $S_1$  است. زیرا زمان لازم برای رسیدن به این مقدار حداقل برای این دو خاک ( $S_3$  و  $S_2$ ) به ویژه  $S_3$  بسیار بیش‌تر از زمان لازم برای رسیدن به این مقدار حداقل بحرانی (یعنی کمتر از 10 دقیقه) بوده و بنابراین جزء خاک‌های مقاوم به اندوده سطحی به حساب می‌آیند. به عبارتی موقعی می‌توان از RSI به

جدول 1- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه.

ویژگیهای خاک	واحد	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_3$
کلاس بافت	-	لوم شنی	لوم رسی	رسی
شن (s)	%	72/59	22/29	21/7
سیلت ( $S_i$ )	%	18	37/6	32/3
رس (C)	%	9/4	40/1	46
$D_{75}$	میلی‌متر	0/4	0/04	0/04
کربنات کلسیم معادل (CCE)	%	12	24	12/3
ماده آلی (OM)	%	0/68	0/51	5/32
$EC_e$	دسی‌زیمنس بر متر	1/3	3/89	0/67
pH عصاره گل اشباع	-	7/73	7/49	7/55
MWD خشک (بدون تصحیح شن)	میلی‌متر	1/51	1/47	2/87
MWD خشک (با تصحیح شن)	میلی‌متر	0/86	1/44	2/62
MWD تر (بدون تصحیح شن)	میلی‌متر	0/42	0/45	0/51
MWD تر (با تصحیح شن)	میلی‌متر	0/17	0/44	0/46
خاکدانه‌های پایدار در آب (WAS)	%	22/95	34/28	42/58
مقاومت برشی در حالت اشباع	کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع	0/06	0/12	0/14

$S_1$ : منطقه ایلخچی با کاربری زراعی  $S_2$ : منطقه ایلخچی با کاربری زراعی  $S_3$ : منطقه کلیبر با کاربری زراعی

جدول 2- شاخص اندوده سطحی نسبی (RSI) برای خاک‌های مورد مطالعه (شیب 5 درصد و شدت 81 میلی‌متر در ساعت).

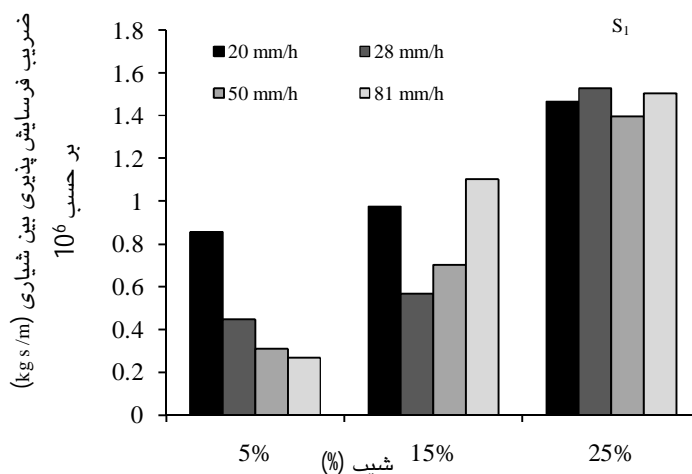
خاک	$t_{lim}$ (min)	Kc (mm/h)	$K_s$ (mm/h)	$RSI = Kc/K_s$
$S_1$	6	29/69	13/29	2/23
$S_2$	32	46/24	13/24	3/49
$S_3$	102	110/9	12/46	8/9

موارد حالت نامنظم دارد. برای مثال در شیب 5 درصد، با افزایش شدت بارندگی از 20 به 81 میلی‌متر بر ساعت در هر سه خاک؛  $K_i$  کاهش یافته است. علت آن می‌تواند به خاطر این باشد که افزایش شدت بارندگی منجر به تخریب بیشتر خاکدانه‌ها شده و مقاومت برشی سطح خاک افزایش پیدا کرده و قابلیت جدا شدن ذرات کم می‌شود در نتیجه فرسایش‌پذیری بین‌شیاری کاهش می‌یابد (فاکس و بریان 1999).

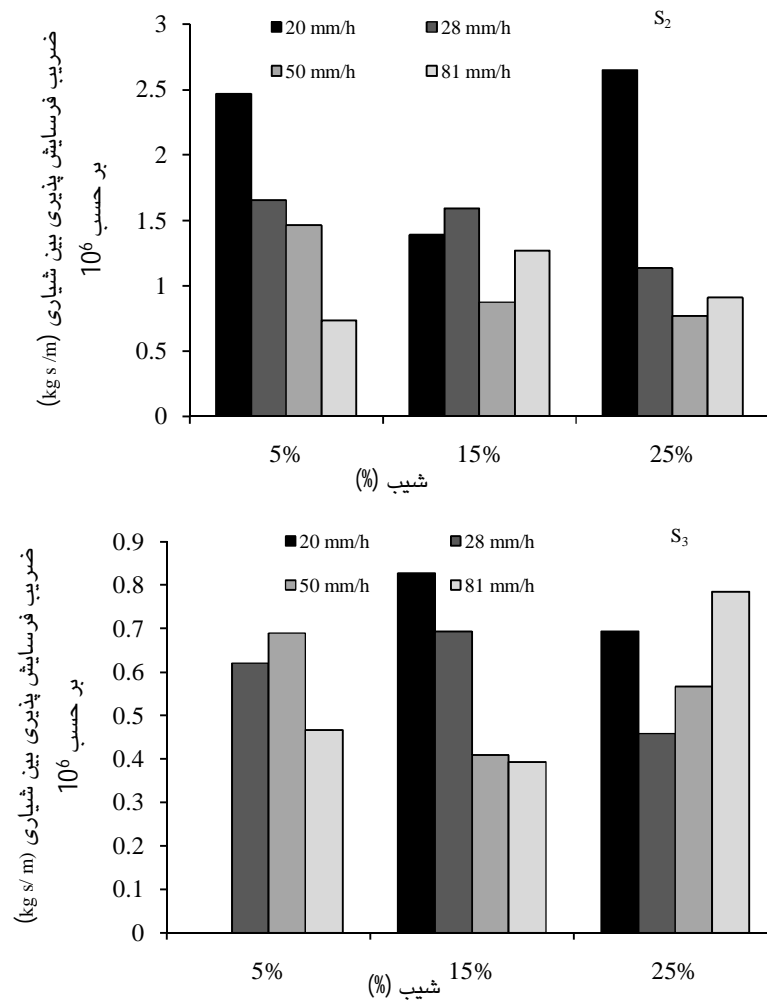
برای بررسی معنی‌دار بودن تفاوت در  $K_i$  ها از آزمون t تست جفت شده به وسیله نرم افزار SPSS استفاده شد که نتایج آن در جدول 3 ارائه شده است. در شکل 4 نیز میانگین  $K_i$ ، در سه شیب 5، 15 و 25 درصد برای هر سه نمونه خاک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در خاک  $S_1$  (حساس به تشکیل اندوده سطحی) با افزایش شیب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری نیز افزایش یافته که دلیل آن می‌تواند به خاطر شستشوی لایه اندوده سطحی در شیب‌های بالا باشد. زیرا وجود لایه اندوده سطحی باعث افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش فرسایش‌پذیری می‌شود (فاکس و بریان 1999، اسدی 1384). ولی در دو خاک دیگر مخصوصاً خاک  $S_3$  فرسایش‌پذیری بین‌شیاری تقریباً ثابت است و با افزایش شیب تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد  $K_i$  یک خصوصیت ذاتی خاک بوده و متأثر از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و اثرات متقابل آن‌ها است. مقدار  $K_i$  حتی اگر شرایط بارندگی، رواناب و شیب متفاوت باشد، باید ثابت بماند (کینل 2000، آسولین و بن-هور 2006). تحقیقات در شرایط آزمایشگاهی توسط آسولین و بن-هور (2006) نشان داده است که در خاک‌های حساس به تشکیل اندوده سطحی، فرض ثابت بودن مقدار  $K_i$  صادق نیست. آن‌ها در این بررسی به منظور برآورد فرسایش‌پذیری بین‌شیاری از روابط 1 و 2 استفاده کردند.

مقادیر محاسبه شده  $K_i$ ، در شیب‌ها و شدت‌های مختلف برای هر سه نمونه خاک در شکل 3 آمده است. چنانچه عوامل مؤثر بر فرسایش بین‌شیاری به درستی در معادله 4 توصیف شده باشند در این صورت  $K_i$  محاسبه شده برای هر خاک بایستی به غیر از تغییرات جزئی ناشی از خطای اندازه‌گیری که به طور تصادفی توزیع یافته، در شدت‌های مختلف بارش و شیب‌های متفاوت دارای مقدار نسبتاً ثابتی باشد (اسدی 1384، محمودآبادی 1386). همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود مقادیر  $K_i$  محاسبه شده برای هر خاک در شیب‌ها و شدت‌های مختلف متفاوت بوده است. این تغییرات در برخی موارد حالت منظم و در بسیاری از





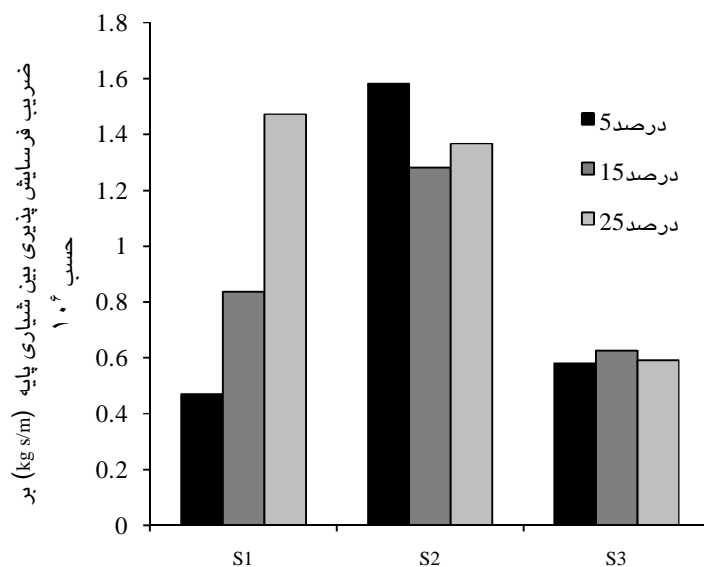


شکل 3- تغییرات ضریب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری ( $K_i$ ) برای سه نوع خاک در شیب و شدت‌های بارندگی مختلف.

جدول 3- مقایسه میانگین ضریب‌های فرسایش‌پذیری بین‌شیاری ( $K_i$ ) در شیب‌های متفاوت برای هر سه خاک  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ .

نوع خاک	شیب‌های مورد مقایسه	t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
$S_1$	5% با 15%	-2/175	3	0/118 <sup>ns</sup>
	5% با 25%	-7/389	3	0/005 <sup>**</sup>
	15% با 25%	-5/129	3	0/014 <sup>*</sup>
$S_2$	5% با 15%	0/866	3	0/45 <sup>ns</sup>
	5% با 25%	0/939	3	0/417 <sup>ns</sup>
	15% با 25%	-0/214	3	0/844 <sup>ns</sup>
$S_3$	5% با 15%	-0/317	3	0/772 <sup>ns</sup>
	5% با 25%	-0/909	2	0/459 <sup>ns</sup>
	15% با 25%	-0/074	2	0/947 <sup>ns</sup>

ns: عدم معنی‌داری      \*\*: معنی‌داری در سطح 1 درصد      \*: معنی‌داری در سطح 5 درصد



شکل 4- تغییرات میانگین  $K_i$  چهار شدت بارش و سه شیب، برای نمونه خاک‌ها.

رسیده‌اند که این تغییرات  $K_i$  می‌تواند ناشی از یکی از سه عامل زیر یا ترکیبی از آنها باشند:

1. نامناسب بودن ساختار معادله‌ای که فاکتور شیب بر ضریب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری را اعمال و آن را برآورد می‌کند،
2. فعال و غالب بودن فرآیندهای ناشی از رواناب در شیب‌های بالاتر و وجود برهمکنش بین فرآیندهای فرسایشی
3. در نظر نگرفتن اثر عمق آب تشکیل شده در سطح خاک بر فرسایش بین‌شیاری توسط مدل WEPP.

به نظر می‌رسد باید اثر اندوده سطحی را نیز طبق یافته‌های این تحقیق بر عوامل مؤثر در تغییرات  $K_i$  اضافه کرد. البته قابل ذکر است که در مدل WEPP ضریب اصلاحی برای اندوده سطحی در نظر گرفته شده است ولی این ضریب اصلاحی قادر به برآورد اثر اندوده سطحی در طی نخستین بارندگی پس از اولین شخم نیست و همچنین این ضریب اصلاحی قادر به پیش‌بینی تغییرات دینامیک اندوده سطحی و اثر شیب و شدت بارندگی بر آن نیست که می‌تواند یکی از اشکالات

همان طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، در خاک  $S_1$  تغییرات  $K_i$  از شیب 5 تا 25 درصد و 15 تا 25 درصد به ترتیب در سطح یک درصد و 5 درصد معنی‌دار است. این بدان مفهوم است که فرض ثابت بودن  $K_i$  در شیب‌های مختلف در خاک  $S_1$  صادق نیست. پتانسیل بالای تشکیل اندوده سطحی در خاک  $S_1$  می‌تواند یکی از دلایل عدم صادق بودن فرض  $K_i$  ثابت در شیب‌های مختلف باشد. بدین صورت که لایه اندوده سطحی با افزایش شیب و شدت بارندگی شسته شده (پوسن 1984) و باعث افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری خاک می‌شود. در نتیجه مقادیر  $K_i$  نیز افزایش می‌یابد. در دو خاک  $S_2$  و  $S_3$  تغییرات  $K_i$  معنی‌دار نیست. در این دو خاک به دلیل عدم تشکیل اندوده سطحی فرض ثابت بودن  $K_i$  صادق می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج جدول 4 تفاوت معنی‌داری بین  $K_i$  در شدت‌های بارندگی مختلف در هیچ کدام از خاک‌ها مشاهده نشد و فرض ثابت بودن  $K_i$  در شدت‌های بارندگی مختلف صادق بود.

اسدی (1384) و محمودآبادی (1386) در مطالعه خود بر روی فرسایش بین‌شیاری، به این نتیجه

این مدل باشد.

جدول 4- مقایسه میانگین ضریب‌های فرسایش‌پذیری بین‌شیاری ( $K_i$ ) در شدت بارندگی‌های متفاوت برای هر سه خاک  $S_1$ ،  $S_2$  و

$S_3$				
خاک	شدت بارندگی‌های (mm/h)	t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
$S_1$	21 پا 38	1/604	2	0/25 <sup>ns</sup>
	21 پا 50	2/161	2	0/163 <sup>ns</sup>
	21 پا 81	3/624	2	0/596 <sup>ns</sup>
	38 پا 50	3/492	2	0/672 <sup>ns</sup>
	38 پا 81	1/204	2	0/352 <sup>ns</sup>
	50 پا 81	0/512	2	0/66 <sup>ns</sup>
$S_2$	21 پا 38	1/429	2	0/289 <sup>ns</sup>
	21 پا 50	2/842	2	0/105 <sup>ns</sup>
	21 پا 81	2/23	2	0/156 <sup>ns</sup>
	38 پا 50	2/753	2	0/11 <sup>ns</sup>
	38 پا 81	2/251	2	0/153 <sup>ns</sup>
	50 پا 81	0/194	2	0/864 <sup>ns</sup>
$S_3$	21 پا 38	3/643	1	0/171 <sup>ns</sup>
	21 پا 50	1/875	1	0/312 <sup>ns</sup>
	21 پا 81	0/604	1	0/631 <sup>ns</sup>
	38 پا 50	0/287	2	0/801 <sup>ns</sup>
	38 پا 81	0/225	2	0/843 <sup>ns</sup>
	50 پا 81	0/052	2	0/963 <sup>ns</sup>

### نتیجه‌گیری کلی

خاک‌های حساس به تشکیل اندوده سطحی این فرض صادق نیست. به طوری که در خاک  $S_1$  (حساس به تشکیل اندوده سطحی) اختلاف معنی‌داری بین  $K_i$  در شیب‌های مختلف مشاهده شد. ولی در هر سه خاک  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  اختلاف معنی‌داری بین  $K_i$  در شدت‌های بارندگی مختلف مشاهده نشد.

با وجود در نظر گرفتن ضریب اصلاحی برای اثر اندوده سطحی در مدل WEPP ولی با این حال این ضریب نمی‌تواند به طور کامل اثر اندوده سطحی را پوشش دهد و به نظر می‌رسد ضریب اصلاحی ارائه شده بیشتر اثر سله را بیان می‌کند تا اثر اندوده سطحی.

خاک  $S_1$  با وجود داشتن RSI کمتر (2/23) نسبت به دو خاک  $S_2$  و  $S_3$ ، به خاطر این که در زمان کم‌تری ( $t_{im}=6 \text{ min}$ ) به حداقل هدایت هیدرولیکی اشباع می‌رسد جزء خاک‌های حساس به تشکیل اندوده سطحی قرار می‌گیرد.

تشکیل اندوده سطحی در طول بارندگی باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود (اسدی، 1384) که ممکن است باعث کاهش فرسایش‌پذیری بین‌شیاری شود. که این روند در خاک  $S_1$  مشاهده شد (شکل 4).

نتایج مربوط به فرض ثابت بودن  $K_i$  در شدت‌های بارندگی و شیب‌های متفاوت نشان داد که در

## منابع مورد استفاده

- اسدی ح، 1384. بررسی فرآیندها و تئوری‌های پایه‌ای مدل‌های فرآیندی فرسایش خاک. رساله دکتری، گروه مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- اسدی ح، محمودی ش و حیدری ا، 1386. اثر اندوده سطحی بر دینامیک فرسایش ورقه‌ای. دهمین کنفرانس علوم خاک ایران. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
- رفاهی ح، 1382. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران.
- محمودآبادی م، 1386. بررسی فرسایش بین‌شیاری و شیاری و فرآیندهای مربوط به آن با استفاده از شبیه‌سازی باران و رواناب. رساله دکتری، گروه مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- Ahmadi A, Neyshabouri MR, Rouhipour H, Asadi H and Iranajad M, 2010. Factors and mechanisms influencing interrill erodibility at different rainfall intensities. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 8 (2): 996-999.
- Asadi H, Rouhipour H and Ghadiri H, 2008. Evaluation of interrill component of the WEPP model for three contrasting soil types in Iran. Pp.237-249. In: Dazzi C and Costantini E, (Eds). *Advances in Geoecology*. Catena Verlag.
- Assouline S and Ben-Hur M, 2006. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, 66: 211-220.
- Breneman LG, 1988. The effect of previous crops and time after tillage on rill and interrill soil erodibility. PhD diss. Iowa State Univ., Ames (Diss. Abstr. 88-26 447), USA.
- Chaves HML, 1987. Influence of incorporated crop residue on interrill erosion. MSc thesis. Purdue Univ., West Lafayette, IN.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle-size analysis. Pp.255-295. In: Dane JH and Topp JC (eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. ASA and SSSA, Madison WI.
- Fox DM, and Bryan RB, 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena* 38: 211-222.
- Foster GR, Flanagan DC, Nearing MA, Lane LJ, Risse M and Finkner SC, 1995. Hillslope erosion component. Pp. In: Flanagan DC and Nearing MA (eds). *USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation*. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Hillel D, 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, New York.
- Kemper WD and Miller DE, 1974. Management of crusting soils: Some practical possibilities. Pp 1-6. In: Carry JW and Evans DD (eds). *Soil Crusts Tech. Bull. 214. Agric. Exp. Stn. University of Arizona*. Tucson, AZ.
- Kemper WD and Rosenau RC, 1986. Size distribution of aggregates. Pp. 425-442. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1*, 2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. 9. ASA-SSSA, Madison, WI.
- Kinnell PIA, 2000. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion. *Soil Sci Soc Am J* 64:1004-1008.
- Kinnell PIA, 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. *Hydro. Process* 19: 2815-2844.
- Lal R, 1994. Soil Erosion by Wind and Water; Problems and Prospects. Pp 1-9. In: Lal R (ed), *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conserv. Soc Ankeney, Iowa.
- Liebenow A, Elliot WJ, Laflen JM and Kohl KD, 1990. Interrill erodibility: Collection and analysis of data from cropland soils *Trans Am Soc Agric Eng.* 33:1882-1882.
- Line DE and Meyer LD, 1989. Evaluating interrill and rill erodibilities for soils of different textures. *Trans. ASAE* 32:1995-1999.
- Meyer LD and Harmon WC, 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci Am J* 48:1152-1157.
- Meyer LD, Foster GR and Romkens MJM, 1975. Source of soil eroded by water from upland slopes. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. Pp. 77-189. *Proc. Sediment Yield Worksh.* 28-30 Nov. Oxford, MS.
- Miller WP and Baharuddin MK, 1987. Interrill erodibility of highly weathered soils. *Commun. Soil Sci Plant Anal* 18:933-945.
- Nearing MA, Bradford JM and Parker SC, 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Sci. Soc Am J* 55: 339-344.
- Nelson D W and Sommers L E, 1982. Total carbon and organic matter. Pp. 539-580. In: Page AL. (Ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Methods, ASA and SSSA, Madison, WI.
- Nimmo JR and Perkins KS, 2002. Aggregate stability and size distribution. Pp. 317-328. In: Warren AD (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Pla I, 1986. A routine laboratory index to predict the effect of soil sealing on soil and water conservation. Pp. 154-163. In: Callebaut F Gabriels D De Boodt M (Eds). *Assessment of Soil Sealing and Crusting*. Proceedings of the

- Symposium Held in Ghent, Belgium,. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, Ghent, Belgium.
- Poesen J, 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Z Geomorph NF Supp* 1Bd 40 :117-131.
- Ramos MC, Nacci S and Pla I, 2003. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces. *Catena* 53: 65-376.
- Watson DA, and Laflen JM, 1986. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Trans ASAE* 29: 98- 102.
- West LT, and Nearing MA, 1988. Soil consolidation effects on rill and interill soil loss. *Agronomy Abstracts*. ASA, Madison, WI. 289p.
- Zang GH, Nearing MA, Miller WP, Norton LD and West LT, 1998. Modeling interrill sediment delivery. *Soil Sci Soc Am J*. 62: 438-444.