

بررسی اثر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک بر فرسایش پذیری در خاکهای کشاورزی

علیرضا واعظی

دانشجوی دکتری خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

شاخص‌های فرسایش پذیری عمدتاً بر اساس ویژگی‌هایی استوار هستند که بر پراکنش خاک، دانه‌بندی خاک، پایداری خاکدانه و انتقال به وسیله جریان آب اثر می‌گذارند. فرسایش‌پذیری خاک یکی از عوامل مهم در مدل‌های فرسایشی است. در رابطه جهانی فرسایش خاک، فرسایش‌پذیری خاک از روی بافت، ساختمان، مقدار ماده آلی و نفوذپذیری نیم‌رخ خاک تعیین می‌گردد. در این معادله، فرسایش-پذیری خاک تنها بر اساس بخشی از ویژگی‌های ذاتی خاک که عمدتاً فیزیکی هستند، استوار است. در حالی که فرسایش‌پذیری در کنار ویژگی‌های فیزیکی ممکن است تحت تأثیر سایر ویژگی‌های خاک (شیمیایی و مکانیکی) نیز قرار گیرد. از سوی دیگر این معادله بر اساس باران‌های مناطق نیمه مرطوب آمریکای مرکزی در خاک‌های تقریباً غیرآهکی ارائه شده است. در حالی که بیشتر نقاط کشور جز مناطق خشک و نیمه خشک بوده و خاکها اغلب آهکی هستند. از این رو استفاده از این معادله برای برآورد فرسایش پذیری در خاکهای آهکی مناطق نیمه خشک ایران نمی‌تواند برآوردی صحیح از فرسایش پذیری خاک را ارائه دهد. فرسایش‌پذیری خاک در کنار ویژگی‌های ذاتی خاک (بافت و ...) که موجب تغییرپذیری مکانی فرسایش پذیری می‌شوند، به ویژگی‌های غیرذاتی خاک از جمله پایداری خاکدانه‌ها نیز بستگی دارد. این ویژگی‌ها در طی سال بر اثر مدیریت‌های مختلف خاکی تغییر می‌یابند. از این رو فرسایش‌پذیری خاک دارای تغییرپذیری زمانی نیز است. بنابراین بررسی عوامل موثر بر فرسایش پذیری خاک در خاکهای آهکی مناطق نیمه خشک و شناخت عوامل موثر در تغییرپذیری زمانی و مکانی فرسایش پذیری حائز اهمیت است.

واژگان کلیدی: فرسایش‌پذیری خاک، اراضی کشاورزی، پایداری خاکدانه، رابطه جهانی فرسایش خاک

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز به منابع طبیعی موجب گردیده است تا کاهش فرسایش و توسعه کشاورزی پایدار به عنوان امری ضروری طی دهه‌های اخیر مطرح گردد. با توجه به اینکه بیشتر زمین‌های قابل کشت در جهان تحت کشاورزی می‌باشد، بنابراین توسعه روشهای بهینه مدیریتی با در نظر گرفتن اصول کشاورزی پایدار ضروری است. تولید محصولات کشاورزی به دو ماده اصلی آب به عنوان مایه حیات و خاک به عنوان بستر حیات نیازمند است. به طوری که امروزه بیش از ۹۷ درصد مواد غذایی جهان از خاک به دست می‌آید (Gerrard, 2000). یکی از مهمترین مشکلات کشاورزی در جهان، فرسایش خاک به

وسيله آب است. فرسایش آبی پدیده‌ای است که طی آن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران از هم جدا شده و به وسیله جریان سطحی (رواناب) منتقل می‌شوند. به طور کلی فرسایش آبی ناشی از دو پدیده مجزا است. ابتدا ذرات خاک به وسیله انرژی جنبشی قطرات باران از هم جدا می‌شوند و سپس ذرات جدا شده یا پاشمان یافته توسط رواناب منتقل می‌شوند. در اثر این دو پدیده هر سال میلیون‌ها تن خاک از سطح خشکی‌ها به وسیله فرسایش جا به جا می‌شود. به طوری که حدود ۸۵ درصد از تخریب زمین به دلیل فرسایش خاک است. این پدیده تولید محصولات کشاورزی را در طی قرن بیستم تا ۱۷ درصد کاهش داده است (Angima و همکاران، ۲۰۰۳).

به طور کلی بر اثر فرسایش، خاک حاصلخیز سطحی و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به تدریج از دسترس خارج می‌شود و شرایط فیزیکی خاک به ویژه از نظر نفوذپذیری نامناسب می‌گردد. به این دلیل رشد گیاه و تولید محصول کاهش می‌یابد. کاهش حاصلخیزی خاک بر اثر فرسایش دلیل اصلی پایین آمدن تولید محصولات کشاورزی در خاکهای ایران است. برآوردها نشان می‌دهد که حدود یک سوم از کل بارندگی سالانه در کشور (۱۳۰ میلیارد متر مکعب) بر اثر فرسایش و کاهش نفوذپذیری خاک از دسترس خارج می‌شود. به طوری که اگر با کاهش فرسایش، از هدررفت این مقدار آب جلوگیری گردد سالانه حدود ۱۰ میلیون هکتار زمین زراعی را می‌توان آبیاری کرد (رفاهی، ۱۳۷۵). گزارش‌ها نشان می‌دهد که فرسایش خاک منجر به هدررفت مواد غذایی و به هم خوردن ساختمان خاک می‌شود. بر اساس این گزارشها مقدار عملکرد در کشتهای فرسایشی نسبت به کرت شاهد ۳۰ درصد کاهش یافت. پایین بودن عملکرد به دلیل کاهش حاصلخیزی خاک، پایین بودن نفوذپذیری و نگهداشت رطوبت در خاک و کاهش آب قابل استفاده گیاه بوده است (Follet و Stewar, ۱۹۸۵).

برای بررسی فرسایش خاک در یک منطقه، شناسایی عوامل موثر بر فرسایش و نقش هریک در مقدار فرسایش حائز اهمیت است. ارزیابی مناسب عوامل عمده موثر در فرسایش خاک در یک منطقه به عنوان نخستین گام در ارائه راهکاری مناسب برای کاهش فرسایش خاک است. معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه تصحیح شده آن (RUSLE) به طور گسترده برای پیش‌بینی هدررفت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (Rejman و همکاران، ۱۹۹۸). این معادله از بررسی تجزیه آماری ۱۰۰۰۰ کرت با رواناب طبیعی همراه با ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ کرت با بکارگیری شبیه‌ساز باران، به دست آمده است (Foster و همکاران، ۱۹۸۵). بر اساس این معادله یکی از عوامل شش‌گانه موثر در فرسایش خاک، فرسایش‌پذیری خاک است. فرسایش‌پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جداشدن ذرات خاک را بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آنها را به

کانی‌های رسی، قابلیت سله بستن خاک، مقاومت برشی خاک، شوری، اسیدیته، پراکنش ذرات و درصد سدیم تبدلی، درصد کربنات کلسیم خاک، درصد اکسیدهای آهن و آلومنیوم و درصد سنگریزه هستند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که فرسایش‌پذیری خاک با نسبت درصد شن + درصد لای به درصد رس متناسب است. اولین شاخص فرسایش-پذیری غیرتجربی بر اساس ترکیبی از ۳ عامل پراکنش، مقدار رس و نگهداشت رطوبت استوار بود (Middleton, ۱۹۳۰). برخی پژوهشگران نشان دادند که مقدار خاکدانه‌هایی که قطر آنها بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر بوده و در برابر آب پایدار باشند را می‌توان به عنوان شاخص فرسایش‌پذیری خاک در نظر گرفت. بررسی‌های انجام گرفته برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک در زمین‌های با شیب ۹ درصد در کرت‌های به عرض ۱/۸۳ متر، به طول ۲۲/۱ متر که در جهت شیب شخم خورده بودند و سطح کرت‌ها بدون پوشش و عاری از بقایابی گیاهی بود، نشان داد که مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) در رابطه USLE برابر است با (Wischnmeier و Smith, ۱۹۷۸):

$$K = \frac{A}{RLSCP} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه A میانگین هدررفت خاک t/ha ، R فرسایش‌پذیری باران بر حسب MJ mm/(ha h) year، L عامل طول شیب، S عامل درجه شیب، C عامل پوشش گیاهی و P عامل کارهای حفاظتی است.

بررسی‌ها نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر ۱۵ ویژگی فیزیکی خاک است. آنها در ادامه بررسی‌های خود ۵ ویژگی فیزیکی خاک (درصد شن، درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری خاک) را به عنوان مهمترین عوامل موثر بر فرسایش‌پذیری خاک معرفی کردند و در اوایل ۱۹۷۰ میلادی نمودگرافی را به منظور برآورد فرسایش‌پذیری از روی ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری خاک، ارائه کردند. این نمودگراف پس از تکمیل به صورت معادله زیر ارائه گردید (Schwab و همکاران، ۱۹۹۳).

$$K = 2.8 \times 10^{-7} M^{1.14} (12-a) + 4.3 \times 10^{-3} (b-a) + 3.3 \times 10^{-3} (c-3)$$

در این رابطه M حاصلضرب (درصد سیلت + درصد شن خیلی نرم) در (درصد رس - ۱۰۰)، a درصد ماده آلی، b طبقه ساختمان خاک و c طبقه نفوذپذیری نیمرخ خاک است (Rejman و همکاران، ۱۹۹۸).

آزمایش‌های انجام گرفته در چین نشان داد که نسبت پراکنش خاک و ضریب انبساط خاک با مقاومت خاک به آبشویی و جداسدن به وسیله جریان رابطه دارد (Zhu و Jiang, ۱۹۶۲). برخی دیگر از پژوهشگران از جمله Conaway و Strickling (۱۹۶۲) با بررسی ۲۴ شاخص پایداری خاکدانه دریافتند که درصد وزنی خاکدانه‌های پایدار در آب با قطر بزرگتر از ۰/۵ و ۲ میلی‌متر مطمئن‌ترین معیار برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری است.

بررسی‌های انجام گرفته به وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر بافت خاک است. در شرایطی که مقدار ماده آلی خاک از ۰/۵ درصد کمتر باشد، فرسایش‌پذیری در بافت‌های رسی، سیلتی و شنی به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۰۵ است.

وسيله نیروی رواناب نشان می‌دهد (Veihe, ۲۰۰۲). حساسیت خاک به فرسایش به ویژگی‌های متعدد خاک از جمله فیزیکی، مکانیکی، هیدرولوژیکی، شیمیایی، مینرالوژیکی و بیولوژیکی همراه با ویژگی‌های نیمرخ خاک مثل عمق خاک و تأثیر آن بر رشد گیاه بستگی دارد. به این دلیل مفهوم فرسایش‌پذیری و ارزیابی آن پیچیده است (Young و همکاران، ۱۹۹۰). مقدار این عامل از راه تعیین مقدار خاک فرسایش یافته از کرت مینا در واحد شاخص فرسایش‌پذیری باران (EI30) به دست می‌آید (Zhang و همکاران، ۲۰۰۴). کوشش‌های فراوانی جهت تعیین شاخصی ساده برای فرسایش‌پذیری خاک بر اساس ویژگی‌های آزمایشگاهی یا صحرایی انجام گرفته است (Veihe, ۲۰۰۲).

مواد و روش‌ها

شاخص‌های فرسایش‌پذیری عمدتاً بر اساس ویژگی‌هایی استوار هستند که بر پراکنش خاک، دانه‌بندی خاک، پایداری خاکدانه و انتقال به وسیله جریان آب اثر می‌گذارند (Gerrard, ۲۰۰۰). در این مقاله به بررسی سوابق مربوطه پرداخته خواهد شد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که مقدار خاکدانه‌های با قطر بزرگتر از ۰/۵ میلی‌متر که در برابر آب پایدار باشند را می‌توان به عنوان شاخص فرسایش‌پذیری خاک در نظر گرفت. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که فرسایش‌پذیری خاک با نسبت درصد لای + درصد شن به درصد رس رابطه دارد. در خاک‌هایی که این نسبت کوچکتر باشد فرسایش کمتر است (رفاهی، ۱۳۷۵). بررسی‌های گسترده‌ای که در سال ۱۹۷۸ انجام گرفت، نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک به بافت، ساختمان، مقدار ماده آلی و نفوذپذیری خاک بستگی دارد (Wischnmeier و Smith, ۱۹۷۸). فرسایش‌پذیری خاک یکی از عوامل مهم در مدل‌های فرسایشی است. این عامل به توزیع ذرات اولیه خاک، نیروی به هم‌آورنده ذرات در خاکدانه‌ها، و میزان وقوع رواناب بر اثر بارندگی بستگی دارد. در مدل‌های فرسایشی لازم است تا این عامل با ویژگی‌هایی از خاک که به آسانی قابل اندازه‌گیری باشد، ارتباط داده شود. در رابطه جهانی فرسایش خاک (USLE) فرسایش‌پذیری خاک از روی ۵ ویژگی خاک تعیین می‌گردد. در حالی که در مدل فرآیندی پیش‌بینی فرسایش‌پذیری (WEPP)، فرسایش‌پذیری بین شیبی صرفاً بر اساس بافت خاک تعیین می‌گردد (Duiker و همکاران، ۲۰۰۱). به طور کلی فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. این ویژگی‌ها در دو گروه قرار می‌گیرند: (۱) عواملی که در پراکنش ذرات خاک، قابلیت جدا شدن، سایش ذرات و حرکت ذرات خاک به وسیله قطرات باران یا رواناب نقش دارند. (۲) عواملی که در سرعت نفوذ آب به خاک، حرکت آب در توده خاک و ظرفیت ذخیره آب در خاک نقش دارند (Wang و همکاران، ۲۰۰۱). بر این اساس عواملی متعدد بر فرسایش‌پذیری خاک اثر می‌گذارند. این عوامل از ویژگی‌های خاک ناشی می‌شوند. این ویژگی‌ها عبارت از بافت، ساختمان (تعداد و اندازه خاکدانه‌ها و درجه پایداری آنها در برابر آب)، مقدار ماده آلی، درجه تخلخل، درصد رطوبت اشباع، سرعت نفوذ آب به خاک، نفوذپذیری نیمرخ خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک، نوع

شیاری به شدت متفاوت است. مقدار فرسایش شیاری به نیروی برشی جریان و مقاومت خاک در برابر جدا شدن بستگی دارد. رابطه شاخصی که برای بیان ظرفیت جدا شدن ذرات در یک شیار استفاده می‌گردد به صورت زیر است:

$$D_c = K_{rs}(\tau - \tau_c) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه D_c ظرفیت جدا شدن (جرم در واحد سطح)، K_{rs} فرسایش‌پذیری خاک در فرسایش شیاری، τ تنش برشی و τ_c تنش برشی بحرانی است. باید توجه داشت که دبی جریان در عرض شیب در شیارهای مختلف متفاوت است بنابراین برای برآورد فرسایش شیاری می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (Foster و همکاران، ۱۹۸۵):

$$D_c = K_{ru} q_{sr} Cr \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه D_c ظرفیت جدا شدن در واحد سطح زمین، K_{ru} فرسایش‌پذیری خاک در فرسایش شیاری q دبی در واحد عرض، sr زاویه شیب در طول شیار و Cr عامل گیاهی - مدیریتی در فرسایش شیاری است.

در مدل WEPP^۱ فرسایش خاک به صورت فرآیند جدا شدن و انتقال ذرات در شیارها و بین شیارها مدل می‌شود. حساسیت و مقاومت خاک به جدا شدن و انتقال عامل اصلی تعیین کننده فرسایش خاک در یک منطقه است. در مدل WEPP^۱ تحویل رسوب به شیارها از خاک بین شیاری به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$D_i = K_i I_e^2 G_e C_e S_f \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه D_i تحویل رسوب از خاک بین شیار به نزدیکترین شیار ($kg/m^2/s$)، K_i فرسایش‌پذیری بین شیاری ($kg/m^4/s$)، I_e شدت بارندگی موثر (m/s)، G_e عامل تعدیل پوشش زمین، C_e عامل تعدیل پوشش گیاهی، S_f عامل تعدیل شیب است. مقدار این عامل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_f = 1.05 - 0.85 e^{-4 \sin a} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این رابطه a شیب سطح در جهت شیار نزدیک می‌باشد. در مدل WEPP^۱ ظرفیت جدا شدن (D_c) از آب جاری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_{crit}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه D_c بیشترین مقدار جدا شدن در هنگامی که رسوبی در آب وجود ندارد، K_r فرسایش‌پذیری شیاری، τ برش هیدرولیکی آب جاری که عبارت از نیرویی است که به وسیله آب جاری در بستر جریان اعمال می‌شود و τ_{crit} برش هیدرولیکی بحرانی است. میزان جدا شدن از آب جاری از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$D_r = D_c(1 - G/T_c) \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه D_r میزان جدا شدن از آب جاری، G بار رسوب و T_c

با افزایش ماده آلی به ۲ درصد، فرسایش‌پذیری خاک‌های رسی، سیلتی و شنی به ترتیب ۱/۰۸، ۱/۱۵ و ۱/۵ برابر کاهش می‌یابد. در ۴ درصد ماده آلی میزان کاهش فرسایش‌پذیری به ترتیب ۱/۳۱، ۱/۴۲ و ۲/۵ برابر بود. بنابراین اثر ماده آلی در کاهش فرسایش‌پذیری خاک در بافت‌های شنی بیشتر از سیلتی و آن هم بیشتر از رسی است (Morgan و Kirkby، ۱۹۸۰). ماده آلی نقشی موثر در افزایش پایداری خاکدانه‌ها دارد. بر این اساس Tisdall و Oades (۱۹۸۰) رابطه بین مقدار کربن آلی خاک و درصد خاکدانه‌های پایدار را در یک خاک شن لومی نرم مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با افزایش کربن آلی خاک از ۱ تا ۳ درصد، مقدار خاکدانه‌های پایدار در آب (با قطر بیشتر از ۲ میلی‌متر) به طور خطی از ۳ تا ۴۰ درصد افزایش یافت. در سال ۱۹۸۴ طرح منظمی به وسیله Murphy برای برآورد فرسایش پذیری خاک‌های کشاورزی در New South Wales پیشنهاد گردید. این طرح بر اساس پایداری ساختمان خاک، مقدار ماده آلی در سطح خاک، مقدار سزکوئی‌اکسیدها در خاک زیرسطحی، مقدار سدیم و خاکدانه‌های پایدار در آب (با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر) ارائه گردید. پژوهشگران گزارش دادند که اندازه‌گیری جریان سطحی، پایه‌ای برای مطالعات فرسایش خاک در زمین‌های شیبدار است. جریان سطحی در کنار شرایط رطوبتی اولیه خاک و ویژگی‌های توپوگرافی (طول، درجه و یکنواختی شیب) و ویژگی‌های پوشش سطحی خاک (نوع و تراکم پوشش گیاهی، مالچ و زبری سطح) به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به ویژه نفوذ، واریختگی، مقاومت برشی، پراکنش و مقدار ماده آلی خاک بستگی دارد و این همه بر فرسایش خاک اثر می‌گذارند (Turner و همکاران، ۱۹۸۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهد حتی زمانی که مدیریت خاک‌ها یکسان باشد حساسیت آنها به فرسایش بین شیاری تغییر می‌کند. ویژگی‌های خاک از جمله درجه خاکدانه سازی، پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت خاکدانه‌ها به تخریب در برابر نیروی برشی به طوری چشمگیر در میزان جدا شدن ذرات بر اثر ضربه قطرات باران اثر می‌گذارند. این ویژگی‌ها به اندازه و جرم حجمی خاکدانه، مقدار و نوع رس، کربن آلی و اجزای غیر آلی همانند آهن، سدیم، کلسیم و منیزیم بستگی دارد. فرسایش‌پذیری خاک را می‌توان از دیدگاه نوع فرسایش بررسی کرد. مطالعات نشان می‌دهد که فرسایش‌پذیری خاک در فرسایش‌های مختلف به دلیل عملکرد بارندگی و رواناب متفاوت است. در فرآیند فرسایش بین شیاری ضربه قطرات باران مهمترین عامل فرساینده خاک بین شیارها است. مقدار فرسایش بین شیاری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D_i = r_i K_i [2.96(\sin \theta) 0.79 + 0.56] C_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن D_i فرسایش بین شیاری (جرم در واحد سطح و زمان)، r_i عامل فرساینده در فرسایش بین شیاری، K_i عامل فرسایش‌پذیری خاک در فرسایش بین شیاری، θ شیب جریان بین شیاری با افق و C_i عامل اثر گیاه و مدیریت بر فرسایش بین شیاری است.

فرسایش شیاری عبارت از جدا شدن و انتقال ذرات خاک به وسیله جریان سطحی تمرکز یافته است. گزارش‌ها نشان می‌دهد که در دو خاک دارای حساسیت یکسان به فرسایش بین شیاری، فرسایش

¹ Water Erosion Prediction Project

ظرفیت انتقال رسوب است. در مورد نقش ساختمان خاک بر فرسایش پذیری خاک تحقیقات نشان می‌دهد که ساختمان خاک تأثیری مهم در فرسایش پذیری خاک دارد (Schwab و همکاران، ۱۹۹۳). تعداد، اندازه و درجه پایداری خاکدانه‌ها در ارزیابی ساختمان خاک از نظر فرسایش پذیری نقش دارند. پایداری خاکدانه‌ها، مقاومت ذرات خاک را در برابر جدا شدن از هم نشان می‌دهد. خاکدانه‌های ناپایدار به آسانی بر اثر ضربه قطرات باران از هم جدا می‌شوند و در صورت تداوم بارنگی و نفوذ آب به خاک، ذرات متلاشی شده منافذ سطح خاک را اشغال می‌کنند. این پدیده موجب ایجاد سله در سطح خاک شده و نفوذ پذیری خاک را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. عواملی از جمله نوع کاتیون‌های تبادلی، نوع و مقدار کانی‌های رسی، مقدار مواد آلی و سایر مواد سیمانی بر تعداد، اندازه و پایداری خاکدانه‌ها اثر می‌گذارند. اندازه ذرات خاک بر قابلیت جدا شدن آنها و انتقال پذیری آنها اثر می‌گذارد. هر چه اندازه ذرات خاک بزرگتر باشد، قابلیت جدا شدن ذرات آسانتر ولی انتقال آنها سخت‌تر می‌شود. ذرات رس نسبت به ذرات شن قابلیت جدا شدن کمتر ولی قابلیت انتقال بیشتری دارند.

برخی دیگر از پژوهشگران نیز فرسایش پذیری خاکها را در کرت‌های رواناب مورد بررسی قرار دادند. Wu و Zhou (۱۹۹۳) با تجزیه داده‌های حاصل از هدررفت خاک از کرت‌های رواناب نشان دادند که نسبت مقدار هدررفت خاک از واحد سطح (Y بر حسب kg/m^2) در هر واحد از ارتفاع رواناب را می‌توان به عنوان شاخص فرسایش پذیری (Kzw) معرفی کرد. این رابطه به صورت زیر ارائه گردید :

$$\text{رابطه (۹)} \quad \frac{Y}{Q} = K_{zw}$$

در این رابطه Kzw شاخص فرسایش پذیری برحسب kg/m^2mm ، Y مقدار هدررفت خاک بر حسب kg/m^2 و Q ارتفاع رواناب برحسب mm است. این شاخص بر خلاف شاخص فرسایش پذیری ویشمایر و اسمیت به شیب زمین بستگی دارد. به طوری که $K_{zw} = 0.0051S$ که در آن S شیب زمین بر حسب درصد است. این رابطه به دلیل آنکه بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای به دست آمده است می‌تواند مستقیماً در برآورد فرسایش پذیری به کار رود.

در نسخه تصحیح شده معادله جهانی فرسایش خاک (MUSLE) Modified Universal Soil Loss Equation نشان داده شد که جریان سطحی نیز بر فرسایش پذیری اثر می‌گذارد و برای این منظور شاخصی برای عامل R پیشنهاد گردید. این شاخص به صورت زیر بود:

$$\text{رابطه (۱۰)} \quad R = \frac{Q_R EI 30}{100}$$

که در آن Q_R سرعت رواناب است. این عامل تاحدی به درجه شیب بستگی دارد. بررسی‌ها نشان داد در شرایطی که عامل R بر اساس Q_R باشد لازم است عامل K و C دوباره ارزیابی شوند. زیرا تغییر در خاک و مدیریت محصول بر رواناب اثر می‌گذارند. در این صورت برآورد فرسایش در MUSLE رضایتبخش خواهد بود. بنابراین در

MUSLE از آنجا که اثر رواناب بر فرسایش در درون عامل R بررسی می‌شود به عنوان پیشرفتی در USLE به شمار می‌آید (Kinnell ۱۹۹۸). مواد آلی، اکسیدهای آهن، کربنات‌ها، رس‌ها و یا سیلیس‌ها در به هم آمدن ذرات خاک و تشکیل خاکدانه‌ها نقشی موثر دارند. افزایش سدیم قابل تبادل (Na^+) در تخریب خاکدانه‌ها نقش دارد. در خاک پراکنش یافته، رسها و کلوئیدهای آلی با جریان آب حرکت می‌کنند و باریکه‌های عبور آب را می‌بندند. بنابراین خاکهای دارای مقادیر زیادی سدیم نفوذپذیری بسیار پایینی دارند. وجود مواد آلی، خاکدانه‌های سطحی بزرگتر و نفوذپذیری بالا فرسایش پذیری خاک را کاهش می‌دهند (Millerr و Gardiner، ۱۹۹۸).

پژوهشگران بیان کردند که بافت، ساختمان (اندازه و شکل خاکدانه‌ها)، پایداری خاکدانه‌ها، نفوذپذیری نبرخ خاک، افق‌های خاک، اندازه و جرم حجمی ذرات، نسبت سزکوئی اکسیدهای سیلیس، مقدار ماده آلی، مقاومت برشی، ظرفیت نفوذ، مقدار مواد شیمیایی (عناصر حاصلخیز کننده)، کانی‌ها، جرم حجمی خاکدانه‌ها، مقدار رطوبت اولیه، پیوستگی ذرات و زبری و سنگریزه‌ای بودن سطح خاک بر فرسایش پذیری آن اثر می‌گذارند. مقاومت ذرات خاک در برابر جدا شدن از هم به پایداری خاکدانه‌ها بستگی دارد. ماده آلی از جمله عواملی است که در اندازه و ثبات خاکدانه‌ها نقش دارد. همچنین ماده آلی با افزایش نفوذپذیری خاک، حجم و سرعت رواناب و قدرت آن را برای انتقال ذرات خاک کاهش می‌دهد (Murphy و Charman، ۲۰۰۰). در مدل WEPP که بر اساس فرآیندهای موثر بر فرسایش (نفوذ، رواناب، جدا شدن ذرات، انتقال، رسوبگذاری، تکامل خاک، رشد گیاه و تجزیه بقایای گیاهی) پایه‌گذاری شده است، فرسایش پذیری بین شیاری بر ویژگی‌های بافت خاک استوار است. مطالعات انجام گرفته در بخش‌های مختلف جهان نشان می‌دهد که رس معمولاً فرسایش پذیری خاک را کاهش می‌دهد. مقدار ماده آلی، کربنات کلسیم، اکسیدهای آهن و آلومینوم و نوع مواد مادری از سایر ویژگی‌های موثر بر فرسایش پذیری هستند. کاتیون‌های با ظرفیت بالا به ویژه Ca^{+2} نقشی موثر در به هم آمدن کلوئیدهای خاک و افزایش مقاومت خاک به فرسایش دارند. آزمایش‌ها نشان داد که کلسیم به طوری معنی‌دار نمک‌های معلق در رواناب را کاهش می‌دهد. کلسیم قابل تبادل و سایر یون‌هایی که هدایت الکتریکی خاک را افزایش می‌دهند هدررفت فرسایشی را در خاکهای سرشار از رس کاهش می‌دهند. همچنین پلی‌ساکاریدها نقشی مهم در پایداری ساختمان خاک و مقاومت خاک در برابر نیروی برشی آب دارند. در خاکهای مناطق خشک که مقدار پلی‌ساکاریدها پایین است فرسایش ناشی از آبیاری بیشتر است (Orts و همکاران، ۲۰۰۰). ویژگی‌هایی مثل خاکدانه‌ها و مقاومت برشی در فرسایش پذیری خاک نقشی عمده دارند و سایر ویژگی‌ها به طور غیر مستقیم نقش دارند (Bryan، ۲۰۰۰). اثر پایداری خاکدانه بر فرسایش پذیری خاک عمدتاً به دلیل اهمیت آن در تشکیل سله می‌باشد. آزمایش‌ها نشان داد که به وجود آمدن سله در خاکهای رسی به پایداری خاکدانه‌ها بستگی دارد. پایداری خاکدانه‌ها با مقدار ماده آلی رابطه‌ای مستقیم و با درصد سدیم قابل تبادل (ESP) رابطه‌ای عکس دارد. برای پایدار بودن خاکدانه‌ها،

مقدار ماده آلی باید بیش از ۲۰ گرم در کیلوگرم و درصد سدیم تبدلی باید کمتر از ۸ تا ۱۰ درصد باشد. مطالعه موردی در مورد پیش بینی مکانی و زمانی و عدم قطعیت هدرفت خاک در RUSLE با استفاده از عامل فرسایش‌دهی باران- رواناب (R) نشان داد که عامل R دارای تغییرات زمانی و مکانی است. روش کریگینگ روشی مناسب برای برآورد تغییرات مکانی و زمانی می باشد. همبستگی بین مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری گردیده با استفاده از مدل گوسی کریگینگ بالاتر از ۰/۸۹ بود (Wang و همکاران، ۲۰۰۱).

بررسی‌ها نشان داد که ماده آلی نقشی مؤثر در نفوذ آب به خاک، پایداری خاکدانه‌ها، دوام خاک و رژیم رطوبتی خاک دارد (Sharma و Buhushan، ۲۰۰۱). بررسی‌های انجام گرفته در مورد تغییرات مکانی فرسایش پذیری در حوزه آبخیز چغاخور در استان چهارمحال بختیاری نشان داد که با افزایش درصد رس و ماده آلی فرسایش پذیری خاک کاهش می‌یابد اما با افزایش درصد سیلت، مقدار K کاهش می‌یابد (قاسمی و محمدی، ۱۳۸۲). شاخص‌های مختلفی برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک در چین ارائه گردید. Keli و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که کرت استاندارد برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک‌ها در چین دارای ۲۰ متر طول و ۵ متر عرض و شیب ۱۵ درجه است. بر این اساس شاخص‌های مختلفی را برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک می‌توان به کار برد. اولین شاخص بر اساس تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. این شاخص را نمی‌توان برای پیش بینی هدررفت خاک به کاربرد چرا که رابطه کمی فرسایش‌پذیری با هدررفت خاک ثابت نگردیده است. دومین شاخص بر اساس تعیین فرسایش‌پذیری به طور مستقیم از اندازه‌گیری مقدار هدررفت خاک بر اثر آبشویی است. با استفاده از این روش نمی‌توان شرح دقیقی از اثر ویژگی‌های خاک بر فرسایش بیان کرد. سومین روش عبارت از اندازه‌گیری مزرعه‌ای از کرت‌های واحد است. برخی دیگر از پژوهشگران بیان کرد که فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر بسیاری از ویژگی‌های خاک از جمله فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی، هیدرولوژیکی، بیولوژیکی، مینرالوژیکی و نیز ویژگی‌های جریان است به این دلیل مفهوم فرسایش‌پذیری و چگونگی ارزیابی آن پیچیده است. عامل K در USLE را می‌توان در خاک‌های غرب آفریقا که کانی رسی غالب خاک کائولینیت است، به کار برد. اما نمی‌توان آن را در خاک‌های رتی سول که دارای رس انبساط‌پذیر هستند و نیز در خاک‌هایی که دارای درصد بالایی از شن درشت می‌باشند استفاده کرد. در چنین خاک‌هایی استفاده از USLE برای تعیین عامل K، مقدار فرسایش‌پذیری را بسیار کمتر نشان می‌دهد. در حالی که در خاک‌های لومی و لوم‌سیلتی با مقدار زیادی سیلت مقدار عامل K کمتر خواهد بود. بررسی‌ها نشان داد که در خاک‌های کشاورزی بلافاصله پس از شخم پیوستگی ذرات از بین می‌رود و خاکدانه‌ها به راحتی تخریب می‌شوند. تحت این شرایط، پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند به عنوان شاخصی مناسب برای ارزیابی فرسایش‌پذیری باشد. مقاومت برشی با فرآیندهای به هم آورنده ذرات در خاکدانه‌ها در ارتباط است. بررسی تغییرپذیری مکانی Spatial variability فرسایش‌پذیری و رابطه آن با نوع خاک‌ها در کشور غنا نشان داد پایداری خاکدانه

شاخصی بسیار مهم برای فرسایش‌پذیری است که با نوع خاک رابطه‌ای ندارد. پایداری اندک خاکدانه‌ها شرایط را برای تولید رواناب ممکن می‌سازد. به این دلیل فرسایش‌پذیری خاک‌های کشاورزی بلافاصله پس از شخم بیشتر است. مقدار شن، سیلت، آهن و آلومینیوم، مقاومت برشی و سنگریزه به نوع خاک بستگی دارد. مقدار شن به دلیل نقش تعیین کننده آن در ترد و شکننده شدن خاکدانه‌ها به عنوان بهترین شاخص فرسایش‌پذیری بود (Veihe، ۲۰۰۲).

آزمایش‌ها نشان داد که خاک‌های دارای مقادیر بیشتری ذرات شن، اثر ضربه قطرات باران را بهتر کاهش می‌دهند و به دلیل داشتن سرعت نفوذ آب بیشتر، رواناب کمتری تولید می‌کنند. با مصرف پلی‌آکریل-آمید (PAM) به وسیله آب آبیاری، پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری خاک افزایش یافت. با بالا رفتن شیب زمین از ۲/۵ تا ۵ درصد، با وجود آنکه حجم رواناب تا ۱۰ درصد افزایش یافت، لیکن نفوذپذیری خاک تا ۲۴ درصد افزایش یافت. بنابراین مصرف پلی‌آکریل‌آمید در خاک‌های با آبیاری بارانی می‌تواند پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری خاک را بهبود بخشد و فرسایش‌پذیری خاک را کاهش دهد (Santos و همکاران، ۲۰۰۳). برخی دیگر از پژوهشگران گزارش دادند که فرسایش‌پذیری خاک به اثر ترکیبی باران، رواناب و نفوذ بستگی دارد. این عامل بیانگر اثر ویژگی‌های خاک بر هدررفت آن در زمین‌های شیبدار در طی مدت بارندگی است. عامل K برآورد شده از نمودار USLE، در خاک‌های نواحی گرمسیری که کائولینیت کانی رسی غالب در خاک است به کار می‌رود. استفاده از آن در خاک‌های رتی سول رایج نیست. در خاک‌های نواحی گرمسیری، خاکدانه‌های ناپایدار، سیلت، شن و رطوبت اشباع برای تعیین K استفاده می‌شود. در پژوهشی اثر مواد مادری بر فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از باران مصنوعی در کرت‌های با مساحت ۱ مترمربع در حوزه آبخیز گل‌آباد اردستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرسایش‌پذیری در خاک‌ها با مواد مادری گرانودیوریت کمترین و در خاک‌های با مواد مادری آندزیت بیشترین است. همچنین مقایسه فرسایش‌پذیری خاک در نمودار USLE با فاکتور فرسایش‌پذیری در RUSLE نشان داد که هیچ رابطه معنی داری بین آن دو وجود ندارد (شکل آبدی و همکاران، ۱۳۸۲). آزمایش‌ها نشان داد که پدیده‌های نفوذپذیری، رواناب و فرسایش خاک از جمله فرآیندهایی هستند که از شرایط فیزیکی سطح خاک متأثر می‌شوند (Zelege و همکاران، ۲۰۰۴). در آزمایشی به منظور ارزیابی کارایی نمودار ویشمایر و اسمیت در برآورد عامل K، فرسایش‌پذیری خاک در کرت‌های رواناب تحت باران طبیعی در منطقه‌ای با میانگین بارندگی سالانه ۴۰۰ تا ۵۴۱ میلی متر با روش Wu و Zhou (۱۹۹۳) در چین بررسی گردید و نتایج با فرسایش‌پذیری برآورد شده با نمودار مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که مقدار Kzw به طور خطی به شیب زمین بستگی دارد در حالی که عامل فرسایش‌پذیری K مستقل از شیب زمین است. نتایج آشکارا نشان داد که عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE بهتر از شاخص Kzw اثر ویژگی‌های خاک را بر هدررفت خاک نشان می‌دهد. همچنین همبستگی معنی‌داری بین مقدار رس و فرسایش‌پذیری به صورت زیر بدست آمد:

رابطه (۱۱)

$$K = 0.031 - 0.0013 CI$$

در این رابطه K عامل فرسایش پذیری در USLE یا RUSLE بر حسب $t \text{ h/MJ mm}$ و CI مقدار رس بر حسب درصد است. مقدار K برآورد شده با نمودار حدود $3/3$ تا $8/4$ برابر بیشتر از مقدار K اندازه گیری شده در کرت ها بود. همبستگی بین این دو مقدار K نیز بسیار پایین ($r^2 = 0/19$) گزارش شد (Zhang و همکاران، ۲۰۰۴). بررسی ها نشان می دهد که فرآیندهای فرسایشی دارای تغییرات مکانی (فضایی) و زمانی هستند. تغییرات مکانی فرسایش خاک هم از بعد کل فرسایش و هم نوع فرسایش است. که این به دلیل تغییر نوع فرآیندهای فرسایشی و اندازه هر یک از فرآیندها و نیز تغییر مقاومت نسبی خاک و پوشش سطح می باشد. این موضوع از سه بعد قابل بررسی است: - در بعد مزرعه ای؛ جایی که تفاوت عمده ای بین بالادست و پایین دست شیب و نیز سطوح دارای شیار و بدون شیار است. - در بعد حوضه ای؛ جایی که تولید جریان و رسوب منجر به تفاوت عمده در نوع و مقدار رسوب می شود. - در بعد منطقه ای؛ جایی که تفاوت ها عمدتاً به دلیل تغییرات فرسایش پذیری و عملیات کاربری اراضی است. از سوی دیگر نوع فرآیندهای فرسایشی در طی زمان تغییر می کند. تغییرات ممکن است کوتاه مدت یا درازمدت باشد. تغییرات زمانی اغلب به دلیل تغییرات حجمی خاک بر اثر تورم، نوسان ماده آلی خاک و یخبندان است. این عوامل بر نفوذ، ظرفیت ذخیره خاک، نوع و طبیعت مواد در سطح خاک اثر می گذارند. پژوهش ها نشان داد که تغییرات حجمی خاک در خاک های دارای مقادیر بیشتری سدیم و نیز خاکهای دارای رس ورمی کولیت رخ می دهد (Morgan و Kirkby، ۱۹۸۰).

نتایج و بحث

بررسی های انجام گرفته به وسیله پژوهشگران نشان می دهد که فرسایش پذیری خاک تحت تأثیر عوامل مختلف فیزیکی، مکانیکی، هیدرولوژیکی، شیمیایی، مینرالوژیکی و بیولوژیکی در کنار ویژگی های جریان و نیمرخ خاک قرار می گیرد. ویشمایر و همکاران با بررسی فرسایش پذیری در خاکهای ۴۲ ایالت مختلف آمریکا نتیجه گرفتند که فرسایش پذیری خاک همبستگی معنی دار با بافت، ساختمان، مقدار ماده آلی و نفوذپذیری خاک دارد. نمودار ویشمایر و اسمیت و معادله فرسایش پذیری در اغلب کشورها به عنوان روشی آسان برای پیش بینی و برآورد فرسایش پذیری خاک استفاده می گردد. باید در نظر داشت که رابطه فوق نتیجه استفاده از باران مصنوعی است که بر اساس باران های مناطق شرق آمریکای مرکزی با بارندگی به شدت $63/5$ میلیمتر در ساعت به مدت ۲ ساعت پیاپی اعمال گردیده است. وقوع چنین بارانی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران غیر محتمل است. بنابراین استفاده از این رابطه برای برآورد مقدار فرسایش پذیری خاک در مناطق خشک و نیمه خشک ایران مقدار K را بیشتر از مقدار حقیقی آن نشان خواهد داد. از سوی دیگر این رابطه در مناطق نیمه مرطوب ایالات متحده آمریکا در خاکهای تقریباً عاری از آهک ارائه گردیده است. بنابراین در خاک های مناطق خشک و نیمه خشک (از جمله ایران) که در آن آهک نقشی سازنده در پایداری خاکدانه ها

دارد، ممکن است در روش تجزیه مکانیکی به روش هیدرومتر به علت پراکنده شدن ذرات کلئیدی جزء بخش شن ریز و سیلت در نظر گرفته شود و این کار مقدار K را بزرگتر از مقدار واقعی آن نشان می دهد (رفاهی، ۱۳۷۵). بنابراین بررسی فرسایش پذیری در خاکهای آهکی مناطق خشک و نیمه خشک از جمله خاک های استان آذربایجان شرقی حائز اهمیت است.

نمودار ویشمایر و اسمیت ارائه شده برای تعیین فرسایش پذیری تنها بر اساس بخش از ویژگی های ذاتی خاک که عمدتاً فیزیکی هستند استوار است. گزارش ها نشان می دهد که نمودار ویشمایر و اسمیت به عنوان پایه ای برای پیش بینی فرسایش خاک با استفاده از USLE و RUSLE در ایالات متحده، استرالیا و سایر نقاط جهان قرار گرفته است (Zhang و همکاران، ۲۰۰۴). در حالی که فرسایش پذیری خاک در کنار ویژگی های فیزیکی ممکن است تحت تأثیر سایر ویژگی های خاک از جمله شیمیایی قرار گیرد. این ویژگی ها می توانند نقش عمده در تغییر پذیری مکانی فرسایش پذیری خاک در یک منطقه داشته باشند. از سوی دیگر نمودار ویشمایر و اسمیت، مقدار فرسایش - پذیری را در طی سال یکسان در نظر می گیرد در صورتی که فرسایش پذیری در کنار ویژگی های ذاتی خاک (بافت و ...) به ویژگی های غیرذاتی خاک از جمله پایداری خاکدانه ها و نفوذپذیری نیز بستگی دارد که این ویژگی ها در طی سال بر اثر مدیریت های مختلف خاکی و زراعی و نیز عوامل اقلیمی تغییر می یابند بنابراین فرسایش - پذیری خاک از دیدگاه زمانی نیز قابل بررسی است. نمودار ویشمایر و اسمیت بر اساس تجزیه و تحلیل های مختلف آمار کلاسیک به دست آمده است. در آمار کلاسیک موقعیت مکانی یا زمانی نمونه ها مورد بررسی قرار نمی گیرد به این دلیل بعضی از ساختارهای موجود ممکن است به وسیله ابزارهای موجود در آمار کلاسیک آشکار نگردد. در زمین آمار یا آمار مکانی موقعیت فضایی نمونه ها مورد سنجش قرار می گیرد. بنابراین بسیاری از ساختارهای پنهان که تابع فاصله زمانی یا مکانی هستند به وسیله ابزارهای موجود در زمین آمار از جمله واریوگرام آشکار می گردد (حسینی پاک، ۱۳۷۷). با استفاده از روش زمین آمار می توان همبستگی بین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک را با تغییرات مکانی و زمانی فرسایش پذیری آن به دست آورد و ویژگی هایی از خاک که همبستگی بالایی با فرسایش پذیری خاک دارند مشخص کرد. همچنین تغییرات مکانی و زمانی فرسایش پذیری را می توان به صورت مدل ارائه کرد. و از آن رابطه ای برای برآورد فرسایش پذیری در خاک های آهکی مناطق نیمه خشک ارائه کرد.

منابع

- ۱- حسینی پاک، ع. ا.، ۱۳۷۷. زمین آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، ایران، صفحه ۷۷-۷۶.
- ۲- رفاهی، ح. ق.، ۱۳۷۵. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ایران، صفحه ۱۴۷-۱۴۰.
- ۳- شکل آبادی، م. ج. خادمی، و ا. ج. چرخابی، ۱۳۸۲. مقایسه فاکتور فرسایش پذیری RUSLE در خاکهای حاصل از مواد مادری متفاوت

Technical Paper 19/84, Wellington Research Center, Soil Conservation Service of NSW, Sydney. PP. 223-228.

19- Orts, J.W., R.E. Sojka, and G.M. Glenn, 2000. Biopolymer additives to reduce erosion- induced soil losses during irrigation. *Industrial Crops and Products*, 11: 19-26.

20- Santos, F.L., J.L. Reis, O.C. Martins, O.C. Castanheria, N.L. and R.P. Serralherio, 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. *Biosystems Engineering*, 86(3), 355-364.

21- Schwab, G. O., D.D. Fanmeier, W.j. Elliot, and R.K. Frevert, 1993. *Soil and water conservation engineering*. Fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., New York. P. 92-103.

22- Sharma, P. K. and L. Buhushan, 2001. Physical characterization of a soil amended with organic residue in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. *Soil Till. Res.*, 60: 143-152.

23- Tisdall, J. M. and J.M. Oades, 1980. The effect of crop production on aggregation in a red-brown earth. *Australian Journal of Soil Research*, 8: 423-433.

24- Turner, A.K., T.A. McMahon, and M.J. Srikanthan, 1985. Rainfall intensity and overland flow in relation to soil erosion studies for tropical lands. *Soil Erosion Management*. Australian Center for International Agricultural Research, pp. 24-31.

25- Veihe, A., 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. *Geoderma*, 106: 101-120.

26- Wang, G., G. Gertner, X. Liu, and A. Anderson, 2001. Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation. *Catena*, 46:1-14.

27- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook No. 537*. US Department of Agriculture, Washington DC.

28- Yuong, R. A., M.J. M Romkens, and D.K. McCool, 1990. Temporal variations in soil erodibility, In: Bryan. R.B. (Ed.), *Soil Erosion- Experiments and Models*. *Catena*. supplement 17, Verlag. Cremlingen –Destedt, pp. 101-111.

29- Zeleke, T.B., M.C.J Grevers, B.C. Si, Mermut, and A.R. Beyene, S. 2004. Effect of residue incorporation on physical properties of the surface soil in the South Central Rift Valley of Ethiopia. *Soil & Tillage Research*, 77: 35-46.

30- Zhang, K., Li, S., W. Peng, and B. Yu, 2004. Erodibility of agricultural soils and loess plateau of China. *Soil & Tillage Research*, 76: 157-165.

31- Zhou, P. and C. Wu, 1993. The research method of soil anti-scourability experiment in

در حوزه آبخیز گل آباد اردستان. مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران، جلد دوم، انتشارات دانشگاه گیلان، ایران، صفحه ۸۵۰-۸۵۲.

۴- قاسمی، ا. و ج. محمدی، ۱۳۸۲. بررسی تغییرات مکانی فرسایش- پذیرگی خاک مطالعه موردی حوزه آبخیز چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری. مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران، جلد دوم، انتشارات دانشگاه گیلان، ایران، صفحه ۸۶۴-۸۶۵.

5- Angima, S. D., D.E. Stott, M.K. O' Neill, C. K. Ong, and G.A. Weesies, 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97: 295-308.

6- Bryan, R.B., 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32: 385-415.

7- Charman, P.E.V. and B.W. Murphy, 2000. *Soils (their properties and management)*. Second edition, Land and Water Conservation, New South Wales, Oxford. PP. 206-212.

8- Conaway, A.W. and E. Strickling, 1962. A comparison of selected methods for expressing soil aggregate stability. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 24: 426-430.

9- Follet, R.F. and B.A. Stewart, 1985. *Soil erosion and crop productivity*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. PP.1-19.

10- Foster, G.R., R.A. Young, M.J.M. Romkens, and C.A. Onstad, 1985. Processes of soil erosion by water. In: Follett, R. F. and Stewart, B. A. *Soil erosion and crop productivity*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Madison. Wisconsin, USA. PP. 137-59.

11- Gerrard, J. 2000. *Fundamental of soils*. Routledge Fundamentals of Physical Geography, London and New York, pp.177-200.

12- Jiang, D. and X. Zhu, 1962. Soil and water conservation. In: Soil Fertilizer Institute of Chinese Academy of Agricultural Soils on Compiling Chinese Agricultural Soils. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai (in Chinese).

13- Keli, Z., L. Shuangcai, and P. Wenyang, 2002. Erodibility of agricultural soils in the loess plateau of China. 12th ISCO Conference, Beijing, pp.551-558.

14- Kinnell, P.I.A. 1998. Converting USLE soil erodibilities for use with the Q_REI30 index. *Soil & Tillage Research*, 45, 349-357.

15- Kirkby, M.J. and R.P. Morgan, 1980. *Soil erosion*. John Wiley & Sons, New York.

16- Middleton, H.E. 1930. Properties of soils which influence soil erosion. *USDA Tech. Bull.* 178, Washington DC.

17- Miller, R.W. and D.T. Gardiner, 1998. *Soils in our environment*. Eighth edition. Prentice-Hall Inc., United State of America, pp. 75-81.

18- Murphy, B.W. 1984. A scheme for the field assessment of soil erodibility for water erosion.

Loess Plateau. Acta Coservation Soil Et Aquae
Sinica. 7(1), 29-34.

