واسنجی عامل فرسایش پذیری یک مدل فرایندی در فرسایش آبی با استفاده از شبیه سازی باران

پدیده جوادی، حسن روحی پور و علی اکبر محبوبی
به ترتیب کارشناس ارشد گروه خاکشناسی شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع و دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه همدان

مقدمه

فرسایش‌پذیری در حقیقت بیان کمّی حساسیت ذاتی خاک نسبت به جدا شدن ذرات از بستر و انتقال آن توسط عوامل فرساینده (باران و رواناب) است. فرسایش پذیری به عنوان یک عامل در واقع حاصل تاثیر بسیاری از خصوصیات فیزیکو شیمیائی خاک و اثرات متقابل بین آنها است. بطور کلی خصوصیاتی از خاک که در فرسایش‌پذیری آن موثرند عبارتند از: سرعت و ظرفیت نفوذ آب در خاک، بافت خاک، ساختمان و پایداری خاکدانه‌ها که خود نیز تحت تأثیر نوع و میزان مواد آلی و ترکیبات مختلف شیمیایی قرار می‌گیرند. از میان این خواص، پایداری خاکدان و مقاومت فیزیکی یا مکانیکی خاک مؤثرترین عامل بر روی فرسایش و انتقال رسوب می‌باشد

به دلیل مشکلات و محدودیتهایی موجود در روشهای مستقیم اندازه گیری فرسایش خاک و همینطور پیشرفت شایان توجهی که در درک مفاهیم و مکانیزم فرآیند فرسایش حاصل شده، ابداع مدل های مختلف در زمینه فرسایش و رسوب از سالها پیش مورد توجه قرار گرفته است. در حال حاضر شناخت نسبتاً جامعی از بسیاری عوامل مؤثر در فرایند فرسایش حاصل شده وروابط بین آنها به صورت معادلات ریاضی تعریف شده‌است.(مورگان، ۱۹۸۶). بر اساس این روابط مدلهای متنوعی تکامل یافته که مدل‌های فرآیندی و تجربی از آن جمله هستند.

در این تحقیق، از بین مدل‌های فرآیندی، مدل (Griffith University Erosion System Template) *GUEST* واز مدل‌های تجربی، مدل جهانی هدر رفت خاک یا *USLE* انتخاب شده تا رابطه عامل فرسایش پذیری خاک در این دو مدل با پایداری خاکدانه ها مورد بررسی قرار گیرد.

مدل فرآیندی GUEST

این مدل براساس مدل رز (۱۹۸۳) و ،یرسین و رز (۱۹۹۲) استوار است. در این مدل سه فرآیند؛ جداشدن ذرات خاک توسط قطرات باران Rainfall detachment، ترسیب ذرات Sediment deposition و جدا شدن ذرات و حمل آنها Entrainment of sediment توسط رواناب در نظر گرفته شده است. غلظت رسوب در رواناب حاصل برآیند این سه فرآیند است. ترسیب یا ته نشینی ذرات تحت اثر نیروی ثقل، فرآیندی است که بطور پیوسته در طول فرایند فرسایش صورت می گیرد. فرآیند ترسیب شدیداً انتخابی بوده و شدت آن بستگی به توزیع اندازه ذرات خاکدانه ها دارد. برای ذرات شن و خاکدانه های درشت سریعتر و برای خاکدانه‌ها یا ذرات با اندازه رس خیلی آرام است. سرعت سقوط خاکدانه‌ها یا ذرات اولیه به اندازه، شکل و چگالی آنها بستگی دارد. فرض کنید که خاک بطور اختیاری به تعداد I کلاس سرعت ته نشینی Settling velocity class یا جرم برابر تقسیم‌بندی شده است. توزیع سرعت سقوط این ذرات، خصوصیات سرعت ته‌نشینی خاک را توصیف می‌نماید. چنانچه سرعت ته‌نشینی ذرات در کلاس قطری i را با v_i نشان دهیم، توان ترسیب‌پذیری مؤثر خاک که تقریباً برابر میانگین سرعت سقوط ذرات رسوب در آب است و با Ø نشان داده می‌شود از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\phi = \sum_{i=1}^{I} \frac{v_i}{I} \qquad (m\ s^{-1}) \qquad (۱)$$

در مدل GUEST میزان فرسایش ناشی از برخورد قطرات باران با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$c = \frac{aP^{p}}{\varepsilon Q} \qquad (kg\ m^{-3}) \qquad (۲)$$

که در آن :

$$\varepsilon = 1 + \frac{a\,\phi}{Qa_d} \qquad (۳)$$

در این روابط، c غلظت رسوب، α و a_d به ترتیب ضریب جدایش‌پذیری Detachability خاک اولیه و لایه ترسیب یافته در حین رویداد فرسایش است. P شدت بارندگی و p کوچک یک نمای بدون بعد برای شدت بارندگی است که تقریباً برابر عدد یک است. Q شدت روان‌آب در واحد سطح ($m^{-3}\ m^{-2}\ s^{-1}$) است.

در مدل GUEST حداکثر غلظت رسوب ناشی از عمل رواناب برای جریان ورقه‌ای با روابط زیر برآورد می‌شود؛

$$C_t = \frac{F\sigma S}{(\sigma/\rho - 1)\phi_e}\left(\frac{\sqrt{S}}{n}\right)^{3/5} L^{2/5} Q^{2/5} \qquad (۴)$$

که در آن؛ F بخشی از قدرت جریان است که برای انجام کار فرسایش در دسترس می‌باشد، $\phi = \Sigma v_i / I$ توان ترسیب‌پذیری مؤثر ($m\ s^{-1}$)، S شیب ($m\ m^{-1}$)، ρ دانسیته آب ($kg\ m^{-3}$)، σ دانسیته مرطوب رسوب ($kg\ m^{-3}$)، n ضریب زبری مانینگ، L طول شیب (m) و Q شدت روان‌آب ($m^2\ s^{-1}$) است. مقدار F برای جریانهای متلاطم تقریبا برابر ۰/۱ است اما در قدرت جریانهای کمتر از ۰/۱ وات بر متر مربع به سمت ۰/۲ افزایش می‌یابد (Proffitt et al., 1993).

مطالعات متعدد نشان داده است که بین میزان واقعی بار رسوب (غلظت واقعی رسوب؛ c) و حداکثر حمل رسوب (c_t) رابطه‌ای نمایی بصورت زیر وجود دارد:

$$c = c_t^{\beta} \qquad (kg\ m^{-3})$$

رابطه (۵)

در رابطه (۵)، β یک پارامتر تجربی فرسایش پذیری است. β همبستگی زیادی با پارامتر اصلی فرسایش‌پذیری، یا مقاومت خاک دارد(Rose, 1993). چنانچه پارامتر فرسایش پذیر خاک (β) معلوم باشد با استفاده از مدل GUEST می‌توان غلظت رسوب را بر هر واقعه مجرد یا رگبارش محاسبه نمود.

برای برآورد عامل فرسایش پذیری β، با برقراری یک سری آزمایشات ابتدا میانگین غلظت واقعی رسوب (c) در کرتهای آزمایشی اندازه گیری شده و سپس حداکثر توان حمل C_t با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود. پس از اندازه گیری بار رسوب و محاسبه توان حمل، عامل β از رابطه زیر بدست می‌آید؛

$$\beta = \frac{\ln c}{\ln c_t}$$

رابطه (۶)

معادله جهانی هدر رفت خاک USLE

ویشمایر و اسمیت (۱۹۶۵) پس از سال های طولانی پژوهش دربارهٔ فرسایش آبی، سر انجام با استفاده از آمار رسوب و رواناب بیش از ۱۰۰۰۰ (سال × پلات) در کرتهای آزمایشی ۴۶ ایستگاه تحقیقاتی از ۲۶ ایالت مختلف آمریکا و ملاحظه یافته‌ها و نتایج بررسی دیگران، معادله‌ای را جهت تخمین مقدار فرسایش آبی خاک پیشنهاد کردند. در معادله جهانی هدر رفت خاک تأثیر هر کدام از عوامل مؤثر در فرسایش خاک بصورت یک کمیت، مشخص گردیده که از حاصلضرب آنها میزان تلفات خاک به صورت کمّی بدست می‌آید.شکل کلی این معادله بصورت زیر است.

$$A=RKLSCP$$

رابطه(۷)

که در آن، A میزان خاک از دست رفته در واحد سطح، R عامل فرسایندگی باران، K عامل فرسایش‌پذیری خاک، L عامل طول شیب، S عامل درجه شیب، C عامل پوشش و مدیریت و P عامل عملیات حفاظتی می‌باشند. عامل فرسایش‌پذیری خاک، K با استفاده از نموگراف ویشمایر و اسمیت(۱۹۷۸) از روی برخی خصوصیات خاک تخمین زده می‌شود. سایر مدل هائی که اساس آنها همان معادله جهانی هدر رفت خاک است مانند MUSLE و یا RUSLE و همچنین معادله ریچاردسون (*Richarson*) برای عامل فرسایش پذیری از همان عامل K ویشمایر و اسمیت استفاده کرده اند.

مواد و روش ها

به منظور تعیین حساسیت خاک به فرسایش از دو مدل تجربی یکی معادله جهانی هدر رفت خاک با استفاده از نموگراف ویشمایر و اسمیت و دیگری از مدل فرایندی GUEST با عامل فرسایش پذیری β استفاده شد. جهت بررسی میزان فرسایش پذیری خاک با استفاده از روشهای تجربی و فرآیندیابی آزمایشهایی با کاربرد شبیه سازی باران درآزمایشگاه فرسایش خاک مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع صورت گرفت. دو نمونه خاک مربوط به دو حوزه ساوه و امامه به مقدار تقریبی صد کیلوگرم در تشتک فلوم شیب دار قرار داده شد. در هر بار آزمایش بستر خاک در معرض سه شدت مختلف بارندگی و برای هر شدت بارندگی نیز ترکیبی از چهار شیب متفاوت روی بستر خاک موجود در فلوم آزمایش در نظر گرفته شد. مقدار رواناب و رسوب ناشی از فرسایش در هر مرحله از آزمایشات مذکوردر طی مدت ۲۰ دقیقه شبیه سازی باران در سطل های پلاستیکی جمع آوری و توزین گردید. پایداری خاکدانه های رسوب با استفاده از خصوصیات فیزیکوشیمیائی خاک و نمودار ویشمایر و اسمیت عامل فرسایش پذیری معادله جهانی هدر رفت خاک تعیین شد. عامل فرسایش پذیری در مدل فرایندی نیز با استفاده از داده های شبیه سازی باران محاسبه و مجدداً برای برای همان خاکها واسنجی گردید.

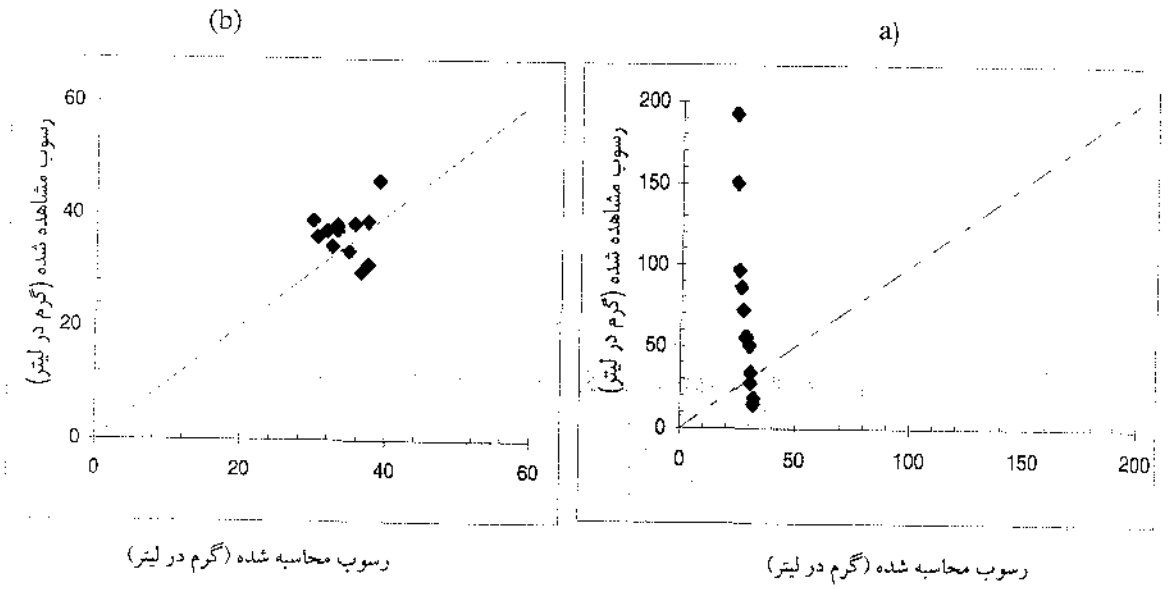
نتایج و بحث

جدول(۱) خصوصیات موردنیاز برای تعیین عامل فرسایش پذیری خاک(K) در مدل جهانی هدر رفت خاک

فرسایش پذیری خاک (K)	نفوذ پذیری	ساختمان	شن %	مواد آلی %	شن خیلی ریز %	سیلت %	نمونه خاک حوضه
0.2	3	2	71.5	0.6	6.4	19	حوضه ساوه
0.43	4	4	12	0.5	6.2	46	حوضه امامه

بررسی بر روی عامل فرسایش پذیری خاک در مدل تجربی USLE نشان داده که هرچه کمیت عامل K یا عامل فرسایش پذیری خاک بیشتر باشد خاک بیشتر در معرض فرسایش قرار می گیرد و خاک حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش دارد. همانطوریکه در جدول (۱) مشاهده می شود نمونه خاک حوزه امامه به دلیل داشتن بافت رسی سیلتی دارای K بالاتری نسبت به نمونه خاک حوزه ساوه با بافت لوم شنی دارد که بیانگر حساسیت بیشتر این خاک به فرسایش می باشد. همچنین مقدار مواد آلی در هر دو نمونه خاک حوزه ساوه و امامه تقریباً در یک سطح می باشد.

شکل(۱) رسوب برآورد شده با استفاده از معادله جهانی هدر رفت خاک و مقایسه آن با رسوب اندازه گیری شده بر روی خاک بدون پوشش حوضه امامه (a) و حوضه ساوه (b)



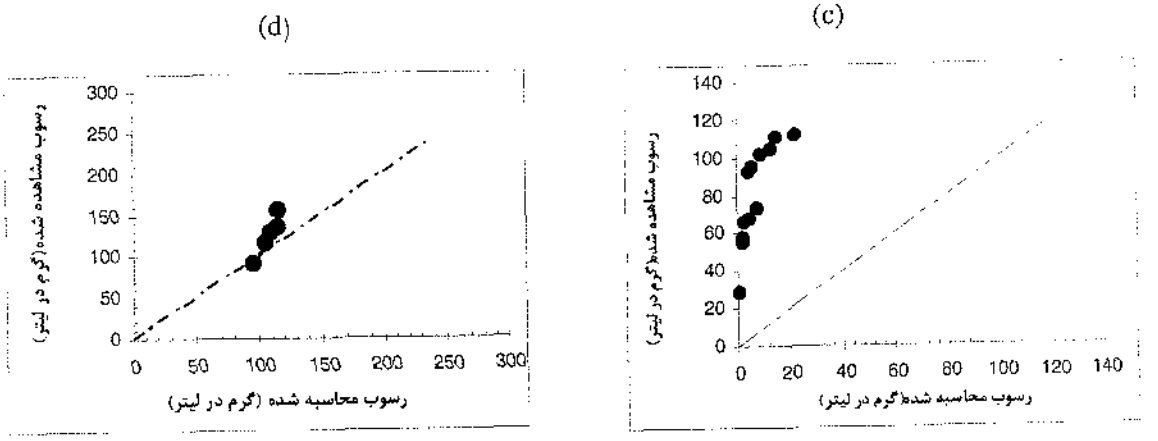
جدول(۲) مقدار رسوب برآورد شده با استفاده از معادله GUEST برای دو پارامتر a و a_d و مقایسه آن با رسوب اندازه گیری شده در نمونه خاک ساوه

شیب %	شدت باران (میلیمتر بر ساعت)	شدت روان آب (میلیمتر بر ساعت)	ضریب (a)	ضریب (a_d)	ترسیب پذیری مؤثر (متر بر ثانیه)	رسوب برآورد شده (گرم در لیتر)	رسوب اندازه گیری شده (گرم در لیتر)
5	25	16.65	21.28	14110.4	0.0325	31.95205	15.069
5	50	33	21.28	14110.4	0.0369	32.24248	18.54
5	75	51.92	21.28	14110.4	0.0304	30.73963	27.975
10	25	17.26	21.28	14110.4	0.0365	30.82281	34.26
10	50	35.12	21.28	14110.4	0.0457	30.29619	50.61
10	75	54.72	21.28	14110.4	0.0451	29.1667	55.68
15	25	18.75	21.28	14110.4	0.0359	28.37342	55.62
15	50	39.5	21.28	14110.4	0.0358	26.93675	72.45
15	75	61.28	21.28	14110.4	0.0325	26.04441	86.4
20	25	21.25	21.28	14110.4	0.0419	25.03537	96.87
20	50	44.12	21.28	14110.4	0.0401	24.11608	150.6
20	75	67.5	21.28	14110.4	0.0415	23.64447	192.81

جدول(۳) مقدار رسوب برآورد شده با استفاده از معادله GUEST برای دو پارامتر a و a_d و مقایسه آن با رسوب اندازه گیری شده درنمونه خاک امامه

شیب %	شدت باران (میلیمتر بر ساعت)	شدت رواناب (میلیمتر بر ساعت)	ضریب(a)	ضریب (a_d)	ترسیب پذیری مؤثر (متر بر ثانیه)	رسوب برآورد شده (گرم در لیتر)	رسوب اندازه گیری شده (گرم در لیتر)
5	25	19.5	29.13	23345.6	0.0081	37.34613	27.99
5	50	37.5	29.13	23345.6	0.014	38.83998	54.96
5	75	58.5	29.13	23345.6	0.0142	37.34614	65.91
10	25	20	29.13	23345.6	0.0089	36.41248	57.3
10	50	41	29.13	23345.6	0.009	35.52438	92.07
10	75	63	29.13	23345.6	0.0145	34.67856	95.16
15	25	22	29.13	23345.6	0.0146	33.10225	67.47
15	50	44	29.13	23345.6	0.0149	33.10226	101.52
15	75	67.5	29.13	23345.6	0.009	32.36666	104.76
20	25	23	29.13	23345.6	0.0096	31.66303	72.96
20	50	48	29.13	23345.6	0.0156	30.34374	110.34
20	75	73.5	29.13	23345.6	0.0165	29.72448	111.21

همانطوریکه در جداول(۲ و ۳) مشاهده می شود با مقایسه میزان رسوب اندازه گیری شده و محاسبه شده با استفاده از عامل فرسایش-پذیری a_d و a می توان دریافت که تنها تا شیب حدود ۵ درصد مقادیر این دو رسوب با هم همخوانی دارد و در شیب های بالاتر به عنوان شاخص فرسایش پذیری نمی تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل(۲) رسوب برآورد شده با استفاده از دو ضریب a و a_d و مقایسه آن با غلظت رسوب اندازه گیری شده در خاک حوضه ساوه (c) و حوضه امامه(d)

اشکال (۱و۲) رابطه بین مقدار غلظت محاسبه شده (برآورد شده از معادله ۱و۲) بر اساس دو پارامتر a و a_d و مقایسهٔ آن با غلظت اندازه گیری شده بر روی نمونه های خاک لخت در هر دو حوزه ساوه و امامه می باشد.همانطوریکه در شکلهای مذکور مشاهده می شود تخمین رسوب بر اساس دو پارامتر a و a_d و مقایسهٔ آن با رسوب اندازه گیری شده بیانگر این نکته است که دو پارمتر a و a_d تنها در شیبهای کم جوابگوی مناسبی می باشد. زیرا معادله ۱ بر اساس کاربرد این دو پارامتر مذکور برای پاشمان ناشی از برخورد قطرات باران تهیه شده است. از طرفی دیگر تنها در شیبهای کم، پاشمان می تواند بخش مهمی از تولید رسوب را بوجود آورد و تأثیر آن در شیبهای تند در مقایسه با روان آب ناچیز است از اینرو بهتر است برای تخمین رسوب با کاربرد دو پارامتر فرسایش پذیری a و a_d تنها در اراضی با شیبهای کم مورد استفاده قرار بگیرد و از آنجائی که در معادلات مذکور تنها خصوصیات هندسی پلات مورد آزمایش از جمله شیب فلوم،طول شیب و...لحاظ نمی گردد طبیعی است که نمی تواند جوابگوی دقیقی جهت تخمین رسوب در شیبهای تندتر باشد

به همین دلیل جهت تخمین رسوب در مدل GUEST از پارامتری دیگربرای شاخص فرسایش پذیری خاک، یعنی پارامتر بتا (β) استفاده می شود. از این رو جهت تخمین فرسایش اعم از پاشمان و رواناب مقدار بتا با استفاده از پارامترهایی که قبلاً توضیح داده شد طی ۱۲ آزمایش مختلف روی هر نوع خاک موردبررسی در شیب و شدت های مختلف مقدار" بتا" محاسبه و مقدار میانگین آن تعیین شد. سپس با استفاده از ضریب فرسایش پذیری بتا و قرار دادن آن در معادله ۵ مقدار رسوب برآورد گردید و با مقدار رسوب اندازه گیری شده در کرت آزمایشی مقایسه شد. جداول (۴ و ۵) بیانگر مقدار رسوب محاسبه شده با استفاده از پارامتر بتا و مقایسه بارسوب اندازه گیری شده در هر دو نمونه خاک حوزه ساوه و امامه است.

جدول(۴) مقدار رسوب محاسبه شده با استفاده از معادله GUEST بر اساس پارامتر بتا و مقایسه آن با رسوب اندازه گیری شده در نمونه خاک حوزه امامه

شیب (درصد)	شدت باران (میلیمتر بر ساعت)	شدت رواناب (میلیمتر بر ساعت)	رسوب اندازه گیری شده (گرم در لیتر)	رسوب برآورد شده (گرم در لیتر)	بتا
5	25	16.65	27.99	30.84	0.58
5	50	33	54.96	39.78	0.58
5	75	51.92	65.91	47.13	0.58
10	25	17.26	57.3	60.79	0.58
10	50	35.12	92.07	66.88	0.58
10	75	54.72	95.16	74.755	0.58
15	25	18.75	67.47	76.76	0.58
15	50	39.5	101.52	88.57	0.58
15	75	61.28	104.76	98.44	0.58
20	25	21.25	72.96	93.39	0.58
20	50	44.12	110.34	109.48	0.58
20	75	67.5	111.21	117.29	0.58

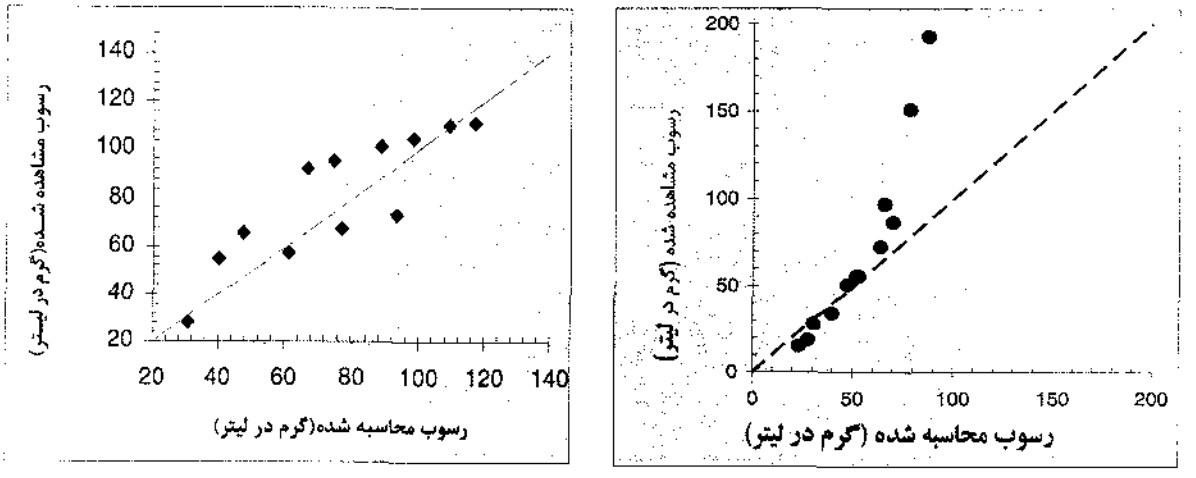
جدول(۵) مقدار رسوب محاسبه شده با استفاده از معادله GUEST بر اساس پارامتر بتا و مقایسه آن با رسوب اندازه گیری شده درنمونه خاک حوزه ساوه

بتا	رسوب برآورد شده (گرم در لیتر)	رسوب اندازه گیری شده (گرم در لیتر)	شدت رواناب (میلیمتر برساعت)	شدت باران (میلیمتر بر ساعت)	شیب (درصد)
0.53	23.39	15.069	19.5	25	5
0.53	27.79	18.54	37.5	50	5
0.53	30.59	27.975	58.5	75	5
0.53	39.80	34.26	20	25	10
0.53	46.94	50.61	41	50	10
0.53	51.56	55.68	63	75	10
0.53	35.28	55.62	22	25	15
0.53	42.58	72.45	44	50	15
0.53	46.78	86.4	67.5	75	15
0.53	97.62	96.87	23	25	20
0.53	116.70	150.6	48	50	20
0.53	130.32	192.81	73.5	75	20

همانطوریکه در جداول (۵ و ۶) دیده می شود هر چه حساسیت خاک به فرسایش بیشتر باشد کمیت بتا که بیانگر فاکتور فرسایش پذیری خاک است بالاتر می رود و به عدد ۱ نزدیک می شود.وقتی کمیت β برابر ۱ باشد نشان دهنده حساسیت بسیار زیاد خاک به فرسایش بوده و بستر خاک در حقیقت هیچگونه مقاومتی در مقابل فرسایش نشان نمی دهد.بستر پوشیده از شن ریز و بدون چسبندگی شاخص این گونه بستر می باشد. نمونه خاک حوزه امامه با کمیت بتا برابر 0.58 نسبت به خاک حوزه ساوه که فرسایش پذیری آن در معیار بتا برابر 0.53 می باشد دارای فرسایش پذیری نسبتاً زیادتری است. مطالعات متعددی نشان داده است که در مدل فرآیند یابی GUEST بین میزان بار واقعی رسوب و حداکثر حمل توان رسوب در روان آب یک رابطه نمایی وجود دارد.همچنین تحقیقات متعددی در این زمینه نشان داده که کمیت توان موجود در این معادله همبستگی بسیار زیادی با مقاومت خاک در مقابل عامل فرسایندگی باران و رواناب یا به عبارت دیگر با فرسایش پذیری خاک داشته است.

از آنجائی که عامل فرسایش پذیری خاک (K) در معادله جهانی فرسایش پذیری خاک (USLE) که با اندازه گیری برخی از خواص فیزیکوشیمیایی خاک و نهایتاً نموگراف ویشمایر تعیین می گرددمتضمن وقت و هزینه های گزافی است،استفاده از روش محاسباتی تعیین فرسایش پذیری خاک β با استفاده از مدلهای ساده فوق الذکر دارای مزیتهای نسبی زیادی است.

شکلهای ۳و۴ نشان دهنده رابطهٔ بین مقدار غلظت برآورد شده بر اساس پارامتر β با غلظت اندازه گیری شده بر روی خاک بدون پوشش برای هر دو خاک حوزه های ساوه و امامه است.



شکل(۳) مقدار غلظت رسوب برآوردشده با استفاده از عامل β و مقایسه آن با غلظت مشاهده شده بر روی نمونه خاک بدون حوزه ساوه (e) و حوضه امامه (f)

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که عامل فرسایش پذیری β در واقع می تواند بعنوان عامل فرسایش پذیری خاک یا حساسیت خاک به فرسایش معرفی و در برآورد میزان رسوب از حوزه های کشاورزی یا منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. برآورد میزان رسوب با استفاده از عامل K در نموگراف ویشمایر و اسمیت و مقایسه آن با عامل فرسایش پذیری در مدل فرآیند یابی مذکور نیز بیانگر این نکته است که مدلهای تجربی مانند معادله جهانی هدر رفت خاک بدون واسنجی نمی تواند به طور مستقیم مدلی مناسب جهت تخمین رسوب برای کرتهای آزمایشگاهی و به تبع آن برای حوزه های آبخیز در یک رگبارش باشد.

نتایج حاصل از این بررسی بیانگر این نکته است که در بیشتر مدلهای فرسایش و رسوب که فاکتورهای کیفی در تهیه آنها استفاده گردیده و بعضا نتایج آن با مدلهای کمی از طریق رابطه همبستگی تائید شده است عمدتا برای همان مناطق و یا مناطق مشابه کاربرد دارند.کاربرد مستقیم مدلهای تجربی همچون USLE و MUSLE و Richardsonدر شرایط ایران با ویژگیهای اقلیمی و وضعیت هیدرولوژیکی متفاوت بدون ارزیابی اولیه و انجام اصلاحات مورد نیاز در بعضی از پارامترهای مورد استفاده و واسنجی آنها برای کرتهای آزمایشگاهی و به تبع آن برای حوزه آبخیز در یک رگبارش چندان مفید به نظر نمی رسد.گراف (۱) و (۲) بیانگر این نکته است که بین مقدار رسوب محاسبه شده و مشاهده شده تفاوت چشمگیری مشاهده شده است.عامل فرسایش پذیری خک در مدلهای فرآیندی a و a_d نمی تواند جوابگوی دقیقی جهت تخمین رسوب در شیبهای تندتر باشد.

عامل فرسایش پذیری بتا می تواند به عنوان عامل فرسایش پذیری خاک یا حساسیت خاک به فرسایش معرفی و در برآورد میزان رسوب از حوزه های کشاورزی یا منابع طبیعی مورد استفاده قرار داد.

همانگونه که مشاهده می شود مدلهای فرآیندی که بیانگر روابط منطقی بین پدیده های فیزیکی یک حادثه فرسایش است می تواند در تخمین کمی فرسایش با دقت بیشتری نسبت به سایر مدلهای تجربی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

۱- بای بوردی، م.۱۳۷۲. اصول مهندسی آبیاری. جلد اول. روابط آب و خاک. چاپ ششم. انتشارات دانشگاه تهران ،۶۴۴ صفحه.

۲- روحی پور، ح. ۱۳۸۰. کارگاه تخصصی آزمایشی، کاربرد مدل فرآیندی GUEST در برآورد میزان فرسایش. اراک. ۴-۲ بهمن ماه. فرسایش خاک و توسعه پایدار.

۳- هادسون، ن. ۱۹۸۲. حفاظت خاک (برگردان حسین قدیری ۱۳۶۸). چاپ دوم دانشگاه اهواز. ۴۶۹ صفحه

4-Rose, C.W., J. R.Williams, G.C. Sander, and D.A. Barry, 1996. A mathematical model of soil erosion and deposition processes". I. Theory for a plan land element. Soil Sci. Soc. Am. J. 47. 991-995.

5-Wischmeier. W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Aguide to conservation planning, USDA. Agricultural Handbook, 537-58p.