

Evaluation of soil erosion effects on rainfed wheat (*Triticum aestivum*) yield using SWAT model

Heidar Ghafari^{1*}, Manouchehr Gorji²

¹ Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Abstract

Introduction

Although soil erosion in natural ecosystems takes place very slowly, yet its cumulative effects on soil productivity are significant in the long term, and even very low rates of erosion cause loss of considerable amounts of soil during the course of many years. Based on statistics presented during the past 40 years, about 30% of agricultural lands in the world have lost their fertility due to erosion and have turned into non-arable lands (Pimentel and Burgess, 2013), and approximately 75 million tons of fertile agricultural soil is lost every year (Eswaran et al., 2001). In another report, it has been stated that about 10 million hectares of agricultural lands in the world lose their productive capacity annually and become non-cultivable lands (Lal, 2001).

Materials and Methods

SWAT model was used to simulate the effect of soil erosion on dry wheat yield. For this purpose, after model calibration and validation, the following five scenarios were defined to quantify the effects of erosion on rainfed wheat yield: (1) current soil depth, (2) removing 5 cm, (3) removing 10 cm, (4) removing 15 cm, (5) and removing 20 cm of current topsoil depth in soil database. Accordingly, a regression relation was established between surface soil erosion and wheat yield.

Results and Discussion

Regression analysis showed that for each centimeter of soil erosion, the yield of rainfed wheat was reduced by 15.1 kg equal to 0.5%. The model results showed that the average specific erosion in the agricultural lands of the region is about 10 t/ha (0.77 mm/year). Assuming that the erosion rate is constant over 100 years, about 77 mm of soil is destroyed, equivalent to a loss of 116 kg/ha of dryland wheat yield. Considering the area under wheat cultivation (about 50,000 ha) in the study region, it is estimated that 580 tons of wheat per year will be destroyed by erosion.

Conclusion

SWAT model was used to assess the effect of erosion on crop yield. The gradual decrease in horizon A depth of input soil data to the model showed that with a decrease in the soil depth per 10 cm, the average yield decreased by 5%. It is suggested that in subsequent studies, the results of this method can be compared and validated with the comparative plot method, as the best field method in evaluating the effect of erosion on yield.

Keywords: Horizon A, Permissible Erosion, Soil Conservation, Soil Productivity

Article Type: Research Article

* Corresponding Author, E-mail: h.ghafari@scu.ac.ir

Citation: Ghafari, H., & Gorji, M. (2021). Evaluation of soil erosion effects on rainfed wheat (*Triticum aestivum*) yield using SWAT model. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(3), 53-66.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.9267.1029

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.3.5.7

Received: 23 July 2021, Accepted: 19 August 2021

Water and Soil Management and Modeling, Year 2021, Vol. 1, No. 3, pp. 53-66

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی اثر فرسایش خاک بر عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل SWAT

حیدر غفاری^{۱*}، منوچهر گرجی^۲

^۱ استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران
^۲ استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران

چکیده

خاک مهم‌ترین منبع طبیعی به‌ویژه در زیست‌بوم‌های کشاورزی است که بستر رشد گیاهان را فراهم می‌کند. فرسایش خاک از طریق کاهش عمق خاک، آب قابل دسترس گیاه و هدررفت مواد معدنی و آلی باعث افت باروری خاک و در نتیجه تقلیل عملکرد گیاه می‌شود. آگاهی از روابط بین فرسایش و عملکرد محصول برای تعیین فرسایش قابل تحمل و برنامه‌های حفاظت خاک ضروری است. محسوس نبودن اثر فرسایش بر رشد گیاه در کوتاه مدت یکی از چالش‌های اصلی در تعیین رابطه بین فرسایش و عملکرد محصول است. بنابراین، پایش مستقیم اثرات فرسایش بر عملکرد محصول تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل روش‌های غیرمستقیم برای این منظور پیشنهاد شده است. مدل‌سازی یکی از روش‌های سریع و ارزان برای ارزیابی اثر فرسایش بر تولید محصول است. در این پژوهش از مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT) برای شبیه‌سازی اثر فرسایش بر عملکرد گندم دیم استفاده شد. برای این کار پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، سناریوهای مختلفی در خصوص عمق خاک تعریف شد و با کاهش تدریجی ضخامت افق A در پرونده مربوط به داده‌های خاک میانگین عملکرد گندم دیم شبیه‌سازی شد. بر این اساس ارتباط بین میزان فرسایش خاک سطحی و عملکرد گندم برقرار شد. رابطه رگرسیونی نشان داد که به ازای هر سانتی‌متر فرسایش خاک، عملکرد گندم دیم به مقدار ۱۵ کیلوگرم در هکتار معادل ۰/۵ درصد کاهش یافت. نتایج مدل نشان داد که میانگین فرسایش ویژه در اراضی کشاورزی منطقه حدود ۱۰ تن در هکتار در سال (معادل ۰/۷۷ میلی‌متر در سال) است. با فرض ثابت بودن میزان فرسایش در طول ۱۰۰ سال، حدود ۷۷ میلی‌متر خاک از بین می‌رود، که معادل هدررفت ۱۱۶ کیلوگرم در هکتار یا ۳/۸ درصد از عملکرد گندم دیم است. با در نظر گرفتن سطح زیر کشت گندم (حدود ۵۰۰۰ هکتار) در حوضه مورد مطالعه، برآورد می‌شود که سالانه ۵۸۰ تن گندم در اثر فرسایش از بین می‌رود. استفاده از این روش در مناطق مختلف و برای سایر محصولات و همچنین اعتبارسنجی نتایج با آزمایش‌های مزرعه‌ای پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس گیاه، افق A، باروری خاک، حفاظت خاک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.ghafari@scu.ac.ir

استناد: غفاری، ح. و گرجی، م. (۱۴۰۰). ارزیابی اثر فرسایش خاک بر عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل SWAT. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، (۳)۱، ۵۳-۶۶.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.9267.1029

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.3.5.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۸

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۰، دوره ۱، شماره ۳، صفحه ۵۳ تا ۶۶

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

خاک یک منبع طبیعی مهم در عرصه کشاورزی است که بستر رشد گیاهان را فراهم می‌کند. فرسایش سطحی حاصل‌خیز در درازمدت باعث کاهش عمق خاک، گنجایش رطوبتی و هدررفت مواد آلی و عناصر غذایی و در نتیجه، کاهش باروری خاک می‌شود (Lal, 1998). امنیت غذایی جمعیت در حال رشد و مشکلات محیط زیستی از جمله مهم‌ترین تهدیدهای فرسایش خاک در سراسر جهان به‌ویژه، کشورهای درحال توسعه به‌شمار می‌روند (Pimentel and Burgess, 2013). حفظ و تأمین نیازهای خوراکی انسان به‌طور اساسی بستگی به حفظ باروری و کیفیت خاک‌های کشاورزی دارد. اگرچه فرسایش خاک در زیست‌بوم‌های طبیعی بسیار کند انجام می‌شود، اما اثرات تجمعی آن بر کیفیت خاک در بلندمدت معنی‌دار بوده و حتی فرسایش‌هایی با مقادیر بسیار کم پس از گذشت سال‌ها باعث از بین رفتن مقادیر قابل توجهی از خاک می‌شوند. بر اساس آمار ارائه شده، سالانه حدود ۷۵ میلیارد تن خاک حاصل‌خیز از اراضی کشاورزی در اثر فرسایش از بین می‌رود (Eswaran et al., 2001). در گزارشی دیگر (Lal, 2001) آمده است که سالانه حدود ۱۰ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان در اثر فرسایش تخریب می‌شوند، به‌طوری که طی ۴۰ سال گذشته، حدود ۳۰ درصد اراضی کشاورزی در سراسر جهان باروری خود را به‌دلیل فرسایش از دست داده‌اند و به اراضی لم یزرع تبدیل شده‌اند (Pimentel and Burgess, 2013).

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در ارزیابی روابط بین فرسایش و باروری خاک، محسوس نبودن کاهش عملکرد محصول ناشی از فرسایش در کوتاه‌مدت است. اثر فرسایش بر تولید به‌قدری آهسته و تدریجی بوده که ممکن است تا زمان از بین رفتن کامل باروری خاک، قابل تشخیص نباشد. علاوه بر این، پیشرفت در فن‌آوری و مصرف نهاده‌ها ممکن است اثرات فرسایش بر تولید را خنثی کند و حتی باعث افزایش تولید شود (Bakker et al., 2004). بنابراین، پایش مستقیم اثرات فرسایش بر عملکرد محصول تقریباً غیرممکن است، به‌همین دلیل روش‌های غیرمستقیم برای این منظور پیشنهاد شده است. ساده‌ترین روش حذف مصنوعی خاک سطحی^۱ است (Larney et al., 2000). مشکل بالقوه این روش این است که اثرات فرسایش بر تولید ممکن است بیش از مقدار واقعی برآورد شود؛ زیرا در شرایط طبیعی، فرسایش به تدریج طی سال‌های زیاد خاک سطحی را حذف می‌کند، در حالی که در این روش کل خاک سطحی به یک

باره از بین می‌رود. روش دیگر اضافه کردن خاک سطحی^۲ به خاک فرسایش یافته است (Verity and Anderson, 1990). Olson et al. (1994) بر این باور است که نتایج این روش نسبت به روش قبلی به شرایط طبیعی نزدیک‌تر است، اما در صورتی که بین ویژگی‌های خاک اضافه شده با خاک سطحی فرسایش یافته اختلاف معنی‌داری وجود داشته باشد، نتایج با واقعیت متفاوت خواهد بود.

روش دیگر، مقایسه عملکرد محصول در امتداد ترانسکت است. از آنجایی که فرسایش خاک به توپوگرافی بستگی زیادی دارد، سرعت فرسایش در موقعیت‌های مختلف، متفاوت بوده و باعث تغییر عمق خاک در بخش‌های مختلف دامنه می‌شود. با مقایسه عملکرد محصول در موقعیت‌های مختلف، ارتباطی بین مقدار فرسایش و عملکرد محصول به‌دست می‌آید (Kosmas et al., 2001; Verity and Anderson, 1990). فرض اساسی در این روش این است که عمده تغییرات عمق و ویژگی‌های خاک در موقعیت‌های مختلف نتیجه فرسایش بوده که همیشه برقرار نیست. ارزیابی عملکرد محصول در کرت‌های مقایسه‌ای^۳ با درجات مختلف فرسایش و ویژگی‌های مشابه (مانند موقعیت، مدیریت، شیب و غیره) یکی دیگر از روش‌هایی است که توسط پژوهش‌گران زیادی استفاده شده است (Schumacher et al., 1994; Weesies et al., 1994). در این روش کرت‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که دارای موقعیت یکسان، ولی درجات مختلف فرسایش باشند. نوع محصول و مدیریت در کرت‌های مختلف باید یکسان باشد تا اختلاف در عملکرد محصول، صرفاً نتیجه اختلاف در شدت فرسایش در نظر گرفته شود. از نظر Olson et al. (1994) روش آخر نسبت به روش‌های قبلی برای مطالعه روابط فرسایش و تولید مناسب‌تر است؛ زیرا تأثیر موقعیت، شیب و تغییرات مدیریت فعلی و گذشته در این روش حداقل است.

یکی از جدیدترین روش‌ها برای ارزیابی اثر فرسایش بر عملکرد محصول استفاده از مدل‌های فرآیندی شبیه‌ساز است (Bakker et al., 2005)، که در این ارتباط پویایی مدل می‌تواند بر ظرفیت‌های مدل در راستای شبیه‌سازی بیفزاید. مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT) به‌عنوان یکی از رایج‌ترین مدل‌های فرآیندی و زمان پیوسته در زمینه هیدرولوژی است که توسط مرکز تحقیقات کشاورزی ایالات متحده برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان سطحی، رسوب، عملکرد محصول و تعادل مواد شیمیایی در حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده با ویژگی‌ها و مدیریت‌های گوناگون برای دوره‌های زمانی طولانی مدت تهیه و

² Adding Topsoil³ Comparing Plots¹ Topsoil Removal

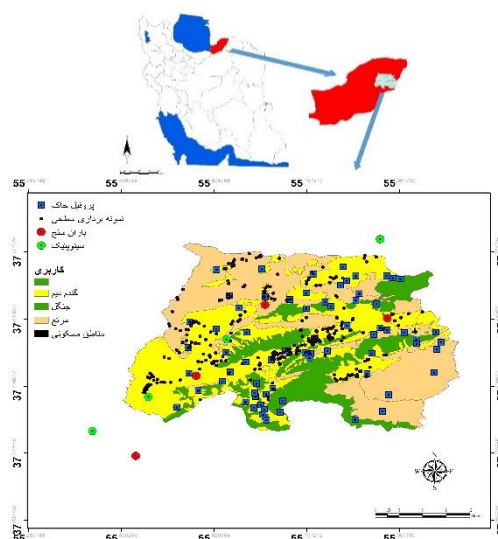
(شکل ۱). اقلیم منطقه بر اساس تقسیمات اقلیمی دومارتن در حد فاصل اقلیم نیمه‌خشک و معتدل قرار دارد. میانگین سالانه بارندگی حوضه حدود ۵۵۰ میلی‌متر است (Ghafari et al., 2017). تیپ‌های اصلی فیزیوگرافی منطقه شامل کوهستان، تپه، دشت دامنه‌ای و تراس رودخانه‌ای بوده که ارتفاع آن‌ها از سطح دریا بین ۲۱۰۰ و ۱۱۰ متر تغییر می‌کند. میانگین وزنی ارتفاع حوضه ۷۵۰ متر و میانگین وزنی شیب آن ۲۳ درصد است. خاک‌های منطقه از نوع لسی با میانگین بیش از ۶۰ درصد سیلت بوده و بر اساس سیستم رده‌بندی آمریکایی غالباً در سه رده مالی‌سول، انتی‌سول و اینسپتی‌سول جای دارند (Khormali et al., 2009). مشخصات پروفیلی خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. عمده اراضی زراعی منطقه زیر پوشش گندم پاییزه (دیج) قرار دارند و در مجموع ۶۲۰۰۰ هکتار را شامل می‌شوند (شکل ۱). عمده اراضی کشاورزی در خاک‌های رده مالی‌سول و اینسپتی‌سول قرار دارند.

ارائه شده است (Neitsch et al., 2011). مدل SWAT برای مدل‌سازی رشد و عملکرد گیاه از محاسبه‌گر اثر بهره‌وری فرسایش (EPIC) استفاده می‌کند، اما بر خلاف مدل EPIC ویژگی‌های خاک در طول دوره شبیه‌سازی فرسایش ثابت بوده و تغییر نمی‌کنند. با توجه به ضرورت موضوع مورد بحث، هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی اثر فرسایش (کاهش ضخامت خاک سطحی حاصل‌خیز) بر عملکرد گندم دیج با استفاده از مدل SWAT و اهداف فرعی شامل شبیه‌سازی رواناب، رسوب و عملکرد گندم دیج است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز تمر در شرق استان گلستان با مساحت حدود ۱۵۰۰ کیلومتر مربع واقع در محدوده عرض شمالی ۳۷° ۲۴' تا ۳۷° ۴۹' و طول شرقی ۵۵° ۲۹' تا ۵۶° ۰۴' است



شکل ۱- موقعیت حوضه تمر به همراه نقشه کاربری، موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و محل نمونه‌برداری خاک
Figure 1- Location of Tamr basin, land use map, location of meteorological stations and soil sampling site

جدول ۱- مشخصات پروفیل شاهد خاک‌های غالب در حوضه مورد مطالعه

Table 1- Properties of dominant soil types in the study area

ردیف خاک	افق	ضخامت (سانتی‌متر)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	اسیدیته	شوری (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ظرفیت آب قابل دسترس (درصد)
	Ap	0-25	25	64	7.8	0.8	1.52	1.27	0.19
مالی‌سول	Btk	25-50	28	64	7.9	0.6	0.44	1.32	0.18
	Bk	50-100	26	67	8.1	0.6	0.37	1.51	0.15
	A	0-20	26	55	7.6	0.4	0.84	1.25	0.18
انتی‌سول	C	20-100	26	53	7.5	0.3	0.23	1.32	0.17
	Ap	0-30	28	59	7.4	0.4	0.76	1.23	0.21
اینسپتی‌سول	Bk1	30-90	25	60	7.5	0.5	0.37	1.44	0.18
	Bk2	90-150	31	63	7.6	0.5	0.31	1.52	0.14

است که مدل در پیش‌بینی رخدادهای آینده کارایی لازم را دارد. برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۷۰ (سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۳) و ۳۰ (سال‌های ۲۰۰۳ الی ۲۰۰۶) درصد داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد. هم‌چنین سه سال (۲۰۰۰ الی ۲۰۰۲) به‌عنوان دوره Z گرم‌شدن مدل در نظر گرفته شد. کارایی مدل توسط شاخص‌های ضریب تبیین و ضریب ناش-ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۲-۳- تحلیل عدم قطعیت

مدل‌های کامپیوتری برای ارزیابی فرآیندهای طبیعی به پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارند که اندازه‌گیری همه آن‌ها کاری دشوار و هزینه‌بر است. به‌همین دلیل، از روش مدل‌سازی معکوس برای برآورد آن‌ها استفاده می‌شود. نرم‌افزار swat-cup نیز نوعی مدل‌سازی معکوس است که با استفاده از داده‌های خروجی واقعی، سعی بر برآورد و تنظیم پارامترهای ورودی می‌شود. برای تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل SWAT از دو معیار p-factor و r-factor استفاده شد. معیار p-factor بیان‌گر درصد مشاهداتی است که در محدوده ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی قرار می‌گیرد و هر چه مقدار آن به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر است. شاخص r-factor برابر است با میانگین فاصله باند ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی تقسیم بر انحراف استاندارد داده‌های واقعی و هر چه مقدار آن کم‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است. بر اساس نظر برخی پژوهش‌گران، مقادیر p-factor بیش از ۶۰ درصد و r-factor کم‌تر از ۱/۳ بیان‌گر کارایی قابل قبول مدل در پیش‌بینی است (Abbaspour, 2015).

۲-۲-۴- شبیه‌سازی اثر فرسایش بر عملکرد گندم

مدل SWAT برای شبیه‌سازی رشد گیاه از مدل EPIC استفاده می‌کند، اما مانند آن قابلیت شبیه‌سازی فرسایش خاک به شکل پویا را ندارد. به این معنی که در مدل SWAT در طول دوره زمانی اجرای مدل، ویژگی‌های خاک ثابت می‌مانند، در حالی که در شرایط واقعی این‌گونه نبوده و ویژگی‌های خاک به‌ویژه عمق خاک در نتیجه فرسایش در حال تغییر است. از آنجایی که فرسایش خاک آهسته رخ می‌دهد و اثرات آن در کوتاه‌مدت محسوس نیست، برخی از پژوهش‌گران برای کمی‌سازی اثر فرسایش بر تولید محصول از روش حذف مکانیکی خاک سطحی استفاده کرده‌اند. با توجه به توضیحات فوق، برای ارزیابی اثر فرسایش بر عملکرد محصول، پارامتر عمق خاک در پرونده مربوط به داده‌های ورودی خاک در شش حالت مختلف (شامل ۱) بدون تغییر (حالت فعلی)؛ (۲) حذف پنج سانتی‌متر، (۳)

۲-۲-۲- شبیه‌سازی رواناب، رسوب و عملکرد گندم

توسط مدل SWAT

۲-۲-۱- ایجاد و اجرای مدل

مدل SWAT یک مدل فرآیندی، نیمه‌توزیعی و زمان‌پیوسته است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی گوناگون برای دوره‌های زمانی طولانی مدت ارائه شده است. برای ساخت و اجرای مدل SWAT چهار گروه داده شامل مدل رقومی ارتفاعی^۲ (توپوگرافی)، کاربری و پوشش زمین، نقشه خاک، و اقلیم (بارندگی، دما، سرعت وزش باد، رطوبت نسبی و تشعشعات خورشیدی) مورد نیاز است (Neitsch et al., 2011). پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز (جدول ۲)، پرونده هر کدام از داده‌های ورودی طبق دستورالعمل آماده و تهیه شد (Arnold et al., 2012). ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده مجموعاً نه ایستگاه شامل پنج ایستگاه سینوپتیک و چهار ایستگاه باران‌سنج بود. از بین ایستگاه‌های سینوپتیک دو عدد درون حوضه و سه عدد خارج از حوضه و از بین ایستگاه‌های باران‌سنجی سه عدد درون حوضه و یک عدد خارج از حوضه واقع شده است (شکل ۱).

به‌منظور کاهش عدم قطعیت مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه، اطلاعات مربوط به نوع مدیریت زراعی و خاک شامل نوع و مقدار کود، تاریخ کاشت، تاریخ برداشت و نوع خاک‌ورزی از سازمان جهاد کشاورزی و برخی کشاورزان منطقه جمع‌آوری و وارد مدل شد (جدول ۳). تاریخ‌ها و مقادیر کودهای مصرفی استفاده شده در مدل میانگین منطقه بوده و ممکن است مقدار آن‌ها از مزرعه‌ای به مزرعه دیگر کمی تغییر کند.

۲-۲-۲- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم سوفی^۲ (برازش متوالی عدم قطعیت^۳ نسخه ۲) در قالب نرم‌افزار SWAT-CUP که یک روش مدل‌سازی معکوس نیمه‌خودکار است، انجام شد (Abbaspour et al., 2004). کلیه داده‌ها در فرمت مناسب تهیه و وارد مدل شدند. ابتدا مدل برای رواناب و سپس برای رسوب و عملکرد گندم واسنجی شد. پس از واسنجی، به‌منظور ارزیابی کارایی پارامترهای واسنجی شده اعتبارسنجی مدل تحت مجموعه‌ای از داده‌های مستقل آزمایش شد. اگر شبیه‌سازی مدل در مرحله اعتبارسنجی به‌طور شایسته‌ای انجام شود، نشان Z این

¹ Configuring and Running

² Digital Elevation Model (DEM)

³ SUFI-2

جدول ۲- داده‌های مورد نیاز و مشخصات آن‌ها در اجرای مدل SWAT

Table 2- Data required for the SWAT model

نوع داده	مقیاس	منبع	توضیحات
مدل رقومی ارتفاع	30 متر	سازمان نقشه‌برداری کشور	-
نقشه کاربری اراضی	1:100000	جهاد کشاورزی استان گلستان	-
نقشه خاک	1:250000	موسسه تحقیقات خاک و آب کشور و آب منطقه‌ای استان گلستان	ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی
نقشه شبکه آبراهه	1:50000	آبخیزداری و منابع طبیعی استان گلستان	-
داده‌های اقلیمی	چهار ایستگاه باران سنج پنج ایستگاه سینوپتیک	سازمان هواشناسی کشور	بارندگی، دما، سرعت باد، رطوبت هوا و تابش خورشیدی
رواناب مشاهده‌ای	13 سال، روزانه-پیوسته	سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان	از سال 2000 تا 2013
رسوب مشاهده‌ای	394 داده گسسته	سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان	از سال 2000 تا 2013
عملکرد گندم دیم	منطقه‌ای	جهاد کشاورزی استان گلستان	از سال 2003 تا 2013

جدول ۳- مدیریت زراعی رایج در منطقه برای کشت گندم دیم

Table 3- Typical crop managements for rainfed wheat at the study area

عملیات/مدیریت	تاریخ (میلادی)	توضیح
خاک‌ورزی	20 اکتبر	شخم برگردان، شخم قلمی و تسطیح زمین
عملیات کاشت	15 نوامبر	گندم دیم
کود دادن اول	15 نوامبر	100 کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل + 50 کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم
کود دادن دوم	20 فوریه	100 کیلوگرم در هکتار اوره
سم‌پاشی	20 مارس	حشره‌کش - قارچ‌کش
کود دادن سوم	20 مارس	100 کیلوگرم در هکتار اوره
برداشت محصول	10 ژوئیه	گندم دیم

که RUE ضریب کارایی گیاه در تبدیل انرژی تابشی و H_{phosyn} میزان تابش‌های فتوسنتزی است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

رواناب و رسوب به صورت روزانه و عملکرد گندم به صورت سالانه شبیه‌سازی شدند. بر اساس منابع مختلف، به ترتیب ۸، ۲۴ و ۶ پارامتر برای شبیه‌سازی رواناب، رسوب و رشد گیاه انتخاب شدند (جدول ۴). سپس با استفاده از تحلیل حساسیت و مقدار p -value، مهم‌ترین پارامترها برای هر متغیر مشخص شدند. هر چه مقدار p -value پارامتری به صفر نزدیک‌تر باشد، حساسیت متغیر به آن پارامتر بیشتر است. حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی رواناب شامل شماره منحنی، ضریب مانینگ، عامل آلفای جریان پایه، درصد نفوذ به آبخوان عمیق، ضریب جبران تبخیر و پارامترهای مربوط به ذوب برف؛ در رسوب شامل ضریب تنظیم دبی اوج جریان در آبراهه اصلی و ضریب خطی و نمایی در محاسبه بیشینه مقدار رسوب بازگشتی در آبراهه؛ و در شبیه‌سازی عملکرد گندم شاخص برداشت و تعداد واحدهای گرمایی بودند.

حذف ۱۰ سانتی‌متر، ۴ حذف ۱۵ سانتی‌متر، ۵ حذف ۲۰ سانتی‌متر و ۶ حذف ۲۵ سانتی‌متر از ضخامت خاک سطحی تهیه شد (Larney et al., 2009). مدل در هر کدام از این حالت‌ها به صورت جداگانه اجرا و عملکرد گندم دیم برای دوره ۱۳ ساله شبیه‌سازی شد. بنابراین، برای دوره زمانی مشخص از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ برای هر حالت یک خروجی از عملکرد گیاه وجود دارد. با رسم مقادیر عملکرد گندم در برابر ضخامت حذف شده، رابطه بین میزان فرسایش و عملکرد گندم به دست آمد. لازم به ذکر است که مدل SWAT رشد واقعی گیاه (G_{act}) را بر اساس رشد پتانسیل (G_{pot}) و ضریب تنش (γ_s) محاسبه می‌کند (Neitsch et al., 2011) و ضریب تنش بستگی به ویژگی‌های خاک دارد و شامل تنش رطوبتی (w)، تنش دمایی (t) و تنش تغذیه‌ای (نیترژن n و فسفر p) است (رابطه‌های ۱ تا ۳). با توجه به این‌که لایه سطحی نسبت به لایه‌های زیرسطحی خاک نقش زیادی در رشد گیاه دارد، کاهش ضخامت آن باعث کاهش کیفیت خاک و تشدید تنش‌های محیطی می‌شود.

$$G_{act} = G_{pot} \cdot \gamma_s \quad (1)$$

$$G_{pot} = RUE \cdot H_{phosyn} \quad (2)$$

$$\gamma_s = 1 - \max(w, t, n, p) \quad (3)$$

جدول ۴- پارامترهای منتخب برای واسنجی رواناب، رسوب و رشد گیاه
Table 4- Selected parameters for calibration of runoff, sediment and plant growth

حد بهینه	p-value	توضیحات	
		پارامترهای رواناب	پارامتر
0.65	0	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط برای اراضی کشاورزی گندم	r__CN2.mgt
4.76	0	ضریب مانینگ برای جریان سطحی در بالادستی	v__OV_N.hru
0.09	0	عامل آلفای جریان پایه برای ذخیره کناری	v__ALPHA_BNK.rte
0.07	0.01	درصد نفوذ به سفره آب زیرزمینی عمیق	v__RCHRGP_DP.gw
83.00	0.01	متوسط طول شیب زمین	v__SLSUBBSN.hru
0.45	0.02	عامل جبران کننده تبخیر آب از خاک	v__ESCO.hru
12.00	0.04	بیشینه میزان ذوب برف در طول سال (میلی متر بر درجه سانتی گراد در روز)	v__SUB_SMFMX.sno
0.19	0.09	ضریب تبخیر از سفره آب زیرزمینی	v__GW_REVAP.gw
0.23	0.14	آب قابل دسترس خاک	r__SOL_AWC.sol
1.93	0.15	زمان تاخیر رواناب سطحی	v__SURLAG.bsn
260	0.16	زمان تاخیر برای تغذیه آبخوان (روز)	v__GW_DELAY.gw
0.08	0.19	عامل آلفا جریان پایه	v__ALPHA_BF.gw
-4.00	0.2	دمای بارش برف	v__SUB_SFTMP.sno
1.47	0.26	جرم مخصوص ظاهری	r__SOL_BD.sol
4.11	0.28	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	r__SOL_K.sol
2596	0.36	کمینه عمق آب سفره کم عمق برای شروع جریان برگشتی	v__GWQMN.gw
0.62	0.51	عامل تاخیر دمای تراکم برف	v__SUB_TIMP.sno
2.00	0.52	دمای پایه ذوب برف	v__SUB_SMTMP.sno
7.00	0.61	کمینه میزان ذوب برف در طول سال (میلی متر بر درجه سانتی گراد در روز)	v__SUB_SMFMN.sno
0.46	0.67	ضریب بازتاب (آلبیدو) خاک مرطوب	v__SOL_ALB.sol
0.06	0.71	ضریب مانینگ برای آبراهه اصلی	r__CH_N2.rte
0.29	0.83	عامل جبران کننده جذب آب توسط گیاه	v__EPCO.hru
231	0.9	کمینه عمق آب در سفره کم عمق برای شروع تبخیر	v__REVAPMN.gw
15.75	0.9	هدایت هیدرولیکی مؤثر در آبراهه اصلی	v__CH_K2.rte
پارامترهای رسوب			
0.005	0	ضریب خطی برای محاسبه بیشینه مقدار رسوب بازگشتی در امتداد حرکت رسوب در آبراهه	v__SPCON.bsn
1.08	0	ضریب تنظیم میزان اوج جریان برای روندیابی رسوب در آبراهه اصلی	V__PRF_BSN.bsn
1.30	0.13	ضریب نمایی محاسبه رسوب بازگشتی در امتداد حرکت رسوب در آبراهه	v__SPEXP.bsn
0.38	0.25	عامل فرسایش پذیری خاک معادله جهانی هدررفت خاک	v__USLE_K.sol
0.002	0.25	عامل پوشش گیاهی مراتع معادله جهانی هدررفت خاک	v__USLE_C{ }.plant.dat_Range
0.04	0.42	عامل پوشش گیاهی اراضی کشاورزی معادله جهانی هدررفت خاک	v__USLE_C{ }.plant.dat_AGRI
1.24	0.55	ضریب فرسایش پاشمان	v__EROS_SPL.bsn
0.001	0.67	عامل پوشش گیاهی جنگلی معادله جهانی هدررفت خاک	v__USLE_C{ }.plant.dat_FROST
پارامترهای رشد گیاه			
0.45	0	شاخص برداشت محصول	v__HI_TARG.mgt
2439	0.03	کل واحدهای گرمایی مورد نیاز برای بالغ شدن گیاه	v__HEAT_UNITS.mgt
3.10	0.64	دمای پایه برای رشد گیاه	v__T_BASE{27}.plant.dat
16.6	0.76	دمای بهینه	v__T_OPT{27}.plant.dat
50.6	0.8	کارایی جذب انرژی (نسبت زیست توده به انرژی)	v__BIO_E{27}.plant.dat
8.70	0.81	حداکثر پتانسیل شاخص سطح برگ	v__BLAI{27}.plant.dat

به ترتیب برابر با ۰/۶۰، ۰/۵۷ و ۰/۸۴ و ضریب تبیین به ترتیب ۰/۶۲، ۰/۶۳ و ۰/۸۴ بود. یکی از اهداف بهینه سازی پارامترها در فرآیند واسنجی مدل، کاهش عدم قطعیت پیش بینی است به گونه ای که بیش تر داده های مشاهده شده در دامنه ۹۵ درصد عدم قطعیت قرار بگیرند. براساس مطالعات برخی پژوهشگران (Abbaspour et al., 2004; 2007)، مقادیر بیش تر از ۶۰ درصد

نتایج شاخص های ارزیابی مدل نشان داد که مدل از کارایی قابل قبولی برای شبیه سازی رواناب، رسوب و عملکرد گندم برخوردار است (جدول ۵). معمولاً ضریب NS بیش تر از ۰/۵ و ضریب تبیین بیش تر از ۰/۶ نشان دهنده کارایی مطلوب مدل است (Santhi et al., 2001; Moriasi et al., 2007). ضریب NS برای رواناب، رسوب و عملکرد گندم در مرحله واسنجی

برای p-factor و مقادیر کم‌تر از ۱/۵ برای r-factor نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی است. بنابراین، در چنین شرایطی استفاده از مدل برای پیش‌بینی اثرات تغییر نوع مدیریت و یا شرایط محیطی (مانند تغییر اقلیم یا تغییر ویژگی‌های خاک) بر متغیرهایی چون رواناب، رسوب و عملکرد محصول امکان‌پذیر است.

جدول ۵- ضرایب کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب، رسوب و عملکرد گندم در مرحله واسنجی (اعتبارسنجی)

Table 5- Performance of SWAT model for simulation of runoff, sedimentation and wheat yield in the calibration (validation) stage

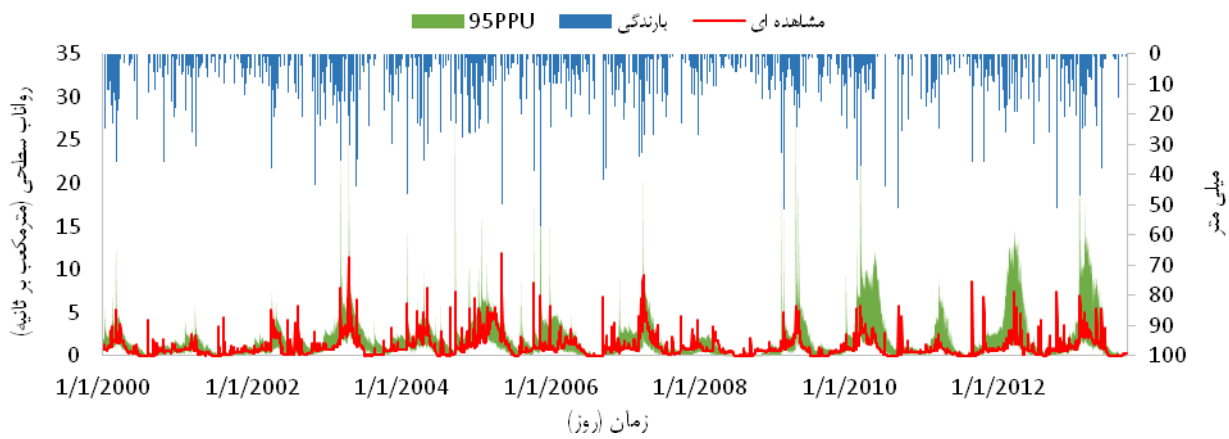
RMSE	P-factor	R-factor	R ²	NS	میانگین سالیانه مشاهداتی	میانگین سالیانه برآوردی	متغیر
0.78 (0.74)	0.74 (0.80)	1.51 (1.91)	0.62 (0.52)	0.61 (0.51)	0.95 (1.01)	0.89 (0.94)	رواناب (میلی‌متر در روز)
10954 (8458)	0.63 (0.61)	0.26 (0.28)	0.63 (0.54)	0.57 (0.53)	3985 (3463)	3609 (2429)	رسوب (تن در روز)
0.19 (0.31)	0.83 (0.76)	1.2 (1.29)	0.84 (0.80)	0.84 (0.78)	3.07 (3.23)	2.95 (3.15)	عملکرد گندم دیم (تن در هکتار)

هکتار در سال برآورد شد. حدود ۸۰ درصد از اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه دارای شیب بین ۱۲-۲۵ درصد است. این اراضی منبع عمده تولید رسوب در این حوضه هستند؛ به طوری که حدود ۶۰ درصد کل رسوب تولید شده در حوضه (حدود ۰/۶۵ میلیون تن در سال) مربوط به این اراضی است. این در حالی است که این اراضی حدود ۳۳ درصد مساحت حوضه را اشغال کرده‌اند. از جمله دلایل افزایش تولید رسوب در اراضی کشاورزی می‌توان به کاهش ماده آلی خاک (Vagen et al., 2006)، تخریب ساختمان خاک و هم‌چنین پوشش گیاهی نامناسب این اراضی در بخشی از سال اشاره کرد. مقدار فرسایش در اراضی مرتعی در مقایسه با میزان فرسایش در اراضی کشاورزی کم‌تر بود، که احتمالاً دلیل آن دست‌نخورده بودن خاک و پوشش مناسب این اراضی در طول فصول سال است (Wei et al., 2009).

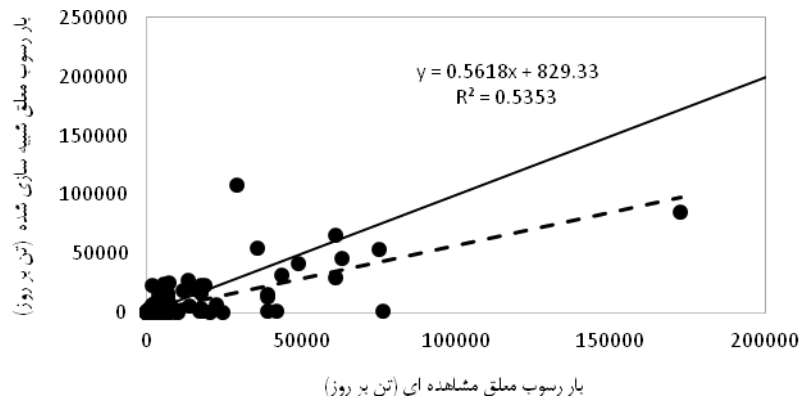
مدل در پیش‌بینی عملکرد گندم دیم از کارایی نسبتاً خوبی برخوردار بود. ضریب NS و ضریب تبیین به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۸۴ بود که نشان‌دهنده توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم است. مقادیر R-Factor و P-Factor به دست آمده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی بیش‌تر از آستانه پیشنهاد شده برای این شاخص‌هاست. بنابراین، مدل برای پیش‌بینی اثر تغییر خصوصیات خاک (در نتیجه فرسایش) بر عملکرد گندم دیم قابل استفاده است. مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد گندم دیم به همراه باند عدم قطعیت در شکل ۴ نمایش داده شده است. اغلب داده‌های مشاهده شده در محدوده باند عدم قطعیت قرار گرفته‌اند. ممکن است خارج افتادن برخی داده‌های عملکرد گندم از باند عدم قطعیت ناشی از خطاهای داده‌برداری و یا اختلاف بین نوع مدیریت در شرایط واقعی و شرایط مدل شده باشند. به عنوان نمونه، رقم گندم، تاریخ کشت و مقدار کود مصرف شده در کل حوضه یکسان فرض شد، در صورتی که این گونه نبوده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های رواناب، رسوب و عملکرد گندم به ترتیب در شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش داده شده است. بررسی هیدروگراف رواناب نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی مقدار رواناب ناشی از رخدادهای اواخر تابستان و اوایل پاییز ضعف دارد. در این موقع از سال وقوع رگبارهای شدید و کوتاه‌مدت معمول است. هم‌چنین، (Tolson and Shoemaker, 2007) نیز بیان کردند که مدل SWAT در پیش‌بینی نقاط اوج جریان ناشی از بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت ضعیف عمل می‌کند؛ زیرا حداقل مقیاس زمانی برای داده‌های بارندگی وارد شده به مدل به صورت روزانه است. هرچند که نتایج شبیه‌سازی رسوب قابل قبول است، اما به دلیل وجود تعداد کم داده‌های مشاهده‌ای و پیوسته نبودن آن‌ها، کارایی مدل در شبیه‌سازی رسوب کاهش یافته است. معمولاً به دلیل هزینه‌بر بودن و نبودن امکانات لازم در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی، داده‌های رسوب موجود در کشور به صورت نامنظم و محدود و معمولاً پس از هر بارندگی برداشت می‌شود. برای افزایش دقت و کارایی مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولوژی، استفاده از ابزار و تجهیزاتی که بتوانند رواناب و رسوب را به طور خودکار در فواصل ساعتی ثبت کنند، پیشنهاد می‌شود.

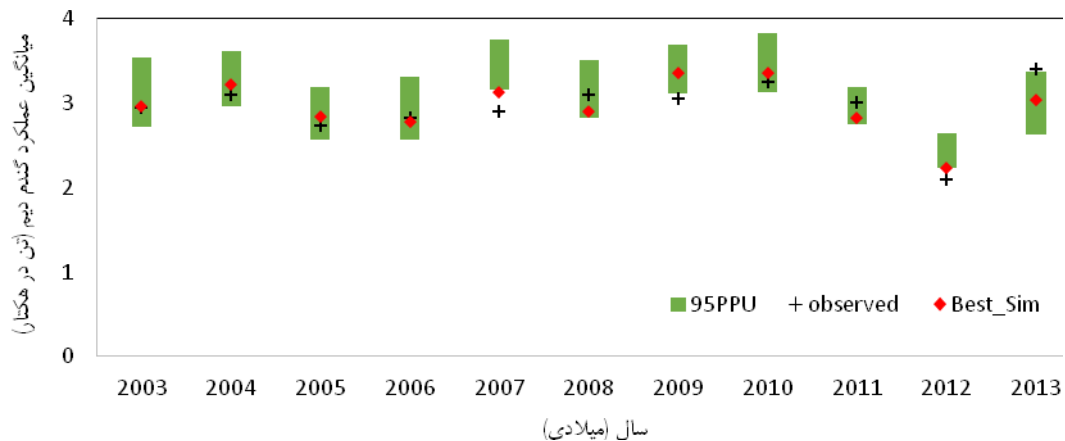
مقدار تولید رسوب در حوضه مورد مطالعه بین ۰/۳ تا ۲۶/۱۰ تن بر هکتار در سال با میانگین حدود ۷/۱۱ تن در هکتار در سال برآورد شد. این نتایج با یافته‌های پژوهش (Behtarinezhad, 2011) مطابقت دارد. وی در پژوهشی مشابه با استفاده از مدل SWAT مقدار رسوب ویژه در این حوضه را ۶/۴۹ تن در هکتار در سال برآورد کرد. دلیل اختلاف موجود بین برآوردها را می‌توان متفاوت بودن طول دوره آماری استفاده شده در اجرای مدل دانست. به طور کلی، بیش‌ترین تولید رسوب در زیرحوضه‌هایی با کاربری زراعی و شیب زیاد و کم‌ترین آن در اراضی جنگلی مشاهده شد. میانگین تولید رسوب در اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی به ترتیب ۰/۶۳، ۶/۵۳ و ۱۰/۳۳ تن در



شکل ۲- مقادیر روزانه رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳
 Figure 2- The daily simulated and observed runoff during 2000-2013



شکل ۳- رابطه بین بار رسوب برآورد شده توسط مدل و بار رسوب مشاهده شده (خط نقطه‌چین) و خط ۱:۱ (خط ممند)، n=۳۹۴
 Figure 3- The linear regression between the simulated and observed sediment loads (dashed line) and 1:1 line (solid line). n=394

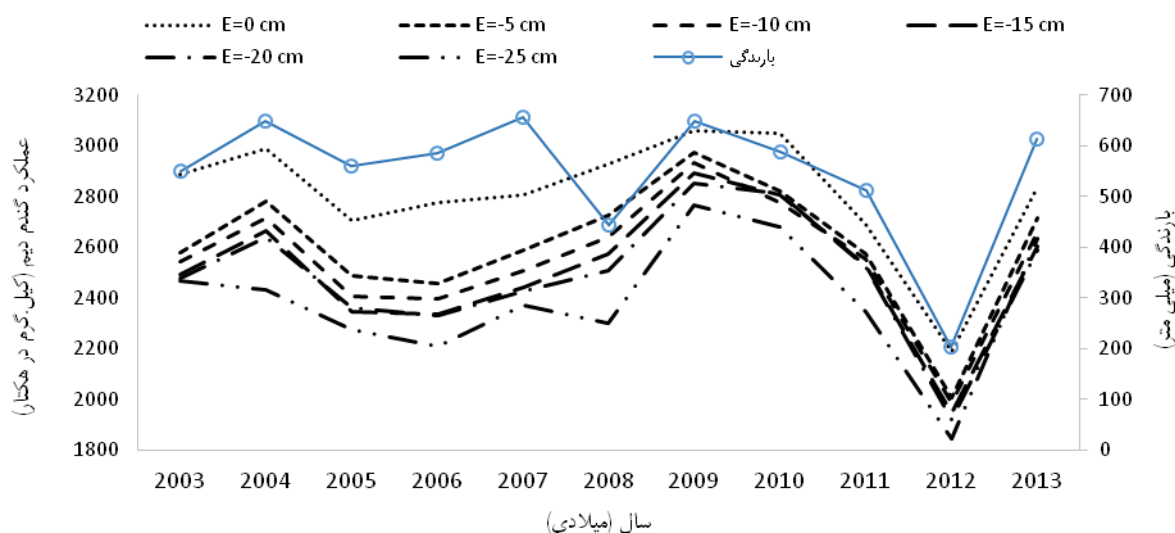


شکل ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد گندم دیم طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳
 Figure 4- Simulated and observed wheat yield during 2003-2013

۳-۲- اثر فرسایش بر عملکرد محصول

فرسایش از طریق تغییر ویژگی‌های خاک به‌ویژه کاهش عمق خاک بر باروری خاک تأثیر می‌گذارد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد گندم در حالت‌های مختلف از عمق خاک نشان داد که با کاهش عمق خاک عملکرد گندم در سال‌های مختلف دوره زمانی مورد نظر کاهش یافت (شکل ۵). رابطه رگرسیونی بین میزان کاهش ضخامت لایه خاک سطحی و میانگین عملکرد محصول در خاک‌های اصلی منطقه نشان داد که میزان افت نسبی عملکرد گندم به ازای هر سانتی‌متر در رده مالی‌سول برابر ۱۶/۳۷ کیلوگرم در هکتار و در رده اینسپتی‌سول برابر با ۱۰/۳۸ کیلوگرم بر هکتار بود (شکل ۶). همان‌طور که مشاهده می‌شود

رابطه بین عملکرد محصول و کاهش عمق لایه سطحی خاک خطی است. طبق گزارش Bakker et al. (2004) نوع رابطه بین عمق خاک و عملکرد محصول بستگی به نوع گیاه و شرایط محیطی دارد، اما رابطه خطی نسبت به غیرخطی معمول‌تر است. همچنین، Schaub et al. (1998) اثرات فرسایش خاک بر عملکرد ذرت را با استفاده از مدل EPIC شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که رابطه بین عملکرد ذرت و فرسایش خاک خطی بوده و به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر عملکرد محصول حدود هشت درصد کاهش یافت.

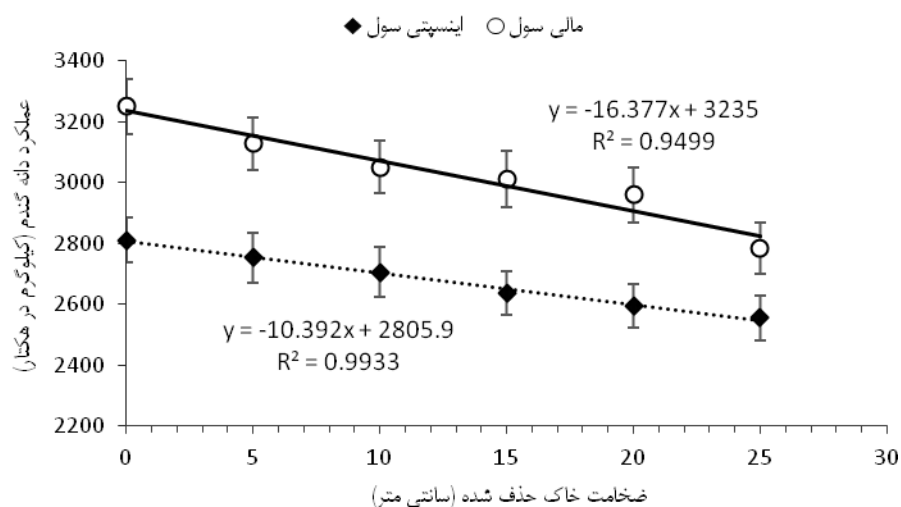


شکل ۵- عملکرد گندم در طول سال‌های شبیه‌سازی تحت تأثیر کاهش تدریجی عمق خاک در طول سال‌های شبیه‌سازی

Figure 5- Effects of topsoil removal on wheat yield during the simulation time period

سال ۲۰۱۷ میلادی (۱۳۹۷ شمسی) یکی از خشک‌ترین (کم‌باران‌ترین) سال‌ها بود، و مدل نیز به‌خوبی توانست این خشکسالی را تشخیص دهد. به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار عملکرد محصول در این سال مشاهده شد. همچنین اثر فرسایش بر عملکرد محصول در این سال در پایین‌ترین سطح قرار دارد که نتایج Gao et al. (2015) مطابقت دارد. با توجه به این‌که شرایط اقلیمی از عوامل اصلی تغییرات سالانه عملکرد گیاهان مخصوصاً در شرایط دیم است، در سال‌هایی که تأثیر اقلیم بر عملکرد کم است، اثر فرسایش ملموس‌تر است (Gao et al., 2015).

میزان نسبی کاهش عملکرد محصول در سال‌های مختلف متفاوت بود، که دلیل آن را می‌توان تفاوت در نحوه مدیریت و شرایط اقلیمی به‌ویژه میزان بارندگی از سالی به سال دیگر ذکر کرد. بزرگی اثر فرسایش و کیفیت رابطه بین فرسایش و عملکرد گیاه تحت تأثیر نوع محصول، نوع خاک و شرایط اقلیمی قرار دارد. Mehdi-zadeh et al. (2013) بر این باورند که اثر فرسایش بر باروری خاک تحت شرایط خشکسالی و تنش‌های محیطی پنهان می‌شود. از طرفی دیگر، مدیریت مناسب می‌تواند کاهش عملکرد ناشی از فرسایش را تا اندازه‌ای جبران کند و مدیریت نامناسب می‌تواند بر شدت آن بیفزاید (Gao et al., 2015). طبق آمار سازمان هواشناسی، در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶- رابطه رگرسیونی بین کاهش عمق خاک و عملکرد گندم دیم در دو خاک مالی سول و اینسپتی سول
Figure 6- The linear regression between the topsoil removal and wheat yield in molisols and inceptisols

معمولاً در خاک‌های کم‌عمق، کاهش عملکرد محصول در نتیجه فرسایش با شدت بیش‌تری صورت می‌پذیرد (Bakker et al., 2004).

نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌هایی که از روش کرت‌های مقایسه‌ای برای تعیین اثر فرسایش بر باروری خاک استفاده کرده‌اند، مطابقت بیش‌تری دارد. میزان افت عملکرد گندم به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر با استفاده از روش حذف مکانیکی خاک سطحی ۱۰/۶ درصد (Du et al., 2013) و با استفاده از روش کرت‌های مقایسه‌ای چهار درصد گزارش شده است (Bakker et al., 2004). پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی نتایج شبیه‌سازی اثر فرسایش بر عملکرد محصول با استفاده از مدل SWAT با روش‌های مزرعه‌ای به‌ویژه کرت‌های مقایسه‌ای یا حذف مکانیکی خاک سطحی مقایسه شود. با توجه به قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری زیاد مدل SWAT نسبت به سایر روش‌ها، می‌تواند گزینه مناسبی برای این نوع پژوهش‌ها باشد. از نتایج این پژوهش می‌توان در برنامه‌های حفاظت خاک و تولید پایدار و هم‌چنین تعیین فرسایش مجاز در منطقه بهره‌برد. بر اساس نظر Delgado (2003) میزان افت مجاز عملکرد محصول در راستای تولید پایدار حداکثر ۱۰ درصد در طول ۱۰۰ سال است.

مقدار میانگین فرسایش سالانه در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه حدود ۱۰ تن در هکتار در سال برآورد شد، که با فرض وزن مخصوص ظاهری ۱/۳ معادل ۰/۷۷ میلی‌متر در سال است. با در نظر گرفتن سطح زیر کشت گندم در حوضه مورد مطالعه (۶۵۰۰۰ هکتار) برآورد می‌شود که در اثر فرسایش سالانه ۶۵ تن گندم هدر می‌رود. با احتساب قیمت خرید تضمینی هر

با توجه به میانگین عملکرد گندم دیم در بخش‌های مختلف حوضه، میزان افت عملکرد گندم به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر فرسایش خاک، مقدار عملکرد در خاک مالی سول و اینسپتی سول به ترتیب ۵ و ۳/۷ درصد بود. تفاوت در میزان کاهش نسبی عملکرد محصول در خاک‌های مختلف به ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی مربوط می‌شود. به طوری که هرچه لایه سطحی خاک نسبت به لایه‌های زیرسطحی شرایط بهتری داشته باشد، کاهش نسبی عملکرد محصول در اثر فرسایش بیش‌تر خواهد بود. به‌همین دلیل است که (Li et al., 2009) روش باروری خاک را برای تعیین فرسایش مجاز خاک‌های همگن و عمیق مناسب نمی‌دانند؛ زیرا در چنین خاک‌هایی اثر فرسایش بر باروری خاک بسیار ناچیز بوده و در نتیجه مقدار فرسایش مجاز خاک عدد بزرگی به‌دست می‌آید. (Biggelaar et al., 2004) گزارش دادند که کاهش نسبی عملکرد گیاه ناشی از فرسایش در رده‌آکسی سول و مالی سول نسبت به انتی سول و اینسپتی سول بیش‌تر بود. البته به نظر می‌رسد که الگوی مشخصی در رابطه با اثرات متقابل نوع خاک و فرسایش بر عملکرد محصول وجود نداشته باشد. زیرا (Biggelaar et al., 2004) گزارش دادند که در اراضی شمال آمریکا میزان کاهش نسبی عملکرد محصولات در رده مالی سول کم‌تر از رده اینسپتی سول و اینسپتی سول کم‌تر از رده آنتی سول بود. در جنوب آمریکا، میزان کاهش عملکرد محصول در رده آکسی سول نسبت به مالی سول و در آسیا، در رده آریدی سول بیش‌تر از رده اینسپتی سول بود. علاوه بر وضعیت حاصل خیزی خاک سطحی و زیرسطحی، عمق مؤثر خاک نیز بر شدت رابطه بین فرسایش و عملکرد محصول تأثیرگذار است.

به لایه‌های زیرین خاک در رده مالی سول است. هرچه پروفیل خاک همگن‌تر و یکنواخت‌تر باشد اثرات فرسایش بر عملکرد محصول کم‌تر ظاهر می‌شوند. بررسی تأثیر اقلیم بر کیفیت رابطه بین فرسایش و عملکرد محصول نشان داد در سال‌های خشک و کم‌باران اثر فرسایش پنهان می‌شود؛ زیرا در چنین شرایطی اقلیم عامل اصلی در کاهش عملکرد محصول است. رشد واقعی گیاه در مدل SWAT تابعی از رشد بالقوه و تنش‌های رطوبتی، دمایی و تغذیه‌ای است و رشد بالقوه بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و گیاه محاسبه می‌شود. بنابراین، کاهش رشد گیاه در نتیجه کاهش ضخامت لایه سطحی خاک به‌طور غیر مستقیم به کاهش کیفیت خاک و افزایش تنش‌های مذکور مربوط است. یافته‌های این پژوهش با یافته‌های سایر پژوهش‌گران که از روش کرت‌های مقایسه‌ای استفاده کرده‌اند، مطابقت بیشتری داشت. روش استفاده شده در این پژوهش نسبت به سایر روش‌ها قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و می‌توان از آن در مناطق مختلف و برای اغلب محصولات بدون صرف هزینه و زمان زیاد استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده امکانی فراهم شود که مدل SWAT بتواند تغییرات خصوصیات خاک را در طول دوران شبیه‌سازی به‌صورت پویا در نظر بگیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تهران و همکاری اداره جهاد کشاورزی شهرستان کلاله و هم‌چنین اداره منابع طبیعی و آبخیزداری و سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان انجام شد. بدین‌وسیله از تمام آن‌ها تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

کیلوگرم گندم در داخل کشور در سال ۱۴۰۰ (حدود ۵۵۰۰۰ ریال)، سالانه چیزی حدود سه میلیارد و پانصد میلیون ریال فقط از طریق کاهش عملکرد گندم به اقتصاد منطقه خسارت وارد می‌شود. سایر خسارت‌های فرسایش شامل آلودگی محیط زیست، پر شدن سدها و کانال‌های انتقال آب، تلفات بانک ژنتیکی خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای، هدررفت مواد آلی و عناصر غذایی و غیره نیز باید در نظر گرفته شود.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت مدل SWAT در شبیه‌سازی هم‌زمان هیدرولوژی و رشد گیاه، از آن برای ارزیابی اثر فرسایش بر عملکرد محصول استفاده شد. کاهش تدریجی عمق خاک در داده‌های خاک ورودی به مدل نشان داد که با کاهش عمق خاک به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر متوسط چهار درصد عملکرد محصول افت کرد. با توجه به عمق زیاد خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه و هم‌چنین اختلاف ناچیز بین خاک‌های سطحی و زیرسطحی، این مقدار کاهش عملکرد محصول منطقی به نظر می‌رسد که پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی نتایج این روش با روش‌های مزرعه‌ای مانند کرت‌های مقایسه‌ای یا حذف مکانیکی خاک سطحی مقایسه و اعتبارسنجی شود. مزیت اصلی این روش این است که سایر شرایط مؤثر در عملکرد گیاه مانند شرایط هواشناسی و مدیریت در طول دوره شبیه‌سازی برای هر سال ثابت بوده و فقط عمق خاک تغییر می‌کند. میزان کاهش عملکرد گیاه در رده مالی سول نسبت به رده اینسیتی سول بیشتر بود. احتمالاً دلیل آن وضعیت حاصل‌خیزی بهتر لایه سطحی نسبت

منابع

بهتری‌نژاد، ب. (۱۳۹۰). تخمین میزان فرسایش و رسوب و هدرروی عناصر غذایی در اثر فرسایش در حوضه گرگان‌رود با استفاده از

References

- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., & van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340e1352.
- Abbaspour, K.C. (2015). User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland
- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., & Neitsch, S.L. (2011). SWAT Input/Output File Documentation, Version 2009. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas, USA.
- Bakker, M.M., Govers, G., & Rounsevell, M.D.A. (2004). The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena*, 57(1), 55-76.
- Bakker, M.M., Govers, G., Jones, R., & Rounsevell, M. (2005). The effect of soil erosion on agricultural productivity. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 695.
- Beharinezhad, B. (2011). Estimation of erosion, sedimentation and nutrients loss due to erosion in Gorganrood basin by SWAT model. M.Sc.

- Thesis, Faculty of Agricultural Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (in Persian).
- Biggelaar, C., Lal, R., Wiebe, K., & Breneman, V. (2004). The global impact of soil erosion on productivity I: absolute and relative erosion-induced yield losses. *Advance in Agronomy*, 81, 1–48.
- Du, S., Chen, A., & Liu, G. (2013). Determination of purple soil loss tolerance based on soil productivity in southwest China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 68(2), 146–152.
- Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P.F. (2001). Land degradation: an overview, In Response to Land Degradation, Bridges EM, Hannam ID, Oldeman LR, Penning De Vries FWT, Scherr JS, Sombatpanit S (Eds) Science Publishers, Enfield, NH, USA
- Gao, X., Xie, Y., Liu, G., Liu, B., & Duan, X. (2015). Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles. *Soil and Tillage Research*, 145, 126-134.
- Ghafari, H., Gorji, M., Arabkhedri, M., Roshani, G.A., Heidari, A., & Akhavan, S. (2017). Identification and prioritization of critical erosion areas based on onsite and offsite effect. *Catena*, 156, 1-9.
- Khormali, F., Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasarao, C., & Wani, S.P. (2009). Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan Province. Iran. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 134, 178–189.
- Kosmas, C., Gerontidis, S., Marathanou, M., Detsis, B., Zafiriou, T., Muysen, W.V., Govers, G., Quine, T., & Vanoost, K. (2001). The effects of tillage displaced soil on soil properties and wheat biomass. *Soil and Tillage Research*, 58, 31–44.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Review in Plant Science*, 4, 319-464.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development*, 12: 519-539.
- Larney, F.J., Janzen, H.H., Olson, B.M., & Olson, A. F. (2009). Erosion–productivity–soil amendment relationships for wheat over 16 years. *Soil and Tillage Research*, 103, 73-83.
- Larney, F.J., Olson, B.M., Janzen, H.H., & Lindwall, C.W. (2000). Early impacts of topsoil removal and soil amendments on crop productivity. *Agronomy Journal*, 92, 948–956.
- Li, L., Du, S., Wu, L., Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *Catena*, 78, 93–99.
- Mehdizadeh, B., Asadi, H., Shabanpour, M. & Ghadiri, H. (2013). Impact of Erosion and Tillage on the Productivity and Quality of Selected Semiarid Soils of Iran. *International Agrophys*, 27: 291–297.
- Moriyasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transaction of the ASABE*, 50, 885–900.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., & Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool. Theoretical documentation, version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report N°406.
- Olson, K.R., Lal, R., & Norton, L.D. (1994). Evaluation of methods to study soil erosion–productivity relationships. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49 (6), 586–590.
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture*, 3, 443-463.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., & Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 37, 1169-1188.
- Schaub, D., Meier-Zielinski, S., & Goetz, R.U. (1998). Simulating long-term erosion effects on soil productivity for Central Switzerland using the EPIC model. In Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes. Edited by W. Summer, E. Klaghofer, and W. Zhang. IAHS Publication No. 249. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences.
- Schumacher, T. E., Lindstrom, M. J., Mokma, D. L., and Nelson, W.W. (1994). Corn yield: erosion relationships of representative loess and till soils in the North Central United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(1), 77–81.
- Tolson, B.A., & Shoemaker, C.A. (2007). Cannonsville reservoir watershed SWAT2000 model development, calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 337 (1e2), 68-86.
- Vagen, T.G., Shepherd, K.D., & Walsh, M.G., (2006). Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Goedermia*, 133, 281–294.
- Verity, G.E., & Anderson, D.W. (1990). Soil erosion effects on soil quality and yield. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 471–484.
- Weesies, G.A., Livingston, S.J., Hosteter, W.D., & Schertz, D.L. (1994). Effect of soil erosion on crop yield in Indiana: Results of a 10 year

- study. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(6), 597–600.
- Wei, H., Nearing, M.A., Stone, J.J., Guertin, D.P., Spaeth, K.E., Pierson, F.B., Nichols, M.H., & Moffet, C.A. (2009). A new splash and sheet erosion equation for rangelands. *Soil Science Society of America*, 73, 1386–1392.