

ارزیابی کارایی مدل EGEM در پیش‌بینی فرسایش خندقی موقت، مطالعه موردی: حوزه آبخیز قوری‌چای، اردبیل

بهنام فرید گیگلو^۱ و ابراهیم امیدوار^{۲*}

^۱ دانشجوی دکترای آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان و ^۲ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۷

چکیده

فرسایش خندقی موقت، یکی از انواع فرسایش آبی بوده که سهم زیادی در تخریب اراضی دارد. به‌منظور، ارزیابی میزان هدررفت خاک ناشی از آن و اجرای اقدامات حفاظتی مناسب، پیش‌بینی این پدیده امری ضروری است. این پژوهش، با هدف بررسی کارایی مدل EGEM در پیش‌بینی فرسایش خندقی موقت در حوزه آبخیز قوری‌چای استان اردبیل انجام پذیرفته است. بدین‌منظور، تعداد ۱۷ خندق موقتی در حوضه شناسایی شد و از اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ تا اردیبهشت ماه ۱۳۹۵ به پایش و ثبت خصوصیات مورفولوژیکی و حجم فرسایش آن‌ها پس از هفت واقعه بارشی مؤثر پرداخته شد. برای تخمین فرسایش خندقی موقت ناشی از تک واقعه بارش، مدل EGEM به چهار گروه ورودی شامل اطلاعات شناسایی، داده‌های حوضه، خاک و بارش در هر خندق نیاز دارد. این مدل شامل دو مولفه هیدرولوژی و فرسایش بوده که رواناب ناشی از بارش‌های رخ داده در هر یک از زیرحوضه‌های مشرف به خندق‌ها بر اساس روش شماره منحنی NRCS برآورد می‌کند. نتایج ارزیابی کارایی مدل EGEM نشان داد که مدل حجم خاک و سطح مقطع فرسایش یافته را به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۶ و ۰/۸۹ پیش‌بینی کرده است. همچنین، نتایج تحلیل حساسیت مدل نیز نشان داد که مدل نسبت به پارامتر CN بیشترین حساسیت را داشته است، به‌طوری که با افزایش و کاهش ۱۰ درصدی CN، میزان تغییرات حجم خاک فرسایش یافته به‌ترتیب ۲۲/۹۸ و ۱۸/۹۲ درصد تغییر پیدا کرد. لذا، می‌توان گفت که مدل EGEM برای برآورد میزان فرسایش خندقی موقت ناشی از وقایع منفرد بارندگی در حوزه آبخیز قوری‌چای مناسب بوده، می‌توان آن را برای مطالعه و برنامه‌ریزی روی خندق‌های موقتی در حوضه‌های مشابه توصیه کرد.

واژه‌های کلیدی: آبکند موقتی، تحلیل حساسیت، دشت مغان، شبیه‌سازی، شماره منحنی، هدررفت خاک

مقدمه

تمرکز جریان رواناب سطحی در یک کانال و یا نفوذ جریان زیرسطحی به مسیرهای زیرزمینی و فروریزش این مسیرها به‌وقوع می‌پیوندد (Wilson, ۲۰۱۱) و می‌توان به آسانی با عملیات رایج کشاورزی آن‌ها را پر کرد (Capra و همکاران، ۲۰۰۵). این خندق‌ها می‌توانند در بیش از ۴۰ درصد رسوبات تحویل داده

فرسایش خندقی به‌عنوان یکی از مهمترین مخاطرات محیطی در جهان و به‌خصوص ایران شناخته شده و به‌وسیله عوامل محیطی و انسانی کنترل می‌شود (Samani و همکاران، ۲۰۱۶). خندق‌های موقتی، شیارها و کانال‌های کوچکی هستند که در اثر

کمترین مقدار می‌رساند. همچنین، تطبیق نوع توزیع بارندگی نیز باعث بهبود مدل در پیش‌بینی حجم خندق می‌شود. Gordon و همکاران (۲۰۰۷) قابلیت محاسبه فرسایش خندقی موقت در مطالعات حوزه آبخیز به‌وسیله مدل EGEM را از طریق تلفیق با مدل AnnAGNPS توسعه دادند. Tekwa و Yahya (۲۰۱۴) نیز به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل EGEM پرداخته، به این نتیجه رسیدند که پارامترهای چگالی ظاهری خاک، طول خندق و به‌طور زیادی میزان فرسایش خندقی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین، پیش‌بینی فرسایش به‌وسیله مدل با پارامترهای تنش برشی و چگالی ظاهری همبستگی منفی و با فرسایش‌پذیری خاک، طول و عمق خندق همبستگی مثبت داشته است. نتایج پژوهش Tekwa و همکاران (۲۰۱۵) در ارزیابی مدل EGEM در شمال شرقی نیجریه نشان داد که نسخه‌های سازگار یافته این مدل دارای دقت بالایی در پیش‌بینی میزان فرسایش خندقی بوده اما مدل استاندارد EGEM دارای دقت کافی نبوده‌اند. همچنین، این مدل به‌وسیله پژوهشگران دیگری در اروپا (Poesen و همکاران، ۲۰۰۳) و آمریکا (Franti و همکاران، ۱۹۸۵؛ Woodward، ۱۹۹۹) آزمایش و نتایج مطلوبی از آن گزارش شده است. در داخل کشور نیز Rezaei Moghadam و Behboodi (۲۰۱۱) مدل مذکور را در حوزه آبخیز سرندچای آذربایجان شرقی به‌کار برده، نشان دادند که طول خندق پارامتر مناسبی برای تعیین مقادیر فرسایش خندقی موقت بوده، بین عرض اندازه‌گیری شده و محاسباتی مدل همبستگی معنی‌دار و در عین حال ضعیفی وجود داشته است. در این پژوهش، پیشنهاد شده است که برای دستیابی به نتایج مطلوب این مدل باید در سایر نواحی اقلیمی ایران نیز به‌کار گرفته شود. همچنین، Zarei و همکاران (۲۰۱۷) طی پژوهشی با هدف ارزیابی کارایی مدل EGEM در حوزه آبخیز یکی‌آغزلی استان گلستان، به این نتیجه رسیدند که در منطقه مورد مطالعه، مدل توانایی قابل قبولی برای برآورد فرسایش خندقی موقت نداشته اما برای پیش‌بینی میزان عرض خندق‌های موقت دارای کارایی قابل قبولی است. Elizondo Gudino و همکاران (۲۰۱۸a) با اندازه‌گیری میزان فرسایش

شده به کناره‌های مزارع کشاورزی سهم داشته و از این طریق سلامت و خدمات اکولوژیکی مناطق پایین‌دست را به خطر بیندازند (Bingner و همکاران، ۲۰۱۶). این سهم می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند مقیاس مکانی و زمانی و همچنین، عوامل کنترل‌کننده محیطی مانند نوع خاک، کاربری اراضی، اقلیم و توپوگرافی تغییر کند (Poesen و همکاران، ۲۰۰۳). محاسبه میزان فرسایش ناشی از خندق‌های موقتی برای طراحی و اجرای برنامه‌های حفاظتی یک مسأله جهانی است (Bernard، ۲۰۱۰). تا به حال مدل‌های برآورد فرسایش مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بسیاری از این مدل‌ها روی فرسایش شیاری و بین‌شیاری تمرکز کرده (Gutiérrez و همکاران، ۲۰۰۹) و توانایی برآورد میزان فرسایش ناشی از خندق‌های موقت را نداشته‌اند (Tekwa و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، در مناطق مستعد فرسایش خندقی موقت، لازم است، مدلی مورد استفاده قرار گیرد که بتواند فرسایش ناشی از این خندق‌ها را نیز لحاظ کند. یکی از مهمترین مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب حاصل از فرسایش خندقی، مدل فرسایش خندقی موقت EGEM است. مدل EGEM که به‌وسیله USDA-NRCS توسعه داده شده، ابزاری مطمئن برای پیش‌بینی فرسایش خندقی است (Capra و همکاران، ۲۰۰۵؛ Gordon و همکاران، ۲۰۰۷). این مدل تا کنون به‌وسیله پژوهشگران مختلفی در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. Nachtergaele و همکاران (۲۰۰۱) مدل EGEM را در اراضی کشاورزی اسپانیا و پرتغال مورد ارزیابی قرار داده، به این نتیجه رسیدند که مدل حجم خندق‌ها را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما مقادیر سطح مقطع عرضی خندق را به‌خوبی محاسبه نمی‌کند. این پژوهشگران، دلیل این امر را به اشکال در شبیه‌سازی اثر سنگ‌ها روی پروفیل خاک و همچنین، عدم شبیه‌سازی سهم جریان سطحی هورتونی و اشباع در فرایند فرسایش خندقی ارتباط دادند. همچنین، Capra و همکاران (۲۰۰۵) مدل EGEM را در سیسیلی ایتالیا به‌کار برده، به این نتیجه رسیدند که قابلیت مدل برای پیش‌بینی مقطع عرضی خندق ضعیف بوده، استفاده از داده‌های عمق تعدیل شده خندق، خطاهای مدل در برآورد حجم خندق را به

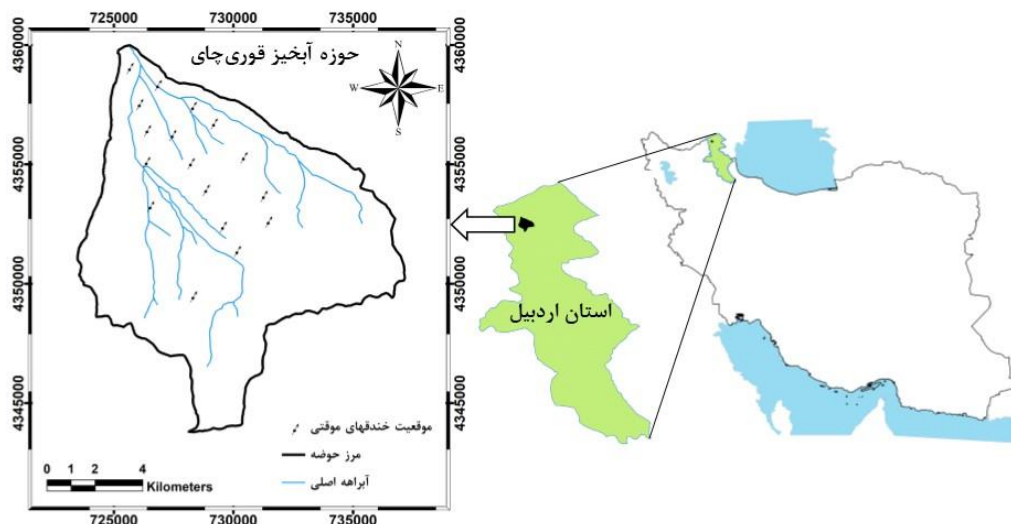
WEPP به حجم داده‌های زیادی نیازمند هستند (Gordon و همکاران، ۲۰۰۶). از مزایای مدل EGEM پیش‌بینی فرسایش خندق موقتی بدون دخالت انواع دیگر فرسایش و نیاز به حجم داده‌های کمتر نسبت به مدل‌های دیگر است. از این‌رو، پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی کارایی مدل EGEM در پیش‌بینی میزان فرسایش خندقی موقت و با تکیه بر مقادیر اندازه‌گیری شده صحرائی انجام شده است. یکی دیگر، از نقاط قوت پژوهش حاضر اجرای مدل به‌صورت تک واقعه خواهد بود که تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بدین‌منظور، حوزه آبخیز قوری‌چای در شمال استان اردبیل برای اجرای این مدل در نظر گرفته شد. این حوزه به سبب گسترش فرسایش خندقی به‌شدت در معرض تخریب قرار گرفته و زمین‌های مستعد و هموار این منطقه با خاک ارزشمند در نتیجه گسترش خندق‌ها در حال نابودی و از بین رفتن است.

مواد و روش‌ها

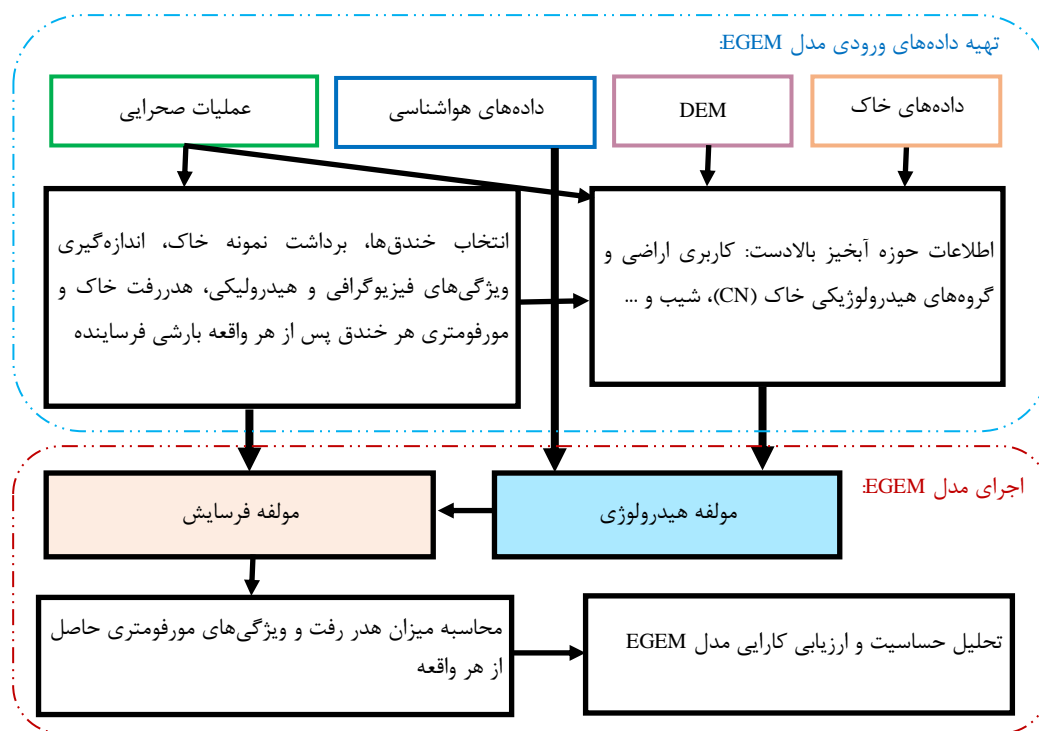
منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز قوری‌چای، در شمال استان اردبیل (دشت مغان) به مساحت ۱۱۸۴۲/۷ هکتار در محدوده ۳۷° ۱۲' ۳۹" تا ۴۲° ۲۱' ۳۹" عرض شمالی و ۰۰° ۳۵' ۴۷" تا ۱۱° ۴۵' ۴۷" طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). بیشترین ارتفاع حوزه ۱۰۰۷ متر و کمترین ارتفاع آن معادل ۲۶۵/۵ متر از سطح دریا است. در این حوزه میانگین، میانگین بیشینه و میانگین کمینه روزانه دمای هوا به‌ترتیب ۱۳/۹، ۱۹/۷ و ۸/۷ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، میزان بارندگی سالیانه به‌طور متوسط ۳۱۸/۸ میلی‌متر بوده که کمینه آن مربوط به مرداد ماه (۸/۹ میلی‌متر) و بیشینه آن مربوط به خرداد ماه (۴۵/۱ میلی‌متر) است. نوع اقلیم منطقه نیز بر اساس طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده، اقلیم نیمه‌خشک سرد می‌باشد.

روش انجام پژوهش: پژوهش حاضر، در دو مرحله کلی، شامل تهیه داده‌های ورودی و اجرای مدل EGEM انجام شد. این مراحل به‌صورت یک نمودار گردش کار در شکل ۲ نشان داده شده است.

خندقی موقت و آستانه توپوگرافی در یک حوضه شهری در مکزیک نشان دادند که آسیب‌پذیری بالا نسبت به فرسایش خندقی همراه با فرسایش‌پذیری بالای خاک و تنش برشی بحرانی پایین بوده است. در سال‌های اخیر مدل EGEM مورد بازبینی قرار گرفته و در قالب مدل AnnGNPS نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طوری که همکاران (Taguas و همکاران ۲۰۱۲) با مدل‌سازی سهم فرسایش خندقی موقت تحت مدیریت‌های مختلف اراضی به این نتیجه رسیدند که مدل AnnGNPS در مقیاس ماهانه به‌ترتیب با ضریب همبستگی (r) و ضریب کارایی (E) برابر با ۰/۹۳ و ۰/۸۷، قابلیت بالاتری نسبت به مقیاس تک‌واقعه (E=۰/۷۱، r=۰/۸۶) داشته است. Li و همکاران (۲۰۱۶)، طی مطالعه‌ای با هدف ارزیابی اثر فرسایش خندقی موقت روی تولید ذرت به ارزیابی مدل AnnGNPS نیز پرداختند. این محققین با تحلیل حساسیت مدل به این نتیجه رسیدند که CN و ضریب جداسازی خاک رأس خندق موقتی حساس‌ترین پارامترهای مرتبط با رواناب و فرسایش خندقی موقت بودند. همچنین، مدل میزان متوسط فرسایش خندقی موقت شبیه‌سازی شده در دو مرحله مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل را با دقت قابل قبولی (درصد ۵۵ < PBIAS) شبیه‌سازی کرده بود. Elizondo Gudino و همکاران (۲۰۱۸b) طی مطالعه‌ای دیگر یک شبکه فرسایش خندقی موقت با استفاده از مدل AnnGNPS پرداختند. نتایج این تحقیق، نشان داد که بار رسوبی مدل‌سازی شده به شماره منحنی (CN)، عمق شخم و تنش برشی بحرانی بیشترین حساسیت را داشته است. به‌طور کلی، سوابق پژوهشی نشان داده‌اند که کارایی مدل EGEM در برخی مطالعات مورد تأیید بوده، در مواقعی نیز قابل قبول گزارش نشده است. در داخل ایران نیز تا کنون دو تحقیق مورد اشاره در فوق روی این مدل انجام شده که در هر دو مورد روی پیش‌بینی‌های سالانه تأکید شده، روی پیش‌بینی میزان فرسایش خندقی حاصل از یک واقعه منفرد، تحقیقی صورت نگرفته است. از سوی دیگر، تا به حال مدل‌های کمی برای پیش‌بینی فرسایش خندقی موقت معرفی شده‌اند که برخی از آن‌ها مانند CREAMS و



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قوری‌چای در ایران و استان اردبیل



شکل ۲- نمودار گردش کار پژوهش حاضر به منظور ارزیابی کارایی مدل EGEM

متمرکز شده (نشان‌دهنده بیشینه طول پتانسیل خندق موقت)، شیب حوزه آبخیز، شیب جریان متمرکز شده و همچنین، شماره منحنی است. داده‌های خاک شامل طبقه خاک، عامل فرسایش‌پذیری کانال، تنش برشی بحرانی، قطر ذرات، چگالی ظاهری، وزن مخصوص ذرات و عامل مانینگ، عمق بیشینه (بر اساس برآورد عمق به لایه خاک که عمق خندق موقتی را محدود می‌کند)، عرض خالی شده (عرض

تهیه ورودی‌های مدل: مدل EGEM، برای تخمین فرسایش خندقی موقت برای تک واقعه بارش ۲۴ ساعته مورد استفاده می‌گیرد. این مدل، نیاز به ۲۳ پارامتر ورودی دارد که آن‌ها را در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی می‌کنند. (۱) اطلاعات شناسایی، (۲) داده‌های حوزه، (۳) داده خاک و (۴) داده‌های بارش. داده‌های حوزه آبخیز شامل مساحت حوزه در خروجی خندق موقت، طول حوزه آبخیز، طول جریان

زمین در مجاورت خندق که از آن خاک برای پرکردن کانال در جریان عملیات کشاورزی استفاده می‌شود). داده‌های بارش نیز شامل نوع توزیع زمانی و باراندگی ۲۴ ساعته است.

در این مطالعه، ابتدا طی عملیات صحرایی نقاط مربوط به موقعیت رأس هر خندق به هنگام برداشت میدانی به‌وسیله دستگاه GPS ثبت و با توجه به نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه، نقشه حوضه زهکشی هر خندق در محیط GIS تهیه شد. سپس، کلیه پارامترهای ورودی حوزه آبخیز مورد نیاز برای مدل EGEM برای هر خندق با استفاده از ابزارهای مختلف در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 محاسبه شد. همچنین، شماره منحنی حوزه آبخیز هر خندق نیز با استفاده از نقشه موجود کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک حوضه (تهیه شده به‌وسیله اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان اردبیل) با استفاده از ابزار ArcCN در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. کاربری‌های غالب حوضه قوری‌چای، مرتع و کشاورزی دیم بود، به‌طوری که مراتع با سطحی معادل ۸۰۲۹/۴ هکتار، ۶۷/۸ درصد کل حوضه را تشکیل داد. داده‌های خاک نیز با توجه به اطلاعات مربوط به نقشه تیپ‌های خاک منطقه اخذ شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اردبیل و بر اساس دستورالعمل مدل تهیه شد. خاک‌های منطقه بیشتر از نوع لومی و سیلتی لومی بودند. غالب اراضی گروه‌های هیدرولوژیکی محاسبه شده در حوضه B، C و D بوده که به‌ترتیب ۱۰/۳۱، ۳۹/۶۴ و ۵۰/۰۳ درصد از مساحت حوضه را تشکیل داده‌اند. اطلاعات شناسایی حوضه مانند درصد عملیات شخم و برخی دیگر از عوامل خاک مانند ضریب مانینگ، عرض بیشینه و عرض خالی شده با توجه به اندازه‌گیری‌های صحرایی به‌دست آمد. همچنین، داده‌های وقایع بارشی فرساینده موثر مربوط به سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ با توجه به اطلاعات اخذ شده از اداره کل هواشناسی استان اردبیل مربوط به ایستگاه سینوپتیک پارس‌آباد مغان که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه بود، آماده شد.

عملیات صحرایی: به‌منظور پیش‌برد اهداف این پژوهش، ابتدا از طریق بازدیدهای میدانی وضعیت و

تیپ فرسایش‌های خندقی منطقه بررسی و از بین کلیه خندق‌های فعال مکان‌یابی شده در حوضه، تعداد ۱۷ خندق موقتی که بدون دخالت انسانی، امکان پایش آن‌ها برای طولانی مدت فراهم بود، انتخاب شدند (شکل ۱). شکل ۳، نمونه‌هایی از خندق‌های انتخابی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. قبل از وقوع رخداد‌های بارشی، پارامترهای مورفومتری در خندق‌های موقتی انتخابی، اندازه‌گیری اولیه شدند. برای اجرای مدل EGEM به‌صورت تک واقعه، لازم بود که وقایع بارشی موثر فرساینده با تیپ‌های مختلف طی فصول مختلف (بهاره، پاییزه و زمستانه) ثبت شده و میزان هدررفت خاک در هر خندق اندازه‌گیری شود. وقایع رگباری موثر فرساینده، وقایعی هستند که رواناب کافی برای فرسایش خندقی در رأس و درون کانال خندق موقتی ایجاد کرده باشند. طبق تعریف Renard و همکاران (۱۹۹۷) یک واقعه بارشی موثر فرساینده، بارشی است که میزان تجمعی آن بیش از ۱۲/۷ میلی‌متر بوده، دست‌کم یک شدت اوج بیشتر از ۶/۳۵ میلی‌متر طی مدت ۱۵ دقیقه (۱۲/۷ میلی‌متر طی ۳۰ دقیقه) داشته باشد. البته اگر طی مدت شش ساعت، بارش تجمعی کمتر از ۱/۲۷ میلی‌متر به‌وقوع بپیوندد، آن واقعه بارشی به دو واقعه مجزا تقسیم می‌شود. طی مدت دو سال از اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ تا اردیبهشت ماه ۱۳۹۵، تعداد هفت واقعه رگباری موثر با شرایط فرساینده بودن به‌وقوع پیوست که پس از هر رخداد اقدام به پایش و ثبت تغییرات در خندق‌ها شد. در این اندازه‌گیری‌ها پس از هر واقعه بارشی موثر، فرساینده عرض بالا، عرض پایین و عمق خندق برای محاسبه تغییرات حجم و سطح خندق و همچنین، میزان عقب رفت طولی خندق ثبت شد.

محاسبه میزان فرسایش واقعی (مشاهداتی): با توجه به شکل‌های مختلف هندسی معمولاً سطح مقطع خندق‌های موقتی به دو شکل استوانه‌ای و مخروطی هستند. از این‌رو، فرسایش واقعی خاک با استفاده از داده‌های برداشت شده طی عملیات صحرایی بعد از هر واقعه بارشی موثر و به‌وسیله روابط ریاضیاتی تعریف شده برای خندق‌های موقت مخروطی یا استوانه‌ای شکل به‌صورت زیر محاسبه شد.

مساحت هدررفت خاک (ASL): مساحت مقطع عرضی خندق موقتی استوانه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود (Tekwa و همکاران، ۲۰۱۶).

(۱) $2\pi rL =$ مساحت خندق موقتی استوانه‌ای که در آن، r شعاع یک خندق استوانه‌ای و L طول کانال هستند.



شکل ۳- نمونه‌هایی از خندق‌های موقتی ایجاد شده در حوضه قوری چای

همچنین، مساحت خندق موقتی مخروطی شکل نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود (Tekwa و همکاران، ۲۰۱۶).

(۲) $\pi r(r+l) =$ مساحت خندق موقتی مخروطی که در آن، r شعاع پایه یک خندق مخروطی و l ارتفاع مورب خندق موقت مخروطی شکل هستند. کل مساحت هدررفت خاک از مجموع دو مساحت خالص خندق موقت استوانه‌ای و مخروطی به دست می‌آید. مساحت مقطع عرضی هدررفت خاک خندق موقتی قبل و بعد از هر واقعه رگباری محاسبه و تفاوت‌های آن‌ها مساحت متوسط خالص هدررفت خاک را برای آن رخداد خاص نشان می‌دهد.

حجم هدررفت خاک (VSL): حجم هدررفت خاک بر اساس شکل‌های استوانه‌ای و مخروطی خندق موقتی به صورت زیر محاسبه می‌شود (Tekwa و همکاران، ۲۰۱۵).

(۳) $\frac{1}{3}\pi r^2 h =$ حجم هدررفت خاک در رأس خندق مخروطی که در آن، r شعاع رأس یک خندق مخروطی و h ارتفاع عمودی رأس خندق موقت مخروطی شکل می‌باشد.

(۴) $\frac{1}{2}\pi r^2 L =$ حجم هدررفت خاک در رأس خندق موقتی استوانه‌ای حجم کل هدررفت خاک از مجموع حجم خالص هدررفت خاک در خندق موقتی استوانه‌ای و مخروطی به دست آمد. جرم هدررفت خاک نیز از حاصل ضرب حجم کل خاک هدررفته در چگالی ظاهری خاک به دست آمد (Wolf، ۲۰۰۳). همانند مساحت مقطع عرضی، حجم هدررفت خاک خندق موقتی نیز قبل و بعد از هر واقعه رگباری محاسبه و تفاوت‌های آن‌ها حجم متوسط خالص هدررفت خاک را برای آن رخداد خاص نشان می‌دهد.

پیش‌بینی میزان فرسایش خندقی با استفاده از مدل EGEM

ساختار مدل EGEM: EGEM فرض می‌کند که بارش منجر به تشکیل خندق موقت، بیشینه بارش ۲۴ ساعته می‌باشد (Capra و همکاران، ۲۰۰۵). البته این مدل می‌تواند برای شرایط متوسط سالانه نیز با استفاده از یک توزیع زمانی بارش استاندارد استفاده شود. در این حالت، فرض می‌شود که یک توزیع لوگ نرمال منحنی فراوانی بیشینه فرسایش سالانه را

خاک (Nm^{-2}) می‌باشد. دبی اوج برای محاسبه t استفاده می‌شود. مدل فرسایشی در گام‌های زمانی عمل نمی‌کند، اما فرایند فرسایش را در سه فاز اجرا می‌کند. (۱) فرسایش اولیه، (۲) فرسایش تا لایه مقاوم که عرض اولیه خندق حفظ می‌شود و (۳) فرسایش تا عرض نهایی خندق. فرض بر این است که دبی اوج در مدت تولید حجم رواناب فعالیت می‌کند. به‌منظور نشان دادن بیشینه تنش در کف کانال، تنش برشی در $1/35$ ضرب می‌شود (USDA-ARS، ۱۹۸۰). K_c و τ_c پارامترهای خاک هستند که از آزمایش‌های جریان متمرکز روی تیپ‌های مختلف خاک به‌دست آمده‌اند (Franti و همکاران، ۱۹۸۵). میزان جداسازی با میزان رسوب حمل شده به‌وسیله جریان آب در تعادل بوده و این مکانیسم با استفاده از معادله زیر نشان داده می‌شود (Foster و Meyer، ۱۹۷۵).

$$D/D_C + G/T_C = 1 \quad (۸)$$

که در آن، D میزان جداسازی، D_C میزان یا ظرفیت جداسازی بیشینه، G بار رسوبی و T_C ظرفیت انتقال رسوب است. واحد همه این متغیرها جرم بر واحد سطح بر واحد زمان است. T_C نیز از معادله یالین در مدل CREAMS به‌دست می‌آید (USDA-ARS، ۱۹۸۰). با توجه به این‌که EGEM روی یک پایه متوسط مکانی و زمانی کار می‌کند، این معادله به‌صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$D_a/D_{Ca} + G_a/T_{Ca} = 1 \quad (۹)$$

که در آن، D_a جرم خاک جدا شده، D_{Ca} بیشینه ظرفیت برای جداسازی، G_a جرم رسوب انتقال یافته و T_{Ca} بیشینه جرم رسوب قابل انتقال است. در این معادله، تمامی واحدها برحسب جرم بر واحد سطح می‌باشد (Woodward، ۱۹۹۹). عرض خندق موقتی (W) در خروجی آن محاسبه می‌شود. با توجه به این‌که عرض خندق از صفر تا یک مقدار تغییر می‌کند، برای نشان دادن عرض متوسط یک عامل $0.664W$ استفاده می‌شود. فرض بر این است که عمق خندق در تمامی طول آن ثابت است. وزن فرسایش با استفاده از حجم و چگالی ظاهری خاک فرسایش یافته محاسبه می‌شود. مدل EGEM، فرسایش خاک را بر حسب مساحت تهی شده و حجم فرسایش یافته برآورد می‌کند. خروجی‌های اصلی مدل EGEM شامل عرض

تشریح می‌کند. در این‌صورت، بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت‌های دو و ۲۵ سال برای تشریح منحنی فراوانی متوسط سالانه استفاده می‌شود (Woodward، ۱۹۹۹). این مدل، شامل دو مؤلفه اصلی هیدرولوژی و فرسایش است (USDA، ۱۹۹۲). مؤلفه فرسایش، ترکیبی از روابط تجربی و معادلات فرایند فیزیکی است که عرض و عمق خندق موقتی را محاسبه می‌کند (Woodward، ۱۹۹۹).

الف) مؤلفه هیدرولوژی: مؤلفه هیدرولوژیک در مدل EGEM، دبی اوج واحد (q_u) و حجم رواناب را بر اساس روش شماره منحنی محاسبه می‌کند. تشریح روش شماره منحنی در فصل دوم راهنمای عملیات صحرائی مهندسی ارائه شده است (USDA-SCS، ۱۹۸۸). با توجه به این دستورالعمل، دبی اوج و حجم رواناب برای یک واقعه سیلابی منفرد برآورد می‌شود.

ب) مؤلفه فرسایش: مؤلفه فرسایش در مدل EGEM، هدررفت خاک ناشی از جریان متمرکز را به‌وسیله دبی اوج و حجم روانابی که از مؤلفه هیدرولوژی به‌دست آمده محاسبه می‌کند. در این مؤلفه، برای برآورد عرض اولیه (We) و عرض نهایی (W_u) خندق از معادلات رگرسیونی استفاده می‌شود. با توجه به تداوم رواناب، فرسایش خندقی تا رسیدن به یک لایه مقاوم ادامه می‌یابد (Watson و همکاران، ۱۹۸۵). در ادامه، بسته به مدت رواناب، خندق در آن عمق باقی مانده، تا رسیدن به عرض نهایی (W_u) گسترده می‌شود. این عرض‌ها به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (Foster، ۱۹۸۲).

$$W_e = 2.66 Q^{0.396} n^{0.387} S^{-0.16} CS^{-0.24} \quad (۵)$$

$$W_u = 179 Q^{0.552} n^{0.556} S^{-0.199} CS^{-0.476} \quad (۶)$$

که در آن‌ها، We عرض اولیه یا تعادلی کانال (m)، W_u عرض نهایی کانال (m)، Q میزان دبی اوج ($m^3 s^{-1}$)، n ضریب زبری مانینگ، S شیب جریان متمرکز شده و CS تنش برشی بحرانی (Nm^{-2}) می‌باشد. میزان جداسازی خاک در حال فرسایش از معادله زیر به‌دست می‌آید (Foster، ۱۹۸۲).

$$D = K_c(1.35 \tau - \tau_c) \quad (۷)$$

که در آن، D میزان جداسازی ($gm^{-2}s^{-1}$)، K_c عامل فرسایش‌پذیری کانال ($gs^{-1}N^{-1}$)، τ میانگین تنش برشی جریان آب (Nm^{-2}) و τ_c تنش برشی بحرانی

که به بررسی رد یا پذیرش مدل می‌پردازد، از شاخص‌های میانگین ضریب مسیر (APC)، میانگین ضریب تعیین (ARS)، میانگین ضریب تعیین تعدیل‌شده (AARS)، میانگین عامل تورم واریانس (AVIF)، میانگین خطی بودن عامل تورم واریانس (AFVIF)، نسبت سهمی میانگین مربعات (RSCR) و نسبت موقوف‌سازی آماری (SSR) نیز استفاده شد.

پس از اطمینان از عملکرد قابل قبول مدل، تغییرات میزان فرسایش و متغیرهای مورفومتری خندق برای دوره بازگشت‌های دو و ۲۵ سال نیز محاسبه شد. بدین‌منظور، با استفاده از سری داده‌های بارندگی ۲۴ ساعته در ایستگاه سینوپتیک پارس‌آباد و همچنین، توزیع لوگ نرمال (Woodward, ۱۹۹۹)، میزان بارش‌ها با دوره بازگشت‌های مربوطه محاسبه و وارد مدل شد. در نهایت میزان متوسط فرسایش در هر دوره بازگشت با استفاده از مدل پیش‌بینی شد. در انتها تحلیل حساسیت مدل نیز با ارزیابی پاسخ مدل (حجم خاک فرسایش‌یافته) نسبت افزایش و کاهش ۱۰ درصدی پارامترهای عامل فرسایش‌پذیری، تنش برشی بحرانی، ضریب زبری مانینگ، CN و زمان تمرکز انجام خواهد شد.

نتایج و بحث

ورودی‌های مدل EGEM: با توجه به دستورالعمل‌های مربوطه ورودی‌های مدل برای تعداد ۱۷ خندق مورد بررسی محاسبه و مقادیر میانگین و انحراف معیار آن‌ها محاسبه و در جدول ۱ ارائه شد.

خندق موقت، وزن خاک فرسایش یافته خندق و مساحت سطحی خندق موقت می‌باشد.

محاسبه میزان فرسایش و ارزیابی کارایی مدل EGEM: پس از تهیه ورودی‌ها، از مؤلفه هیدرولوژی (روش SCS و با توجه به مقادیر CN محاسبه شده) مقادیر دبی اوج و حجم رواناب برای حوزه آبخیز هر خندق محاسبه و سپس، با توجه به مؤلفه فرسایش میزان حجم و وزن خاک فرسایش یافته برای هر یک از خندق‌ها جداگانه محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی کارایی مدل در پیش‌بینی مقادیر حجم فرسایش، از داده‌های اندازه‌گیری شده حجم در خندق‌های موقتی طی عملیات صحرائی استفاده شد. بدین‌منظور، از شاخص‌های ضریب تبیین رگرسیون خطی ساده بین داده‌های حجم خاک فرسایش یافته اندازه‌گیری شده (مشاهداتی) و برآورد شده (R^2) استفاده شد. همچنین، شاخص‌های میانگین خطای استاندارد (M_{ES}) و ریشه میانگین مربعات خطا (M_{SE}) نیز به‌کار گرفته شدند که محاسبه آن‌ها از طریق روابط زیر امکان‌پذیر است (Capra و همکاران، ۲۰۰۵).

$$M_{ES} = \frac{1}{n} \hat{\alpha} \left(\frac{Z_i - Z_i^*}{s} \right)^2 \quad (14)$$

$$M_{SE} = \left[\frac{1}{n} \hat{\alpha} (Z_i - Z_i^*)^2 \right]^{0.5} \quad (15)$$

که در آن‌ها، Z_i حجم فرسایش برآورد شده، Z_i^* حجم فرسایش اندازه‌گیری شده (مشاهداتی)، s انحراف معیار مقادیر حجم اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است. هر چه مقادیر M_{ES} به یک نزدیک‌تر بوده و M_{SE} کوچک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. همچنین، به‌منظور ارزیابی تناسب و برازش مدل

جدول ۱- میانگین و انحراف معیار پارامترهای ورودی حوزه آبخیز و خاک برای مدل EGEM در خندق‌های مورد مطالعه

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	پارامتر	میانگین	انحراف معیار
حوضه زهکشی (m^2)	۲۵۲۰۰	۱۶۹۱۴	عامل فرسایش‌پذیری کانال	۰/۲۸	۰/۱۵
طول جریان (m)	۲۵۶	۱۲۴	تنش برشی	۱/۵۸	۰/۵۹
طول جریان متمرکز (m)	۱۵۰	۱۳۵	عمق بیشینه (m)	۰/۳۵	۰/۱۷
شیب حوضه (درصد)	۱۸/۶	۵	وزن مخصوص ظاهری (kgm^{-3})	۱۶۱۰	۱۲۶
شیب جریان متمرکز (درصد)	۱۶/۴	۶	قطر ذره (mm)	۰/۰۵	۰/۰۳
شماره منحنی	۹۴	-	وزن مخصوص ذرات (kgm^{-3})	۳۱۴۱	-
ضریب مانینگ	۰/۰۶	-	لومی، لوم لای‌دار، لوم رس و لای‌دار، لوم رس و شن‌دار، لوم شن‌دار		
عملیات شخم (درصد)	۱۵	۷	طبقه بافت خاک		

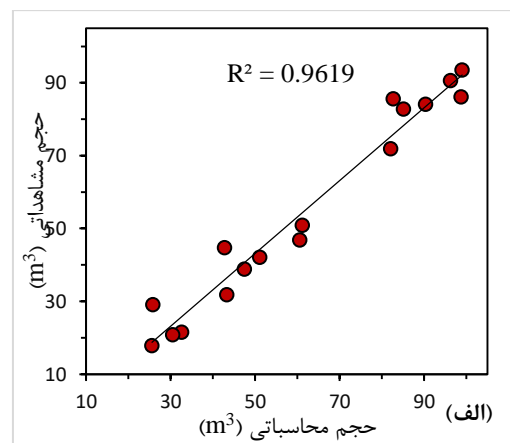
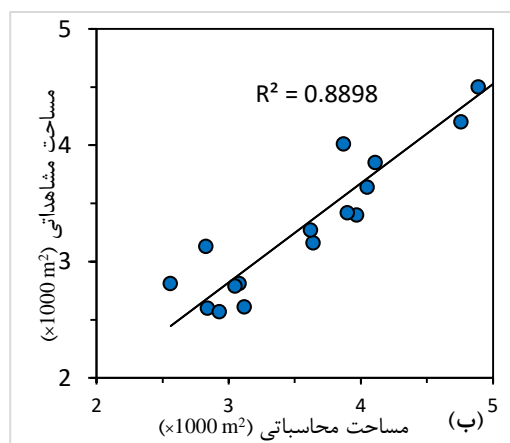
است. همچنین، مقادیر M_{SE} و M_{ES} نیز حاکی از عملکرد قابل قبول مدل در خندق‌های موقتی مختلف است. مقادیر مجموع حجم و سطح مقطع عرضی محاسباتی مدل طی هفت واقعه رگباری در هر خندق در مقابل مجموع مقادیر مشاهداتی قرار داده شد و میزان ضریب تبیین کلی این داده‌ها محاسبه شد. یافته‌ها بیان‌گر این امر بود که مدل EGEM مقادیر حجم کل خندق‌ها را با ضریب تبیین ۰/۹۶ و مقادیر سطح مقطع عرضی کل را با ضریب تبیین ۰/۸۹ پیش‌بینی کرده است (شکل ۴).

اجرا و ارزیابی کارایی مدل: نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل EGEM در برآورد حجم فرسایش خندقی در خندق‌های موقتی مورد مطالعه نشان داد که مدل در بیشتر خندق‌ها با میزان R^2 بالاتر از ۰/۵۰ توانسته پیش‌بینی قابل قبولی از حجم مواد فرسایش یافته را ارائه کند (جدول ۳). همچنین، نتایج برآورد حجم مواد فرسایش یافته برای هر یک از خندق‌های موقتی نیز در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرسایش در خندق شماره ۱۲ و کمترین میزان نیز در خندق شماره ۷ محاسبه شده

جدول ۳- نتایج اجرای مدل EGEM در خندق‌های موقتی مورد بررسی برای تعداد هفت واقعه رگباری منفرد

خندق	تیپ توزیعی بارش	نوع بارش مؤثر*	مجموع حجم فرسایش یافته (m^3)	R^2	M_{ES}	M_{SE}
۱	محلی	۱	۹۰/۶۲	۰/۵۷*	۱/۴	۶۳/۳
۲	محلی	۲	۳۸/۸۷	۰/۶۱*	۱/۳	۶۹/۸
۳	محلی	۲	۲۱/۵۴	۰/۵۳ ns	۱/۶	۲۵/۸
۴	محلی	۱	۴۴/۶۸	۰/۴۸ ns	۳/۲	۱۸/۷
۵	محلی	۲	۸۶/۱۰	۰/۶۰*	۱/۶	۶۵/۵
۶	محلی	۳	۲۰/۸	۰/۵۶*	۲/۳	۳۸/۹
۷	محلی	۱	۹۳/۵۱	۰/۵۷*	۲/۴	۴۰/۱
۸	محلی	۱	۵۰/۹۱	۰/۵۴ ns	۴/۴	۳۵/۷
۹	محلی	۲	۱۷/۸۲	۰/۵۳ ns	۳/۴	۲۴/۷
۱۰	محلی	۲	۷۱/۸۹	۰/۴۹ ns	۱/۲	۳۵/۴
۱۱	محلی	۲	۸۵/۵۸	۰/۵۵ ns	۲/۳	۳۶/۳
۱۲	محلی	۲	۴۲/۱۰	۰/۶۱*	۱/۶	۷۱/۴
۱۳	محلی	۱	۴۶/۸۵	۰/۴۷ ns	۳/۱	۱۸/۲
۱۴	محلی	۱	۸۲/۸	۰/۵۳ ns	۴/۵	۸۸/۹
۱۵	محلی	۲	۳۱/۷۷	۰/۵۶*	۱/۴	۸۶/۵
۱۶	محلی	۱	۲۹/۱	۰/۵۹*	۳/۸	۴۴/۳
۱۷	محلی	۲	۸۴/۱۱	۰/۵۰ ns	۳/۱	۲۰/۳

* معنی‌داری در سطح پنج درصد، ns عدم معنی‌داری



شکل ۴- الف) نمودار حجم محاسباتی و حجم مشاهداتی و ب) نمودار مساحت محاسباتی و مساحت مشاهداتی

برای APC، ARS و AARS به دست می آید، باید کمتر از ۰/۰۵ باشد، در حالی که برای شاخص AVIF و AFVIF رقمی کمتر از پنج قابل قبول است و کمتر از ۳/۳ ایده آل است. همچنین، شاخص RSCR برای مطلوب بودن بایستی رقم آن بزرگتر از ۰/۹ باشد و برای شاخص SSR این رقم بایستی بیشتر از ۰/۷ باشد. با توجه به مقادیر به دست آمده برازش مدل قابل قبول ارزیابی می شود.

همچنین، به منظور ارزیابی تناسب و برازش مدل که به بررسی رد یا پذیرش مدل می پردازد، از شاخص های APC، ARS، AARS، AVIF، AFVIF، RSCR و SSR استفاده شد. شاخص های تناسب مدل (جدول ۴) حاکی از آن بود که پیش بینی های مدل از نظر شاخص های تناسب و برازش در وضعیت قابل قبول قرار دارد، از این رو می توان نتیجه گرفت که مدل اجرا شده برازش مناسبی دارد. مقادیر p-value که

جدول ۴- شاخص های تناسب و برازش مدل EGEM برای کل خندق های موقتی مورد مطالعه

مقدار شاخص	نام شاخص
$(P=0.001) 0.427$	میانگین ضریب مسیر (APC)
$(P=0.001) 0.598$	میانگین ضریب تعیین (ARS)
$(P=0.001) 0.592$	میانگین ضریب تعیین تعدیل شده (AARS)
$(acceptable\ if < 5) 1.153$	میانگین عامل تورم واریانس (AVIF)
$(acceptable\ if < 5) 2.671$	میانگین خطی بودن عامل تورم واریانس (AFVIF)
$(acceptable\ if \geq 0.9) 1$	نسبت سهمی میانگین مربعات (RSCR)
$(acceptable\ if \geq 0.7) 1$	نسبت موقوف سازی آماری (SSR)

حساسیت را داشته است، به طوری که با افزایش ۱۰ درصدی میزان این پارامتر در حوزه های آبخیز بالادست خندق های موقتی، میزان تغییرات حجم خاک فرسایش یافته در کل خندق های موقتی ۱۷ گانه ۲۲/۹۸ درصد افزایش داشته و بالعکس با کاهش ۱۰ درصدی میزان CN میزان حجم کل ۱۸/۹۲ درصد کاهش پیدا کرد. به دنبال شماره منحنی، پارامترهای فرسایش پذیری خاک کانال، ضریب زبری مانینگ و تنش برشی بحرانی در رده های بعدی حساسیت قرار گرفتند. همچنین، کمترین میزان حساسیت مدل نیز در پاسخ به پارامتر زمان تمرکز (Tc) بوده که با افزایش ۱۰ درصدی آن برآورد میزان حجم کل فرسایش خندق های موقتی ۱/۵۴ درصد کاهش و کاهش ۱۰ درصدی آن نیز موجب افزایش ۱/۷۱ درصدی حجم کل فرسایش شد. لازم به ذکر است که عکس العمل مدل EGEM نسبت به کاهش و افزایش تنش برشی بحرانی، ضریب زبری مانینگ و زمان تمرکز معکوس بود، اما پاسخ مدل نسبت به کاهش و افزایش CN و عامل فرسایش پذیری کانال، مستقیم و مثبت بود.

پیش بینی میزان فرسایش خندقی موقت برای دوره بازگشت های دو و ۲۵ سال: پس از اطمینان از عملکرد قابل قبول مدل EGEM، برای بارش های ۲۴ ساعته با دوره بازگشت های دو و ۲۵ سال نیز مدل اجرا و نتایج آن به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شد. طبق نتایج اجرای مدل پارامترهای مساحت، جریان سطحی، دبی اوج، عمق، عرض، خاک فرسایش یافته و حجم خالی شده برای هر خندق ارائه شده است. همان طور که انتظار می رود، مقادیر خاک فرسایش یافته و حجم خالی شده طی یک واقعه بارندگی با دوره بازگشت ۲۵ سال به مراتب بالاتر از دوره بازگشت دو سال است. در دوره بازگشت دو سال خندق شماره ۳ کمترین و خندق شماره ۱۲ بیشترین میزان فرسایش را داشتند. اما در دوره بازگشت ۲۵ سال خندق شماره ۷ کمترین میزان و خندق شماره ۱۲ بیشترین میزان فرسایش را از خود نشان دادند.

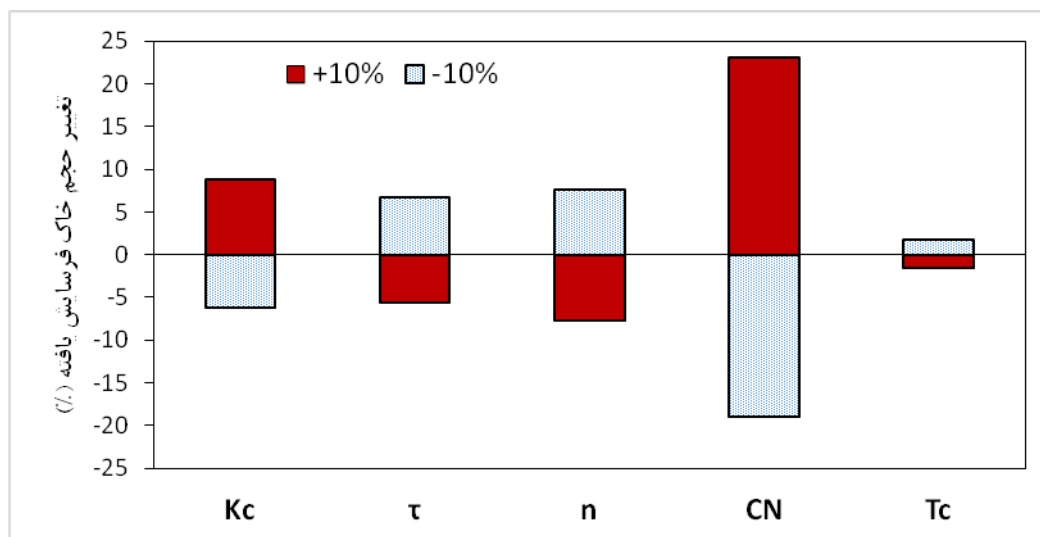
تحلیل حساسیت مدل EGEM: نتایج حاصل از تحلیل حساسیت خروجی مدل (حجم کل فرسایش خندقی موقت منطقه) نسبت به تغییرات پارامترها در نمودار شکل ۵ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن بود که مدل EGEM نسبت به پارامتر CN بیشترین

جدول ۵- نتایج پیش‌بینی مدل برای بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت دو سال

شماره خندقی	مساحت مقطع عرضی (m ²)	جریان سطحی (cm)	دبی اوج (m ³ s ⁻¹)	عمق (cm)	عرض (cm)	خاک فرسایش‌یافته (ton)	حجم خالی شده (m ³)
۱	۳۰۴۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲	۵۰/۲	۶/۴۵	۷۱/۹	۱۹۶/۱
۲	۴۱۴۶	۰/۰۱۶	۰/۰۲۵	۶۹/۳	۱۵/۵۱	۹۴/۳	۲۶۹/۳
۳	۲۷۹۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۳۸/۵	۵/۲۰	۷۰/۸	۱۸۷/۹
۴	۳۱۵۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۵	۵۷/۲	۶/۹۴	۷۵/۲	۲۰۱/۴
۵	۵۱۸۴	۰/۰۱۷	۰/۰۲۶	۷۱/۲	۱۳/۸۵	۱۰۹/۸	۲۸۵/۵
۶	۳۲۳۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۶۱/۳	۷/۸۷	۷۳/۵	۲۰۳/۷
۷	۲۴۷۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۷	۳۶/۴	۴/۴۹	۷۲/۵	۱۹۱/۷
۸	۴۲۰۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۰	۶۳/۸	۱۴/۵۸	۱۰۵/۱	۲۷۲/۲
۹	۳۸۸۱	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	۶۳/۷	۱۳/۴۳	۱۰۵/۸	۲۴۱/۶
۱۰	۴۰۵۴	۰/۰۱۹	۰/۰۲۲	۶۵/۹	۱۵/۰۲	۱۱۵/۵	۲۵۰/۵
۱۱	۲۹۱۰	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	۵۸/۷	۷/۴۳	۷۳/۹	۱۹۳/۷
۱۲	۵۴۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳	۷۰/۹	۱۳/۵۸	۱۲۱/۳	۲۸۴/۶
۱۳	۴۱۶۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۶۴/۸	۱۱/۹۱	۸۸/۱	۲۴۱/۹
۱۴	۴۰۰۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶	۶۲/۵	۹/۸۲	۷۹/۴	۲۱۹/۲
۱۵	۳۱۴۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۴	۵۹/۴	۸/۰۲	۷۳/۵	۱۹۶/۸
۱۶	۵۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۲۷	۶۹/۶	۱۵/۱۰	۹۹/۴	۲۷۳/۸
۱۷	۳۸۴۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۸	۵۹/۶	۹/۹۳	۷۸/۶	۲۱۰/۳

جدول ۶- نتایج پیش‌بینی مدل برای بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال

شماره خندقی	مساحت مقطع عرضی (m ²)	جریان سطحی (cm)	دبی اوج (m ³ s ⁻¹)	عمق (cm)	عرض (cm)	خاک فرسایش‌یافته (ton)	حجم خالی شده (m ³)
۱	۵۷۹۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۷	۶۲/۶	۱۵/۲۶	۹۵/۸	۲۱۲/۳
۲	۷۱۰۰	۰/۰۲۷	۰/۰۳۰	۷۴/۱	۲۴/۴۶	۱۱۸/۵	۲۹۷/۸
۳	۵۲۱۵	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	۴۷/۹	۱۴/۱۸	۹۳/۳	۲۱۰/۵
۴	۶۰۵۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۹	۶۸/۵	۱۷/۶۲	۹۶/۸	۲۲۵/۳
۵	۸۳۷۲	۰/۰۲۹	۰/۰۳۲	۸۰/۶	۲۵/۳۶	۱۳۹/۱	۳۰۸/۲
۶	۶۴۴۰	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	۶۹/۱	۱۸/۰۵	۹۶/۹	۲۲۷/۸
۷	۴۸۳۰	۰/۰۱۷	۰/۰۲۱	۴۵/۶	۱۳/۸۴	۹۱/۶	۲۰۶/۶
۸	۷۲۱۹	۰/۰۲۸	۰/۰۲۶	۷۵/۳	۲۳/۷۲	۱۲۸/۶	۲۸۸/۶
۹	۶۸۰۸	۰/۰۲۶	۰/۰۳۱	۷۱/۲	۲۲/۲۰	۱۳۰/۴	۲۶۵/۸
۱۰	۷۱۲۵	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۷۳/۵	۲۳/۳۹	۱۳۶	۲۷۴/۸
۱۱	۵۵۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۷	۶۶/۹	۱۶/۱۹	۹۵/۲	۲۱۷/۱
۱۲	۸۸۶۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹	۷۹/۸	۲۴/۹۰	۱۴۷/۲	۳۰۶/۴
۱۳	۷۰۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۴	۷۲/۶	۲۲/۸۲	۱۰۶/۲	۲۶۸/۳
۱۴	۶۹۹۴	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۷۱/۷	۲۰/۹۴	۱۰۳/۸	۲۴۳/۵
۱۵	۶۲۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹	۶۷/۶	۱۷/۴۴	۹۵/۹	۲۱۹/۳
۱۶	۸۲۹۱	۰/۰۲۸	۰/۰۳۳	۷۷/۲	۲۴/۴۵	۱۲۱/۷	۲۹۹/۵
۱۷	۶۸۵۳	۰/۰۲۶	۰/۰۲۴	۷۰/۹	۱۹/۸۴	۱۰۰/۹	۲۳۷/۷



شکل ۵- نمودار تحلیل حساسیت حجم خاک فرسایش یافته محاسباتی مدل EGEM در مقابل تغییرات پارامترها

نتیجه گیری

کرد چرا که در پژوهش حاضر به بررسی تک واقعه مقادیر فرسایش خندقی موقت پرداخته شد. هر چند که ایشان نیز پیش‌بینی‌های سالانه متوسط عرض خندق‌ها با استفاده از مدل EGEM را قابل قبول ارزیابی کرده بودند. محققانی مانند Taguas و همکاران (۲۰۱۸) نیز کارایی مدل EGM بازبینی شده را در قالب مدل AGNPS برای پیش‌بینی تک واقعه خندق موقتی نسبت به حالت سالانه و ماهانه ضعیف‌تر ارزیابی کرده‌اند. با توجه به این‌که پس از هر واقعه با پس‌روی رأس خندق، مساحت حوزه آبخیز بالادست کم می‌شود، بنابراین، در اجرای تک واقعه مدل این مزیت وجود دارد که متناسب با پس‌روی خندق در وقایع قبلی مساحت جدید به مدل داده می‌شود، اما در پیش‌بینی سالانه تنها یک مساحت داده می‌شود که ممکن است، طی وقایع متوالی تغییر کند. Nachtergaele و همکاران (۲۰۱۱) و همچنین Capra و همکاران (۲۰۰۵) نیز پیش‌بینی‌های مقطع عرضی به‌وسیله مدل را ضعیف گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مبنی بر پیش‌بینی قابل قبول مساحت مقطع عرضی خندق تطابق ندارد. یکی از دلایل پیش‌بینی رضایت‌بخش حجم، استفاده از داده‌های مشاهداتی عمق و طول خندق‌ها است که مدل EGEM در محاسبات نهایی حجم، از آن‌ها نیز استفاده می‌کند. بنابراین، بخشی از پیش‌بینی‌های مدل مربوط به داده‌هایی است که خود در محاسبه حجم مشاهداتی (اندازه‌گیری‌های صحرایی) نیز سهم داشته است.

در این پژوهش، به ارزیابی عملکرد مدل EGEM در پیش‌بینی فرسایش خندقی موقت پرداخته شد. بدین‌منظور، تعداد ۱۷ خندق موقتی در حوزه آبخیز قوری‌چای دشت مغان انتخاب و طی عملیات صحرایی پس از وقایع رگباری مقادیر مشاهداتی فرسایش خندقی اندازه‌گیری شد. در ادامه، با تهیه اطلاعات ورودی مورد نیاز، مدل EGEM برای محاسبه میزان فرسایش خندقی طی هر واقعه رگباری در هر خندق اجرا شد. نتایج اجرای مدل، حاکی از آن بود که این مدل توانایی لازم برای پیش‌بینی مقطع عرضی و حجم فرسایش خندقی موقت در حوضه مورد مطالعه را دارد. کارایی قابل قبول مدل در پیش‌بینی حجم فرسایش خندقی به‌وسیله پژوهشگرانی از جمله Nachtergaele و همکاران (۲۰۰۱)، Tekwa و همکاران (۲۰۱۵)، Li و همکاران (۲۰۱۸)، Elizondo Gudino و همکاران (۲۰۱۸b) و همچنین Rezaei Moghadam و Behboodi (۲۰۱۱) نیز قبلاً گزارش شده بود. EGEM و همکاران (۲۰۱۵) ضمن مطالعه کارایی مدل EGEM در برآورد میزان فرسایش خندقی موقت در شمال نیجریه تأکید کردند که این مدل توانایی برآورد دقیق و سریع سطح و حجم توده از دست رفته خندق‌های موقتی را دارد. Zarei و همکاران (۲۰۱۷) برآوردهای سالانه متوسط فرسایش خندقی با استفاده از مدل EGEM را غیر قابل قبول گزارش کرده بودند که شاید نتوان نتایج ایشان را با نتایج پژوهش حاضر مقایسه

همکاران (۲۰۰۷) و Elizondo Gudino و همکاران (۲۰۱۸b) نیز به حساسیت فرسایش خندقی موقت به تنش برشی بحرانی اشاره کرده بودند. دیگر نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل دارای حساسیت بسیار بالا و همچنین، همبستگی مثبت با پارامتر CN بوده است. محققان مختلفی در دنیا مانند، Li و همکاران (۲۰۱۶) و همچنین، Elizondo Gudino و همکاران (۲۰۱۸b) نیز به حساسیت بالای مدل EGEM اصلاح شده به CN اشاره کرده‌اند. این امر نشان می‌دهد که پارامتر CN از طریق تاثیر روی حجم و دبی اوج رواناب ورودی می‌تواند نقش به‌سزایی در میزان خاک فرسایش یافته داشته باشد. بنابراین، بایستی در محاسبه و تهیه نقشه CN حوزه‌های آبخیز بالادست خندق‌های موقتی نهایت دقت را به کار برد، چرا که اندکی خطا و تغییر در میزان CN، می‌تواند منجر به برآورد چند برابری میزان فرسایش به‌وسیله مدل شود. همچنین، حساسیت خروجی مدل به CN تاییدکننده این امر بوده که یکی از عوامل تاثیرگذار در فرسایش خندقی رواناب تولید شده در بالادست خندق است. بنابراین، به‌منظور کنترل فرسایش خندقی موقت بایستی توجه ویژه‌ای به وضعیت تولید رواناب حوزه آبخیز بالادست آن داشت.

در سال‌های اخیر، مدل EGEM به‌صورت یک نسخه بازبینی‌شده به مدل جامع‌تر AGNPS اضافه شده و تحقیقات اخیر دنیا، مطالعات روی مدل‌سازی خندق‌های موقتی را بیشتر با مدل AGNPS انجام داده‌اند. البته، چنانچه هدف محاسبه فرسایش خندقی موقت به‌صورت خاص بدون دخالت اشکال دیگر فرسایشی باشد، مدل EGEM قابل استفاده خواهد بود، چرا که مدل AGNPS یک مدل جامع و با پیچیدگی بالا بوده و اجرای آن نیازمند حجم وسیعی از داده‌ها است.

در یک نتیجه‌گیری نهایی از پژوهش حاضر، می‌توان بیان کرد که مدل EGEM برای برآورد میزان فرسایش خندقی موقت ناشی از وقایع منفرد بارندگی در حوزه آبخیز قوری‌چای مناسب بوده و می‌توان آن را برای مطالعه و برنامه‌ریزی روی فرسایش خندقی موقت در حوزه‌های مشابه استفاده کرد.

به‌عبارت دیگر، معیارهای ارزیابی کارایی پیش‌بینی حجم مدل، با مجموعه‌ای از داده‌های محاسباتی و مشاهداتی انجام شده که بخشی از آن‌ها سرشت واحدی دارند. همچنین، نتایج ارزیابی تناسب و برازش مدل به‌کمک شاخص‌های APC، ARS، AARS، AVIF، AFVIF، RSCR و SSR نشان داد که این مدل برازش مناسبی دارد و به‌خوبی توانسته است، پارامترهای مربوط به گسترش خندق‌های موقتی را پیش‌بینی کند. نتایج حاکی از آن بود که در برخی از خندق‌ها مقادیر R^2 معنی‌دار نبوده است. علت این امر می‌تواند به‌خاطر مساحت به نسبت بالای حوضه و تغییرپذیری بالای متغیرها و پارامترهای مدل در مناطق مختلف باشد که مدل به خوبی نتوانسته منعکس‌کننده این تغییرات باشد. بیشتر مطالعات مورد اشاره فوق در حوضه‌های با مساحت به‌مراتب کوچک‌تر و حتی روی یک شبکه خندقی متشکل از چند خندق انجام شده بود. یکی از دلایل دیگر این است که در این پژوهش به‌دلیل کمبود اطلاعات از آمار ایستگاه سینوپتیک پارس‌آباد استفاده شد که بارندگی ثبت شده در آن به‌دلیل عدم همبستگی مکانی و ارتفاعی با برخی خندق‌ها تطابق نداشته و منجر به پیش‌بینی همراه با خطا در میزان رواناب ورودی و به‌دنبال آن میزان فرسایش شده است.

یافته‌های حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای مدل EGEM حاکی از آن بود که مدل با تغییرات عامل فرسایش‌پذیری کانال و تنش برشی بحرانی همبستگی منفی دارد. Tekwa و Yahya (۲۰۱۴) نیز با تحلیل حساسیت مدل به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان عامل فرسایش‌پذیری و تنش برشی، میزان فرسایش خندقی برآورد شده کاهش پیدا کرده است. Elizondo Gudino و همکاران (۲۰۱۸a) به رابطه معکوس بین تنش برشی بحرانی با میزان آسیب‌پذیری فرسایش خندقی موقت اشاره کرده بودند. اما در مورد فرسایش‌پذیری خاک نتایج این پژوهشگران بر خلاف نتایج پژوهش حاضر بوده است. این عدم تطابق می‌تواند به‌خاطر تفاوت در نوع خاک و دیگر عوامل موثر مانند تیپ و شدت بارندگی، CN منطقه و ... است که در یک منطقه نقش پررنگ‌تری نسبت به منطقه دیگر دارند. همچنین، Gordon و

منابع مورد استفاده

1. Bernard, J., R.L. Bingner, S.M. Dabney, E.J. Langendoen, J. Lemunyon, W. Merkel, F. Theurer, R.R. Wells, N. Widman and G.V. Wilson. 2010. Ephemeral gully erosion: a natural resource concern. USDA-ARS National Sedimentation Laboratory Research Report. No. 69. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS.
2. Bingner, R.L., R.R. Wells, H.G. Momm, J.R. Rigby and F.D. Theurer. 2016. Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology. *Natural Hazards*, 80(3): 1949-1966.
3. Capra, A., L.M. Mazzara and B. Scoicolone. 2005. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy. *Catena*, 59: 133-146.
4. Foster, G.R. and L.D. Meyer. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. *American Society of Mechanical Engineers*, 1975: 190-207.
5. Franti, T.G., J.M. Laflen and D.A. Watson. 1985. Soil credibility and critical shear under concentrated flow. *ASAE Summer Paper*, 85: 20-33.
6. Gordon, L.M., S.J. Bennett, R.L. Bingner, F.D. Theurer and C.V. Alonso. 2007. Simulating ephemeral gully erosion in AnnAGNPS. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 857-866.
7. Gudino Elizondo, N., T.W. Biggs, C. Castillo, R.L. Bingner, E.J. Langendoen, K.T. Taniguchi, T. Kretzschmar, Y. Yuan and D. Liden. 2018a. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques. *Land Degradation and Development*, 29(6): 1896-1905.
8. Gudino-Elizondo, N., T. Biggs, R. Bingner, Y. Yuan, E. Langendoen, K. Taniguchi, T. Kretzschmar, E. Taguas and D. Liden. 2018b. Modelling ephemeral gully erosion from unpaved urban roads: equifinality and implications for scenario analysis. *Geosciences*, 8(4): 137-153.
9. Gutiérrez, Á.G., S. Schnabel and J.F.L. Contador. 2009. Using and comparing two nonparametric methods (CART and MARS) to model the potential distribution of gullies. *Ecological Modelling*, 220(24): 3630-3637.
10. Nachtergaele, J.J., L. Poeson, D. Vandekerckove, W. Oostwoud and M. Roxo. 2001. Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM) for two Mediterranean environments. *Earth Surface Processes and Land Forms*, 26: 17-30.
11. Poesen, J., G. Nachtergaele, C. Verstraten and C. Valentine. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4): 91-133.
12. Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703). Washington, D.C., United States Department of Agriculture, 49 pages.
13. Rezaei Moghadam, M.H. and A. Behboodi. 2011. Application of EGEM model for ephemeral gully erosion estimation in Sarandchay Watershed. *Journal of Geographic Space*, 11(35): 135-154 (in Persian).
14. Samani, A.N., R.J. Wasson, M.R. Rahdari and A. Moeini. 2016. Quantifying eroding head cut detachment through flume experiments and hydraulic thresholds analysis. *Environmental Earth Sciences*, 75(21): 1424-1443.
15. Tekwa, I.J. and A.S. Yahya. 2014. Sensitivity analysis of some EGEM inputs in predicting ephemeral gully erosion in Mubi, semi-arid Northeast Nigeria. *Asian American Environment and Agriculture Research Journal*, 1(1): 1-12.
16. Tekwa, I.J., A.M. Kundiri and A.M. Chiroma. 2016. Efficiency test of modeled empirical equations in predicting soil loss from ephemeral gully erosion around Mubi, Northeast Nigeria. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(1): 12-19.
17. Tekwa, I.J., J.M. Laflen and A.M. Kundiri. 2015. Efficiency test of adapted EGEM model in predicting ephemeral gully erosion around Mubi, Northeast Nigeria. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1): 15-27.
18. USDA-ARS, 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. United States, Science and Education Administration, Agricultural Research Service, Science and Education Administration, 672 pages.
19. USDA. 1992. Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM). Ver. 2.0, DOS User Manual, Soil Conservation Service, Washington, D.C., pp. 101.
20. Watson, D., J. Laflen and T. Franti. 1985. Ephemeral gully erosion estimator. 70th SWCS International Annual Conference, July 26-29, Greensboro.
21. Wilson, G. 2011. Understanding soil-pipe flow and its role in ephemeral gully erosion. *Hydrological Processes*, 25: 2354-2364.
22. Wolf, B. 2003. Diagnostic techniques for improving crop production. Haworth Press, USA, 452 pages.

23. Woodward, D.E. 1999. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Catena*, 37: 393–399.
24. Zarei, H., A. Najafinejad, M. Hosseinalizadeh and K. Alipour. 2017. Efficiency assessment of the EGEM to estimate gully erosion in Iky-Aghzly Watershed of Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5): 147-162 (in Persian).