



دانشگاه گسترش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره سوم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

تعیین آستانه توپوگرافی و تأثیر ویژگی‌های خاکی بر گسترش آبکندها در سه منطقه از استان اردبیل

حسین شهاب آرخازلو^۱، *حجت امامی^۲، غلامحسین حق‌نیا^۲، اباذر اسمعیلی^۳ و مجید محمودآبادی^۴

^۱دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، آدانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد،

^۲آدانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی، ^۳آدانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۵

چکیده

سابقه و هدف: فرسایش آبکندی یکی از مهم‌ترین انواع فرسایش از نظر تولید رسوب و تخریب اراضی در سراسر جهان می‌باشد که در نقاط مختلف ایران نیز رخ می‌دهد. ویژگی‌های توپوگرافی حوزه زه‌کشی آبکندها و ویژگی‌های خاک از جمله عامل‌های مؤثر بر گسترش آبکندها می‌باشند. در پژوهش‌های مختلف تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر تشکیل آبکندها نیز گزارش شده است. هدف این پژوهش تعیین نوع فرایند هیدرولوژیکی تشکیل آبکند با استفاده از شاخص توپوگرافی، بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی بر گسترش آبکند در طی دو سال و انتخاب مهم‌ترین آن‌ها بود.

مواد و روش‌ها: برای تعیین فرآیند غالب هیدرولوژیکی در ایجاد این نوع فرسایش، آستانه توپوگرافی تشکیل آبکند به صورت رابطه $S = aA^b$ برای آبکندهای سه حوزه آرتاداغ، ملااحمد و سرچم استان اردبیل تعیین شد، که S شیب و A مساحت حوزه زه‌کشی آبکندهاست و a و b ضرائب محیطی هستند. همچنین به منظور تعیین اثر ویژگی‌های خاک بر گسترش آبکندها، در هر حوزه مجموعه‌ای مشابه از آبکندها گزینش و تغییر حجم و سطح مقطع آبکند در چهار نقطه از طول آن، به عنوان شاخص گسترش آبکند در دو سال اندازه‌گیری شد. با تعیین ۱۹ ویژگی در خاک سطحی و زیر سطحی آبکندها و نیز خاک حوزه زه‌کشی آن‌ها، تأثیر این ویژگی‌ها بر گسترش آبکندها بررسی گردید. در انتها با استفاده از رگرسیون گام به گام، مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی گسترش آبکند تعیین و مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آن در هر حوزه معرفی شدند. دقت مدل‌های رگرسیونی با استفاده از دو آماره ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در حوزه سرچم توان b آستانه توپوگرافی مثبت است و فرآیند تونلی شدن عامل اصلی ایجاد آبکند است، در حالی که در دو حوزه دیگر مقدار آن منفی بوده و رواناب آبکندها را شکل داده است. نتایج آنالیز همبستگی میان ویژگی‌های خاک و گسترش آبکندها نشان داد که در حوزه سرچم گسترش آبکند با فرسایش‌پذیری و وجود ترکیب‌های قابل انحلال در خاک زیر سطحی ارتباط بیش‌تری دارد، در حالی که در دو حوزه دیگر فرسایش‌پذیری خاک سطحی و زیر سطحی به یک اندازه در گسترش آبکند مهم است. نتایج مدل‌های رگرسیونی نشان داد، به‌طور کلی مدل‌هایی که در آن‌ها از مجموع ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی آبکند به عنوان متغیر مستقل برای پیش‌بینی تغییر سطح مقطع آبکند استفاده می‌شود، دقیق‌تر می‌باشند. در مدل رگرسیونی پیش‌بینی تغییر حجم آبکند از مجموعه

* مسئول مکاتبه: hemami@um.ac.ir

ویژگی‌های حوزه زه‌کشی به‌عنوان متغیر مستقل استفاده شد. این مدل در دو حوزه آرتاداغ و سرچم دقت قابل‌قبولی داشت ولی در ملاحمد از دقت کم‌تری برخوردار بود. نتایج رگرسیون نشان داد در حوزه آرتاداغ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، مقدار شن خیلی ریز و رس خاک سطحی، مقدار گچ، آهک و رس قابل پراکنش خاک زیرسطحی و درصد پوشش گیاهی و شاخص نسبت کاتیونی پایداری ساختمان خاک حوزه زه‌کشی آبکندها، در ملاحمد درصد کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی و درصد رس قابل پراکنش در آب و نسبت جذب سدیم خاک زیرسطحی و درصد شیب متوسط حوزه زه‌کشی آبکندها و در سرچم، جرم مخصوص ظاهری و درصد رس قابل پراکنش خاک سطحی، مقدار سیلت، شن و جرم مخصوص ظاهری خاک زیرسطحی و شماره منحنی (CN) و ضریب گردی میلر حوزه زه‌کشی آبکندها بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش آبکندها داشته‌اند.

نتیجه‌گیری: شاخص توپوگرافی کارایی لازم را جهت تعیین نوع فرایند هیدرولوژیکی تشکیل آبکند دارد. در منطقه سرچم گسترش آبکند با ویژگی‌های مربوط به انحلال‌پذیری خاک زیر سطحی ارتباط داشت ولی در دو منطقه دیگر فرسایش‌پذیری خاک سطحی و زیرسطحی بر گسترش آبکندها مؤثر بودند. بین ویژگی‌های حوزه آبخیز آبکندها نیز ویژگی‌هایی که بر تولید رواناب موثرند، بیش‌ترین نقش را در گسترش آبکند داشتند.

واژه‌های کلیدی: بالاکند، رگرسیون گام به گام، فرسایش تونلی، هدررفت خاک

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب اراضی در سراسر جهان بوده و تهدید اصلی برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود (۱۱). در میان انواع فرسایش آبی، فرسایش آبکندی یکی از مهم‌ترین عوامل تلفات خاک و آب، تغییر زمین‌نما و از بین رفتن زمین‌ها بوده و حجم زیادی از رسوب را تولید می‌نماید (۱۷). انواع مختلفی از فرسایش آبکندی را می‌توان در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف زمین مشاهده کرد (۵). در مناطق مختلف ایران نیز وجود فرسایش آبکندی گزارش شده است (۱، ۲۲). در استان اردبیل فرسایش آبکندی در مناطق مختلف به‌طور پراکنده مشاهده می‌شود، اما این نوع فرسایش به‌طور مشخص و متراکم در چهار منطقه وجود دارد که شامل مناطق قوری‌چای و آرتاداغ در شمال استان، منطقه ملاحمد در مرکز استان و منطقه سرچم در جنوب استان می‌باشد.

تشکیل آبکند زیر تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد و برای تشکیل و گسترش آن بایستی این عوامل از یک سطح آستانه فراتر روند (۲۰). در ساده‌ترین تعریف، آستانه نقطه‌ای است که پس از آن رفتار سیستم تغییر می‌کند (۱، ۱۹). در این بین یکی از عوامل مهمی که بر تشکیل و گسترش آبکند اثر می‌گذارد ویژگی‌های توپوگرافی می‌باشد. برای تعیین تأثیر توپوگرافی نیز آستانه توپوگرافی مورد بررسی قرار می‌گیرد (۲۵). هم‌چنین ویژگی‌های خاک نیز یکی از عوامل تأثیرگذار بر توسعه آبکندها می‌باشد که بسته به نوع منطقه خصوصیات مختلف آن از قبیل میزان ترکیبات محلول، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌تواند دارای اهمیت باشد (۳۰).

به‌منظور تعیین آستانه توپوگرافی تشکیل و گسترش آبکندها، مساحت و شیب حوزه زه‌کشی آبکند مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این ترتیب حدی از مساحت و شیب بالادست پیشانی آبکند که در مقادیر بیش‌تر از آن فرسایش روی می‌دهد به‌عنوان

تونلی در اثر انحلال ترکیبات محلول موجود در توده خاک و وجود لایه نفوذناپذیر در عمق کم آن ارتباط دارد (۱۰، ۲۰). کاهش ماده آلی خاک نیز پایداری ساختمانی خاک را کاهش می‌دهد و شرایط را برای تشکیل سله، تولید رواناب و فرسایش آبکندی مناسب می‌کند (۲۶، ۲۹).

هم‌چنین تأثیر ویژگی‌های SAR، ESP، EC، میزان نمک‌های محلول، رطوبت اشباع خاک، درصد ذرات شن، سیلت و رس و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک مانند میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و شاخص پایداری خاکدانه (AS)^۲ بر گسترش فرسایش آبکندی، در پژوهش‌های مختلف نشان داده شده است (۳، ۶، ۸، ۱۱). صوفی و عیسائی (۲۰۱۰) بین درصد رس، نسبت جذب سدیم، غلظت کلسیم و میزان هدایت الکتریکی خاک با حجم آبکنده‌های استان گلستان همبستگی منفی گزارش نمودند (۲۳). مرتضایی و همکاران (۲۰۰۸) نیز علاوه بر توپوگرافی، تأثیر ویژگی‌های خاک را بر گسترش آبکنده‌های شمال غرب زنجان بررسی و دریافتند که افزایش غلظت سدیم و کاهش کربن آلی باعث گسترش آبکنده‌ها می‌شود (۱۷). با وجود تأثیر مهم عوامل خاکی در گسترش آبکند، اطلاعات کافی در مورد تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر شدت گسترش آبکنده‌ها وجود ندارد و در اغلب مطالعات این عامل به صورت عمومی بررسی شده است (۲۰). بنابراین به دست آوردن تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر شدت گسترش آبکنده‌های نقاط مختلف در کنار سایر عوامل مؤثر بر تشکیل گسترش آبکند، در شناسایی اراضی مستعد تخریب در اثر گسترش آبکند دارای اهمیت است.

آستانه توپوگرافی تعریف می‌شود (۴، ۵، ۲۰). در واقع آستانه توپوگرافی رابطه‌ای بین شیب و مساحت حوزه زه‌کشی آبکنده‌های یک منطقه است، که نشان می‌دهد در یک شیب مشخص چه سطحی باید وجود داشته باشد تا آبکند تشکیل شود. برای تعیین آستانه توپوگرافی رابطه $S = aA^b$ ارائه شده است که در آن S شیب و A مساحت حوزه زه‌کشی آبکنده‌ها است و a و b ضرائب محیطی هستند (۲۷). آستانه توپوگرافی به صورت $SA^b > t$ نیز بیان شده است که در این رابطه t عدد آستانه توپوگرافی بوده و مقادیر منفی توان b بیانگر غالب بودن جریان سطحی در ایجاد آبکند می‌باشد در حالی که مثبت بودن آن نشان‌دهنده غالب بودن جریان زیرسطحی در تشکیل آبکند می‌باشد (۱۶، ۳۰). از آنجایی که تعیین آستانه‌های هیدرولیکی بسیار سخت است، در این روابط سطح زه‌کشی جایگزین حجم رواناب تولیدی در حوزه یک آبکند و شیب حوزه جایگزین سرعت رواناب ایجاد شده در نظر گرفته می‌شود (۱، ۶، ۳۰). هنگامی که شیب در مقابل مساحت آبکنده‌ها در یک دستگاه مختصات لگاریتمی رسم شود، بهترین خط برازش‌یافته به این نقاط، بیانگر آستانه متوسط تشکیل آبکند در منطقه می‌باشد که نشان می‌دهد به‌طور متوسط در هر شیبی، آستانه تشکیل آبکند در چه مساحتی از حوزه زه‌کشی رخ می‌دهد (۳، ۳۰). وجود رابطه معکوس شیب با مساحت حوزه زه‌کشی آبکند نشانگر تأثیر رواناب سطحی در ایجاد آبکند و وجود رابطه مثبت بین این دو نشانگر تأثیر رواناب زیر سطحی در ایجاد آبکند است (۲۷). بنابراین از این رابطه می‌توان برای تشخیص نوع فرایند هیدرولوژیکی غالب در تشکیل آبکنده‌های یک منطقه استفاده کرد.

یکی دیگر از عواملی که بر گسترش آبکند تأثیر می‌گذارد ویژگی‌های خاک می‌باشد. توسعه بسیاری از آبکنده‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک با فرسایش

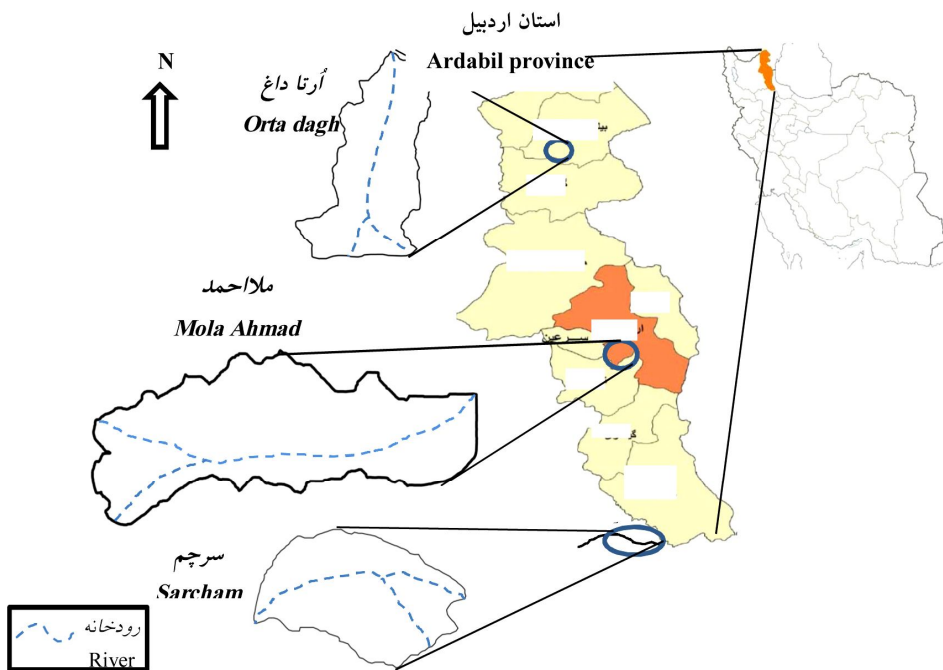
- 1- Sodium adsorption ratio
- 2- Exchangable sodium percentage
- 3- Electric conductivity
- 4- Aggregate stability

مناطق با فرسایش آبکندی فعال، مانند مناطق مورد بررسی در این پژوهش، مقدار زیادی خاک از بین رفته و حجم زیادی از رسوب تولید می‌گردد (۲۰)، برای مدیریت مطلوب این نوع مناطق تعیین شاخص توپوگرافی و انتخاب مهم‌ترین عوامل خاکی مؤثر بر گسترش آبکندها ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش: در این پژوهش سه حوزه آبخیز در سه منطقه از استان اردبیل که دارای فرسایش آبکندی فعال می‌باشند انتخاب شدند. مناطق بررسی شده شامل اُرتاداغ در شمال استان اردبیل با میانگین دمای سالانه ۱۵/۱ درجه سانتی‌گراد و بارندگی متوسط سالانه ۲۷۱/۲ میلی‌متر، منطقه ملااحمد در مرکز استان اردبیل با میانگین دمای سالانه ۹ درجه سانتی‌گراد و بارندگی متوسط سالانه ۳۰۳/۹ میلی‌متر و منطقه سرچم در جنوب استان اردبیل با میانگین دمای سالانه ۸ درجه سانتی‌گراد و بارندگی متوسط سالانه ۳۸۴/۶ میلی‌متر می‌باشند. از نظر طبقه‌بندی اقلیمی به روش آمبرژه هر سه منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشند. در منطقه اُرتاداغ حوزه آبخیزی به وسعت ۲۷۲۷ هکتار در محدوده جغرافیایی "۴۲' ۱۸" ۳۹° تا "۰۶' ۱۴" ۳۹° شمالی و "۴۷' ۵۲" ۴۷° تا "۴۱' ۵۶" ۴۷° شرقی، در منطقه ملااحمد حوزه آبخیزی به وسعت ۵۰۳۸ هکتار در محدوده جغرافیایی "۵۷' ۰۴" ۳۸° تا "۳۷' ۰۷" ۳۸° شمالی و "۱۴' ۱۲" ۴۸° تا "۵۲' ۲۱" ۴۸° شرقی و در منطقه سرچم حوزه آبخیزی به وسعت ۱۱۰۸ هکتار در محدوده جغرافیایی "۱۱' ۰۸" ۳۷° تا "۱۰' ۱۰" ۳۷° شمالی و "۰۶' ۵۹" ۴۷° تا "۵۴' ۵۵" ۴۷° شرقی مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجه به مشاهدات صحرایی (شکل ۳) و با مقایسه تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سال ۲۰۱۳ (۱۳۹۲ شمسی) با عکس‌های هوایی ۱۹۷۰ (۱۳۴۹ شمسی) مشاهده شد که سه منطقه اُرتاداغ در شمال، ملااحمد در مرکز و سرچم در جنوب استان اردبیل از جمله مناطقی هستند که در چند دهه گذشته فرسایش آبکندی در آن روی داده و موجب هدررفت خاک و تخریب گسترده اراضی شده است. مشابه این وضعیت در اثر تغییر کاربری اراضی به‌ویژه کشت دامنه‌ها و تخریب پوشش گیاهی در نقاط مختلف کشور گزارش شده است (۱، ۱۳، ۲۲، ۳۰). مقیمی و سلامی (۲۰۱۱) وجود فرسایش آبکندی در شمال استان اردبیل و افزایش گسترش آن با افزایش شیب و ارتفاع را گزارش کردند (۱۵). بیاتی (۲۰۰۶) شاخص توپوگرافی تشکیل آبکندها را در منطقه شرق استان اردبیل بین مشکین‌شهر و اهر تعیین کرد و با استفاده از رگرسیون خطی، طول دامنه و اختلاف ارتفاع بالاکندها و خط‌الراس را عوامل مهم در توسعه آبکندها ذکر کرد (۲). با توجه به کمبود اطلاعات در مورد فرآیند تشکیل، شدت گسترش و تأثیر عوامل خاکی بر گسترش آبکندهای استان اردبیل، در این پژوهش شاخص توپوگرافی برای سه منطقه ذکر شده در استان اردبیل که دارای فرسایش آبکندی فعال بودند، بررسی شد. هدف از تعیین شاخص توپوگرافی، بررسی کارایی آن در تشخیص امکان تشکیل آبکندها در مناطق مورد بررسی و همچنین تعیین فرآیند غالب هیدرولوژیکی ایجاد آبکندها در این سه منطقه بود. هم‌چنین تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر گسترش آبکندها در طول دو سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ بررسی و مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر گسترش آن‌ها تعیین شد. از آنجایی‌که در



شکل ۱- موقعیت آبخیزهای مطالعه شده در سطح کشور و استان اردبیل.

Figure 1. Location of study watersheds in Iran and Ardabil province.

می‌باشد در مراحل اولیه تشکیل بوده و بارش‌های دوره دوساله مورد بررسی می‌توانست ابعاد هندسی آن‌ها را نسبت به مقدار اولیه به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد و اندازه‌گیری این تغییرات نیز با دقت کافی قابل انجام بود، در حالی‌که آبکندهای بزرگ‌تر نسبتاً تثبیت یافته بوده و احتمال این‌که بارش دوره دوساله بر تغییر ابعاد آن مؤثر باشد کم‌تر بود. بنابراین در شناسایی صحرائی آبکندهایی انتخاب شدند که عمق بالاکنند آن‌ها کم‌تر از یک متر بود. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (تصاویر سال ۲۰۱۳)، آبکندهای انتخاب شده در شناسایی صحرائی روی تصاویر ماهواره‌ای مشخص شدند. با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سال ۱۳۷۳، در ArcGIS 10.2 مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۵ متر و نقشه شیب برای محدوده‌های مورد بررسی تهیه شد. درصد پوشش گیاهی، سنگریزه و خاک لیخت در حوزه زه‌کشی هر آبکنند، با قرار دادن تصادفی ۱۰ پلات یک مترمربعی

با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استان اردبیل، مناطق مورد نظر از نظر سنگ‌شناسی متشکل از توف‌های مارنی، سیلتی و شنی، کنگلومرای، رسوبات آبرفتی، لایم استون، توف‌ها و لاواهای اندزیتی و مارن‌های گچی هستند. در شکل ۱ موقعیت مناطق مورد بررسی در استان اردبیل و ایران نشان داده شده است.

روش انجام پژوهش: ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (۲۰۱۳) در سه منطقه مورد نظر، مرز محدوده دارای فرسایش آبکندی تعیین شد. سپس با بازدیدهای صحرائی تعداد ۲۸ آبکنند در منطقه اُرتاداغ، ۳۳ آبکنند در منطقه ملااحمد و ۲۰ آبکنند در منطقه سرچم که دارای بالاکنند فعال بودند و عمق آن‌ها در قسمت بالاکنند کم‌تر از ۱ متر بود انتخاب شده و مختصات جغرافیایی هر یک با استفاده از GPS ثبت شد. آبکندهایی که اندازه آن‌ها کوچک

مشخصات حوزه زه‌کشی شامل مساحت، شیب متوسط، ضریب گردی میلر، درصد پوشش گیاهی سطحی و شماره منحنی (CN) حوزه، بیش‌ترین شباهت را داشتند با استفاده از تجزیه خوشه‌ای در نرم‌افزار SPSS19، انتخاب شدند. نتایج تجزیه خوشه‌ای نشان داد که ۸ آبکند در منطقه اُرتاداغ، ۱۲ آبکند در منطقه ملااحمد و ۱۰ آبکند در منطقه سرچم (مجموعاً ۳۰ آبکند) از نظر مجموع مشخصات حوزه زه‌کشی بیش‌ترین تشابه را داشتند. از آن‌جایی‌که درون هر منطقه میزان و شدت بارش‌ها مشابه می‌باشد و آبکندهای منتخب هر منطقه نیز از نظر تولید رواناب در حوزه زه‌کشی دارای شرایط مشابه می‌باشند، فرض گردید که در هر بارش حجم رواناب وارد شده به آبکندهای منتخب هر منطقه مشابه است، بنابراین تأثیر ویژگی‌های خاک بر شدت گسترش این آبکندها بررسی شد. پس از شناسایی این آبکندها، طول آبکند با متر نواری اندازه‌گیری و در چهار نقطه از طول هر آبکند شامل سر آبکند و فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد طول از سر آبکند میخ‌های چوبی به‌عنوان شاخص نصب و مشخصات هندسی آبکندهای منتخب شامل عمق، عرض دهانه، عرض در ۵۰ درصد عمق و عرض کف در این نقاط تعیین شد. سپس در طی دو سال ۹۳-۱۳۹۲ تغییرات ابعاد هندسی این آبکندها شامل پیشروی سر آبکند و تغییر عمق، عرض دهانه، عرض در ۵۰ درصد عمق و عرض کف با توجه به شاخص‌های نصب شده در محل، در فواصل سه‌ماهه اندازه‌گیری شد. پس از ۸ دوره اندازه‌گیری مستمر ۳ ماهه تغییر قابل‌توجه در ابعاد آبکندها مشاهده شد، به همین دلیل دوره دو ساله به‌عنوان طول مدت بررسی انتخاب گردید. لازم به ذکر است که در مدت زمان کوتاه‌تر با توجه به ابزارهای اندازه‌گیری مورد استفاده، ممکن بود تغییرات ابعاد ناچیز بوده و دقت کار کاهش می‌یافت. در مدت زمان‌های طولانی‌تر از

در امتداد یک ترانسکت اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به روش تک‌استوانه، سرعت نهایی نفوذ آب در خاک حوزه آبکندها و گروه هیدرولوژیک خاک تعیین شد (۲۱). با استفاده از درصد پوشش سطح و گروه هیدرولوژیک خاک حوزه آبریز آبکندها، شماره منحنی (CN)^۱ حوزه هر آبکند که بیانگر شدت تولید رواناب در حوزه است، تعیین شد (۲۴). به‌منظور تعیین آستانه توپوگرافی مناطق، به کمک DEM مناطق با استفاده از نرم‌افزار Global mapper 14 حوزه زه‌کشی هر آبکند تعیین و مساحت، محیط و ضریب گردی میلر آن‌ها تعیین شد. پس از تعیین حوزه زه‌کشی آبکندها، با استفاده از نقشه شیب و در محیط ArcGIS10.2 شیب متوسط حوزه هر آبکند تعیین شد. با به‌دست آمدن شیب و مساحت حوزه آبکندهای هر منطقه، آستانه توپوگرافی هر منطقه محاسبه شد. به‌منظور تعیین آستانه توپوگرافی بر اساس رابطه $S = aA^b$ ، مساحت (A) و شیب (S) حوزه آبخیز آبکندهای هر منطقه به‌صورت لگاریتمی رسم و رابطه خطی بین آن‌ها برآش داده شد، سپس رابطه رگرسیون توانی بین آن‌ها برقرار و ضرائب a و b و سطح معنی‌داری رگرسیون هر منطقه با استفاده از نرم‌افزار SPSS 19 به‌دست آمد. با به‌دست آمدن ضرائب a و b هر منطقه رابطه آستانه توپوگرافی هر منطقه به‌دست آمد و از این طریق نوع فرآیند هیدروژیک غالب در تشکیل آبکندهای هر منطقه مشخص گردید. در صورتی‌که توان b منفی باشد رابطه بین مساحت و شیب معکوس بوده و جریان رواناب سطحی عامل اصلی تشکیل آبکندها می‌باشد و اگر این توان مثبت باشد جریان اشباع زیرزمینی و تونلی شدن عامل اصلی تشکیل آبکندها می‌باشد.

به‌منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر شدت فرسایش آبکندی، در هر منطقه آبکندهایی که از نظر

1- Curve Number

در طول هر آبکند منتخب برداشت شد. به منظور تعیین ویژگی‌های خاک حوزه بالادست آبکندها نیز سه نمونه مرکب از خاک سطحی حوزه زه‌کشی هر آبکند برداشت شد. سپس برخی ویژگی‌های خاک که می‌تواند بر گسترش آبکندها مؤثر باشد، با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های خاک تعیین شده شامل درصد ذرات شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری و قرائت چهار زمانه، درصد رس قابل پراکنش در آب به روش پیپت، درصد شن درشت ($0/1$ تا 2 میلی‌متر) و شن خیلی ریز (کوچک‌تر از $0/1$ میلی‌متر) به روش الک تر نمونه خاک پراکنش یافته و درصد مجموع سیلت و شن خیلی ریز (۹)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (۱۹۳۴)، درصد کربنات کلسیم معادل، pH و EC در نسبت ۲:۱، جرم مخصوص ظاهری خشک به روش نمونه‌برداری با سیلندر، درصد گچ، غلظت سدیم، پتاسیم و مجموع کلسیم و منیزیم (۱۸)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD)^۱ به روش الک تر (۱۲)، نسبت جذب سدیم (SAR) و شاخص نسبت کاتیونی پایداری ساختمان خاک (CROSS)^۲ (۷، ۱۴) بودند.

به منظور بررسی تأثیر خاک بر گسترش آبکندها، پس از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی آنالیز همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک آبکندها و تغییر سطح مقطع آن‌ها در طول ۲ سال مورد بررسی (۹۳-۱۳۹۲)، انجام شد. همچنین همبستگی بین مشخصات حوزه زه‌کشی آبکندها (شامل مساحت، شیب متوسط، درصد پوشش گیاهی، ضریب گردی میلر و شماره منحنی) و ویژگی‌های خاک سطحی آن‌ها با تغییر حجم آبکندها نیز انجام شد. به این ترتیب ویژگی‌هایی که همبستگی معنی‌داری با گسترش سطح مقطع و حجم آبکندها داشتند تعیین شدند. از رگرسیون گام به گام برای تعیین مهم‌ترین

دو سال نیز با توجه به این‌که آبکندهای انتخاب شده دارای ابعاد کوچک بوده و از نظر توسعه فعال بودند ممکن بود حالت چندشاخه شدن در طول آبکند اتفاق بیافتد و عملاً یک آبکند به چند آبکند تبدیل و به تبع آن حوزه زه‌کشی آن نیز تقسیم می‌شد که در این صورت فرض یکنواخت بودن حوزه آبکندها از بین می‌رفت. بنابراین پس از دو سال از شروع اندازه‌گیری‌ها که گسترش آبکندها مشهود بود و شاخه‌شاخه شدن برخی آبکندها در حال شروع شدن بود (شکل ۳)، گسترش آبکندها محاسبه شد. برای این منظور در ابتدا و انتهای دوره بررسی دوساله (فروردین ۱۳۹۲ و فروردین ۱۳۹۴) مساحت سطح مقطع آبکندها در چهار نقطه ذکر شده در طول هر آبکند تعیین شد. برای این منظور در هر مقطع، با قرار دادن یک شاخص کاملاً عمودی از کف تا دهانه آبکند (به کمک تراز حبایی)، در فواصل ده سانتی‌متری عمق، عرض آبکند تعیین گردید. به این ترتیب مساحت سطح مقطع با دقت یک دسی‌مترمربع (10×10 سانتی‌متر) در دو مقطع زمانی به فاصله دو سال محاسبه شد. حجم آبکندهای منتخب نیز از مجموع حجم‌های جزیی آبکندها در دو مقطع زمانی مورد نظر محاسبه شد. حجم جزیی از ضرب میانگین سطح دو مقطع مجاور اندازه‌گیری شده به فاصله بین آن‌ها تعیین شد (۶، ۲۲). با تفاضل سطح مقاطع و حجم آبکندها در انتهای دوره دو ساله از مقدار آن در ابتدای دوره، افزایش سطح مقاطع و حجم آبکندها به دست آمد. در این پژوهش از دو عامل تغییر سطح مقطع آبکندها در ۴ نقطه از طول آبکند و تغییر حجم کل آبکند، در طی دو سال به‌عنوان شاخص گسترش آبکند استفاده شد.

نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده از دو عمق شامل خاک سطحی ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و خاک زیرسطحی ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر از چهار نقطه گفته شده

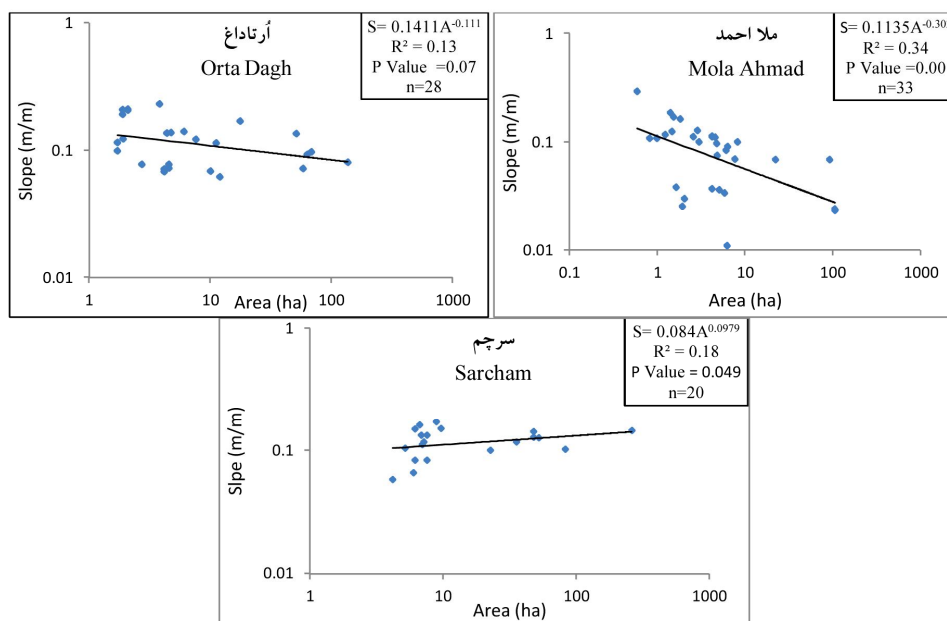
1- Mean weight diameter

2- Cation ratio of soil structural stability

نتایج و بحث

با برقراری رابطه رگرسیونی توانی بین سطح حوزه زه‌کشی کل آبکندهای بررسی شده و شیب متوسط آن‌ها در هر منطقه، آستانه توپوگرافی به صورت $S = aA^b$ به دست آمد (شکل ۲). اغلب هر دو جریان سطحی و زیرسطحی در تشکیل آبکند نقش دارند و هر گاه در این رابطه مقدار توان b منفی باشد بیانگر تأثیر بیش‌تر جریان سطحی نسبت به جریان زیرسطحی است، در حالی که مقدار مثبت آن نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر جریان زیرسطحی نسبت به جریان سطحی است (۱، ۲۲).

ویژگی‌های خاک آبکندها و سهم نسبی هر یک از آن‌ها بر تخمین گسترش سطح مقطع آبکندها استفاده شد و مدل رگرسیونی تغییرات آبکندها ارائه شد. همچنین رگرسیون گام به گام برای تخمین تغییر حجم آبکندها به‌عنوان متغیر وابسته و مجموعه مشخصات حوزه زه‌کشی آبکندها و ویژگی‌های خاک سطحی حوزه‌ها که دارای همبستگی معنی‌داری با گسترش حجم آبکندها بودند به‌عنوان متغیر مستقل، مورد استفاده قرار گرفت. این کار به منظور تعیین سهم هر ویژگی و انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کل فرسایش آبکندی هر کدام از مناطق صورت گرفت. آنالیزهای آماری فوق نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS19 صورت گرفت.



شکل ۲- آستانه توپوگرافی برای سه منطقه مورد مطالعه.

Figure 2. Topography threshold for three study region.

تأثیر بیش‌تر جریان سطحی رواناب نسبت به جریان‌های زیرسطحی در تشکیل آبکندهای این دو منطقه است. ضریب تعیین (R^2) این رابطه در منطقه ملاح احمد ۰/۳۴ و در سطح یک درصد معنی‌دار بود ($p \text{ Value} = 0.00$)، در حالی که در حوزه آرتاداغ

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در منطقه آرتاداغ و ملاح احمد توان b آستانه توپوگرافی منفی و به ترتیب ۰/۱۱- و ۰/۳۰- است، که این امر نشان‌دهنده رابطه معکوس بین مساحت حوزه زه‌کشی آبکندها و شیب آن است (شکل ۲). این روابط بیانگر

امر با مشاهدات صحرایی منطقه نیز مطابقت دارد (شکل ۳). سلیمانپور و همکاران (۲۰۱۰) نیز رابطه مثبت با ضریب تعیین ۰/۱۹ بین شیب و مساحت حوزه زه‌کشی آبکندهای منطقه کنار تخته استان فارس را گزارش نمودند و جریان زیرسطحی را عامل تشکیل آبکندها عنوان کردند (۲۲). همچنین رابطه مثبت با ضریب تعیین ۰/۱۱ تا ۰/۱۸ در چند حوزه آبخیز استان مرکزی نیز گزارش شده است که جریان زیر سطحی را به‌عنوان عامل هیدرولوژیکی تشکیل آبکند معرفی کرده‌اند (۱). بیاتی (۲۰۰۶) نیز توان مثبت شاخص توپوگرافی تشکیل آبکندها را در شرق استان اردبیل و محدوده بین مشکین‌شهر و اهر گزارش کرده است (۲). این نتایج نشان می‌دهد با توجه به شرایط محیطی متفاوت از جمله ویژگی‌های خاک، هر دو فرایند هیدرولیکی جریان سطحی و زیرسطحی در تشکیل آبکندهای استان اردبیل نقش داشته است.

ضریب تعیین ۰/۱۳ و معنی‌دار نبود ($p \text{ Value}=0.07$)، بنابراین در حوزه ملاحمد جریان سطحی نقش اصلی را در تشکیل آبکندها داشته و جریان زیرسطحی اهمیت چندانی ندارد، اما در مورد اُرتاداغ هر چند با توجه به مقدار منفی توان b ، جریان سطحی نقش بیش‌تری در تشکیل آبکندها داشته است، اما با توجه به معنی‌دار نبودن این رابطه می‌توان گفت عواملی مانند جریانات زیر سطحی یا تونلی شدن نیز در کنار جریان سطحی رواناب تأثیر مهمی بر تشکیل آبکندها داشته است. وجود رابطه منفی بین سطح و شیب حوزه آبکندها با ضریب تعیین ۰/۰۲ و ۰/۲۵ نیز گزارش شده است که به‌ترتیب بیانگر تأثیر کم و زیاد رواناب سطحی بر تشکیل آبکند بوده است (۱، ۳). برخلاف دو منطقه فوق، در سرچم توان b مثبت و ضریب تعیین رابطه ۰/۱۸ به‌دست آمد، که در سطح پنج درصد معنی‌دار بود ($p \text{ Value}=0.049$). بنابراین عامل اصلی تشکیل آبکندها فرآیندهایی مانند تونلی شدن و انحلال لایه‌های زیرین خاک می‌باشد، که این



شکل ۳- نمونه‌ای از آبکندهای مناطق مورد مطالعه از راست به چپ: اُرتاداغ، ملاحمد، سرچم.

Figure 3. A gully sample presented in each region, right to left: Orta Dagh, Molla Ahmad, Sarcham.

به‌طورکلی بیش‌ترین درصد پوشش گیاهی، کم‌ترین CN و کم‌ترین ضریب گردی مربوط به حوزه ملاحمد است. از آنجایی‌که با افزایش درصد پوشش گیاهی و کاهش CN، نسبت تولید رواناب از کل بارش کاهش می‌یابد و با کاهش ضریب گردی میلر حوزه کشیده‌تر می‌شود و زمان تمرکز رواناب افزایش

در جدول ۱ میانگین و دامنه تغییرات مشخصات حوزه زه‌کشی و ابعاد هندسی آبکندهای مشابه منتخب در هر منطقه ارائه شده است. مشاهده می‌شود ابعاد آبکندهای منطقه سرچم کوچک‌تر از دو منطقه دیگر است در حالی‌که تغییرات سطح مقطع و حجم آبکندها در سه منطقه تقریباً نزدیک به هم است.

کربن آلی و مجموع سیلت و شن خیلی ریز در حوزه ملاحمد بیش‌تر و جرم مخصوص ظاهری آن کم‌تر از دو منطقه دیگر است. در منطقه اُرتاداغ MWD و گچ بیش‌تر از دو منطقه دیگر و در سرچم نیز EC، کاتیون‌های محلول، SAR و CROSS بیش‌تر از دو منطقه دیگر است.

می‌یابد (۲۴)، بنابراین در منطقه ملاحمد نسبت به دو منطقه دیگر رواناب کم‌تری تولید می‌شود. در جدول ۲ میانگین و دامنه تغییرات ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی آبکندها و نمونه خاک‌های حوزه زه‌کشی آن‌ها برای سه منطقه ارائه شده است. به‌طورکلی مشاهده می‌شود درصد رس قابل پراکنش در آب،

جدول ۱- مشخصات هندسی و مشخصات حوزه آبخیز آبکندهای منتخب در سه منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Geometric and watershed properties of selected gullies in three regions.

مشخصات هندسی آبکندها در چهار نقطه از طول آبکند						منطقه Region name
Geometric properties of gullies in 4 points of length						
تغییر سطح مقطع در دو سال (m ²) Cross section change in 2 years (m ²)	تغییر حجم در دو سال (m ³) Volume change in 2 years (m ³)	عرض دهانه (m) Top with (m)	عرض کف (m) Bottom with (m)	عمق (m) Depth (m)	طول (m) Length (m)	
0.9 (0-3.17)	31 (13-45)	2.3 (0.8-5.8)	1.2 (0.3-3.1)	1.25 (0.3-2.7)	35 (21-53)	اُرتاداغ (۸ آبکند) <i>Orta Dagh</i> (8 gullies)
0.6 (0-2.4)	29 (8-68)	2.5 (0.6-6.2)	0.9 (0.2-2)	0.8 (0.3-1.5)	31 (17-45)	ملاحمد (۱۲ آبکند) <i>Mola Ahmad</i> (12 gullies)
0.8 (0.1-2.7)	20 (9-35)	1.8 (0.5-4.5)	0.6 (0.1-1.5)	0.9 (0.25-2)	18 (10-26)	سرچم (۱۰ آبکند) <i>Sarcham</i> (10 gullies)
مشخصات حوزه زه‌کشی آبکندها						منطقه Region name
Watershed properties of gullies						
شماره منحنی CN Curve Number	پوشش گیاهی (%) Plant Cover (%)	ضریب گردی میلر Miller Shape index	شیب متوسط (%) Slop (%)	مساحت (ha) Area (ha)		
70 (60-78)	30 (15-45)	0.5 (0.45-0.58)	7 (4-14)	16 (14-21)		اُرتاداغ (۸ آبکند) <i>Orta Dagh</i> (8 gullies)
65 (61-74)	51 (40-75)	0.26 (0.21-0.36)	10 (4-13)	18 (14-23)		ملاحمد (۱۲ آبکند) <i>Mola Ahmad</i> (12 gullies)
75 (71-81)	16 (10-25)	0.35 (0.2-0.43)	11 (8-14)	24 (21-32)		سرچم (۱۰ آبکند) <i>Sarcham</i> (10 gullies)

مقادیر داخل پرانتز دامنه تغییرات (حداقل - حداکثر) ویژگی مورد نظر می‌باشد.

Values in parenthesis is range (min-max) of properties.

جدول ۲- میانگین و دامنه تغییرات ویژگی های خاک آبگندها در دو عمق سطحی و زیرسطحی و خاک حوزه آبخیز آبگندها.

Table 2. Mean and range of soil properties in gully's at surface, subsurface depths and gully's watershed soil.

سرچشم		ملاح احمد				آرتاداغ				ویژگی های خاک Soil Properties
Sarcham		Mola Ahmad				Orta Dag				
خاک حوزه آبخیز	خاک زیرسطحی	خاک سطحی	خاک حوزه آبخیز	خاک زیرسطحی	خاک سطحی	خاک حوزه آبخیز	خاک زیرسطحی	خاک سطحی	خاک سطحی	
Watershed soil	Subsurface soil	Surface soil	Watershed soil	Subsurface soil	Surface soil	Watershed soil	Subsurface soil	Surface soil	Surface soil	
27 (19-35)	31 (17-61)	27 (18-45)	13 (9-31)	16 (7-32)	13 (7-27)	17 (25-29)	26 (19-37)	24 (16-34)	رس (%) Clay (%)	
53 (45-61)	47 (12-65)	53 (29-76)	52 (38-59)	48 (34-66)	53 (38-69)	56 (47-69)	54 (29-70)	57 (24-72)	شن (%) Sand (%)	
19 (12-35)	22 (13-44)	18 (13-48)	33 (26-38)	33 (13-47)	33 (19-42)	19 (12-27)	17 (4-34)	18 (6-31)	سیلت (%) Silt (%)	
19 (8-31)	15 (3-34)	15 (2-39)	54 (20-99)	42 (11-95)	48 (19-96)	16 (9-30)	17 (7-32)	14 (2-27)	رس قابل پراکنش Dispersible clay (%)	
20 (8-26)	21 (4-61)	19 (3-51)	21 (8-28)	19 (4-34)	21 (4-35)	18 (6-28)	17 (3-40)	18 (2-53)	شن درشت Coarse sand, 0.1-2 mm (%)	
33 (19-44)	27 (7-54)	33 (13-75)	31 (23-39)	28 (11-45)	29 (17-38)	36 (18-53)	30 (8-52)	38 (8-68)	شن خیلی ریز Very fine sand, <0.1mm (%)	
52 (43-63)	49 (17-69)	52 (27-79)	64 (59-75)	62 (49-81)	64 (51-78)	56 (42-65)	52 (19-71)	56 (32-79)	سیلت + شن خیلی ریز (%) Silt+VF sand (%)	
0.7 (0.5-0.9)	0.4 (0.2-0.9)	0.7 (0.3-1)	1.3 (0.7-2.2)	0.7 (0.2-1.8)	1.3 (0.7-2.8)	0.9 (0.5-1.5)	0.4 (0.1-1.1)	0.98 (0.21-1.8)	کربن آلی (%) Organic carbon	
19 (15-29)	17 (8-22)	19 (13-45)	15.5 (8-35)	12 (2-25)	15 (6-40)	11 (3-16)	12 (1-17)	10 (1.2-20)	کربنات کلسیم (%) Calcium carbonate (%)	

ادامه جدول ۲ -
Continue Table 2.

سرخس Sarcham	ملاحمد Mola Ahmad			آرتاغ Orta Dag		ویژگی های خاک Soil Properties
	خاک زیر سطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک حوزه آبخیز Watershed soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	
7.7 (7.5-8)	7.7 (7.1-8.6)	7.7 (7.1-8.7)	7.6 (7.4-7.8)	7.6 (7.3-8.2)	7.8 (7.4-8.6)	pH
5.7 (0.5-11.7)	3.6 (0.3-13)	5.8 (0.2-21)	0.23 (0.2-0.3)	0.25 (0.15-0.41)	1.4 (0.3-8)	EC (dSm ⁻¹)
40 (4-110)	21 (2.4-68.5)	40 (3-216)	3.2 (2.5-4.5)	3.5 (2.1-9)	18 (5-40)	محلول Soluble Ca+Mg
0.5 (0.2-1)	0.3 (0.1-0.9)	0.5 (0.1-1.1)	1.2 (0.3-2.5)	1.1 (0.1-5.6)	0.7 (0.15-1.3)	MWD (mm)
1700 (200-3500)	1500 (200-5100)	1800 (100-7500)	76 (45-190)	90 (11-190)	230 (8-1115)	Na (ppm)
42 (16-77)	38 (10-116)	43 (13-112)	14 (8-20)	12 (6-22)	24 (10-112)	K (ppm)
2.7 (1.4-4)	2.6 (0.9-4.7)	2.8 (0.9-6.3)	3 (1.1-6)	3.7 (1.3-10)	4.5 (1.1-15)	گچ (%) Gypsum (%)
17 (0.6-31)	18 (0.6-43)	13 (0.2-35)	0.2 (0.15-0.4)	0.32 (0.1-0.8)	3 (1-13)	SAR
19 (0.9-35)	21 (1-51)	15 (0.5-39)	0.4 (0.2-0.6)	0.5 (0.15-1.1)	4 (0.2-15)	CROSS
1.5 (1.2-1.7)	1.5 (1.3-1.9)	1.5 (1.2-1.8)	1.3 (1.1-1.5)	1.4 (1.1-1.7)	1.5 (1.25-1.9)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density

- مقادیر داخل پرانتز دامنه تغییرات (حدافل - حداکثر) ویژگی مورد نظر می باشد.

- Values in parenthesis is range (min-max) of properties.

به‌عنوان یک روند کلی افزایش شن، شن درشت، شن خیلی ریز، رس قابل پراکنش در آب، کاتیون‌های محلول، SAR و CROSS به‌طور معنی‌داری در هر سه منطقه موجب افزایش سطح مقطع آبکند شده‌اند در حالی‌که افزایش رس موجب کاهش گسترش آبکند شده است. مقادیر همبستگی و سطح معنی‌داری آن‌ها در جدول ۳ به تفکیک هر منطقه و برای دو عمق سطحی و زیرسطحی ارائه شده است. صوفی و عیسائی (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که در آبکندهای استان گلستان درصد رس و SAR همبستگی منفی با حجم آبکندها داشت (۲۳)، که در مورد درصد رس با نتایج این پژوهش مطابقت داشت ولی در مورد SAR نتیجه دو پژوهش متفاوت بود. شوری خاک (EC) نیز دارای همبستگی معنی‌دار با گسترش آبکند است که ضریب همبستگی آن در منطقه سرچم که EC بیش‌تری دارد (جدول ۳)، بیش‌تر می‌باشد. پژوهشگران دیگری نیز کاهش ابعاد آبکند در اثر افزایش رس و کاهش املاح محلول را گزارش کرده‌اند (۳، ۶). با افزایش شوری خاک، تراکم پوشش گیاهی و نقش حفاظتی آن کاهش یافته است و این امر منجر به گسترش آبکندها شده است. کربنات کلسیم همبستگی معنی‌داری نشان نداد و فقط در خاک زیرسطحی منطقه اُرتاداغ همبستگی معنی‌داری با گسترش آبکند داشت. در پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده شده است که افزایش مقدار سیلت، رس، شن و املاح خاک بر گسترش آبکند تأثیرگذار است (۳، ۸). هم‌چنین افزایش کربن آلی در اُرتاداغ و سرچم روند گسترش آبکند را به‌طور معنی‌داری کاهش داده است، در حالی‌که در ملاحمد عکس این موضوع صادق است. در سرچم و اُرتاداغ مقادیر کربن آلی کم است (جدول ۲) و به‌نظر می‌رسد افزایش آن با تأثیر بر

در جدول ۳ ضریب همبستگی بین دو مجموعه، ویژگی‌های مورد نظر خاک سطحی و زیرسطحی آبکندها با تغییرات سطح مقطع آبکندها در طی دو سال (در چهار نقطه از طول برای هر آبکند)، برای آبکندهای مشابه در هر منطقه ارائه شده است. مشاهده می‌شود در اُرتاداغ ۱۳ ویژگی خاک سطحی و عمقی، در ملاحمد ۱۲ ویژگی خاک سطحی و ۱۰ ویژگی خاک زیرسطحی و در سرچم ۷ ویژگی خاک سطحی و ۱۲ ویژگی خاک زیرسطحی تأثیر معنی‌داری بر گسترش آبکند دارند. این نتایج بیانگر تأثیر بیش‌تر وضعیت خاک زیرسطحی بر گسترش آبکندها در سرچم است که نشان می‌دهد با افزایش حساسیت به فرسایش لایه‌های پایین مانند افزایش میزان سیلت و رس قابل پراکنش در آب و افزایش غلظت کاتیون‌های محلول، گسترش آبکند تشدید می‌شود. در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود که میانگین درصد سیلت در خاک زیرسطحی منطقه سرچم ۲۲ درصد و در خاک سطحی ۱۸ درصد است، در حالی‌که در دو منطقه دیگر درصد سیلت خاک سطحی و زیرسطحی نزدیک به هم است. هم‌چنین همبستگی گسترش آبکندها با تعداد بیش‌تری از ویژگی‌های خاک زیر سطحی نسبت به خاک سطحی در سرچم نیز، می‌تواند دلیلی بر تأثیر بیش‌تر جریان زیر سطحی آب و تونلی شدن نسبت به جریان سطحی بر گسترش آبکند باشد. این موضوع می‌تواند تأییدکننده کارایی شاخص توپوگرافی در تشخیص نوع جریان هیدرولوژیکی تشکیل آبکند باشد. در اُرتاداغ و ملاحمد بین ویژگی‌های هر دو لایه سطحی و زیرسطحی خاک با گسترش آبکند همبستگی معنی‌داری مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد جریان سطحی رواناب بر هر دو لایه تأثیر گذاشته و با فرسودن آن موجب گسترش آبکندها می‌شود.

کم‌تر بودن عوامل تخریب، موجب پایداری آن‌ها در این منطقه گشته است که می‌تواند موجب کاهش تولید رواناب و گسترش آبکند شود. دلاپا و همکاران (۲۰۱۲) به نقش افزایش پایداری خاکدانه‌ها بر کاهش تولید رسوب در اثر گسترش آبکندها اشاره و بیان کردند که عواملی که بر پایداری ساختمان خاک مؤثر است می‌تواند بر کاهش گسترش آبکندها اثر بگذارد (۶).

وجود مقادیر زیاد گچ در خاک می‌تواند موجب افزایش فرسایش آبکندی شود (۳). در بین سه منطقه مورد مطالعه، در اُرتاداغ مقدار گچ زیاد است و همبستگی معنی‌داری با گسترش آبکند نیز تنها در این منطقه مشاهده می‌شود. این امر نشان می‌دهد مقادیر بالای گچ در خاک، می‌تواند بر گسترش آبکندها مؤثر باشد در حالی‌که در مقادیر کم‌تر گچ در خاک، تأثیر آن ناچیز است. در جدول ۴ همبستگی بین مشخصات حوزه زه‌کشی آبکندها و ویژگی‌های خاک بالادست آبکندها با تغییر حجم آبکندهای مشابه در هر منطقه در طی دو سال مورد بررسی، ارائه شده است. از آنجایی‌که به‌منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر گسترش آبکند، در هر منطقه آبکندهای مشابه از نظر مشخصات حوزه انتخاب شده‌اند، همبستگی معنی‌داری بین مساحت، شیب و ضریب شکل با تغییر حجم مشاهده نشد. تنها در سرچم همبستگی معنی‌دار با شاخص گردی میلر مشاهده شد که نشان می‌دهد با گردتر شدن حوزه زه‌کشی آبکند، شدت جریان ورودی به آن بیش‌تر و حجم خاک فرسایش‌یافته افزایش می‌یابد.

بهبود ساختمان خاک و افزایش MWD موجب کاهش رواناب و گسترش آبکند شده است. این در حالی است که در ملااحمد میانگین کربن آلی بیش‌تر از دو منطقه دیگر است (جدول ۲) و افزایش آن با کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، پایداری خاک در برابر جریان آب را کاهش و گسترش آبکند را بیش‌تر نموده است. نتایج همبستگی جرم مخصوص ظاهری نیز این امر را تأیید می‌کند، به‌طوری‌که در منطقه اُرتاداغ و سرچم با افزایش جرم مخصوص ظاهری سطح مقطع آبکند افزایش یافته است ولی در ملااحمد عکس این روند وجود دارد. مرتضایی و همکاران (۲۰۰۸) نیز در منطقه شمال‌غرب زنجان که جنوب استان اردبیل و مجاور منطقه سرچم می‌باشد، نشان دادند افزایش درصد ماده آلی با افزایش پایداری ساختمان خاک گسترش آبکندها را محدود کرده است (۱۷)، که با مشاهدات این پژوهش در منطقه سرچم مطابقت دارد. چاپلوت (۲۰۱۳) نیز تأثیر افزایش جرم مخصوص ظاهری بر افزایش عقب‌نشینی لبه آبکندها را نشان داده است (۳). با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در اُرتاداغ گسترش آبکند کاهش نشان داد، در حالی‌که در دو منطقه دیگر تأثیر معنی‌داری نداشت. در اُرتاداغ میانگین درصد رس به‌میزان قابل‌توجهی بیش‌تر از ملااحمد و کربن آلی آن نیز بیش‌تر از سرچم است، بنابراین عوامل پایداری خاکدانه در این منطقه در مجموع بیش‌تر از دو منطقه دیگر است. مقادیر SAR و CROSS نیز در این منطقه بسیار کم‌تر از سرچم ولی مشابه ملااحمد است. بنابراین مناسب بودن عوامل پایداری خاکدانه‌ها و

جدول ۳- همبستگی بین ویژگی‌های خاک آب‌کندها (سطحی و عمقی) و تغییر سطح مقطع.
Table 3. Correlation between gully's soil properties (surface and subsurface) and cross section change.

ویژگی‌های خاک Soil properties	سرخم <i>Sarcham</i>			ملاحمد <i>Mola Ahmad</i>			آرتاداغ <i>Orta Dag</i>		
	خاک زیرسطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیرسطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیرسطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیرسطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	
رس (%) Clay (%)	-0.40**	-0.29 ^{ns}	-0.52**	-0.48**	-0.46*	-0.54**			
شن (%) Sand (%)	0.409*	-0.142 ^{ns}	0.416**	0.462**	0.40*	0.47*			
سیلت (%) Silt (%)	0.503**	0.456**	0.227 ^{ns}	-0.127 ^{ns}	0.348 ^{ns}	0.306 ^{ns}			
رس قابل پراکنش Dispersible clay (%)	0.45*	0.58**	0.631**	0.25 ^{ns}	0.805**	0.658**			
شن درشت، ۰/۱-۲ میلی‌متر Coarse sand, 0.1-2 mm (%)	0.496**	0.15 ^{ns}	0.057 ^{ns}	0.302*	0.463*	-0.387*			
شن خیلی ریز >0.1mm (%) Very fine sand, <0.1mm (%)	-0.167 ^{ns}	0.218 ^{ns}	0.41**	0.316*	0.419*	0.515**			
سیلت + شن خیلی ریز Silt+VFsand (%)	-0.129 ^{ns}	-0.029 ^{ns}	0.389**	-0.094 ^{ns}	-0.043 ^{ns}	0.444*			
کربن آلی (%) Organic carbon (%)	-0.054 ^{ns}	-0.351*	0.512**	0.592**	-0.547**	-0.245 ^{ns}			
کربنات کلسیم (%) Calcium carbonate (%)	-0.071 ^{ns}	0.084 ^{ns}	0.252 ^{ns}	-0.076 ^{ns}	0.472**	-0.026 ^{ns}			

ادامه جدول ۳-
Continue Table 3.

ویژگی‌های خاک Soil properties	ملاحمد <i>Mola Ahmad</i>			آرتاداغ <i>Orta Dag</i>		
	سرچشم <i>Sarcham</i>	خاک زیرسطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیرسطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیرسطحی Subsurface soil
pH	0.209 ^{ns}	-0.075 ^{ns}	-0.236 ^{ns}	-0.167 ^{ns}	-0.158 ^{ns}	
EC (dSm ⁻¹)	0.46 ^{**}	0.026 ^{ns}	0.318 [*]	0.493 ^{**}	0.369 ^{ns}	
محلول Ca+Mg Soluble Ca+Mg (meqL ⁻¹)	0.399 [*]	-0.176 ^{ns}	0.363 [*]	-0.292 ^{ns}	0.597 ^{**}	
MWD (mm)	0.248 ^{ns}	-0.144 ^{ns}	-0.295 ^{ns}	-0.551 ^{**}	-0.529 ^{**}	
Na (ppm)	0.526 ^{**}	0.361 [*]	0.445 ^{**}	0.366 ^{ns}	0.464 [*]	
K (ppm)	0.456 ^{**}	0.507 ^{**}	0.567 ^{**}	0.67 ^{**}	0.696 ^{**}	
گچ (%) Gypsum (%)	0.153 ^{ns}	0.276 ^{ns}	0.057 ^{ns}	0.701 ^{**}	0.505 ^{**}	
SAR	0.434 ^{**}	-0.167 ^{ns}	0.478 ^{**}	0.337 ^{ns}	0.302 ^{ns}	
CROSS	0.433 ^{**}	-0.181 ^{ns}	0.422 ^{**}	0.563 ^{**}	0.546 ^{**}	
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gcm ⁻³)	0.453 ^{**}	0.222 ^{ns}	-0.464 ^{**}	0.499 ^{**}	0.465 [*]	

* Significant correlation at P<5 %, ** Significant correlation in P<1% and ^{ns} No significant correlation.
دارای همبستگی معنی دار در سطح ۵ درصد، ^{ns} فاقد همبستگی معنی دار، ^{**} دارای همبستگی معنی دار در سطح ۱ درصد و ^{ns} فاقد همبستگی معنی دار.

جدول ۴- همبستگی مشخصات حوزه زه‌کشی و ویژگی‌های خاک حوضه بالادست آبکندها با تغییر حجم آبکندها در طی دو سال.

Table 4. Correlation between drainage basin properties and soil properties of gully's with volume change during 2 years.

سرچم <i>Sarcham</i>	ملا احمد <i>Mola Ahmad</i>	آرتاداغ <i>Orta Dagh</i>	
0.768**	0.082 ^{ns}	0.103 ^{ns}	شاخص گردی میلر حوزه آبخیز آبکندها Miller shape index of gully's watershed
0.034 ^{ns}	0.138 ^{ns}	0.02 ^{ns}	مساحت حوزه آبخیز آبکندها (ha) Gully's watershed area (ha)
0.299 ^{ns}	0.877**	-0.073 ^{ns}	شیب متوسط حوزه آبخیز آبکندها Gully's watershed slop (%)
-0.933**	-0.6*	-0.902**	درصد پوشش سطح حوزه آبخیز آبکندها Gully's watershed plant cover surface (%)
0.942**	0.515*	0.704*	شماره منحنی (CN) حوزه آبخیز آبکندها Curve number of gully's watershed
-0.328 ^{ns}	-0.354 ^{ns}	-0.639*	رس (%) Clay (%)
0.014 ^{ns}	0.57*	0.626*	شن (%) Sand (%)
0.27 ^{ns}	-0.171 ^{ns}	0.673*	سیلت (%) Silt (%)
0.003 ^{ns}	0.138 ^{ns}	0.398 ^{ns}	رس قابل پراکنش Dispersible clay (%)
0.63*	0.237 ^{ns}	-0.038 ^{ns}	شن درشت، ۰/۱-۲ میلی‌متر Coarse sand, 0.1-2 mm (%)
0.429 ^{ns}	0.256 ^{ns}	0.651*	شن خیلی ریز > ۰/۱ میلی‌متر Very fine sand, <0.1 mm (%)
0.353 ^{ns}	0.102 ^{ns}	0.386 ^{ns}	سیلت + شن خیلی ریز (%) Silt + VFsand (%)
0.243 ^{ns}	0.777**	0.339 ^{ns}	کربن آلی (%) Organic carbon(%)
0.27 ^{ns}	-0.183 ^{ns}	0.189 ^{ns}	کربنات کلسیم (%) Calcium carbonate(%)
0.281 ^{ns}	-0.639*	-0.486 ^{ns}	pH
0.597*	0.426 ^{ns}	-0.105 ^{ns}	EC (dSm ⁻¹)
-0.555*	0.174 ^{ns}	0.051 ^{ns}	Ca + Mg محلول Soluble Ca + Mg (meqL ⁻¹)
0.342 ^{ns}	-0.582*	0.422 ^{ns}	MWD (mm)
0.597*	-0.199 ^{ns}	-0.231 ^{ns}	Na (ppm)
0.251 ^{ns}	0.586*	0.309 ^{ns}	K (ppm)
0.256 ^{ns}	0.154 ^{ns}	-0.011 ^{ns}	گچ (%) Gypsum (%)
0.302 ^{ns}	-0.149 ^{ns}	0.655*	SAR
0.301 ^{ns}	0.203 ^{ns}	0.642*	CROSS
0.099 ^{ns}	-0.588*	0.704*	جرم مخصوص ظاهری (gcm ⁻³) Bulk density (gcm ⁻³)

* دارای همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد ** دارای همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ^{ns} فاقد همبستگی معنی‌دار.

* Significant correlation at P<5 %, ** Significant correlation at P<1% and ^{ns} No significant correlation.

آبکندها که بر تولید رواناب مؤثرند مانند جرم مخصوص ظاهری و درصد سدیم تبادل (ESP) گسترش آبکند افزایش می‌یابد (۳، ۸).

به‌طور کلی ویژگی‌های خاک سطحی حوزه زه‌کشی بالادست آبکندها نسبت به خاک خود آبکندها دارای همبستگی کم‌تری با گسترش آبکندها بودند و عمدتاً ویژگی‌هایی از خاک که بر میزان تولید رواناب تأثیرگذارند مانند SAR، CROSS، نوع بافت و جرم مخصوص ظاهری بر گسترش آبکند تأثیر معنی‌داری داشته و سایر ویژگی‌هایی که مربوط به فرسایش‌پذیری خاک می‌شوند تأثیری بر گسترش آبکند نداشته‌اند، در حالی‌که در مورد خاک خود آبکندها این ویژگی‌ها نیز به‌طور مستقیم بر گسترش آبکند تأثیر داشته‌اند.

در نهایت رگرسیون گام به گام بین تغییر سطح مقطع آبکندهای مشابه در هر منطقه به‌عنوان متغیر وابسته و مجموعه ویژگی‌های خاک سطحی و عمقی که دارای همبستگی معنی‌داری با تغییر سطح مقطع بودند، به‌عنوان متغیرهای مستقل انجام شد. هم‌چنین رگرسیون گام به گام بین تغییر حجم آبکندهای مشابه در هر منطقه به‌عنوان متغیر وابسته و مجموعه مشخصات حوزه زه‌کشی و ویژگی‌های خاک سطحی حوزه زه‌کشی بالادست آبکندها که دارای همبستگی معنی‌داری با تغییر حجم آبکندها بودند، به‌عنوان متغیرهای مستقل، انجام شد. در جدول ۵ مدل‌های رگرسیونی ارائه شده برای هر منطقه و هر مجموعه از متغیرهای مستقل به همراه ضریب تعیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱ هر مدل به‌عنوان شاخص‌های اعتبار پیش‌بینی مدل، ارائه شده است. با توجه به ضرائب مدل‌های رگرسیونی، مشاهده می‌شود در منطقه اُرتاداغ MWD، مقدار شن خیلی‌ریز و رس خاک سطحی آبکندها، مقدار گچ، آهک و رس قابل پراکنش خاک زیرسطحی آبکندها و درصد پوشش گیاهی و شاخص CROSS حوزه زه‌کشی آبکندها بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش آبکند داشته است.

پوشش گیاهی و CN، در هر سه منطقه همبستگی معنی‌داری با تغییر حجم آبکندها داشتند، به‌طوری‌که با افزایش CN و کاهش درصد پوشش گیاهی گسترش آبکند بیش‌تر شده است. هر چند در این دو مورد نیز آبکندهای نسبتاً مشابهی در هر منطقه انتخاب شد (جدول ۱)، ولی مشاهده می‌شود تغییر جزئی در این دو شاخص نیز می‌تواند تأثیر مهمی بر گسترش آبکند داشته باشد.

در مورد تأثیر ویژگی‌های خاک حوزه بالادست آبکندها بر گسترش آن‌ها مشاهده می‌شود در منطقه اُرتاداغ تنها مقدار رس، شن، سیلت، شن خیلی‌ریز، SAR، CROSS و جرم مخصوص ظاهری با گسترش حجم آبکند همبستگی معنی‌داری داشتند، در حالی‌که در ملاحمد مقدار شن، کربن آلی، pH، MWD، غلظت پتاسیم و جرم مخصوص ظاهری دارای همبستگی معنی‌داری بودند. مشاهده می‌شود در این دو منطقه عمدتاً ویژگی‌هایی از خاک حوزه بالادست آبکندها که بر تولید رواناب مؤثرند بر گسترش آبکندها تأثیر گذاشته‌اند. مقیمی و سلامی (۲۰۱۱) نیز در منطقه خرسلو در شمال استان اردبیل و نزدیک منطقه اُرتاداغ نشان دادند که با افزایش شیب و در نتیجه افزایش شدت رواناب توسعه آبکند بیش‌تر می‌شود (۱۵) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. در سرچم تنها درصد شن درشت (۰/۱ تا ۲ mm)، مجموع مقادیر کلسیم و منیزیم، مقدار سدیم و EC دارای همبستگی معنی‌داری با گسترش سطح مقطع آبکندها بودند. این مسأله نشان می‌دهد در سرچم ویژگی‌هایی از خاک بالادست که بر انحلال‌پذیری ترکیبات خاک مؤثرند بر گسترش آبکند تأثیر می‌گذارند، در این بین مقدار بیش‌تر شن درشت نیز با تسهیل حرکت آب درون خاک جابجایی مواد حل شده را تسریع و گسترش آبکند را تشدید می‌کند. در مناطق دیگر کشور نیز تأثیر نوع و میزان پوشش سطح حوزه‌های زه‌کشی آبکندها بر گسترش آن نشان داده شده است (۱۳، ۲۲). پژوهشگران دیگر نیز بیان کرده‌اند که با افزایش ویژگی‌هایی از خاک حوزه زه‌کشی

1- Root mean squared error

جدول 5-0- مدل‌های رگرسیونی ارائه شده برای تغییرات سطح مقطع و حجم آبگداهای سه منطقه مطالعه شده در طی دو سال به روش رگرسیون گام به گام.
 Table 5. Regression models presented for gully's cross section and volume changes during 2 years by stepwise regression in three study area.

متغیرهای مستقل	Independent variable	RMSE	R ²	منطقه
Regression models				
$A = 2.145 + 0.009K + 0.011V / F_{sand}$	ویژگی‌های خاک سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A (جدول 3)	0.46	0.728	آرتاداغ Orta Daglı
$-0.266MWD - 0.054clay$	Gully's surface soil properties that have significant correlation with A (table 3)			
$A = -0.914 + 0.077D_{clay} + 0.015K$	ویژگی‌های خاک زیر سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A (جدول 3)	0.39	0.771	
$A = -0.931 + 0.519gypsum_b + 0.347V / F_{sand}_A$	Gully's subsurface soil properties that have significant correlation with A (table 3)			
$+0.298CaCo_{3b} + 0.222C_{sand}_b$	ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A	0.39	0.771	Mola Ahmad
$V = 61.116 + 0.816silt - 1.191plant$	Gully's total soil properties (surface and sub surface) that have significant correlation with A (table 3)			
$+2.058CROSS$	مشخصات حوزه آبخیز آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با V (جدول 4)	1.4	0.981	
$A = 0.86 + 0.60SOC + 0.195(Ca + Mg)$	Gully's watershed properties have significant correlation with V (table 4)			
$-1.2BD$	ویژگی‌های خاک سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A (جدول 3)	0.42	0.528	ملاحمد
$A = -0.152 + 0.01D_{clay} + 1.531SAR$	Gully's surface soil properties that have significant correlation with A (table 3)			
$+0.42OC - 0.28clay$	ویژگی‌های خاک زیر سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A (جدول 3)	0.34	0.679	
$A = 0.47 + 0.011D_{clay}_b + 1.285SAR_b$	Gully's subsurface soil properties that have significant correlation with A (table 3)			
$+0.407OC_A - 0.894BD_A$	ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A	0.31	0.705	Sarcham
$V = 73.9 + 9.494 slope$	Gully's total soil properties (surface and sub surface) that have significant correlation with A (table 3)			
	مشخصات حوزه آبخیز آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با V (جدول 4)	13	0.769	
	Gully's watershed properties have significant correlation with V (table 4)			
$A = -2.007 + 0.35D_{clay} + 1.615BD$	ویژگی‌های خاک سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A (جدول 3)	0.35	0.566	سرچم
$A = -1.571 + 0.06silt + 0.022sand$	Gully's surface soil properties that have significant correlation with A (table 3)			
$A = -3.048 + 0.019D_{clay}_A + 1.346BD_A$	ویژگی‌های خاک زیر سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A (جدول 3)	0.41	0.555	
$+0.343silt_b + 0.675BD_b$	Gully's subsurface soil properties that have significant correlation with A (table 3)			
$V = 106.728 + 1.809CN + 2.631SMiller$	ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با A	0.28	0.781	اندیس A و B: ویژگی مورد نظر به ترتیب، مربوط به خاک سطحی و زیر سطحی است.
	Gully's total soil properties (surface and sub surface) that have significant correlation with A (table 3)			
	مشخصات حوزه آبخیز آبگداهای دارای همبستگی معنی دار با V (جدول 4)	1.86	0.948	
	Gully's watershed properties have significant correlation with V (table 4)			

Index A and B: Surface and sub surface soil properties, respectively.

A and V: Gully's cross section and volume change during 2 years. VF:sand: Very fine sand (<0.1 mm). CSand: coarse sand (0.1-2 mm). Delay: Dispersible clay. Plant: Gully's watershed plant cover (%). BD: Bulk density. CN: Curve number. SMiller: Miller shape index.

حجم آبکندها تشخیص داده شد، اما پیش‌بینی تغییر حجم تنها براساس شیب از اطمینان کمی برخوردار است. در منطقه سرچم، جرم مخصوص ظاهری و درصد رس قابل پراکنش خاک سطحی آبکندها، مقدار سیلت، شن و جرم مخصوص ظاهری خاک زیرسطحی آبکندها و شماره منحنی (CN) و ضریب گردی میلر حوزه زه‌کشی آبکندها بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش آبکندها داشته‌اند. در این منطقه نیز مانند ملاحمد مدل به‌دست آمده از مجموع ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی نسبت به استفاده از هر مجموعه به تنهایی، دارای بیش‌ترین دقت (بیش‌ترین R^2 و کم‌ترین RMSE) در پیش‌بینی تغییر سطح مقطع آبکندها بود. مدل به‌دست آمده برای تغییر حجم آبکندها بر اساس ضریب گردی میلر و CN نیز دارای دقت بالا ($R^2=0/948$) بوده و با توجه به میانگین تغییر حجم در منطقه که ۲۰ مترمکعب بود (جدول ۲)، دارای خطای پایینی می‌باشد ($RMSE=1/86$). بنابراین این مدل دارای توانایی قابل‌قبولی برای پیش‌بینی تغییر حجم آبکندها می‌باشد. پژوهشگران دیگر نیز با استفاده از رگرسیون گام به گام، با توجه به مجموعه ویژگی‌های مورد بررسی خود عوامل مختلفی را بر توسعه آبکند مؤثر دانسته‌اند. زارع و همکاران (۲۰۱۴) در منطقه مورد بررسی خود که جریان سطحی را عامل اصلی تشکیل آبکند تشخیص داده بود، با بررسی مجموعه‌ای از عوامل خاک و حوزه زه‌کشی میزان ماده آلی، پوشش گیاهی و ضریب گردی را دارای اهمیت بیش‌تر بر گسترش آبکند ذکر کرده است (۱۳). در مقابل، در منطقه‌ای که جریان زیرسطحی عامل تشکیل آبکند است پوشش گیاهی، درصد رس، سیلت، شن و گردی حوزه زه‌کشی در رگرسیون مهم‌ترین عوامل تشخیص داده شده‌اند (۲۲). چاپلوت (۲۰۱۳) نیز در منطقه‌ای که جریان سطحی عامل تشکیل آبکند بوده، جرم مخصوص

با توجه به R^2 و RMSE مدل‌ها، در منطقه اُرتاداغ استفاده از ویژگی‌های خاک زیرسطحی و مجموع ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی، مدل بهتری برای پیش‌بینی تغییر سطح مقطع آبکندها ارائه می‌دهد، هر چند که دقت مدل به‌دست آمده از مجموعه ویژگی‌های خاک سطحی نیز نسبت به دو مجموعه قبلی تفاوت اندکی دارد و قابل‌قبول است ($R^2=0/72$ و $RMSE=0/46$). مدل به‌دست آمده برای تغییر حجم آبکندها نیز با $R^2=0/981$ دقت بالایی دارد و RMSE این مدل نیز ۱/۴ است که با توجه به میانگین تغییر حجم آبکندها در این منطقه یعنی ۳۱ مترمکعب (جدول ۱) خطای نسبتاً کمی می‌باشد.

بنابراین مقدار سیلت، پوشش گیاهی و شاخص CROSS حوزه آبکند به خوبی می‌تواند تغییرات حجم آبکندها را پیش‌بینی کند. در منطقه ملاحمد، درصد کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی آبکندها و درصد رس قابل پراکنش در آب (Dclay) و SAR خاک زیرسطحی آبکندها و درصد شیب متوسط حوزه زه‌کشی آبکندها بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش آبکند داشتند. در این منطقه مشاهده می‌شود مدل پیش‌بینی تغییر سطح مقطع به‌دست آمده از مجموعه ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی دارای بیش‌ترین R^2 و کم‌ترین RMSE می‌باشد، بنابراین استفاده از کل ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی در پیش‌بینی توسعه آبکند بیش‌ترین دقت را دارد.

در مدل پیش‌بینی تغییر حجم آبکند برای ملاحمد، تنها شیب حوزه‌ها وارد شده و R^2 نسبتاً پایینی به‌دست آمده است. با توجه به میانگین تغییر حجم آبکند در منطقه (۲۹ مترمکعب) نیز خطای پیش‌بینی این مدل نسبتاً بالا ($RMSE=1/3$) می‌باشد. بنابراین با وجود این‌که در ملاحمد شیب متوسط حوزه زه‌کشی آبکندها مهم‌ترین ویژگی حوزه مؤثر بر تغییر

با فرسایش پذیری ذاتی و انحلال پذیری ترکیبات خاک آبکندها مشاهده شد. در مورد ویژگی‌های حوزه زه‌کشی آبکندها، مشخصات خود حوزه نسبت به ویژگی‌های خاک سطحی حوزه بالادست تأثیر بیشتری بر گسترش آبکند داشتند. ویژگی‌های خاک حوزه بالادست نیز از طریق تأثیری که بر تولید رواناب دارند بر گسترش آن اثر می‌گذارد. با توجه به نتایج همبستگی و نیز مؤثرترین عوامل انتخاب شده توسط رگرسیون گام به گام در بین مناطق مورد مطالعه، توسعه آبکندها در اُرتاداغ هم با ویژگی‌های خاک سطحی و هم ویژگی‌های خاک زیرسطحی ارتباط دارد. در ملاحمد نیز هر چند هر دو دسته تأثیرگذار می‌باشد اما تأثیر ویژگی‌های خاک سطحی بیشتر است. ولی در مورد سرچم عمدتاً توسعه آبکند با فرسایش‌پذیری خاک زیرسطحی مرتبط است. این نتایج تأییدکننده نتایج به‌دست آمده از شاخص توپوگرافی است که نشان داد عامل اصلی تشکیل آبکند در سرچم جریان زیرسطحی و در دو منطقه دیگر جریان سطحی است. به‌منظور کنترل گسترش آبکندها، بایستی با توجه به نوع فرایند هیدرولوژیکی غالب و مهم‌ترین عوامل خاکی تشخیص داده شده، مدیریت خاک‌های مناطق به شکلی باشد که این عوامل را در سطح بهینه از نظر مقاومت در برابر گسترش آبکند حفظ کند. همچنین در مناطقی که رواناب عامل اصلی تشکیل و گسترش آبکند تشخیص داده می‌شود، بایستی با اجرای عملیات مناسب حفاظت خاک، شدت و سرعت رواناب را کاهش داد تا مانع از تخریب بیش‌تر اراضی و تاسیسات در اثر توسعه آبکند شود.

ظاهری اعماق مختلف، میزان املاح محلول و پایداری ساختمان خاک را مهم‌ترین عوامل تشخیص داده است (۳). همچنین تفاوت پایداری ساختمان خاک سطحی و زیرسطحی نیز عامل تشکیل آبکند تشخیص داده شده است (۶). به‌طورکلی انطباق نسبی بین نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های گذشته وجود دارد. البته از آنجایی‌که پژوهشگران مختلف مجموعه متفاوتی از ویژگی‌های خاک و حوزه را در نظر گرفته‌اند و از روش‌های متفاوتی در جمع‌آوری داده‌ها استفاده کرده‌اند، وجود تفاوت در نتیجه‌گیری‌ها عادی به‌نظر می‌رسد.

با توجه به مدل‌های رگرسیون به‌دست آمده، به‌طورکلی می‌توان گفت استفاده از مجموع ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی نسبت به هر یک از آنها به تنهایی، مدل دقیق‌تری برای پیش‌بینی تغییر سطح مقطع آبکندها ارائه می‌دهد. بنابراین استفاده از داده‌های بیشتر دقت مدل و شناسایی عوامل تأثیرگذارتر بر گسترش آبکند را افزایش می‌دهد، هر چند که هزینه و سختی کار نیز افزایش می‌یابد، چرا که بایستی داده‌های خاک زیر سطحی نیز به‌دست آید. همچنین مدل‌های مربوط به تغییر حجم آبکندها نشان دادند که ویژگی‌هایی از حوزه که بر حجم و شدت جریان رواناب تأثیرگذارند نقش مهمی در توسعه آبکند دارند که نتایج همبستگی‌های مربوط به این عوامل نیز تأییدکننده این امر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی در این پژوهش مشاهده شد شاخص آستانه توپوگرافی کارایی لازم را در تعیین نوع فرایند هیدرولوژیکی ایجاد آبکندها دارد. همچنین رابطه بین گسترش آبکندها با مجموعه‌ای از ویژگی‌های مرتبط

منابع

1. Agharazi, H., Davodirad, A., and Soufi, M. 2014. Area-slope threshold of gully's in Zahir Abad watershed of Markazi province. *J. Water. Engin. Manage.* 6: 1-9. (In Persian)
2. Bayatti, M. 2006. Gully properties and gully controlling factors, case study: between Meshkinshahr and ahhar. *Geog. Dev. Iran. J.* 4: 115-136. (In Persian)
3. Chaplot, V. 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorph.* 186: 1-11.
4. Chaplot, V., Coadou le Brozec, E., Silvera, N., and Valentin, C. 2005. Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of northern Laos. *Catena.* 63: 167-184.
5. Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., and McKean, J. 1994. Analysis of erosion thresholds, channel network, and landscape morphology using a digital terrain model. *J. Geol.* 101: 141-152.
6. Dlapa, P., Chrenková, K., Mataix-Solera, J., and Šimkovic, I. 2012. Soil profile improvement as a by-product of gully stabilization measures. *Catena.* 92: 155-161.
7. Emami, H., Astaraei, A., Fotovat, A., and Khotabaei, M. 2014. Effect of Soil Conditioners on Cation Ratio of Soil Structural Stability, Structural Stability Indicators in a Sodic Soil and On Dry Weight of Maize. *Arid Land Res. Manag.* 28: 325-339.
8. Faulkner, H. 2013. Badlands in marl lithologies: A field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena.* 106: 42-53.
9. Gee, G.W., and Bauder, J.M. 1986. Partical-size analysis. P 383-411, In: A.L. Page and et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods.* Agronomy Monograph No. 9 (2nd edition), American Society of Agronomy, Madison, WI.
10. Hadley, R.F., Lal, R., Onstad, C.A., Walling, D.E., and Yair, A. 1985. Recent developments in erosion and sediment yield studies, Technical Documents in Hydrology. UNESCO. Paris.
11. Herzig, A., Dymond, J.R., and Marden, M. 2011. A gully-complex model for assessing gully stabilisation strategies. *Geomorph.* 133: 23-33.
12. Kemper, W.D., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. P 425-442, In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part a: Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI.
13. Zare, M., Soufi, M., Nejabat, M., and Jokar, L. 2014. Effect of Topographic Threshold Conditions on Gully Erosion) Case Study: Alla Marvdasht -Lamerd & Fadagh-Larestan). *J. Sci. Tech. Agri. Nat. Resour. Water Soil Sci.* 18: 323-336. (In Persian)
14. Marchuk, A.G., and Rengasamy, P. 2010. Cation ratio of soil structural stability (CROSS). 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1-6 August, Brisbane, Australia, Pp: 9-11.
15. Moghimi, I., and Salammi, N. 2011. Mechanism of geomorphologic creation and development of gully in the winter quarter of Haj Mohammad in the northern slope of Khoroslu in Ardebil. *Territory.* 30: 49-61. (In Persian)
16. Morgan, R.P.C. 2005. *Soil erosion and conservation*, third edition. Blackwell Publishing, 316p.
17. Mortezaei, Gh., Ahmadi, H., Ghoddosee, J., Feiznia, S., and Jafari, M. 2008. Evaluation of the quantitative effects of environmental parameters on occurrence of gully erosion. *J. Iran. Nat. Resour.* 60: 1211-1223. (In Persian)
18. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America. Madison, WI.
19. Phillips, J.D. 2006. Evolutionary geomorphology: thresholds and nonlinearity in landform response to environmental change. *Hyd. Earth Sys. Sci.* 10: 731-742.
20. Poesena, J., Nachtergaele, J., Verstraetena, G., and Valentin, C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena.* 50: 91-133.

21. Reynolds, W.D., Elrick, D.E., and Youngs, E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). P 818-826, In: J.H. Dane and G.C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
22. Soleimanpour, S.M., Soufi, M., and Ahmadi, H. 2010. A Study on the Topographic Threshold and Effective Factors on Sediment Production and Gully Development in Neyriz, Fars Province. *J. Range Water. Manage.* 63: 41-52. (In Persian)
23. Soufi, M., and Esaei, H. 2010. Estimate of gully erosion volume with morphometric and soil properties in Gholestan province. *J. Water. Engin. Manage.* 2: 73-82. (In Persian)
24. Refahi, H.Gh. 2006. *Water erosion and conservation*. University of Tehran press, 671p. (In Persian)
25. Valentin, C.J., Poesen, J., and Yong, L. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena.* 63: 132-153.
26. Valentin, C. 2004. Overland flow, erosion and associated sediment and biogeochemical transports. P 317-322, In: P. Kabat, M. Claussen, P.A. Dirmeyer, J.H.C. Gash, L. Bravo de Guenni, M. Meybeck, R.A. Pielke Sr, C.J. Vořrošmarty, R.W.A. Hutjes and S. Luřtkemeier (Eds.), *Vegetation, Water, Humans and the Climate. A New Perspective on an Interactive System*. Springer Verlag, Berlin. Global Change-The IGBP Series.
27. Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud Wijdenes, D., Nachtergaele, J., Kosmas, C., Roxo, M.J., and De Figueiredo, T. 2000. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surf. Proc. Landforms.* 25: 1201-1220.
28. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
29. Wick, A.F., Ingram, L.J., and Stahl, P.D. 2009. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes. *Soil Biol. Biochem.* 41: 201-209.
30. Yasrebi, B., Soufi, M., Mirnia, K., and Mohammadi, J. 2013. Effect of topography and soil on development of gully's in agriculture lands, case study: Illam province. *J. Water. Engin. Manage.* 5: 31-40. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(3), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Determining topographic threshold and effect of soil properties on gully development in three region of Ardabil province

H. Shahab Arkhazlou¹, *H. Emami², Gh.H. Haghnia², A. Esmali³
and M. Mahmood Abadi⁴

¹Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad,

³Associate Prof., Dept. of Rangeland and Watershed Management, University of Mohaghegh Ardabili,

⁴Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman

Received: 07/04/2015; Accepted: 10/27/2015

Abstract

Background and Objectives: Gully erosion is an important type of soil erosion worldwide with respect to sediment production and land degradation that also occurs in different parts of Iran. Topography and soil properties of drainage catchment of gullies have important effects on development of gullies. The effect of soil properties on gully formation has been reported in different studies. The objective of this study was to investigate hydrologic process of gully forming by topography index and to determine the effect of surface and subsurface soil properties on gully extension for 2 year and to select the most important of this properties.

Materials and Methods: In order to determine the main hydrological process that creates the gully erosion, three regions of Ardabil province including *Orta Dagh*, *Mola Ahmad* and *Sarcham* were selected and topographic threshold of gully forming was determined as $S=aA^b$ where S and A are the slope and area of gully's drainage catchment, respectively and *a* and *b* are the regional coefficients. Also, to investigate the effect of soil properties on gully's development in each region, a set of similar gullies were selected and the changes of volume and cross section area for gullies in four points along its length were measured as indicator of gully development during two years time. 19 different soil properties at surface and subsurface layer of gullies and at drainage area were measured and their effects on gully development were investigated. At the end, stepwise regression models were introduced to predict the value of gully development and to determine the main factors of gully development in each catchment. Precision of regression models was determined with R^2 and root mean of squared error (RMSE).

Results: The results showed that in *Sarcham* catchment *b* power of topographic threshold was positive, therefore it seems that piping and tunnel erosion be main reasons for gully forming but in two other catchments the values of *b* power was negative therefore runoff may have caused gully formation. Correlation analysis between soil properties and gully's development revealed that in *Sarcham* catchment erodibility and presence of soluble materials in subsurface layers of soil had a strong relation with gully development. While in other two catchments, erodibility of surface and subsurface layers of soil had similar effects on gully development. In general, application of regression models that used total data set of surface as well as subsurface as independent variable for prediction of cross sectional area changes showed higher precision. For prediction of changes of gully volume, total properties of drainage area were used as independent variables. The precision of this model in *Orta Dagh* and *Sarcham* was high but in *Mola Ahmad* was low. The results of stepwise regression model demonstrated that in *Orta Dagh* catchment, mean weighted diameter (MWD), very fine sand, clay contents in surface layer, gypsum, calcium carbonate, dispersible clay in subsurface layer, percentage of plant cover and CROSS index in drainage area of gully, in *Mola Ahmad* catchment, organic carbon and bulk density at surface layer, dispersible clay content and SAR in subsurface layer, and mean slope of gully drainage area and in *Sarcham* catchment, bulk density and dispersible clay content in surface layer, bulk density, silt and sand contents in subsurface layer, and curve number (CN) and Miller shape index of gully drainage area had the most effect on gully development.

Conclusion: Used topography index had careful efficiency for determining the hydrological process of gully formation. In *Sarcham*, gully's extension related to soluble material in subsurface soil but in two other region gully's extension related to erodibility of surface and subsurface soil. Among properties of gully catchment, ones affects on runoff creation had the main effect on gully's extension.

Keywords: Head cut, Soil loss, Stepwise regression, Tunnel erosion

* Corresponding Author; Email: hemami@um.ac.ir