

## تعیین مؤثرترین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندها در استان اردبیل

حسین شهاب آرخازلو<sup>1</sup> - حجت امامی<sup>2\*</sup> - غلامحسین حق‌نیا<sup>3</sup> - اباذر اسمعیلی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1394/11/07

تاریخ پذیرش: 1395/07/04

### چکیده

فرسایش آبکندی یکی از مهمترین انواع فرسایش در سطح کشور است که در نقاط مختلف استان اردبیل وجود دارد و یکی از شاخص‌های گسترش آبکند افزایش سطح مقطع آن می‌باشد. توپوگرافی منطقه و ویژگی‌های خاک از جمله مهمترین عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی می‌باشند. با وجود اهمیت ویژگی‌های خاک در فرسایش آبکندی، تأثیر مستقیم این عوامل کمتر بررسی شده است و مطالعات محدودی در مورد تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک بر فرسایش آبکندی انجام شده است. هدف این پژوهش تعیین تأثیر توپوگرافی بر فرسایش آبکندی و تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک سطحی و زیرسطحی بر افزایش سطح مقطع آبکندها و در نهایت انتخاب مهمترین ویژگی‌های خاک مؤثر بر آن در سه منطقه آرتاداغ، ملاحمد و سرچم استان اردبیل بود. همچنین رابطه بین مهمترین ویژگی‌های خاک و عوامل توپوگرافی نیز بررسی گردید. با استفاده از دو روش رابطه طبقات شیب با تراکم آبکندها و شاخص آستانه توپوگرافی  $S = aA^b$  که  $S$  و  $A$  شیب و مساحت حوضه زه‌کشی آبکند و  $a$  و  $b$  ضرایب محیطی هستند، تأثیر توپوگرافی بر فرسایش آبکندی در سه منطقه ارزیابی شد. پس از انتخاب مجموعه‌ای مشابه از آبکندها در هر منطقه از نظر مشخصات حوضه زه‌کشی، گسترش آبکندها با اندازه‌گیری افزایش سطح مقطع آن‌ها در طول دو سال و در چهار نقطه از طول آبکندها اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری 17 ویژگی مکانیکی و فیزیکی خاک سطحی و زیرسطحی در نقاط اندازه‌گیری سطح مقطع، با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکند تعیین شد. در نهایت مدل رگرسیونی افزایش سطح مقطع آبکند در اثر مهمترین ویژگی‌های خاک حاصل از PCA، با رگرسیون گام به گام برای هر منطقه به دست آمد. رابطه طبقات شیب و تراکم آبکند نشان داد در منطقه ملاحمد با افزایش شیب تراکم آبکند بیشتر شده است و در منطقه آرتاداغ تا شیب 20-30 درصد این روند مشاهده شد، در حالی که در منطقه سرچم رابطه‌ای بین طبقات شیب و تراکم آبکند وجود نداشت. با استفاده از شاخص آستانه توپوگرافی، فرآیند غالب هیدرولوژیکی تشکیل آبکند برای منطقه ملاحمد رواناب سطحی و برای منطقه سرچم جریان زیرزمینی تشخیص داده شد و در آرتاداغ هر دو نوع جریان سطحی و زیرزمینی مؤثر شناخته شد. با انجام PCA در دو منطقه ملاحمد و آرتاداغ عمده‌ترین ویژگی‌های مکانیکی و پایداری خاکدانه‌ها بر افزایش سطح مقطع آبکند تأثیر بیشتری داشتند، در حالی که در منطقه سرچم کلاس‌های اندازه ذرات و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها تأثیر بیشتری داشتند. به طور کلی رابطه‌ی بین تراکم آبکند در طبقات مختلف شیب، آستانه توپوگرافی تشکیل آبکند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مؤثر بر گسترش آبکندها نشان داد که بین نوع جریان هیدرولوژیکی تشکیل آبکند و مهمترین ویژگی‌های خاک مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکند هماهنگی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آستانه توپوگرافی، بالاکند، تحلیل عاملی، فرسایش زیرزمینی

### مقدمه

و در اثر گسترش آن حجم زیادی از خاک فرسایش می‌یابد (4). فرسایش آبکندی در نقاط مختلف دنیا و در اقلیم‌های مختلف وجود دارد و بخش مهمی از رسوب حوضه‌های آبخیز را تولید می‌کند (28). در این نوع فرسایش هدررفت خاک بسیار بیشتر از فرسایش ورقه‌ای و شیاری است که پیامد آن پر شدن مخازن سدها، کاهش گنجایش انتقال آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و صرف هزینه‌های زیاد برای کاهش گسترش آبکندها می‌باشد (11). ایجاد و گسترش آبکند فرآیند پیچیده‌ای است که عوامل مختلفی

آبکند آبراهه‌ای نسبتاً دائمی با دیواره‌های تقریباً عمودی است که جریان موقت آب هنگام بارندگی یا کمی بعد، درون آن جریان می‌یابد

1، 2 و 3- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(\* - نویسنده مسئول: Email: hemami@um.ac.ir)

4- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی

DOI: 10.22067/jsw.v30i6.52921

بر مقاومت برشی خاک مؤثر می‌باشد که عامل مهمی در مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌باشد (3). برای تعیین پایداری ساختمان خاک شاخص‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها ( $MWD^1$ ،  $GMD^2$ )، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب ( $WSA^3$ %)، شاخص پایداری ( $SI^4$ )، درصد خاکدانه‌های پایدار ( $SAI^5$ %) و درصد خاکدانه‌های درشت پایدار ( $SMal^6$ %) اشاره نمود (21). در پژوهش‌های مختلف تأثیر مستقیم پایداری ساختمان خاک بر فرسایش پذیری خاک و گسترش آبکندها نشان داده شده است (5 و 11). بنابراین بررسی رابطه شاخص‌های مختلف پایداری ساختمان خاک با افزایش سطح مقطع آبکند به منظور انتخاب مناسبترین شاخص قابل استفاده در بررسی فرسایش آبکندی دارای اهمیت است. مقاومت مکانیکی خاک از طریق شاخص‌هایی مانند حدود اتزبرگ ( $PI^9$ ،  $PL^8$ ،  $LL^7$ )،

شاخص فعالیت (Activity)، شاخص‌های مرتبط با توزیع اندازه ذرات مانند ضریب یکنواختی ( $Cu^{10}$ ) و ضریب انحنای ( $Cc^{11}$ ) و مقاومت برشی نزدیک اشباع خاک تعیین می‌شود که در پایداری خاک در برابر فرسایش مؤثر می‌باشند (20). شاخص فعالیت (Activity) نشان دهنده قابلیت انبساط پذیری رس‌های خاک می‌باشد که با افزایش انبساط‌پذیری خاک حساسیت آن در برابر فرسایش و توسعه آبکند افزایش می‌یابد (17). ویژگی‌های مکانیکی خاک نیز به طور مستقیم بر پایداری آن تأثیرگذار می‌باشند (3 و 20).

با وجود تحقیقات مختلفی که در زمینه فرسایش آبکندی انجام شده است، هنوز مدل مناسبی برای برآورد میزان فرسایش خاک در اثر توسعه آبکندها ارائه نشده است، یکی از علل این امر پیچیدگی عوامل مؤثر بر این پدیده و دشواری مطالعه این عوامل می‌باشد (37). بنابراین بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر توسعه ابعاد آبکند و تعیین مهمترین دسته از این ویژگی‌ها برای شناخت عوامل مؤثر بر هدررفت خاک در اثر توسعه آبکند و در نتیجه مدیریت مناسب مناطق دارای فرسایش آبکندی مفید می‌باشد (10). یکی از روش‌های آماری به منظور کاهش تعداد داده و انتخاب مهمترین عوامل مؤثر بر یک متغیر، تحلیل عاملی ( $FA^{12}$ ) است (26). همچنین از روش رگرسیون

آن را کنترل می‌کنند (37). دو مورد از مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر گسترش آبکند، ویژگی‌های خاک و توپوگرافی زمین می‌باشد (28). از جمله عوامل توپوگرافی مؤثر بر گسترش آبکند شیب و مساحت حوضه زه‌کشی آبکندها می‌باشد که برای تعیین تأثیر آن از آستانه توپوگرافی استفاده می‌گردد (7). آستانه توپوگرافی رابطه‌ی بین شیب و مساحت حوضه زه‌کشی آبکندهای یک منطقه است، که نشان می‌دهد در یک شیب مشخص چه سطحی باید وجود داشته باشد تا آبکند تشکیل شود (38). همچنین از رابطه بین طبقات مختلف شیب با تراکم آبکندهای منطقه نیز به عنوان شاخص دیگری از تأثیر توپوگرافی بر شدت فرسایش آبکندی و تعیین حساسترین طبقه شیب به فرسایش آبکندی استفاده شده است (18). از بین ویژگی‌های مختلف خاک، تأثیر عمق خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن بر این نوع فرسایش گزارش شده است (32). یک دسته از ویژگی‌های خاک که می‌تواند بر فرسایش‌پذیری آن و بنابراین بر فرسایش آبکند مؤثر باشد، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک می‌باشند (6). مشاهده شده است که ویژگی‌های ساختمان خاک بر توسعه آبکندها تأثیر می‌گذارند (11). کانتون و همکاران (5) بیان کردند که پایداری ساختمان خاک، مناسبترین شاخص برای محافظت خاک شیب‌ها از فرسایش آبکندی و جابجایی حجم زیاد خاک است. افزایش میزان ماده آلی خاک نیز از طریق افزایش پایداری ساختمان خاک موجب کاهش فرسایش خاک و جلوگیری از گسترش آبکند می‌شود (39). مقاومت برشی اشباع افق‌های خاک نیز شاخص مناسبی از مقاومت آن در برابر فرسایش حاصل از جریان‌های متمرکز آب معرفی شده است (27). بیان شده است که مقاومت برشی آستانه برای افق B به طور معنی‌داری بیشتر از افق A است، همچنین با افزایش رطوبت اولیه افق‌های خاک فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد (25). ژو و همکاران (41) نیز تأثیر آبکند بر ویژگی‌های رطوبتی خاک اطراف دیواره‌های آبکند را تا عمق چهار متری گزارش نموده است. گاوو و همکاران (15) نیز تأثیر پذیری متقابل ویژگی‌های رطوبتی ناحیه ریشه و مشخصات آبکندها را گزارش کردند.

با توجه به بررسی منابع، مشاهده می‌شود چهار دسته مشخصات فیزیکی خاک شامل ویژگی‌های رطوبتی، شاخص‌های پایداری ساختمان خاک، اندازه ذرات خاک و شاخص‌های مکانیکی خاک بر فرسایش آبکندی تأثیر می‌گذارند. از جمله ویژگی‌های رطوبتی خاک شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف (شاخص S) می‌باشد که به عنوان شاخصی از کیفیت خاک بوده و شاخصی از ظرفیت کل آب خاک، میزان نگهداری آب خاک و تکامل ساختمانی خاک می‌باشد (30). لذا این ویژگی خاک از طریق تأثیری که بر حجم رواناب تولید شده و میزان نگهداری آب در خاک می‌گذارند، می‌تواند بر پایداری خاک و فرسایش آبکندی مؤثر باشد (15). مشاهده شده است که میزان نگهداری آب در خاک با تأثیری که بر رطوبت خاک می‌گذارد،

- 1- Mean Weight Diameter
- 2- Geometric Mean Diameter
- 3- Water Stable Aggregates
- 4- Stability Index
- 5- Stable Aggregates Index
- 6- Stable Macroaggregates Index
- 7- Liquid Limit
- 8- Plastic Limit
- 9- Plasticity Index
- 10- Coefficient of uniformity
- 11- Coefficient of curvature
- 12- Factor Analysis

## روش انجام پژوهش

با تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای لندست 8 (2013) (<http://www.USGS.gov>)، مرز محدوده‌ی دارای فرسایش آبکندی در سه منطقه مورد نظر تعیین شد. آبکندهایی که عمق آن‌ها در قسمت بالا کند کوچکتر از 3 فوت باشد، به عنوان آبکندهای کوچک طبقه بندی می‌شوند (28). این نوع آبکندها در مراحل اولیه تشکیل بوده و بارش‌های سالانه می‌تواند ابعاد هندسی آن‌ها را به طور قابل توجهی تغییر دهد و این تغییرات نیز با دقت کافی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. بنابراین در سه منطقه مورد مطالعه با انجام بازدیدهای صحرایی آبکندهایی که دارای بالا کند فعال بودند و عمق بالا کند کم‌تر از یک متر بود، شناسایی شدند و مختصات جغرافیایی هر یک با استفاده از GPS ثبت شد. از بین آبکندهای موجود، مجموعاً 81 آبکنند شامل 28 آبکنند در منطقه اُرتاداغ، 33 آبکنند در منطقه ملاحمد و 20 آبکنند در منطقه سرچم که دارای شرایط ذکر شده بودند انتخاب شدند. با استفاده از نقشه توپوگرافی 1:25000 سال 1373، در ArcGIS 10.2 مدل رقومی ارتفاع (DEM<sup>2</sup>) با دقت 5 متر و نقشه شیب برای محدوده‌های مورد بررسی تهیه شد. درصد پوشش گیاهی، سنگریزه و خاک لخت در حوضه زه‌کشی هر آبکنند، با قرار دادن تصادفی 10 پلات یک متر مربعی در امتداد یک ترانسکت اندازه‌گیری شد. همچنین به روش تک استوانه با سه تکرار، سرعت نهایی نفوذ آب خاک در سه نقطه از سطح حوضه آبکندها اندازه‌گیری شد و گروه هیدرولوژیک خاک حوضه تعیین گردید (31). شماره منحنی (CN) حوضه زه‌کشی هر آبکنند که بیانگر شدت تولید رواناب در حوضه است، با استفاده از درصد پوشش سطح و گروه هیدرولوژیک خاک تعیین شد (29). از روی DEM مناطق با پیکسل اندازه 5 متر نقشه طبقات شیب و توزیع آبکندهای هر منطقه در محیط GIS تهیه گردید (شکل 2). با استفاده از این دو نقشه، طول و تراکم آبکندهای موجود در هر طبقه شیب برای سه منطقه محاسبه شد. همچنین با استفاده از DEM مناطق در نرم افزار GlobalMapper 14 حوضه زه‌کشی هر آبکنند تعیین و مساحت، محیط و ضریب گردی میلر برای هر یک به دست آمد. پس از تعیین حوضه زه‌کشی آبکندها، با استفاده از نقشه شیب با اندازه پیکسل 5 متر و در محیط GIS شیب متوسط حوضه هر آبکنند تعیین شد. در این روش شیب هر پیکسل با استفاده از میانگین تانژانت خط مماس بر پنج نقطه از پیکسل محاسبه می‌شود و میانگین شیب پیکسل‌های حوضه‌ی آبکنند به عنوان شیب متوسط حوضه با واحد درصد ارائه می‌شود. با توجه به اینکه لایه شیب استفاده شده دارای پیکسل با اندازه 5 متر بود، محاسبه شیب برای واحدهای 5 در 5 متر انجام و میانگین شیب این واحدها به عنوان شیب متوسط حوضه ارائه می‌شود، بنابراین شیب به دست آمده دارای دقت نسبتاً قابل

گام به گام نیز به منظور بررسی تأثیر هر عامل بر افزایش سطح مقطع آبکنند و انتخاب مهمترین عوامل از بین آنها استفاده می‌گردد (32). پژوهشگران به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف و انتخاب مهمترین دسته از ویژگی‌ها که بر گسترش آبکنند مؤثر است از روش تحلیل عاملی و رگرسیون گام به گام استفاده کرده‌اند (6 و 8). وجود فرسایش آبکندی و خسارات ناشی از آن در نقاط مختلف منطقه آذربایجان و استان اردبیل گزارش شده است (2، 22 و 24). با مشاهدات صحرایی و مقایسه تصاویر ماهواره‌ای (لندست 8، 2013) با عکس‌های هوایی 1970 (1349) وجود روند رو به گسترش فرسایش آبکندی در سال‌های اخیر در سه منطقه اُرتاداغ، ملاحمد و سرچم که به ترتیب در شمال، مرکز و جنوب استان اردبیل قرار دارند، تشخیص داده شد. در این پژوهش تأثیر توپوگرافی در فرسایش آبکندی و تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندهای فعال در سه منطقه فوق مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر توپوگرافی با هدف تشخیص نوع فرآیند هیدرولوژیکی غالب در ایجاد آبکندهای هر منطقه، با دو روش رابطه طبقات شیب با تراکم آبکندها و آستانه توپوگرافی بررسی گردید (23). همچنین در این پژوهش با توجه به منابع فرض گردید که مجموعه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد بررسی خاک، می‌تواند بر توسعه آبکنند مؤثر باشند، از این رو برای انتخاب مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکندها از روش تحلیل عاملی به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA<sup>1</sup>) (8) استفاده شد. در نهایت با استفاده از مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکنند که از PCA به دست آمده بود، مدل رگرسیونی افزایش سطح مقطع آبکنند برای سه منطقه توسط رگرسیون گام به گام ارائه شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه پژوهش

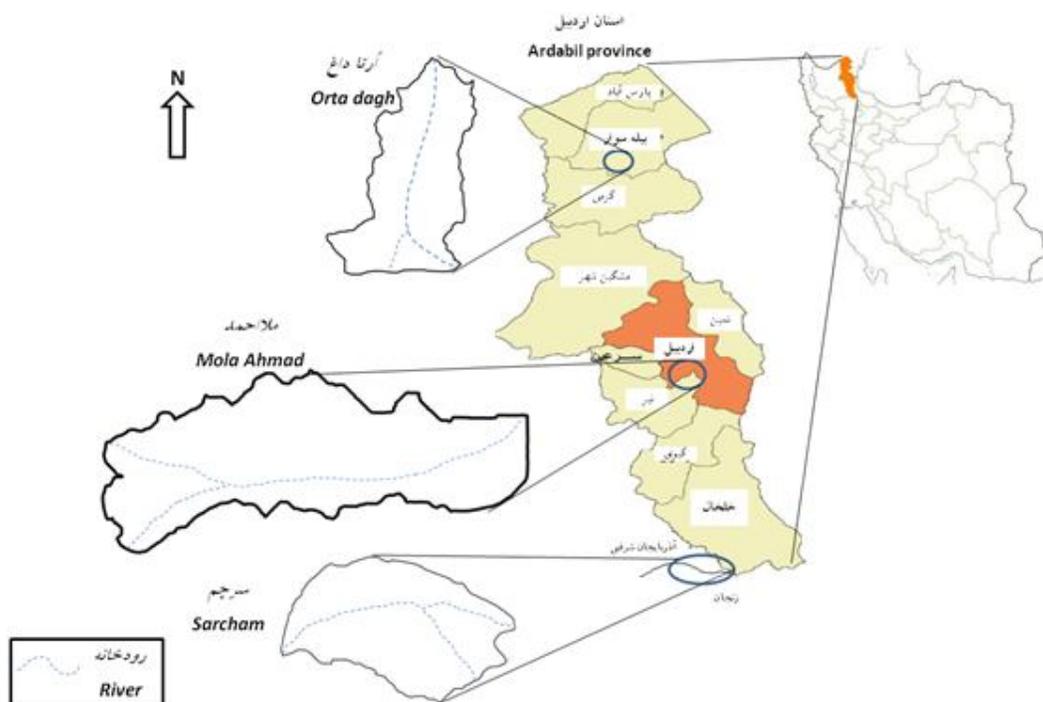
سه منطقه به نام‌های اُرتاداغ، ملاحمد و سرچم به ترتیب در شمال، مرکز و جنوب استان اردبیل که دارای فرسایش آبکندی بوده و آبکندهای آن در حال گسترش می‌باشند انتخاب گردید. محدوده جغرافیایی و مشخصات اقلیمی این سه منطقه به طور خلاصه در جدول 1 ارائه شده و موقعیت مناطق در سطح کشور و استان اردبیل نیز در شکل 1 نشان داده شده است. طبق نقشه زمین شناسی 1:100000 استان اردبیل، سه منطقه فوق از نظر سنگ‌شناسی متشکل از توفهای ماری، سیلتی و شنی، کنگلومرایی، رسوبات آبرفتی، لایم استون، توفها و لاوهای اندزیتی و مارن‌های گچی هستند (سازمان زمین شناسی، 1373).

برازش داده شد، سپس رابطه رگرسیون توانی بین آن‌ها برقرار و ضرائب a و b و سطح معنی‌داری رگرسیون هر منطقه با استفاده از نرم افزار SPSS 19 به دست آمد. با به دست آمدن ضرائب a و b هر منطقه رابطه آستانه توپوگرافی هر منطقه به دست آمد.

قبولی برای برآورد آستانه توپوگرافی می‌باشد. با محاسبه شیب و مساحت حوضه زه‌کشی مجموعه آبکندهای هر منطقه، آستانه‌ی توپوگرافی هر منطقه بر اساس رابطه  $S = aA^b$  محاسبه شد (38). برای این منظور، رابطه مساحت (A) در برابر شیب (S) حوضه آبخیز آبکندهای هر منطقه به صورت لگاریتمی رسم و رابطه خطی بین آنها

جدول 1- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی مناطق مورد مطالعه  
Table 1- Climatic and geographic characteristics of study areas

نام منطقه Region	مساحت (ha) Area (ha)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	میانگین دمای سالانه Annual mean temperature (°C)	میانگین بارش سالانه Annual mean precipitation(mm)	طبقه‌بندی اقلیمی (دومارتن توسعه یافته) Climate classification (Domartn developed)
اُرتاداغ (Orta Dagh)	2727	47°52'47" to 47°56'41"	39°18'42" to 39°14'06"	15.1	271.2	نیمه خشک (Semiarid)
ملاحمد (Mola Ahmad)	5038	48°12'14" to 48°21'52"	38°04'57" to 38°07'37"	9	303.9	نیمه خشک (Semiarid)
سرچم (Sarcham)	1108	47°59'06" to 47°55'54"	37°08'11" to 37°10'10"	8	384.6	نیمه خشک (Semiarid)



شکل 1- موقعیت مناطق مطالعه شده در سطح کشور و استان اردبیل  
Figure 1- Location of study areas in Iran and Ardabil province

حوضه، بیش‌ترین شباهت را داشتند با استفاده از تحلیل خوشه‌ای در نرم افزار SPSS19، انتخاب شدند. نتایج تحلیل خوشه‌ای نشان داد که 8 آبکند در منطقه اُرتاداغ، 12 آبکند در منطقه ملاحمد و 10 آبکند در منطقه سرچم (مجموعاً 30 آبکند) از نظر مجموع مشخصات حوضه

در هر منطقه از بین آبکندهای مورد مطالعه، آبکندهایی که از نظر مشخصات حوضه زه‌کشی شامل مساحت، شیب متوسط، ضریب گردی میله، درصد پوشش گیاهی سطحی و شماره منحنی (CN<sup>1</sup>)

1- Curve Number

زه‌کشی بیشترین تشابه را داشتند، که به عنوان آبکندهای منتخب برای بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر گسترش آبکندها انتخاب شدند. لازم به توضیح است هدف از تحلیل خوشه‌ای انتخاب مجموعه‌ای از آبکندها درون هر منطقه بود که از نظر مشخصات حوضه زه‌کشی مشابه ولی دارای ویژگی‌های خاکی متفاوت باشند تا بتوان تأثیر خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندها را مستقل از تأثیر مشخصات حوضه بررسی کرد، بنابراین گروه‌های همگن آبکندها از نظر حوضه زه‌کشی درون هر منطقه انتخاب شدند. مشخصات بارش شامل شدت و مقدار بارندگی و مشخصات فیزیکی حوضه عوامل اصلی تعیین کننده مقدار و انرژی رواناب تولید شده در حوضه آبکندها می‌باشند که وارد آبراهه آبکند شده و با فرسایش خاک دیواره و کف آبراهه باعث افزایش سطح مقطع آبکند می‌شود. درون هر منطقه مقدار و شدت بارش‌ها مشابه می‌باشد و آبکندهای منتخب هر منطقه نیز از نظر مشخصات فیزیکی حوضه زه‌کشی دارای شرایط مشابه می‌باشند، بنابراین در هر بارش انرژی رواناب وارد شده به آبراهه آبکندهای منتخب در هر منطقه تقریباً مشابه می‌باشد. بنابراین فرض گردید که در هر بارش انرژی رواناب وارد شده به آبکندهای منتخب هر منطقه مشابه است و تفاوت در افزایش سطح مقطع آبکندها ناشی از تفاوت در ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی آنها می‌باشد. یکی از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای بررسی گسترش آبکند در دوره‌های زمانی کوتاه، اندازه‌گیری تغییر مساحت سطح مقطع آبکند در قسمت سر آبکند و نقاط مختلف آبراهه آبکند در طول زمان است (8 و 14). پس از شناسایی آبکندهای منتخب هر منطقه، طول هر آبکند با متر نواری اندازه‌گیری و چهار نقطه از طول آبکند شامل سر آبکند و فواصل 25، 50 و 75 درصد طول از سر آبکندها به عنوان مقاطع آبکند که در اثر جریان رواناب مساحت آنها افزایش می‌یابد در نظر گرفته شدند. با توجه به اینکه آبکندهای منتخب از نوع کوچک می‌باشند تغییرات متغیرها در طول آن شدید نبوده و چهار نقطه ذکر شده به عنوان نمونه‌ای از مقاطع مختلف آبکند جهت بررسی انتخاب شدند. سپس میخ‌های چوبی به عنوان شاخص در این مقاطع نصب و مشخصات هندسی آنها شامل عمق، عرض دهانه، عرض در 50 درصد عمق و عرض کف به صورت فصلی و در فواصل سه ماهه در طول دو سال 1392 و 1393 تعیین شد. این اندازه‌گیری‌ها به منظور پایش تغییرات سطح مقطع آبکند در طول دوره مطالعه انجام گردید تا ضمن اطمینان از فعال بودن فرسایش آبکندهی در آبکندهای انتخاب شده، بتوان وقوع تغییرات ناگهانی سطح مقطع در اثر عوامل ناشناخته در طول مدت مطالعه را نیز شناسایی کرد. در طول دو سال مورد بررسی میانگین بارش سالانه منطقه اُرتاداغ، ملاحمد و سرچم به ترتیب 371، 277 و 296 میلی‌متر بود که از نظر آماری در منطقه اُرتاداغ بیشتر از میانگین بلندمدت و در دو منطقه ملاحمد و سرچم کمتر از آن است (جدول شماره 1). با اندازه‌گیری تغییرات ابعاد هندسی آبکندها افزایش

تدریجی آن در طول دو سال مشاهده شد که این افزایش پس از 8 دوره اندازه‌گیری مستمر 3 ماهه تغییر قابل توجه در ابعاد سطح مقطع آبکندها را نشان می‌داد، به همین دلیل دوره دو ساله به عنوان طول مدت بررسی انتخاب گردید. سطح مقطع آبکندها در چهار نقطه ذکر شده در طول هر آبکند در دو مقطع زمانی به فاصله دو سال (فروردین 1392 و فروردین 1394) تعیین شد. برای این منظور در هر مقطع، با قرار دادن یک شاخص کاملاً عمودی از کف تا دهانه آبکند (به کمک تراز حبابی)، عرض آبکند در فواصل ده سانتی‌متری عمق تعیین گردید. به این ترتیب مساحت سطح مقطع با دقت یک دسی متر مربع (10×10 سانتی‌متر) در دو مقطع زمانی به فاصله دو سال محاسبه شد. با تفاضل سطح مقطع آبکندها بین دو مقطع زمانی اندازه‌گیری، افزایش سطح مقطع مقاطع به دست آمد. در این پژوهش از افزایش مساحت سطح مقطع آبکندها در 4 نقطه از طول آن در طی دو سال که نشان دهنده فرسایش خاک در اثر ریزش دیواره‌های آبکند و کنده شدن بستر آبکند در اثر جریان رواناب در این مدت زمانی است، به عنوان شاخص گسترش آبکند استفاده شده است (8).

در ادامه از چهار نقطه از طول آبکندهای منتخب که مساحت سطح مقطع آنها ثبت شده بود نمونه خاک دست خورده و دست نخورده سطحی و زیر سطحی (از دو عمق 0-30 سانتی‌متر و 30-60 سانتی‌متر) برداشت شد. عمق متوسط آبکندهای منتخب در منطقه اُرتاداغ یک متر، در ملاحمد 0/8 متر و در سرچم 0/9 متر بود و دو عمق نمونه‌برداری خاک (0-30 و 30-60 سانتی‌متر) در مناطق نیمه خشک معادل افق‌های A و B خاک دیواره آبکندها هستند که حداکثر خاک‌سازی در آنها انجام شده و تأثیر خاک در افزایش سطح مقطع آبکندها عمدتاً زیر تأثیر این لایه‌ها می‌باشد (28). همچنین مقاومت برشی نزدیک اشباع ( $SS^1$ ) خاک با استفاده از ابزار پره برشی (مدل H605) در دو عمق سطحی و زیرسطحی نقاط مورد نظر در آبکندهای منتخب به صورت صحرائی اندازه‌گیری شد (20). دستگاه پره برشی دارای پره‌های قابل تعویض براساس مقدار مقاومت برشی خاک می‌باشد که پس از اشباع مصنوعی خاک تا حد نزدیک اشباع پره متصل به صفحه مدرج اندازه‌گیری به داخل خاک فرو برده شده و با چرخاندن پره، عدد نمایش داده شده افزایش می‌یابد، با رسیدن به حد برش خاک مقدار عدد نمایش داده شده ثابت باقی می‌ماند که معادل مقاومت برشی بر حسب کیلو پاسگال است (20). برای هر نمونه بافت خاک به روش هیدرومتری با قرائت چهار زمانه و درصد رس قابل پراکنش در آب (Dclay) به روش پیپت تعیین شد، منحنی توزیع اندازه ذرات اولیه خاک ( $PSD^2$ ) در محدوده 4-0/1 میلی‌متر به روش الک تر و در محدوده 0/1-0/001 میلی‌متر به روش پیپت

استخراج و ادامه تحلیل عاملی با آنها صورت می‌گیرد (6). بیشترین واریانس داده‌ها مربوط به عامل‌های نهایی است و در هر عامل نهایی، می‌توان مهمترین ویژگی‌ها که بیشترین همبستگی با آن عامل دارند را تعیین کرد. به این ترتیب در هر منطقه از بین مجموعه ویژگی‌های خاک که بر افزایش سطح مقطع آبکندها مؤثر بودند، مهمترین ویژگی‌ها انتخاب شدند (8). با تعیین مهمترین ویژگی‌های خاک مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکندها توسط تحلیل عاملی، رگرسیون گام به گام بین این مجموعه ویژگی‌ها و افزایش سطح مقطع آبکندها برای هر منطقه انجام و براساس ضریب رگرسیون هر ویژگی، شدت اثر آن ویژگی بر افزایش سطح مقطع آبکندها تعیین شد (36). تحلیل‌های آماری بالا نیز با استفاده از نرم افزار SPSS19 انجام گردید.

### نتایج و بحث

ابتدا تأثیر توپوگرافی بر فرسایش آبکندی با دو روش آستانه توپوگرافی و رابطه تراکم آبکندها با طبقات شیب، بررسی شد. در شکل 2 نقشه توزیع آبکندها در طبقات شیب و در جدول 2 درصد سطح و تراکم آبکند طبقات شیب برای سه منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین روند تغییرات تراکم آبکندها در 5 طبقه شیب نیز برای این سه منطقه در شکل 3 ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در منطقه ملاحمد با افزایش شیب تراکم آبکندها افزایش یافته است در حالی که در منطقه آرتاداغ تا شیب 20-30 درصد تراکم افزایش و پس از آن کاهش پیدا کرده است و بیشترین تراکم آبکند در این طبقه وجود دارد و در منطقه سرچم روند خاصی بین شیب و تراکم آبکند مشاهده نمی‌شود و تراکم‌های بیشتر در شیب کمتر مشاهده می‌شود. این روندها نشان می‌دهد فرسایش آبکندی در منطقه ملاحمد تابع شیب زمین می‌باشد، بنابراین انرژی جریان رواناب سطحی می‌تواند در تشکیل آن نقش مهمی داشته باشد. در آرتاداغ هر چند افزایش شیب در افزایش تراکم آبکندها نقش دارد، ولی این روند پیوسته نمی‌باشد. این امر نشان می‌دهد انرژی رواناب سطحی به تنهایی عامل فرسایش آبکندی نیست و ممکن است سایر عوامل مانند جریان‌های زیر سطحی آب نیز بر آن مؤثر بوده و حداکثر انرژی رواناب سطحی و جریان‌های زیرسطحی در شیب 20-30 درصد اتفاق افتاده و بیشترین فرسایش آبکندی را موجب شده است. حسین زاده و همکاران (18) نیز در مناطق دامنه‌ای استان مازندران، تأثیر افزایش شیب بر افزایش تراکم آبکند را گزارش نمودند و بیشترین تراکم آبکند را در شیب 20-30 درصد مشاهده کردند. توسعه بیشتر آبکندها در طبقه شیب 5-20 درصد نیز در شرایط مشابه این منطقه گزارش شده است (33). در سرچم عدم وجود رابطه بین طبقات شیب و تراکم آبکندها نشان می‌دهد فرسایش آبکندی رابطه ضعیفی با انرژی رواناب سطحی دارد و احتمالاً جریان زیرسطحی آب و فرسایش تونلی دارای تأثیر بیشتری می‌باشند.

در نمونه خاک‌های پراکنده شده با هگزا متافسفات سدیم تعیین شد (16). با استفاده از منحنی دانه‌بندی پارامترهای درصد شن درشت ( $C_{sand}^{(1)}$ ، 0/1 تا 2 میلی‌متر)، درصد شن خیلی ریز ( $C_{vfSand}^{(2)}$  کوچکتر از 0/1 میلی‌متر)، درصد مجموع سیلت و شن خیلی ریز ( $Silt+vfSand$ )، ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنا ( $C_c$ ) نمونه خاک‌ها تعیین گردید (17). همچنین با استفاده از دستگاه صفحات فشاری رطوبت نمونه‌های دست نخورده خاک در مکش‌های 0، 10، 30، 50، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال تعیین شد و با برازش معادله وان‌گن‌اختن به داده‌های آزمایشی توسط نرم افزار RETC شاخص شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف ( $S$  index) به دست آمد (9). با انجام الک تر خاکدانه نمونه‌های دست نخورده به روش کمپر و روزنا (19) و انجام الک تر دوگانه به روش مارکویز و همکاران (21)، شاخص‌های پایداری ساختمان خاک شامل میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، شاخص پایداری خاکدانه (SI)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA%)، شاخص خاکدانه‌های پایدار (SAI%) و شاخص خاکدانه‌های درشت پایدار (SMAI%) تعیین شد (21). با انجام آزمایش حدود اتربرگ شاخص‌های حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI)، و از نسبت PI به درصد رس، شاخص فعالیت (Activity) محاسبه شد (17).

پس از تعیین 17 ویژگی فیزیکی و مکانیکی فوق در نمونه خاک‌های سطحی و زیر سطحی آبکندهای منتخب مناطق مورد مطالعه، تأثیر این ویژگی‌ها بر افزایش سطح مقطع آبکندها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک آبکندها و تغییر سطح مقطع آن‌ها در طول 2 سال (93-1392) انجام شد. برای انتخاب مهمترین دسته از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مؤثر بر گسترش آبکند از بین 17 ویژگی مورد بررسی خاک، از تحلیل عاملی به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی PCA استفاده شد (8). برای تأیید مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی، شاخص اندازه کفایت نمونه‌گیری کایزر مایر آلکین ( $KMO^3$ ) برای مجموعه داده‌های مورد نظر تعیین شد و سپس اقدام به تحلیل عاملی گردید (26).

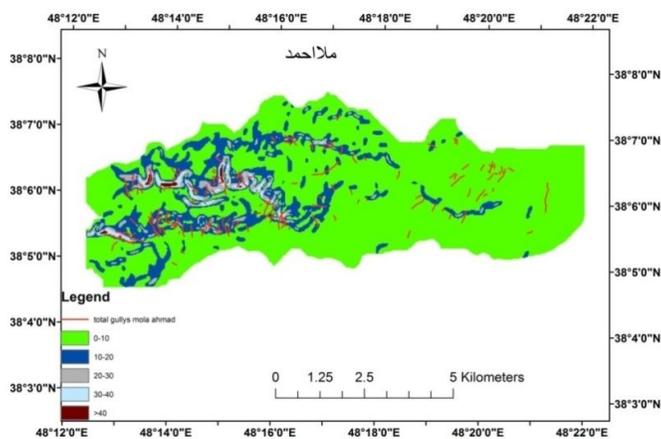
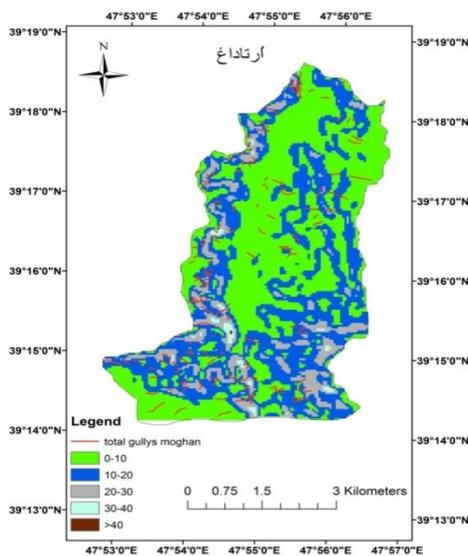
در تحلیل عاملی از همبستگی درونی بین مجموعه ویژگی‌های مورد بررسی استفاده شده و عامل مشترک بین مجموعه‌ای از ویژگی‌ها تشخیص داده می‌شود و فرض می‌شود تغییرات مجموعه‌ای از متغیرها ناشی از آن عامل مشترک است (26). در تحلیل عاملی به روش PCA ابتدا به ازاء هر متغیر که ویژگی مورد بررسی است، یک عامل ساخته می‌شود (17 عامل اولیه در این پژوهش). سپس عامل‌هایی که مقدار ویژه بیش از یک دارند به عنوان عامل‌های نهایی

- 1- Coarse Sand
- 2- Very Fine Sand
- 3- Kaiser Meyer Olkin

جدول 2- درصد سطح و تراکم آبکنده 5 طبقه شیب در سه منطقه مورد مطالعه

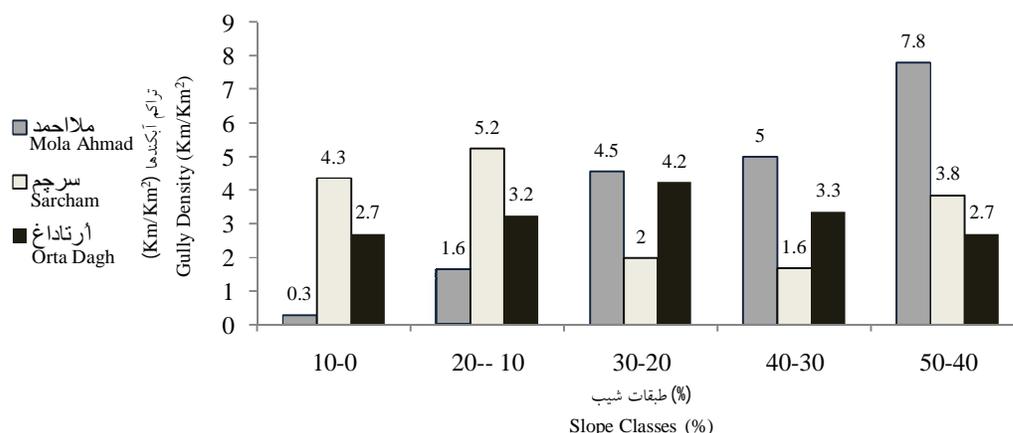
Table 2- Percentage and density of gullies at 5 slope classes in three study regions

نام منطقه Region	طبقه شیب Slope class	0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	>40%
اُرتاداغ (Orta Dagh)	درصد سطح	49	39	11	0.7	0.3
	تراکم آبکنده (Km/Km <sup>2</sup> )	2.7	3.2	4.2	3.3	2.7
ملاحمد (Mola Ahmad)	درصد سطح	78	17	3.2	1.1	0.7
	تراکم آبکنده (Km/Km <sup>2</sup> )	0.3	1.6	4.5	5	7.8
سرچم (Sarcham)	درصد سطح	44	35	12	3.3	5.7
	تراکم آبکنده (Km/Km <sup>2</sup> )	4.3	5.2	2	1.6	3.8



شکل 2- توزیع آبکندها در 5 طبقه شیب

Figure 2- Gully's distribution in 5 slope classes



شکل 3- روند تغییرات تراکم آبکندها در 5 طبقه شیب در سه منطقه مورد مطالعه  
Figure 3- Changes of gully density at 5 slope classes in 3 study regions

تشکیل آبکندها و مثبت بودن آن نشان دهنده غالب بودن جریان زیرسطحی در تشکیل آبکندها می‌باشد (40). در جدول 3 رابطه توانی آستانه توپوگرافی به همراه ضریب تبیین و سطح معنی‌داری این روابط در سه منطقه مورد مطالعه ارائه شده است، همچنین در این جدول میانگین و دامنه تغییرات مساحت و شیب حوضه زه‌کشی آبکندها که برای محاسبه آستانه توپوگرافی استفاده شده‌اند نیز برای سه منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. برای محاسبه شاخص آستانه توپوگرافی از مساحت و شیب متوسط حوضه زه‌کشی آبکندها استفاده می‌شود (28 و 37) و همان‌طور که گفته شد در این مطالعه برای محاسبه شیب از متوسط تانژانت پیکسل‌های حوضه زه‌کشی آبکندها در نقشه شیب با دقت 5 در 5 متر استفاده شده است.

شهریور و حسن پور (34) نیز نشان دادند در مناطقی که وجود مواد محلول در خاک عامل توسعه آبکند بود، توسعه آبکند در شیب‌های کم بیشتر بود و طبقه شیب 11-15 درصد دارای بیشترین فرسایش آبکندی بود. افزایش تنش برشی رواناب در زمین‌های پرشیب یکی از عوامل اصلی فرسایش آبکندی در منطقه است که نشان دهنده تأثیر شیب زمین بر گسترش آبکندها می‌باشد (3) که این حالت در مورد منطقه ملاحمد و اُرتاداغ وجود دارد ولی در مورد سرچم رابطه بین شیب زمین و شدت فرسایش آبکندی مشاهده نمی‌شود. شاخص آستانه توپوگرافی، که بیانگر رابطه مساحت (A) در برابر شیب (S) حوضه آبخیز آبکندهای هر منطقه به صورت  $S = aA^b$  می‌باشد نیز نتایج رابطه طبقات شیب با تراکم آبکندها را تأیید می‌کند. طبق این شاخص منفی بودن توان b بیانگر غالب بودن جریان سطحی در

جدول 3- رابطه توانی آستانه توپوگرافی و اطلاعات شیب و مساحت حوضه زه‌کشی آبکندها برای سه منطقه مورد مطالعه  
Table 3- Power relation of topographic threshold, slope and area of gully's watershed for three study regions.

	اُرتاداغ Orta Dagh	ملاحمد Mola Ahmad	سرچم Sarcham
Topography threshold آستانه توپوگرافی	$S = 0.141 A^{-0.111}$	$S = 0.1135 A^{-0.302}$	$S = 0.084 A^{0.0979}$
ضریب تبیین R <sup>2</sup>	0.13	0.34	0.18
P Value سطح معنی‌داری	0.07	0.00	0.049
Mean of slope (%) میانگین شیب (درصد)	7	10	11
Range of Slope (%) دامنه تغییرات شیب (درصد)	4-14	4-13	8-14
Mean of area (ha) میانگین مساحت (هکتار)	16	18	24
Range of area (ha) دامنه تغییرات مساحت (هکتار)	14-21	14-23	21-32

منفی است و می‌توان گفت که جریان سطحی رواناب فرآیند هیدرولوژیکی غالب ایجاد آبکندهای این مناطق است. در اُرتاداغ با توجه به معنی‌دار نبودن این رابطه می‌توان گفت در کنار جریان سطحی رواناب، جریانات زیر سطحی نیز در تشکیل آبکندها نقش

در شاخص آستانه توپوگرافی، علامت منفی توان b نشان دهنده تأثیر رواناب سطحی در تشکیل آبکندهای منطقه و علامت مثبت آن بیانگر تأثیر جریان زیرزمینی در تشکیل آبکند است (28، 6، 2 و 1). مشاهده می‌شود در منطقه اُرتاداغ و ملاحمد توان b آستانه توپوگرافی

متر مربع و سرچم  $0/8$  متر مربع بود که به ترتیب معادل 41، 44 و 64 درصد مساحت اولیه سطح مقاطع بود. در جدول 4 میانگین و دامنه تغییرات ویژگی‌های مورد بررسی خاک سطحی و زیرسطحی آبکندها برای سه منطقه ارائه شده است. به طور کلی مشاهده شد میانگین اکثر ویژگی‌های خاک در نمونه خاک‌های سطحی آبکند و حوضه زه‌کشی آبکندها نزدیک هم بود ولی مقدار آن‌ها معمولاً در خاک زیرسطحی کمتر می‌باشد، در حالی که مقاومت برشی نزدیک اشباع خاک در خاک زیر سطحی بیشتر است. ناچترگایل و پواسن (2002) نیز مقاومت برشی بیشتر خاک در افق‌های زیر سطحی خاک نسبت به افق سطحی را گزارش نمودند.

به منظور بررسی مستقیم تأثیر ویژگی‌های خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندها، همبستگی بین ویژگی‌های خاک با افزایش سطح مقطع آبکندها بررسی گردید که در جدول 5 ارائه شده است. مشاهده می‌شود در بین ویژگی‌های مکانیکی خاک LL، PL و مقاومت برشی (SS) در هر سه منطقه و در هر دو عمق مورد بررسی با افزایش سطح مقطع آبکندها همبستگی معنی‌دار منفی دارند. این امر نشان می‌دهد با افزایش LL و PL رطوبت بیشتری برای تبدیل خاک از حالت جامد به خمیری و روانی لازم می‌باشد، بنابراین خاک دیرتر تغییر حالت داده و گسترش آبکند محدود می‌گردد. با افزایش مقاومت برشی نیز مقاومت خاک در برابر تنش برشی حاصل از جریان رواناب افزایش یافته و افزایش سطح مقطع آبکندها محدود می‌گردد. بیلی و درامیس (3) تأثیر افزایش تنش برشی جریان بر گسترش آبکند را بررسی نمودند و بر تأثیر مقاومت در برابر جریان برای کاهش گسترش آبکندها تأکید کردند. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین افزایش سطح مقطع آبکندها و شاخص فعالیت نشان می‌دهد، با افزایش این شاخص میزان رس‌های انبساط‌پذیر و ضریب انبساط‌پذیری خاک بیشتر شده و با جذب آب پایداری آن در برابر عوامل فرساینده کاهش می‌یابد (17). در بین اجزاء مختلف اندازه ذرات بیشترین تأثیر بر افزایش سطح مقطع آبکندها را درصد رس قابل انتشار در آب داشت که به جز خاک سطحی منطقه ملاحمد در سایر موارد معنی‌دار بود. سایر اجزاء اندازه ذرات نیز مقادیر مختلفی از همبستگی را نشان دادند.

در پژوهش‌های مختلف بر تأثیر ساختمان خاک بر گسترش آبکندها، تأکید شده است، که در این پژوهش‌ها از شاخص‌هایی مانند MWD، GMD، AS و WSA استفاده شده است (6، 11 و 13). در این پژوهش شاخص‌های بیشتری از پایداری ساختمان خاک مورد بررسی قرار گرفت و به طور کلی همبستگی منفی و معنی‌دار بین این شاخص‌ها و افزایش سطح مقطع آبکندها گزارش شد که بیانگر کاهش گسترش آبکند با افزایش پایداری ساختمان خاک است. در بین شاخص‌های مختلف مورد استفاده همبستگی بسیار بالایی درصد خاکدانه‌های پایدار (SAI) نسبت به سایر شاخص‌ها بارزتر بود.

داشته است. وجود رابطه منفی بین سطح و شیب حوضه آبکندها با ضریب تعیین  $0/02$  و  $0/25$  نیز گزارش شده است که به ترتیب بیانگر تأثیر کم و زیاد رواناب سطحی بر تشکیل آبکند بوده است (1 و 6). برخلاف دو منطقه فوق، در سرچم توان b مثبت و فرآیند هیدرولوژیکی غالب ایجاد آبکندها، جریان زیرسطحی آب و فرآیندهایی مانند تونلی شدن و انحلال لایه‌های زیرین خاک می‌باشد. بیاتی (2) نیز در شرق استان اردبیل توان b مثبت را برای آستانه توپوگرافی مشاهده کرده و بر اساس آن تشکیل آبکند در اثر جریان زیرزمینی آب را گزارش کرده است.

با استفاده از آستانه توپوگرافی، فرآیند هیدرولوژیکی غالب ایجاد آبکندها در منطقه ملاحمد جریان رواناب سطحی تشخیص داده شد و از آنجا که با افزایش شیب زمین انرژی جریان رواناب افزایش می‌یابد، بنابراین در طبقات شیب بالاتر تراکم آبکند بیشتری وجود دارد. در اُرتاداغ جریان سطحی همراه با جریان زیر سطحی فرآیند هیدرولوژیکی غالب ایجاد آبکندها می‌باشد، بنابراین در اینجا نیز با افزایش شیب تراکم آبکند افزایش می‌یابد ولی این روند تا جایی ادامه می‌یابد که جریان زیر سطحی نیز وجود دارد (شیب 20-30 درصد)، اما در شیب‌های بیشتر که جریان سطحی غالب است تراکم آبکندها نیز کاهش می‌یابد. در سرچم علامت توان b آستانه توپوگرافی مثبت است و جریان زیرسطحی آب فرآیند هیدرولوژیکی غالب ایجاد آبکندها تعیین شد و رابطه‌ای بین شیب و تراکم آبکند نیز وجود ندارد. محققین دیگر نیز رابطه آستانه توپوگرافی با افزایش انرژی جریان در اثر افزایش شیب زمین و گسترش آبکند را گزارش نموده و بیان کردند که وجود رابطه منفی بیشتر بین شیب زمین و مساحت حوضه آبخیز آبکند در طبقات شیب بیشتر، قویتر است (23)، در حالی که در مناطق دارای آستانه توپوگرافی با توان مثبت ارتباط بین جریان رواناب سطحی با تشکیل آبکند معنی‌دار نیست (35)، که با نتایج این پژوهش انطباق دارند. همان‌طور که مشاهده شد نتایج هر دو روش رابطه طبقات شیب با تراکم آبکندها و شاخص آستانه توپوگرافی، تأثیر توپوگرافی بر نوع جریان هیدرولوژیکی ایجاد کننده آبکندها سه منطقه را مشابه ارزیابی کردند. بنابراین می‌توان گفت آستانه توپوگرافی نیز نتایج رابطه طبقات شیب با تراکم آبکندها را در سه منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند.

پس از بررسی تأثیر توپوگرافی، تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندهای منتخب در سه منطقه مورد نظر ارزیابی شد. همان‌طور که گفته شد، در این پژوهش از عامل افزایش سطح مقطع آبکندهای منتخب در چهار نقطه از طول آن‌ها در مدت دو سال مورد بررسی، به عنوان شاخص گسترش آبکند استفاده شد (14). میانگین افزایش سطح مقطع آبکندهای منتخب در طول دو سال مورد بررسی برای اُرتاداغ  $0/9$  متر مربع، ملاحمد  $0/6$

جدول 4- میانگین و دامنه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک سطحی و زیر سطحی آبکندهای سه منطقه

Table 4- Mean and range of surface and subsurface soil physical and mechanical properties for gullies in three regions

ویژگی‌های خاک Soil Properties	سرچم Sarcham		ملا احمد Mola Ahmad		آرتاداغ Orta Dagh	
	خاک سطحی Surface soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil
% LL	38 (28-58)	37 (20-50)	33 (22-59)	36 (26-57)	40 (32-65)	36 (26-55)
% PL	24 (19-31)	24 (16-31)	24 (19-33)	25 (19-37)	26 (21-31)	24 (17-30)
% PI	14 (9-20)	14 (3-23)	9 (3-17)	10 (0-20)	13 (7-27)	11 (7-17)
Activity	0.5 (0.3-1)	0.47 (0.17-0.9)	0.68 (0.27-1.2)	0.6 (0-1.2)	0.55 (0.3-0.8)	0.45 (0.24-0.75)
SS (KPa)	6 (2-17)	7 (3-15)	7 (1-15)	7 (2-14)	7 (2-12)	8 (3-14)
Cu	65 (30-163)	130 (2-827)	40 (21-57)	43 (3-63)	61 (30-120)	71 (33-200)
Cc	6.7 (0.1-38)	2 (0-16)	5 (1-15)	5 (1-15)	11 (2-46)	9 (0.1-37)
%C Sand	19 (3-51)	21 (4-61)	21 (4-35)	19 (4-34)	18 (2-53)	17 (3-40)
%vfSand	33 (13-75)	27 (7-54)	29 (17-38)	28 (11-45)	38 (8-68)	30 (8-52)
%Dclay	15 (2-39)	15 (3-34)	48 (19-96)	42 (11-95)	14 (2-27)	17 (7-32)
%silt+vfSand	52 (27-79)	49 (17-69)	64 (51-78)	62 (49-81)	56 (32-79)	52 (19-71)
MWD (mm)	0.5 (0.1-1.1)	0.3 (0.1-0.9)	0.9 (0.2-3.3)	1.1 (0.1-5.6)	2.6 (0.3-5.1)	0.7 (0.15-1.3)
%SAI	74 (67-77)	57 (0-79)	69 (50-76)	60 (27-77)	68 (48-77)	64 (48-77)
%SMaI	5 (0-33)	2 (0-11)	6 (1-21)	7 (0-22)	8 (0-31)	6 (1-16)
%WSA	12 (1-80)	8 (1-32)	25 (2-75)	23 (3-93)	46 (2-86)	20 (3-45)
SI	3 (1-5)	1.5 (0.5-3)	5 (2-15)	2.7 (0.5-9)	4 (0.7-8)	2 (0.4-5.5)
S index	0.065 (0.03-0.16)	0.084 (0.32-0.848)	0.103 (0.045-0.23)	0.082 (0.045-0.152)	0.063 (0.002-0.105)	0.074 (0.045-0.095)

\* Parenthesis (min-max)

\* داخل پرانتز (حداقل - حداکثر)

برای انجام تحلیل عاملی، با شاخص KMO مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در ردیف آخر جدول 8 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود KMO تمام مجموعه داده‌ها بیش از 0/5 می‌باشد، بنابراین در هر سه منطقه برای مجموعه ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی می‌توان از تحلیل عامل استفاده کرد (26).

با انجام تحلیل عاملی، جدول کل واریانس تبیین شده چرخش یافته برای داده‌های خاک سطحی سه منطقه در جدول 6 و برای خاک زیرسطحی در جدول 7 ارائه شده است. برای استخراج عامل‌ها از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شده است. مشاهده می‌شود برای ویژگی‌های خاک سطحی در منطقه آرتاداغ، ملا احمد و سرچم به ترتیب 4، 6 و 5 عامل نهایی و برای خاک زیرسطحی 5، 5 و 4 عامل نهایی استخراج شده است که مقدار ویژه، درصد واریانس و درصد واریانس تجمعی عامل‌ها نیز در جدول 6 و 7 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عامل‌های نهایی مستخرج در تمام مجموعه داده‌ها 70 تا 80 درصد کل تغییرات متغیرها (ویژگی‌های خاک) را تبیین می‌کنند، بنابراین عوامل نهایی مستخرج به خوبی می‌توانند برای کاهش حجم داده‌ها و انتخاب مهمترین ویژگی‌ها از بین کل ویژگی‌های مورد بررسی استفاده گردند. همچنین تعداد عوامل نهایی مستخرج، تعداد گروه اصلی متغیرها که بر افزایش سطح مقطع آبکندها مؤثر هستند را نشان می‌دهد (8 و 10).

این امر نشان می‌دهد که استفاده از این شاخص به علت تعیین مستقیم پایداری خاکدانه‌ها توسط انجام آزمایش الک تر دوگانه (21) نسبت به سایر روش‌ها مانند MWD که پایداری خاکدانه را با یک بار الک تر تعیین می‌کنند (19)، برای بررسی گسترش آبکند مفیدتر است. شاخص شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف (Sindex) نیز در تمام موارد همبستگی منفی معنی‌دار با افزایش سطح مقطع آبکندها داشت. شاخص S یکی از شاخص‌های کیفیت خاک بوده و بیشتر بودن آن به معنی توزیع مناسب منافذ ریز و درشت خاک، خاکدانه‌سازی مناسبتر و در نتیجه مناسب بودن خاک از نظر انتقال هوا و آب و تأمین رشد گیاه می‌باشد (9 و 30). بنابراین با افزایش این شاخص مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی خاک بهبود یافته و مقاومت آن در برابر توسعه آبکند بیشتر می‌گردد. گاوو و همکاران (15) نیز بیان کردند که در آبکندهای مناطق کوهستانی بالادست، شرایط رطوبتی خاک تا عمق 80 سانتی‌متری متأثر از خصوصیات آبکند است.

پس از بررسی اولیه همبستگی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک با افزایش سطح مقطع آبکندها، مشاهده گردید که به طور کلی مجموعه ویژگی‌های خاک بررسی شده با افزایش سطح مقطع آبکندها ارتباط دارند و در صورت مناسب بودن داده‌ها می‌توان از بین آن‌ها مهمترین دسته ویژگی‌ها را با تحلیل عاملی انتخاب کرد. بنابراین مناسب بودن داده‌های خاک سطحی و زیرسطحی هر منطقه

جدول 5- همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک سطحی و زیرسطحی آبکندها با افزایش سطح مقطع آبکندها در سه منطقه  
Table 5- Correlation between surface and subsurface soil physical and mechanical properties of gullies with their increasing the cross section in three regions

ویژگی‌های خاک Soil Properties	سرچم Sarcham		ملا احمد Mola Ahmad		اُرتاداغ Orta Dagħ	
	خاک سطحی	خاک زیرسطحی	خاک سطحی	خاک زیرسطحی	خاک سطحی	خاک زیرسطحی
	Surface soil	Subsurface soil	Surface soil	Subsurface soil	Surface soil	Subsurface soil
% LL	-0.71**	-0.50**	-0.47**	-0.43**	-0.7**	-0.48**
% PL	-0.59**	-0.46**	-0.52**	-0.44**	-0.68**	-0.44*
% PI	-0.56**	-0.32*	-0.07 <sup>ns</sup>	-0.18 <sup>ns</sup>	-0.5**	-0.16 <sup>ns</sup>
Activity	0.60**	0.67**	0.62**	0.70**	0.69**	0.69**
SS (KPa)	-0.60**	-0.60**	-0.58**	-0.58**	-0.67**	-0.67**
Cu	0.11 <sup>ns</sup>	0.40*	0.30*	-0.33*	<sup>ns</sup> -0.07	0.02 <sup>ns</sup>
Cc	-0.15 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>	0.12 <sup>ns</sup>	0.69**	-0.08 <sup>ns</sup>
%C Sand	<sup>ns</sup> 0.15	0.50**	0.30*	<sup>ns</sup> 0.06	-0.39*	0.46*
%vfSand	<sup>ns</sup> 0.22	<sup>ns</sup> -0.17	0.32*	0.41**	0.52**	0.42**
%Dclay	0.58**	0.45*	<sup>ns</sup> 0.25	0.63**	0.66**	0.81**
%silt+vfSand	<sup>ns</sup> -0.03	<sup>ns</sup> -0.13	<sup>ns</sup> -0.09	0.39**	0.44*	<sup>ns</sup> -0.04
MWD (mm)	<sup>ns</sup> 0.21	<sup>ns</sup> 0.25	<sup>ns</sup> -0.30	<sup>ns</sup> -0.14	-0.53**	-0.55**
%SAI	-0.81**	-0.51**	-0.83**	-0.67**	-0.71**	-0.68**
%SMaI	-0.32*	-0.13 <sup>ns</sup>	-0.43**	-0.35*	-0.44*	-0.46**
%WSA	-0.15 <sup>ns</sup>	-0.34*	-0.09 <sup>ns</sup>	-0.36*	-0.56**	-0.50**
SI	-0.41**	-0.17 <sup>ns</sup>	-0.39**	-0.48**	<sup>ns</sup> 0.28	-0.44*
S index	-0.43**	-0.60**	-0.50**	0.47**	-0.48**	-0.68**

\*\* , \* , and ns به ترتیب معنی‌دار در سطح 1% ، 5% و غیر معنی‌دار

\*\* , \* , and ns are Significant at P< 0.01, 0.05 and non significant, respectively

جدول 6- کل واریانس تبیین شده دوران یافته داده‌های خاک سطحی سه منطقه

Table 6- Rotated total variance explained of surface soil for three regions

عامل Component	سرچم Sarcham			ملا احمد Mola Ahmad			اُرتاداغ Orta Dagħ		
	مقدار ویژه	واریانس عامل%	واریانس تجمعی%	مقدار ویژه	واریانس عامل%	واریانس تجمعی%	مقدار ویژه	واریانس عامل%	واریانس تجمعی%
	Eigenvalue	Variance of component (%)	Cumulative variance (%)	Eigenvalue	Variance of component (%)	Cumulative variance (%)	Eigenvalue	Variance of component (%)	Cumulative variance (%)
1	3.222	18.950	18.950	3.248	19.104	19.104	3.641	21.261	21.261
2	2.67	16.236	35.187	2.53	14.885	33.989	3.290	19.355	40.616
3	2.664	15.668	50.855	2.47	14.528	48.517	3.225	18.970	59.586
4	2.454	14.436	65.292	1.935	11.382	59.898	2.265	13.326	72.912
5	2.050	12.056	77.348	1.778	10.46	70.358			
6				1.491	8.773	79.131			

جدول 7- کل واریانس تبیین شده دوران یافته داده‌های خاک زیر سطحی سه منطقه

Table 7- Rotated total variance explained of subsurface soil for three regions

عامل Component	سرچم Sarcham			ملا احمد Mola Ahmad			اُرتاداغ Orta Dagħ		
	مقدار ویژه	واریانس عامل%	واریانس تجمعی%	مقدار ویژه	واریانس عامل%	واریانس تجمعی%	مقدار ویژه	واریانس عامل%	واریانس تجمعی%
	Eigenvalue	Variance of component (%)	Cumulative variance (%)	Eigenvalue	Variance of component (%)	Cumulative variance (%)	Eigenvalue	Variance of component (%)	Cumulative variance (%)
1	3.814	22.436	22.436	2.865	16.851	16.851	4.063	23.899	23.899
2	3.774	22.198	44.635	2.633	15.491	32.342	3.602	21.186	45.085
3	2.261	19.185	63.819	2.556	15.034	47.377	2.445	14.384	59.469
4	1.346	7.918	71.736	2.547	14.982	62.359	1.887	11.102	70.571
5				2.152	12.661	75.020	1.541	9.067	79.637

دهنده رابطه متغیرها با این عوامل است (6). هر چه اشتراک بیشتر باشد داده‌های ویژگی مورد نظر برای تحلیل عامل مناسب‌تر است و حداقل مقدار آن بایستی 0/30 باشد (6).

در جدول 8 اشتراک هر متغیر با عامل‌های مستخرج ارائه شده است که نشان می‌دهد چه نسبتی از تغییرات هر ویژگی را عامل‌های نهایی مستخرج، تبیین می‌کنند (6). این مقادیر از مجموع مجذور همبستگی هر ویژگی با عامل‌های نهایی به دست می‌آید و نشان

جدول 8- جدول اشتراک ویژگی‌های مورد بررسی با عامل‌های مستخرج  
Table 8- Cummunalities table of soil properties with extracted factors

ویژگی‌های خاک	سرچم Sarcham		ملاحمد Mola Ahmad		اُرتاداغ Orta Dagh	
	خاک سطحی Surface soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil	خاک سطحی Surface soil	خاک زیر سطحی Subsurface soil
% LL	0.856	0.923	0.911	0.925	0.917	0.920
% PL	0.694	0.913	0.841	0.821	0.731	0.900
% PI	0.554	0.836	0.856	0.873	0.836	0.937
Activity	0.893	0.761	0.860	0.764	0.539	0.853
SS (KPa)	0.612	0.785	0.554	0.598	0.694	0.741
Cu	0.842	0.883	0.867	0.854	0.669	0.829
Cc	0.832	0.679	0.666	0.765	0.821	0.777
%C Sand	0.869	0.912	0.923	0.877	0.891	0.662
%vfSand	0.889	0.833	0.783	0.801	0.761	0.653
%Dclay	0.731	0.817	0.730	0.660	0.609	0.754
%silt+vfSand	0.916	0.895	0.825	0.831	0.888	0.876
MWD (mm)	0.764	0.788	0.821	0.838	0.830	0.796
%SAI	0.797	0.702	0.810	0.822	0.638	0.789
%SMaI	0.737	0.802	0.659	0.784	0.637	0.741
%WSA	0.781	0.684	0.724	0.904	0.904	0.758
SI	0.516	0.655	0.783	0.829	0.787	0.694
S index	0.857	0.568	0.572	0.696	0.507	0.827
شاخص KMO داده‌ها	0.594	0.795	0.649	0.680	0.605	0.640

می‌باشد و به همین ترتیب از اهمیت عوامل بعدی و ویژگی‌های مربوط به آن کم می‌شود. به این ترتیب مجموعه ویژگی‌هایی از خاک که بر افزایش سطح مقطع آبکند مؤثر هستند، به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند که به ترتیب بیشترین اهمیت تا کمترین اهمیت را در تعیین تغییرات کل داده‌ها و در نتیجه افزایش سطح مقطع آبکندها دارند (1) و (8).

در مورد داده‌های خاک سطحی آبکندهای منطقه اُرتاداغ، مشاهده می‌شود در عامل نهایی اول ویژگی‌های مکانیکی خاک و شاخص S (SS)، LL، PI، Sindex) مهمترین ویژگی‌ها و پس از آن در عامل دوم و سوم ویژگی‌های مکانیکی، اندازه ذرات و پایداری خاکدانه (Cc، Activity، %vfSand، %SMaI، %C Sand و %Silt+vfSand) مهمترین ویژگی‌ها بوده و سایر ویژگی‌های فیزیکی مورد بررسی در اولویت‌های پایینتر قرار دارند. به همین ترتیب سه دسته از مهمترین ویژگی‌های خاک برای خاک زیر سطحی منطقه اُرتاداغ عبارتند از مجموعه شاخص‌های پایداری خاکدانه-ها و ویژگی‌های مکانیکی (MWD، Activity، SS، WSA و Dclay) و سایر شاخص‌های مکانیکی و پایداری خاکدانه‌ها (SMaI، SI، LL، PI و Cc) مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکندها را تشکیل می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمام ویژگی‌ها بیش از 50% تغییرات و در مورد بیشتر آن‌ها بیش از 80% تغییرات توسط عامل‌های نهایی تبیین می‌شود. بنابراین می‌توان با انتخاب ویژگی‌هایی که بیشترین همبستگی را با عامل‌های نهایی دارند مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر هر عامل را استخراج کرد و با تعیین مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر عامل‌های نهایی، مهمترین ویژگی‌های خاک که بیشترین تأثیر را بر کل تغییرات متغیرها دارند، انتخاب نمود (8).

در جدول 9 برای هر مجموعه داده‌ها، ویژگی‌هایی از خاک که بیشترین همبستگی را با هر یک از عوامل نهایی دارند به همراه میزان همبستگی آن‌ها ارائه شده است. ویژگی‌ها و همبستگی آن‌ها از ماتریس اجزای چرخش یافته، در PCA داده‌های خاک سطحی و زیرسطحی سه منطقه مورد بررسی، استخراج شده است. با توجه به اینکه عامل اول بیشترین تغییرات کل متغیرها را تبیین می‌کند (جدول 6 و 7)، گروه ویژگی‌هایی که بیشترین همبستگی را با آن عامل دارند مهمترین ویژگی‌های خاک می‌باشند. پس از عامل اول، عامل دوم بیشترین تغییرات را تبیین می‌کند و گروه ویژگی‌های مربوط به آن عامل، دومین دسته از مهمترین ویژگی‌های خاک

جدول 9- ویژگی‌های خاک دارای بیشترین همبستگی با عوامل چرخشی یافته (به دست آمده از ماتریس اجزای چرخشی یافته)

Table 9- Soil properties including the highest correlation with extracted rotated factors (obtained from rotated component matrix)

مناطق	عوامل	1	2	3	4	5	6
Regions	Components						
اُرتاداغ Orta Dagh	خاک سطحی Surface soil	LL=0.911 SS=0.693 S index=0.74 PI=0.84	Cc=0.805 Activity=0.759 vfSand=0.71 SMaI=0.70	Csand=0.906 Silt+vfSand=0.81			
	خاک زیر سطحی Subsurface soil	MWD=0.772 Activity=0.865 SS=0.778 WSA=0.669 Dclay=0.73	SMaI=0.81 SI=0.75 PL=0.75 LL=0.73 Cc=0.64	Cu=0.905 Silt+vfSand=0.85	PI=0.905	PI=0.905	
ملاحمد Mola Ahmad	خاک سطحی Surface soil	SAI=0.87 S index=0.65 PL=0.59 Activity=0.57 SS=0.55	C Sand=0.83 LL=0.83 PI=0.82 PL=0.55	vfSand=0.882 Activity=0.725	MWD=0.86 WSA=0.80	MWD=0.86 WSA=0.80	Cu=0.89
	خاک زیر سطحی Subsurface soil	S index=0.97 PI=0.844 SI=0.643	Dclay=0.72 Cc=0.7 vfSand=0.69 Activity=0.68 SI=0.62	PL=0.85 LL=0.74 SS=0.67 Sindex=0.61	Silt+vfSand=0.77 Csand=0.76 Cu=0.71	Silt+vfSand=0.77 Csand=0.76 Cu=0.71	
سرچم Sarcham	خاک سطحی Surface soil	Activity=0.87 SAI=0.78 Dclay=0.65 SS=0.59	Sindex=0.93 Cc=0.91	Cc=0.90 vfSand=0.72 SI=0.61	SMaI=0.80 Sindex=0.62	SMaI=0.80 Sindex=0.62	
	خاک زیر سطحی Subsurface soil	MWD=0.88 Cc=0.77 Cu=0.76 WSA=0.71 PI=0.65	Sindex=0.84 MWD=0.82	SMaI=0.85 vfSand=0.77 Silt+vfSand=0.67 Dclay=0.86			

کاهش گسترش آبکند، در مناطقی که جریان رواناب نقش تعیین کننده در تشکیل آبکندها دارد، اشاره کرده‌اند (3 و 20).

در سرچم از خاک سطحی به ترتیب ویژگی‌های مکانیکی و پایداری خاکدانه (Activity، SAI، Dclay و SS)، ویژگی‌های اندازه ذرات و شاخص S (Cc و Sindex) و اندازه ذرات (SI و vfSand، Cc) بیشترین اهمیت را در افزایش سطح مقطع آبکندها داشتند. از ویژگی‌های خاک زیرسطحی نیز پایداری خاکدانه و اندازه ذرات (MWD، Cc، WSA، PI) بیشترین اهمیت و پس از آن ویژگی‌های اندازه خاکدانه و شاخص S (MWD و Sindex) و در مرتبه بعدی اندازه ذرات و پایداری خاکدانه‌های درشت (SMaI، Silt+vfSand، vfSand و Dclay) بیشترین اهمیت را داشتند. مشاهده می‌شود در این منطقه که طبق شاخص آستانه توپوگرافی جریان زیرسطحی عامل اصلی تشکیل آبکند است، در کنار خصوصیات مکانیکی و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها، اندازه ذرات و ویژگی‌های رطوبتی خاک نیز که تعیین کننده شدت جریان رواناب درون خاک

در ملاحمد مهمترین ویژگی‌های خاک سطحی که توسط تحلیل عاملی تعیین شد به ترتیب اهمیت عبارتند از دسته اول مجموعه‌ای از ویژگی‌های مکانیکی، رطوبتی و پایداری خاکدانه (SAI، Sindex، PL، Activity و SS) و دسته دوم برخی ویژگی‌های مکانیکی و درصد شن درشت (Csand، LL، PL و PI). بنابراین مشاهده می‌شود به طور کلی ویژگی‌های مکانیکی بیشترین اهمیت را در افزایش سطح مقطع آبکندها دارند. در بین ویژگی‌های خاک زیر سطحی این منطقه در عامل اول ویژگی‌های مکانیکی، پایداری خاکدانه و شاخص S (Sindex، PI و SI) و در عامل دوم ویژگی‌های مکانیکی و اندازه ذرات (SI، Dclay، Cc، vfSand و Activity) بیشترین اهمیت را دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دو منطقه فوق که جریان رواناب سطحی نقش اصلی را در تشکیل آبکند دارد، به‌طور کلی دو دسته ویژگی‌های مکانیکی و شاخص‌های پایداری خاکدانه خاک سطحی و زیرسطحی، ویژگی‌های مهم خاک در افزایش سطح مقطع آبکندها می‌باشند. سایر محققین نیز بر تأثیر مقاومت مکانیکی خاک بر

هنگامی استفاده می‌شود که بخواهیم از بین مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل، متغیرهایی را که به بهترین وجه متغیر وابسته را پیش‌بینی می‌کنند پیدا کنیم (35). در اینجا متغیر وابسته افزایش مساحت سطح مقطع آبکند و متغیرهای مستقل شامل مجموعه ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی است که با استفاده از PCA به عنوان مهمترین ویژگی‌های خاک در ارتباط با افزایش سطح مقطع آبکندها تشخیص داده شد.

است اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. تأثیر اندازه ذرات بر شدت جریان زیرزمینی و گسترش آبکند در برخی پژوهش‌ها گزارش شده است (28).

پس از انتخاب مهمترین ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی با استفاده از PCA، به منظور تعیین شدت تأثیر این ویژگی‌ها بر افزایش سطح مقطع آبکندها، رگرسیون گام به گام بین این مجموعه از ویژگی‌ها و افزایش سطح مقطع آبکندها برقرار شد و ضریب رگرسیون هر ویژگی به دست آمد (36). از رگرسیون گام به گام

جدول 10- مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی افزایش سطح مقطع آبکند با مهمترین ویژگی‌های خاک به دست آمده از PCA  
Table 10- Regression models for predicting increasing the gully's cross section from soil properties obtained by PCA

منطقه Region	متغیرهای مستقل Independent variables	RMSE	R <sup>2</sup>	مدل رگرسیونی پیش‌بینی افزایش سطح مقطع آبکند Regressin models of gullys cross section Prediction
آرتاداغ Dagh	مهمترین ویژگی‌های خاک سطحی و زیر سطحی بدست آمده از PCA The most important properties of surface and subsurface soil obtained from PCA	0.29	0.87	$A = 1.428 + 2.17 Activity_b + 0.047 Dclay_b - 0.067 LL_b$
ملا احمد Ahmad		0.28	0.85	$A = 1.57 + 0.7 Activity_a + 0.01 Dclay_b - 0.024 SAI_a - 0.024 SS_a$
سرچم Sarcham		0.24	0.86	$A = 4.22 - 0.032 SAI_b - 0.063 SS_b - 8.54 Sindex_a - 0.91 MWD_b + 0.011 Dclay_b$

A: افزایش مساحت سطح مقطع آبکند، اندیس a: ویژگی مربوط به خاک سطحی آبکندها، اندیس b: ویژگی مربوط به خاک زیر سطحی آبکندها

A: Gully cross section increase, Index a: Surfade soil of gully's properties, Index b: Subsurfade soil of gully's properties

برشی و شاخص خاکدانه‌های پایدار (SAI)، MWD و رس قابل پراکنش خاک زیرسطحی و شاخص S خاک سطحی مهمترین ویژگی‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی افزایش سطح مقطع آبکندها هستند.

به طور کلی در سرچم طبق نتایج شاخص‌های توپوگرافی احتمالاً جریان زیرسطحی آب فرآیند هیدرولوژی غالب در تشکیل آبکند می‌باشد و با توجه به تحلیل عاملی PCA و مدل‌های رگرسیونی در این منطقه ویژگی‌های مکانیکی و پایداری خاکدانه خاک زیرسطحی بر افزایش سطح مقطع آبکندها تأثیر بیشتری می‌گذارند. در آرتاداغ نیز هر چند با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی هر دو جریان سطحی و زیر سطحی فرآیند هیدرولوژی مؤثر در تشکیل آبکند می‌باشد، ولی ویژگی‌های مکانیکی خاک زیر سطحی تعیین کننده افزایش سطح مقطع آبکند است. در ملا احمد، با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی، جریان سطحی آب فرآیند هیدرولوژی غالب در تشکیل آبکند تشخیص داده شد و ویژگی‌های خاک سطحی بر افزایش سطح مقطع آبکندها مؤثر است.

مشاهده می‌شود در هر سه منطقه رس قابل پراکنش خاک زیرسطحی یکی از عوامل مهم مؤثر بر افزایش سطح مقطع آبکندها تشخیص داده شده است. از آنجایی که با افزایش درصد رس قابل پراکنش در آب، پایداری مکانیکی خاک و پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد و فرسایش خاک زیرسطحی یکی از مکانیسم‌های اصلی

به این ترتیب، مدل رگرسیونی تغییر ابعاد آبکند در اثر مهمترین ویژگی‌های خاک منتخب از PCA، برای هر منطقه به دست آمد. در جدول 10 مدل رگرسیونی هر منطقه به همراه ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>1</sup>) هر مدل به عنوان شاخص‌های اعتبار پیش‌بینی مدل، ارائه شده است. هر سه مدل دارای R<sup>2</sup> بالا هستند و RMSE مدل‌ها نیز نسبت به میانگین افزایش سطح مقطع آبکند در دو سال پایین است، بنابراین مدل‌ها اعتبار لازم برای پیش‌بینی تغییر ابعاد آبکند را دارا می‌باشند. مشاهده می‌شود در منطقه آرتاداغ سه ویژگی شاخص فعالیت رس، درصد رس قابل پراکنش و حد روانی خاک زیرسطحی افزایش سطح مقطع آبکند را به بهترین شکل پیش‌بینی می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تغییر ابعاد آبکند در بین ویژگی‌های خاک، با مشخصات مکانیکی خاک زیرسطحی ارتباط بیشتری دارد. در ملا احمد شاخص فعالیت، مقاومت برشی و شاخص خاکدانه‌های پایداری خاک سطحی و درصد رس قابل پراکنش خاک زیر سطحی بهترین شاخص‌ها برای پیش‌بینی افزایش سطح مقطع آبکندها بودند. بنابراین ویژگی‌های مکانیکی خاک سطحی که تعیین کننده مقاومت خاک در برابر تنش برشی رواناب هستند (3) و نیز پایداری خاکدانه‌های خاک سطحی ارتباط بیشتری با افزایش سطح مقطع آبکندها دارند. در سرچم مقاومت

1- Root mean of squared error

سطحی بیشتر می‌باشد، بنابراین تراکم آبکند بیشتری مشاهده شد. در اُرتاداغ هر دو جریان هیدرولوژیکی سطحی و زیرسطحی بر تشکیل آبکند مؤثر بودند و در طبقه شیب 20 تا 30 درصد بیشترین تراکم آبکند مشاهده شد، که نشان می‌دهد در این شیب مجموع دو جریان حداکثر نیروی برشی را دارند با این وجود تأثیر خاک زیرسطحی در افزایش سطح مقطع آبکندها بیشتر است. در سرچم جریان زیرسطحی عامل هیدرولوژیکی عمده در تشکیل آبکند تشخیص داده شد و این جریان در شیب کمتر فرصت بیشتری برای فرسایش زیرزمینی دارد، بنابراین بر خاک زیرسطحی تأثیر بیشتری گذاشته و موجب گسترش آبکند در شیب‌های کمتر شده است. در بین شاخص‌های پایداری خاکدانه نیز، بر اساس نتایج همبستگی و PCA شاخص درصد خاکدانه‌های پایدار (SAI) بیشترین ارتباط را با افزایش سطح مقطع آبکندها داشت و بهترین شاخص پایداری خاکدانه‌ها برای بررسی فرسایش آبکندی تشخیص داده شد. همچنین درصد رس قابل پراکنش در آب در هر سه شرایط هیدرولوژیکی تشکیل آبکند، در افزایش سطح مقطع آبکندها دارای اهمیت بود.

گسترش آبکندها است (37)، با افزایش رس قابل پراکنش، پایداری خاک زیرسطحی کاهش یافته و در اثر هر دو نوع جریان سطحی و زیر سطحی آبگسترش آبکند افزایش می‌یابد. در پژوهش‌های دیگر نیز تأثیر ناپایداری خاک زیرسطحی بر گسترش آبکند در اثر جریان سطحی گزارش شده است، که تأیید کننده این نتایج است (12). بنابراین در تمام مناطق ناپایداری مکانیکی خاک زیرسطحی در فرسایش آبکندی اهمیت دارد.

## نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در این پژوهش تأثیر توپوگرافی بر فرسایش آبکندی و تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندها بررسی شد. همچنین تأثیر هر دسته از ویژگی‌های خاک بر افزایش سطح مقطع آبکندها در شرایط مختلف هیدرولوژیکی ایجاد آبکند، بررسی شد. نتایج نشان داد، در منطقه ملاحمد که جریان روی زمینی آب عامل هیدرولوژیکی تشکیل آبکند است و در طبقات شیب بالاتر انرژی رواناب سطحی بیشتر است، تأثیر این جریان نیز بر خاک

## منابع

- 1- Agharazi H., Davodirad A., and Soufi M. 2014. Area-slope threshold of gully's in Zahir Abad watershed of Markazi province. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6:1-9. (in Persian)
- 2- Bayatti M. 2006. Gully properties and gully controlling factors, case study: between Meshkinshahr and ahhar. *Geography and Development Iranian Journal*, 4:115-136. (in Persian)
- 3- Bili P., and Dramis F. 2003. Geomorphological investigation on gully erosion in the rift valley and the northern highlands of Ethiopia. *Catena*, 50: 353-368.
- 4- Bradford J., and Piest R. 1980. Erosional development of valley bottem gullies in the upper midwestern United States, p. 75-101. In: D.R. coates, and J.D. Vited (ed.) *Geomorphic thresholds*, Dowden and culver, Stroudsburg, Pennsylvania.
- 5- Canton Y., Sole-Benet A., Asensio C., Chamizo S., and Puigdefabregas J. 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils. Relationships with runoff and erosion. *Catena*, 77:192-199.
- 6- Chaplot V. 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology*, 186:1-11.
- 7- 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.
- 8- Deng Q., Qin F., Zhang B., Wang H., Luo M., Shu C., Liu H., and Liu G. 2015. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology*, 228: 703-713.
- 9- Dexter A.R. 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.
- 10- Di Stefano C., Ferro V., Pampalona V., and Sanzone F. 2013. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. *Catena*, 101:226-234.
- 11- 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.
- 12- Esteves M., and Lapetite J.M. 2003. A multi scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*, 50:255-271.
- 13- Faulkner H. 2013. Badlands in marl lithologies: A field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*, 106:42-53.
- 14- Frankl A., Poesen J., Scholiers N., Jacob M., Haile M., Deckers J., and Nyssen J. 2013. Factors controlling the morphology and volume (V)-length (L) relations of permanent gullies in the northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Process Landforms*, 38:1672-1684.
- 15- Gao X., Wu P., Zhao X., Zhang B., Wang J., and Shi Y. 2012. Estimating the spatial means and variability of root-

- zone soil moisture in gullies using measurements from nearby uplands. *Journal of Hydrology*, 476:28-41.
- 16- Gee G.W., and Bauder J.M. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In: A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No. 9 (2nd edition), American Society of Agronomy, Madison, WI.
  - 17- Hafezi Moghaddas N. 2011. *Engineering Geology*. Arses press. 488p. (in Persian)
  - 18- Hossein Zadeh M., Esmaceli R., Kalhor S., and Nosrati K. 2011. Assessment of local changes of gully erosion under geomorphology factors with multivariate statistics. *Environmental Erosion Research*. 1: 57-66. (in Persian)
  - 19- 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.
  - 20- Khalil Moghadam B., Afyuni M., Jalalian A., Abbaspour K.C., and Dehghani A.A. 2011. Estimation Surface Soil Shear Strength by Peto-Transfer Functions and SoilSpatial Prediction Functions. *Water and Soil*, 25:187-195. (in Persian)
  - 21- Marquez C.O., Garcia V. J., Cambardella C. A., Schultz R. C., and Isenhardt T. M. 2004. Aggregate-Size Stability Distribution and Soil Stability. *Soil Science Society of American Journal*, 68:725-735.
  - 22- 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)
  - 23- Morgan R.P.C., and Mngomezulu D. 2003. Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in the middle veld of Swaziland. *Catena*, 50:401-414.
  - 24- 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. *Journal of the Iranian Natural Resource*, 60: 1211-1223. (in Persian)
  - 25- Nachtergaele J., and Poesen J. 2002. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. *European Journal of Soil Science*, 53:449- 463.
  - 26- Nayeibi H. 2014. *Applied advanced statistics by SPSS*. University of Tehran press. 401p. (in Persian).
  - 27- Poesen J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. p. 221- 239. In: S. Wicherek (ed.) *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam.
  - 28- Poesena J., Nachtergaelea J., Verstraetena G., and Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50:91- 133
  - 29- Rafahi H.Gh. 2006. *Water erosion and conservation*. University of Tehran press. 671p. (in Persian)
  - 30- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., and Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152:252-263.
  - 31- Reynolds W. D., Elrick D. E., and Youngs E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrimeters (vadose zone). p. 818- 826. In: J.H. Dane, G.C. and Topp (ed.) *Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA.
  - 32- Servati M., ghodosi J., and dadkhah M. 2008. Gully erosion formation and extension controlling factors in losses. *Pajohesh and sazandeghi*, 78:20-33. (in Persian)
  - 33- Shadfar S., Zahedi S., Namaki M., and Sharifi I. 2007. Assessment of gully erosion development in Ali Abad watershed of Guilan province. 4<sup>th</sup> Iran watershed science and engineering congress. 20-21 Feb. 2007. Karaj, Iran. (in Persian)
  - 34- Shahrivar A., and Hassan Pour B. 2005. Effect of soluble salts, area and slope of gully basin on gully erosion in Sog region. 9<sup>th</sup> Iranian soil science congress. 28-31 Aug. 2005. Shahre Kord, Iran. (in Persian)
  - 35- Soleimanpour S.M., Soufi M., Ahmadi H. 2009. Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province. *Water and Soil*, 23:131-141. (in Persian)
  - 36- Soufi M., and Esaei H. 2010. Estimate of gully erosion volume with morphometric and soil properties in Gholestan province. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2:73-82. (in Persian)
  - 37- Valentin C. J., Poesen J., Yong Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63:132-153.
  - 38- 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 Surface Processes and Landforms*, 25:1201-1220.
  - 39- 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 Biology and Biochemistry*, 41:201-209.
  - 40- 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. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5:31-40. (in Persian)
  - 41- Zhu H., A. S.M., and Horton R. 2008. Impact of Gully on Soil Moisture of Shrubland in Wind-Water Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau. *Pedosphere*, 18: 674-680.

## Determination the most Important Physical and Mechanical Soil Properties on Increasing Cross Sections in Ardebil Province

H. Shahab<sup>1</sup> - H. Emami<sup>2\*</sup> - Gh. H. Hagh Nia<sup>3</sup> - A. Esmali<sup>4</sup>

Received: 27-01-2016

Accepted: 25-09-2016

**Introduction:** Gully erosion is an important type of soil erosion in Iran and Ardebil province (Moghimi and Salami, 2011; Khatibi, 2006). Increasing the cross section of gullies is an indicator for gully developing (Deng et al, 2015). Topography and soil properties are two important factors in gully developing in various regions of worldwide (Poesena et al, 2003). Despite the importance of soil properties in gully erosion, the direct effect of these agents was less investigated and few researches have been carried out to the effect of physical and mechanical soil properties on gully erosion. Therefore, the objectives of this research were to determine 1) the effect of topography on gully erosion, 2) effect of surface and subsurface soil physical and mechanical properties on increasing the cross section of gullies and 3) to select the most important soil properties affect developing the cross section of gullies in three regions of Ardebil province (Ortadagh, Molla Ahmad, and Sarcham). In addition, the relationship between the most soil properties and topographic agents was investigated

**Materials and Methods:** The effect of topography on gully erosion was investigated by using of two methods i.e. topographic threshold of gully forming (as  $S = aA^b$ , where A and S is gully watershed cross section and slope, respectively, a and b is local coefficients) and the relationship between slope classes with gullies density. In regard to catchment characteristics, a set of similar gullies was selected in each region and the changes of cross section area for gullies in four points along its length were measured as indicator of gully development during two years. 17 physical and mechanical of surface and subsurface soil properties in each point were measured and the most important properties that affect on gully development were selected based on principle component analysis (PCA) method. Finally, the stepwise regression model was fitted to the soil properties selecting from PCA for gully's development in each region.

**Results:** The relationship between Slope classes and gully density showed that in MollaAhmad region gully density was increased with increasing the slope. In OrtaDaghregion, similar trend was observed up to 20-30% slope, while in Sarcham region these was no relationship between slope classes and gully density. According to the topographic threshold it seems that runoff is the main agent for gully forming in MollaAhmad, but in Sarcham the piping and tunnel erosion might have caused gully formation and in Ortadagh both surface and subsurface flows were recognized as effective agents for gully formation. Increasing values of the cross section for the selected gullies during 2 years was 0.9, 0.6, and 0.8 m<sup>2</sup> for Ortadagh, MollaAhmad, and Sarcham regions respectively, which were 41, 44 and 61 percent more than their initial cross sections. Among mechanical soil properties, liquid limit (LL), plastic limit (PL) and shear strength (SS) had the negative and significant correlations with increasing the cross sections of gullies in 3 regions. Among the particle size fractions, Water dispersible clay had the most effect on increasing the gully's cross sections and except for surface depth of Molla Ahmad, its correlation with gully's cross section was significant. Principle component analysis (PCA) demonstrated that in MollaAhmad and Ortadagh mainly mechanical properties of soil and aggregate stability had the more effect on increasing the gully cross section, but in Sarcham soil particle size classes and aggregate stability indices had more effect on gully's cross section.

**Conclusion:** According to topography threshold, it can be concluded that surface runoff is the main agent for gully forming in MollaAhmad and gully density increases by increasing the slope classes. In this region the effect of surface runoff on surface soil erosion was sever. In Sarcham there was no relationship between slope and gully density and it was found that the subsurface flow is predominant factor for gully forming. In OrtaDagh both surface and subsurface flows were the main factors for gully forming, so due to increasing the surface flow up to slope 20-30% class, maximum gully density was noted in this slope class and the effect of subsurface soil properties in developing gully cross section was higher than surface soil properties. In general, the relationship

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Associate Professor and Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(\*- Corresponding Author Email: hemami@um.ac.ir)

4- Associate Professor of Range and Watershed Management Department, University of Mohagheh Ardabili

between gully density with slope classes, topographic threshold and soil physical and mechanical properties which were effective on gully development indicated the close consistency between the type of hydrologic flow in gully forming and the most important soil properties on increasing the gully's cross section.

**Keywords:** Factor analysis, Head cut, Topographic threshold, Tunnel erosion