

## Experimental Study of Gully Erosion in Cohesive Soil with Consolidation and Sandy Layer

M. Ashourian<sup>1</sup>, M. Shafai-Bejestan<sup>2\*</sup>, H. Babazadeh<sup>3</sup>, and H. Fouladfar<sup>4</sup>

1- PhD of Hydraulic Structure, Department of Water Sci. and Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran..

2\*- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (m\_shafai@yahoo.com)

3-Professor, Department of Water Sci. and Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4- PhD of Hydraulic Structures, Head of River and Coastal Eng., Iran Water and Power Development Company, IWPCO.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 31 October 2018

Revised: 6 September 2019

Accepted: 11 September 2019

#### Keywords:

Headcut Movement, Sediment, Clay  
Content.

### TO CITE THIS ARTICLE:

Ashourian, M., Shafai-Bejestan, M., Fouladfar, H. (2021). 'Experimental Study of Gully Erosion in Cohesive Soil with Consolidation and Sandy Layer', *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(3), pp. 117-128. doi: 10.22055/jise.2017.20044.1430.

## Introduction

Gully erosion causes a drop in the channel bed, widening the channel and transporting a large amount of sediment downstream. Understanding the effects of various factors such as soil consolidation and the placement of the sandy layer on sediment transport rate are the goals of this research. Therefore, five samples of cohesive soils with various percent of clay and silt with short- and long-term consolidation were tested under natural conditions. Moreover, in one test, a sandy layer was laid on the gully bed to study the effects of this layer. Results indicated gully migration to upstream occurred at angles closer to 90 degrees when the percent of clay was raised. The same reduction in clay amount in long- and short-term consolidation caused the total gully migration and amounts of sediment to increase 2.5 times in long-term compared to short-term consolidation. The effect of clay reduction was more pronounced in the sample with long-term consolidation.

## Methodology

The tests were performed in a re-circulating flume in the experiment Lab of *Water Research Institute, Tehran, Iran*. The flume has a dimension of 12m\*0.45m\*0.6m (length\* width\* height). Also, the observational interval in all tests had a dimension of 3m\*0.45m\*0.6m (length\* width\* height), and gully upstream length for all tests is 1.6m with no slope (smooth surface).

Initial tests were performed to determine the hydraulic conditions (depth, velocity, and discharge) to be applied for the occurrence of our tests. Moreover, to conduct the gully erosion tests on the samples, it was necessary to prepare the sediment bed for different percentages of adhesion and to be consolidated naturally under sediment weight. For each test, first, naturally pre-saturated consolidated sediment was performed. To this aim, a three-meter part of the flume in the middle was selected as the test section. Both upstream and downstream of the test section were closed by glass sheets. Then the dried sediment mixture was put in the sediment tank, and water was added and mixed with the help of an electrical agitator. After ensuring complete mixing, the test section was filled with solute sediment mixture by pumping from the sediment mixing tank. This situation was kept for almost one week. During this time, the sediment mixture was consolidated naturally by its own weight, and the bed was ready for the hydraulic tests. It is worth

mentioning that the same procedure was followed for all sediment mixtures. To prepare the test with the sandy layer in the gully bed, a layer of clay was first laid in the observational interval. After one week of consolidation, a sandy layer was laid on that clay layer. Then gully was made on the sandy layer. It remained one week. And after one week of consolidation, the gully is ready for testing. The observational time interval was the same for all tests and lasted from minute 1 to minute 17. Six different interval times were assumed as the reference for measurements (i.e., minutes 1, 2, 3, 5, 10, and 17). From the start to the end of each test were filmed or photos were taken. From these photos, various parameters such as gully migration and sediment yield were obtained.

### Findings

Results indicated gully migration to upstream occurred at angles closer to 90 degrees when the percent of clay was raised. The slope angle of the gully measured from a vertical line was 34.6 degrees under conditions of using only clay. However, in soils with 70 percent clay, this angle increased to 37.5 degrees. When the clay amount is the same in two tests (test 2 and test 5), gully migration and amount of sediment are far more in test with more erodible bed (test 5 with sandy layer bed). Because of piping and empty space under the gully, changes increased.

Reduction in clay percent increased gully migration and amount of sediment. But sandy layer in the gully bed, with a decrease in the clay content, caused more increases in gully migration and amount of sediment. The effect of short-term consolidation to accelerate the rate of changes is far more than the effect of the sandy layer in the bed of gully and reduction in clay percent. Over time, the variations declined and converged to a fixed value.

### Conclusions

The same reduction in clay amount in long- and short-term consolidation caused the total gully migration and amounts of sediment to increase 2.5 times in long-term compared to short-term consolidation. The effect of clay reduction was more pronounced in the sample with long-term consolidation. In this study, part of the analysis relating to this type of erosion has been considered. But gully erosion, especially in cohesive soils that have complex behavior, needs more tests and research.

### Acknowledgment

The authors would like to thank the *Iranian Water Research Institute* for providing the facilities to conduct this study.

### References

- 1- Mokarian, Z., Hosseini, S.H., Saneie, S.M. and Hosseini, M., 2015. Experimental study of the effect of the clay found in the riverbank materials on the river bank erosion. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(1), pp.77-84. (In Persian).
- 2- Papanicolaou, T., Wilson, C., Dermisis, D., Elhakeem, M. and Thomas, J., 2008. The effects of headcut and knickpoint propagation on bridges in Iowa. *Final Rep. IIHR- Hydroscience & Engineering*.
- 3- Poesen, J., Nachtergaele, J., Vertsraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), pp. 91–133.
- 4- Poesen, J., Vanwalleghem, T., Vente, J., Knapen, A., Verstraeten, G. and Martinez-Casasnovas, J.A., 2006. *Gully erosion in Europe*.
- 5- Robinson, M.K. and Hanson, J.G., 2001. Headcut erosion research. Proceedings of the 7th Federal Interagency sedimentation Conference.

- 6- Soleymanpour, S.M., Soufi, M. and Ahmadi, H., 2008. Effect of different land uses on initiation of gully erosion in Fars province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 2(3), pp.66-68. (In Persian).
- 7- Soleimanpour, S.M., Soufi, M. and Ahmadi, H., 2009. Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province. *Journal of Water and Soil*, 23(1), pp. 131-141. (In Persian).
- 8- Wilcox, J., Benoit, T. and Mink, L., 2001. Evaluation of geomorphic restoration techniques applied to fluvial systems. *Feather River Coordinated Resource Management Group*.
- 9- Zhu, Y., Xie, Y., Guo, X. and Zhao, G., 2013. Experimental observations of headcut erosion during embankment breaching. *IAHR World Congress*.



© 2021 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## بررسی آزمایشگاهی فرسایش آبکندی خاک چسبنده در شرایط تحکیم و لایه ماسه‌ای

معصومه عاشوریان<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجنستان<sup>۲\*</sup>، حسین بابازاده<sup>۳</sup> و حسام فولادفر<sup>۴</sup>

- ۱- دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.  
 ۲- نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، اهواز ایران. (m\_shafai@yahoo.com)  
 ۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.  
 ۴- دکتری سازه‌های آبی، مدیر بخش مهندسی رودخانه و سواحل شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۲۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۱۵

دریافت: ۱۳۹۷/۸/۹

### چکیده

فرسایش آبکندی باعث پایین افتادگی بستر، عریض شدن آبراهه و انتقال حجم زیادی از رسوب به پائین دست می‌گردد. شناخت عوامل مختلفی هم‌چون میزان تحکیم و نیز فرارگیری لایه ماسه‌ای در میزان انتقال رسوب از اهداف این تحقیق است. در تحقیق حاضر تعداد پنج نمونه خاک چسبنده، با ترکیب متفاوت رس و سیلت و با تحکیم بلندمدت و کوتاه‌مدت در شرایط طبیعی، مورد آزمایش قرار گرفت. علاوه بر این، در یکی از آزمایش‌ها از یک لایه ماسه‌ای در بستر آبکنند استفاده شده، تا تاثیر این لایه نیز بررسی شود. نتایج نشان داد که با افزایش درصد رس، مهاجرت طولی آبکند به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری صورت می‌گیرد. کاهش یکسان مقدار رس در تحکیم بلندمدت و کوتاه‌مدت، باعث شد که مقدار کل مهاجرت طولی و کل حجم رسوب تولید شده تقریباً ۲/۵ برابر در تحکیم بلندمدت نسبت به کوتاه‌مدت افزایش یابد. تاثیر کاهش میزان درصد رس در نمونه تحکیم بلندمدت مشهودتر بود.

کلید واژه‌ها: مهاجرت آبکند، رسوب، میزان رس.

### مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی نقش بسیار عمده‌ای در زندگی انسان را دارا می‌باشد. امروزه فرسایش خاک و تولید رسوب، معضلی است که روزبه‌روز روند افزایشی پیدا می‌کند. رسوبات ناشی از فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز، علاوه بر هدر رفتن و کاهش حاصل‌خیزی خاک، موجب کاهش کیفیت آب و عمر مفید سدها به‌دلیل انباشت رسوبات در مخزن آن‌ها می‌شود. پدیده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری رسوبات چسبنده با منشأ رودخانه‌ای یکی از مهمترین فرایندها در مدل‌سازی کیفیت آب محسوب می‌شوند. فرسایش آبکندی (Gully Erosion) یک رخساره فرسایشی پر رسوب است که سهم عمده‌ای در تخریب اراضی دارد. این نوع فرسایش در بسیاری از کشورها منبع اصلی تولید رسوب حوزه‌ها می‌باشد. تا جایی که مشارکت آن در تولید رسوب نسبت به کل فرسایش خاک از ۱۰ تا ۹۴ درصد گزارش شده است (Poesen et al., 2006)، و تأثیر آن در تخلیه‌ی سریع‌تر منابع آب زیرزمینی و رطوبت خاک نقش به‌سزایی در کاهش عملکرد محصولات زراعی در منطقه تحت گسترش آبکند و درآمد کشاورزان خواهد داشت

(Soleimanpour et al., 2008). هم‌چنین خسارات اقتصادی

فراوانی به راه‌ها و سازه‌های عمرانی وارد می‌کند. آبکند یک آبراهه با کناره‌های دارای شیب تند و یک پیشانی فرسایشی پر شیب و فعال است که به‌وسیله‌ی فرسایش ناشی از جریان سطحی متناوب (به طور معمول در طی یا پس از وقوع باران‌های شدید) ایجاد می‌شود (Poesen et al., 2003). زمانی که بستر رودخانه از ماسه تشکیل شده باشد، این پدیده خیلی سریع‌تر اتفاق می‌افتد و زمانی که بستر چسبنده (رسی) باشد، این روند کندتر می‌شود (Papanicolaou et al., 2008). وقوع این پدیده عامل اولیه‌ای برای گسترش فرسایش و آبستگی سواحل رودخانه‌ها می‌باشد. هرچه چسبندگی رسوب بستر بیش‌تر باشد، حرکت آبکندها به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری مشاهده می‌شود (Wilcox et al., 2001).

مطالعه‌های آزمایشگاهی گوناگونی در مورد این پدیده صورت گرفته است. Robinson و Hanson (2001) به بررسی تأثیر میزان فرسایش‌پذیری لایه خاک پایین دست آبکند بر نرخ مهاجرت فرسایش آبکندی پرداختند. آن‌ها نرخ مهاجرت فرسایش آبکندی را در صورت وجود لایه ماسه‌ای و عدم وجود آن، مورد بررسی قرار دادند. وقتی یک

تحکیم طبیعی بلندمدت و کوتاهمدت بر فرسایش پس‌رونده پرداخته شد.

لذا این تحقیق با هدف بررسی آزمایشگاهی فرسایش آبکندی در خاک چسبنده، با ترکیب متفاوت رس و سیلت و با تحکیم بلندمدت و کوتاهمدت، انجام شده است. علاوه بر این در یکی از آزمایش‌ها از یک لایه ماسه‌ای در بستر آبکند استفاده شده، تا تاثیر این لایه بر روند فرسایش آبکندی مشاهده شود.

### مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌ها، از فلوم آزمایشگاهی موجود در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو استفاده شد. فلوم به طول ۱۲ متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و عرض ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد، شکل (۱). بازه مشاهداتی در تمامی آزمایش‌ها، به طول سه متر، عرض ۴۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، می‌باشد، شکل (۲). طول بالادست آبکند ۱/۶ متر بود. در واقع آبکند تقریباً در وسط این بازه ایجاد شد. بدین ترتیب جریان در بالادست و پایین‌دست آبکند قابل مشاهده بود. هم‌چنین در دوره‌ی زمانی انجام تمامی آزمایش‌ها، میزان طول مهاجرت در فاصله کمتر از ۱/۶ متر به یک مقدار ثابت رسید و فرصت برای توسعه یافتن جریان هنگام ورود به بازه مشاهداتی ایجاد شد. بالادست آبکند بدون شیب (سطح صاف) بود. در تمامی نمونه‌ها، ضخامت لایه خاک چسبنده در پایین‌دست آبکند برابر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت آن در بالادست، مجموع ضخامت پایین‌دست و ارتفاع آبکند بود. بازه زمانی مشاهداتی تمامی آزمایش‌ها یکسان و ۱۷ دقیقه می‌باشد. شش نقطه‌ی زمانی به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری در نظر گرفته شد (دقیقه‌های یک، دو، سه، پنج، ۱۰ و ۱۷). در طول انجام تمامی آزمایش‌ها، از تغییرات آبکند فیلم‌برداری و عکس‌برداری شد. میزان مهاجرت طولی و کاهش تراز پیشانی آبکند، در عرض ۴۵ سانتی‌متری فلوم، به‌صورت یکنواخت نبود. به‌همین علت در تمامی آزمایش‌ها، سه نقطه‌ی مکانی به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. یک نقطه در وسط فلوم و دو نقطه دیگر به فاصله‌ی پنج سانتی‌متری از جداره فلوم (به‌منظور حداقل شدن اثر جداره‌ها بر اندازه‌گیری‌ها). میانگین اعداد برداشت شده از این سه نقطه، در بازه زمانی مربوطه، در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شد. هم‌چنین به پیروی از روال اصولی در کارهای آزمایشگاهی، قبل از انجام آزمایش، کلیه اجزای سامانه آزمایشگاهی مورد واسنجی قرار گرفت. بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده هم‌خوانی قابل قبولی مشاهده شد.

لایه خاک فرسایش‌پذیر روی لایه ماسه‌ای قرار داشت، نرخ فرسایش آبکندی افزایش چشم‌گیری نداشت. اما زمانی که یک لایه مقاوم به فرسایش روی لایه ماسه‌ای قرار گرفت، در نرخ فرسایش افزایش قابل توجهی مشاهده شد. Zhu et al. (2013) به بررسی آزمایشگاهی فرسایش آبکندی روی دایک با سه ترکیب خاک، شامل ماسه ریز، ترکیب ماسه ریز و مقدار کم رس، ترکیب ماسه ریز و مقدار بیشتر رس، و با دو نوع بستر فرسایش‌پذیر و بستر فرسایش‌ناپذیر پرداختند. آن‌ها بیان کردند که هر چه بستر فرسایش‌پذیرتر باشد، سرعت فرسایش آبکندی نیز بیشتر است.

در نواحی مختلف ایران تأثیر مخرب فرسایش آبکندی بر محیط زیست، به‌صورت میدانی، بررسی شده است. نتایج تحقیق‌های Soleimanpour et al. (2009) در کنار تخته استان فارس نشان داد که رسوب تولیدی ناشی از گسترش آبکندها در کنار تخته، تابع عامل خاک، زمین‌شناسی و ویژگی‌های حوزه آبخیز بر تولید رسوب ناشی از فرسایش آبکندی دارد. نقش عامل خاک و زمین‌شناسی مهم‌تر از ویژگی‌های حوضه آبخیز بود.

با بررسی منابع مشاهده شد که مطالعه‌های انجام شده روی خاک‌های ترکیبی و با چسبندگی کم بوده و تحقیقات کافی در زمینه فرسایش پس‌رونده در خاک چسبنده (با میزان چسبندگی زیاد) وجود ندارد. به دلیل پیچیدگی‌های خاک چسبنده، علی‌رغم وجود سازندهای وسیع ریزدانه رسی موثر و حائز اهمیت بر فرسایش در کشور، تحقیقات کافی در این زمینه وجود ندارد (Mokarian et al., 2015). بنابراین در این تحقیق سعی شده است که به بررسی خاک‌ها با میزان چسبندگی زیاد (درصد رس بالا) پرداخته شود. خاک‌های چسبنده با درصد رس بالا (بالای ۹۰ درصد) در مخازن سدها (به‌عنوان مثال سد سفیدرود، سد شهید عباسپور) مشاهده می‌شود. امروزه می‌توان با ایجاد فرسایش پس‌رونده حجم زیادی از رسوباتی که در مکانی نهشته شده‌اند را تخلیه کرد. مثلاً خارج کردن رسوبات چسبنده از حوضچه‌های ته‌نشینی ابتدای شبکه‌های آبیاری و زهکشی و یا کاربرد آن در خارج کردن رسوبات نهشته شده از مخزن سد. هم‌چنین در منابع دیده شد که تعداد نمونه‌های مورد بررسی کم بوده و روی نمونه‌های محدودی شرایط هیدرولیکی تغییر داده شده است. لذا در این تحقیق تعداد نمونه‌های رسوبی بیشتری، با جنس خاک متفاوت، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در منابع بررسی شده مشاهده شد که خاک برای انجام آزمایش‌های کوبانده و متراکم شده است، در حالی که در تمامی آزمایش‌های این تحقیق، تحکیم به‌صورت طبیعی و ناشی از وزن رسوبات، طی مدت زمان مشخصی، بود و بدین ترتیب به مقایسه تأثیر

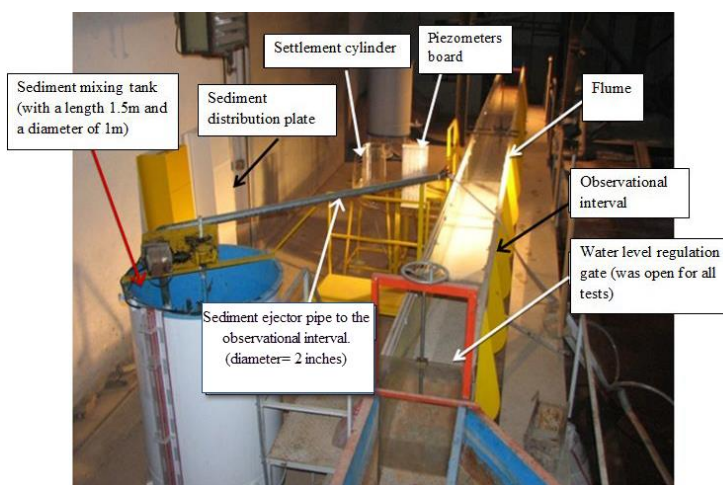


Fig 1- Experimental flume

شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی

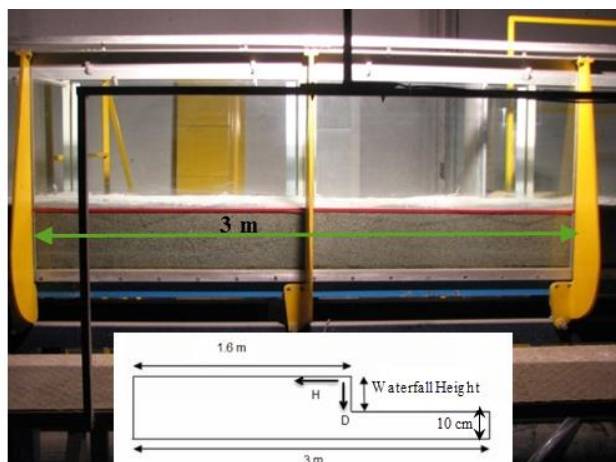


Fig 2- Observational section

شکل ۲- بازه مشاهداتی

آزمایش با لایه ماسه‌ای باید گفت که در ابتدا یک لایه رس خالص به ضخامت پنج سانتی‌متر در طول سه متری بازه مشاهداتی ریخته شد و بعد از یک هفته فرصت تحکیم، یک لایه ماسه به ضخامت پنج سانتی‌متر روی آن ریخته شد، سپس آبکند با ترکیب مورد نظر رس و سیلت ایجاد شد (۷۰ درصد رس + ۳۰ درصد سیلت)، شکل (۳). یک هفته فرصت تحکیم به آبکند (آبشار) نیز داده شد. در تمامی نمونه‌ها، تحکیم به صورت طبیعی و تحت وزن رسوبات انجام گرفته و از هیچ دستگاهی برای متراکم کردن خاک استفاده نشده است. توسط شکاف‌های موجود در کف فلوم آزمایشگاهی، زهکشی از یک سمت انجام شد. دبی جریان نیز توسط دستگاه تنظیم فرکانس موتور پمپ قابل تنظیم می‌باشد.

به منظور انجام آزمایش‌ها روی نمونه‌های رسوبی، در ابتدا نسبت به آماده‌سازی بستر برای چسبندگی‌های متفاوت و دوره تحکیم طبیعی بلندمدت و کوتاه‌مدت اقدام شد. خاک چسبنده مورد استفاده، رس (کائولینیت) می‌باشد که توسط میزان اختلاط متفاوت با سیلت، میزان چسبندگی آن تغییر می‌کند. برای آماده‌سازی بستر، ابتدا رسوبات معلق یکنواخت با کمک مخزن اختلاط رسوب و تعبیه صفحه‌ی پخش رسوب، از مخزن به بازه مشاهداتی، از طریق ایجاد باران رسوبی، پمپاژ شد. از آب‌بند در فلوم و در دو طرف بازه مشاهداتی، به منظور خشک نگه داشتن بازه مشاهداتی در دوره پر کردن فلوم، استفاده شد. سپس فرصت رسوب‌گذاری و تحکیم به رسوبات (با توجه به نوع تحکیم) داده شد. زمان برای تحکیم کوتاه‌مدت یک روز و برای تحکیم بلندمدت هفت روز در نظر گرفته شد. در مورد آماده‌سازی بستر برای

گذشت زمان این ترک‌ها باعث تخریب و فروریختگی لایه از سطح شد. با افزودن لایه ماسه‌ای سرعت مهاجرت طولی، میزان H در شکل (۲)، افزایش یافت.

مطابق با نتایج Wilcox et al. (2001)، مشاهده شد که هرچه درصد رس بیش‌تر باشد، مهاجرت آب‌کنند به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری می‌باشد. بطوریکه در شرایط رس خالص (آزمایش ۱) زاویه شیب آب‌کنند نسبت به خط قائم ۳۴/۶ درجه است، اما در خاک با ۷۰ درصد رس (آزمایش ۲) به ۳۷/۵ درجه افزایش یافت. در جدول (۲)، مقادیر کل پارامترهای اندازه‌گیری شده در پنج آزمایش انجام شده، ذکر شده است.

مشخصات پنج آزمایش انجام شده در جدول (۱) ذکر شده است. در پنج آزمایش انجام شده، ارتفاع آب‌کنند: ۱۵ سانتی‌متر، متوسط عمق آب در بالادست آب‌کنند: پنج سانتی‌متر، دبی جریان: ۵/۶ لیتر بر ثانیه می‌باشد.

### نتایج و بحث

همان‌طور که ذکر شد، در آزمایش پنج یک لایه ماسه زیر لایه ترکیبی رس و سیلت (۳۰ درصد سیلت و ۷۰ درصد رس) ریخته شد. با عبور جریان آب، لایه ماسه‌ای سریع شسته شده و آب زیر لایه رس و سیلت قرار گرفت و موجب سست شدن این لایه گردید، شکل (۴). سپس ترک‌هایی در لایه‌های سطحی مشاهده شد، شکل (۵)، که با

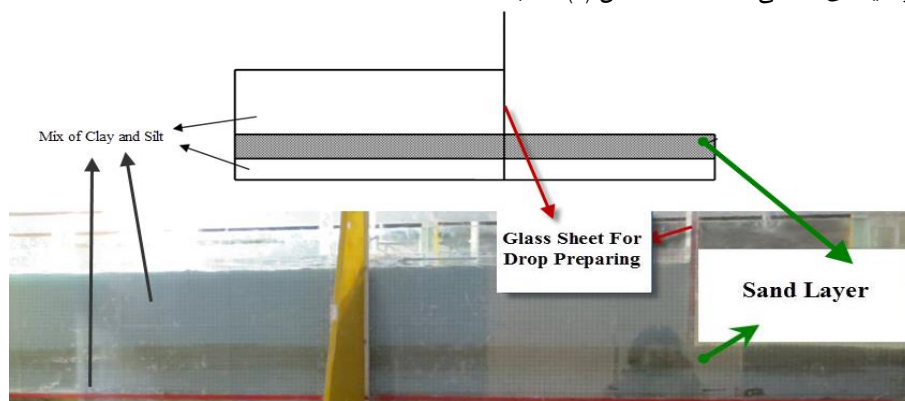


Fig. 3- Bed preparation process in Test 5

شکل ۳- آماده‌سازی بستر رسوبی در آزمایش ۵

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

Table 1- Specifications of Conducted Experiments

Tests	Soil Material	Consolidation Type
Test 1	100% Clay	Long-term
Test 2	70% Clay+30% Silt	Long-term
Test 3	100% Clay	Short-term
Test 4	70% Clay+30% Silt	Short-term
Test 5	70% Clay+30% Silt With Sandy Layer	Long-term



Fig. 4- Sandy layer piping in Test 5

شکل ۴- زیرشویی لایه ماسه در آزمایش ۵



Fig. 5- Cracks formed in Test 5  
شکل ۵- ترک‌های ایجاد شده در آزمایش ۵

جدول ۲- مقادیر پس‌روی، کاهش تراز پیشانی آبکند و حجم رسوب تولید شده کل

Table 2- Total headcut movement, waterfall decline and produced sediment volume

Parameters	Dimension	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Total headcut movement (H in Fig. 2)	cm	55	70	90	100	76
Total waterfall decline (D in Fig. 2)	cm	15	18	23	24	20
Total produced sediment volume	m <sup>3</sup>	0.16	0.21	0.32	0.36	0.24

پس‌روی دارد. همچنین با تقسیم حجم رسوب لحظه‌ای بر بازه زمانی مربوطه، دبی رسوب لحظه‌ای به دست آمد، (شکل ۸). تغییرات دبی رسوب لحظه‌ای با روندی شبیه به سرعت لحظه‌ای پس‌روی و کاهش تراز پیشانی آبکند، در ابتدا صعودی و سپس نزولی بوده تا به یک مقدار ثابت نزدیک شود. همان‌طور که در شکل‌های (۶) تا (۸) قابل مشاهده است، بیش‌ترین مقدار پارامترهای اندازه‌گیری شده در نمونه چهار، با تحکیم کوتاه‌مدت و ۷۰ درصد رس، و کم‌ترین آن‌ها در نمونه یک، با تحکیم بلندمدت و ۱۰۰ درصد رس، رخ داد.

به‌طور کلی میزان تغییرات در ابتدای آزمایش‌ها بیشتر بوده که با گذشت زمان و متعادل شدن فرسایش، میزان تغییرات کاهش می‌یابد و ابعاد چاله آبشستگی در پایین آبکند با نسبت یکسانی تغییر می‌کند. در واقع تغییراتی وجود دارد اما مقدار آنها متعادل شد و به یک روند ثابتی رسید.

همچنین در شکل‌های (۶) تا (۸)، میزان پس‌روی پیشانی آبکند (مهاجرت طولی آبکند یا میزان H در شکل ۲) نسبت به زمان و سرعت لحظه‌ای آن، کاهش تراز پیشانی آبکند (میزان D در شکل ۲) نسبت به زمان و سرعت لحظه‌ای آن و دبی رسوب لحظه‌ای قابل مشاهده است. طبق شکل (۶)، در تمامی آزمایش‌ها، میزان پس‌روی بالادست آبکند نسبت به پیشانی با گذشت زمان، روندی صعودی دارد. با تقسیم میزان پس‌روی‌ها بر بازه زمانی مربوطه، سرعت پس‌روی لحظه‌ای بدست می‌آید، (شکل ۶). طبق این شکل، روند تغییرات سرعت پس‌روی در تمامی آزمایش‌ها مشابه، در ابتدا صعودی و سپس نزولی، می‌باشد. بیش‌ترین میزان تغییرات در ۱۰ دقیقه ابتدایی بوده و بعد از آن به یک مقدار ثابتی نزدیک می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۷) قابل مشاهده است، کاهش تراز پیشانی آبکند با گذشت زمان روندی نزولی دارد، که این روند بعد از گذشت ۱۰ دقیقه به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود. با تقسیم میزان کاهش تراز بر بازه زمانی مربوطه، سرعت لحظه‌ای کاهش تراز پیشانی آبکند به دست می‌آید و روندی مشابه با روند تغییرات سرعت لحظه‌ای



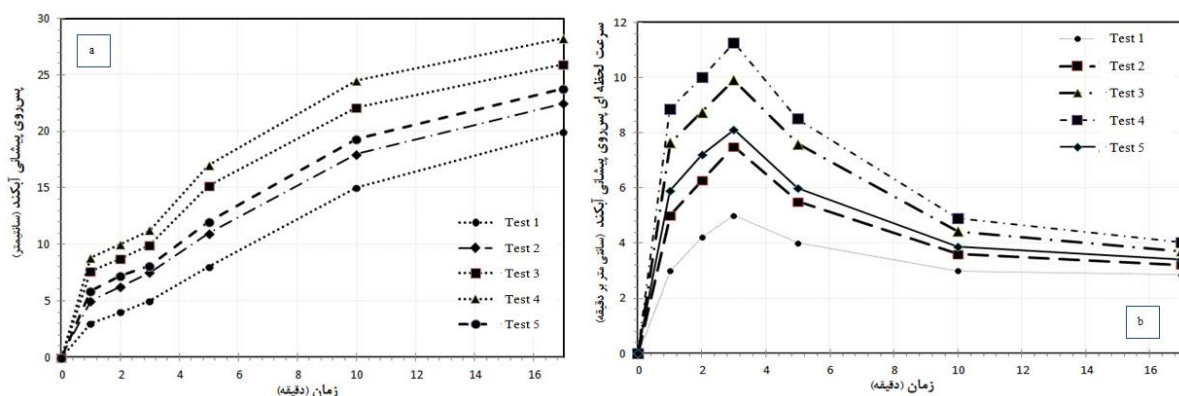


Fig. 6- (a) Temporal variations of headcut movement, (b) Instantaneous headcut velocity  
 شکل ۶- (a): میزان سرروی آبکند نسبت به زمان. (b): سرعت لحظه‌ای آن

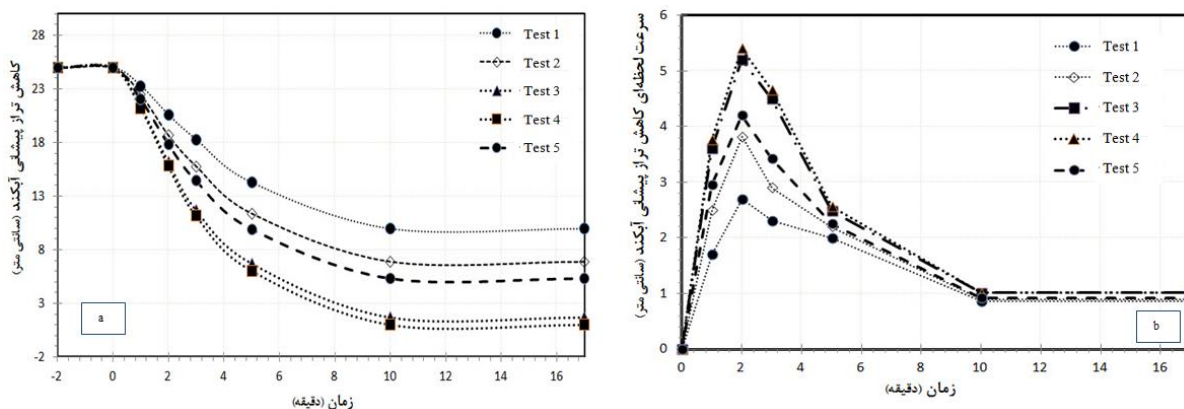


Fig. 7- (a) Temporal variations of waterfall decline, (b) Instantaneous waterfall decline velocity  
 شکل ۷- (a): میزان کاهش تراز پیشانی آبکند نسبت به زمان. (b): سرعت لحظه‌ای آن

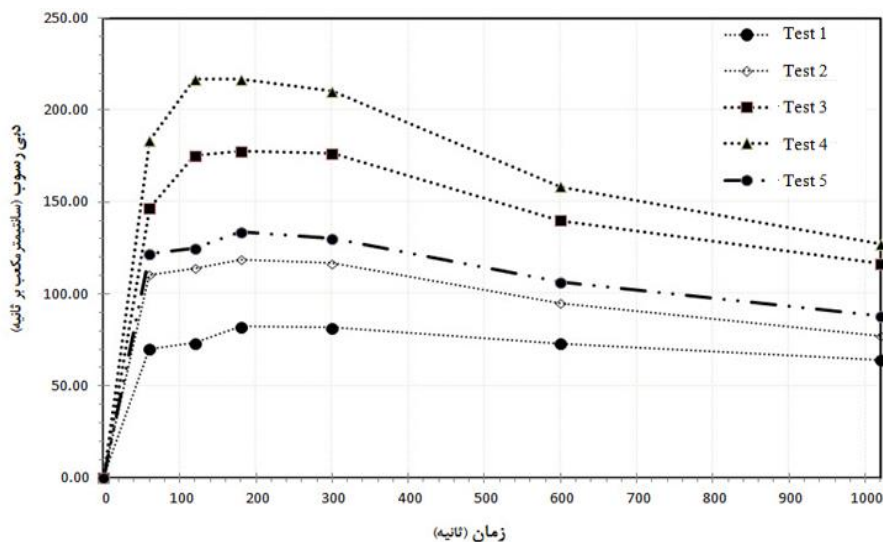


Fig. 8- Temporal variations of sediment discharge  
 شکل ۸- دبی رسوب لحظه‌ای

جدول ۳- مشخصات آزمایش‌های مورد مقایسه

Table 3- Specifications of Compared Experiments

Tests	Consolidation Type	Variations of Clay content	Sandy Layer
Test 2 to Test 1	Long-term	30% decrease	-
Test 4 to Test 3	Short-term	30% decrease	-
Test 5 to Test 2	Long-term	Constant	In waterfall bed of test 5
Test 4 to Test 5	Short-term & Long-term	Constant	In waterfall bed of test 5
Test 3 to Test 1	Short-term & Long-term	Constant	-
Test 4 to Test 2	Short-term & Long-term	Constant	-

جدول ۴- مقایسه مقادیر پس‌روی، کاهش تراز پیشانی آبکند و حجم رسوب تولید شده کل

Table 4- Total headcut movement, waterfall decline and produced sediment volume comparison

Tests	Total headcut movement (cm)	Total waterfall decline (cm)	Total produced sediment volume (m <sup>3</sup> )
Test 2 to Test 1	27% increase	20% increase	31% increase
Test 4 to Test 3	11% increase	5% increase	12% increase
Test 3 to Test 1	64% increase	53% increase	double
Test 4 to Test 2	43% increase	33% increase	71% increase
Test 4 to Test 5	32% increase	20% increase	50% increase
Test 5 to Test 2	9% increase	11% increase	14% increase

که این تأثیر همزمان کاهش درصد رس و تحکیم کوتاه‌مدت را در افزایش پارامترها نشان می‌دهد. می‌توان گفت که کاهش درصد رس و تحکیم کوتاه‌مدت موجب افزایش مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده می‌شود، اما تأثیر تحکیم در سرعت بخشیدن به میزان تغییرات، به مراتب بیشتر از تأثیر کاهش میزان رس است.

کاهش ۳۰ درصدی رس در آزمایش چهار نسبت به آزمایش سه، با تحکیم کوتاه‌مدت، موجب افزایش پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش چهار شده است. در حالی که کاهش ۳۰ درصدی رس در آزمایش دو نسبت به آزمایش یک، با تحکیم بلندمدت، موجب افزایش بیشتری در این مقادیر شده است. مثلاً مقدار کل حجم رسوب تولید شده در آزمایش دو نسبت به آزمایش یک، با کاهش ۳۰ درصدی رس در شرایط تحکیم بلندمدت، تقریباً ۳۱ درصد و در آزمایش چهار نسبت به آزمایش سه، با کاهش ۳۰ درصدی رس در شرایط تحکیم کوتاه‌مدت، ۱۲ درصد افزایش یافته است. کاهش یکسان مقدار رس در تحکیم بلندمدت و کوتاه‌مدت (کاهش ۳۰ درصدی)، باعث شد که مقادیر کل مهاجرت طولی و حجم رسوب تولید شده تقریباً ۲/۵ برابر (۲۷ درصد نسبت به ۱۱ درصد و ۳۱ درصد نسبت به ۱۲ درصد)، و کاهش تراز پیشانی آبکند چهار برابر (۲۰ درصد نسبت به پنج درصد) در تحکیم بلندمدت نسبت به کوتاه‌مدت، افزایش یابد. بیشترین درصد تغییرات در کاهش تراز پیشانی آبکند مشاهده شد.

تأثیر نوع تحکیم و افزودن لایه ماسه‌ای و اثر کاهش درصد رس بر این دو پارامتر، بین مقادیر کل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۳) مشخصات آزمایش‌های مورد مقایسه ارائه شده است. نتایج این مقایسه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

#### بررسی تأثیر نوع تحکیم و میزان رس

همان‌طور که انتظار می‌رفت در تحکیم کوتاه‌مدت میزان مهاجرت طولی، حجم رسوب تولید شده و کاهش تراز پیشانی آبکند به مراتب بیشتر از آزمایش‌هایی با شرایط تحکیم بلندمدت بود. بیش‌ترین میزان مهاجرت طولی در نمونه چهار، با تحکیم کوتاه‌مدت و ۷۰ درصد رس، و کم‌ترین آن در نمونه یک، با تحکیم بلندمدت و ۱۰۰ درصد رس، رخ داد. طبق جدول (۴)، مقدار کل مهاجرت طولی در آزمایش سه، با میزان ۱۰۰ درصد رس و تحکیم کوتاه‌مدت، نسبت به آزمایش یک، با میزان ۱۰۰ درصد رس و تحکیم بلندمدت، تقریباً ۶۴ درصد افزایش داشته که این مقدار در آزمایش چهار، با میزان ۷۰ درصد رس و تحکیم کوتاه‌مدت، نسبت به آزمایش دو، با میزان ۷۰ درصد رس و تحکیم بلندمدت، تقریباً ۴۳ درصد بود. کاهش درصد رس موجب اختلاف کمتری بین آزمایش‌های دو و چهار شده است. با کاهش میزان رس در نمونه‌ها، تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده افزایش داشت.

طبق جدول (۴)، بیشترین میزان افزایش در پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به آزمایش سه نسبت به آزمایش یک می‌باشد،

آزمایش قرارگرفت. علاوه بر این در یکی از آزمایش‌ها از یک لایه ماسه‌ای در بستر آبکند استفاده شده، تا تأثیر این لایه نیز بررسی شود. مطابق با نتایج Wilcox et al. (2001)، مشاهده شد که هرچه درصد رس بیش‌تر باشد، مهاجرت آبکند به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری می‌باشد. وقتی میزان رس در دو آزمایش برابر باشد، مقادیر مهاجرت طولی، کاهش تراز پیشانی آبکند و حجم رسوب تولید شده در آزمایش با بستر فرسایش‌پذیرتر (آزمایش پنج با افزودن لایه ماسه‌ای) به مراتب بیشتر است. تأثیر تحکیم در سرعت بخشیدن به میزان تغییرات، به مراتب بیشتر از تأثیر لایه ماسه‌ای و کاهش چسبندگی است. کاهش یکسان مقدار رس در تحکیم بلندمدت و کوتاه‌مدت، باعث شد که پارامترهای اندازه‌گیری شده تقریباً ۲/۵ برابر در تحکیم بلندمدت نسبت به کوتاه‌مدت افزایش یابد. در واقع تأثیر کاهش درصد رس در تحکیم بلندمدت مشهودتر بود.

بررسی سرعت پس‌روی و کاهش تراز پیشانی آبکند، با توجه به جنس خاک، در حفظ سازه بالادست رودخانه مؤثر می‌باشد. هم‌چنین محاسبه تقریبی حجم رسوب تولید شده ناشی از این فرسایش، به کنترل مقدار رسوب در مخازن سدهای پایین‌دست کمک می‌کند. در این تحقیق سعی شد بخشی از تحلیل‌های مربوط به این نوع فرسایش صورت گیرد، اما بررسی فرسایش آبکندی، به‌ویژه در خاک‌های چسبنده که رفتار پیچیده‌ای دارند، نیاز به بررسی‌ها و آزمایش‌های بیشتری دارد.

### تقدیر و تشکر

این تحقیق در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است و نویسندگان از مسئولین موسسه، بخاطر در اختیار قراردادن امکانات، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در شکل‌های (۶) تا (۸) نیز، در مقایسه با نمودارهای آزمایش‌های سه و چهار، اختلاف بیشتری بین نمودارهای آزمایش‌های یک و دو مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که تأثیر کاهش درصد رس در تحکیم بلندمدت مشهودتر بود.

### بررسی تأثیر افزودن لایه ماسه‌ای و میزان رس

با افزودن یک لایه ماسه‌ای در آزمایش پنج و فرسایش‌پذیر شدن بستر آبکند، مقادیر مهاجرت طولی، حجم رسوب تولید شده و کاهش تراز پیشانی آبکند نسبت به آزمایش دو، با همان مقدار ترکیب رس و سیلت و شرایط تحکیم یکسان، افزایش داشته است. در واقع با شسته شدن لایه ماسه و خالی شدن فضای زیر آبکند، سرعت تغییرات بیشتر می‌شود. و این باعث شده که درصد تغییرات در آزمایش چهار نسبت به آزمایش پنج کمتر از درصد تغییرات در آزمایش چهار نسبت به آزمایش دو باشد. به‌عنوان مثال، طبق جدول (۴)، میزان حجم رسوب تولید شده در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو تقریباً ۱۴ درصد، در آزمایش چهار نسبت به آزمایش پنج، ۵۰ درصد و در آزمایش چهار نسبت به آزمایش دو، ۷۱ درصد افزایش داشته است.

کاهش درصد رس موجب افزایش مقادیر مهاجرت طولی، کاهش تراز پیشانی آبکند و حجم رسوب تولید شده شد، اما وجود لایه ماسه‌ای در کنار کاهش درصد رس موجب افزایش بیشتر این پارامترها گردید. در واقع افزودن لایه ماسه‌ای، کاهش درصد رس و تحکیم کوتاه‌مدت موجب افزایش مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده می‌شود، اما تأثیر تحکیم در سرعت بخشیدن به میزان تغییرات، به مراتب بیشتر از تأثیر لایه ماسه‌ای و کاهش میزان رس است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تعداد پنج نمونه خاک چسبنده، با ترکیب متفاوت رس و سیلت و با تحکیم بلندمدت و کوتاه‌مدت در شرایط طبیعی، مورد

### References

- 1- Mokarian, Z., Hosseini, S.H., Saneie, S.M. and Hosseini, M., 2015. Experimental study of the effect of the clay found in the riverbank materials on the river bank erosion. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(1), pp.77-84. (In Persian).
- 2- Papanicolaou, T., Wilson, C., Dermisis, D., Elhakeem, M. and Thomas, J., 2008. The effects of headcut and knickpoint propagation on bridges in Iowa. *Final Rep. IIHR - Hydroscience & Engineering*.
- 3- Poesen, J., Nachtergaele, J., Vertsraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), pp. 91-133.
- 4- Poesen, J., Vanwallegem, T., Vente, J., Knapen, A., Verstraeten, G. and Martinez-Casasnovas, J.A., 2006. *Gully erosion in Europe*.
- 5- Robinson, M.K. and Hanson, J.G., 2001. Headcut erosion research. *Proceedings of the 7th Federal Interagency sedimentation Conference*.

- 6- Soleimanpour, S.M., Soufi, M. and Ahmadi, H., 2008. Effect of different land uses on initiation of gully erosion in Fars province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 2(3), pp.66-68. (In Persian).
- 7- Soleimanpour, S.M., Soufi, M. and Ahmadi, H., 2009. Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province. *Journal of Water and Soil*, 23(1), pp. 131-141. (In Persian).
- 8- Wilcox, J., Benoit, T. and Mink, L., 2001. Evaluation of geomorphic restoration techniques applied to fluvial systems. *Feather River Coordinated Resource Management Group*.
- 9- Zhu, Y., Xie, Y., Guo, X. and Zhao, G., 2013. Experimental observations of headcut erosion during embankment breaching. *IAHR World Congress*.