


# Numerical Comparison of Performance and Stability of Concrete and Gabion Retaining Walls in Riverbanks Protection

Reza Hosseinzadeh Asl<sup>1</sup>, Mehdi Yasi<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

\* [m.yasi@ut.ac.ir](mailto:m.yasi@ut.ac.ir)

Received: 5 May 2022, Accepted: 6 November 2022  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** A retaining wall is a structure that maintains the pressure due to the situation in the level difference caused by an embankment, excavation, or natural factors. In this study, the performance and stability of two different types of retaining walls is evaluated in terms of stability and performance and compared with rigid walls, weight retaining wall (concrete) and flexible walls, gabion retaining wall (in weight form) with almost the same conditions. The geometry of the concrete weight retaining wall is chosen so that the result of the forces acting on it (including weight and lateral forces) is in the core of the base or its horizontal sections. The expected results of this study include the study of retaining wall performance in terms of soil material change behind the wall, river water depth, and retaining wall slope, and finally, comparison and selection of suitable retaining wall to protect the river wall between two types of concrete and gabion walls.

**Methodology:** SLOPE/W software is the most advanced slope stability software for soil and rock slopes from the GEO-STUDIO 2012 software suite. SLOPE/W effectively analyzes various types of slip surface shapes and determines factors of safety, pore water pressure conditions, soil properties, and loading conditions. In this study, the Morgenstern-Price method has been used. Also, the balance of forces and anchors for sliding sections is determined, and by Entry and Exit method, the factor of safety is determined.

In this study, different factors such as type of wall and river bed materials, water depth in the river, type of retaining wall materials, the slope of retaining wall, and soil adhesion were investigated. Based on the critical conditions in the evaluation of the stability of retaining walls, the saturation state (the most critical state possible) was considered for the wall and river bed materials. To apply the soil properties behind the retaining wall in the model, a homogeneous porous medium and isotropy ( $K_x/K_y = 1$ ) were considered, and for the slip criterion of the Mohr-Coulomb resistance model, which is the most common method for expressing shear strength in geotechnical materials, used. To compare the results, the retaining wall was designed and modeled in mirror conditions, i.e. the vertical part of the wall on the riverside and the stair part of the wall under the soil.

**Results and Discussion:** Since the permeability and hydraulic conductivity of medium gravel are higher than that of average sand, it has a greater capacity to drain excess water. It

was observed that the active force and torque of the average gravel are 7% and 11% lower than the average sand, respectively. This is also true for the gabion retaining wall as well as the state of the river with a water depth of 2 meters and 4 meters. In a river with no water, the amount of active force and torque is about 20% more than in a river with a water depth of 2 meters and about 40% more than in a river with a water depth of 4 meters. In the retaining wall in the mirror state, in the river without water, the active force and torque have both increased by about 16%, and in the river water depth of 2 meters, it has increased by about 17% and in the depth of 4 meters, it has increased by 23%. The results of stability and factor of safety for two wall slopes in the conditions of water level drop showed that the factor of safety at a depth of 2 meters decreases by about 20% compared to a depth of 4 meters. Also, the factor of safety of the river with no water is reduced by about 30% compared to a depth of 4 meters. The results showed that the retaining wall in mirror conditions has a better performance than other models in terms of factor of safety. Also, the index wall in the vertical position, at a depth of 4 meters, which is the same depth equal to the total height of the wall from the riverbed, has the lowest factor of safety.

**Conclusion:** In this research, the stability and performance of two types of concrete and gabion retaining walls were examined with SLOPE/W software under similar river conditions. A total of 24 models were designed using two types of bank material (gravel and sand), two slopes of the retaining walls, and three river water depths. Also, 6 models of vertical walls were considered for comparison. The results indicated that the coarser-grained bank material produces a lower level of pore pressure, which in turn results in lower values of active force and torque by 11% and 7%, respectively, compared with the sand material. The results of this applied research can be used as a guideline for selection between two types of retaining walls (i.e. Concrete or masonry walls, and gabion walls) in different river conditions.

**Keywords:** Concrete retaining wall, Gabion retaining wall, Riverbank protection, Slope protection, SLOPE/W.



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This 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/>)

# مقایسه عددی عملکرد و پایداری دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی در حفاظت از دیواره رودخانه

رضا حسین زاده اصل<sup>۱</sup> و مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران.  
۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

\* m.yasi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵ ☞ وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** از روش های مستقیم حفاظت دیواره رودخانه ها، استفاده از سازه دیوار نگهدار با مصالح مختلف است. در این تحقیق، پایداری و عملکرد دو نوع دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی، با سیمای پلکانی در شرایط همسان رودخانه، به کمک نرم افزار SLOPE/W بررسی شد. تعداد ۲۴ مدل اصلی، با دو نوع مصالح دیواره رودخانه (شن و ماسه)، با دو شیب دیوار نگهدار (۱:۱ و ۱:۲) و در سه تراز آب رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه، از ۶ مدل دیوار نگهدار قائم (در سمت رودخانه) نیز استفاده شد. نتایج نشان داد که در خاک دانه درشت تر شنی، فشار حفره ای کم تر بوده، در نتیجه نیرو و گشتاور محرک به ترتیب ۱۱ و ۷ درصد کم تر از ماسه است. همچنین، میزان نیرو و گشتاور محرک در رودخانه خشک حدود ۲۰ درصد بیش تر از حالت نیمه پر و ۴۰ درصد بیش تر از رودخانه لبریز می باشد. در مقایسه دو نوع دیوار، ضریب اطمینان عملکرد دیوار بتنی کمی بیش تر از دیوار تورسنگی است، ولی در شرایط مقطع پر رودخانه این اختلاف به صفر میل می کند. در شیب دیواره کمتر (۱:۲) و در عمق آب بالاتر، ضریب اطمینان دیوار تورسنگی بیش تر از دیوار بتنی است. از نتایج بررسی مدل ها، معادلات همبستگی بی بعد برای نسبت برآیند نیرو و گشتاور محرک و مقاوم بصورت تابعی از عمق نسبی آب و شیب دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی ارائه گردیده است. از نتایج این پژوهش کاربردی می توان برای راهنمای انتخاب بین دو گزینه دیوار نگهدار (بتنی یا سنگ و سیمانی، و تورسنگی) در شرایط مختلف رودخانه استفاده نمود.

**کلیدواژگان:** دیوار نگهدار بتنی، دیوار نگهدار تورسنگی، حفاظت دیواره رودخانه، حفاظت شیب، SLOPE/W.

## ۱- مقدمه

بهره برداری بهینه از رودخانه ها به عنوان مهم ترین منابع آبی با حفظ شرایط زیست محیطی، از جمله هدف های توسعه پایدار در مهندسی رودخانه به شمار می آید. فرآیند فرسایش دیواره رودخانه که مهم ترین عامل آن آب است، به صورت مستقیم به مهاجرت جانبی آبراهه های آبرفتی<sup>۱</sup>، اندرکنش نیروهای فعال<sup>۲</sup> ناشی از جریان آب و نیروهای مقاوم<sup>۳</sup> به جریان ناشی از مواد بستر مربوط می شود. ناپایداری دیواره رودخانه با فرسایش سطحی<sup>۴</sup> آغاز و در

ادامه پدیده آبشستگی<sup>۵</sup> و سپس فروریختگی<sup>۶</sup> به وجود می آید (Docker et al., 2008). استفاده از دیوارهای نگهدار (دیوار حایل<sup>۷</sup>)، یکی از روش های متداول به منظور مقابله با خطرهای همچون رانش، لغزش و یا ریزش زمین های شیب دار و به ویژه برای حفاظت از دیواره رودخانه، می باشد. دیوار نگهدار، سازه ای است که فشار ناشی از وضعیت موجود در اختلاف تراز به وجود آمده به علت خاکریزی، خاکبرداری و یا عامل های طبیعی را به صورت پایدار حفظ کند (Guideline for Design of

5 Scouring  
6 Slumping  
7 Retaining wall

1 Alluvial Channel  
2 Active Forces  
3 Passive Forces  
4 Sub-Aerial Erosion

تحلیلی حرکت دیوار بر فشار محرک خاک، یک روش تحلیلی جدید مبتنی بر تعادل حدی برای محاسبه فشار محرک خاک ارائه کرد و به این نتیجه رسید که توزیع فشار پشت دیوار، غیرخطی بوده و محل تاثیر نیرو در حالت محرک کمی بالاتر از  $1/3$  ارتفاع دیوار از پاشنه قرار می‌گیرد، که با نظریه کولمب متفاوت است. کاربرد قانون داری برای جریان غیراشباع مستلزم تعیین دقیق شیب منحنی مشخصه رطوبتی و بیان هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از رطوبت یا مکش ماتریک است ( Bertoldo, 2013). Liu (2014) در پژوهشی تاثیر فشار جانبی را بر دیوارهای حایل دایره‌ای بررسی و تعیین کرد که فشار جانبی به صورت نمایی با افزایش جابه جایی دیوار، کاهش می‌یابد. Rao (2016) در تحقیقی با عنوان تعیین فشار (محرک وارد بر دیوار نگهدار صلب با توجه به قوس شدگی در خاک‌های چسبنده، نتیجه‌گیری کرد که کاهش فشار جانبی محرک وارد بر دیوار نگهدار صلب با افزایش زاویه اصطکاک دیوار و خاک همراه می‌باشد. Shivakumar (2015)، پایداری شیب‌ها را به روش عنصر محدود بررسی کرده و بیان داشتند که در زمان تخلیه سریع نیاز به بررسی جدی پایداری شیب‌ها وجود دارد.

دیوارهای نگهدار را می‌توان از نظر مصالح، روش اجرا، کاربری و عملکرد رده‌بندی کرد. از نظر عملکرد سازه‌ای به دو صورت دیوارهای صلب و دیوارهای انعطاف‌پذیر تقسیم می‌شوند. دیوارهای نگهدار بتنی یا سنگ و سیمانی از نوع صلب و ناتراوا هستند. دیوار تورسنگی از روش‌های سازه‌ای با ویژگی‌ها بسیار متخلخل و تراوا، انعطاف‌پذیر در برابر نشست‌های دیواره و کف بستر، قوی، بادوام، قابل اعتماد، ساخت آسان و بوم‌شناختی (اکولوژیکی) است. تورسنگ‌ها، استوانه‌ها یا جعبه‌هایی هستند که با سنگ پر شده‌اند. جامع‌ترین ضابطه‌های فنی و اجرایی برای انواع تورسنگ‌ها توسط شرکت ایتالیائی مک‌کافری ارائه شده است (Peerdawood and Mawlood, 2010).

دیوارهای نگهدار در برابر افزایش فشار حفره‌ای آب به هر دلیل (چه به علت افزایش تراز آب زیرزمینی و چه به علت زلزله) حساس هستند. لذا باید آسانگری زهکشی در آن‌ها به کمک استفاده از مصالح دانه درشت و تمیز به عنوان

(Retaining Walls, 2005). همچنین دیوارهای نگهدار به عنوان دیواره محافظ کنار جاده‌ها، تونل‌ها، پایه‌های کناری پل‌ها استفاده می‌شوند. به علت ارتباط این سازه‌ها با پی و خاک محل اجرا، بررسی شرایط خاک و فشار وارده از طرف خاک در طراحی این‌گونه از سازه‌ها دارای اهمیت است (Niedostatkiewicz et al., 2011).

Coulomb (1776)، با بررسی تعادل حدی گوه گسیختگی با توجه به فرض خاک همسان و دارای چسبندگی و اصطکاک درونی و سطح گسیختگی خطی، معادله‌ای برای توزیع نیرو در پشت دیوار ارائه کرد (Das, 2010).

Rankine (1857) در ادامه تحقیقات انجام شده توسط Coulomb (1776)، فرض کرد که خاک در حالت تعادل خمیری است و در اصول با همان ضمیمه‌های Coulomb (1776) و این فرض که دیوار بدون اصطکاک و خاکریز دانه‌ای با توجه به تنش حد عنصر (المان) خاکریز است، روشی برای توزیع نیرو و به‌دست آوردن ضریب فشار جانبی ارائه کرد (Das, 2010). Culman (1875)، در زمینه سطح شکست بحرانی به صورت خطی و سپس فشار محرک کولمب بدون در نظر گرفتن بی‌نظمی سطح خاک و سربار، برای هر میزان اصطکاک دیوار خاک، روشی ترسیمی ارائه کرد (Bowles, 1994). Hird (1990)، نمودارهای بی‌بعد را برای ارزیابی پایداری شیروانی خاکریزهای مسلح با مصالح خاکی چسبنده و غیرچسبنده که خود بر روی پی‌ریزی (فونداسیون) خاکی با مصالح غیرچسبنده واقع شده، ارائه نمود.

Fishman (2009)، در پژوهشی به بررسی پایداری شیب‌های خاکی با ساز و کار (مکانیزم) لغزش، واژگونی و کج شدن‌های محدود در شکست سازه‌های نگهدارنده بتنی با بستر سنگی پرداخته است. بر مبنای این تحقیق، لغزش تنها در موارد خاصی امکان‌پذیر است که در قسمت سطح تماس دیوار نگهدارنده با بستر، فراسنجه (پارامترهای) برشی پی تضعیف شده باشد. همچنین شکست پاشنه بالادست دیوار و فشار بیش از حد در این قسمت می‌تواند عامل اصلی کج شدن یا شکستگی جزئی و محدود در دیوارهای نگهدار باشد و موجب گسیختگی دیوار از پی در پاشنه بالادست آن نیز شود. (Chen (2014)، با بررسی

STUDIO و بسیاری از نرم‌افزارهای همانند مانند Plaxis، از روش عنصر محدود استفاده نمی‌شود و تنها شامل مجموعه‌ای از روش‌های ترسیمی و تعادل حدی مانند بیشاپ<sup>۱</sup>، جانبو<sup>۲</sup>، مورگنشترن<sup>۳</sup> - پرایس<sup>۴</sup>، اسپنسر<sup>۵</sup>، شارما<sup>۶</sup>، لاو و کارفه<sup>۷</sup> و دیگر روش‌های موجود که روش‌های محبوبی در تحلیل پایداری هستند، برای تحلیل پایداری شیب است (Salmasi et al., 2019, Hosseinzadeh Asl, 2018). این نرم‌افزار همچنین سازگاری و همبستگی بسیار مناسبی با دیگر نرم‌افزارهای اجزای محدود بسته نرم‌افزاری GEO-STUDIO 2012 دارد. هدف اصلی نرم‌افزار SLOPE/W تحلیل پایداری ایستایی و ایستایی مانند (استاتیکی و شبه‌استاتیکی) سدهای خاکی در مرحله‌های مختلف ساخت و بهره‌برداری با امکان مسلح سازی شیب‌ها، بررسی سطح‌های شیب‌دار و تعیین ضریب اطمینان در طراحی شیب استفاده می‌شود. ضریب اطمینان (Fs)، نسبت بین مقاومت برشی نهایی خاک در صفحه گسیختگی در زمان گسیختگی و تنش برشی مقاوم در سطح لغزش بحرانی احتمالی می‌باشد، که از رابطه‌های تعادل به دست می‌آید در این پژوهش از روش تعادل حدی، روش مورگنشترن - پرایس که برای برابری نیروهای بین قطعه‌ها با استفاده از یک تابع اختیاری تعریف می‌شود، استفاده شده است. در این روش از طریق تعادل نیروها و لنگرها برای مقطع‌ها لغزشی تعیین شده و با روش ورودی و خروج<sup>۷</sup> ضریب اطمینان مشخص می‌شود. در همه روش‌های تعادل حدی فرض می‌شود که میزان مقاومت برشی در امتداد سطح شکست احتمالی با استفاده از رابطه‌های خطی (مور-کولمب) یا غیرخطی بین این مقاومت و تنش عادی (نرمال) سطح شکست قابل تعیین است. در روش مورگنشترن - پرایس همه نیروهای بین قطعه‌ها، تحت یک زاویه مشخص با محور افقی در نظر گرفته شده و زاویه نیروی برابری بین قطعه‌ها نسبت به افق، به صورت ضریبی از یک تابع فرضی در نظر گرفته

مصالح پرکننده در پشت دیوار یا تعبیه لوله‌های زهکش به منظور آسانگری خروج آب‌های جمع شده در پشت دیوار فراهم شود. از سوی دیگر، اجرای دیوارهای نگهدار به صورت پله‌ای یا شیب‌دار نسبت به حالت قائم در سمت رودخانه دارای برتری‌هایی از جمله کاهش حجم خاک ریزی پشت دیوار، مهار بهتر لایه‌های تقویت کننده، کاهش نشست خاک، پایداری در برابر آبشستگی پنجه، آسانگری اجرا، دسترسی به کرانه آب، ارزش بوم‌شناختی، و همچنین زیبا نما می‌باشد.

هدف اصلی از این پژوهش کاربردی، مقایسه پایداری و عملکرد دو نوع متفاوت از دیوارهای نگهدار وزنی (۱- دیوار صلب بتنی، و ۲- دیوار انعطاف‌پذیر تورسنگی) در شرایط همسان بوده است. هندسه دیوار نگهدار وزنی بتنی طوری انتخاب می‌شود که برآیند نیروهای وارد بر آن (شامل وزن و نیروهای جانبی) در هسته قاعده و یا مقطع‌های افقی آن قرار گیرد. در طرح دیوار تورسنگی به معیارهای شرکت ایتالیایی مک کافری توجه شده است. نتایج مورد انتظار از این بررسی شامل بررسی عملکرد دیوار نگهدار در شرایط تغییر جنس مصالح خاکی پشت دیوار، عمق آب رودخانه و شیب دیواره نگهدار و در نهایت مقایسه و انتخاب دیوار نگهدار مناسب برای حفاظت از دیواره رودخانه از بین دو نوع دیوار بتنی (که همانند با سنگ و سیمانی نیز است) و دیوار تورسنگی می‌باشد. نوآوری این پژوهش کاربردی را باید مستندسازی روش طرح و مقایسه دیوارهای نگهدار رودخانه، و در نتیجه انتخاب بهترین شرایط برای ساخت این دیوار به شمار آورد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معرفی نرم‌افزار SLOPE/W

نرم‌افزار SLOPE/W از مجموعه نرم‌افزاری GEO-STUDIO 2012، پیشروترین نرم‌افزار پایداری شیب برای دامنه‌های خاک و سنگ است. SLOPE/W به‌طور موثری به تجزیه و تحلیل انواع شکل‌های سطح لغزش، تعیین ضریب اطمینان، شرایط فشار آب منفذی، ویژگی‌های خاک و شرایط بارگیری می‌پردازد. در نرم‌افزار SLOPE/W برخلاف دیگر نرم‌افزارهای مجموعه نرم‌افزاری GEO-

1 Bishop  
2 Janbu  
3 Morgenstern - Price  
4 Spencer  
5 Sarma  
6 Lowe - Karafiath  
7 Entry and Exit

گرفته شده است. سیمای نیمرخ عرضی یک رودخانه فرضی و دیوار نگهدار در شکل ۲ نشان داده شده است. مهندس دیوار بر مبنای شرایط عمومی رودخانه‌ها فرض شد. از این رو، عمق آبستنگی در بازه احداث دیوار نگهدار معادل سه متر ( $ds=3m$ ) و ارتفاع دیواره از کف بستر تا ساحل بالا معادل چهار متر ( $H=4m$ ) انتخاب شد.

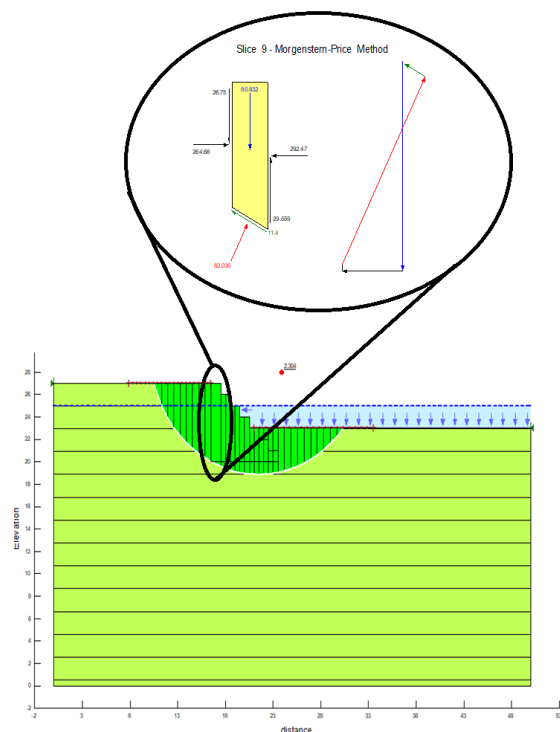
در پایداری دیوار نگهدار فراسنجه‌های چندی تاثیر دارند. در این تحقیق عامل‌هایی مانند: نوع مصالح دیواره و بستر رودخانه، عمق آب در رودخانه، نوع مصالح دیوار نگهدار، شیب دیوار نگهدار و چسبندگی خاک بررسی شد. مواد بستری رودخانه‌ها همگی ناچسبنده (ماسه ای، شنی یا درشت‌تر) است. در این بررسی از مواد شن و ماسه استفاده شده است. همچنین، مواد بستری رودخانه (کف و دیواره) و مواد پشت دیوار نگهدار همسان فرض شده است. ویژگی‌های مواد بستر (کف و کناره‌ها) رودخانه و ویژگی‌های دیوارهای نگهدار در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار SLOPE/W، دیوارهای نگهدار در حالت ناشباع (حتی در صورت نبود زهکش) پایدار می‌باشند (Nouri et al., 2019)؛ از این رو، بنابر شرایط بحرانی در ارزیابی پایداری دیوارهای نگهدار، حالت اشباع (بحرانی‌ترین حالت ممکن) برای مواد دیواره و بستر رودخانه در نظر گرفته شد. ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی دو نوع مواد تشکیل دهنده بستر و دیواره رودخانه در جدول ۲ ارائه شده است. برای مقایسه بیشتر، مصالح شن را بدون چسبندگی در نظر گرفته شد. برابر جدول شماره ۲، برای مصالح ماسه‌ای دو شرایط (ماسه خالص با چسبندگی صفر و مخلوط ماسه‌ای با چسبندگی ۵) در نظر گرفته شد (Peerdawood and Mawlood, 2010; Netzal., 2016; Jayanandan et al., 2020).

برای اعمال ویژگی‌های خاک پشت دیوار نگهدار در مدل‌سازی، محیط متخلخل همگن و همروند یا ایزوتروپ ( $K_x/K_y = 1$ ) در نظر گرفته شد و برای معیار لغزش از مدل مقاومتی مور-کلمب<sup>۱</sup> که رایج‌ترین روش برای بیان مقاومت برشی در مصالح ژئوتکنیکی است، استفاده شد. برای بررسی شرایط هیدرولیکی رودخانه، سه شرایط جریان

شده که این ضریب به عنوان یک مجهول در معادله‌ها تعادل وارد می‌شود. در شکل ۱ یکی از مدل‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار و تقسیم قطعه‌ها و نیروهای وارد بر هر قطعه نشان داده شده است.

ضریب اطمینان کل دیوار نگهدار در امتداد سطح لغزش است و در واقع کمترین تنش برشی مقاومی است که به ازای آن دیوار پایدار می‌ماند. کمترین ضریب اطمینان پایداری یک شیب برابر واحد می‌باشد ولی اغلب در طراحی این کمینه را برابر ۱/۵ در نظر می‌گیرند (Salmasi et al., 2019).



**Fig. 1** The transverse profile of the retaining wall and its division into different parts and elements in the Morgenstern - Price method and the way to apply forces to each element.

شکل ۱ نیمرخ عرضی دیوار نگهدار و تقسیم به قطعه‌ها و عنصرهای مختلف در روش مورگنسترن - پرایس و روند اعمال نیرو برای هر عنصر.

## ۲-۲- طرح مدل‌های فیزیکی

برای حفاظت مستقیم دیواره رودخانه از روش‌های مختلف (روکش‌ها و دیوارهای نگهدار) استفاده می‌شود. در این تحقیق، روش دیوار نگهدار وزنی با شکل و اندازه هندسی همسان، ولی با دو نوع مصالح (تورسنگی و بتنی) برای مقایسه شرایط پایداری و کارکرد این دو گزینه در نظر

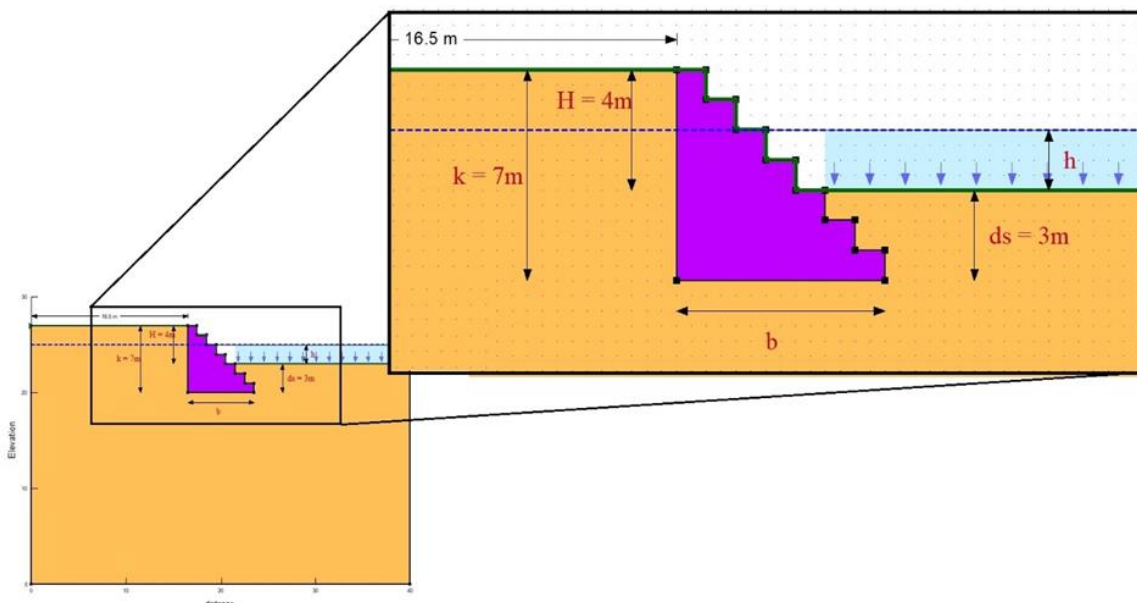


Fig. 2 Transverse profile of retaining wall (gabion and concrete) to protect the river banks

شکل ۲ نیمرخ عرضی دیوار نگهدار (تورسنگی و بتنی) برای حفاظت دیواره رودخانه

جدول ۱ میزان فراسنجه‌های مورد استفاده در مدل‌ها

Table 1 Values of the parameters used in the models

The parameters that have been studied	The values of the parameters used in the model	
Type of soil material behind the retaining wall	Medium Sand / Medium Gravel	
Type of retaining wall	Concrete / Gabion	
Slope of the retaining wall	$z=1$	$b=k$
	$z=2$	$b=2k$
Height of retaining wall from the river bed ( $H$ ): meters	4	
Depth of water in the river ( $h$ ): meters	0, 2, 4	

برای محاسبه گستره  $A$ ، فاصله عنصر مورد نظر ( $y_i$ ) از عنصر مجاور ( $y_{i-1}$ ) ضرب در عرض واحد مدل محاسبه می‌شود. نیروی وارد بر دیوار نگهدار برابر مجموع نیروی عنصرها است. در رابطه (۲)، فشار وارد بر المان ( $P_i$ ) و فشار وارد بر المان مجاور ( $P_{i-1}$ ) است.

برای بی‌بعد سازی از طریق تحلیل ابعادی، از نسبت عمق آب بر ارتفاع دیوار نگهدار از کف رودخانه ( $h/H$ ) استفاده شد. ارتفاع دیوار نگهدار از کف رودخانه برابر ۴ متر و عمق آب رودخانه شامل میزان‌های ۰، ۲ و ۴ متر است.

همچنین، نیروی وارد بر دیوار به صورت بدون بعد و نسبت به وزن دیوار ( $F/W$ ) مورد نظر قرار گرفت. معادله‌های همبستگی مبتنی بر داده‌ها و نتایج شمار ۲۴ مدل، و در محدوده متغیرها که در جدول ۲ معرفی شده است، توسط

جریان در مقطع رودخانه در نظر گرفته شد: ۱- پرآب که کل ارتفاع دیوار نگهدار در تماس با آب؛ ۲- شرایط نیمه پر آب که ارتفاع آب تا نصف ارتفاع دیوار نگهدار باشد؛ و ۳- شرایط بدون آب یا خشک‌رودی.

مدل‌های مورد بررسی شامل دو گزینه دیوار نگهدار (تورسنگی و بتنی) است؛ که برای هر گزینه ۱۲ آزمون، و در مجموع ۲۴ آزمون مدل‌سازی طرح و اجرا شد. برای محاسبه نیروی وارده به دیوار نگهدار، با توجه به این‌که فراسنجه فشار را از نرم‌افزار به ازای هر عنصر می‌توان به دست آورد، با توجه به رابطه (۱) که برای محاسبه نیرو می‌باشد، رابطه (۲) به دست می‌آید (Nouri et al., 2019):

$$F = PA \quad (1)$$

$$F_i = \frac{(P_i + P_{i-1})}{2} (y_i - y_{i-1}) \quad (2)$$



قسمت قائم دیوار در طرف رودخانه و قسمت پله‌ای دیوار در زیر خاک طراحی و مدل‌سازی شد. برای این کار دیوار نگهدار بتنی با شیب (۱:۱) و مصالح خاکی شن متوسط با عمق آب رودخانه ۰، ۲ و ۴ متر طراحی شد. شکل ۳، نمایی از نیمرخ عرضی دیوار نگهدار بتنی در شرایط آینه (قسمت قائم سمت رودخانه) نشان داده شده است. در بررسی تکمیلی، برابر شکل ۳، دیوار نگهدار قائم با رودخانه بدون آب و عمق آب ۲ متر و ۴ متر طراحی شد. علت طرح مدل دیوار نگهدار قائم برای بررسی اثر شیب دیوار شاخص در حالت آینه (شکل ۴) بر پایداری و ضریب اطمینان می‌باشد. برای مقایسه نتایج مدل‌سازی در آزمون‌های مختلف از شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) استفاده گردید.

نرم‌افزار SPSS تحلیل و به‌دست آمده‌اند. گشتاور نیروی وارد بر دیوار از جهت فشار حفره‌ای به عنوان گشتاور زیان‌آور و گشتاور مربوط به وزن دیوار به عنوان گشتاور پایداری بررسی می‌شود. نیروی وارده بر هر عنصر ضرب در میانگین فاصله عمودی آن از محور گردش گشتاور برابر با گشتاور واژگونی دیوار نگهدار بوده و گشتاور وزنی هر قسمت از دیوار نگهدار ضرب در فاصله افقی محور نیرو از محور گردش گشتاور، برابر گشتاور پایداری دیوار نگهدار خواهد بود. در این بررسی، رابطه بی‌بعد شده نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور پایداری ( $M_{\text{overturning}} / M_{\text{stabilitytorque}}$ ) استفاده شد.

### ۳-۲- مدل‌سازی دیوار نگهدار در شرایط آینه

برای مقایسه نتایج، دیوار نگهدار را در شرایط آینه یعنی

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی مواد دیواره و بستر رودخانه

Table 2 Physical and hydraulic characteristics of river bed and banks materials

Parameters	The Unit	Medium Sand	Medium Gravel	Concrete retaining wall	Gabion retaining wall
Slip Criterion	-	<i>Mohr-Coulom</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	-	-
$Kx/Ky$	-	1	1	-	-
Unit Weight of Mass	$KN/m^3$	18.24	19.8	22	18
Adhesion $c$	$KPa$	0	5	-	0
Internal Friction Angle $\phi$	<i>Degree</i>	29	33	-	35

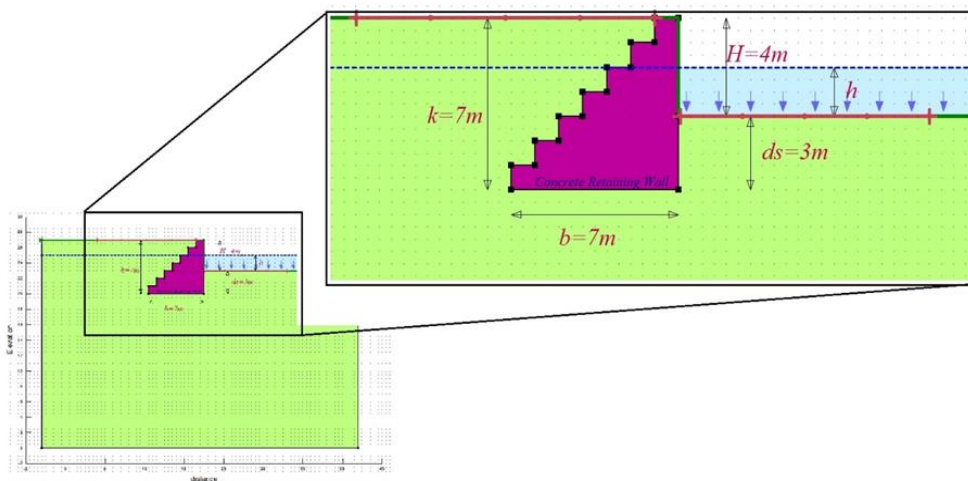


Fig. 3 Transverse profile of concrete retaining wall in mirror condition

شکل ۳ نیمرخ عرضی دیوار نگهدار بتنی در شرایط آینه



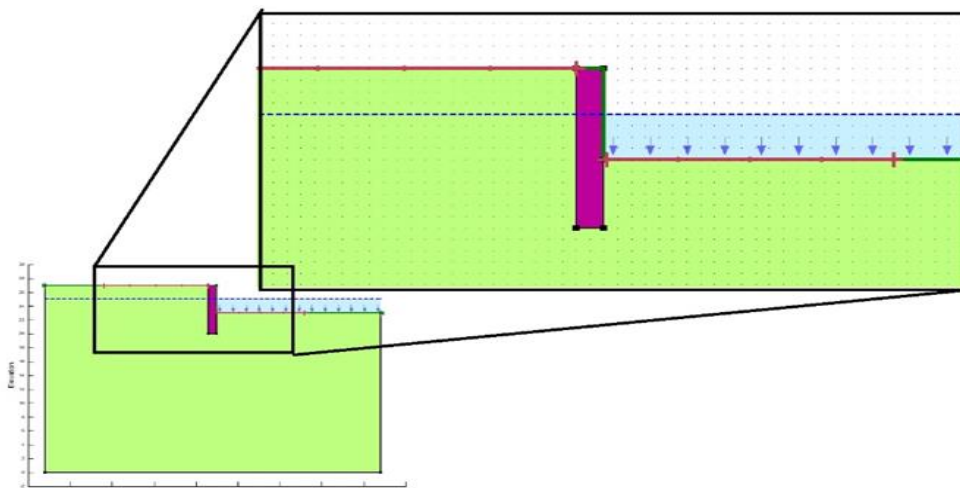


Fig. 4 Transverse profile of vertical concrete retaining wall

شکل ۴ نیمرخ عرضی دیوار نگهدار قائم بتنی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تاثیر جنس خاک پشت دیوار نگهدار بر میزان فشار حفره‌ای و گشتاور واژگونی

پایداری یک شیب خاکی تابعی از نیروهای محرک و مقاوم می‌باشد. ضریب اطمینان پایداری با استفاده از این نیروها و گشتاورهای به‌دست آمده محاسبه می‌شود ( Ghoddosi et al., 2018). ضریب اطمینان، نسبت بین Tultimate (soil) مقاومت برشی نهایی خاک در صفحه گسیختگی در زمان گسیختگی و Tmobilize(soil) تنش برشی مقاوم بسیج شده در سطح لغزش بحرانی احتمالی می‌باشد که از رابطه‌های تعادل به‌دست می‌آید. برای بررسی تاثیر جنس خاک بر پایداری شیب‌ها توسط دیوار نگهدارنده، نمودار رابطه بین جنس خاک و نیرو محرک و گشتاور واژگونی رسم شد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تاثیر نوع مصالح خاکی بر نیروی وارد شده و گشتاور واژگونی در حالت دیوار بتنی و عمق آب رودخانه صفر نشان داده شده است. برابر شکل ۵ و ۶، از آنجایی که نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی شن متوسط بیشتر از ماسه متوسط است (Tahouni., 2012)، ظرفیت تخلیه آب مازاد بیشتری را دارد و مشاهده می‌شود که گشتاور و نیروی محرک شن متوسط به ترتیب ۷ درصد و ۱۱ درصد کمتر از ماسه متوسط می‌باشد.

این موضوع برای دیوار نگهدار تورسنگی و همچنین حالت رودخانه دارای عمق آب ۲ متر و ۴ متر نیز صادق می‌باشد.

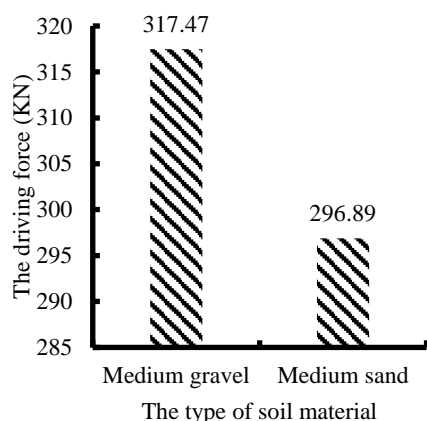


Fig. 5 The effect of the type of soil material behind the concrete retaining wall on the driving force in the river under dry condition

شکل ۵ تاثیر نوع مصالح خاکی پشت دیوار نگهدار بتنی بر نیروی محرک در حالت رودخانه بدون آب

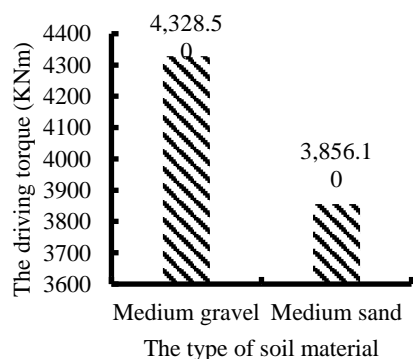
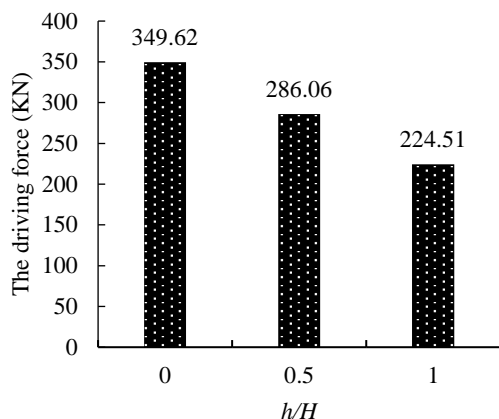


Fig. 6 The effect of the type of soil material behind the concrete retaining wall on the driving torque in the river under dry condition

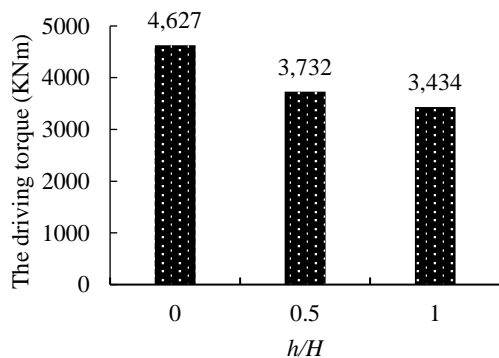
شکل ۶ تاثیر نوع مصالح خاکی پشت دیوار نگهدار بتنی بر گشتاور محرک در حالت رودخانه بدون آب

افزایش یافته‌اند و در حالت نیمه‌پر نیروی محرک ۲۱ درصد و نیروی گشتاور ۱۹ درصد و در حالت پر نیروی محرک ۲۹ درصد و گشتاور ۴۶ درصد افزایش یافته است و علت آن نبود بار اضافی آب در جهت نیروی مقاوم بر روی سازه دیوار نگهدار شاخص می‌باشد.



**Fig. 9** Variation of driving force with dimensional changes of water depth ( $h/H$ ) in the mirror retaining wall

شکل ۹ تغییرپذیری‌های نیرو محرک با عمق آب بی‌بعد ( $h/H$ ) در دیوار نگهدار آینه

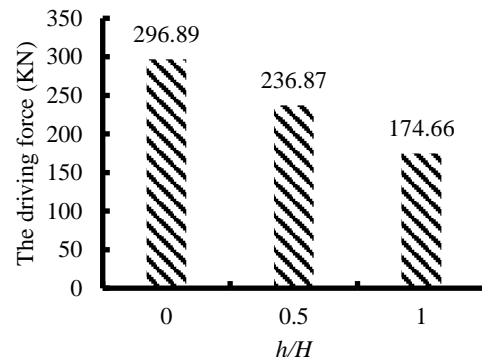


**Fig. 10** Variation of actuator torque with dimensionless water depth changes ( $h/H$ ) in the mirror retaining wall  
شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های گشتاور محرک با عمق آب بی‌بعد ( $h/H$ ) در دیوار نگهدار آینه

### ۳-۲- بررسی پایداری شیب‌هایی که در معرض افت سطح آب قرار دارند

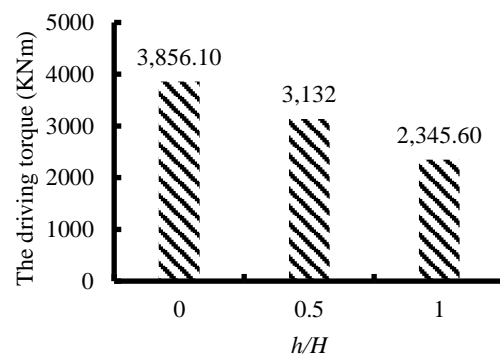
نتایج بررسی پایداری و ضریب اطمینان برای دو شیب دیواره در شرایط افت سطح آب در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این نمودار که برای دیوار نگهدار بتنی در دو حالت مصالح خاکی شن متوسط و ماسه متوسط با شیب

در شکل ۷ و ۸ تاثیر عمق آب رودخانه به ترتیب بر روی نیروی محرک و گشتاور محرک مقایسه شد.



**Fig. 7** Variation of driving force with dimensional changes of water depth ( $h/H$ ) in the concrete retaining wall and medium gravel soil

شکل ۷ تغییرپذیری‌های نیرو محرک با عمق آب بی‌بعد ( $h/H$ ) در دیوار نگهدار بتنی و خاک شن متوسط

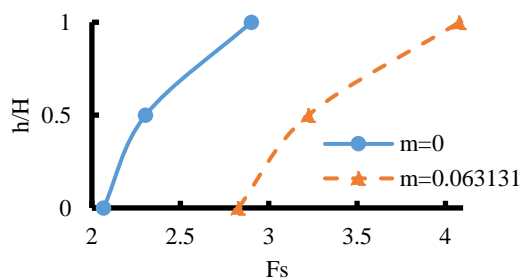


**Fig. 8** Variation of actuator torque with dimensionless water depth changes ( $h/H$ ) in the concrete retaining wall and medium gravel soil

شکل ۸ تغییرپذیری‌های گشتاور محرک با عمق آب بی‌بعد ( $h/H$ ) در دیوار نگهدار بتنی و خاک شن متوسط

شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که در رودخانه بدون آب ( $\frac{h}{H} = 0$ ) میزان نیروی محرک و گشتاور محرک حدود ۲۰ درصد بیشتر از حالت رودخانه با عمق آب ۲ متر و حدود ۴۰ درصد بیشتر از رودخانه با عمق آب ۴ متر می‌باشد که علت آن اضافه شدن وزن آب بر روی شیب دیوار نگهدار در جهت مقاومت در برابر واژگونی می‌باشد.

در مقایسه شاخص برابر شکل ۹ و ۱۰، مشاهده می‌شود در دیوار نگهدار در حالت آینه، در رودخانه بدون آب نیروی محرک ۱۸ درصد و گشتاور محرک حدود ۲۰ درصد



**Fig. 12** Variation of safety factor ( $F_s$ ) with relative water level ( $h/H$ ) with stability number ( $m$ ) for the concrete retaining wall with slope of (1: 1)

**شکل ۱۲** تغییرپذیری‌های ضریب اطمینان ( $F_s$ ) در مقابل تراز نسبی آب ( $h/H$ ) با عدد پایداری ( $m$ ) برای دیوار نگهدار بتنی با شیب (۱:۱)

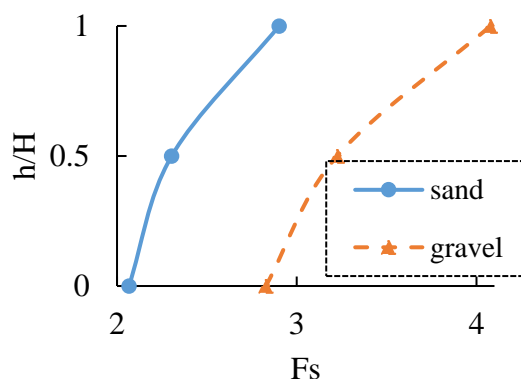
علت تفاوت این نتایج با نتایج شکل ۵ و ۶ در این می‌باشد که ضریب اطمینان برابر نیروی مقاوم تقسیم بر نیروی محرک می‌باشد و در شکل ۵ و ۶ تنها نیروی محرک بررسی شده است و نیروی مقاوم دخالتی در نتایج ندارد. شکل ۱۳ نیروی مقاوم نسبت به جنس خاک را در عمق آب رودخانه صفر نشان می‌دهد. این حالت برای عمق رودخانه ۲ متر و ۴ متر نیز صادق می‌باشد و نیروی مقاوم خاک ماسه متوسط بیشتر از نیروی مقاوم خاک شن متوسط است.

نتایج مقایسه پایداری و ضریب اطمینان برای دو دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی، در شیب ۴۵ درجه (۱:۱) و مصالح خاکی پشت دیوار شن متوسط، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. هر چه عمق آب افزایش می‌یابد، ضریب اطمینان دیوار نگهدار نیز افزایش می‌یابد. همچنین در مقایسه دیوار بتنی با تورسنگی، در عمق‌های آب ۲ متر و بدون آب، ضریب اطمینان دیوار بتنی به میزان ناچیزی بیشتر از دیوار تورسنگی می‌باشد. ولی در عمق آب رودخانه برابر با ارتفاع دیوار نگهدار ( $h=H=4\text{ m}$ )، ضریب اطمینان دیوار بتنی برابر ضریب اطمینان دیوار تورسنگی خواهد بود. به عبارت دیگر با توجه به شکل ۱۴، برای حالت پر آب، تفاوت ضریب اطمینان دیوارهای بتنی و تورسنگی کم است؛ و با کاهش سطح آب در رودخانه این تفاوت افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شکل ۱۵، تغییر مصالح پشت دیوار از شن متوسط به ماسه به طور کلی باعث افزایش قابل توجه ضریب اطمینان می‌شود. همچنین مانند شن متوسط، در حالت ماسه نیز برای حالت پر آب

دیوار ۴۵ درجه (۱:۱) رسم شده است، محور عمودی نسبت افت عمق سطح آب رودخانه به ارتفاع دیوار نگهدار از کف رودخانه ( $\frac{h}{H}$ ) را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، ضریب اطمینان در عمق ۲ متر ( $\frac{h}{H} = 0.5$ ) حدود ۲۰ درصد نسبت به عمق ۴ متر ( $\frac{h}{H} = 1$ ) کاهش می‌یابد و همچنین ضریب اطمینان در رودخانه بدون آب نسبت به عمق ۴ متر حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که علت آن حذف وزن آب روی شیب و در نتیجه کاهش مقاومت برشی خاک می‌باشد. کاهش ضریب اطمینان در رودخانه بدون آب نسبت به عمق ۲ متر نیز برابر ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین ضریب اطمینان در خاک ماسه متوسط بیشتر از حالت خاک شن متوسط می‌باشد.

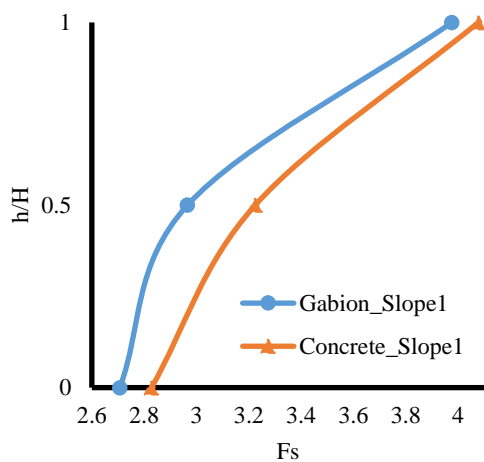
در شکل ۱۲، برای مقایسه بهتر ضریب اطمینان در برابر افت نسبی تراز آب، از رابطه (۳) به عنوان فراسنجه‌ای بی‌بعد به نام عدد پایداری استفاده شد که در آن چسبندگی بر حسب کیلونیوتن بر مترمربع، وزن مخصوص بر حسب کیلونیوتن بر متر مکعب و  $H$  ارتفاع دیوار نگهدار از کف رودخانه بر حسب متر می‌باشد. برابر شکل ۱۲، فراسنجه بی‌بعد پایداری صفر (چسبندگی برابر صفر، متعلق به شن متوسط)، ضریب اطمینان کمتری نسبت به پارامتر بی‌بعد پایداری ۰/۰۶ (چسبندگی ۵، متعلق به ماسه متوسط) دارد.

$$m = \frac{c}{\gamma H} \tag{3}$$



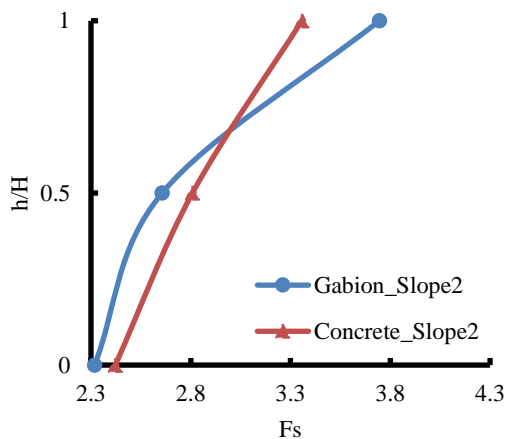
**Fig. 11** Variation of safety factor ( $F_s$ ) with relative drop in water level for the concrete retaining wall with slope of (1:1)

**شکل ۱۱** تغییرپذیری‌های ضریب اطمینان ( $F_s$ ) در مقابل افت نسبی تراز آب برای دیوار نگهدار بتنی با شیب (۱:۱)



**Fig. 15** Comparison of safety factor ( $F_s$ ) of the concrete and gabion retaining walls of slope (1: 1) with ( $h / H$ ) in medium sand material

شکل ۱۵ مقایسه ضریب اطمینان ( $F_s$ ) دیوار نگهدار بتنی با تورسنگی در حالت خاک ماسه متوسط و شیب (۱:۱) نسبت به ( $h/H$ )



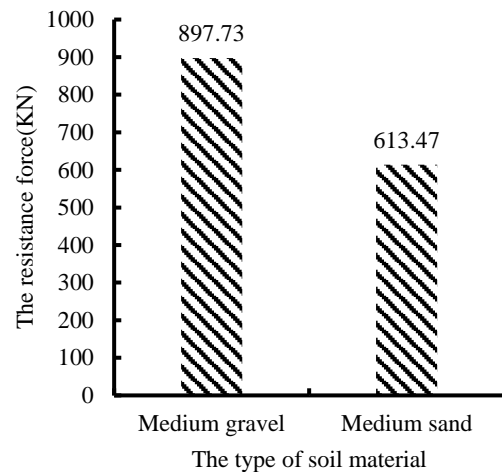
**Fig. 16** Comparison of safety factor ( $F_s$ ) of the concrete and gabion retaining walls of slope (1: 2) with ( $h / H$ ) in medium gravel material

شکل ۱۶ مقایسه ضریب اطمینان ( $F_s$ ) دیوار نگهدار بتنی با تورسنگی در حالت خاک شن متوسط و شیب (۱:۲) نسبت به ( $h/H$ )

### ۳-۳- مقایسه با دیوار شاخص

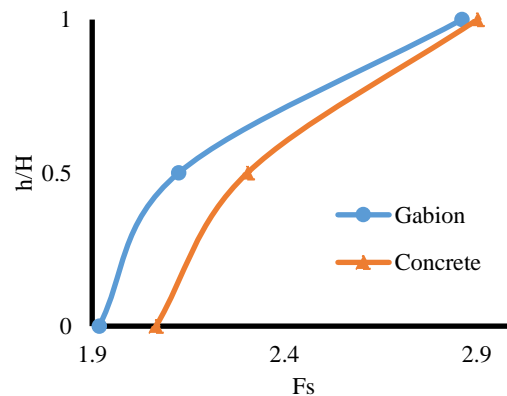
برای مقایسه نتایج به دست آمده با شاخص و صحت سنجی مطالب، از نتایج داده‌های دیوار نگهدار بتنی در شرایط آینه و حالت قائم و مقایسه آن با داده‌های دیوار نگهدار بتنی با شیب (۱:۱) و هر سه با جنس خاک شن متوسط بررسی شد. برای این کار سه عمق آب رودخانه مختلف بدون آب و ۲ متر و ۴ متر انتخاب شدند. برابر شکل ۱۷، نتایج نشان داد دیوار نگهدار در شرایط آینه

میزان‌های ضریب اطمینان دیوار بتنی و تورسنگی نزدیک به هم و تقریباً یکی است و با کاهش عمق آب این تفاوت افزایش می‌یابد.



**Fig. 13** The effect of the type of soil material behind the concrete retaining wall on the resistance force in the river under dry condition

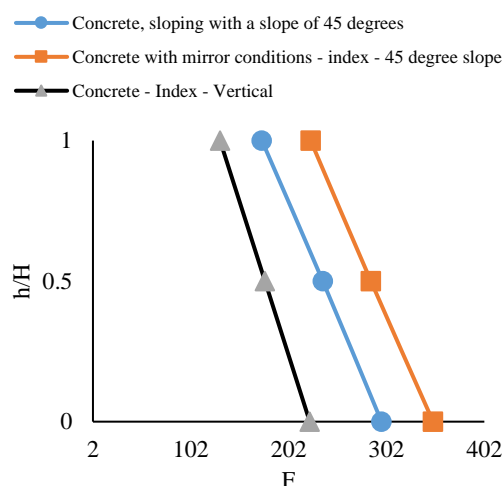
شکل ۱۳ تاثیر نوع مصالح خاکی پشت دیوار نگهدار بتنی بر نیروی مقاوم در حالت رودخانه بدون آب



**Fig. 14** Comparison of Safety Factor ( $F_s$ ) of the concrete and gabion retaining walls of slope (1: 1) with ( $h / H$ ) in medium gravel material

شکل ۱۴ مقایسه ضریب اطمینان ( $F_s$ ) دیوار نگهدار بتنی با تورسنگی در حالت خاک شن متوسط و شیب (۱:۱) نسبت به ( $h/H$ )

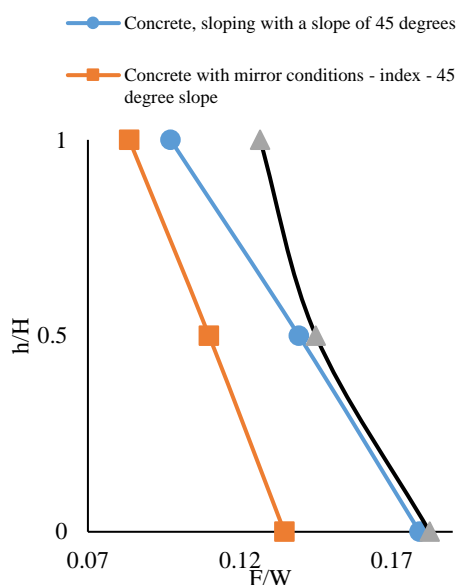
نتایج مقایسه دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی در شرایط مصالح خاکی یکسان شن متوسط و برای شیب ملایم دیواره (۱:۲) در شکل ۱۶ نشان می‌دهد که از عمق آب صفر تا عمق آب حدود ۳ متر ضریب اطمینان دیوار تورسنگی کمتر از دیوار بتنی می‌باشد؛ ولی در عمق بالاتر از سه متر دیوار تورسنگی عملکرد بهتری دارد.



**Fig. 18** Comparison of relationship between driving force ( $F$ ) with  $(h/H)$  for the concrete retaining wall in oblique, mirror and vertical conditions

شکل ۱۸ مقایسه رابطه نیروی محرک ( $F$ ) با  $(h/H)$  برای

دیوار نگهدار بتنی در شرایط مایل، آینه و قائم



**Fig. 19** Comparison of dimensionless relationship between  $F/W$  and  $(h/H)$  for the concrete retaining wall in oblique, mirror and vertical conditions

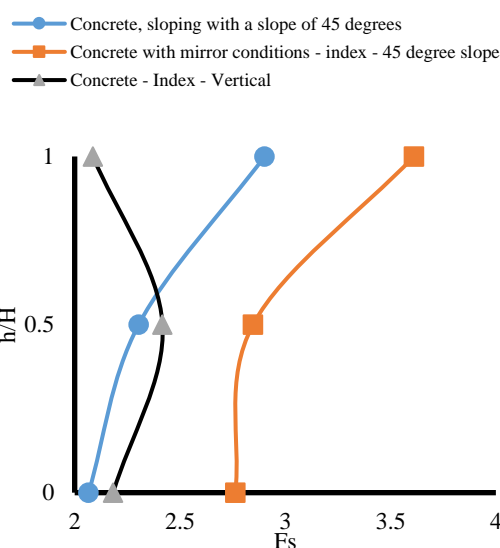
شکل ۱۹ مقایسه رابطه بدون بعد  $F/W$  با  $(h/H)$  برای دیوار

نگهدار بتنی در شرایط مایل، آینه و قائم

### ۴-۳- بررسی رابطه بی‌بعد نیرو و گشتاور

در رابطه (۴) و (۵)، معادله همبستگی چند متغیره خطی بی‌بعد شده  $F/W$  به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۸ و ۰/۹۸ و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) برابر ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۶ برای دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی به‌دست آمد. با استفاده از نرم افزار SPSS، بررسی تحلیل حساسیت برای

عملکرد بهتری از دیگر مدل‌ها از نظر ضریب اطمینان دارد. همچنین دیوار شاخص در حالت قائم، در عمق ۴ متر که همان عمق برابر کل ارتفاع دیوار از کف رودخانه می‌باشد، کمترین ضریب اطمینان را دارد. علت کم بودن ضریب اطمینان در حالت دیوار قائم و پر آب (شکل ۳)، نسبت به حالت دیوار نگهدار در شرایط آینه با شیب ۴۵ درجه که داخل خاک است (شکل ۴)، شیب مایل دیواره در درون خاک است که باعث پایداری بهتر شیب خاکی در حالت دیوار نگهدار در شرایط آینه با شیب ۴۵ درجه در درون خاک می‌شود.

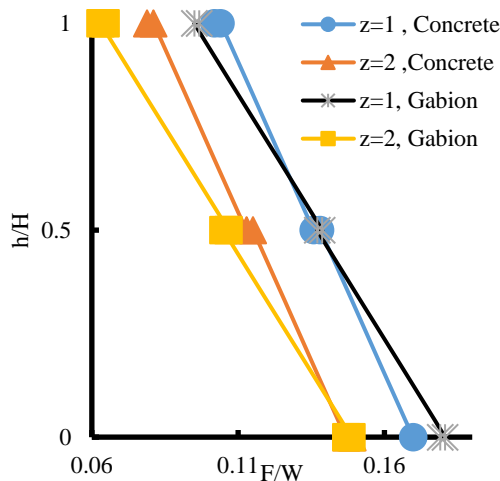


**Fig. 17** Comparison of relationship between safety factor ( $F_s$ ) with  $(h/H)$  for the concrete retaining wall in oblique, mirror and vertical conditions

شکل ۱۷ مقایسه رابطه ضریب اطمینان ( $F_s$ ) با  $(h/H)$  برای

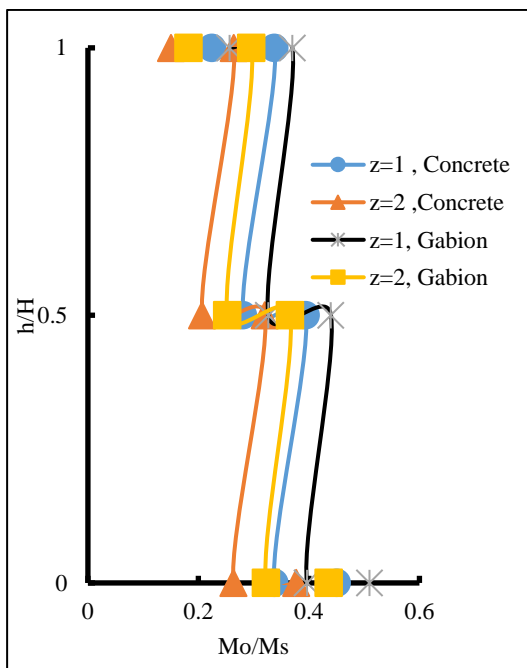
دیوار نگهدار بتنی در شرایط مایل، آینه و قائم

در شکل ۱۸، نیروی محرک این سه دیوار با عمق‌های آب رودخانه مختلف بررسی شد. برابر شکل، دیوار بتنی در حالت آینه نیروی محرک بیشتری نسبت به دیوار قائم دارد. همچنین در شکل ۱۹، در مقایسه نتایج  $F/W$  با  $h/H$  برای دیوار نگهدار بتنی در شرایط مایل، آینه و قائم مشاهده می‌شود که عمل بی‌بعد کردن نیروی محرک تاثیر قابل توجهی در نتایج داشته و به کلی برعکس نتایج شکل ۱۸ را ارائه می‌دهد. در شکل ۱۹، نیروی محرک تقسیم بر وزن دیوار قائم بیشتر از دیوار در شرایط آینه می‌باشد. در هر دو شکل نتایج دیوار بتنی مایل ما بین دو شاخص در نظر گرفته شده می‌باشد.



**Fig. 20** Comparison of the force ratio  $F/W$  (from Equations 4 and 5) with  $h/H$  for different slopes of the concrete and gabion retaining walls

شکل ۲۰ مقایسه نسبت نیرو  $F/W$  به دست آمده از رابطه (۴) و (۵) با  $h/H$  برای شیب های مختلف دیوارهای نگهدار بتنی و تورسنگی



**Fig. 21** Comparison of the torque ratio  $(M_o / M_s)$  (from Equations 6 and 7) with  $h/H$  for different slopes of the concrete and gabion retaining walls

شکل ۲۱ مقایسه نسبت گشتاور  $(M_o / M_s)$  از رابطه (۶) و (۷) با  $h/H$  در شیب های مختلف از دیوارهای نگهدار بتنی و تورسنگی

#### ۴- نتیجه گیری

دیوارهای نگهدار سازه‌هایی هستند که به‌عنوان حایل یا نگهدارنده خاک استفاده می‌شوند. از این‌رو شناخت رفتار

ضرایب متغیرهای بی‌بعد این دو معادله انجام یافت، که نتایج در سطح معنی دار ۰/۰۱ قرار دارند.

$$\frac{F}{W} = 0.195 - 0.068 \frac{h}{H} - 0.023z - 0.034m \quad (4)$$

$$\frac{F}{W} = 0.211 - 0.084 \frac{h}{H} - 0.023z - 0.027m \quad (5)$$

مقایسه نسبت نیرو  $(F/W)$  به دست آمده از رابطه (۴) و (۵) با  $h/H$  با شیب های مختلف و دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی در شکل ۲۰ نشان می‌دهد که نیروی محرک بر وزن در رودخانه بدون آب بیشتر از حالت با عمق ۲ متر و ۴ متر می‌باشد و دیوار تورسنگی با شیب  $z=2$  نسبت به دیوار تورسنگی با  $z=1$  نیروی محرک بر وزن کمتری دارد. این موضوع بر دیوار بتنی نیز صادق می‌باشد.

رابطه همبستگی چند متغیره خطی بی‌بعد نسبت گشتاور واژگونی به گشتاور پایداری  $(\frac{M_o}{M_s})$  برای دیوار نگهدار

بتنی و تورسنگی به ترتیب رابطه (۶) و رابطه (۷)، با ضریب تبیین ۰/۹۸ و ۰/۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMSE)$  برابر ۰/۰۳۷ و ۰/۰۱۸ به دست آمد. سطح معنی‌داری تمامی متغیرها کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد.

$$\frac{M_o}{M_s} = 0.525 - 0.113 \frac{h}{H} - 0.054z - 1.684m \quad (6)$$

$$\frac{M_o}{M_s} = 0.584 - 0.140 \frac{h}{H} - 0.074z - 1.796m \quad (7)$$

مقایسه بین گشتاور زیان‌آور نسبت به گشتاور پایداری به دست آمده از رابطه (۶) و (۷) با  $h/H$  با شیب های مختلف و دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی در شکل ۲۱ نشان داده شده است. دیوار بتنی با شیب  $z=2$  نسبت به دیوار تورسنگی با شیب  $z=1$  نسبت گشتاور زیان‌آور به گشتاور پایداری کمتری دارد. علت وجود دو حالت در هر کدام از عمق‌ها از هر مدل دیوار وجود عدد پایداری  $(m)$  و در واقع اثر جنس خاک می‌باشد. این مورد در شکل ۲۰ نیز وجود دارد ولی تاثیر عدد پایداری ناچیز بوده و در نتیجه دو نقطه بر روی هم افتاده و یک نقطه نمایش داده می‌شود.

۲۱ درصد و نیروی گشتاور ۱۹ درصد و در حالت پر نیروی محرک ۲۹ درصد و گشتاور ۴۶ درصد افزایش یافته است و علت آن نبود بار اضافی آب در جهت نیروی مقاوم بر روی سازه دیوار نگهدار شاخص می‌باشد.

نتایج بررسی پایداری و ضریب اطمینان برای دو شیب دیواره در شرایط افت سطح آب نشان داد ضریب اطمینان در عمق ۲ متر حدود ۲۰ درصد نسبت به عمق ۴ متر کاهش می‌یابد و همچنین ضریب اطمینان در رودخانه بدون آب نسبت به عمق ۴ متر حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که علت آن حذف وزن آب روی شیب و در نتیجه کاهش مقاومت برشی خاک می‌باشد. کاهش ضریب اطمینان در رودخانه بدون آب نسبت به عمق ۲ متر نیز برابر ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین ضریب اطمینان در خاک ماسه متوسط بیشتر از حالت خاک شن متوسط می‌باشد. به عبارتی دیگر برای حالت پر آب، تفاوت ضریب اطمینان دیوارهای بتنی و تورسنگی کم است و با کاهش سطح آب در رودخانه این تفاوت افزایش می‌یابد. همچنین تغییر مصالح پشت دیوار از شن متوسط به ماسه به طور کلی باعث افزایش قابل توجه ضریب اطمینان می‌شود. همچنین مانند شن متوسط، در حالت ماسه نیز برای حالت پر آب مقادیر ضریب اطمینان دیوار بتنی و تورسنگی نزدیک به هم و یکی است و با کاهش عمق آب این تفاوت افزایش می‌یابد.

نتایج مقایسه پایداری و ضریب اطمینان برای دو دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی، در شیب ۴۵ درجه (۱:۱) و مصالح خاکی پشت دیوار شن متوسط، نشان داد هر چه عمق آب افزایش می‌یابد، ضریب اطمینان دیوار نگهدار نیز افزایش می‌یابد. همچنین در مقایسه دیوار بتنی با تورسنگی، در عمق‌های آب ۲ متر و بدون آب، ضریب اطمینان دیوار بتنی به میزان ناچیزی بیشتر از دیوار تورسنگی می‌باشد. ولی در عمق آب رودخانه برابر با ارتفاع دیوار نگهدار ( $h=H=4\text{ m}$ )، ضریب اطمینان دیوار بتنی برابر ضریب اطمینان دیوار تورسنگی خواهد بود. تغییر مصالح پشت دیوار از شن متوسط به ماسه متوسط تغییر زیادی ایجاد نمی‌کند.

نتایج مقایسه با دیوارهای آینه نشان داد دیوار نگهدار در

دیوارها در پایداری شیروانی‌های خاکی دارای اهمیت می‌باشد. در این پژوهش دو نوع دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی مقایسه و ارزیابی شدند. همچنین برای هر کدام از دیوارهای نگهدار، دو نوع مصالح پشت دیوار (شن متوسط و ماسه متوسط)، دو شیب دیواره (۱:۱) و (۱:۲) و سه عمق آب رودخانه برابر بدون آب، ۲ متر و ۴ متر و در کل ۲۴ مدل در نظر گرفته شد. همچنین دو دیوار دیگر به عنوان شاخص یکی در حالت آینه و دیگری در حالت قائم هر کدام با سه عمق مختلف و در کل ۶ مدل طراحی و اجرا شد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که جنس خاک بر پایداری شیب‌های خاکی اثر گذاشته و هرچه خاک هدایت هیدرولیکی بیشتری داشته باشد و دانه درشت‌تر باشد، در نتیجه فشار حفره‌ای کمتری نسبت به دیگر انواع خاکی خواهد داشت، در نتیجه گشتاور و نیروی محرک شن متوسط به ترتیب ۷ درصد و ۱۱ درصد کمتر از ماسه متوسط به دست آمد و این موضوع برای دیوار نگهدار تورسنگی و همچنین حالت رودخانه دارای عمق آب ۲ متر و ۴ متر نیز صادق می‌باشد.

مقایسه رابطه ضریب اطمینان با افت سطح آب نشان می‌دهد که کاهش سطح آب روی شیب به دلیل حذف وزن آب روی دیوار نگهدار، ضریب اطمینان کمتر می‌شود. از نظر عملکرد، ضریب اطمینان دیوار بتنی به مقدار ناچیزی از دیوار تورسنگی بالاتر است؛ ولی در عمق آب رودخانه برابر ارتفاع کل دیوار نگهدار ( $h=H$ ) این اختلاف به صفر میل می‌کند. همچنین در شیب ملایم دیواره (۱:۲) و در عمق بالاتر از ۳ متر، ضریب اطمینان دیوار تورسنگی بیشتر از دیوار بتنی می‌باشد. مشاهده شد در رودخانه بدون آب میزان نیروی محرک و گشتاور محرک حدود ۲۰ درصد بیشتر از حالت رودخانه با عمق آب ۲ متر و حدود ۴۰ درصد بیشتر از رودخانه با عمق آب ۴ متر می‌باشد که علت آن اضافه شدن وزن آب بر روی شیب دیوار نگهدار در جهت مقاومت در برابر واژگونی می‌باشد. در دیوار نگهدار در حالت آینه، در رودخانه بدون آب نیروی محرک ۱۸ درصد و گشتاور محرک حدود ۲۰ درصد افزایش یافته‌اند و در حالت نیمه‌پر نیروی محرک



$y_i$	فاصله عنصر مورد نظر (m)
$z$	شیب دیوار نگهدار نشانه‌های یونانی:
$\gamma$	وزن مخصوص ( $\text{KN/m}^2$ )
$\emptyset$	زاویه اصطکاک درونی (درجه) زیرنویس‌ها:
$i$	شماره هر عنصر
overturmtorque	واژگونی
stabilitytorque	پایداری

### ۶- منابع

Amin Javaheri, A.R. and Pakniyat, E. (2016). Static and dynamic analysis of earth dams using GEO STUDIO, Nashre Omran. (in Persian)

Athani, S.S., Shivamant, C.H. and Solanki, G.R. (2015). Dodagoudar, Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method. Aquatic Procedia, 4, 876-883.

Bertoldo, D. (2013). Stability Analysis of an Earth Embankment Subjected to Rainfall Infiltration, PhD Thesis, Anno Academics, Padova, and ICEA.

Bowles, J. (1994). Foundation Analysis and Design, 5 ed., McGraw-Hill Companies.

Chen, L. (2014). Active earth pressure of retaining wall considering wall movement. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 18(8), 910-926.

Coulomb, C.A. (1776). Essay on an Application of the Rules of Maximis and Minimis to Some Problems of Statics Relating to Architecture, Memoirs of Mathematics and Physics, presented to the Royal Academy of Sciences, by various scholars, and read in its Assemblies, From L'Imprimerie Royale, Paris, Vol. 7, 343-387. (in French)

Culmann, K. (1875). The graphic statics, volume 1 Die graphische Statik, Band 1. Meyer & Zeller (A. Reimann): Zürich, Switzerland. (in German)

Das, B.M. (2010). Principles of Geotechnical Engineering, Chris Carson.

Docker, B.B. and Hubble, T.C.T. (2008). Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. Geomorphology, 100(3), 401-418.

شرایط آینه عملکرد بهتری از دیگر مدل‌ها از نظر ضریب اطمینان دارد. همچنین دیوار آینه در حالت قائم، در عمق ۴ متر که همان عمق برابر کل ارتفاع دیوار از کف رودخانه می‌باشد، کمترین ضریب اطمینان را دارد. معادله همبستگی چند متغیره خطی بی‌بعد شده نیرو ( $F/W$ ) و گشتاور ( $\frac{M_o}{M_s}$ ) برای دیوار نگهدار بتنی و تورسنگی به‌صورت رابطه‌های ۴ تا ۷ ارائه شده است. خروجی اصلی این پژوهش کاربردی، روش شناختی انتخاب بین دو گزینه دیوار نگهدار رودخانه (بتنی یا سنگ و سیمانی، و تورسنگی) در شرایط مختلف رودخانه است.

### ۵- فهرست نشانه‌ها

A	مساحت ( $\text{m}^2$ )
b	عرض کف دیوار نگهدار (m)
c	چسبندگی (KPa)
ds	عمق آبشستگی (m)
F	نیرو وارد بر دیوار (N) - نیروی محرک
$F_i$	نیرو به ازای هر المان (N)
$F_s$	ضریب اطمینان پایداری
H	ارتفاع دیواره از کف بستر تا ساحل بالا (m)
h	عمق آب رودخانه (m)
k	ارتفاع دیوار نگهدار (m)
$K_x$	هدایت هیدرولیکی در جهت افقی
$K_y$	هدایت هیدرولیکی در جهت عمودی
M	گشتاور (N.m)
Mohr-Coulomb	معیار لغزش: مور-کلمب
m	عدد پایداری (بی‌بعد)
$M_o$	گشتاور محرک (N.m)
$M_s$	گشتاور مقاوم (N.m)
$\frac{M_o}{M_s}$	نسبت گشتاور
P	فشار ( $\text{N/m}^2$ )
$P_i$	فشار عنصر مورد نظر ( $\text{N/m}^2$ )
RMSE	شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا
$R^2$	شاخص آماری ضریب تبیین
W	وزن دیوار (N)

- Rankine, W.J.M. (1857). On the Stability of Loose Earth, Philosophical Transactions, Royal Society, Vol. 147, London.
- Rao, P., Chen, Q., Zhou, Y., Nimbalkar, S. and Chiaro, G. (2016). Determination of Active Earth Pressure on Rigid Retaining Wall Considering Arching Effect in Cohesive Backfill Soil. *International Journal of Geomechanics*, 16(3), 04015082-1-04015082-9, [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000589](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000589).
- Salmasi, F., Nourani, B. and Norouzi, R. (2019). Slope Stability Analysis and GeoStudio (SLOPE/W) Software Practical Training, Maraviya. (in Persian)
- Tahouni, S. (2012). Principles of Geotechnical Engineering, Pars Aeen. (in Persian)
- Fishman, Y.A. (2009). Stability of concrete retaining structures and their interface with rock foundations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 957-966.
- Ghoddosi, H., Vakili Tanha F. and Shahverdi, K. (2018). Application of SCE Meta Heuristic Method and LINGO11 Model for Optimization of Earth Dams Dimensions (Case Study Barzok Dam), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 233-242. (in Persian)
- Guideline for Design of Retaining Walls (2005). Planning and Budget Organization-Office of Standard and Technical Criteria, Iran. (in Persian)
- Hird, C.C., Pyrah, I.C. and Russell, D. (1990). Finite Element Analysis of the Collapse of Reinforced Embankments on Soft Ground. *Geotechnique*, 40(4), 633-640.
- Hosseinzadeh Asl, R. (2018). Numerical investigation of the effect of lining and lateral boundaries distance in seepage of irrigation with different canal sections, University of Tabriz. (in Persian).
- Jayanandan, M. and Viswanadham, B.V.S. (2020). Geogrid Reinforced Soil Walls with Marginal Backfills Subjected to Rainfall: Numerical Study. *Indian Geotechnical Journal*, 50(2), 238-251.
- Liu, F.Q. (2014). Lateral Earth Pressures Acting on Circular Retaining Walls. *International Journal of Geomechanics*, 14(3), 04014002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000291](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000291).
- Netzal H. D., and Vink, D. (2016). Prediction of soil deformations during excavation work for the renovation of "Het Nieuwe Rijksmuseum" in Amsterdam, The Netherland, *PLAXIS Bulletin* 20, 16-19.
- Niedostatkiewicz, M., Lesniewska, D. and Tejchman, J. (2011). Experimental Analysis of Shear Zone Patterns in Cohesionless for Earth Pressure Problems Using Particle Image Velocimetry. *Strain*, 47(s2), 218-231.
- Nouri, M. and Salmasi, F. (2019). Performance of horizontal and chimney drainage in stability of retaining wall of earthen slopes. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 51(1), 157-168. (in Persian)
- Peerdawood, C.T. and Mawlood, Y.I. (2010). Analytical Study for Stability of Gabion Walls. *J. Pure Appl. Sci. / Salahaddin University-Hawler*, 22(5), 21-34.

