

Investigation of bioengineering properties of *Celtis caucasica* and *Pistacia atlantica* in slope stabilization (Case study: Kalan Malayer Dam)

Masoumeh Malmir¹ , Iman Pazhouhan^{2*} , Farhad Ghasemi Aghbash³ 

¹ M.Sc. Student, Department of Natural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

² Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

³ Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Extended Abstract

Introduction

Soil erosion is a natural process that is intensified by human activities. Experts of natural resources consider soil erosion as a phenomenon that has caused the destruction of civilizations. Preventing erosion and actually reducing its damages to the natural level of soil losses depends on choosing appropriate strategies for soil protection. Preventing erosion and actually reducing its damages to the natural level of soil losses depends on choosing appropriate strategies for soil protection. Among the many methods of preventing soil erosion and increasing the stability of slopes, bio-engineering methods of protected areas have received a lot of attention due to environmental and economic issues in engineering today.

Materials and Methods

In this research, the effect of the root of *Celtis caucasica* and *Pistacia atlantica* in soil reinforcement around the Kalan Dam, 34 km southwest of Malair City, was investigated on different slopes. To carry out this study, two species of *Celtis caucasica* and *Pistacia atlantica* were investigated in three different populations in three areas with low (0-10 %), medium (10-25 %), and high slopes (25-40 %). The root samples were collected on December 15, 2021, from a depth of about 30 cm. In general, 6 individual trees were randomly selected in each area and all the characteristics of the soil were examined in 6 repetitions and the root in 10 repetitions (to test the tensile strength of the roots). The treatment used to preserve and prepare the roots includes washing and placing them in plastic bags containing a 15 % alcohol solution. Then samples with a length of about 10 cm were randomly selected and the speed of the tensile strength test was 10 mm min⁻¹. The root was measured using a standard Instron device manufactured by the Santam factory. Considering the normality of the data, the t-test was used to compare the two species. Three harvesting areas with different slope classes, including low (Region 1), medium (Region 2), and high (Region 3) slopes. The treatment used to preserve and prepare the roots includes washing and placing them in plastic bags containing a 15 % alcohol solution. Then samples with a length of about 10 cm were randomly selected and the speed of the tensile strength test was 10 mm min⁻¹. The root was measured using a standard Instron device manufactured by the Santam factory. Considering the normality of the data, the t-test was used to compare the two species. In three harvesting areas with different slope classes, including low (Region 1), medium (Region 2), and high (Region 3) slopes, 18 stems of Callaghan and 18 stems of *P. atlantica* were harvested for root Callaghan, and 18 stems of *P. atlantica* were harvested for root sampling.

Results and Discussion

The results showed that the root elasticity of *C. caucasica* is higher than *P. atlantica*. The relationship between the diameter and root reinforcement was different, and about *C. caucasica* it was negative. The highest root reinforcement is related to fine roots. The RAR (Root Area Ratio) in *C. caucasica* was higher on a high slope rather than a low slope. In steep slopes (Region 3) root tension of *C. caucasica* is higher than the area with the average slope. There was a positive correlation between PL and LL of soil in *C. caucasica* stand in Region 3. Finally, strengthen the soil and reduce erosion in the upper slopes. The noteworthy point is that the percentage of carbon in the soil in Region 3 is higher than in the other two regions, which is due to the negative correlation

between carbon and sand in the soil. *C. caucasica* in high-slope lands with a lower percentage of sand causes an increase in carbon deposition and parameters of the dough limit and liquid limit of the soil. According to the results of the data, the amount of root elasticity of *C. caucasica* is higher than *P. atlantica* species. The relationship between diameter and root tension is different in the case of species. About *C. caucasica* it was negative and the highest root tension is related to the roots of the fine roots, but in *P. atlantica*, the relationship between diameter and tension is a positive power function and As the diameter increases, the amount of tension increases. The amount of root area ratio (RAR) in *C. caucasica* is higher on the higher slope than on the lower slope. The percentage of clay in the soil texture has a negative correlation with the amount of RAR, and root growth and distribution are less in clay soils. *C. caucasica* in high-slope lands with lower sand percentage increases carbon deposition and parameters of the plastic limit and liquid limit of the soil.

Conclusion

It is suggested to use species that increase soil reinforcement and reduce the amount of erosion in the area of the dam in order to reduce the amount of erosion and increase the useful life. according to the results, it can be recommended that it is better to use *C. caucasica* in afforestation around the Kalan Dam because of its greater effect in increasing soil improvement and reducing erosion.

Keywords: Afforestation, Erosion, Roots, Reinforcement, Soil mechanics

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: imanpazhouhan@gmail.com

Citation: Malmir, M., Pazhouhan, I., & Ghasemi Aghbash, F. (2023). Investigation of bioengineering characteristics of *Celtis caucasica* and *Pistacia atlantica* in slope stabilization (Case study: Kalan dam). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 192-208.

DOI: 10.22098/mmws.2023.11959.1193

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.13.7

Received: 20 December 2022, Received in revised form: 23 January 2023, Accepted: 23 January 2023, Published online: 23 January 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 4, pp. 192-208

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بررسی خصوصیات زیست مهندسی گونه‌های *Pistacia atlantica* و *Celtis caucasica* در تثبیت زیستی دامنه‌ها در ارتباط با شیب (مطالعه موردی: جنگل کاری‌های حاشیه سد کلان ملایر)

معصومه مالمیر^۱، ایمان پژوهان^{۲*}، فرهاد قاسمی آقباش^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده

فرسایش خاک یک فرآیند طبیعی است که در اثر فعالیت‌های انسانی تشدید می‌شود. از دیدگاه منابع طبیعی فرسایش باعث نابودی خاک‌های حاصل‌خیز شده و آثار منفی زیادی بر زندگی ساکنان کره زمین داشته است. جلوگیری از فرسایش و کاهش میزان خسارات ناشی از آن تا حد طبیعی تلفات خاک، بستگی به انتخاب راهبردهای مناسب در حفاظت خاک دارد. با توجه به ضرورت و اهمیت کاهش اثرات مخرب فرسایش خاک، در این پژوهش بررسی اثر ریشه گونه‌های بنه و داغداغان در مسلح‌سازی خاک اطراف سد کلان در ۳۴ کیلومتری جنوب غربی شهرستان ملایر در شیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این مطالعه دو گونه بنه و داغداغان در دو توده مختلف سه منطقه با شیب کم، متوسط و زیاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان کشتش ریشه گونه داغداغان از بنه بیش‌تر است. هم‌چنین، میزان RAR (نسبت سطح ریشه به سطح خاک) در گونه داغداغان با افزایش شیب بیش‌تر شده است. رابطه بین قطر و کشتش ریشه در مورد گونه‌ها با هم متفاوت است و در گونه داغداغان منفی بود و بیش‌ترین مقدار کشتش ریشه مربوط به گونه داغداغان در منطقه ۳ با مقدار ۶۳/۵۱ مگاپاسکال و مربوط به ریز ریشه‌هاست و کم‌ترین آن مربوط به گونه بنه در منطقه ۲ با ۸/۱۸ مگاپاسکال است. با توجه به نتایج پژوهش پیشنهاد می‌شود با به‌کارگیری گونه‌هایی که باعث افزایش مسلح‌سازی خاک و کاهش میزان فرسایش در محدوده سد می‌شود مانند گونه داغداغان به‌منظور کاستن از میزان فرسایش و افزایش عمر مفید استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ریشه، جنگل کاری، فرسایش، مسلح‌سازی، مکانیک خاک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: imanpazhouhan@gmail.com

استناد: مالمیر، معصومه، پژوهان، ایمان، و قاسمی آقباش، فرهاد (۱۴۰۲). بررسی خصوصیات زیست مهندسی *Pistacia atlantica* و *Celtis caucasica* در تثبیت زیستی دامنه‌ها در ارتباط با شیب (مطالعه موردی: جنگل کاری‌های حاشیه سد کلان ملایر). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۱۹۲-۲۰۸.

DOI:10.22098/mmws.2023.11959.1193

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.13.7



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۴، شماره صفحه ۱۹۲ تا ۲۰۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

استفاده از روش زیستی به دلیل سازگاری با محیط و پایین بودن هزینه‌ها در اولویت برنامه‌های مبارزه با فرسایش خاک قرار دارد. کاهش حاصل‌خیزی خاک و از بین رفتن مواد آلی، کاهش پوشش جنگلی، پایین آمدن کیفیت آب‌های سطحی و مانند آن‌ها از جمله آثار مستقیم و غیرمستقیم فرسایش هستند. برآوردهای مختلفی از مقدار فرسایش در ایران وجود دارد و هنوز اطلاعات دقیق و کاملی در خصوص آن به دست نیامده است. با این حال آنچه کارشناسان بر آن توافق دارند، افزایش مقدار فرسایش در ایران بیش از حد مجاز استانداردهای جهانی است (Arab Khedri, 2014). از بین روش‌های متعدد جلوگیری از فرسایش خاک و افزایش پایداری دامنه‌ها، روش‌های زیست‌مهندسی به دلیل مسائل محیط زیستی و اقتصادی در مهندسی امروزه بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. پوشش گیاهی در افزایش پایداری دامنه‌ها و بهبود شرایط هیدرولوژیک خاک مؤثر است. خاک‌های دارای پوشش گیاهی کم‌تر، در معرض خطر فرسایش توسط آب و حرکت‌های توده‌ای هستند (Greenway, 1987). در واقع حضور ریشه در خاک باعث پایداری خاک و افزایش مقاومت در برابر فرسایش می‌شود، از این رو خاک در مقابل فشار مقاوم اما در برابر کشش ضعیف است. برخلاف خاک، ریشه در مقابل کشش مقاوم و در برابر فشار ضعیف است (Pollen, 2007).

با توجه به اینکه ریخت‌شناسی ریشه‌ها تحت تأثیر شرایط محلی قرار دارد و از ترکیب شیمیایی ریشه، بر مبنای مرفولوژی متفاوت است، ممکن است شرایط محیط بر میزان سلولز تأثیر داشته باشد. در نتیجه امکان این که در یک رویشگاه پایه‌های مختلف یک گونه دارای مقاومتهای مختلف باشد وجود دارد (Genet et al., 2008). هنگامی که گیاه دچار تنش می‌شود رشد شاخه‌ها همواره شرایط بارگذاری خود را تغییر می‌دهند و باعث تنش مکانیکی در سیستم ریشه می‌شود. در پاسخ، سیستم ریشه باید لنگرگاه خود را در برای جلوگیری از ریشه‌کن شدن تقویت کند (Sun et al., 2008). فرسایش خاک و تولید رسوب در عمر مفید سدها بسیار تأثیرگذار است. بنابراین، کنترل اثرات منفی فرسایش خاک در اطراف سدها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. به‌عنوان مثال، Nouri et al. (2019) در بررسی میزان پراکنش ریشه درختان چنار در حاشیه رودخانه شهرستان کلیر با ارزیابی اثرات ریشه در کاهش فرسایش از طریق مسلح‌سازی خاک به این نتیجه رسیدند که مقدار حفاظت خاک توسط گیاه به ویژگی‌های زیست‌فناوری ریشه از جمله پراکنش ریشه در خاک یا میزان نسبت سطح ریشه به سطح خاک بستگی دارد. در ادامه، Karamirad et al. (2020) به بررسی مسلح‌سازی خاک بر اساس تغییرات چسبندگی در حضور ریشه درختان ممرز با مدل

(FiberBundel-Model) FBM و (Wu-Waldron) WWM به روش انتخاب هفت درخت ممرز در سه رویشگاه جنگل سرچشمه چالوس پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار چسبندگی اضافه شده به خاک در اثر حضور ریشه با افزایش عمق طبق تابع لگاریتمی کاهش پیدا می‌کند. در پژوهشی، Sanchez-Castillo et al. (2017) در بررسی تأثیر تقویت ریشه گونه‌های جنگلی بر پایداری شیب سیرا مادر اورینتال، مکزیک به این نتیجه رسیدند که به ترتیب گونه *Quercus Acacia berlandieri* و *Pinus pseudostrabus Lindl. arysopylla lucidum* بیش‌ترین نقش را در پایداری شیب مورد مطالعه دارند. از طرفی بهبود ضریب ایمنی (FOS) به دلیل ریشه‌های گونه‌هایی که در منطقه مذکور پراکنش دارند، سهم بسیار مهمی در تثبیت شیب دارند. در پژوهش دیگری، Tsige et al. (2020) با تحلیل پایداری شیب‌های کم‌عمق تقویت شده با ریشه گیاه در امتداد جاده‌های کوهستانی بر اساس مدل‌سازی عددی به این نتیجه رسیدند که تثبیت دامنه‌ها از طرق خصوصیات زیست‌مهندسی ریشه، ضریب ایمنی از ۲۲ تا ۳۴ درصد بهبود یافت. از بین پنج گونه گیاهی منتخب، *Salix subserrata* به دلیل خواص مکانیکی ریشه بهتر، گونه گیاهی امیدوارکننده برای تثبیت شیب بود. Cislighi et al. (2021) اثرات فاصله‌گذاری و تنک شدن درختان بر تقویت ریشه در جنگل‌های کوهستانی آلپ جنوبی اروپا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تقویت ریشه از نظر آماری در بین انواع جنگلی متفاوت بود و کم‌ترین مقدار در جنگل *Castanea sativa* مشاهده شد. صرف نظر از نوع جنگل، تنک کردن به میزان کم به‌طور قابل‌توجهی تقویت ریشه را تغییر نداد، در حالی که تنک کردن خوشه‌ای آن را پنج برابر کاهش داد. در نهایت، Liu et al. (2022) در بررسی مقاومت برشی ریشه-خاک و مکانیسم تقویت خاک در اثر ریشه به این نتیجه رسیدند که تنش اصلی شکست ریشه-خاک با m و n همبستگی مثبت دارد.

از بررسی پژوهش‌های صورت گرفته چنین استنباط می‌شود که رابطه بین مقاومت کششی و قطر ریشه بر حسب گونه و شرایط محیطی متفاوت است. با افزایش مقاومت کششی ریشه میزان مقاومت برشی و حد خمیری و حد روانی خاک اطراف ریشه افزایش یافته و منجر به مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌شود. بر همین اساس در پژوهش حاضر، قابلیت گونه‌های بنه (*Pistacia atlantica*) و داغداغان (*Celtis caucasica*) که در بالادست سد کلان در سال ۱۳۹۵ جنگل‌کاری شده‌اند؛ در جهت مسلح‌سازی خاک، مورد مطالعه قرار گرفت تا بتوان گامی مهم در جهت افزایش عمر مفید سد کلان در شهرستان ملایر و کاهش فرسایش برداشت. برای این منظور، با نمونه‌برداری از ریشه دو

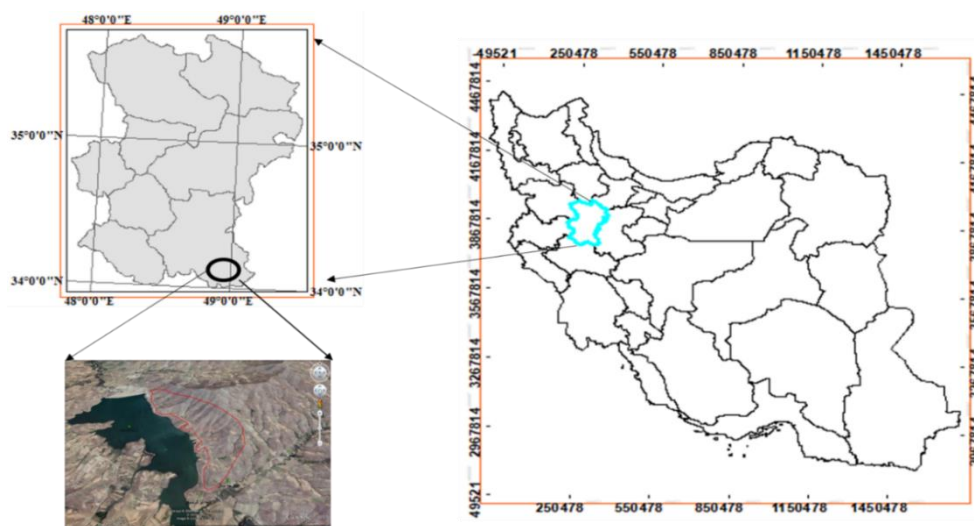
شیب منطقه طرح ۴۰-۱۰ درصد است. این منطقه، شامل یک جامعه *Astragalus microcephalus Bromus tomentelus* و دو زیرجامعه *Festuca ovina Stipa barbata* و *Euphorbia macroclada* گیاهی است. برای انجام این مطالعه دو گونه بانه و داغداغان در سه جمعیت مختلف انتخاب و نمونه‌های ریشه و خاک آن‌ها برای انجام مطالعات زیست مهندسی به آزمایشگاه منتقل شد. در بازدید از منطقه به غیر از پوشش فقیر گونه‌های مرتعی و انواع گراس‌های یکساله یا چندساله هیچ گونه درختی وجود ندارد و در سه سال اخیر اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان ملایر گونه‌هایی مانند بانه، *Amygdalus scoparia*، *Vitex agnus-castus*، *Celtis caucasica*، *Spach Elaeagnus*، *Thuja orientalis*، *Crataegus spp* و *Morus alba* و *angustifolia* L را کشت نموده است.

گونه مذکور، در سه منطقه با شیب‌های کم (۰-۱۰ درصد)، متوسط (۱۰-۲۵ درصد) و بالا (۲۵-۴۰ درصد)، میزان مقاومت کششی ریشه هر گونه و میزان تأثیر آن بر مقاومت برشی و حد خمیری نمونه‌های خاک اطراف ریشه، مورد بررسی قرار گرفت و گونه برتر از نظر اولویت جنگل‌کاری در اراضی بالا دست سد کلان معرفی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنگل‌های روستای قلعه‌نو در ۳۴ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان ملایر است که به‌علت قرارگیری در حاشیه سد کلان، معروف شده است (شکل ۱). بر اساس جمع‌آوری گیاهی انجام شده از منطقه، ۱۲ گونه شناسایی شد. حداقل و حداکثر ارتفاع آن ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ متر بالاتر از سطح دریا است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

Figure 1- Geographical location of the study area

بررسی شد. شبکه مورد نظر روی دیواره پروفیل قرار گرفت و تعداد نقاطی که با ریشه‌ها تقاطع داشتند شمارش شدند و با مشخص بودن نقاط کل و استفاده از فرمول زیر برآوردی از RAR که در آن P؛ نسبت سطح ریشه به سطح خاک (درصد)، n؛ تعداد نقاط تقاطعی با ریشه‌ها و N؛ تعداد کل نقاط شبکه در هر لایه ۱۰ سانتی‌متری است، به‌دست آمد (Abdi, 2009).

$$\%p = n \times \frac{100}{N} \quad (1)$$

نرمال بودن داده‌ها از طریق آزمون کولموگروف-اسمیرنوف انجام گرفت. با توجه به نرمال بودن داده‌ها آزمون تی‌تست برای مقایسه کشش ریشه دو گونه استفاده شد. در سه منطقه برداشت با طبقات مختلف شیب شامل منطقه ۱ با شیب صفر تا ۱۰ درصد (شیب کم)، منطقه ۲ با شیب ۱۰-۲۵ درصد (شیب متوسط)،

۲-۲- روش تحقیق

برای آزمایش مقاومت کششی ریشه، نمونه‌های ریشه درختان مورد مطالعه در ۱۵ آذر ۱۴۰۰ از عمق حدود ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد. بین زمان جمع‌آوری ریشه‌ها و انجام آزمایش کم‌تر از یک هفته وقفه زمانی وجود داشت. تیماری که به‌منظور نگهداری و آماده‌سازی نمونه ریشه‌ها استفاده شد شامل شست و شو و قرار دادن آن‌ها در کیسه‌های پلاستیکی حاوی محلول الکل ۱۵ درصد است. سپس نمونه‌هایی به طول حدود ۱۰ سانتی‌متر به‌صورت تصادفی انتخاب و سرعت انجام آزمایش مقاومت کششی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. ریشه با استفاده از یک دستگاه اینسترون استاندارد اندازه‌گیری شد. برآورد پارامتر RAR با استفاده از یک شبکه به ابعاد ۱۰×۱۵ میلی‌متر

با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک نرمال بودن داده‌های مربوط به ریشه مشخص شد و از آزمون من ویتنی U برای مقایسه خصوصیات ریشه دو گونه در هر منطقه و از آزمون کروسکال والیس خصوصیات ریشه سه منطقه برای هر دو گونه استفاده و با هم مقایسه شدند. در خصوص آزمایش‌های مربوط به خاک آزمون توزیع نرمال برای بررسی نرمال بودن داده‌ها صورت گرفت. با توجه به نرمال نبودن داده‌ها، برای مقایسه مناطق مختلف از نظر ویژگی‌های خاک از آزمون کروسکال والیس و از آزمون لون برای مشخص شدن یکسانی پراکنش واریانس‌ها استفاده شد. در مورد داده‌هایی که نتایج آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه در مورد آن‌ها معنادار بود مقایسات دوبه‌دو انجام شد که با توجه به همگنی واریانس داده‌ها (آزمون لون) برای همه پارامترها آزمون دانکن و برای EC آزمون Dunnett T3 انجام شده است. همچنین، برای بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف خاک از آزمون همبستگی اسپیرمن استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پراکنش RAR در ارتباط با نوع گونه و شیب در دو گونه بنه و داغداغان

جدول ۲، میانگین سطح ریشه به سطح خاک (RAR) در دو گونه بنه و داغداغان در سه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول ۳ آزمون نرمال بودن داده‌های RAR سطح ریشه به سطح خاک در سه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد داده‌های مربوط نرمال نیستند. بنابراین، در پارامتر RAR از آزمون کروسکال والیس برای مقایسه گروه‌های مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامتر RAR در سه منطقه دارای اختلاف معنادار است. بین دو گونه در هر منطقه و بین مناطق مورد بررسی تفاوت معناداری از نظر میزان سطح ریشه به سطح خاک وجود ندارد. اطلاعات مربوط به این شاخص نشان‌دهنده میزان مسلح‌سازی ریشه‌ها در عمق‌های مختلف است (Abernethy and Rutherford, 2001). در پژوهش صورت گرفته در مورد RAR در تحقیق انجام شده توسط Bischetti et al. (2005) نشان‌دهنده تنوع زیاد بین و درون گونه‌هاست و این در حالی است که در مطالعات دیگر رابطه عمق و شاخص روند کاهش دارد. (Mattia et al. (2005) دلیل این مسئله را تراکم خاک در لایه‌های زیرین خاک عنوان کرده است. این شاخص در گونه‌های مختلف دارای تفاوت است. حداکثر مقدار مربوط به گونه راش اروپایی است. در گیاهان بوته‌ای و علفی که تمامی ریشه‌ها نازک هستند (Bischetti et

منطقه ۳ با شیب بیش از ۲۵ درصد (شیب زیاد) ۱۸ پایه از گونه داغداغان و ۱۸ پایه از گونه بنه جهت نمونه‌برداری ریشه برداشت شد (جدول ۱). به‌طور کلی در هر منطقه، شش پایه به‌صورت تصادفی از هرگونه انتخاب و تمامی مشخصات مربوط به خاک در شش تکرار و ریشه در ۱۰ تکرار (برای آزمون مقاومت کششی ریشه) مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی مناطق مورد بررسی
Table 1- Physiographic Characteristics of the investigated regions

پارامتر	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳
شیب	0-10	10-25	25-40
ارتفاع	1937	1950	1960
جهت	غربی	غربی	غربی

۲-۲-۱- پردازش داده‌ها

یافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، ماده آلی خاک به روش سوزاندن در کوره اندازه‌گیری شد (Heiri et al., 2001). در نهایت ۵۴ درصد از ماده آلی خاک به‌عنوان کربن آلی خاک محاسبه شد. EC و pH به‌ترتیب با استفاده از دستگاه‌های هدایت‌سنج الکتریکی (McLean, 1982) و pH (متر) (Rasouli et al., 2016)، تعیین حدود اتربرگ (حد روانی، حد پلاستیک) با استفاده از استاندارد (ASTM D-42-66) سپس با استفاده از منحنی‌های روانی ترسیم شد (Rahimi, 2005). هدف از انجام این آزمایش تعیین حدود اتربرگ شامل حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و نشانه خمیری (PI) است. مقداری خمیر از آزمایش حد روانی انتخاب کرده و بر روی سطح صاف (شیشه) قرار می‌دهیم و با دست آن را می‌غلطانیم تا به فتیله‌ای با قطر ۳/۲ میلی‌متر تبدیل شود. با گرفتن رطوبت از خاک هنگامی که این فتیله از طول و عرض ترک برداشت نمونه‌هایی از آن را برای تعیین درصد رطوبت انتخاب کرده که این درصد رطوبت نشان‌دهنده حد خمیری است. اگر فتیله از ۳/۲ میلی‌متر نازک‌تر شد و ترک برداشت باید نمونه جمع شود و با ورز دادن رطوبت آن گرفته شود و کار را دوباره تکرار کرد تا در قطر ۳/۲ میلی‌متر نمونه ترک بر دارد (Das, 1990).

۲-۲-۲- مقاومت برشی خاک

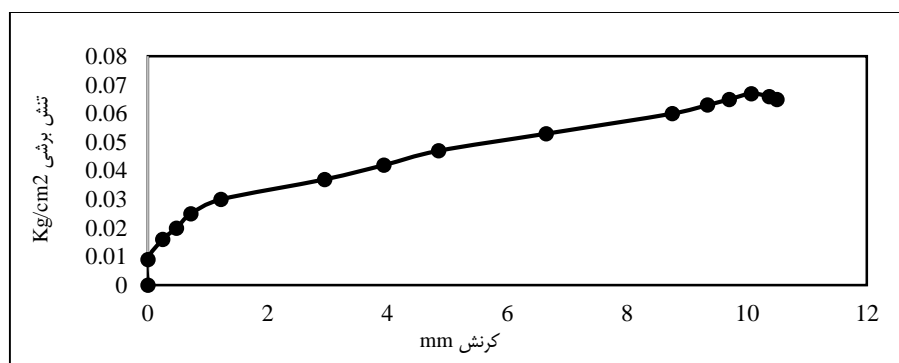
در آزمایش برش مستقیم با حرکت دادن نیمه بالایی یک جعبه محتوی خاک نسبت به نیم پایینی آن، خاک داخل جعبه تحت تنش برشی قرار داده شد تا تحت این تنش برشی گسیخته شود (شکل‌های ۲ تا ۵).

۲-۳- تحلیل آماری داده‌ها

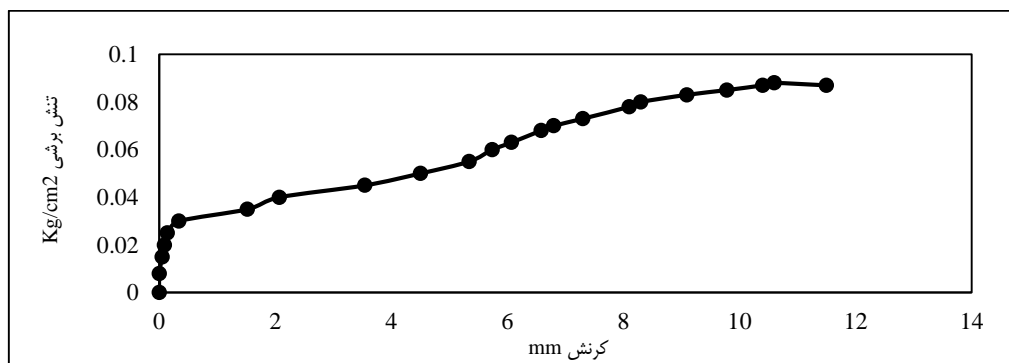
¹ One-way analysis of variance

نیست، در این تحقیق منطقه با شیب کم این شاخص میزان بالاتری را به خود اختصاص داده است. علت این موضوع را می‌توان بر اساس نتایج حاصل از ضریب همبستگی بین پارامتر رس با RAR که دارای همبستگی منفی هستند بیان داشت. در منطقه نمونه‌برداری با شیب کم درصد رس پایین‌تر از دو منطقه ۱ و ۲ بوده است. این نکته نشان می‌دهد هرچه میزان رس در خاک بیشتر باشد حجم ریشه نسبت به حجم خاک کاهش می‌یابد و رشد ریشه در خاک‌های رسی کمتر است.

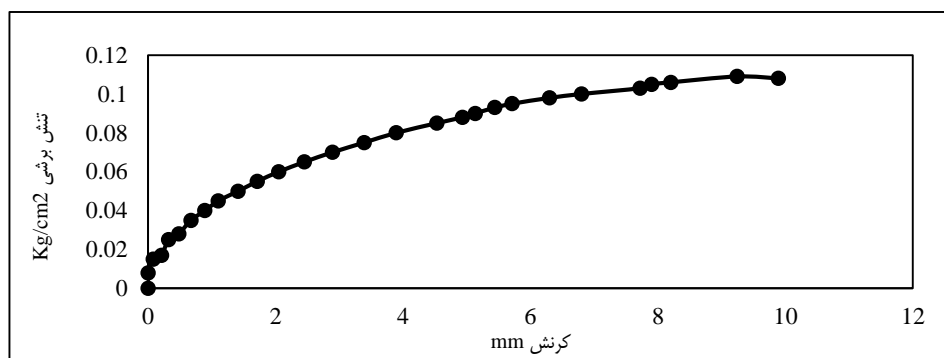
(al., 2005). در مقایسه با درختان این شاخص کمتر است و وجود ریشه‌های قطور تغییرات قابل‌توجهی در شاخص RAR در رابطه با عمق خاک ایجاد می‌کند. Abernethy and Rutherford (2001) در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که به دلیل بالا بودن سنگ مادری عمق ریشه دوانی محدود است و ریشه‌ها بیشتر در عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری خاک پراکنده شده‌اند. در پژوهش صورت گرفته RAR در سه منطقه برداشت دارای اختلاف معنادار است. در منطقه ۱ که برداشت ریشه در نقاط بالای شیب صورت گرفت بالاترین درصد حجم ریشه به حجم خاک قرار دارد که منطبق با نتایج این پژوهش



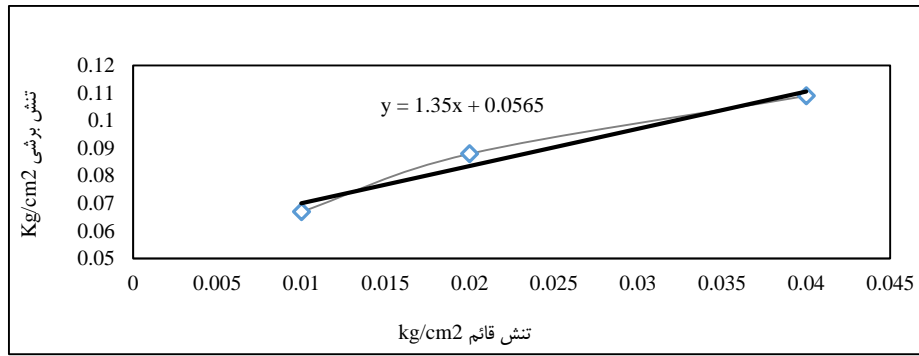
شکل ۲- نمودار تنش-کرنش بار قائم یک کیلوگرم
Figure 2- Stress-strain diagram of vertical load of 1 kg



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش بار قائم دو کیلوگرم
Figure 3- Stress-strain diagram of vertical load of 2 kg



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش بار قائم چهار کیلوگرم
Figure 4- Stress-strain diagram of vertical load of 4 kg



شکل ۵- نمودار تنش قائم-تنش برشی
Figure 5- Vertical stress-shear stress diagram

درصد رس و سیلت مربوط به نمونه خاک بنه منطقه ۳ و بالاترین میزان درصد شن مربوط به نمونه خاک بنه منطقه ۲ است. جدول ۶ آزمایش شیمیایی خاک در سه منطقه را نشان می‌دهد. بیشترین میانگین داده‌ها در خصوص اسیدیته خاک مربوط به بنه منطقه ۱، هدایت الکتریکی داغداغان منطقه ۳، بالاترین میانگین داده‌ها در خصوص شن و رس به ترتیب مربوط به بنه مناطق ۲ و ۳ و بالاترین میزان میانگین داده‌های سیلت در نمونه خاک داغداغان منطقه ۲ مشاهده شده است. با مراجعه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که سطح معنادار بودن در پارامترهای مقاومت برشی PI و pH بالای ۰/۰۵ است. با توجه به نتیجه حاصله سه پارامتر اختلاف معناداری ندارند و مابقی دارای اختلاف معنادار هستند.

۳-۲- آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

جدول ۴ نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین مقادیر حد روانی و حد خمیری و نشانه خمیری مربوط به گونه داغداغان در منطقه شماره ۳ است و بالاترین میزان مقاومت برشی خاک در نمونه خاک داغداغان و بنه منطقه ۲ مشاهده شده است. نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک در سه منطقه مورد مطالعه در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که بالاترین مقدار pH، مربوط به نمونه خاک داغداغان و بالاترین میزان EC، مربوط به نمونه خاک بنه منطقه یک و بالاترین میزان کربن مربوط به بنه منطقه ۱ به میزان ۶/۹۲ درصد است. بالاترین

جدول ۲- مقدار RAR (سطح ریشه به سطح خاک) در سه منطقه مورد مطالعه

Table 2- The value of RAR (root surface to soil surface) in the three study regions

نام گونه	منطقه ۱ (شیب 0-10 درصد)	منطقه ۲ (شیب 10-25 درصد)	منطقه ۳ (شیب بیش از 25 درصد)
داغداغان	0.48	0.03	0.02
داغداغان	0.05	0.04	0.02
داغداغان	0.04	0.05	0.02
بنه	0.03	0.02	0.02
بنه	0.04	0.02	0.03
بنه	0.02	0.02	0.02

جدول ۳- آزمون نرمال بودن داده‌های RAR سطح ریشه به سطح خاک در سه منطقه مورد مطالعه

Table 3- Test of normality of RAR data from the root surface to the soil surface in the three studied regions

Area	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
1	0.14	6	0.20*	0.98	6	0.96
2	0.46	6	0.00	0.56	6	0.00
3	0.34	6	0.03	0.81	6	0.07

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی خاک
Table 4- The results of physical and mechanical soil test

مقاومت برشی خاک	نشانه خمیری (PI)	حد خمیری (PL)	حد روانی (LL)	منطقه	گونه
0.11	1.35	26.7	28.35	1	بنه
0.13	0.70	20.00	19.30	2	بنه
0.94	2.00	22.30	24.30	3	بنه
1.00	1.02	29.70	30.72	1	داغداغان
0.13	0.70	20.00	19.30	2	داغداغان
0.11	0.90	23.30	24.25	3	داغداغان
0.12	0.30	27.70	28.00	1	بنه
0.12	-4.00	23.00	26.19	2	بنه
0.92	1.28	20.60	88.21	3	بنه
0.11	1.00	28.64	64.29	1	داغداغان
0.99	1.73	20.23	5.18	2	داغداغان
0.11	1.31	23.20	93.24	3	داغداغان
0.11	1.15	26.70	28.00	1	بنه
0.11	-1.30	19.00	7.17	2	بنه
0.10	3.00	18.60	6.21	3	بنه
0.10	2.36	23.14	5.25	1	داغداغان
0.99	1.73	20.23	5.18	2	داغداغان
0.10	2.41	24.30	71.26	3	داغداغان

جدول ۵- خصوصیات شیمیایی خاک در سه منطقه مورد مطالعه
Table 5- Chemical properties of soil in the three study regions

درصد رس	درصد شن	درصد سیلت	کربن	EC	pH	گونه	منطقه
3.12	89.00	7.64	6.92	0.35	7.46	بنه	1
5.62	85.2	8.86	6.32	0.10	7.75	داغداغان	1
4.26	89.00	7.46	6.44	0.19	7.35	بنه	1
3.84	90.00	6.00	6.24	0.24	7.42	داغداغان	1
4.18	88.20	8.72	7.36	0.38	7.30	بنه	1
3.20	84.20	12.56	6.92	0.16	7.49	داغداغان	1
1.26	94.81	3.93	2.56	0.12	7.59	بنه	2
3.12	89.30	7.56	2.48	0.10	7.32	داغداغان	2
1.18	97.18	1.64	3.24	0.11	7.50	بنه	2
1.48	93.88	4.64	3.52	0.11	7.90	داغداغان	2
2.32	94.88	2.80	3.60	0.11	7.53	بنه	2
2.48	91.88	5.64	3.32	0.10	7.64	داغداغان	2
6.26	83.18	10.65	5.60	0.16	7.35	بنه	3
6.12	87.32	6.56	4.32	0.13	7.18	داغداغان	3
4.12	84.24	11.64	4.92	0.13	7.54	بنه	3
5.12	88.30	6.65	4.88	0.15	7.27	داغداغان	3
5.54	83.67	10.79	5.40	0.11	7.66	بنه	3
4.76	88.02	7.22	4.12	0.15	7.28	داغداغان	3

پارامترها نشان می‌دهد رس و EC خاک با ضریب ۰/۸۲۹- با سطح معناداری ۵ درصد دارای همبستگی منفی هستند (جدول ۱۰). PL خاک با ضریب ۰/۸۲۹- در سطح پنج درصد دارای همبستگی منفی با رس موجود است، در حالی که PL خاک در سطح ۵ درصد با درصد شن موجود در خاک همبستگی مثبت دارد.

نتایج حاصل از آزمون ضریب همبستگی پارامترها حاکی از آن است که مقاومت برشی خاک و PL با ضریب ۰/۸۲۹ در سطح ۵ درصد همبستگی معناداری دارند (جدول ۹). شن و رس نیز (ضریب ۰/۹۸۶-) در سطح یک درصد معنادار بوده و همبستگی منفی دارند. پارامتر PL و LL (۰/۸۹۸) در سطح پنج درصد معنادار و همبستگی مثبت دارند (جدول ۹). نتایج حاصل از آزمون ضریب همبستگی

جدول ۶- آمار توصیفی داده‌های خاک به تفکیک گونه و منطقه میانگین داده‌ها

Table 6- Descriptive statistics of soil data by species and average data region

منطقه	گونه	pH (اسیدیته)	EC (هدایت الکتریکی)	سیلت	شن	رس
1	بنه	0.818±7.57	0.102±0.31	0.68±7.94	0.461±88.73	0.636±3.85
2	بنه	0.351±7.53	0.057±0.113	1.145±2.79	1.348±95.62	0.636±1.58
3	بنه	0.156±7.51	0.251±0.133	0.568±10.99	0.53±83.69	1.088±5.30
1	داغداغان	0.173±7.55	0.702±0.166	3.28±9.14	3.1±86.46	1.25±4.22
2	داغداغان	0.290±7.62	0.057±0.103	1.48±5.94	2.29±91.68	0.826±2.36
3	داغداغان	0.055±7.24	0.115±0.143	0.381±6.78	0.504±87.88	0.704±5.33

جدول ۷- توصیف داده‌های خاک به تفکیک گونه و منطقه میانگین داده‌ها

Table 7- Descriptive of soil data by species and average data region

منطقه	گونه	کربن	PL (حد خمیری)	LL (حد روانی)	PI (نشانه خمیری)	مقاومت برشی	RAR (سطح ریشه به سطح خاک)
1	بنه	0.46±6.90	0.577±27.03	0.202±28.11	0.577±0.933	0.006±0.113	0.007±0.289
2	بنه	0.528±3.133	2.08±25.83	0.912±18.57	2.35±1.53	0.112±0.118	0.248±0.187
3	بنه	0.349±5.30	1.852±20.5	1.48±22.59	0.863±2.09	0.478±0.654	0.002±0.021
1	داغداغان	0.371±6.49	3.52±27.16	2.75±28.62	0.779±1.64	0.516±0.403	0.104±0.417
2	داغداغان	0.105±3.44	1.94±19.33	1.47±19	0.525±1.35	0.506±0.405	0.006±0.200
3	داغداغان	0.393±4.44	0.608±23.6	1.27±25.29	0.778±1.54	0.055±0.107	0.0004±0.182

جدول ۸- نتایج تحلیل واریانس یک طرفه

Table 8- Result of one-way variance analysis

عنوان	Df (درجه آزادی)	مجموع مربعات	Sig. (سطح معنادار بودن)
pH (اسیدیته)	17	0.59	0.19
EC (هدایت الکتریکی)	17	0.15	0.01
Carbon (کربن)	17	38.36	0.00
Silt (سیلت)	17	150.21	0.01
Sand (شن)	17	295.77	0.00
Clay (رس)	17	44.80	0.00
PL (حد خمیری)	17	226.48	0.00
LL (حد روانی)	17	310.86	0.00
PI (نشانه خمیری)	17	40.95	0.09
Shear strength (مقاومت برشی)	17	2.26	0.82

جدول ۹- آزمون همگنی واریانس خاک در سه منطقه مورد مطالعه

Table 9- Homogeneity test of soil variance in the three studied regions

پارامتر	Levene Statistic	Df 1 (درجه آزادی ۱)	Df 2 (درجه آزادی ۲)	Sig. (سطح معنادار بودن)
pH (اسیدیته)	0.22	2	15	0.81
EC (هدایت الکتریکی)	11.43	2	15	0.00
Carbon (کربن)	0.71	2	15	0.51
Silt (سیلت)	0.51	2	15	0.61
Sand (شن)	0.03	2	15	0.97
Clay (رس)	0.00	2	15	0.99
PL (حد خمیری)	0.12	2	15	0.89
LL (حد روانی)	0.59	2	15	0.57
PI (نشانه خمیری)	4.93	2	15	0.02
Shear strength (مقاومت برشی)	0.65	2	15	0.54

و همبستگی مثبت دارند. با افزایش درصد شن خاک، پارامتر RAR افزایش پیدا کرده و رشد ریشه بیشتر می‌شود.

با افزایش درصد رس خاک میزان PL خاک کاهش می‌یابد و در مورد شن برعکس است. میزان درصد سطح ریشه به سطح خاک (RAR) و درصد شن خاک در سطح پنج درصد معنادار بوده

۳-۳- آزمایش‌های مقاومت کششی ریشه

نتایج مربوط به میانگین مقاومت کششی ریشه دو گونه در جدول ۱۲ ارائه شده است. با توجه به جدول، مقاومت کششی گونه داغداغان در هر سه منطقه بیش‌تر از گونه بنه است. همچنین، نتایج بیان‌گر این است در منطقه ۳ با شیب بیش‌تر، مقاومت کششی نیز بیش‌تر است. به دلیل نرمال نبودن توزیع داده‌ها برای مقایسه مقاومت کششی دو گونه در سه منطقه آزمون من‌ویتنی استفاده شد (جدول ۱۳). نتایج نشان داد که از نظر مقاومت کششی در مناطق ۱، ۲ و ۳ بین گونه‌های بنه و داغداغان اختلاف معنادار وجود دارد (جدول ۱۴ و شکل ۶). برای بررسی وجود اختلاف معنادار در پارامتر مقاومت کششی ریشه گونه‌ها در سه منطقه، ابتدا نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نرمال نبودن توزیع داده‌ها، از آزمون کروسکال والیس برای رسیدن به این هدف استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در گونه داغداغان و بنه بین مناطق مختلف به‌ترتیب با سطح معناداری

۰/۲۷۹ و ۰/۰۹۷ از نظر مقاومت کششی اختلاف معنادار وجود ندارد (جدول ۱۵).

رابطه قطر ریشه و میزان نیروی لازم برای گسیختن ریشه در سه منطقه با شیب متفاوت نشان داد که فقط در گونه بنه منطقه ۲ همبستگی مثبت وجود دارد ($R^2=0/5556$) و در بقیه موارد مقدار ضریب تعیین بسیار پایین است. در همه موارد رابطه بین قطر و نیروی لازم برای کشش ریشه تابع توانی مثبت است (شکل ۷).

مقاومت کششی ریشه‌ها از طریق تقسیم نیروی لازم برای گسیختن هر نمونه بر سطح مقطع ریشه آن به‌دست خواهد آمد. نمودار مربوط به رابطه قطر مقاومت کششی ریشه گونه‌ها در مناطق سه‌گانه در شکل ۸ آمده است. در تمامی مناطق رابطه بین قطر و مقاومت کششی ریشه تابع توانی منفی است و با افزایش قطر مقاومت کششی کاهش می‌یابد (شکل ۸).

جدول ۱۲- ضریب همبستگی پارامترهای خاک در منطقه ۳
Table 12- Correlation coefficient of soil parameters in Region 3

ضریب همبستگی	pH (اسیدیته)	Ec (هدایت الکتریکی)	carbon (کربن)	Silt (سیلت)	Sand (شن)	Clay (رس)	PL (حد خمیری)	LL (حد روانی)	PI (نشانه خمیری)	Shear strength (مقاومت برشی)	RAR (ریشه به سطح خاک سطح)
pH (اسیدیته)	1.00										
Ec (هدایت الکتریکی)	-0.35	1.00									
carbon (کربن)	0.66	0.03	1.00								
silt (سیلت)	0.93**	-0.33	0.58	1.00							
sand (شن)	-0.66	0.09	-0.82*	-0.68	1.00						
clay (رس)	-0.20	0.26	0.43	-0.32	-0.49	1.00					
PL (خمیری حد)	0.83*	0.47	-0.83	-0.75	0.66	-0.03	1.00				
LL (روانی حد)	-0.60	0.79	-0.54	-0.61	0.60	-0.09	-0.03	1.00			
PI (نشانه خمیری)	0.60	0.00	0.26	0.32	-0.26	0.03	-0.09	0.83*	1.00		
Shear strength (مقاومت برشی)	0.00	0.52	0.55	0.18	-0.35	0.20	-0.30	-0.30	0.03	1.00	
RAR (ریشه به سطح خاک سطح)	0.88*	0.15	0.83*	0.75	-0.82*	0.2	-0.70	-0.31	-0.31	0.32	1.00

علامت ** و * به‌ترتیب نشان‌دهنده همبستگی پارامترها در ۰/۰۱ و ۰/۰۵ معنادار است و علامت منفی نشان‌دهنده همبستگی منفی است

جدول ۱۳- آمار توصیفی مقاومت کششی ریشه در سه منطقه
Table 13- Descriptive statistics of root tensile strength in the three regions

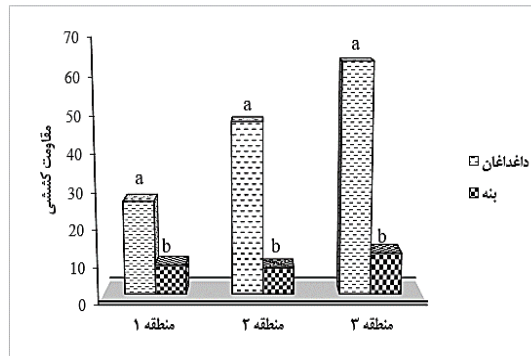
منطقه	گونه ۱	مقاومت کششی ریشه (مگاپاسکال)
۱	بنه	8.98± 1.75
۲	بنه	8.18± 1.65
۳	بنه	12.31± 2.09
۱	داغداغان	26.41± 7.42
۲	داغداغان	47.68± 18.85
۳	داغداغان	63.51± 17.21

جدول ۱۴- آزمون نرمال بودن داده‌ها در سه منطقه
Table 14- Data normality test in the three areas

Species	کولموگروف-اسمیرنوف			شاپیرو		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
کشش ریشه	1	0.26	51	0	0.65	51
	2	0.47	52	0	0.16	52

جدول ۱۵- آزمون من ویتنی (U) کشش ریشه در دو گونه مناطق مختلف
Table 15- Mann-Whitney (U) test of root elongation in two species in different regions

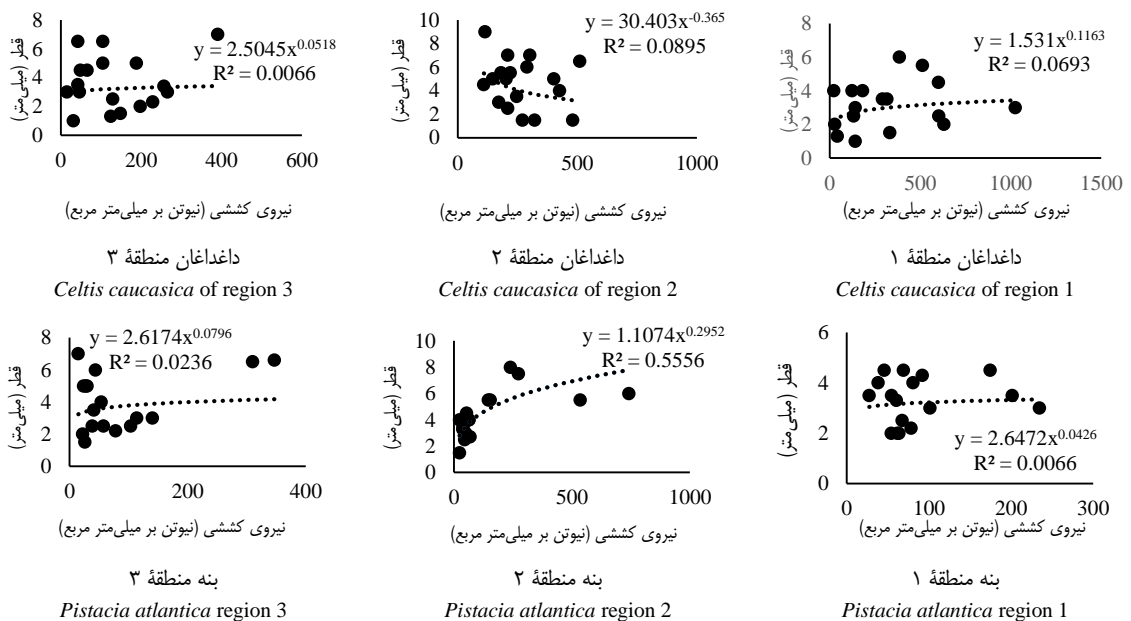
منطقه	آزمون من ویتنی (U)	Z	سطح معناداری
منطقه ۱	61	-3.195	0.001
منطقه ۲	70	-2.91	0.004
منطقه ۳	115	-1.147	0.004



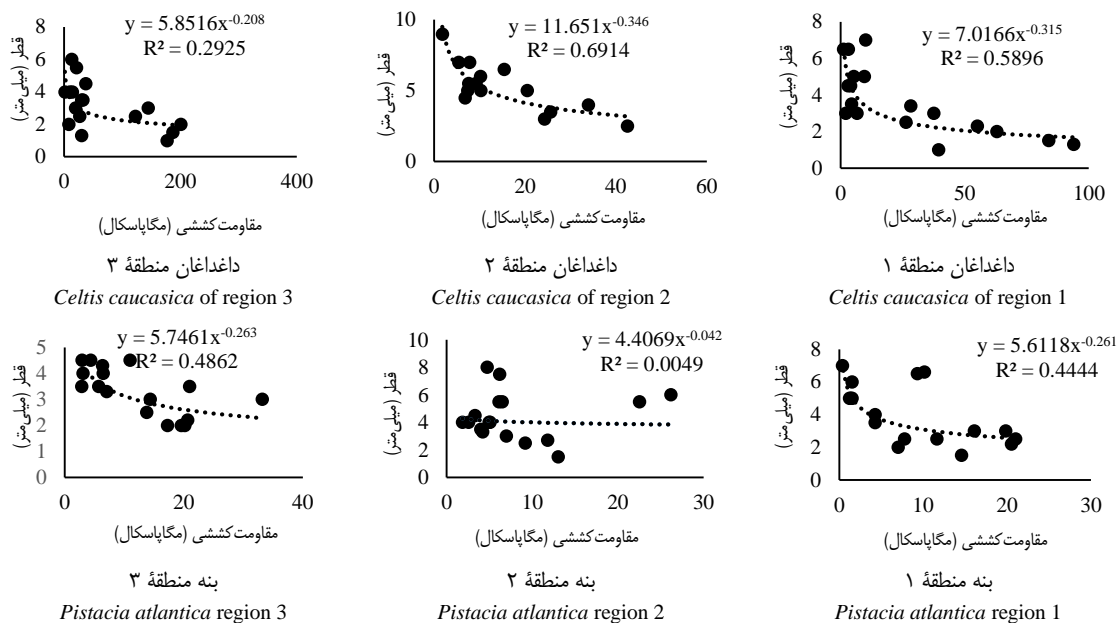
شکل ۶- مقایسه کشش ریشه دو گونه در سه منطقه
Figure 6- Comparison of root elongation of two species in three regions

جدول ۱۶- نتایج آزمون کروسکال والیس
Table 16- Kruskal-Wallis test results

گونه	درجه آزادی	کروسکال والیس	معناداری
بانه	2	4.60	0.10
داغداغان	2	2.55	0.28



شکل ۷- رابطه قطر ریشه و میزان نیروی لازم برای گسیختن ریشه در سه منطقه مورد مطالعه
Figure 7- Relationship between root diameter and the amount of force required to break the root in the three study regions



شکل ۸- رابطه بین قطر و مقاومت کششی ریشه

Figure 8- Relationship between the diameter and the tensile strength of the beard

در منطقه ۲ با شیب متوسط دارای رابطه توانی منفی و بیشترین مقدار مقاومت کششی ریشه مربوط به نازکترین ریشه‌هاست. در خصوص گونه بنه رابطه بین قطر و کشش ریشه رابطه تابع توانی مثبت دارد. با افزایش قطر میزان کشش ریشه افزایش می‌یابد. مقایسه مناطق با شیب متوسط و زیاد نشان داد که گونه داغداغان از نظر کشش ریشه دارای اختلاف آماری معناداری هستند. در منطقه با شیب زیاد میزان میانگین کشش ریشه گونه داغداغان بالاتر از مناطق با شیب متوسط و کم است.

ریشه‌های گیاهان، به خصوص درختان می‌توانند منجر به افزایش پارامترهای مقاومتی خاک شود. در روش‌های زیست مهندسی خاک، با گذشت زمان پایداری شیب‌ها افزایش می‌یابد و در صورت آسیب دیدگی، توانایی احیاء دوباره خود را دارند (Abernethy and Rutherford, 2001). به طور کلی می‌توان گفت میزان مسلح‌سازی یک گونه به خصوصیات زیست مهندسی آن گونه بستگی دارد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، بین گونه‌ها از نظر این خصوصیات اختلاف قابل توجهی وجود دارد. مشخص کردن سامانه ریشه گونه‌های مختلف گیاهی شاخص تأثیرگذار به منظور انتخاب گونه مورد نظر برای مسلح کردن خاک تعیین تأثیر گونه‌های مختلف در بحث پایداری است. برای برآورد افزایش مقاومت برشی خاک، میزان مسلح‌سازی و افزایش پایداری شیب ناشی از حضور ریشه‌ها، بررسی ساختار ریشه‌ها ضرورت دارد.

در مطالعه‌ای، Akramian et al. (2019) در بررسی تأثیر ریشه گز بر افزایش میزان چسبندگی خاک و مقاومت برشی خاک

در پژوهشی، Hosseini et al. (2019) در بررسی مقاومت کششی درختان گز در حاشیه رودخانه به منظور کاربردهای زیست مهندسی به این نتیجه دست یافتند که بین قطر و نیروی گسیختگی ریشه رابطه مستقیم وجود دارد با افزایش قطر نیروی بیشتری برای گسیختگی ریشه لازم است. در مطالعات دیگر رابطه بین این دو مؤلفه به صورت تابع توانی منفی ذکر شده است (Simon and Colison, 2002). همچنین، Keybandari et al. (2018) در بررسی تغییرات مقاومت کششی ریشه سرخ‌بید به این نتیجه رسیدند که رابطه قطر و مقاومت کششی ریشه تابع توانی منفی است با کاهش قطر مقاومت کششی نیز کاهش می‌یابد. در پژوهش صورت گرفته در منطقه با شیب متوسط و زیاد از نظر مقاومت کششی ریشه اختلاف معناداری وجود دارد و در منطقه برداشت گونه‌ها در منطقه با شیب متوسط در اواسط دامنه شیب و در منطقه با شیب زیاد از نقاط پائین شیب صورت گرفته است. میزان کشش ریشه در نقاط پائین شیب (منطقه ۳) کم‌تر از نقاط با شیب متوسط (منطقه ۲) است. این نکته نشان می‌دهد که کشش ریشه و RAR در گونه داغداغان در نقاط بالای شیب بیش‌تر از نقاط پائین شیب است. میانگین کشش ریشه گونه داغداغان بیش‌تر از گونه بنه است و بین مقاومت کششی گونه بنه از نظر قطر و میزان کشش ریشه رابطه تابع توانی مثبت وجود دارد. با افزایش قطر ریشه مقاومت کششی ریشه افزایش می‌یابد. میزان مقاومت کششی دو گونه دارای اختلاف معناداری است و کشش ریشه گونه داغداغان بیش‌تر از گونه بنه است. در گونه داغداغان رابطه بین کشش و قطر ریشه

بیش‌ترین کشش ریشه مربوط به ریزریشه‌هاست، اما در مورد گونه‌ی بنه رابطه‌ی قطر و کشش تابع توانی مثبت است و با افزایش قطر میزان کشش افزایش می‌یابد. میزان حجم ریشه به خاک RAR در گونه‌ی داغداغان در شیب بالاتر بیش‌تر از مناطق با شیب پایین است. درصد رس موجود در بافت خاک با میزان RAR همبستگی منفی دارند و در خاک‌های رسی رشد و پراکنش ریشه کم‌تر است. گونه‌ی داغداغان در اراضی با شیب بالا با درصد شن پایین‌تر باعث افزایش ترسیب کربن و پارامتر حد خمیری و حد روانی خاک می‌شود (منطقه ۳). هم‌چنین، نتایج نشان داد که مقاومت کششی ریشه‌ی گونه‌های بنه و داغداغان تفاوت معناداری دارند. مقایسه‌ی مقاومت کششی گونه‌ی داغداغان و بنه نشان داد که این دو گونه با هم از نظر کشش ریشه تفاوت معناداری دارند و میزان کشش ریشه‌ی داغداغان از کشش ریشه‌ی گونه‌ی بنه بیش‌تر است. بین خصوصیات بوم‌مهندسی ریشه در ارتباط با میزان شیب تفاوت معنادار وجود دارد. در خصوص گونه‌ی بنه در سه منطقه تفاوت معناداری از نظر کشش ریشه وجود نداشت، ولی در گونه‌ی داغداغان از نظر میزان مقاومت کششی ریشه در منطقه ۲ و میزان حد خمیری و حد روانی خاک تفاوت معناداری وجود دارد.

با توجه به اهمیت حضور پوشش گیاهی جهت کاهش فرسایش خاک نتایج این پژوهش باعث آشنایی بیش‌تر با خواص زیست فنی دو گونه‌ی داغداغان و بنه شد. پیشنهاد می‌شود تأثیر این گونه‌ها در شیب‌هایی با تفاوت بیش‌تر از ۴۰ درصد به‌منظور بررسی میزان تأثیر خواص زیست فنی گونه‌های مذکور بر مسلح‌سازی خاک مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به در نظر گرفتن جنبه‌ی توریستی منطقه مورد مطالعه ضرورت کشت گونه‌های مقاوم به کم‌آبی که با سیستم ریشه‌ای با قدرت کششی بیش‌تر منجر به سرسبزی محیط اطراف، ایجاد دید منظر مطلوب، کاهش فرسایش، و عمر مفید سد می‌شود. در نهایت با توجه به نتایج می‌توان توصیه نمود که در جنگل‌کاری‌های اطراف سد کلان بهتر است از گونه‌ی داغداغان به‌دلیل تأثیر بیش‌تری که در افزایش مسلح‌سازی خاک و کاهش فرسایش دارد، استفاده شود.

رحیمی، حسن (۱۳۸۴). مکانیک خاک. چاپ دوم، انتشارات دانش و فن تهران، ۶۲۲ صفحه.

رسولی صدقیانی، میرحسین، قدرت، کمال، اشرفی ساناز، جعفری، مراد، و خداوردیلو، حبیب (۱۳۹۵). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک در مناطق تغییر کاربری‌یافته جنگل‌های زاگرس شمالی (مطالعه موردی: آشنویه استان آذربایجان غربی). مدیریت خاک و تولید پایدار، ۶(۳)، ۸۳-۹۹.

با بررسی ۱۸ نمونه‌ی خاک حاوی ریشه و سه نمونه خاک بدون ریشه به این نتیجه رسیدند که حضور ریشه منجر به افزایش مقاومت برشی و چسبندگی خاک به میزان ۲۶/۶ و ۴۲/۶۴٪ می‌شود. هم‌چنین، در این پژوهش با افزایش شاخص تراکم RAR چسبندگی خاک و نهایتاً مقاومت برشی افزایش می‌یابد و با افزایش مقاومت برشی خاک پایداری کناره‌های رودخانه افزایش یافته و منجر به کاهش میزان فرسایش خاک می‌شود. در این راستا، Maleki et al. (2013) در بررسی ریشه‌ی درخت توسکا مقدار مسلح‌سازی خاک با توجه به نتایج حاصله از خصوصیات زیست‌مهندسی و مدل و کمینه و بیشینه آن، ۵۵ و ۷۶/۱۱۰ کیلو پاسکال است. ریشه‌ی درختان گز و پده باعث افزایش ۶۶-۲۰ درصد مقاومت برشی خاک شده و بین مقاومت برشی و تراکم ریشه در واحد سطح رابطه‌ی خطی وجود دارد. در بررسی صورت گرفته بین دو گونه‌ی بنه و داغداغان در خصوص افزایش مقاومت برشی و حد خمیری و حد روانی و پارامتر کشش ریشه خاک اختلاف معناداری وجود ندارد. مناطق دارای شیب متوسط و زیاد از نظر کشش ریشه گونه‌ی داغداغان داری اختلاف معنادار هستند. در منطقه ۳ میزان میانگین کشش ریشه‌ی گونه‌ی داغداغان بالاتر از منطقه ۲ است. میانگین داده‌های کشش ریشه‌ی داغداغان منطقه ۲ با شیب متوسط برابر با ۴۲/۴۶ مگاپاسکال است. در منطقه ۳ با شیب زیاد میزان میانگین کشش ریشه‌ی گونه‌ی داغداغان بالاتر از منطقه ۲ با شیب متوسط است. با توجه به همبستگی مثبت پارامتر PL (حد خمیری) و LL (حد روانی) خاک گونه‌ی داغداغان منطقه ۳ در نقاط بالای شیب به‌علت حضور ریشه با کشش بیش‌تر ریشه باعث افزایش پارامتر PL (حد خمیری) و LL (حد روانی) خاک و مسلح‌سازی خاک و کاهش فرسایش در شیب‌های بالایی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، میزان کشش ریشه‌ی گونه‌ی داغداغان از گونه‌ی بنه بیش‌تر است. رابطه‌ی بین قطر و کشش ریشه در هر دو گونه با هم متفاوت است. در گونه‌ی داغداغان این رابطه منفی و

منابع

اکرمیان، محبوبه، دستورانی، محمدتقی، جنگجوبرزل آباد، محمد، و عبدی، احسان (۱۳۹۸). بررسی اثرات ریشه درختان ساحلی (گز) در افزایش مقاومت برشی خاک. یازدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، دانشگاه یاسوج.

حسینی، علیرضا، و شفاعی بجستانی، محمد (۱۳۹۸). بررسی مقاومت کششی درختان گز در جهت شیب و جریان رودخانه با منظور کاربردهای زیست‌مهندسی. پژوهش آب ایران، ۱۳ (۱)، ۴۱-۴۸.

کی‌بندری، صغری، و حسینی، عطاالله (۱۳۹۸). مروری بر مطالعه عوامل مؤثر ساخت جاده‌های جنگلی در ناحیه رویشی هیرکانی. جاده، ۱۰۵-۱۱۴، (۱۰۱)۳۷.

ملکی، صغری، نقدی، رامین، عبدی، احسان، و نیکوی، مهرداد (۱۳۹۳). بررسی میزان مسلح‌سازی ریشه‌توسکا به‌منظور کاربرد در زیست‌مهندسی. *جنگل ایران*، ۶(۱)، ۴۹-۵۸.

نوری، پروین، و حبیبی بی‌بالانی، قاسم (۱۳۹۸). بررسی میزان پراکنش ریشه درختان چنار (*Platanus orientalis L.*) در حاشیه رودخانه کرانلو شهرستان کلیبر. *تحقیقات منابع طبیعی تجدیدشونده*، ۱۰(۲)، ۳۱-۳۷.

References

Abernethy, B., & Rutherford, D. (2001). The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 921-937. doi:10.1002/1096-9837(200008)25:9<921::AID-ESP93>3.0.CO;2-7

Akramian, M., Dasarati, M., Jallobarzalabad, M., & Abdi, A. (2019). Investigating the effects of the roots of coastal trees (gaz) in increasing the shear strength of the soil. The 11th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering, Yasouj, Iran. [In Persian]

Arab Khedri, M. (2014). A review on major water erosion factors in Iran. *Agrarian Management Journal*, 2(1), 17-26. doi:10.22092/lmj.2014.100081 [In Persian]

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., & Zocco, A. (2005). Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, 278, 11-22. doi:10.1007/s11104-005-0605-4

Cislaghi, A., Alterio, E., Fogliata, P., Rizzi, A., Lingua, E., Vacchiano, G., Battista Bischetti, B., & Sitzia, T. (2021). Effects of tree spacing and thinning on root reinforcement in mountain forests of the European Southern Alps. *Forest Ecology and Management*, 482(1-2), 118873. doi:10.1016/j.foreco.2020.118873

Das, B.M. (1990). *Principle of geotechnical engineering*. 2nd ed. Translated by Salehzadeh H., Iran University of Science and Technology, Tehran, 457 Pages.

Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis. Pp. 383-411, In: A. Klute. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*, second edition.

Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Fourcaud, T., Cai, X., Ji, J., & Mickovski, S. (2008). Root reinforcement in plantations of cryptomeria japonica d. don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and Management*, 256(8), 1517-1526. doi:10.1016/j.foreco.2008.05.050

عرب‌خدری، محمود (۱۳۹۳). مروری بر عوامل مؤثر بر فرسایش آبی خاک در ایران. *مدیریت اراضی*، ۲(۱)، ۱۷-۲۶. doi:10.22092/lmj.2014.100081

عبدی، احسان (۱۳۸۸). بررسی تاثیر ریشه گونه‌های جنگلی در پایداری دامنه‌ها به‌منظور استفاده‌های کاربردی در جاده‌سازی جنگل و زیست مهندسی. رساله دکتری، دانشگاه تهران.

کریمی راد، سمیه، لطفعلیان، مجید، شوش پاشا، عیسی، جلیلود، حمید، و گیادروسیچ، فیلیپو (۱۳۹۹). بررسی مسلح‌سازی خاک بر اساس تغییرات چسبندگی در حضور ریشه درختان ممرز (*Carpinus betulus L.*). *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۲۸(۳)، ۲۶۹-۲۸۲. doi:10.22092/ijfpr.2020.342892.1929

Greenway, D.R. (1987). Vegetation and slope stability. Pp. 187-230, In: Anderson, M.G., Richards, K.S. (Eds.), *Slope Stability*. John Wiley and Sons, Ltd, New York.

Heiri, O., Lotter, A.F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediment: reproducibility and comparability of results, *Journal of Paleolimnology*, 25, 101-110. doi:10.1023/A:1008119611481

Hosseini, A., & Shafa'i Bejstani, M. (2019). Investigating the tensile strength of Gaz trees in the direction of slope and river flow with the purpose of bioengineering applications. *Journal Water Research*, 13(1), 41-48. [In Persian]

Keybandari, S., & Hosseini, A. (2018). A review of the factors affecting the design and construction of forest roads in the Hyrkani growth area. *Road*, 23(4), 105-114. [In Persian]

Karamirad, S., Lotfalian, M., Shooshpasha, A., Jalilund., A., & Giadrosich, F. (2020). Investigation of soil reinforcement according to the root cohesion changes in hornbeam (*Carpinus betulus L.*). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 28(3), 269-282. doi:10.22092/ijfpr.2020.342892.1929 [In Persian]

Liu, P., Xiao, X., Wu, L., Li, X., Zhang, H., & Zhou, J. (2022). Study on the shear strength of root-soil composite and root reinforcement mechanism. *Forests*, 13(6), 898-904. doi:10.3390/f13060898

Maleki, S., Naghdi, R., Abdi, A., & Nikooy, M. (2014). Investigating the amount of reinforcement of Alnus subcordata root in order to use in bioengineering. *Iranian Journal of Fores*, 6(1), 49 - 58. [In Persian]

Mattia, C., Bischetti, G.B., & Gentile, F. (2005). Biotechnical characteristics of root system of typical Mediterranean species. *Plant and Soil*, 278, 23-32. doi:10.1007/s11104-005-7930-5

Mclean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. Pp.199-224. In: Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*,

- Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed. ASA-SSSA, Madison, WI. [In Persian]
- Nouri, P., & Habibi Bibalani, Gh. (2019). Investigating of root distribution of plantain trees (*Platanus orientalis* L.) on riverside of Cranelo river Kalibar city. *Renewable Natural Resources Research*, 10(2), 31 – 37. [In Persian]
- Pollen, N. (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of stream banks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69(3), 197-205. doi:10.1016/j.catena.2006.05.004
- Rasouli, S., Ghodrat, K., Ashrafi, S., Jafari, M., & Khodaverdloo, H. (2016). Evaluation of soil quality indicators in land use changed forest of Northern Zagros (Case study: Oshnavieh, West Azerbaijan). *Soil Management and Sustainable Production*, 6(3), 83-99. [In Persian]
- Sanchez-Castillo, L., Kubota, T., Hasnawir, & Cantu silva, I. (2017). Influence of root reinforcement of forest species on the slope stability of Sierra Madre Oriental, Mexico. *Journal of the Faculty of Agriculture*, 62(1), 177-181. doi:10.5109/1801779
- Simon, A., & Collison, A.J.C. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface. Processes Landforms*, 27(5), 527–546. doi:10.1002/esp.325
- Sun, H.L., Li, S.C., Xiong, W.L., Yang, Z.R., Cui, B.S., & Yang, T. (2008). Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. *Ecological Engineering*, 32(1), 60–67. doi:10.1016/j.ecoleng.2007.09.002
- Tsige, D., Senadheera, S., & Talema, A. (2020). Stability analysis of plant-root-reinforced shallow slopes along mountainous road corridors based on numerical modeling. *Geosciences*, 10(1), 19-28. doi:10.3390/geosciences10010019