

تأثیر سیستم ریشه‌ای علف و تیور بر پارامترهای مقاومت برشی ساحل رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کر)

حسین حمیدی فر^{۱*}، مهدی بهرامی^۲، محمدجواد امیری^۲

۱. استادیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فسا

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۰/۱۴)

چکیده

فرسایش کناره‌ای در رودخانه‌ها خسارت‌های زیادی را به اراضی مجاور تحمیل می‌کند و تغییر ریخت‌شناسی رودخانه‌ها را به همراه دارد. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی کارایی علف و تیور در افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش فرسایش سواحل رودخانه‌ها صورت گرفته است. تغییرات پارامترهای ساختاری علف و تیور شامل RDR ، RAR ، $RDDI$ و RLD در اعماق مختلف و همچنین توسعه عرضی و عمقی ریشه بررسی شد. با بررسی سه فاصله مختلف بین بوته‌های تیور، فاصله ۳۰ سانتی متری بین بوته‌ها به عنوان فاصله بهینه مشخص شد. نتایج نشان داد علف و تیور سبب افزایش بیش از ۱۰۴ درصدی چسبندگی و حدود ۸۳ درصدی زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با حالت بدون ریشه شده است. مقایسه بین پارامترهای مختلف نشان داد به ترتیب پارامترهای RAR و RDR مناسب‌ترین پارامتر برای محاسبه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در حضور ریشه تیور هستند. همچنین، با انجام مقایسه‌ای بین تیور و برخی گونه‌های درختی منطقه از نظر مقاومت کششی ریشه، مدت زمان لازم برای استقرار گیاه، مقاومت در برابر خشکسالی و قابلیت خودترمیمی مشخص شد که علف و تیور در مقایسه با سایر گونه‌های گیاهی متداول، مناسب‌تر است و می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای محافظت سواحل رودخانه در برابر فرسایش استفاده شود.

کلیدواژگان: پوشش گیاهی، حفاظت سواحل رودخانه، رسوب، روش بیولوژیک، فرسایش کناره.

مقدمه

فرسایش سواحل رودخانه از بیشترین منابع تولید رسوب است که به دلیل اثرگذاری بر خصوصیات مجاری رودخانه‌ها، اهمیت زیادی دارد. همچنین، فرسایش سواحل موجب ایجاد خسارت‌های فراوان به اراضی و تأسیسات مجاور ساحل می‌شود. ملاحظات اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی و بهره‌برداری مطلوب از رودخانه‌ها ایجاب می‌کند که در بسیاری مواقع، با اقدامات مناسب، روند فرسایش به نوعی مهار شود و کاهش یابد (۱ و ۲). بر اساس مطالعات انجام‌شده، متوسط میزان اتلاف اراضی بر اثر فرسایش کناری رودخانه تجن در سواحل ایران ۳۳/۱ و در سواحل ترکمنستان ۳/۹ مترمکعب بر متر در سال برآورد شده است (۳ و ۴). روش‌های متعددی برای مهار فرسایش در رودخانه‌ها استفاده می‌شود که بر حسب نوع مصالح، طول عمر، انعطاف‌پذیری، نفوذپذیری و ... به انواع گوناگونی تقسیم می‌شود. در سال‌های اخیر بیشتر توجه محققان و مهندسان رودخانه به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه به سمت روش‌های غیرسازه‌ای بوده است که به‌اصطلاح با عنوان «روش‌های بیومهندسی» شناخته می‌شود. این روش‌ها از نظر طراحی و اجرا ساده‌تر و ارزان‌تر هستند و سازگاری بسیار بیشتری با محیط زیست منطقه دارند. نکته بسیار مهم درباره روش‌های بیومهندسی آن است که به خلاف روش‌های سازه‌ای، نیاز به صرف هزینه زیادی برای نگهداری ندارند و در صورت تخریب جزئی نیز به صورت خودرو دوباره احیا می‌شوند (۵-۷).

به طور کلی، سیستم خاک-ریشه تکمیل‌کننده یکدیگر از دیدگاه تأثیر نیروها هستند (۸ و ۹). تحقیقات نشان داده است خاک در مقابل نیروهای فشاری، مقاومت زیاد و در مقابل نیروهای کششی مقاومت بسیار کمی دارد. در مقابل ریشه گیاهان مقاومت کششی زیاد و مقاومت فشاری کمی دارند (۱۰). بنابراین، حضور خاک و ریشه در کنار یکدیگر سبب تشکیل سیستمی می‌شود که هم مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی زیادی را از خود نشان می‌دهد که می‌تواند از دیدگاه پایداری سواحل در برابر فرسایش بسیار درخور توجه باشد. پوشش گیاهی از طریق تحکیم خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک، تحت تأثیر عمل ریشه گیاهان، موجب افزایش مقاومت دیواره‌ها و زیادشدن مقاومت خاک در برابر نیروی فرسایشی آب شده و با حفاظت طبیعی حاشیه و کناره مسیر رودخانه، کاهش

میزان رسوب حمل‌شده توسط جریان آب را موجب می‌شود (۱۱ و ۱۲).

علاوه بر آن، اندام‌های هوایی گیاهی نیز سبب افزایش زبری دیواره‌ها و کاهش سرعت و تنش برشی جریان آب در مواقع سیلابی می‌شود که به نوبه خود در کاهش آثار فرسایشی جریان آب مؤثر است (۱۳). از این رو، پوشش گیاهی به صورت بالقوه توانایی پایداری و حفاظت سواحل رودخانه‌ها را از طریق کاهش خطر فرسایش و کنترل رسوب دارد. علاوه بر تأثیر مستقیم پوشش گیاهی در تثبیت خاک کناره‌ها، وجود این نوع پوشش در اراضی حاشیه بالادست رودخانه و همچنین سطح حوضه آبریز کارکرد مهمی در جلوگیری از فرسایش خاک و کاهش رسوب حمل‌شده به رودخانه دارد (۱۴).

در زمینه کاربرد درختان در حفاظت سواحل، میزان افزایش مقاومت برشی ساحل کارون با استفاده از هندسه ریشه‌های درختان گز و پده بررسی و مشاهده شد که میزان مقاومت برشی خاک بر اثر وجود ریشه درخت با افزایش عمق ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد (۱۵). همچنین، افزایش پایداری شیب‌های کنار رودخانه‌ای بر اثر حضور ریشه درخت گز نیز گزارش شده است (۱۶). با بررسی تأثیر ریشه گیاه بید و گونه‌ای از گیاهان علفی مشاهده شد که بید ریشه‌های ضعیف دارد و متوسط مقاومت آن ۱۲ مگاپاسکال است، در حالی که مقاومت ریشه گونه علفی ۱۹ مگاپاسکال است ولی هر دو گونه سبب افزایش چسبندگی خاک شده‌اند (۱۷).

پیشینه استفاده از علف وتیور^۱ به عنوان یک راهکار بیومهندسی برای احیای اراضی، کنترل فرسایش به قرن‌ها پیش برمی‌گردد، اما مقبولیت و محبوبیت آن در سطح جهانی در دهه اخیر بسیار افزایش یافته است. این امر بیشتر ناشی از افزایش دانش و آگاهی برنامه‌ریزان منابع آب در زمینه ویژگی‌های منحصربه‌فرد علف وتیور و نیز مقرون‌به‌صرفه بودن آن است. از طرفی، نباید از سازگاری بسیار زیاد آن با شرایط محیطی و کمترین تأثیر آن بر محیط زیست غافل بود. به طوری که از سال ۱۹۸۰ مورد توجه بانک جهانی قرار گرفته و با عنوان «فناوری علف وتیور» به عنوان حفاظت از محیط زیست در کشورهای مختلفی مانند استرالیا، چین، ویتنام،

نشده است، اما معرفی و توصیه به کاربرد این روش توسط افراد و نهادهای مختلف انجام شده است. به صورت آزمایشی نیز تعدادی نهال وتیور برای تثبیت رودخانه‌های استان خوزستان کشت شده است. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی میدانی میزان تأثیر و کارایی گیاه علف وتیور در تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک و کاهش فرسایش سواحل رودخانه‌ها صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده در شمال غرب شهرستان شیراز و در فاصله ۷۰ کیلومتری غرب شهرستان مرودشت در استان فارس واقع شده است. این بخش در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و در محدوده عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۶ دقیقه شرقی قرار دارد. این منطقه شامل قسمتی از طرح سامان‌دهی و تعیین حریم و بستر رودخانه کر به طول ۲۵ کیلومتر است که مطالعات آن در سال ۱۳۸۸ صورت گرفت.

در مطالعات هواشناسی و هیدرولوژی، ایستگاه چمریز از نظر موقعیت جغرافیایی مناسب و نزدیک بودن به محدوده مطالعه شده، به عنوان ایستگاه معرف منطقه انتخاب شد. بر این اساس، متوسط بارش منطقه برابر ۴۹۶/۴ میلی‌متر و متوسط کمترین، متوسط و متوسط بیشترین دما در ایستگاه شاخص چمریز ۶/۴، ۱۴/۷ و ۲۳ درجه سانتی‌گراد است که معرف دمای محدوده طرح به حساب می‌آید. همچنین، متوسط تعداد روزهای یخبندان در منطقه ۲۵ روز در سال و متوسط رطوبت نسبی در ایستگاه چمریز، که معرف منطقه طرح به حساب می‌آید، ۵۲/۶ درصد است. جهت غالب وزش باد در منطقه شمال غرب بوده و بیشترین فراوانی سرعت باد بعد از بادهای آرام، باد با سرعت ۷/۴ - ۱۱/۱ کیلومتر در ساعت (۴ - ۶ نات) است. میانگین سالانه ساعات آفتابی برابر با ۳۳۳/۳ ساعت، متوسط کمترین ساعات آفتابی معادل ۶/۳ ساعت در روز در دی‌ماه و بیشترین حد آن برابر ۱۱/۸ ساعت در روز در خردادماه گزارش شده است. تبخیر از سطح آزاد برای منطقه طرح ۱۳۷۳/۹ میلی‌متر در سال برآورد شده است. درخور یادآوری است که با توجه به ساخت سد ملاصدرا روی رودخانه کر در بالادست منطقه طرح حاضر، جریان کنترل شده‌ای در رودخانه و در حد فاصل سدهای ملاصدرا و

هندوستان، فیلیپین، مالزی، هلند و ایالات متحده آمریکا ترویج شده است. علف وتیور سیستم ریشه‌ای انبوه، توده‌ای، عمیق و سریع‌الرشدی دارد که می‌تواند تا عمق بیش از سه متر رشد کند و استحکام کششی ریشه‌های این گیاه به طور متوسط ۷۵ مگاپاسکال است [۱۸]. نام لاتین علف وتیور *Vetiveria zizanioides* است که به معنای ساحل رودخانه است. بنابراین، از نخستین کاربردهای علف وتیور که توسط انسان کشف شده، حفاظت کناره‌های رودخانه‌هاست. ترکیب سیستم ریشه‌ای عمیق و شاخساره‌های ضخیم علف وتیور، به حفاظت سواحل رودخانه‌ها و آبراهه‌ها در مقابل شرایط سیلابی منجر می‌شود [۱۹]. ریشه‌های عمیق علف وتیور از شسته شدن دیواره‌ها جلوگیری می‌کند و در عین حال، شاخساره‌های گیاه سرعت جریان را کاهش داده و مقاومت کناره‌ها را در مقابل فرسایش افزایش می‌دهند. بیشترین مزیت علف وتیور نسبت به روش‌های قدیمی، حفاظت سواحل از قبیل سنگ‌چین صرفه‌جویی اقتصادی آن است. به طور مثال، در یک طرح افزایش پایداری شیب در کشور چین با استفاده از علف وتیور حدود ۸۵ - ۹۰ درصد در هزینه‌ها صرفه‌جویی شده است [۲۰ و ۲۱].

Ke و همکارانش با مطالعه روی علف وتیور در نواحی نزدیک دریا گزارش کرده‌اند که این گیاه می‌تواند در خاک‌های شور و حتی اسیدی نیز رشد کند [۲۲]. در پژوهشی که با متقاعد کردن هتل‌دارانی که در سال‌های متوالی هزینه‌های زیادی را برای حفاظت سواحل با استفاده از روش‌های سازه‌ای متحمل شده بودند، مشخص شد که با استفاده از علف وتیور می‌توان سواحل فرسایش‌پذیر را تثبیت کرد [۲۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد مقاومت کششی ریشه‌های علف وتیور با کاهش قطر ریشه افزایش می‌یابد [۲۴]. به بیانی دیگر، ریشه‌های نازک‌تر مقاومت بیشتری نسبت به ریشه‌های ضخیم‌تر دارند. همچنین، علف وتیورهایی که در ساحل رودخانه یوجیانگ^۱ کشت شده بودند به رغم اینکه ۱/۵ تا دو ماه پس از کشت با یک سیلاب شدید با سرعت دو متر بر ثانیه مواجه شدند، به گونه مؤثری از فرسایش رودخانه جلوگیری کردند [۲۲]. در کشور ایران تا کنون تحقیق گزارش شده‌ای در زمینه کاربرد عملی علف وتیور ارائه

تنانت^۱ موسوم است، محاسبه شد [۲۶]. در این روش ابتدا ریشه‌ها روی یک صفحه کاغذ بزرگ با شبکه‌های مربعی به ابعاد یک سانتی‌متر پخش می‌شوند. سپس، یک صفحه شیشه‌ای روی کاغذ قرار می‌گیرد و تعداد محل‌های تقاطع ریشه‌ها با خطوط افقی و عمودی شمارش می‌شوند. با توجه به اینکه ابعاد هر مربع یک سانتی‌متر است، اگر تعداد محل‌های تقاطع در کسر $\frac{11}{14}$ ضرب شود، طول ریشه بر حسب سانتی‌متر به دست می‌آید. با توجه به قطر کم ریشه‌های علف وتیور و به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری قطر ریشه‌ها، از روش پردازش تصویر دیجیتال استفاده شد. به این ترتیب که پس از اندازه‌گیری طول ریشه‌ها به روش تنانت، با استفاده از دوربین دیجیتال به تصویربرداری از ریشه‌ها اقدام شد. سپس، تصاویر دیجیتال به نرم‌افزار گرافر منتقل شده و با کمک گرفتن از شبکه مربعی موجود، تصاویر روی کاغذ شطرنجی رقمی‌سازی شدند. بنابراین، قطر ریشه گیاه در قسمت‌های مختلف و همچنین در اعماق مختلف محاسبه شد.

به منظور بررسی توسعه عرضی ریشه، مقدار طول ریشه بر حسب درصد در فواصل مختلف نسبت به مرکز گیاه برای تراکم‌های مختلف در شکل ۱ ترسیم شده است. بر این اساس، بیش از ۵۰ درصد از ریشه‌ها در فاصله پنج سانتی‌متری از مرکز گیاه واقع می‌شود. همچنین در تراکم زیاد، به علت رقابتی که برای گیاهان مجاور به وجود می‌آید، توسعه جانبی ریشه محدود می‌شود و ریشه به مرکز گیاه نزدیک‌تر می‌شود. بررسی توزیع عرضی ریشه نشان داد بخش عمده ریشه‌ها در دایره‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر، که گیاه در مرکز آن قرار می‌گیرد، توزیع شده‌اند. بنابراین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که به منظور به‌دست‌آوردن نتیجه مناسب و مسلح‌شدن کل خاک با ریشه‌ها، فاصله بین بوته‌های مجاور باید حدود ۳۰ سانتی‌متر باشد. همچنین، بررسی توزیع ریشه در عرض و عمق خاک برای سه تراکم بوته استفاده شده نشان داد در محدوده داده‌های تحقیق حاضر، تراکم بوته‌ها تأثیر چندانی در پارامترهای مقاومت برشی خاک ندارند. البته، این نتایج مربوط به قسمت‌هایی از زمین است که در زیر بوته علف وتیور واقع شده‌اند و در خارج از این محدوده، ریشه‌ها تأثیری بر مقاوم‌سازی خاک ندارند. بنابراین، رعایت فاصله توصیه‌شده (۳۰ سانتی‌متر) بین بوته‌ها ضروری است.

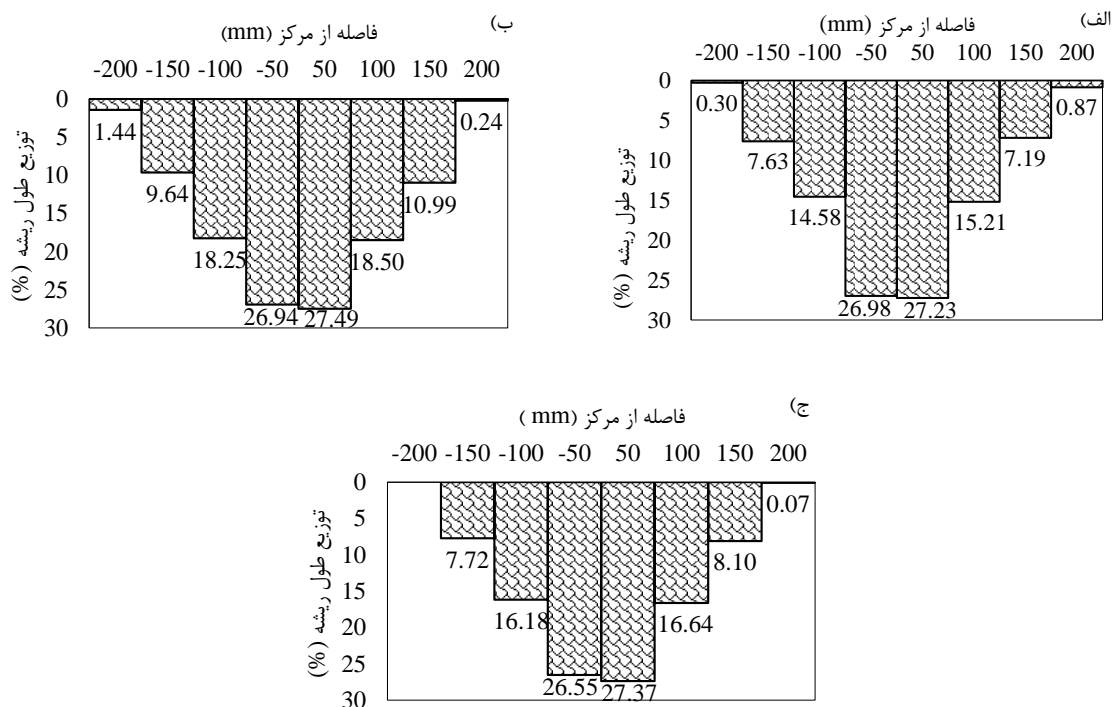
دردوزن برقرار است. البته در این مسیر، چندین زهکش و نیز سرشاخه‌های مائین و سیوند نیز به آن می‌پیوندند. بر این اساس، دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله در محل تنگ بستانک ۳۶۱ مترمکعب بر ثانیه و تا پل عباس‌آباد برابر ۴۰۷ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است.

کاهش شیب رودخانه از ابتدای منطقه مطالعه‌شده به سمت سد دردوزن، سبب نهشته‌شدن انواع رسوبات ریزدانه شده است، به طوری که با نزدیک‌تر شدن به دریاچه بر میزان مواد رسوبی ریزدانه رودخانه افزوده می‌شود. رسوبات سواحل رودخانه نیز در قسمت‌های پایین‌تر قله‌های درشت دارد که در قسمت‌های بالاتر، بر مواد ریزدانه آنها افزوده می‌شود. وجود رسوبات ریزدانه سطحی و غنی، از دیدگاه کشاورزی حاشیه رودخانه کر را در این قسمت به یکی از قطب‌های مهم شالیکاری در منطقه یادشده تبدیل کرده است. با توجه به فرسایش‌پذیری شدید سازنده‌های اطراف رودخانه، زمین‌های کشاورزی که در سیلاب‌دشت‌ها و تراس‌های آبرفتی حاشیه رودخانه قرار دارند، دچار تخریب‌های جدی شده‌اند. این شرایط سبب شده است که رودخانه کر در محدوده مطالعه‌شده از نظر فرسایش کناری و تخریب اراضی کشاورزی حاشیه‌ای، حساس‌ترین بازه را به خود اختصاص دهد [۲۵].

به منظور کاشت گیاه از پاجوش‌های علف وتیور استفاده شد. برای این کار پاجوش‌های علف وتیور یک‌ساله، از ساقه اصلی بوته مادری جدا شده و پس از ضدعفونی توسط محلول قارچ‌کش درون چاله‌های حفرشده، کاشته شد. به منظور بررسی تغییرات رشد شاخساره‌ای، ارتفاع گیاه به صورت هفتگی به وسیله خط‌کش اندازه‌گیری و ثبت می‌شد تا روند رشد و توسعه شاخساره‌ای گیاه ادامه یابد. همچنین، به منظور مقایسه بین بررسی آزمایشگاهی و میدانی، تعداد گیاه علف وتیور در گلدان کشت شد. از یک استوانه فلزی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر برای تهیه نمونه دست‌نخورده از خاک استفاده شد. اندازه‌گیری پارامترهای مقاومت برشی خاک با استفاده از دستگاه برش مستقیم صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

به منظور بررسی ساختار ریشه علف وتیور، نمونه‌های خاک محتوی ریشه با استفاده از آب شسته شده و خاک از ریشه‌ها جدا شد. طول ریشه‌ها به روش جداکردن خطی، که به روش



شکل ۱. توزیع ریشه علف و تیور بر حسب فاصله از مرکز گیاه
الف) تراکم کم؛ ب) تراکم متوسط و ج) تراکم زیاد

در شکل ۲-الف و ۲-ب به ترتیب تغییرات پارامترهای RAR و RDR در اعماق مختلف و برای تراکم‌های مختلف گیاه علف و تیور نشان داده شده است. مقدار این پارامترها در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری از سطح زمین اندازه‌گیری شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که در نزدیکی سطح زمین، مقدار RAR حداکثر بوده و با افزایش عمق، مقدار RAR روند کاهشی را دنبال می‌کند. همچنین، RAR مستقل از تراکم گیاه است و برای هر سه تراکم بررسی شده در تحقیق حاضر، تفاوت معناداری بین مقادیر مربوط به تراکم‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. به خلاف شکل ۲-ب که با افزایش عمق مقدار RAR کاهش می‌یابد، در شکل ۲-الف چنین مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از سطح زمین، مقدار RDR روند افزایشی دنبال می‌کند. همچنین، تراکم بوته نیز مؤثر بوده و مقدار RDR برای شرایطی که تراکم بوته کم است، در مقایسه با تراکم متوسط و زیاد، کمتر است. همچنین، تغییرات پارامتر $RDDI$ و RLD در اعماق مختلف در شکل‌های ۲-ج و ۲-د نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تأثیر تراکم بوته در نزدیکی سطح زمین درخور توجه است ولی با افزایش عمق، مقادیر $RDDI$ مربوط به

برخی از محققان مقاومت برشی خاک را به شاخص‌هایی همانند شاخص نسبت قطر ریشه^۱ (RDR)، شاخص نسبت مساحت ریشه^۲ (RAR)، شاخص تراکم و قطر ریشه^۳ ($RDDI$) و شاخص تراکم طول ریشه^۴ (RLD)، که به صورت روابط ۱-۴ تعریف می‌شوند، مرتبط دانسته‌اند [۲۷ و ۲۸]:

$$RDR = \frac{d_{50}}{d_{max}} \times 100 \quad (1)$$

$$RAR = \frac{A_{root}}{A_{sample}} \times 100 \quad (2)$$

$$RDDI = RAR \times RDR \quad (3)$$

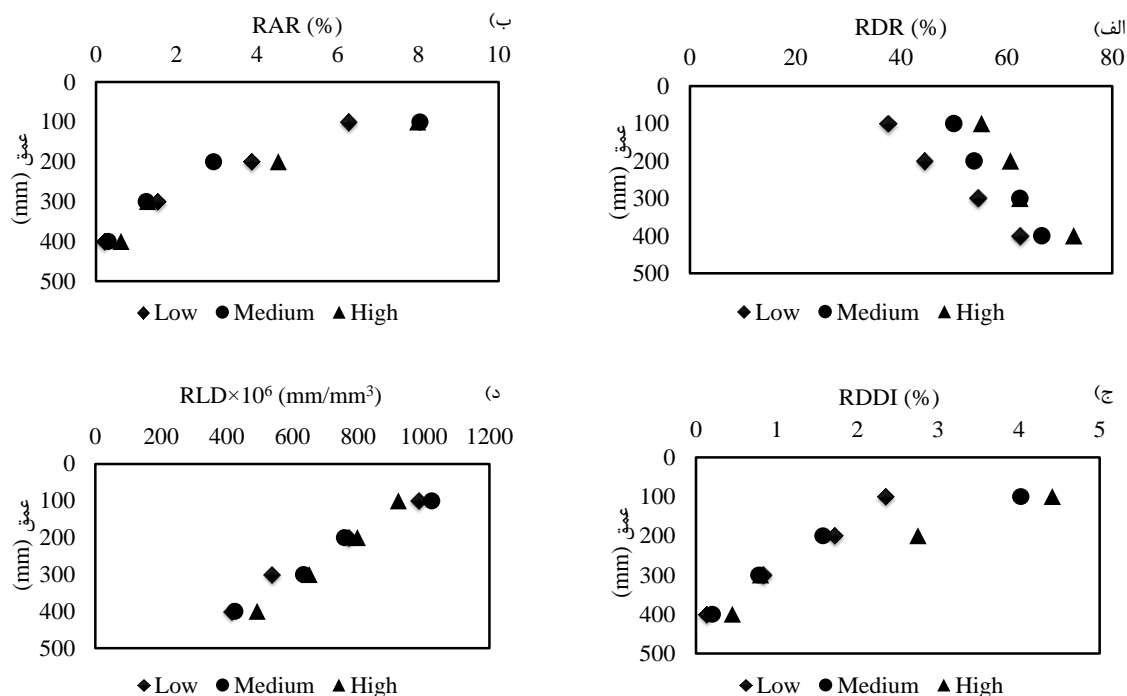
$$RLD = \frac{L_{root}}{V_{sample}} \times 100 \quad (4)$$

در روابط یادشده d_{50} ، d_{max} ، A_{root} ، A_{sample} و L_{root} به ترتیب قطر میانگین ریشه‌ها، بیشترین قطر ریشه‌ها، سطح مقطع ریشه‌ها، طول ریشه‌ها و حجم ریشه‌هاست.

1. Root Diameter Ratio
2. Root Area Ratio
3. Root Diameter and Density Index
4. Root Length Density

سخت در منطقه مطالعه شده، منطقی به نظر می‌رسد. در ادامه، ارتباط بین پارامترهای RAR ، RDR ، $RDDI$ و RLD مقاومت برشی خاک بررسی می‌شود.

تراکم‌های مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شود. همچنین، با افزایش عمق از میزان طول ریشه در حجم خاک (RLD) کاسته می‌شود که این امر با توجه به وجود لایه‌های نسبتاً



شکل ۲. تغییرات پارامترهای الف) RAR ، ب) RDR ، ج) $RDDI$ و د) RLD در عمق و برای تراکم‌های مختلف گیاه علف و تیور

در این روابط، اندیس‌های i و f به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مربوط به حالت بدون ریشه گیاه و با ریشه گیاه علف و تیور است.

بر اساس جدول ۱، ملاحظه می‌شود که گیاه علف و تیور با تراکم کم سبب افزایش بیش از ۱۰۴ درصدی چسبندگی و حدود ۸۳ درصدی زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با حالت بدون ریشه شده است. همچنین، با افزایش تراکم گیاه، تأثیر ریشه گیاه بر پارامترهای مقاومت برشی کاهش یافته است. نکته درخور توجه دیگری که در جدول ۱ مشاهده می‌شود آن است که بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، مقدار چسبندگی خاک بر اثر حضور ریشه گیاه علف و تیور بیش از پنج برابر افزایش یافته است. این در حالی است که زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز به میزان ۷/۵۴ درصد افزایش یافته است.

پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس نمودار تغییرات تنش برشی در برابر تنش نرمال برای هر یک از آزمایش‌ها و بر اساس رابطه ۵ محاسبه شده‌اند:

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

که در این رابطه، τ تنش برشی خاک، C چسبندگی خاک، σ تنش قائم و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک است. به منظور بررسی تأثیر ریشه گیاه علف و تیور بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، پارامترهای ΔC و $\Delta \varphi$ که به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات زاویه ایستایی و چسبندگی هستند، به صورت روابط ۶ و ۷ تعریف شده‌اند:

$$\Delta \varphi = \frac{\varphi_f - \varphi_i}{\varphi_i} \times 100 \quad (6)$$

$$\Delta C = \frac{C_f - C_i}{C_i} \times 100 \quad (7)$$

جدول ۱. مقادیر میانگین پارامترهای C و ϕ در تیمارهای مختلف و تغییرات آنها در مقایسه با تیمار شاهد

وضعیت پوشش گیاهی	نماد	$\bar{\phi}$	\bar{C}	$\Delta\bar{\phi}(\%)$	$\Delta\bar{C}(\%)$
بدون گیاه	N	۲۱/۹۶	۰/۱۱	-	-
تراکم کم	L	۴۰/۱۸	۰/۲۲	۸۲/۹۲	۱۰۴
تراکم متوسط	M	۳۸/۹۲	۰/۲۲	۷۷/۱۹	۱۰۳
تراکم زیاد	H	۳۸/۴۳	۰/۲۱	۷۴/۹۵	۹۸

است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش شاخص RAR چسبندگی خاک افزایش می‌یابد. علت آن است که با افزایش RAR مساحت ریشه‌ها در واحد سطح نیز افزایش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش تعداد ریشه‌ها در واحد سطح است. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر، رابطه ۹ برای محاسبه چسبندگی خاک بر حسب RAR استخراج شده است:

$$C = 0.007RAR + 0.211 \quad (9)$$

در این رابطه RAR بر حسب درصد و C بر حسب kg/cm^2 است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.91$ است. همچنین، در شکل ۳-ج تغییرات C در برابر شاخص تراکم و قطر ریشه ($RDDI$) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش $RDDI$ مقدار چسبندگی خاک نیز افزایش می‌یابد. رابطه ۱۰ بر اساس رگرسیون بین داده‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه C بر حسب $RDDI$ ارائه شده است:

$$C = 0.014RDDI + 0.211 \quad (10)$$

در این رابطه $RDDI$ بر حسب درصد و C بر حسب kg/cm^2 است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.83$ است. تغییرات چسبندگی خاک در برابر شاخص تراکم طول ریشه (RLD) در شکل ۳-د نشان داده شده است. با توجه به این شکل نیز مشاهده می‌شود که با افزایش شاخص RLD مقدار چسبندگی خاک نیز افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر، رابطه ۱۱ برای محاسبه چسبندگی خاک بر حسب RLD استخراج شده است:

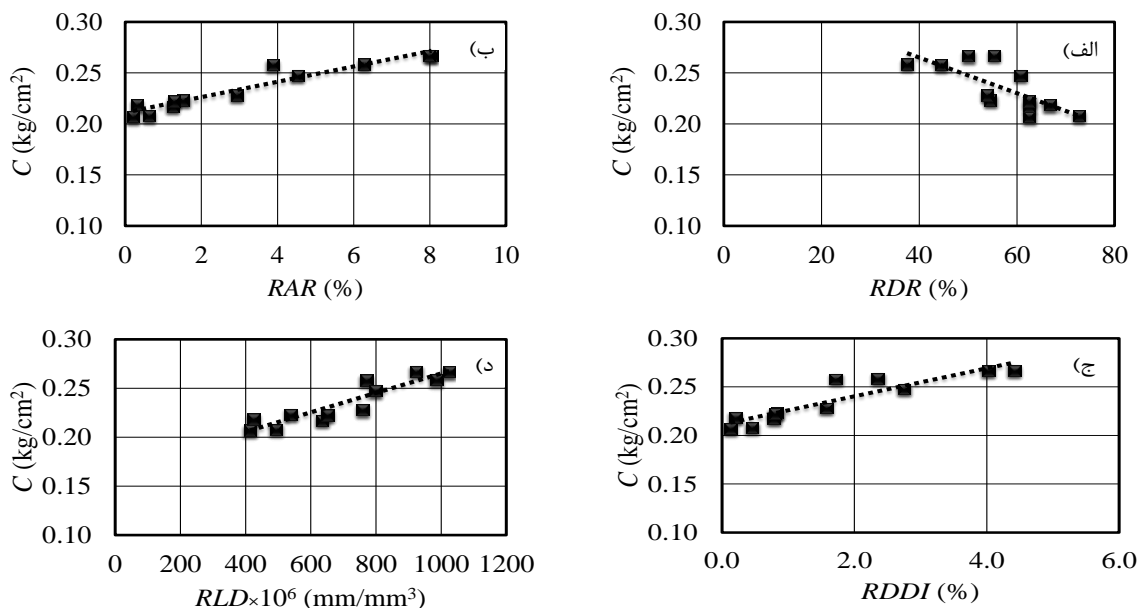
$$C = 0.994RLD + 0.165 \quad (11)$$

در این رابطه RLD بر حسب $1/cm^2$ و C بر حسب kg/cm^2 است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.84$ است.

همان طور که پیش از این گفته شد، در بسیاری از تحقیقات گذشته، پارامترهای مقاومت برشی خاک به RAR ، RDR و پارامترهایی از این نوع ارتباط داده شده‌اند. در شکل ۳-الف تغییرات پارامتر چسبندگی خاک در برابر نسبت قطر ریشه (RDR) ترسیم شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش پارامتر RDR ، مقدار چسبندگی خاک کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۱۱ ملاحظه می‌شود که با کاهش RDR ، مقدار قطر متوسط ریشه‌ها (d_{50}) کاهش یافته و در واقع ریشه‌ها باریک‌تر می‌شوند. اگرچه انتظار می‌رود که با افزایش قطر ریشه‌ها و متعاقب آن افزایش RDR ، کارکرد ریشه‌ها در پایدارسازی خاک بیشتر شود، روندی که در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود با آنچه مورد انتظار است، تفاوت دارد. علت را می‌توان در رابطه بین مقاومت کششی ریشه و قطر متوسط ریشه‌ها جست‌وجو کرد. بر اساس نتایج تحقیقات پیشین، با افزایش قطر متوسط ریشه‌ها، مقدار مقاومت کششی ریشه‌ها کاهش می‌یابد [۲۲]. بنابراین، علت کاهش پارامتر C با افزایش RDR را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش قطر متوسط ریشه‌ها، مقدار مقاومت کششی کاهش می‌یابد و در نتیجه ریشه‌های باریک‌تر کارکرد بیشتری در مسلح‌سازی خاک دارند. این نتایج با پژوهش قبلی، که کاهش چسبندگی خاک با افزایش قطر ریشه گیاه را مشاهده کردند، مطابقت دارد [۲۹ و ۳۰]. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، رابطه ۸ برای محاسبه چسبندگی خاک بر حسب RDR ارائه شده است:

$$C = -0.001RDR + 0.335 \quad (8)$$

در این رابطه RDR بر حسب درصد و C بر حسب kg/cm^2 است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.56$ است. در شکل ۳-ب تغییرات پارامتر چسبندگی خاک (C) در برابر شاخص نسبت مساحت ریشه (RAR) نشان داده شده



شکل ۳. تغییرات پارامتر چسبندگی خاک در برابر الف) RAR ، ب) RDR ، ج) $RDDI$ و د) RLD

در این رابطه RAR بر حسب درصد و ϕ بر حسب درجه است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.49$ است. همچنین، در شکل ۴-ج تغییرات ϕ در برابر شاخص تراکم و قطر ریشه ($RDDI$) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش $RDDI$ مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز افزایش می‌یابد. رابطه ۱۴ بر اساس رگرسیون بین داده‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه ϕ بر حسب $RDDI$ ارائه شده است:

$$\phi = 0.1864 RDDI + 37 / 5 \quad (14)$$

در این رابطه $RDDI$ بر حسب درصد و ϕ بر حسب درجه است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.44$ است. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک در برابر شاخص تراکم طول ریشه (RLD) در شکل ۴-د نشان داده شده است. با توجه به این شکل نیز مشاهده می‌شود که با افزایش شاخص RLD مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر، رابطه ۱۵ برای محاسبه ϕ بر حسب RLD استخراج شده است:

$$\phi = 60 / 73 RLD + 34 / 69 \quad (15)$$

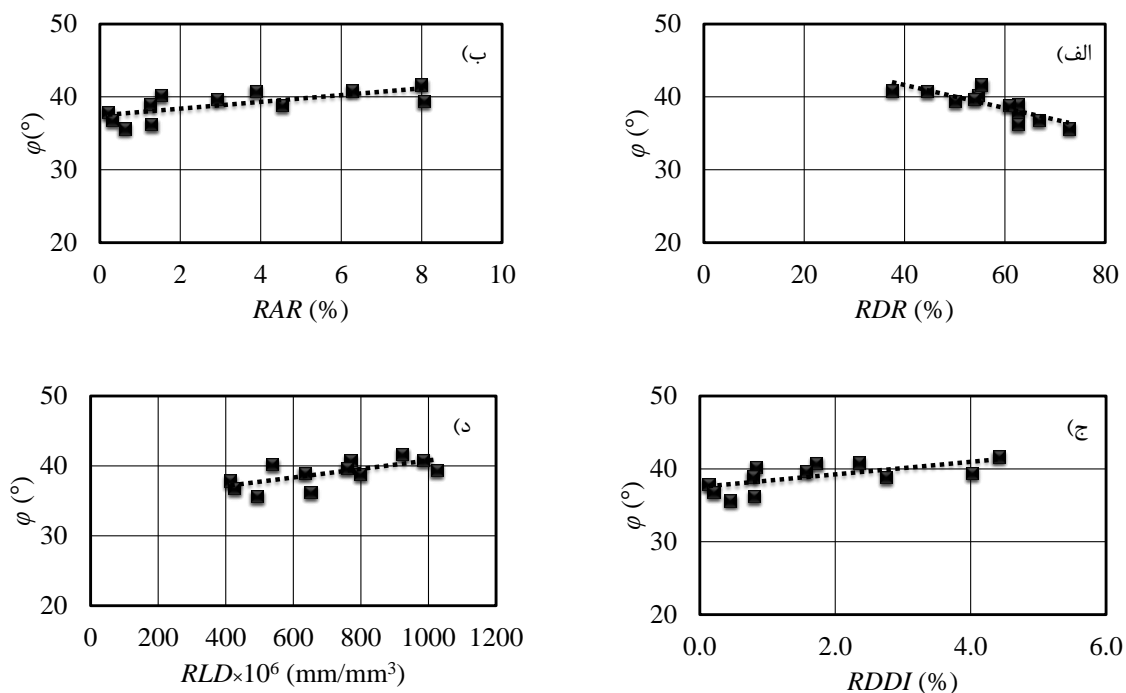
در این رابطه RLD بر حسب $1/cm^2$ و ϕ بر حسب درجه است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.43$ است.

در شکل ۴-الف تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) در برابر شاخص نسبت قطر ریشه (RDR) ترسیم شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش پارامتر RDR ، مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد. همان‌طور که گفته شد، علت آن است که با افزایش RDR ، که با افزایش قطر متوسط ریشه‌ها همراه است، مقاومت کششی ریشه‌ها نیز کاهش یافته و به تبع آن تأثیر ریشه علف و تیور در پایدارسازی خاک کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، رابطه ۱۲ برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی خاک بر حسب RDR ارائه شده است:

$$\phi = -0.158 RDR + 47 / 99 \quad (12)$$

در این رابطه RDR بر حسب درصد و ϕ بر حسب درجه است. ضریب همبستگی این رابطه $R^2=0.65$ است. در شکل ۴-ب تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) در برابر شاخص نسبت مساحت ریشه (RAR) نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش شاخص RAR ، زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر، رابطه ۱۳ برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی خاک بر حسب RAR استخراج شده است:

$$\phi = 0.465 RAR + 37 / 44 \quad (13)$$



شکل ۴. تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک در برابر الف) RAR ، ب) RDR ، ج) $RDDI$ و د) RLD

بزرگ، می‌توانند نیروی باد را دریافت کرده و از طریق تنه و ریشه‌ها به خاک منتقل کنند که این مسئله می‌تواند به کاهش پایداری خاک در برابر لغزش منجر شود. این در حالی است که علف و تیور در مقایسه با درختان، ارتفاع چندانی ندارد و به دلیل انعطاف‌پذیری ساقه‌ها و برگ‌ها، می‌تواند بادهای نسبتاً شدید را تحمل کند بدون آنکه نیروی زیادی به خاک منتقل شود. از طرف دیگر، درختان به دلیل داشتن ریشه اصلی، که در مقایسه با ریشه‌های فرعی قطر بزرگ‌تری دارند، می‌توانند سبب ایجاد درز و شکاف در خاک شوند و پتانسیل خاک در برابر لغزش را افزایش دهند. اما گیاه علف و تیور با داشتن ریشه‌های نازک که در خاک پخش می‌شوند مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد و در نتیجه خاک را در برابر لغزش پایدارتر می‌کند. بنابراین، با توجه به موارد یادشده، ملاحظه می‌شود که گیاه علف و تیور در مقایسه با سایر گونه‌های گیاهی متداول مناسب‌تر است و می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای محافظت سواحل رودخانه در برابر فرسایش استفاده شود.

در جدول ۲ مقایسه‌ای بین گیاه علف و تیور و برخی گیاهان دیگر انجام شده است. بر اساس جدول ۲ ملاحظه می‌شود که گیاه علف و تیور با داشتن ریشه‌های ریزتر نسبت به سایر گیاهان، مقاومت کششی زیادی را از طریق ریشه‌ها ایجاد می‌کند. همچنین، از لحاظ مدت زمان مورد نیاز برای استقرار گیاه، علف و تیور پس از گذشت دو ماه از زمان کاشت، می‌تواند به خوبی از خاک در برابر فرسایش محافظت کند. از طرفی، با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، که گاه خشکسالی‌های غیرمنتظره‌ای را تجربه می‌کند، گیاه علف و تیور در مقایسه با اغلب گونه‌های دیگر، در برابر خشکسالی مقاوم‌تر است و پس از استقرار، گیاه می‌تواند دوره‌های طولانی خشکسالی را تحمل کند. از دیگر ویژگی‌های منحصربه‌فرد علف و تیور می‌توان به مقاومت آن در برابر آتش‌سوزی و سایر بلایای طبیعی اشاره کرد که می‌تواند به سرعت و به صورت خودرو ترمیم شود.

از دیگر نکات مهم در مقایسه بین علف و تیور و درختان یادشده آن است که درختان به دلیل داشتن جثه

جدول ۲. مقایسه گونه‌های مختلف گیاهی با گیاه علف وتیور*

نام گیاه	نام لاتین	قطر متوسط ریشه (mm)	مقاومت کششی ریشه (MPa)	مدت زمان لازم برای استقرار (ماه)	مقاومت در برابر خشکسالی	قابلیت خودترمیمی
علف وتیور	vetivergrass	۰/۶۶	۸۵/۱۰	۲	زیاد	زیاد
بید	willow	۳	۱۰/۳۳	۱۸	کم	متوسط
صنوبر	spruce	۱	۲۸	۲۴	کم	کم
چنار	sycamore	۳/۵	۲۶	۲۴	کم	کم
گز	tamarix	۱۴	۴-۳۰/۲	۳۶	زیاد	متوسط
افرا	maple	۳	۸-۳۰	۲۴	متوسط	کم
توسکا	alnus subcordata	۲/۵	۱۶-۲۰	۲۴	کم	کم
اکالیپتوس	eucalyptus	۲	۲۹/۷۳	۲۴	زیاد	متوسط
زرشک	barberry	۲	۰	۲۴	متوسط	متوسط
تمشک	raspberry	۱/۵	۰	۱۸	کم	کم

*اطلاعات جدول از منابع [۵] و [۳۱-۳۴] به دست آمده است. †در مورد مقاومت کششی این گونه‌ها اطلاعاتی در منابع در دسترس یافت نشد.

نتیجه‌گیری

همبستگی را نشان داد. در پایان نیز مقایسه‌ای بین گیاه علف وتیور و سایر گونه‌های گیاهی بومی منطقه، که تا کنون به منظور ساماندهی رودخانه به کار رفته‌اند، صورت پذیرفت و از جنبه‌های مختلف از جمله مقاومت در برابر خشکسالی، مدت زمان لازم برای استقرار، مقاومت کششی ریشه‌ها و مقاومت در برابر آتش‌سوزی و سایر بلاهای طبیعی، گیاه علف وتیور در مقایسه با سایر گونه‌های گیاهی متداول مناسب‌تر است و می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای محافظت سواحل رودخانه در برابر فرسایش استفاده شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، تأثیر ریشه علف وتیور بر مقاوم‌سازی خاک‌های با بافت‌های مختلف بررسی شود.

تشکر و قدردانی

از حمایت‌های سازمان آب منطقه‌ای فارس در انجام این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- [1].Dang MH, Umeda S, Yuhi M. Long-term riverbed response of lower Tedori River, Japan, to sediment extraction and dam construction. *Environmental Earth Sciences*, 2014; 72(8): 2971-2983.
- [2].Balaban SI, Hudson-Edwards KA, Miller JR. A GIS-based method for evaluating sediment storage and transport in large mining-affected river systems. *Environmental Earth Sciences*, 2015; 74(6): 4685-4698.

در پژوهش حاضر، تأثیر ریشه‌های گیاه علف وتیور بر پارامترهای مقاومت برشی خاک در حاشیه رودخانه کر بررسی شد. بررسی‌ها به صورت میدانی انجام شد. پس از تهیه نمونه‌های دست‌نخورده، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و توسط دستگاه برش مستقیم بررسی شدند. پارامترهای هواشناسی و اقلیمی در منطقه مطالعه‌شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های مجاور، نشان دادند از لحاظ اقلیمی شرایط برای استقرار گیاه علف وتیور فراهم است. نتایج نشان داد به منظور حصول نتیجه مناسب و مسلح‌شدن کل خاک با ریشه‌ها، فاصله بین بوته‌های مجاور باید حدود ۳۰ سانتی‌متر باشد. همچنین، بررسی توزیع ریشه در عرض و عمق خاک برای سه تراکم بوته استفاده شده نشان داد در محدوده داده‌های تحقیق حاضر، تراکم بوته‌ها تأثیر چندانی در پارامترهای مقاومت برشی خاک ندارند. به طور کلی، در حضور ریشه گیاه علف وتیور، مقادیر پارامترهای زاویه اصطکاک ایستایی و چسبندگی افزایش معناداری را تجربه می‌کنند. گیاه علف وتیور سبب افزایش بیش از ۱۰۴ درصدی چسبندگی و حدود ۸۳ درصدی زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با حالت بدون ریشه شده است. همچنین، شاخص RAR بیشترین ضریب همبستگی و شاخص RDR کمترین ضریب همبستگی را در محاسبه مقدار چسبندگی خاک دارد. در محاسبه مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز از بین شاخص‌های مطالعه شده، شاخص RDR بیشترین ضریب

- [3]. Ahmadian-Yazdi M. Effect of vegetation on Tajan-Harirood meander bank erosion. MSc. Thesis, 2000; Gorgan University of Agriculture and Natural Resources. [Persian]
- [4]. Samadi A, and Amiri-Tokaldani E. River bank mass erosion: Process and Mechanism, University of Tehran Press; 2015. p. 504.
- [5]. Shirdeli A, Shafai-Bajestan M, Ciacar H. Investigation of the effects of tamarisk and tamarisk aphyllaroots on the stability of seistan river banks. 7th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, 2007; 13-15 Feb 2007, Ahwaz [Persian]
- [6]. Lin D, Liu W, Lin S. Estimating the effect of shear strength increment due to root on the stability of makino bamboo forest slopeland, *Journal of GeoEngineering*, 2011; 6(2): 73-88
- [7]. Dumlao MR, Ramanarivo S, Goyal V, DeJong JT, Waller J, Silk WK. The role of root development of *Avena fatua* in conferring soil strength. *American journal of botany*, 2015; 102(7): 1050-1060.
- [8]. Ghestem M, Veylon G, Bernard A, Vanel Q, Stokes A. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant and soil*, 2014; 377(1-2), 43-61.
- [9]. Islam MS. Application of Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) as a bio-technical slope protection measure—some success stories in Bangladesh. *Proceedings of the 6th International Conference on Vetiver*, 2015; 5-8 May, Danang City, Vietnam.
- [10]. Abdullah MN, and Osman N. Soil-root Shear Strength Properties of Some Slope Plants. *Sains Malaysiana*, 2011; 40(10): 1065–1073
- [11]. Genet M, Stokes A, Fourcoud T, Norris JE. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. *Ecological Engineering*, 2010; 36: 265-275.
- [12]. Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, Lehmann P, Or D. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering* 2010; 36: 285-291.
- [13]. Ebrahimi N, Shirdeli A, Nik-khah-Javan E, Hossein M. Effects of river bed vegetation on flow hydraulics and bed forms. *Journal of Watershed Management and Engineering*, 2015; 8(2): 182-192. [Persian]
- [14]. Hemphill RW, Bramley ME. Protection of river and canal banks. CIRIA, Butter Worths, London; 1989.
- [15]. Shafaei-Bajestan M, Salimi M. Effects of tamaricaceae and popoluse roots on in situ soil shear strength of Karoon river banks. *Journal of Agriculture and Natural Resources Science and Technology*, 2002; 6(4): 27-40. [Persian]
- [16]. Shirdeli A. Study of bioengineering methods for river bank stabilization, *Journal of Watershed Science and Engineering*, 2012; 7(23): 53-62. [Persian]
- [17]. Dastoorani M, Rajabi-Mohammadi F. Study of mechanical and hydrological effects of river bank vegetation on bank stability, Case Study: Hana River, 3rd National Seminar on water resources management, University of Agriculture and Natural Resources Science, 2011; 10-12 September, Sari, Iran. [Persian]
- [18]. Troung P, Van T, Pinners E. Vetiver system applications (Technical Reference). 2008.
- [19]. Niknejad D. Biological control of river bank erosion by Vetivergrass. 11th National Seminar on Irrigation and Vapor reduction. Kerman, Shahid Bahonar University, 2010; 8-10 February, Kerman, Iran. [Persian]
- [20]. Xie FX. Vetiver for highway stabilization in Jian Young country: demonstration and extension. In; proceedings of the Interventional vetiver workshop, Fuzhow, China; 1997.
- [21]. Xia HP, Ao HX, Liu SZ, He DQ. Application of the Vetiver grass bioengineering technology for the prevention of highway slippage in southern China. *Proc. Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization*, Manila, Philippines April 1999.
- [22]. Ke C, Feng Z, Wu X, Tu F. Design Principles and Engineering Samples of Applying Vetiver Eco-engineering Technology for Steep Slope and River Bank Stabilisation. In *Proceedings of the Third International Vetiver Conference (ICV3)*, 2003; *Guangzhou, China*.
- [23]. Sy M. The vetiver: from nursery to the protection of infrastructures. *Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition*, 2003; *Guangzhou, China*.
- [24]. Hengchaovanich D, and Nilaweera NS. An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization. In *International Conference on Vetiver*, 1996; *Chain Kai, Thailand*.
- [25]. Sangab-Zagros consulting Engineers. Evaluation report of geology and morphology of the Kor river. Fars Regional Water Organization; 2008. [Persian]
- [26]. Shirani H, Haj-Abbasi M, Afyooni M, Hemmat E. Effect of tillage and manure on

- maize root morphology. *Soil and Water Journal*, 2008; 23(1): 101-107. [Persian]
- [27]. Davoudi M, Fatemi-Aqda M. Effect of Diameter and Density of Willow Roots on Shear Resistance of Soils, *Geosciences*, 2008; 71: 143-148. [Persian]
- [28]. Shariata Jafari M, Davoudi M, Safaei M and Partoi A. Investigating the effect of Diospyros lotus root system in soil reinforcement using RDR and RDDI indices. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2014; 6(2): 107-114. [Persian]
- [29]. Davoudi M, Fatemi-Aqda M, Noroozi H, Shah-Alipoor GH. Effect of tree root diameter on soil shear strength, 4th seminar on engineering geology and environment, 2004; 24-26 February, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [Persian]
- [30]. Vannoppen, W., Poesen, J., De Baets, S., Vanmaercke, M., Peeters, P., & Vandevorode, B. Effectiveness of plant roots in controlling rill and gully erosion: A case study on vegetation communities on river dikes. In Proceedings of the 4th International Conference on Soil Bio- and Eco-Engineering, 11-14 July 2016, Sydney, Australia.
- [31]. Day SD, Seiler JR, Persaud N. A comparison of root growth dynamics of silver maple and flowering dogwood in compacted soil at differing soil water contents. *Tree Physiology*, 2000; 20(4): 257-263.
- [32]. Goldsmith W. Soil strength reinforcement by plants, International Erosion Control Association (IECA); 2006. p. 5-16.
- [33]. da Silva EV, Bouillet JP, de Moraes Gonçalves JL, Junior CHA, Trivelin, PCO, Hinsinger P, Jourdan C, Nouvellon Y, Stape JL, Laclau, JP.. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional Ecology*, 2011; 25: 996-1006.
- [34]. Maleki S, Naghdi R, Abdi E, Nikooi M. Study of Tuska root effects on soil armoring as a bioengineering tools. *Iranian Forest Journal*. 2013; 6 (1): 49-58. [Persian]