

## بررسی مقاومت کششی ریشه درختان گز ساحلی در جهت شیب و جریان رودخانه به منظور کاربردهای زیست مهندسی خاک

علیرضا حسینی<sup>۱\*</sup> و محمود شفاعی بجزستان<sup>۲</sup>

### چکیده

ترکیب خاک و ریشه، سبب افزایش مقاومت برشی خاک و پایداری شیب سواحل رودخانه می‌شود. برای برآورد میزان مقاومت برشی سیستم خاک-ریشه، مدل وو به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کاربرد این مدل، اندازه‌گیری مقاومت برشی ریشه‌ها ضروری است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی مقاومت کششی ریشه درختان گز ساحل رودخانه سیمره است. برای این منظور تعداد پنج پایه درخت در بازه نسبتاً مستقیمی از رودخانه انتخاب شد. برای بررسی مقاومت کششی و سیستم ریشه، از روش حفر ترانشه دایره‌ای استفاده شد. ترانشه به چهار قسمت مساوی تقسیم و مجموعاً ۱۴۸ نمونه از ریشه به تفکیک چهار ربع برای آزمایش مقاومت کششی جمع‌آوری شد. آزمایش ۷۳٪ از کل نمونه‌ها مورد تأیید قرار گرفت. حداکثر قطر مورد آزمایش به ترتیب ۱ و ۸/۲ میلی‌متر بود و همین‌طور حداقل و حداکثر مقاومت کششی، ۶/۱ و ۴۴/۹ مگاپاسکال محاسبه شد. هر ترانشه، به دو ناحیه بالادست و پایین‌دست، در جهت شیب و جریان تقسیم شد. نتایج پژوهش نشان داد که تفاوت بین مقاومت کششی ریشه‌ها در نواحی بالایی و پایینی شیب و جریان اندک بود و با وجود این، تأثیر شیب به مراتب بیشتر از تأثیر جریان است.

**واژه‌های کلیدی:** پایداری شیب‌ها، حفاظت خاک، ساماندهی سواحل، زیست مهندسی، فرسایش خاک، مهندسی رودخانه، مسلح‌سازی خاک.

**ارجاع:** حسینی ع. و شفاعی بجزستان م. ۱۳۹۸. بررسی مقاومت کششی ریشه درختان گز ساحلی در جهت شیب و جریان رودخانه به منظور کاربردهای زیست مهندسی خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۴۱-۴۸.

1- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه ایلام.  
2- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [ar.hoseini@ilam.ac.ir](mailto:ar.hoseini@ilam.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۸

## مقدمه

آب مهم‌ترین عامل فرسایش است. ناپایداری سواحل رودخانه با فرسایش سطحی<sup>۱</sup> آغاز می‌شود و در ادامه پدیده آبستگي<sup>۲</sup> و سپس فروریختگی<sup>۳</sup> به وجود می‌آید (داکر و هابل، ۲۰۰۸). این پدیده سبب از بین رفتن بخشی از زمین‌های حاصل‌خیز کشاورزی، افزایش رسوبات ته‌نشین شده در دریاچه سدهای مخزنی، تخریب تأسیسات آبریزی از رودخانه، تخریب پایه پل‌ها و راه‌ها، افزایش هزینه تصفیه آب شرب، از بین رفتن میکروارگانیزم‌های ضروری برای جانوران رودخانه‌ای و تغییرات زیست‌محیطی می‌شود (داکر، ۲۰۰۳؛ هابل و همکاران، ۲۰۱۰).

با توجه به اینکه در مهندسی رودخانه، استفاده از روش‌های سازه‌ای از اهمیت بیشتری برخوردار است. فرسایش کناره‌های رودخانه، به‌صورت خطی و در طول نسبتاً زیادی از آبراهه رخ می‌دهد. این در حالی است که حفاظت سازه‌ای، به‌دلیل بالا بودن هزینه‌ها تنها به‌صورت موضعی امکان‌پذیر بوده و با گذشت زمان و تغییر شرایط اولیه طراحی، به سادگی در معرض تخریب قرار می‌گیرد. بنابراین تأثیر پوشش‌های گیاهی در افزایش مقاومت برشی و پایداری شیب‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که پوشش‌های گیاهی مانند درختان با داشتن آثار هیدرولوژیکی و مکانیکی مختلف اثر قابل توجهی بر افزایش مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش ضریب پایداری شیب ساحل دارند (سیمون و کالیسون، ۲۰۰۲؛ پولن، ۲۰۰۷). وجود درختان ساحلی از طریق مسلح‌سازی خاک به‌وسیله ریشه احتمال گسیختگی توده‌های شیب را کاهش می‌دهد. خاک و ریشه یک ماده مرکب را تشکیل می‌دهند که ریشه به‌دلیل داشتن مقاومت کششی و چسبندگی نسبتاً بالا، سبب افزایش مقاومت برشی سیستم خاک-ریشه می‌شود. برای برآورد میزان مقاومت برشی سیستم خاک-ریشه، مدل وو (وو و همکاران، ۱۹۷۹) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کاربرد این مدل اندازه‌گیری مقاومت برشی ریشه‌ها ضروری است. در چند دهه اخیر استفاده از پوشش‌های گیاهی، به نام روش‌های زیست‌مهندسی<sup>۴</sup> روبه افزایش است. زیست

مهندسی مربوط به روش‌های ترکیب کردن پوشش گیاهی با سازه‌های سخت، مانند دیوارهای حایل است که در آن از مزایای هر دو قسمت بهره برده می‌شود (مورگان و ریکسون، ۱۹۹۵). استفاده از پوشش‌های گیاهی با هدف پایداری شیب‌ها و کنترل فرسایش، زیست مهندسی خاک نامیده می‌شود (بارکر، ۱۹۹۵). استفاده از روش‌های زیست مهندسی برای حفاظت سواحل، در کنار مزایای قابل توجهی که دارد، دارای محدودیت‌هایی نیز است. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد تأثیر مکانیکی ریشه‌ها انجام شده است. نتیجه این بررسی‌ها نشان می‌دهد که این مقدار به سیستم و مقاومت کششی ریشه بستگی دارد. ریشه در مقابل کشش دارای مقاومت زیاد، ولی در مقابل فشار دارای مقاومت کمتری است. با افزایش قطر ریشه، نیروی لازم برای گسیخته شدن آن افزایش می‌یابد. ولی ریشه‌های نازک‌تر نسبت به ریشه‌های قطور به‌دلیل وجود مواد سلولزی بیشتر مقاومت کششی بیشتری از خود نشان می‌دهند. تقریباً رابطه مقاومت کششی با قطر ریشه به‌صورت یک تابع توانی منفی پذیرفته شده است (بیسجتی و همکاران، ۲۰۰۵؛ واتسون و ماردن، ۲۰۰۴؛ شفاعی بجستان و گل‌شیخی، ۱۳۸۱؛ عبدی، ۱۳۸۸).

مطالعات زیادی در مورد مقاومت کششی ریشه‌ها انجام و مقدار مختلفی برای آن‌ها ارائه شده است. ماکاروا و همکاران (۱۹۹۸) مقاومت ریشه‌های راش اروپایی را مورد بررسی قرار دادند. دامنه قطری ریشه‌های انتخابی ۶/۵-۰/۹ میلی‌متر و دامنه مقاومت کششی آن‌ها ۵۶-۱۱ مگاپاسکال بود. نیلاورا و نوتالایا (۱۹۹۹) تعدادی نمونه ریشه از هفت گونه درختی تایلند با حداکثر قطر ۱۵ میلی‌متر را آزمایش کردند. دامنه تغییرات مقاومت کششی با توجه به قطر و گونه ۸۹-۵ مگاپاسکال گزارش شد. کوفی و کولن (۲۰۰۱) ریشه‌های راش اروپایی با دامنه قطری ۱۱-۴ میلی‌متر را بررسی و مقاومت کششی آن‌ها را ۴۰-۱۲ مگاپاسکال برآورد کردند. جنت و همکاران (۲۰۰۵) پنج گونه درختی در فرانسه را مورد مطالعه قرار دادند. تعداد ریشه‌های مورد آزمایش ۱۱ تا ۵۳ عدد برای هر گونه و دامنه قطری ۱۲-۰/۲ میلی‌متر بود. نوریس (۲۰۰۵) مقاومت کششی ریشه گونه ولیک را ۱۵/۵±۶/۸ و بلوط را ۸/۱±۴/۶ مگاپاسکال گزارش کرد. ون بیک و همکاران (۲۰۰۵)، ۵۲ عدد ریشه گیاهان مربوط به جنوب اسپانیا را آزمایش کردند. در این پژوهش دامنه قطری

1- Sub-aerial erosion  
2- Scouring  
3- Slumping  
4- Bioengineering

## مواد و روش‌ها

برای بررسی مقاومت کششی و سیستم ریشه درختان ساحلی، بازه‌ای به طول یک کیلومتر از ساحل رودخانه سیمره واقع در روستای وحدت آباد- شهرستان دره‌شهر- استان ایلام انتخاب شد. این رودخانه، از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه است که متوسط آبدهی سالانه آن در محل پژوهش، ۱۲۲ مترمکعب در ثانیه است. در طول این بازه، پایه‌های مناسب برای انجام پژوهش شناسایی و شماره‌گذاری شدند. از بین دوازده پایه درخت گز شماره‌گذاری شده، تعداد پنج پایه به روش کاملاً تصادفی انتخاب گردید. پیرامون هر پایه، ترانشه‌ای به شکل دایره، در فاصله ۰/۵ متری از تنه درخت، حفر شد. با استفاده از دو محور عمود بر هم سطح ترانشه به چهار ربع (قسمت مساوی) تقسیم گردید. یکی از محورها عمود بر ساحل و دیگری موازی با ساحل و جریان عمومی آبراهه انتخاب شد. هم‌زمان با حفاری و بررسی سیستم ریشه، نمونه‌های سالم ریشه برای آزمون کشش به تفکیک چهار ربع انتخاب گردید. ریشه‌ها را در اندازه ۲۰ سانتی‌متری برش داده و تا زمان انجام آزمون کشش در محلول ۱۵ درصد الکل نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری مقاومت کششی ریشه‌ها از دستگاه کشش اینسترون-۴۴۸۶<sup>۱</sup> (آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران) استفاده شد. برای محاسبه مقاومت کششی ریشه، مقدار نیرو در لحظه گسیخته شدن بر سطح مقطع معادل قطر متوسط ریشه، تقسیم شد. براساس روش بیسپتی و همکاران (۲۰۰۵) و پولن (۲۰۰۷) نیرو با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به ریشه اعمال گردید. برای یافتن معادله مناسب بین قطر ریشه و مقدار نیروی گسیختگی، مدل‌های مختلف رگرسیونی بررسی شد. برای اطمینان از درستی کارکرد مدل، توزیع باقی‌مانده‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. در شکل‌های ۱ تا ۶ به ترتیب مشکلات فرسایش در ساحل رودخانه‌ها، تأثیر پوشش گیاهی در حفاظت سواحل، چگونگی آرایش ربع‌ها مختصاتی در ساحل، روش حفاری، نمونه ریشه‌ها و دستگاه کشش نشان داده شده است.

۲۴-۱ میلی‌متر، دامنه مقاومت کششی ۴۳-۳ مگاپاسکال و میانگین مقاومت کششی  $13 \pm 6/8$  گزارش شد. کازوفی و همکاران (۲۰۰۶) مقاومت کششی چهار گونه از گرامینه‌های جنوب ایتالیا را بررسی کردند. مقاومت کششی به دست آمده در این پژوهش، ۷۰-۱۵ مگاپاسکال و افزایش مقاومت برشی در اثر حضور ریشه ۱۵-۲ کیلوپاسکال گزارش شد. توسی (۲۰۰۷) سه گونه درختچه‌ای شمال ایتالیا با میانگین قطر  $3/2$ ،  $3/2$  و  $4/1$  میلی‌متر را بررسی و میانگین مقاومت کششی هر یک را به ترتیب ۲۹/۹، ۲۲/۹ و ۱۸/۷ مگاپاسکال برآورد کرد. بیسپتی (۲۰۰۹) مقاومت کششی ۵ گونه درختی در شمال ایتالیا را مورد بررسی قرار داد. دامنه قطری و مقاومت کششی به ترتیب؛  $0/12$  تا ۷ میلی‌متر و  $6/1$  تا ۳۳۲ مگاپاسکال گزارش کرد. ادھیگری و همکاران (۲۰۱۳)، مقاومت کششی ریشه‌های چهار گونه درختی در سواحل رودخانه‌های کلرادو را مورد بررسی قرار دادند و مقاومت کششی را بین  $34/8$  تا  $62/23$  مگاپاسکال گزارش کردند. حسینی و همکاران (۱۳۹۲) متوسط مقاومت کششی ریشه درختان پده را برای قطرهای ۱ تا  $7/9$  میلی‌متر را  $25/9$  مگاپاسکال تعیین کرد. شیردلی (۱۳۹۲) مقاومت کششی ریشه چند گونه گیاهی، در ساحل رودخانه زنجانرود را مورد بررسی قرار داد و برای قطرهای تا ۱۵ میلی‌متر گونه گز، مقاومت کششی را بین  $30/2$ -۴ مگاپاسکال گزارش داد.

در بسیاری از پروژه‌های علوم آب، مانند مهندسی رودخانه، برای حفاظت سواحل و کاهش فرسایش خاک می‌توان از پوشش‌های گیاهی استفاده کرد. از جمله موانع مهم استفاده از گیاهان به‌عنوان یک مصالح مهندسی، محدودیت دانش فنی در خصوص ویژگی‌های فنی و مکانیکی ریشه‌ها است. حاشیه بسیاری از رودخانه‌های کشور از جمله رودخانه سیمره رویشگاه مناسبی برای درختان گز است. بازدیدهای میدانی به عمل آمده از رودخانه سیمره نشان می‌دهد که در محل رویشگاه‌های درختان گز، ساحل و مقطع رودخانه و زمین‌های مجاور به شکل مناسبی حفاظت شده و فرسایش خاک به حداقل رسیده است. هدف از انجام این پژوهش شناخت ویژگی‌های فنی و مکانیکی ریشه درختان گز به‌منظور استفاده‌های کاربردی است.



شکل ۵- تهیه نمونه ریشه برای انجام آزمایش کشش



شکل ۱- فرسایش سواحل رودخانه‌ها (رودخانه سیمره - شهرستان سیروان)



شکل ۶- تعیین نیروی کششی ریشه با استفاده از دستگاه اینسترون

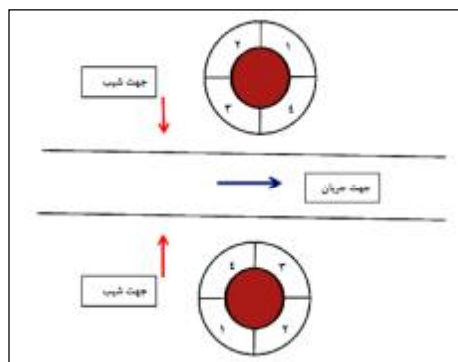


شکل ۲- تأثیر پوشش گیاهی در حفاظت سواحل رودخانه‌ها (رودخانه سیمره - شهرستان سیروان)

### نتایج و بحث

#### نیروی گسیختگی ریشه‌ها

تعداد کل ریشه‌های گونه گز که آزمایش مقاومت کششی روی آن‌ها انجام شد، ۱۴۸ عدد بود که ۷۳٪ از کل آزمایش‌های انجام شده دارای کیفیت مناسب بودند. آماره‌های توصیفی قطر ریشه‌های مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. لیز خوردن ریشه‌های قطور و گسیختگی در بین فک‌ها، مهم‌ترین مشکل آزمایش تعیین مقاومت کششی ریشه‌ها بود. چون شکل ریشه‌ها استوانه‌ای کامل نیست و بیشتر شبیه مخروط ناقص است، به نظر می‌رسد اگر گسیختگی، درست در وسط نمونه، رخ ندهد اشکالی نداشته باشد. نتیجه آزمایش‌هایی که گسیختگی آن‌ها در داخل فک‌ها رخ می‌داد، کنار گذاشته شدند. هر اندازه قطر ریشه‌های مورد آزمایش بزرگ‌تر شود، درصد موفقیت آزمایش کاهش می‌یابد. نبود فک مناسب برای انجام این نوع آزمایش سبب می‌شود تا در مواردی گسیختگی، لهیدگی و لیز خوردن ریشه در داخل فک‌ها به وجود آید (دی‌بیتس و همکاران، ۲۰۰۸؛ ماتیا و همکاران، ۲۰۰۵). سفت بودن بیش از اندازه فک، سبب پاره‌گی بافت و شل بودن آن سبب لیز خوردن ریشه در داخل فک‌ها



شکل ۳- آرایش ربع‌ها در ساحل



شکل ۴- روش حفاری دایره‌ای پیرامون پایه درخت

ریشه‌های مورد آزمایش کمتر می‌شد، درصد خطا نیز کاهش می‌یافت.

تابع توانی با ضریب تبیین  $R^2=0/92$  به‌عنوان بهترین تابع برازنده داده‌ها انتخاب شد. تابع توانی به شکل معادله زیر است:

$$F = 20.18D^{1.64} \quad (1)$$

در این معادله،  $F$  نیروی گسیختگی برحسب نیوتن و  $D$  قطر ریشه بر حسب میلی‌متر است. با افزایش قطر ریشه‌ها مقدار نیروی لازم برای گسیخته شدن افزایش می‌یابد. در جداول ۱ و ۲ آماره‌های توصیفی نیروی کششی ریشه در جهت جریان و شیب و در شکل ۷ نیز نمودار تابع برازنده بین قطر و نیروی کششی ریشه داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع باقیمانده‌ها نرمال و مدل برازنده داده‌ها است.

می‌شد که در هر دو مورد، نیروی اندازه‌گیری شده با مقدار واقعی تفاوت دارد. بهتر است در آغاز کار با انجام تعدادی آزمایش میزان محکم بستن فک‌ها به‌صورت تجربی مشخص شود. وقوع این پدیده، به ویژگی ریشه و قطر نمونه بستگی و درصد خطا در ریشه گونه‌های مختلف با هم فرق دارد. برای گسیختن ریشه هر اندازه به نیروی بیشتری نیاز باشد، چون احتمال لیز خوردن ریشه افزایش می‌یابد، قطر اندازه‌گیری شده کمتر می‌شود. هر چند ویژگی‌های ژنتیکی درخت، در به دست آوردن تعداد آزمایش‌های موفق، مؤثر است، داشتن تجربه آزمایش نیز اثر گذار بوده و بهتر است قبل از شروع آزمایش اصلی تعدادی نمونه، آزمایش شوند. درصد خطای این مطالعه از نتایج آبرنتی و رادرفورد (۲۰۰۱) با حدود ۵۰٪ خطا، کمتر و از نتایج عبدی (۱۳۸۸) با حدود ۱۵٪ خطا و حسینی و همکاران (۱۳۹۲) با ۲۶٪ خطا، بیشتر است. هر اندازه قطر

جدول ۱- آماره‌های توصیفی نیروی کششی ریشه

تعداد آزمایش مناسب	میانگین (نیوتن)	کمینه (نیوتن)	بیشینه (نیوتن)	انحراف معیار	انحراف استاندارد میانگین	کشیدگی
۱۰۸	۲۲۵/۲	۱۶/۱	۱۰۶۳	۲۳۰/۷	۲۲/۲	۱/۵

جدول ۲- آماره‌های توصیفی نیروی کششی ریشه در بالادست و پایین‌دست شیب و جریان

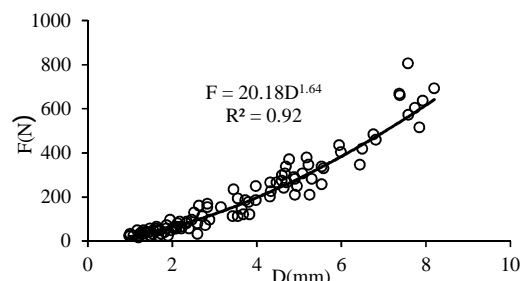
جهت شیب	جهت شیب		جهت جریان		
	بالادست	پایین‌دست	بالادست	پایین‌دست	
حداقل	۵۹	۴۹	۵۶	۵۲	قطر ریشه (میلی‌متر)
حداکثر	۵۴/۶	۴۵/۴	۵۱/۹	۴۸/۱	
تعداد ریشه	۱	۱	۱	۱	درصد تعداد ریشه
حداقل	۷/۹	۸/۲	۷/۹	۸/۲	
حداکثر	۳/۸	۳/۴	۳/۸	۳/۷	نیروی گسیختگی ریشه (نیوتن)
میانگین	۱/۸	۲/۳	۲/۱	۱/۸	
انحراف معیار	۲۴/۲	۱۶/۱	۲۴/۲	۲۴/۲	انحراف معیار
حداقل	۱۰۶۳	۸۲۱/۵	۸۷۷/۷	۱۰۶۳	
حداکثر	۲۴۲/۶	۲۰۴/۳	۲۲۵/۲	۲۲۵/۲	
میانگین	۲۲۹/۷	۲۳۲/۵	۲۴۱/۰	۲۲۱/۴	

### مقاومت کششی ریشه‌ها

بین قطر و مقاومت کششی رابطه‌ای معکوس وجود دارد. تابع توانی با ضریب تبیین  $0/39$  به‌عنوان تابع برازنده داده‌ها انتخاب شد. تابع توانی مقاومت کششی - قطر ریشه به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$t = 24.20D^{-0.31} \quad (2)$$

در این معادله  $\tau_r$  مقاومت کششی برحسب مگاپاسکال و  $D$  قطر ریشه بر حسب میلی‌متر است. نمودار این تابع در



شکل ۷- رابطه بین قطر و نیروی گسیختگی ریشه

برای اطمینان از درستی کارکرد مدل، توزیع باقیمانده‌ها بررسی شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که مدل برازنده داده‌هاست. در جداول ۳ و ۴ آماره‌های توصیفی مقاومت کششی ریشه در جهت جریان و شیب و در شکل ۸ نیز نمودار تابع برازنده بین قطر و مقاومت کششی ریشه داده شده است. برای آزمون معنی‌دار بودن تفاوت بین متوسط مقاومت کششی ریشه، در نواحی بالادست و پایین‌دست جریان و شیب، تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از آزمون‌های من-ویتنی انجام شد. نتیجه آزمون من-ویتنی برای مقایسه میانگین مقاومت کششی ریشه‌ها در بالادست و پایین‌دست شیب و جریان به ترتیب با  $P=0/48$  و  $P=0/98$  نشان می‌دهد که در سطح معنی‌داری  $\alpha=5$  درصد تفاوت معنی‌داری بین مقاومت کششی ریشه‌ها در بالادست و پایین‌دست شیب و جریان وجود ندارد. تأثیر شیب بر مقاومت کششی ریشه به مراتب بیشتر از تأثیر نیروی ناشی از جریان است. مقایسه متوسط مقاومت کششی ریشه بین پایه‌های مختلف با استفاده از آزمون کروسکال والیس نیز انجام شد. نتیجه آزمون کروسکال-والیس با سطح معنی‌داری  $P=0/002$  نشان می‌دهد که در سطح معنی‌داری  $\alpha=5$  درصد متوسط مقاومت کششی ریشه پایه‌های مختلف با هم متفاوت است.

شکل ۸ داده شده است. مقاومت کششی گزارش شده به‌وسیله پژوهشگران مختلف بسیار متفاوت است و دامنه نسبتاً گسترده‌ای را دربر می‌گیرد. این مقدار از چند مگاپاسکال تا حدود هزار مگاپاسکال گزارش شده است که نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج بیشتر پژوهشگران هم‌خوانی دارد.

حداکثر قطر ریشه‌ای که می‌توان مقاومت آن را تعیین کرد، به دلیل پدیده لیز خوردن در بین فک‌ها دارای محدودیت است. در منابع مختلف قطرهای اندازه‌گیری شده از  $0/12$  تا  $24$  میلی‌متر گزارش شده است (ون بیک، ۲۰۰۵). بیشتر پژوهشگران تنها تا قطرهای  $10$  میلی‌متر را اندازه‌گیری کرده‌اند. ضریب تابع توانی  $\alpha$  و  $\beta$  برای این گونه به ترتیب  $24/2$  و  $-0/31$  و ضریب تبیین  $0/39$  است. در منابع مختلف  $91/2 < \alpha < 26/3$  و  $-0/28 < \beta < -1/11$  گزارش شده است (عبدی، ۱۳۸۸؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۲؛ بیسجتی و همکاران، ۲۰۰۵؛ ماتیا و همکاران، ۲۰۰۵). مقاومت کششی ریشه علاوه بر قطر به عوامل دیگری هم‌مانند شرایط محیطی، تفاوت ژنتیکی و سن درختان بستگی دارد و به همین دلیل ضریب تبیین تابع توانی کمتر از  $0/5$  است (دی بیتس و همکاران، ۲۰۰۸).

جدول ۳- آماره‌های توصیفی مقاومت کششی ریشه

تعداد آزمایش	میانگین (مگا پاسکال)	کمینه (مگا پاسکال)	بیشینه (مگا پاسکال)	انحراف معیار	انحراف استاندارد میانگین	کشیدگی
۱۰۸	۱۹/۴	۶/۱	۴۴/۹	۷/۵	۰/۷۳	۱/۰

جدول ۴- آماره‌های توصیفی مقاومت کششی ریشه در جهت جریان و شیب

تعداد ریشه	جهت شیب		جهت جریان	
	بالادست	پایین‌دست	بالادست	پایین‌دست
تعداد ریشه	۵۹	۴۹	۵۲	۵۶
درصد تعداد ریشه	۵۴/۶	۴۵/۴	۴۸/۱	۵۱/۹
حداقل	۱	۱	۱	۱
حداکثر	۷/۹	۸/۲	۸/۲	۷/۹
میانگین	۳/۸	۳/۴	۳/۷	۳/۶
انحراف معیار	۱/۸	۲/۳	۱/۸	۲/۱
حداقل	۸/۵	۶/۱	۶/۱	۱۰/۵
حداکثر	۳۸/۵	۴۴/۹	۴۴/۹	۴۱/۰
میانگین	۱۹/۳	۱۹/۵	۱۹/۲	۱۹/۵
انحراف معیار	۷/۴	۷/۸	۷/۹	۷/۳

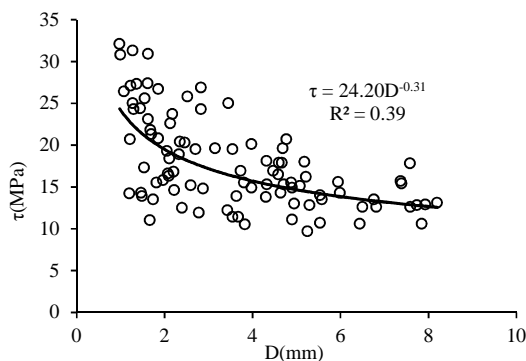
درختان ساحلی (درخت پده) جهت کاربردهای زیست مهندسی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۷): ۴۳۲-۴۴۰.

۲. شفای بجستان م. و گل شیخی م. ۱۳۸۱. تعیین اثر ریشه درختان پده و گز بر مقاومت برشی ساحل کارون در محل. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۶(۴): ۲۷-۴۰.

۳. شیردلی ع. ۱۳۹۲. بررسی زیست مهندسی در تثبیت سواحل رودخانه‌ها و شیب‌ها. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۷(۲۳): ۵۳-۶۲.

۴. عبدی ا. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر ریشه گونه‌های جنگلی در پایداری دامنه‌ها به منظور استفاده‌های کاربردی در جاده‌سازی جنگل و زیست مهندسی. پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۸۳ ص.

5. Abernethy B. and Rutherford I. D. 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement, Hydrological Processes. 15: 63-79.
6. Adhikari A. R. Gautam M. R. Yu Z. Imada S. and Acharya K. 2013. Estimation of root cohesion for desert shrub species in the Lower Colorado riparian ecosystem and its potential for stream bank stabilization, Ecological Engineering. 51: 33-44.
7. Barker D. H. 1995. Vegetation and slopes, stabilization, protection and ecology. Thomas Telford Publications, United Kingdom. 296 p.
8. Bischetti G. B. 2009. Root cohesion of forest species in the Italian ALPS. Plant soil. 324: 71-89.
9. Bischetti G. B. Chiaradia E. A. Simonato T. Speziali B. Vitali B. Vullo P. and Zocco A. 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy), Plant and Soil. 278: 11-22.
10. Cazzuffi D. Coreneo A. and Cripra. 2006. Slope stabilization by perennial "gramineae" in Southern Italy: plant growth and temporal performance. Geotechnical and Geological Engineering. 24: 429-447
11. Cofie P. and Koolen A. J. 2001. Test speed and other factors affecting the measurements of tree root properties used in soil reinforcement models. Soil and Tillage Research. 63: 51-56.
12. De Baets S. Poesen J. Reubes B. Wemans K. De Baerdewaeker J. and Muys B. 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their



شکل ۸- رابطه بین قطر و مقاومت کششی ریشه

### نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بین قطر و نیروی گسیختگی رابطه مستقیم وجود دارد و با افزایش قطر، نیروی بیشتری برای گسیخته شدن ریشه لازم است. این رابطه به صورت تابع توانی مثبت است. حداکثر قطر و نیروی گسیختگی اندازه‌گیری شده به ترتیب ۸/۲ میلی‌متر و ۱۰۶۳ نیوتن است. رابطه بین قطر و مقاومت کششی ریشه به صورت تابع توانی منفی است. حداقل و حداکثر مقاومت کششی محاسبه شده به ترتیب ۶/۱ و ۴۴/۹ مگاپاسکال است. در جهت جریان و شیب نیز بین متوسط مقاومت کششی ریشه‌ها در بالادست و پایین‌دست، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. هرچند اثر شیب و جریان روی مقاومت کششی ریشه‌ها ناچیز؛ اما تأثیر شیب بیشتر از تأثیر جریان است. بنابراین جریان رودخانه و شیب ساحل تأثیر ناچیزی بر مقاومت کششی ریشه دارند. بین متوسط مقاومت کششی پایه‌های مختلف درختان گز تفاوت معنی‌داری وجود دارد و این نتیجه نشان می‌دهد که مقاومت کششی ریشه به شرایط محیطی و خواص ژنتیکی درختان بستگی دارد.

### سپاس‌گزاری

این مطالعه بخشی از طرح پژوهشی کاربرد روش‌های بیومهندسی در ساماندهی سواحل رودخانه است که به این وسیله از کمک‌های مالی شرکت آب منطقه‌ای استان ایلام تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

### منابع

۱. حسینی ع. شفای بجستان م. موسوی جهرمی ح. و رحیمی ح. ۱۳۹۲. بررسی مقاومت کششی ریشه

25. Van Beek L. P. H. Wint J. Cammeraat L. H. and Edwards J. P. 2005. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. *Plant and Soil*. 278: 55-74.
26. Watson A. J. and Marden M. 2004. Live root-wood tensile strengths of some common New Zealand indigenous and plantation tree species. *New Zealand journal of forestry science*. 34(3): 344-353.
27. Wu T. H. McKinnell III W. P. and Swantson D. N. 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*. 16: 19-33.
- contribution to soil shear strength. Published by Springer. *Plant Soil*. 305:207-226.
13. Docker B. B. 2003. Biotechnical engineering on alluvial riverbanks of south eastern Australia: a quantified model of the earth-reinforcing properties of some native riparian trees, Unpublished Ph.D. Thesis, University of Sydney. 185 p.
14. Docker B. B. and Hubble T. C. T. 2008. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology*. 100: 401-418.
15. Genet M. Stokes A. Salin F. Mickovski S. B. Fourcaud T. Dumail J. F. and Van Beek R. 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots, *Plant and soil*. 258: 1-9.
16. Hubble T. C. T. Docker B. B. and Rutherford I. D. 2010. The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: A review of Australian experience and practice. *Ecological Engineering*. 36: 292-304.
17. Makarova O. V. Cofie P. and Koolen A. J. 1998. Axial stress-strain relationships of fine roots of Beech and Larch in loading to failure and in cyclic loading. *Soil & Tillage Research*. 45: 175-187.
18. Mattia C. Bischetti G. B. and Gentile F. 2005. Biotechnical characteristics of root system of typical Mediterranean species. *Plant and Soil*. 278: 23-32.
19. Morgan R. P. and Rickson R. J. 1995. *Slope Stabilization and Erosion Control-A Bioengineering Approach*. Silso College, Cranfield University, UK. An Imprint of Chapman and Hall. 290 p.
20. Nilaweera N. S. and Nutalaya P. 1999. Role of tree roots in slope stabilization, *Bulletin of Engineering Geology And Environment*. 57(4): 337-342.
21. Norris J. 2005. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England. *Plant and Soil*. 278: 43-53.
22. Pollen N. 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of stream banks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*. 69: 197-205.
23. Simon A. and Collison A. J. C. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on stream bank stability. *Earth Surf. Process. Landforms*. 27: 527-546.
24. Tosi M. 2007. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy), *Geomorphology*. 87: 268-283.