

مقدمه

تثبیت سواحل از مهمترین مسائل در مهندسی رودخانه جهت حفاظت از سواحل به ویژه در مناطق فرسایش پذیر است. در راستای همین امر روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از جمله این روش‌ها، حفاظت بیومهندسی سواحل می‌باشد. که امروزه بدلیل مسائل زیست محیطی و اقتصادی در مهندسی رودخانه مورد توجه قرار گرفته است.

مهمترین نظریه در مورد تحلیل پایداری شیب‌ها، نظریه کلمب است (۲ و ۷ و ۳۷) که به صورت زیر بیان شده است.

$$S = C + \sigma_n \tan \phi \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این فرمول C عامل چسبندگی، σ تنش مؤثر قائم و ϕ زاویه اصطکاک داخلی است.

والدرون [۱۱] مدل فوق را برای ملحوظ نمودن عکس‌العمل خاک و ریشه (ΔS) به شرح زیر اصلاح نمود.

$$S = C + \Delta S + \sigma_n \tan \phi \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\Delta S = a_r k (\sec \theta - 1)^{1/2} (\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \phi) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در روابط فوق، θ زاویه شکست ریشه نسبت به محور قائم از سطح برش است و بسته به وضعیت ریشه دو حالت خطی و یا سهوی را دارد و مقادیر k برای این دو حالت به شرح ذیل است.

$$k = \left[\frac{4\tau ZE}{D} \right]^{1/2} \quad \text{در حالتی که ریشه حالت خطی باشد:} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$k = \left[\frac{8\tau ZE}{D} \right]^{1/2} \quad \text{در حالتی که ریشه حالت سهمی باشد:} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط (۴) و (۵)، D قطر ریشه، Z ضخامت لایه برش، E مدول الاستیسیته ریشه، τ حداکثر تنش اصطکاکی بین ریشه و خاک، A_r سطح مقطع ریشه که از ناحیه برش عبور نموده و A سطح مقطع برش می‌باشد و $a_r = \frac{A_r}{A}$ است. گری و وتیر [۱۴] مدلی را ارائه نمود که ریشه‌ها بصورت مورب از سطح برش عبور می‌نمود. وو و همکاران [۳۵] و بارکر [۱] مقدار افزایش برش خاک را برای حالتی که مجموعه‌ای از ریشه‌ها از سطح برش عبور می‌نمود به شرح ذیل محاسبه نمود.

$$\Delta S = \delta \sum_{i=1}^n \frac{A_i T_i}{A} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، T_i حداکثر مقاومت کششی هر ریشه با سطح مقطع A_i و n تعداد ریشه‌های عبوری از سطح مقطع برش می‌باشد. مقدار

 بررسی‌های زیست مهندسی در تثبیت سواحل
 رودخانه‌ها و شیب‌ها
عظیم شیردلی^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰

چکیده

زنجارود یکی از سرشاخه‌های عمده قزل‌اوزن می‌باشد. عمده اراضی قابل کشت در حاشیه رودخانه واقع است و عمق رسوبات آن در بعضی از مناطق به حدود ۳۰ متر می‌رسد. در واقع شرایط سیلابی این رودخانه، پاشنه سواحل آن را شسته و لغزش و واژگونی سواحل سبب پیچانرودی شدن رودخانه و نابودی واحدهای زراعی می‌شود. یکی از روش‌هایی که امروزه بدلیل مسائل زیست محیطی و اقتصادی در مهندسی رودخانه مورد توجه قرار گرفته است روش‌های زیست مهندسی حفاظت سواحل می‌باشد. این روش‌ها بر مبنای استفاده از اثرازیست مقاومت خاک توسط ریشه‌های گیاهی، در پایدارسازی سواحل می‌باشد از این رو مطالعات مربوطه بر روی مقاومت مکانیکی و ژئومتری ریشه گونه‌های گیاهی بومی این بازه که جزء نواحی سرد است و می‌تواند مقاومت خاک را افزایش دهد متمرکز شده است. در راستای اجرای این طرح پژوهشی، ابتدا یک سری بازدیدهای صحرایی از سطح منطقه جهت شناسایی پوشش گیاهی بومی منطقه صورت پذیرفت و مدل‌های محاسباتی خاک‌های مسلح مورد بررسی قرار گرفت. میزان مقاومت کششی ریشه‌های درختان در شرایط آزمایشگاهی، وضعیت پراکنش آنها (ژئومتری) و همچنین دامنه موثر گسترش ریشه‌ها تعیین و مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعدی با استفاده از آزمایش برش خاک در محل با ریشه و بدون ریشه، میزان اثر گیاهان بر روی مقاومت برشی خاک محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که درختان گز، پده، نارون و بید سبب افزایش مقاومت برشی خاک به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد گردید.

واژه‌های کلیدی: زیست مهندسی، رودخانه، تثبیت سواحل، مقاومت مکانیکی ریشه

۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان
shirdeliazim@gmail.com

عامل δ نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\delta = \sin \theta + \cos(\tan \phi) \quad \text{رابطه (۷)}$$

بر طبق آزمایشات وو و همکاران [۳۴] و بارکر [۱] بطور متوسط $\delta = 1.15$ توصیه شده است.

والدران و داکیان [۳۲] با استفاده از فرضیات قبلی رابطه ذیل را ارائه نمودند.

$$\Delta S = \left[\frac{\pi \tau \delta}{2 A_s} \right] \sum_{i=1}^n E_i^{1/2} n_i D_i^{3/2}, \quad L_F = \frac{T_F D}{2\tau} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه [۸]، δ عرض ناحیه برش و A_s سطح مقطع برش می‌باشد. اگر L طول ریشه بزرگتر از طول موثر یا L_F باشد باعث شکست ریشه در حالت برش می‌گردد و اگر کوچکتر باشد ریشه می‌لغزد و شکست رخ نمی‌دهد و T_F حداکثر تنش کششی می‌باشد.

وو و همکاران [۳۶] علاوه بر دو مدل قبلی، مدل کابلی و میله‌ای را ارائه نمود و طبق نتایج بدست آمده بیان داشت، در جابجایی کم مدل میله‌ای و در جابجایی زیاد مدل کابلی بهتر عمل می‌کند. گری و مغان [۱۳] عامل مکش خاک (فشار آب منفذی منفی) را به عنوان یک نیروی چسبیده اضافی برای شرایط غیراشباع در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک به شرح ذیل بکار برد.

$$\tau = C' + C'_R + (\sigma' - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در رابطه (۱۰) C' چسبندگی مؤثر خاک، C'_R چسبندگی مؤثر خاک، σ' تنش مؤثر قائم، u_a فشار هوای منفذی، u_w فشار آب منفذی، ϕ زاویه اصطکاک داخلی، ϕ^b زاویه‌ای که خط افزایش تنش برشی با محور مکش خاک ایجاد می‌کند به عبارتی نرخ تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییرات مکش خاک است.

شیو بریج و سبتار [۲۹ و ۲۷] دریافتند که عرض و شکل ناحیه برش بسته به میزان مسلح شدگی خاک و سفتی تغییر می‌کند و الگوی تغییر شکل ریشه به صورت یک منحنی و با معادله زیر منطبق می‌باشد.

$$X_1 = B - B^{-b(X_2)} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۹)، X_1, X_2 محورهای موازی و عمود بر سطح برش و B نصف عرض ناحیه برش است.

توزیع تنش برشی در ناحیه برش به صورت یکنواخت نیست و در این پژوهش مدل خطی وو مورد استفاده قرار گرفته است.

تجزیه و تحلیل مقاومت برشی به دو روش آزمایشگاهی و آزمایش در محل امکان‌پذیر می‌باشد. برای اولین بار والدران [۳۱] از مدل آزمایشگاهی برای تحلیل برش مستقیم خاک و ریشه استفاده نمود و انجام عملیات برش را با سرعت ثابت ۲/۵ میلی متر در دقیقه مورد بررسی قرار داد. بنا به گزارش شفافی بجستان و محمد سلیمی گل شیخی [۲۵] نقل از پژوهش‌های داودی و همکاران نشان داده است که نوع ریشه در افزایش مقاومت برش خاک تأثیر بسزایی دارد و ریشه‌های کم ضخامت و متعدد اثر بیشتری در مقایسه با ریشه‌های قطور و کم تعداد دارند ریشه‌های نازکتر و متعددتر باعث افزایش

تماس و درگیری بین ریشه و خاکدانه گردیده و انعطاف‌پذیری بیشتری دارند.

گری و اهاشی [۱۵] با انجام آزمایش‌هایی بر روی نحوه‌ی مسلح‌سازی ماسه توسط انواعی از فیبرها نتیجه گرفتند که فیبرها باعث افزایش حداکثر مقاومت برش شده است و حداکثر مقاومت برش زمانی اتفاق می‌افتد که فیبرها نسبت به سطح ناحیه برش زاویه ۶۰ درجه بسازد و با افزایش طول فیبرها مقاومت برش اضافه می‌شود. والدران [۳۱] با انجام آزمایش‌های برشی آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند در اثر وجود ریشه به ترتیب ۲ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد.

زایمر [۴۰] جهت نشان دادن اثر قطع درختان بر روی شیب جنگلی از آزمایش برش بلوک‌های خاک و ریشه در محل استفاده کرد. وی بلوک خاک و ریشه را با صفحات فلزی محصور نمود و در مرحله بعد این بلوک را توسط یک جک که در جلوی شفت آن یک نیروسنج رینگ قرار داده بود با سرعت ۱،۲۷ سانتی متر در دقیقه به جلو راند و نتیجه گرفت که بین توده‌ی زنده موجود در خاک و مقاومت برشی آن یک رابطه خطی وجود دارد. وو و همکاران [۳۵] از روش زایمر استفاده کردند و با روی تعدادی از ریشه‌ها، نیروسنج جهت اندازه‌گیری نیروی محوری ریشه نصب نمودند، آزمایش برش مستقیم کند و زهکشی شده در محل را انجام دادند نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که مقدار مقاومت برش اندازه‌گیری شده از مقدار بدست آمده از مدل محاسباتی کمتر می‌باشد. وو و واتسون [۳۷] آزمایش در محل را بر روی بلوکهای با ریشه درختان ۸-۶ سال و قطر اکثر ریشه‌های کمتر از ۲ سانتی متر انجام داد بلوکهای آنها ابعاد ۱×۱ متر و عمق ۰،۵ متر داشت و اطراف بلوک را با حفر ترانشه از خاک اطراف جدا نمودند و از یک جک، صفحه صلب در وجه بالادست بلوک و یک پمپ دستی استفاده کردند و میزان نیروی جابجایی را با یک فشارسنج و میزان جابجایی را از روی میخهای نصب شده بر روی بلوک تعیین نمودند.

در مطالعات مربوط به ریشه گیاهان عامل‌هایی نظیر مقاومت برش و ژئومتری ریشه مورد توجه قرار می‌گیرد. طول ریشه‌های اصلی از چند سانتی متر تا چند متر و ضخامت آنها به چند سانتی متر می‌رسد و ریشه‌های فرعی طولشان چند سانتی متر و ضخامت آنها از یک تا سه میلی متر بیشتر تجاوز نمی‌کند. براساس ریخت‌شناختی گیاهی، نواحی مختلف سامانه ریشه را می‌توان مشخص نمود. از تاج ریشه (تنه اصلی) تمام ریشه‌ها منشعب می‌شوند و ریشه‌های جانبی بصورت موازی با سطح زمین رشد می‌کنند که می‌توان آنها را به دو قسمت ناحیه کاهش سریع و ناحیه ریشه‌های جانبی تقسیم کرد. ریشه‌های پائین رونده قطور هستند که به صورت عمودی به درون زمین می‌روند و تمام مساحتی را که ریشه‌های جانبی در آن رشد می‌کنند توده ریشه می‌گویند. از اینرو افراد محقق چون وایلد [۳۳] سامانه ریشه را به سه دسته ریشه‌های صفحه‌ای، ریشه‌های قائم و ریشه‌های پراکنده تقسیم کرد. گرین وی [۱۶] قطر توده ریشه را

معادل ارتفاع گیاه یا دو برابر آن ذکر نموده است. و [۳۶] قطر توده ریشه را ۴ تا ۱۶ متر برای درختان ذکر کرده و رابطه زیر را بر حسب متر ارایه نموده است.

$$D_r = 2 + 5D_t \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در رابطه (۱۱)، D_r قطر توده ریشه و D_t قطر ساقه می‌باشد. بنا به گزارش وایزل و همکاران [۳۰] کراسیل نیکف مشهورترین طبقه‌بندی ریشه‌ها را از نظر ژئوتکنیکی ارایه نموده است. وایزل و همکاران میزان توسعه ریشه‌های سطحی را در عمق ۳۰ سانتی‌متری تا ۲ متری اعلام نموده و ریشه‌های عمقی را به صورت ریشه‌هایی که عمودی رشد کرده و عمق آنها بیش از این اندازه است تعریف نموده است.

ا^۱ لاغلین [۲۶] نشان داد که ریشه‌های با قطر ۱ تا ۲۰ میلی‌متر بیشترین سهم را در مسلح کردن خاک بعهده دارند و ریشه‌های با قطر بیشتر نقش معنی‌داری را ایفا نمی‌کنند.

و و همکاران [۳۴] نحوه نامگذاری ریشه‌ها جهت عملیات ژئومتری را ابداع کردند آنها در مجموع یک ریشه که به ساقه وصل می‌شود ریشه اصلی و یا J_0 و محل انشعاب اولین شاخه فرعی را با J_1 نشان دادند و حد فاصل بین دو نقطه را با R_i مشخص کردند و هر R_i در بین دو نقطه J_{i-1} و J_i قرار می‌گیرد و برای هر ریشه منشعب نامگذاری بدین شکل است که هر R_{ij} در بین دو نقطه $J_{i,j-1}$ و $J_{i,j}$ قرار می‌گیرد.

گری و مکدونالد [۱۰] جهت ژئومتری دو ترانشه یکی در راستا و یکی عمود بر شیب حفر کردند سپس در هر عمقی میزان نسبت سطح مقطع ریشه را با مساحت کل خاک (RAR) محاسبه نمودند. آنها دریافتند که حداکثر ریشه در عمق ۳۰ cm و معادل ۱۱٪ و تا عمق ۷۰ سانتی متری میزان آن به ۰/۱ درصد کاهش می‌یابد و در ترانشه موازی با شیب تغییرات سطح مقطع ریشه ناچیز و حدود ۰/۱۵ درصد بود.

ریشه گیاهان همانند میله‌گرد در بتن سبب مسلح شدن خاک می‌شود. بنا به گزارش نیلاورا [۲۱] آزمایش‌های برش آزمایشگاهی برای سامانه ریشه‌های زنده انجام داد و نیلاورا مقاومت کششی ریشه را در برابر قطر رسم کرد و نشان داد که با افزایش قطر ریشه درخت مقاومت کششی آن کاهش می‌یابد. به نقل از گزارش شیردلی. ع و هادی سیاسر [۲۸] داودی و همکاران در سال (۲۰۰۴) رابطه نمایی بین مقاومت کششی و قطر ریشه درخت بید را ارایه کردند. زایمر و سوان استون [۳۹] کاهش مقاومت کششی ریشه‌ها را بعد از قطع درختان بعد از بررسی مورد تایید قرار دادند. والدرون و داکسیان [۳۲] یک سری آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی ریشه‌های دو گیاه جو و کاج را انجام دادند. هنگ چاوینچ [۱۶] میزان مقاومت کششی ریشه و تیوار را بین ۴۰ تا ۱۲۰ مگا پاسکال را اعلام داشت. کرو گستاد [۲۰] با استفاده از اطلاعات زایمر میزان مقاومت کششی ریشه‌های گیاهان زیادی را در مقابل قطر ریشه رسم نمود و نشان داد که میزان مقاومت کششی ریشه حتی در درون یک گونه گیاهی

به میزان زیادی متغیر می‌باشد که این تغییرات وابسته به نوع گونه، شرایط اقلیمی و نوع خاک بستر و شرایط رطوبتی است و ایشان. مقاومت کششی ریشه‌ها را با پوست یا بدون پوست انجام می‌داد.

در مورد تخریب ریشه‌ها باید گفت وقتی که میزان تنش تخریبی بیشتر از مقاومت ریشه‌ها شود اول یکی از ریشه‌های فرعی تخریب گردیده بعد از آن ریشه فرعی دیگر نیز تخریب می‌گردد در نتیجه فرایند تخریب سامانه ریشه تکمیل می‌شود که به آن تخریب پیش رونده می‌گویند.

گری و مک دونالد [۱۰] بیان داشت به ازای یک واحد افزایش تراکم ریشه‌ها در واحد متر مکعب خاک، میزان افزایش مقاومت برش از ۷،۴ Psi/ib به ۸،۴ Psi/ib تغییر می‌کند. هنگ چاوینچ (۲۰) بیان نمودند که ویتیوار می‌تواند ۱۶-۱۰ کیلو پاسکال به ازای هر یک کیلو ریشه در واحد متر مکعب خاک باعث افزایش مقاومت برش بلوک خاک گردد. والدرون [۳۱] رابطه خطی بین افزایش مقاومت برش خاک و درصد سطح مقاومت ریشه‌های جو ارایه نمود. زایمر و اسوتستون [۴۰] رابطه خطی بین تنش کششی در درون ریشه با مقاومت برش خاک را نشان دادند.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی میزان تاثیر مقاومت مکانیکی ریشه‌های درختان بومی سردسیر ایران بر افزایش مقاومت برشی خاک و در نتیجه پایداری سواحل رودخانه‌ها به‌ویژه در سواحل زنجانرود می‌باشد.

تحلیل پایداری

روش‌های تحلیل پایداری که برای محاسبه پایداری شیب‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد مبتنی بر تعادل محدود بین نیروهای برش و مقاومت برش است معروف‌ترین آنها روش بیشاب، فلینوس، مورگانسترن و جانبو می‌باشد.

ممکن است تحلیل پایداری شیب با روش شیب نامحدود استفاده شود که در این روش نظریه تنش مؤثر با استفاده از روش تعادل حدی محاسبه می‌شود. این روش بیشتر در سواحل کم شیب رودخانه‌ها و در خاک‌های کم عمق استفاده می‌شود.

$$F_s = \frac{C' + (\gamma Z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma_{sat} \sin \beta \cos \beta} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در رابطه (۱۲)، ϕ' زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک، C' چسبندگی مؤثر خاک، γ چگالی ویژه خاک، Z ضخامت خاک روی سطح لغزش در امتداد قائم β زاویه شیب توده (درجه)، γ_w چگالی ویژه آب بر حسب kN/m^3 و h_w ضخامت لایه آبدار روی سطح لغزش در امتداد قائم می‌باشد. در هر دو حالت فوق اثر وجود ریشه اغماض می‌شود.

در صورتی که اثر وجود ریشه در این روابط لحاظ شود رابطه فوق به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$F_s = \frac{C' + \Delta S + (\gamma_z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma_w \cdot z \cdot \sin \beta \cos \beta} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

بازه‌ای به طول ۴۰ کیلومتر در محدوده شمالی زنجان به لحاظ تراکم و تنوع پوشش گیاهی انتخاب شد و کلیه آزمایش‌های صحرایی در این محدوده انجام گرفت (شکل ۱) جدول (۱).

درختان این محدوده شامل بید، پده، نارون، سنجد، تبریزی و گز بودند ولی درخت تبریزی در حاشیه رودخانه رویش نداشت. عمده اراضی تا لب رودخانه دارای مالکیت ویژه بود که انجام مطالعات با کسب اجازه آنها کار میسر می‌شد.

به منظور شناخت وضعیت سامانه ریشه، درختانی که دارای عمر بیش از ۴ تا ۵ سال بودند، انتخاب گردیدند. ابتدا قطر ساقه و عرض تاج درخت اندازه‌گیری شد سپس درخت از ناحیه سطح زمین قطع گردید و محدوده‌ای به ابعاد ۴×۴ متر مربع انتخاب شد. با بیل مکانیکی خاک اطراف تا عمق ۳ متر خارج گردید به گونه‌ای که این بلوک به صورت ستونی در مرکز بود. در مرحله بعد کل مجموعه ریشه خارج و با حمل در انبار نسبت به بازسازی وضعیت استقرار ریشه اقدام و سپس بر طبق روش و همکاران [۳۴] ژئومتری ریشه‌ها تعیین شد.

از اینرو تعدادی نمونه ریشه در اقطار مختلف که طول آنها ۱۵ سانتی‌متر بود از ریشه درختان ذکر شده در محل تهیه و با دستگاه مقاومت کششی Hounsfield مدل H₂SK_S ساخت انگلستان مقاومت کششی تعیین شد. ریشه‌ها بدون پوست بودند و سرعت باز و بستن فک‌های کششی ۵ میلی‌متر در دقیقه بود. در مجموع تعداد ۷۵

در رابطه فوق، ΔS افزایش مقاومت خاک در اثر وجود ریشه است. اگر خاک غیر چسبنده باشد $C' = 0$ و در نتیجه آن ضریب اطمینان برابر است با:

$$F_s = \frac{\tan \phi' + \Delta S}{\tan \theta} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

θ زاویه بین ریشه و سطح لغزش است

کوپین و ریچارد (۶) تأثیر حضور ریشه در افزایش مقاومت خاک مربوط به افزایش چسبندگی خاک (C_R) و مؤلفه نیروی مقاومت کششی ریشه در امتداد سطح لغزش (T) دانست و رابطه زیر را ارائه نمود.

$$F_s = \frac{(C' + C'_R) + [(y_z - \gamma_w h_w) + W] \cos^2 \beta + T \sin \theta}{[(y_z + W) \sin \beta + D] \cos \beta} \{\tan \phi' + T \cos \theta\} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه (۱۵)، C'_R چسبندگی مؤثر خاک افزوده شده در اثر وجود ریشه، D نیروی باد در امتداد شیب، W وزن گیاه، T نیروی کششی ریشه در سطح لغزش، بر اساس این نظریه ضریب اطمینان C'_R به میزان ۱۷٪ و تحت تأثیر نیروی T و C'_R به میزان ۵۵٪ افزایش می‌یابد. گرین وی [۱۶] این میزان را ۲۹٪ اعلام داشته است.

روش پژوهش

در پژوهش حاضر ابتدا به منظور شناسایی مسیر و گونه‌های گیاهی موجود در سواحل، بازدید از کل مسیر زنجان رود انجام و سپس

جدول ۱- مختصات مکانی محل آزمایشات صحرایی (مقاومت خاک با ریشه و ژئومتری ریشه‌ها)

موقعیت	عرض جغرافیایی در سامانه UTM	طول جغرافیایی در سامانه UTM	نمونه‌های گیاهی مورد آزمایش در محل
۱	۳۶۴۰/۷۰۹	۴۸۲۶/۳۸۵	سنجد
۲	۳۶۴۲/۵۸۳	۴۸۲۲/۹۰۷	پده- گز
۳	۳۶۴۲/۷۰۲	۴۸۲۳/۱۹۳	نارون
۴	۳۶۴۴/۲۵	۴۸۱۷/۲۰۳	بید- گز
۵	۳۶۴۹/۴۰۱	۴۸۱۱/۴۹۶	بید- گز



شکل ۱- نقشه محدوده مطالعاتی زنجان رود

و قالب ۱×۱ متر در محیط بلوک خاک و ریشه نصب می‌شد بعداً جک در فضای ایجاد شده قرار می‌گرفت و سامانه هیدرولیک آن به تراکتور وصل و آزمایش انجام می‌شد و میزان فشار و جابجایی بلوک نسبت به زمان ثبت می‌شد و در خاتمه آزمایش قطر ریشه و توزیع آنها ثبت می‌شد.

نتایج

- درصد تراکم ریشه‌ها یکی از عوامل مهم در افزایش مقاومت برشی خاک و افزایش پایداری خاک در مقابل لغزش می‌باشد. ریشه‌ها ممکن است در جهت‌های افقی و عمودی رشد کنند و لذا تعیین درصد تراکم ریشه به صورت دستی مشکل می‌باشد از اینرو مدلی ریاضی بر اساس نتایج اندازه‌گیری تهیه و تدوین گردید تا درصد تراکم را در اعماق مختلف پیش‌بینی نماید.

تصویر (۲-الف و ب): طرز قرار گرفتن جک و صفحه فولادی قبل از شروع آزمایش برش بلوک با درخت انتخاب شده و شاهد (بدون درخت) را در عرصه نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج اندازه‌گیری مقاومت کششی ریشه‌ها و نیروهای حد گسیختگی برای اقطار ریشه تا ۱۵ میلی‌متر معادلات ۱۶ تا ۲۰ به ترتیب برای درختان نارون، پده، گز، بید و سنجد استخراج شده است.

آزمایش بر روی نمونه‌های پده، گز، بید، سنجد و نارون (هر کدام به تعداد ۱۵ نمونه) انجام شد.

اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک دارای ریشه با آزمایشاتی در محل انجام شد. ابتدا یک جک هیدرولیکی، که شفت آن دارای حرکت مستقیم‌الخط رفت و برگشتی بوده و با فشار ۳۰۰ bar کار می‌کند، ساخته شد این سامانه با یک سری شلنگ‌های هیدرولیکی به سامانه هیدرولیکی تراکتور وصل می‌شود اهرم‌های کنترل و فرمان آن در محدوده ۲ متری جک قرار داشت و بر روی این قسمت فشارسنج نصب شده بود که فشار توسط آن قرائت می‌شد. قطر شفت جک ۵ سانتی‌متر و قطر پیستون جک ۱۵ سانتی‌متر بود. برای اینکه سطح گسیختگی افقی داشته باشیم از یک قالب فلزی به ابعاد ۱×۱×۰/۵ متر که از ۴ طرف دور بلوک خاک را محصور می‌نمود استفاده گردید. همچنین جهت اینکه تکیه‌گاه جک تحت نیروی عکس‌العمل لغزش نداشته باشد از یک صفحه‌ای فولادی تقویت شده (به عنوان سپر) به ابعاد ۱×۲ متر و با شمع‌هایی در پشت استفاده شد. (تصویر شماره ۲-الف و ب).

بعد از انتخاب درخت و محل آزمایش، درخت از ناحیه تاج قطع می‌شد بعد بلوکی به ابعاد ۱×۱ متر با مرکزیت تاج درخت گچ‌ریزی و حفاری می‌شد و بلوک خاک مشابه بدون درخت در جوار آن ایجاد می‌شد سپس سپر فولادی در محل تکیه‌گاهی قرار می‌گرفت



تصویر ۲-الف و ب: طرز قرار گرفتن جک و صفحه فولادی

مقاومت برش خاک براساس نظریه وو و همکاران (۳۵) و بارکر (۱) از رابطه زیر بدست می آید.

$$\Delta S = 1.15 \frac{\sum_{i=1}^n A_i T_i}{A} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

نتایج نشان داد، (جدول ۲) مقاومت برشی خاک برای درخت گز در عمق ۱۴۰ سانتی متری عمود بر ساحل به میزان ۱۴،۴۶ کیلو پاسکال و برای درخت پده در عمق ۲،۲ متری به میزان ۱۷،۷۵ کیلو پاسکال افزایش یافته است.

- نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی در محل برای درختان پده، سنجد، نارون، گز و بید در مقابل نمونه‌های شاهد بدون درخت مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۳) نتایج اندازه‌گیری در این پژوهش و نتایج پژوهش‌های سایر پژوهشگران در میزان درصد افزایش مقاومت برشی بلوک‌های خاک برای انواع گونه‌ها ارائه شده است. در میزان افزایش مقاومت برشی بلوک‌های خاک با ریشه درختان گز و پده نسبت به بلوک‌های شاهد یا بدون ریشه تا حدود ۵۰ درصد، با ریشه درختان بید حدود ۲۵ درصد، با ریشه درختان سنجد حدود ۴۰ درصد و با ریشه درختان نارون حدود ۵۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش داشته است و برای درختان گز و پده معادلات ذیل استخراج گردید.
درخت گز:

$$S = -14.6 \ln(D) + 39.24 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$S = -16.41 \ln(D) + 40.985 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$S = -16.41 \ln(D) + 40.985 \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$S = -13.67 \ln(D) + 40.16 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$S = -19.09 \ln(D) + 47.94 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

که در این معادلات S مقاومت کششی ریشه بر حسب $(\frac{N}{m^2})$ و D قطر ریشه بر حسب (mm) می‌باشد. در جدول (۲) نتایج اندازه‌گیری در این پژوهش و نتایج پژوهش‌های سایر پژوهشگران ارائه شده است.

- محاسبه افزایش مقاومت برش خاک با استفاده از داده‌های مقاومت کششی ریشه‌ها در هر عمق نیاز به مدل ژئومتری ریشه داشت. از اینرو برای دو گونه گز و پده مدل ریاضی به فرم ذیل تهیه شد.

$$D = D_2 - \frac{(D_2 - D_1)(Z - Z_2)}{(Z_1 - Z_2)} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در رابطه فوق، D_2, D_1 قطر ریشه در ابتدا و انتهای ریشه و Z_2, Z_1 عمق دو طرف آن می‌باشد. از اینرو قطر ریشه D در هر عمق قابل استخراج می‌باشد. در حقیقت $F = \sum_{i=1}^n A_i$ برای کل ریشه‌های عمودی از هر سطح برش قابل محاسبه می‌باشد که در اینجا A سطح مقطع ریشه و T_i حداکثر مقاومت کششی ریشه است. میزان افزایش

جدول ۲- ارزیابی نتایج اندازه‌گیری مقاومت ریشه‌های گونه‌های گیاهی حاشیه زنگان رود با نتایج سایر پژوهشگران

ردیف	مقاومت کششی ریشه (Mpa)	نام پژوهشگر و سال	نام فارسی	نام انگلیسی
۱	۹-۳۶	Schiecht- 1980	بید مجنون	<i>Salix babylonica</i>
۲	۵-۳۸	Schiecht- 1980	سپیدار یا صنوبر	<i>Populus alba</i>
۳	۷-۷۴	Schiecht- 1980	توسکا	<i>Alnus spp</i>
۴	۱۹-۶۱	Schiecht- 1980	صنوبر داگلاس	<i>Populus Douglas</i>
۵	۱۵-۳۱	Schiecht- 1980	جو	<i>Hordum vulgariss</i>
۶	۲-۲۰۰	Schiecht- 1980		<i>Poa peratensis</i>
۷	۲-۷	Schiecht- 1980	چمن خزه	<i>mass</i>
۸	۱۷/۶	O'Loughlin&Watson-1979	کاج	<i>Pinus eldarica</i>
۹	۴۰-۱۲۰	Hengechaovanich-2000	ویتوتر	<i>vitewar</i>
۱۰	۴-۳۰/۲	Shirdeli-2010	گز	<i>Tamarix</i>
۱۱	۳/۲-۲۹/۶۱	Shirdeli-2010	پده	<i>Populus euphratica</i>
۱۲	۵/۶-۲۹/۱۲	Shirdeli-2010	نارون	<i>Ulmus nigra</i>
۱۳	۴-۳۴/۷	Shirdeli-2010	سنجد	<i>Elaeagnus spp</i>
۱۴	۸/۶۸-۳۰/۶۸	Shirdeli-2010	بید	<i>Salix Spp</i>

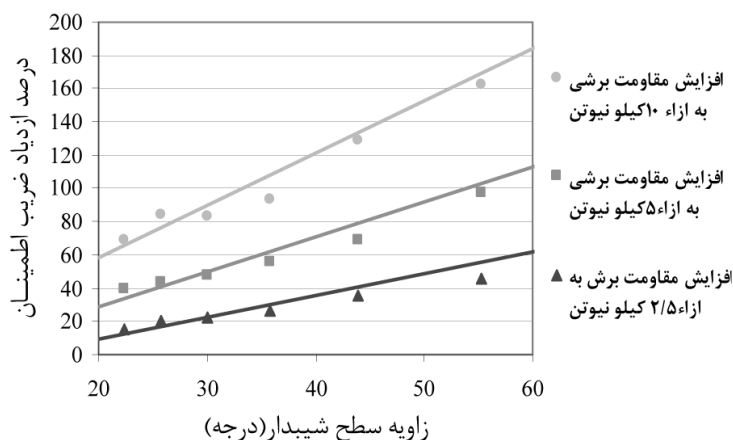
بر اساس شکل (۳) میزان ضریب اطمینان در مقابل تغییرات مقاومت برشی تا ۱,۵ برابر افزایش یافت. برای مقادیر کم ΔS پایداری شیب خاک به ازای شیب ۴۰ درجه تا ۳۸ درصد افزایش داشت و نشان‌دهنده اینست که به مرور زمان بدلیل رشد گیاهان، بر پایداری شیب‌های خاکی اضافه می‌گردد. هرچه سن درخت بیشتر باشد بر میزان مقاومت برشی لایه‌های عمیق‌تر افزوده می‌شود. مقدار نسبت (A_z/A) در لایه سطحی کم و با افزایش عمق، افزایش یافته

$$\Delta S = 798.88 \left(\frac{A_z}{A} \right) \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

درخت پده:

$$\Delta S = 481.74 \left(\frac{A_z}{A} \right) \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

در این روابط A_z مساحت سطح مقطع ریشه‌های عبوری از صفحه افقی برش و A مساحت سطح کل ناحیه عبور ریشه‌ها است.



شکل ۳- تاثیر ریشه گیاهان بر درصد افزایش ضریب اطمینان در شیب‌های مختلف

جدول ۳- ارزیابی نتایج اندازه‌گیری شده افزایش مقاومت برشی خاک باریشه گونه‌های گیاهی در ساحل زنگانرود با نتایج سایر محققان

نام انگلیسی	نام فارسی	نام پژوهشگر و سال	درصد افزایش مقاومت برشی خاک یا ضریب اطمینان	افزایش مقاومت برشی خاک (KPa)	ردیف
<i>Poa peratensis</i>	چمن	USDA-ARS-2006	٪۲۷-٪۴۰	-	۱
<i>Alnus spp</i>	توسکا	Goldsmi- 1998	٪۱۸۵۰	-	۲
<i>Salix alba</i>	بید	Goldsmi- 1998	٪۲۰۰	-	۳
-	انواع گونه‌ها	Barker & wu-1986	٪۱۵	-	۴
<i>Vitewar</i>	ویتووتر	Hengechaovanich-1999	-	۱۰-۱۶	۵
<i>Pinus Yumanenu</i>	کاج	Use & et. al. -1997	٪۳۸	۵/۷	۶
-	-	Gray and Mac onald-1980	-	۲۲/۵	۷
<i>Eucalyptus elata</i>	اکالیپتوس و اکاسیا و دودرخت	Doker &HubbLe-2003	٪۵۰-٪۲۱۵	-	۸
<i>Pinus Yumanenu</i>	دیگراسترالیایی کاج	Van Beek & et.al	-	۱۸	۹
-	-	Davoodl & et.al.-2004	٪۳۵-٪۳۷	-	۱۰
<i>Tamarix</i>	گز	Shirdeli-2010	٪۶۰	۱۵	۱۱
<i>Poplus euphratica</i>	پده	Shirdeli-2010	٪۵۶	۱۴	۱۲
<i>Ulmus ssp</i>	نارون	Shirdeli-2010	٪۵۰-٪۱۰۰	۳۰	۱۳
<i>Elaeagnus spp</i>	سنجد	Shirdeli-2010	٪۳۸	۸	۱۴
<i>Salix Spp</i>	بید	Shirdeli-2010	٪۲۵	۷	۱۵

۱۰۰٪/۲۵٪ افزایش می‌دهد. جدول (۳) نتایج سایر پژوهشگران در این جدول ارائه شده است.

پیشنهادات

- پیشنهاد می‌گردد اثر قطر ساقه، ارتفاع درخت و عرض سایه‌انداز بر ناپایداری سواحل مورد بررسی قرار گیرد.
- نقش تأثیر بادها بر ناپایداری سواحل زنجان رود مطالعه گردد.
- مطالعه جداگانه بر روی اثر درخت نارون بر افزایش مقاومت برشی خاک انجام گردد.

مراجع

- 1- Barker, D. H. 1986. Enhancement of slope stability by vegetation. Grounding. London, 19,11-14pp
- 2- Bishop, D.M. and Stevens, M.E. 1964. Land Slides on Logged Areas In Southeast Alaska, USDA forest Service Research Paper N OR -1,18pp.
- 3- Bohm, W. 1979. Methods of Surveying Root System, Springer Verlag, Berlin.
- 4- Braja, M. Das, Translated by Atyabi, A. 2003, Principles of Geotechnical Engineering, Academic Press Book
- 5- Coppin, N.J. and Richards, I.G. 1990. Use of Vegetation in Civil Engineering, Construction Industry Research and information Association Butterworths, Landan
- 6- Docker, B.B. Hubble, T.C.T. 2008. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species, Science Direct, www.Sciencedirect.com.
- 7- Ebnejalal, R. and Shafai Bejestan, M1994, "Theoretical and Practical Principles of Soil Mechanics", Shahid Chamran university Press, Ahwaz, Iran.(In Persian)
- 8- Cofie, P., Koolen, A.J. and Perdok, U.D. 2000. Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems, Journal of Soil and Tillage Research 57(2000) 1-12.
- 9- Gray, D.H. 1994. Influence of vegetation on the stability of slope, Jon WILEY & Sons
- 10- Gray, D.H. 1978. Role of Woody vegetation In Reinforcing Soils And Stabilizing Slopes" Proceedings of the Symposium on Soil Reinforcement a Stabilizing Techniques, Sydney., Australia, pp. 252-306.

و سپس کاهش می‌یابد. برای درخت پده حداکثر عمق توسعه ریشه ۱۳۷ سانتی متر و عمق حداکثر (A_c/A) ، ۷۳ سانتی متر بدست آمد. میزان شعاع تأثیر ریشه درخت گز ۳ متر و برای درخت پده حدود ۱۲ متر مشاهده گردید. ریشه درخت نارون افشان بود. به عبارتی دیگر در محل انتهایی ساقه درخت چندین ریشه اصلی و فرعی از ساقه منشعب می‌گردید و در نتیجه ریشه‌های جانبی منشعب شده از ریشه اصلی نارون بیشتر از گز و گز بیشتر از پده بود. خاصیت شاخه‌زنی ریشه گز بیشتر از پده مشاهده گردید و قطر اکثر ریشه‌های درخت گز ۲ سانتی متر و فقط قطر ریشه اصلی بیشتر از این مقدار بود و درخت پده نیز ریشه‌هایی با قطر بزرگتر ولی سطحی داشت.

نتیجه‌گیری

بررسی‌ها (شکل ۱ و جدول ۱) نشان می‌دهد پوشش گیاهی موجود در اطراف رودخانه زنجانرود تا شعاع ۳۰ کیلومتری باعث مهار فرسایش شده است و حتی رسوب‌گذاری و تثبیت سواحل رودخانه را موجب گردیده است و در خارج از شعاع ۳۰ کیلومتری رودخانه شکل شریانی و پیچانرودی بخود گرفته است. از اینرو مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بر روی میزان شعاع تأثیر ریشه و مقاومت خاک با ریشه تمرکز گردید.

- میزان شعاع تثبیت کنندگی درخت گز ۳ متر و درخت پده ۵ - ۷ متر و حداکثر ۱۲ متر بدست آمد و برای درخت نارون بدلیل متراکم بودن درختان در محل امکان تعیین شعاع تأثیر فراهم نشد.

- درخت گز دارای یک ریشه اصلی که بطور تقریباً عمودی در خاک رشد می‌کند و ریشه‌های جانبی قطر ریشه‌ها در گز کمتر از ۲ سانتی‌متر ولی ریشه‌های درخت پده کمی قطورتر و سطحی مشاهده گردیدند.

- آزمایش برش در محل، میزان تأثیر وجود ریشه‌ها را در افزایش مقاومت برش خاک نشان داد.

- به علت بالا بودن تراکم ریشه درخت گز رودخانه‌ای و همچنین تعداد بیشتر و تطابق‌پذیری محیطی بالای آن نسبت به سایر گونه‌ها، برای مسلح‌سازی خاک در اعماق کمتر و در کوتاه مدت توصیه می‌شود. در دراز مدت با کاشت درختان پده و نارون می‌توان مسلح‌سازی خاک را تقویت نمود. سایر درختان بدلیل عدم خودرو بودن با کاهش میزان آب و اثرات خشکسالی خشک شده و نیاز به کشت مجدد دارند.

- درخت گز پا کوتاه بوده، بصورت خودرو و در منطقه قابل گسترش می‌باشد و عمق ریشه آن به میزان ۲۰ متر هم مشاهده شده است. در شرایط ترسالی و خشکسالی نیز حفظ بقاء نموده و لذا می‌توان از آن به عنوان گونه ماندگار زیستی در تثبیت سواحل رودخانه زنجان رود استفاده نمود.

- پوشش گیاهی حتی به میزان اندک می‌تواند تأثیر زیادی بر روی افزایش پایداری شیب‌های خاکی سواحل زنجانرود داشته باشد و افزایش مقاومت برشی خاک شیب ساحل یا ضرایب اطمینان را

and Erosion in New Zealand Steep Lands, Paper presented to Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii.

25-Shafaei Bejestan, M. and Salami, M.G.S. 2001. Effect of vegetation on the stability of Karoon river banks, Final Research project report, Iranian Water Resource Management Company, Ministry of Power, Tehran, Iran. (In Persian)

26-Shewbridge S.E and Sitar N.(1990) Deformation-based model for reinforced land. In. Journal of Geotechnical Engineering, 116, 1153-1170.

27-Shewbridge S.E and Sitar N. (1989) Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. Protection.

28-Shirdeli, A. 2006. "Effects of biotechnology on slope stability methods in Sistan River banks, Research project Zabol University, Zabol. (In Persian)

29-Waisel, Y., Eshel, A. and Kafkafi, U. 1991. Plant Roots: The Hidden Half. Marcel.

30 -Waldron, I.J. 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous striated soil. Journal of the soil science society of America, 41:843-849.

31-Waldron, I.J. and Dakessian, S. 1981. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil science, 132, 428-435.

32-Wilde, S. 1958. Forest Soils: Their Protection And Relation To Silviculture", Ronald Press. New York.

33-Wu T.H. and Beadapura D. and Beal P.E (1988) A statistical model of root geometry. Forest Science, 34, 4, 980-998.

34-Wu, H.T., Beal, P.E. and Ian, C. 1988. In situ shear test of soil-root systems Journal of Geotechnical Engineering 114, 1376-1394.

35- Wu, H.T., Mcomber, R.T. and Beal, P.E. 1988. Study of soil-root interaction. Journal of Geotechnical Engineering 114, 1351-1375.

36- Wu, H.T. and Watson, A. 1998. In situ shear tests of soil blocks with roots Canadian geotechnical journal 35:579-590.

37-Yasi, M. 1988, Modification of stream reach

11-Gray, D.H. and MacDonald, A. 1986. Role of vegetation in river bank, erosion Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 218-223.

12- Gray, D.H. and Megahan. 1980. Forest Vegetation Removal And Slope Stability In the Idaho, Batholith", USDA Research Paper INT-271, Ogden UT, 23PP.

13- Gray, D.H. and Sotir. 1996. Biotechnical Stabilization of Steepened Slopes", Transportation Research Board Record No. 1474, National Academy Press, National Research Council, pp23-36.

14-Gray, D.H. and Ohashi, H. 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. Journal of Geotechnical Engineering, 109, 335, 353.

15-Greenway, D.R. 1987. Vegetation And Slope Stability, Wiley chichester, pp.187-230

16-Hengechaovanich D. 1999. 15 years of bioengineering in the tropics" The First Asia.

17- Hengechaovanich, D. 2000. Pacific on France on ground and water bioengineering.

18- Hengechaovanich, D. 2000. Use of Vetiver grass for engineering purposes in Malaysia Will particular reference to slope stabilization and erosion control. Wowed. Vetiver. Corn.

19 -Krogstad, F. 1997. Root reinforcement of unstable hill slopes. Students. Washington, edu.

20-Nilaweera, N.S. 1994. Influence of Hardwood Roots On Soil Shear Strength And Slope Stability In Southern Thailand, Ph.D. Dissertation Asian Institute of Technology, Bangkok.

21-Nilaweera, N.S. and Nutailand, P. 1999. Role of tree roots in slope stabilization, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Springer Publishing, Vol.57.

22-Natasha, P. 2006. Temporal and spatial variability in root reinforcement of stream banks, Accounting for soil shear strength and Moisture, Science Direct www. Scimedirect.com.

23- O'Loughlin, C.L. and Watson, A.J. 1979. Root Wood Strength Deterioration In radiate Pine After Clear felling", New Zealand Journal of Forestry Science 9(3):248-293.

24-O'Loughlin, C.L. 1984. Effective of Introduced Forest Vegetation for Protecting against Landslides

strength changes after logging southeast Alaska.
USDA for serve . Res .note PNW-306

40- Zimre, R.R. 1981. Roast and the stability of
forested slopes . In erosion and sediment Transport
in Pacific Rim steep lands .I.AH .S. PUBLISH .No
132.

and protection of flood walls using natural materials,
M.Sc. thesis , Dept. of Irrigation Engineering , Shiraz
University. .(In Persian)

38-Zimer, R.R. 1981. The rote of vegetation in
the stability of forested slope, proceedings refer
-exposes IUFRO.PP.297-308.

39- Zimer, R.R. and Svanston, D.N. 1977. Root