

تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه‌ی قزل اوزن با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی

محمدحسین رضایی مقدم* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز
محمدرضا ثروتی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
صیاد اصغری سراسکانرود - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۷/۲۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۱۰/۸

چکیده

ناپایداری مجرای رودخانه، نقش به‌سزایی در ایجاد فرسایش، تخریب سواحل و تأسیسات کناره‌ی رودخانه دارد. این نقش به‌ویژه هنگامی تشدید می‌شود که مجرا و بستر رودخانه آبرفتی باشد. رودخانه‌ی قزل اوزن یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های ایران است. این رودخانه اثریافته از عوامل مختلفی چون، زمین‌شناسی منطقه، ویژگی‌های تشکیلات آبرفتی و شرایط هیدرولیکی جریان، رفتار مورفولوژیکی پویایی دارد. هدف این پژوهش، بررسی وضعیت پایداری رودخانه با استفاده از روش‌های تجربی و ریاضی و مقایسه‌ی نتایج این روش‌ها با نتایج مطالعات صحرایی و ویژگی‌های مورفولوژیک هر کدام از بازه‌های مورد مطالعه در طبیعت است. برای رسیدن به این هدف، در این پژوهش با استفاده از روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر، وضعیت پایداری رودخانه تحلیل و سپس نتایج روش‌های گفته‌شده با مطالعات و اندازه‌گیری‌های صحرایی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در بازه‌ی اول محدوده‌ی مورد مطالعه، نتایج روش‌های تجربی با مطالعات صحرایی هم‌خوانی دارد؛ ولی در بازه‌های دوم و سوم نتایج روش‌های تجربی با مطالعات صحرایی هم‌خوانی ندارد. این بررسی نشان داد که روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر، تنها در مجراهای آبرفتی اهمیت داشته و به نتایج آنها می‌توان استناد کرد. به‌کارگیری این روش‌ها در بازه‌های غیرآبرفتی، نتایج غیرواقعی و دور از انتظار خواهد داشت و با ویژگی‌های مورفولوژیک رودخانه‌ی مورد مطالعه هم‌خوانی نخواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: ناپایداری مجرا، روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر، رودخانه‌ی قزل اوزن.

مقدمه

ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه، نه تنها سبب خسارت به اراضی مستعد کشاورزی و تأسیسات مجاور ساحل رودخانه شده، بلکه رسوبات حاصل از فرسایش، در برخی مواقع، درصد چشمگیری از مجموع کل رسوبات انتقالی به‌وسیله جریان رودخانه را شامل می‌شوند. ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه، به دلیل تأثیرگذاری بر میزان فرسایش و ویژگی‌های مجاری رودخانه‌ها، در گسترش پهنه سیلابی و مدیریت منابع آب اهمیت دارد (مینگوی و همکاران^۱، ۲۰۱۰: ۳۹۱). در رودخانه‌هایی که هنوز به نظام تعادلی خود نرسیده‌اند، تعریض و تعمیق رودخانه و در رودخانه‌های پیچان، عقب‌نشینی ساحل خارجی از پدیده‌های عادی به‌شمار می‌روند (تورون و همکاران^۲، ۱۹۸۱: ۴۷۱). پدیده‌هایی همچون فرسایش، رسوب‌گذاری و تغییرات رودخانه‌ای، واکنش‌هایی است که رودخانه برای رسیدن به شرایط پایدار ایجاد می‌کند و این واکنش‌ها ممکن است منجر به خسارت‌های چشمگیری شود. دلایل عمده ناپایداری سواحل و دیواره‌های رودخانه را می‌توان شسته‌شدن ذرات خاک در اثر جریان و امواج، شسته‌شدن پاشنه‌ی شیب سواحل و ریزش و گسیختگی درونی آن، افزایش شیب سواحل در اثر فرسایش آب و آب‌شستگی، افزایش فشار آب منفذی در حالت کاملاً اشباع، گسیختگی درونی شیب به‌علت نشت آب به‌سمت رودخانه، فرسایش ناشی از ورود زه آب‌های کشاورزی و عوامل بسیار دیگر برشمرده (غفاری و همکاران، ۱۳۸۵: ۶۲، به نقل از رفاهی، ۱۳۷۵). از سوی دیگر، پایداری رودخانه نیز تحت تأثیر مؤلفه‌های درونی و خارجی سیستم رودخانه‌ای است. مؤلفه‌های خارجی شامل متغیرهای اقلیم، پوشش گیاهی، فعالیت‌های انسانی و شیوه‌ی یخ‌زدن و ذوب‌شدن است (افضلی‌مهر و دی^۳، ۲۰۰۹: ۲۳۶؛ برترند و پاپانیکولاو^۴، ۲۰۰۹: ۶۴۸۰) و مؤلفه‌های خارجی نیز شامل مورفولوژی رودخانه، مانند انواع الگوهای رودخانه (مئاندری، شریانی و مستقیم) ویژگی‌های هندسی و هیدرودینامیکی قوس‌های رودخانه‌ای، مواد بستر و کناره‌های رودخانه، متغیرهای هیدرولوژیکی جریان و عامل تنش برشی است (مینگوی و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۹۱؛ توکالدنی و همکاران^۵، ۲۰۰۷: ۱۱۶۸؛ ساسانی و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۶۳) تغییر هر کدام از مؤلفه‌های درونی و خارجی پایداری رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اگرچه، عوامل کنترل‌کننده فرسایش و رسوب‌گذاری و به‌دنبال آن پیش‌بینی تغییرات بستر و شکل پلان امکان‌پذیر است؛ ولی پیش‌بینی میزان دقیق این تغییرات و شبیه‌سازی عددی آن بسیار مشکل است، با این حال می‌توان با نظارت بر تغییرات ریخت‌شناسی که در طول رودخانه رخ می‌دهد، تدابیر ویژه‌ای برای جلوگیری از بروز ناپایداری به‌وسیله‌ی شناسایی شاخص‌های ناپایداری مجرا اندیشید. در جدول شماره ۱ شاخص‌های ناپایداری مجرا و آثار آنها بر مجرا آورده شده است.

۱. Minghui et al

۲. Thorne et al

۳. Afzalimehr and Dey

۴. Bertrand and papanicolaou

۵. Tokaldany et al

جدول ۱. شاخص‌های ناپایداری مجرا و آثار آنها

شاخص‌ها	نوع اثر بر مجرا
<p>۱- شواهد مطالعات میدانی</p> <p>۱-۱- مورفولوژی مجرای اصلی</p> <p>الف : سازه‌های حفاظت از کناره‌ی رودخانه</p> <p>ب : فرسایش بدون ایجاد پشته‌های رسوبی</p> <p>ج : فرسایش با ایجاد پشته‌های رسوبی</p> <p>د : کاهش مقطع به دلیل تراکم پوشش گیاهی - کاهش ظرفیت بده عبوری - مجراهای شریانی شده</p> <p>ه : توسعه‌ی مقطع - افزایش ظرفیت بده عبوری</p> <p>و : افزایش فرسایش کناره در پیچان‌رودها و در نهشته‌های رسوبی بدون پوشش گیاهی</p>	<p>کف‌کنی</p> <p>کف‌کنی</p> <p>ترازافزایی</p> <p>ترازافزایی</p> <p>کف‌کنی</p> <p>ترازکاهی</p>
<p>۲-۱- طبقه‌بندی رسوبی سیلاب‌دشت</p> <p>الف : خاک دفن‌شده به‌وسیله‌ی آبرفت</p> <p>ب : قرارگیری مواد ریزدانه (بار معلق) بر روی مواد درشت‌دانه (بار بستر)</p> <p>ج : تراز نهشته‌های رسوبی از نهشته‌های فسیلی بی‌حفاظ در کناره‌ی رودخانه بالاتر است.</p> <p>د- تراز نهشته‌های رسوبی از نهشته‌های فسیلی بی‌حفاظ در کناره‌ی رودخانه پایین‌تر است.</p>	<p>ترازافزایی</p> <p>ترازافزایی</p> <p>ترازافزایی</p> <p>کف‌کنی</p>
<p>۳-۱- مورفولوژی سیلاب‌دشت</p> <p>الف : وجود سامانه‌ی چندشاخه‌ی غیرفعال در سیلاب‌دشت</p> <p>ب : وجود تراس‌ها و سیلاب‌دشت‌های غیرفعال</p>	<p>لازم است پایداری آن بررسی شود.</p> <p>کف‌کنی (در درازمدت) ترازافزایی (در دوره‌های ۱۰ تا ۱۰۰ ساله)</p>
<p>۲- تراز جریان</p> <p>الف : افزایش تراز بده متوسط سالانه در طول دوره‌ی آماری درازمدت</p> <p>ب : کاهش تراز بده متوسط سالانه در طول دوره‌ی آماری درازمدت</p>	<p>ترازافزایی</p> <p>کف‌کنی</p>
<p>۳- شواهد تاریخی</p> <p>الف : تغییرات در مقطع عرضی</p> <p>ب : افزایش ضریب خمیدگی</p> <p>ج : کاهش ضریب خمیدگی (شریانی شدن)</p>	<p>کف‌کنی (تعمیق) - فرسایش کناره‌ها (تعریض) - ترازافزایی (کاهش عمق) رسوب‌گذاری در کناره‌ها (کاهش عرض)</p> <p>کف‌کنی، فرسایش جانبی</p> <p>ترازافزایی</p>

این پژوهش در گام اول تلاش می‌کند، وضعیت پایداری رودخانه را با استفاده از روش‌های تجربی و ریاضی و با در نظر گرفتن اثر عوامل مؤثری چون، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، ویژگی‌های رسوبات بستر و کناره‌ها را تحلیل کند. در گام دوم، میزان هم‌خوانی روش‌های مورد مطالعه با مطالعات صحرایی و ویژگی‌های مورفولوژیک هر کدام از بازه‌های مورد مطالعه در طبیعت را بسنجد.

احمدیان یزدی (۱۳۸۰) تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ی تجن را با هدف تعیین مناطقی با حداکثر تنش برشی و اولویت‌بندی محدوده‌های مستعد فرسایش کناری مورد بررسی قرار داد. نتیجه این پژوهش نشان داد که افزون‌بر تراکم پوشش گیاهی، پهناى ناحیه‌ی پوشش گیاهی در مسیر رودخانه، نقش مؤثری در کنترل فرسایش کناری دارد. نوحه‌گر و محمودی (۱۳۸۱) آثار برداشت مصالح بر شکل بستر و سیستم رودخانه‌ی میناب را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نشان داده شده است که برداشت مصالح، سبب تغییرپذیری مسیر رودخانه، از جمله گود افتادگی بستر، فرسایش شدید، تخریب کناره‌ها، توسعه‌ی مئاندرها، عریض شدن روبه‌گسترش بستر و تهدید سازه‌های انسانی و مزارع کشاورزی شده است.

غفاری و همکاران (۱۳۸۵) تغییرات مورفولوژی کناره‌ی آبراه بابل‌رود را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه برای تعیین و شناسایی نقاط مستعد فرسایش و رسوب‌گذاری، مقادیر حداکثر و حداقل تنش برشی سواحل راست، چپ و مجرای اصلی هر مقطع در دوره‌های بازگشت مختلف، تعیین و در نهایت، مناطق در معرض خطر فرسایش مشخص شده است. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار تنش برشی در دیواره‌ها کمتر از مجرای اصلی بوده و در سمت خارجی پیچ‌ها و نواحی مئاندردی رودخانه، مقدار تنش افزایش یافته و میزان فرسایش کناری بالا می‌رود.

اسماعیلی و حسین‌زاده (۱۳۸۹) نقش موانع طولی را در تغییر الگوی مجرای لایچ‌رود بررسی کردند. در این مطالعه، سه بازه از مسیر رود را مشخص و رسوبات بستر را دانه‌بندی کرده و با استفاده از روابط تنش برشی کل، تنش برشی بحرانی و پایداری نسبی بستر (RBS)^۱، توانایی رود را تعیین کردند. نتیجه‌ی این پژوهش نشان داد که قسمت زیادی از انرژی رودخانه، صرف غلبه بر مقاومت اشکال بستری می‌شود. از این‌رو، موانع طولی در قسمت‌های عریض مجرای رود در جریان‌های کمتر از لبالی و در نتیجه‌ی تغذیه‌ی زیاد رسوب و کاهش قدرت رود انباشته شده‌اند.

لان^۲ (۱۹۹۵) در مطالعه ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، رابطه‌ی کیفی میان متغیرهای اصلی مانند دبی (Q)، بار کف (Q_s)، شیب (S) و شاخص اندازه‌ی مواد بستری (D_{۵۰}) را به‌صورت رابطه‌ی شماره‌ی ۱ بیان می‌کند:

$$Q_s \times D_{50} = Q \times S \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

بر این اساس، رودخانه زمانی در حالت پایدار باقی می‌ماند که میان تغییرات بار رسوبی و اندازه‌ی رسوبات با دبی و

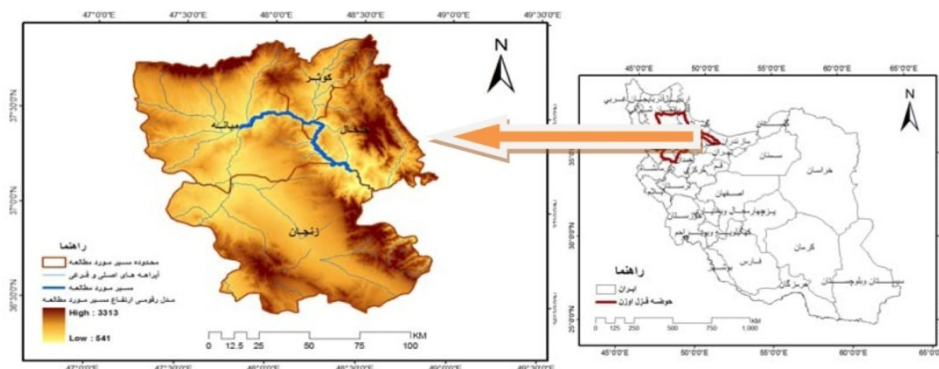
۱. Relative Bed Stability

۲. Lane

شیب، موازنه برقرار باشد. در صورت تغییر هر یک از عوامل فوق، رودخانه از حالت پایدار خارج خواهد شد. اورفی و همکاران^۱ (۲۰۰۲) در پژوهشی، ویژگی‌های هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی بالادست و پایین‌دست رودخانهی پارانا را مورد بررسی قرار دادند. برای مقایسه بین پایین‌دست و بالادست رودخانه، متغیرهای زیر انتخاب شده و بررسی شدند: ۱- دبی سالانه؛ ۲- بار معلق؛ ۳- بار بستر؛ ۴- چگالی رسوبات معلق؛ ۵- اندازه‌ی ذرات رسوبات بستر؛ ۶- شکل بستر؛ ۷- پهنای مجرا؛ ۸- پهنای دشت سیلابی؛ ۹- مورفولوژی مجرا. نتیجه‌ی این مطالعه نشان داد که بین پایین‌دست و بالادست رودخانه از نظر عوامل فوق، تغییرات فضایی بسیار زیادی وجود دارد. پهنای بستر نسبت به بالادست در پایین‌دست گسترش بسیار زیادی دارد که ناشی از منبع تغذیه‌ی زیاد از راه انشعاب‌های مختلفی که به رودخانه وارد می‌شوند و همچنین از بین رفتن شیب یا کاهش بسیار محسوس آن است. کافمن و همکاران^۲ (۲۰۰۸) از شاخص مقاومت نسبی بستر برای ارزیابی کلی پایداری بستر استفاده کردند. پژوهشگران در این بررسی برای محاسبه‌ی تنش برشی در رودخانه‌ی مورد مطالعه، در شاخص پایداری نسبی بستر اصلاحاتی انجام دادند.

منطقه‌ی مورد مطالعه

سرچشمه‌ی رودخانه‌ی قزل اوزن از ارتفاعات چهل چشمه کردستان بوده و با طولی بیش از ۵۵۰ کیلومتر، پس از عبور از استان‌های زنجان، آذربایجان شرقی و اردبیل، ضمن دریافت شاخه‌های گوناگون در طول مسیر خود با رودخانه‌ی شاهرود در استان گیلان تلاقی و وارد مخزن سد سفیدرود می‌شود. پهنای حوضه‌ی آبخیز آن نزدیک به ۴۹۴۰۰ کیلومترمربع است (عبدی، ۱۳۸۵: ۹). رودخانه‌ی قزل اوزن از دیدگاه ژئومورفولوژی، رودخانه‌ای آبرفتی با بستری از مصالح ریزدانه شامل رس سیلتی و ماسه‌ای است که تحت تأثیر شرایط خاص هیدرولیکی، توپوگرافی، مواد سازنده بستر و کناره‌ها و بسیاری از دلایل ناشناخته دیگر، این رودخانه به شکل رودخانه‌ای مئاندری درآمده است. فرم خاص مورفولوژیکی رودخانه‌ی قزل اوزن، زمینه‌ی ناپایداری رودخانه و مهاجرت سالانه‌ی حلقه‌های پیچان‌رودها و فرسایش کناری رودخانه را فراهم کرده است. محدوده‌ی مطالعاتی بین طول‌های جغرافیایی ۴۸° ۴۷' تا ۴۸° ۲۷' و عرض‌های جغرافیایی ۳۷° ۱۲' تا ۳۷° ۲۵' قرار دارد.

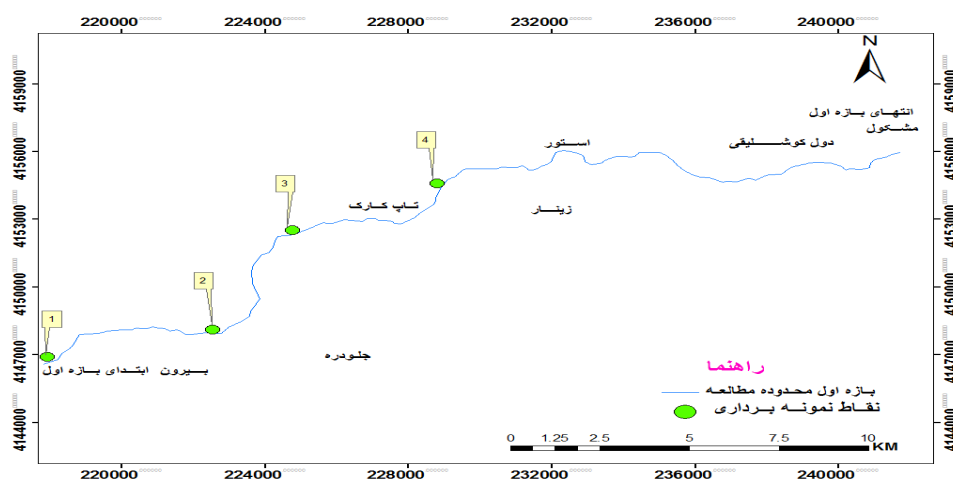


۱. Orfeo et al

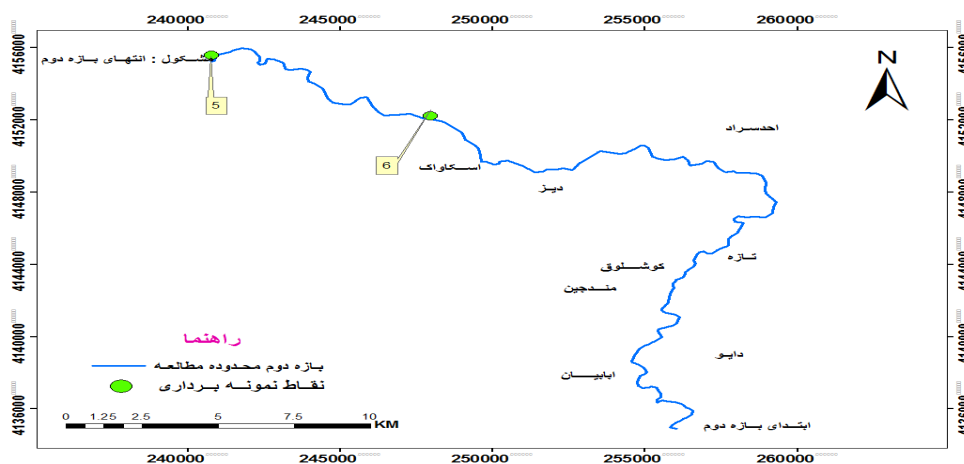
۲. Kaufmann et al

شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه‌ی مورد مطالعه

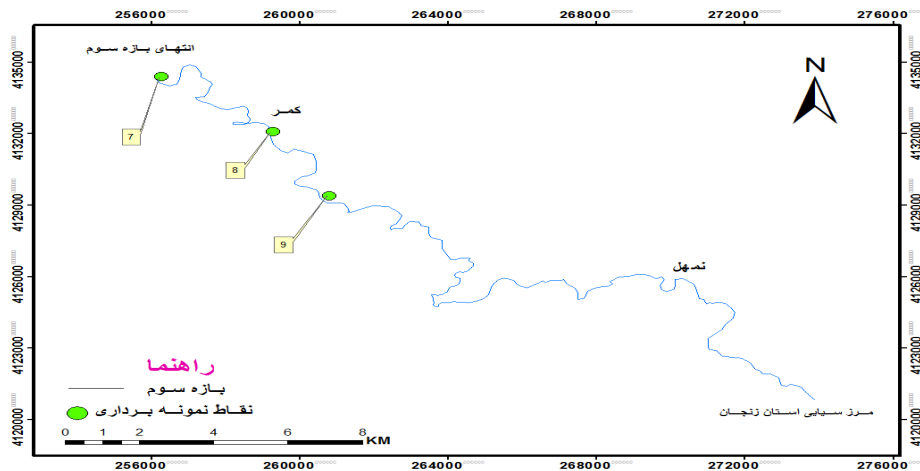
در این پژوهش، از آنجاکه الگوی رودخانه در تمام طول مسیر مورد مطالعه به یک شکل نیست، مسیر مورد مطالعه به سه بازه تقسیم شده است. بازه‌ی اول مسیر مورد مطالعه، از محدوده‌ی بین روستای بیرون (۳۰ کیلومتری شهرستان میانه) تا مشکول را شامل می‌شود (شکل شماره ۲). این محدوده بازه‌ی دشتی بوده و الگوی مسیر رودخانه شریانی است. بازه‌ی دوم، محدوده‌ی بین مشکول تا روستای ابابیان را دربرمی‌گیرد (شکل شماره ۳). بخش زیادی از این بازه (بیش از ۸۰ درصد) در منطقه‌ی کوهستانی است که الگوی آن جزء رودخانه‌های ماندیری تک‌مجرایی است. بازه‌ی سوم نیز محدوده‌ی بین روستای کمر تا ابتدای مرز سیاسی استان زنجان را شامل می‌شود (شکل شماره ۴). این بازه در داخل محدوده‌ی نیمه‌کوهستانی است و شدت ارتفاعات در آن نسبت به بازه‌ی دوم کاهش می‌یابد. در این بازه الگوی شریانی بر الگوی پیچان‌رودی اثر کرده و این‌گونه، درجه‌ی سینوسی و منظم رودخانه را تغییر داده است. بنابراین، الگوی این محدوده به‌صورت الگوی پیچان‌رودی در حال تبدیل به الگوی شریانی است.



شکل ۲. بازه‌ی اول محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری



شکل ۳. بازه‌ی دوم محدوده و موقعیت نقاط نمونه‌برداری



شکل ۴. بازه‌ی سوم محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری

مواد و روش‌ها

برای بررسی وضعیت پایداری رودخانه در بازه‌های مورد مطالعه، نخست محدوده‌ی مطالعاتی با نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای IRS سال ۲۰۰۷ بررسی شد و نقشه‌ی پلان رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای به‌دست آمد. سپس مکان‌های نمونه‌برداری با توجه به لیتولوژی محل و موقعیت آن نسبت به موقعیت راه‌های در دسترس مشخص شد. در دوره‌ی عملیات میدانی نمونه‌برداری‌هایی از هر بازه‌ی مطالعاتی گرفته شد. در بازه‌ی اول به‌دلیل پویایی بسیار بالای آن ۴ نقطه، بازه‌ی دوم به‌دلیل کوهستانی بودن و دشواری راه محدوده برای برداشت، ۲ نقطه و از بازه‌ی سوم نیز ۳ نقطه مشخص و نمونه‌برداری و برداشت‌ها انجام گرفت. نمونه‌برداری از مصالح بستر و کناره‌های رودخانه برای تعیین دانه‌بندی رودخانه است. از همان محل نمونه‌برداری، عمق رودخانه نیز اندازه‌گیری شد. گفتنی است که نمونه‌برداری‌ها در تاریخ ۲۱ و ۲۲ خرداد سال ۱۳۹۰ انجام گرفت. دانه‌بندی رسوبات بستر و کناره‌های رودخانه با استفاده از روش استاندارد اشوتو ۸۰-۷۷^۲ انجام گرفت. نتایج دانه‌بندی در جدول شماره‌ی ۲ آورده شده است.

از دیگر اطلاعات اساسی مورد نیاز برای بررسی وضعیت پایداری رودخانه، داده‌های هیدرولوژیکی است. به این دلیل آمار مقادیر دبی درازمدت رودخانه در محل ایستگاه استور تهیه و پس از آن، دبی سیلابی رودخانه در دوره‌ی بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. برای محاسبه‌ی دوره‌ی بازگشت دبی سیلابی رودخانه‌ی قزل اوزن، پیک سیلاب‌های موجود در هر ماه از سال، به‌طور جداگانه استخراج شده و برای ماه‌هایی که آمار سیلاب موجود نبوده است با توجه به آمار متوسط روزانه و روابط همبستگی، آمار لحظه‌ای مصنوعی ساخته شد. سپس دوره‌ی بازگشت به‌کمک نرم‌افزار هیفا^۳ و با استفاده

۱. Indian Remote Sensing (IRS)

۲. ASSHTO - T^{۸۰-۷۷} (American Association and State Highway and Transportation Officials)

۳. HYFA

از توزیع گامبل محاسبه شد^۱ (جدول شماره ۳).

محاسبه‌ی تنش برشی موجود و تنش برشی بحرانی

اگرچه تاکنون مباحث زیادی در مورد تنش برشی انجام گرفته، اما همچنان به‌عنوان رایج‌ترین معیار پذیرفته شده برای تجزیه و تحلیل حرکت ذرات رسوبی باقی مانده است (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹: ۴۷ به نقل از باتالا و مارتین، ۲۰۰۱). به شروع حرکت ذرات رسوبی به‌وسیله‌ی جریان آب در بستر رود، تنش برشی مرزی گفته می‌شود (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹: ۴۷).

تنش موجود با استفاده از رابطه‌ی شماره ۲ تعیین شده است.

$$\tau = \gamma RS \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

در این رابطه τ : تنش برشی؛ γ : وزن مخصوص آب؛ R شعاع هیدرولیکی و S شیب خط انرژی است. به‌دلیل عرض بسیار بالای رودخانه، تعیین دقیق شعاع هیدرولیکی بسیار مشکل است. به همین علت به جای شعاع هیدرولیکی، عمق آب جای‌گذاری شد. گفتنی است که در رودخانه‌های عریض، عمق آب مساوی شعاع هیدرولیکی (تلوری، ۱۳۷۱) و S معادل شیب کف در بازه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

تنش برشی موجود ضریبی از γRS است، برای تعیین تنش برشی کناره نیز از رابطه‌ی ۳ استفاده شده است.

$$\tau' = C\gamma RS \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

ضریب C به‌گونه‌ای است که تنش برشی در کناره‌ها، کمتر از تنش برشی در بستر کانال است. فرسایش ذرات هنگامی رخ می‌دهد که نیروی محرک وارد بر ذرات، بر نیروی مقاوم بین ذرات غلبه کند. لحظه‌ای که ذرات در اثر این فرایند شروع به حرکت می‌کنند را به‌اصطلاح آستانه‌ی حرکت ذرات می‌گویند. تنش برشی در لحظه‌ی آستانه‌ی حرکت رسوبات را تنش برشی بحرانی می‌گویند (وجدانی و قمشی، ۱۳۸۵: ۴۶). برای محاسبه‌ی تنش برشی بحرانی از رابطه‌ی سومالی و میتال^۲ (رابطه‌ی شماره ۴) استفاده شده است.

$$\frac{\tau_c}{g \Delta \rho_s \left[\frac{\rho \gamma^2}{g \Delta \rho_s} \right]^{13}} = 0.243 + \frac{0.06 d^2}{(3600 + d^2)^{1.2}} \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

$$\Delta \rho_s = \rho_s - \rho_w$$

$$d = d \left[\frac{\rho \gamma^2}{g \Delta \rho_s} \right]^{-1.3}$$

۱. گفتنی است که محاسبه‌های مربوط به تنش برشی برای دبی با دوره‌ی بازگشت دو ساله محاسبه شده است.

این رابطه را سوامی و میتال ارائه کرده‌اند که در آن؛

$$\tau_c: \text{تنش برشی بحرانی } n/m^2;$$

$$\rho_s: \text{جرم حجمی ذرات خاک } kg/m^3;$$

$$\rho_w: \text{جرم حجمی آب } kg/m^3;$$

$$g: \text{شتاب ثقل } m/s^2;$$

$$d: \text{قطر متوسط ذرات خاک } mm \text{ (سوامی و میتال، ۱۹۷۶).}$$

با توجه به اینکه جنس مصالح، رس سیلتی یا ماسه‌ای با چگالی ذرات برابر ۲/۷۲ است و با فرض وزن مخصوص

مساوی ۰/۰۰۰۰۰۱ (۲۰ = T) رابطه‌ی شماره‌ی ۲ به شکل زیر نوشته می‌شود (حجی‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۴: ۶۷۷).

$$\tau_c = 0.1598 + \frac{0.432 d^2}{\sqrt{1 + 0.183 d^2}} \quad (\text{رابطه‌ی ۵})$$

شاخص پایداری نسبی بستر (RBS)

این شاخص معادل با ذرات ریز بافت موجود در بستر بوده که از سوی بوفینگتون و مونتوگمری^۱ (۱۹۹۹) محاسبه شده و

مشابه با پایداری نسبی بستری است که جووت^۲ (۱۹۸۹) عنوان کرده است. جووت این شاخص را به عنوان نسبت سرعت

ورودی بحرانی بستر به سرعت حقیقی نزدیک بستر معرفی کرده است. اولسن و همکاران^۳ (۱۹۹۷) این شاخص را نسبت

بین تنش برشی بحرانی به تنش برشی کناره‌ها تعریف کرده‌اند (کافمن و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۵۱).

این گونه می‌توان گفت که این شاخص در واقع، مقایسه بین اندازه‌ی ذرات بستر به اندازه‌ی حداکثر ذراتی است که

جریان در کناره‌ی رود با خود حمل می‌کند و با رابطه‌ی شماره‌ی ۶ به دست می‌آید.

$$RBS = \frac{V_c}{V_b} \quad (\text{رابطه‌ی ۶})$$

در این رابطه V_c یا سرعت بحرانی را می‌توان از رابطه‌ی شماره‌ی ۷ و V_b سرعت حقیقی جریان نزدیک بستر رود

را از رابطه‌ی شماره‌ی ۸ به دست آورد.

$$V_c = 0.155 \sqrt{d} \quad (\text{رابطه‌ی ۷})$$

$$V_b = 0.7 V \quad (\text{رابطه‌ی ۸})$$

اگر عدد به دست آمده از رابطه‌ی ۶ بزرگتر از یک باشد، نشان‌دهنده‌ی پایداری بستر و هرچه این مقدار بیشتر باشد،

۱. Buffington and Montgomery

۲. Jowett

۳. Olsen et al

نشان‌دهنده‌ی پایداری ذرات رسوبی موجود در کف بستر خواهد بود. همچنین اگر از یک کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی ناپایداری بستر بوده و رسوبات موجود در کف بستر در جریان‌های لبالی و کمتر، قابل جابه‌جایی هستند (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹: ۴۸).

یافته‌های تحقیق

توزیع اندازه‌ی ذرات^۱ نمونه‌برداری‌های انجام گرفته‌ی رودخانه، در جدول شماره‌ی ۲ نشان داده شده است. در این جدول دانه‌بندی ذرات به صورت درصد وزنی ذرات نشان داده شده است. قطر D_{50} اندازه‌ای است که ۵۰ درصد وزنی ذرات از آن کوچکتر هستند و با نام قطر میانه خوانده می‌شوند (ژولین^۲، ۱۳۸۷: ۱۹). به همین نظم، قطرهای D_{10} و D_{90} اندازه‌ی ذراتی هستند که به ترتیب ۹۰ درصد و ۱۰ درصد ذرات از آن کوچکتر باشند. در مطالعات و بررسی‌های پایداری رودخانه، قطر میانه اهمیت زیادی دارد و مبنای محاسبات قرار می‌گیرد.

جدول ۲. اندازه‌ی قطر ذرات (mm) نمونه‌برداری‌های انجام شده از بازه‌های مورد مطالعه‌ی رودخانه‌ی قزل اوزن

ردیف	بازه نمونه‌برداری	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	D_{70}	D_{90}	D_{100}
۱	بازه‌ی اول	۳	۷	۱۳	۱۷	۲۲	۳۱	۳۶
۲	بازه‌ی اول	۶	۱۱	۱۷	۲۶	۳۴/۵	۴۲	۵۲
۳	بازه‌ی اول	۱۶	۲۴	۲۷	۳۰/۵	۳۴	۳۸	۴۳/۵
۴	بازه‌ی اول	۴	۷	۱۴/۵	۱۹	۲۴	۳۰/۵	۳۶
۵	بازه‌ی دوم	۳	۶	۱۳/۵	۲۰	۲۶	۳۲	۳۸
۶	بازه‌ی دوم	۵	۱۱	۱۷	۲۲	۲۷	۳۴	۳۹
۷	بازه‌ی سوم	۲	۷	۱۱	۱۷	۲۴	۲۹	۳۴
۸	بازه‌ی سوم	۱/۵	۵	۱۰	۱۴/۵	۲۱	۲۴	۳۰/۵
۹	بازه‌ی سوم	۴	۸	۱۳/۵	۱۸	۲۴	۳۲	۳۷

جدول ۳. دبی سیلابی رودخانه‌ی قزل اوزن در ایستگاه استور برای دوره‌ی بازگشت‌های مختلف با استفاده از توزیع گامبل

دوره‌ی برگشت	۲	۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰
ایستگاه استور	۹۴۰	۱۹۰۰	۲۳۲۰	۳۰۳۰	۳۶۴۰

شکل رودخانه تابعی از جریان آب، کمیت و نوع رسوبات حمل شده، پوشش گیاهی و ترتیب مواد سازنده‌ی دیواره و کف رودخانه است. بنابراین هیدرولیک رودخانه‌ای، جریان آب و تنش برشی بر دیواره و کف رودخانه وارد می‌کند که پایداری

۱. Particle size distribution

۲. Julien

یا تغییرپذیری شکل رودها بستگی به مقاومت هر نقطه از پیرامون بستر مقطع جریان، در مقابل تنش برشی وارده از سوی جریان دارد (لئوپولد و همکاران، ۱۹۶۴) و با توجه به اینکه میزان تنش برشی در بستر و کناره‌های رودخانه یکنواخت نیست، میزان تأثیر تنش برشی جریان بر کف و بستر رودخانه، بستگی به میزان حساسیت خاک و مواد آبرفتی رودخانه به فرسایش آبی دارد. با توجه به جدول شماره ۴، میزان تنش برشی کف همیشه بیشتر از تنش برشی کناره‌ها است، بنابراین میزان فرسایش در بستر بیشتر از کناره‌هاست. با مقایسه‌ی تنش‌های موجود و تنش‌های بحرانی، مشاهده می‌شود که در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی، میزان تنش برشی موجود بیشتر از تنش بحرانی بوده است، در نتیجه این مناطق ناپایدار هستند. براساس این شاخص، فرسایش‌پذیری زیاد و مقاومت برشی کم در ایستگاه‌های مورد مطالعه، سبب افزایش میزان تغییرات بازه‌های مورد مطالعه خواهد شد.

همچنین بررسی شاخص RBS در جدول شماره ۴ نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها میزان این شاخص کمتر از یک است، در نتیجه این مناطق ناپایدار هستند.

جدول ۴. وضعیت پایداری رودخانه با توجه به شاخص‌های تنش برشی و شاخص RBS

ردیف	بازه	شیب	D50 mm	ضریب c	عمق آب m	n	n	τ' n/m ²	R	وضعیت پایداری
۱	بازه‌ی اول	۰/۰۰۲۵	۱۳	۰/۷۶	۱/۶	۳۹/۲۴	۱۳/۰۸	۲۹/۸۲	۰/۲۶	ناپایدار
۲	بازه‌ی اول	۰/۰۰۲۵	۱۷	۰/۷۶	۱/۹	۴۶/۵۹	۱۷/۱۶	۳۵/۴	۰/۳۰	ناپایدار
۳	بازه‌ی اول	۰/۰۰۲۵	۲۷	۰/۷۶	۱/۸	۴۴/۱۴	۲۷/۳۳	۳۳/۵۴	۰/۳۸	ناپایدار
۴	بازه‌ی اول	۰/۰۰۲۵	۱۴/۵	۰/۷۶	۲/۲	۵۳/۹۵	۱۴/۶۲	۴۱	۰/۲۸	ناپایدار
۵	بازه‌ی دوم	۰/۰۰۳	۱۳/۵	۰/۷۶	۳/۱	۹۱/۲۳	۱۳/۵۹	۶۹/۳۳	۰/۲۷	ناپایدار
۶	بازه‌ی دوم	۰/۰۰۳	۱۷	۰/۷۶	۲/۹	۸۵/۳۴	۱۷/۱۶	۶۴/۸۵	۰/۳۰	ناپایدار
۷	بازه‌ی سوم	۰/۰۰۲۷	۱۱	۰/۷۶	۲/۵	۶۶/۲۱	۱۱/۰۲	۵۰/۳۱	۰/۲۴	ناپایدار
۸	بازه‌ی سوم	۰/۰۰۲۷	۱۰	۰/۷۶	۲/۳	۶۰/۹۲	۱۰	۴۶/۲۹	۰/۲۳	ناپایدار
۹	بازه‌ی سوم	۰/۰۰۲۷	۱۳/۵	۰/۷۶	۱/۶	۵۸/۲۷	۱۳/۵۹	۴۴/۲۸	۰/۲۷	ناپایدار

آنچه از بررسی میزان تغییرات بازه‌های مورد مطالعه به‌وسیله‌ی تصاویر ماهواره‌ای، مطالعات صحرایی و ویژگی‌های مورفولوژیک بازه‌ها دیده می‌شود با نتایج روش‌های تجربی به‌کار گرفته شده در مورد بازه‌ی دوم و به میزان کمی در مورد بازه‌ی سوم متفاوت است؛ ولی نتایج این روش‌ها با ویژگی‌های بازه‌ی اول کاملاً منطبق است.

الگوی رودخانه در بازه‌ی اول شریانی است. سازندهای واقع در کناره‌های مسیر رودخانه‌ی قزل اوزن در بازه‌ی دشت سیلابی از چهار لیتولوژی مشخص تشکیل شده است که شامل مارن‌های نئوژن، پادگان‌های کهن، پادگان‌های میانی و پادگان‌های جوان (نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه) است. فرسایش عمیق و لغزش‌های

پراکنده در این سازند سبب شده که رودخانه در بازه‌ی اول، ناپایداری بالایی داشته باشد که این ناپایداری با روش‌های تجربی و ریاضی به خوبی نشان داده شده است.

بازه‌ی دوم محدوده‌ی مورد مطالعه داخل منطقه‌ی کوهستانی است. الگوی این بازه جزء رودخانه‌های مئاندری تک‌مجریایی است. عرض رودخانه بسیار کم است. در این بازه لیتولوژی عمده، شامل سنگ‌های آذرین و آذر آواری ائوسن به همراه طبقات رسوبی شیلی و ماسه‌سنگی است (نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه) که در مقابل فرسایش رودخانه‌ای بسیار مقاوم هستند و مورفولوژی رودخانه در این بازه، تحت تأثیر عوامل زمین‌ساختی و زمین‌شناختی قرار دارد. بررسی مسیر رودخانه در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که الگوی رودخانه در طول سال‌های به نسبت طولانی ثابت است و مجرای رودخانه حالت پایداری دارد که نتایج روش‌های تجربی و ریاضی بررسی شده در این پژوهش، برعکس این حالت را نشان می‌دهند؛ زیرا روش‌های مذکور برای رودخانه‌های آبرفتی مصداق دارند و برای رودخانه‌هایی با بستر سنگی و مقاوم به فرسایش مناسب نیستند؛ زیرا روش‌های مذکور بر پایه‌ی مقاومت ذرات رسوبی به فرسایش بنا شده‌اند، در حالی که در بازه‌های با بستر سنگی در کل آبرفتی وجود ندارد و آبرفت‌های موجود نیز نتیجه‌ی حمل جریان آب از رسوبات بازه‌های دیگر و انباشت آن هنگام فروکش جریان رودخانه‌ای در بازه‌ی مذکور است. این حالت با نسبت کمتری در بازه‌ی سوم نیز دیده می‌شود، چون لیتولوژی این بازه تا حدودی مقاوم به فرسایش است و حالت پایداری این بازه نسبت به بازه‌ی دوم بسیار کمتر است؛ زیرا در این بازه، الگوی رودخانه در حال تبدیل به الگوی شریانی است.

بحث و نتیجه‌گیری

مجریایی پایدار است که تمام ذرات واقع بر محیط خیس شده‌ی آن ساکن باشند. بنابراین اگر مواد بستر از جا کنده نشوند، هندسه‌ی مقطع در طی زمان ثابت باقی می‌ماند. در مجراهای پایدار غیر آبرفتی، شکل مجرا به سنگ بستر بستگی دارد و به مقدار رسوبات منتقل شده ربطی ندارد، اما در بازه‌های آبرفتی، شکل مجرا و پایداری آن به مقاومت ذرات رسوبی آن بستگی خواهد داشت.

با توجه به اینکه رودخانه‌های شریانی وضعیتی پایدار و ثابتی ندارند و جهت جریان و موقعیت جزایر رسوبی و عرض رودخانه‌ها پیوسته در حال تغییر و تحول است، در برابر رودخانه‌هایی که کناره‌ها و بستر آنها متشکل از سازندهای مقاوم باشد، پایداری و ثبات بیشتری دارند، بنابراین می‌توان بازه‌ی اول را که ترکیبی از شکل شریانی و پیچان‌رودی در بستر آبرفتی است، به عنوان بازه‌ی ناپایدار و بازه‌های دوم و سوم را که رودخانه به وسیله‌ی سنگ بستر و کناره‌ها محدود شده است را به عنوان بازه‌ی کمابیش پایدار معرفی کرد. همچنین می‌توان پیش‌بینی کرد که تغییرات احتمالی صورت گرفته در آینده، در بازه‌ی شریانی خواهد بود و با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از این محدوده زمین‌های کشاورزی پوشش می‌دهد، هرگونه تغییر در مؤلفه‌های ریخت‌شناسی در این مکان، سبب به هم خوردن تعادل پویایی شده و واکنش مورفودینامیک محیط به صورت تعرض آب بر زمین‌های کشاورزی اطراف سواحل رودخانه و فرسایش بسیار شدید خواهد بود. بنابراین شایسته است که هرگونه اقدامات ساماندهی در محدوده‌ی بازه با توجه به متغیرهای مورفولوژیکی انجام

شود.

این پژوهش نشان داد که روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر، تنها در مجراهای آبرفتی اهمیت دارد و به نتایج آن می‌توان استناد کرد. به‌کارگیری این روش‌ها در بازهای غیرآبرفتی نتایج غیرواقعی و دور از انتظار خواهد داشت و با ویژگی‌های مورفولوژیک رودخانه‌ی مورد مطالعه هم‌خوانی نخواهد داشت. باید توجه داشت که مطالعه رفتار، دینامیک و ویژگی‌های مورفولوژیکی رودخانه‌ای، طیف وسیعی از علوم مرتبط با رودخانه را می‌طلبد و به‌کارگیری یافته‌های یک رشته‌ی خاص در این زمینه، نتایج پذیرفتنی را ارائه نخواهد داد و گروه بسیاری از پژوهشگران به این موضوع تأکید کرده‌اند (استفان و همکاران^۱، ۲۰۱۰: ۶۴).

منابع

- Abdi, P., ۲۰۰۶, **Performance Evaluation of Breakwater Construction on Rivers in the Province Zanjan**, The Seventh International Congress on Civil Engineering, Tarbiyat Modares University of Tehran.
- Afzalimehr, H. and Dey, S., ۲۰۰۹, **Influence of Bank Vegetation and Gravel Bed on Velocity and Reynolds Stress Distributions**, International Journal of Sediment Research, Vol. ۲۴, PP. ۲۳۶-۲۴۶.
- Ahmadian Yazdi, M. J., ۲۰۰۴, **Investigation of Vegetation Role in Side Erosion Control of Meander Tajan River – Harirrood**, University of Watershed, Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan.
- Bertrand, F. and Papanicolaou, A. N., ۲۰۰۹, **Effects of Freezing and Thawing Process on Bank Stability**, World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers, New Mexico.
- Department of Water Affairs and Abfa, ۲۰۱۰, **The Draft of Guide Cross-section Geometry and the River line, Department of Energy**, Publication Number ۳۶۶, Office of Water Engineering, Technical Standards and Abfa.
- Esmaili, R. & Hoseinzade, M., ۲۰۱۰, **Investigation of Forming Processes of Longitudinal Barriers in Mountain Rivers, Northern Alborz, Catchment Area Lavij Rood**, Geography Research, Vol. ۴۲, No. ۷۱, PP. ۴۳-۵۰.
- Gafari, G., Soleymani, K., Mosaedi, A., ۲۰۰۶, **Investigation of Changes in the Side Channel Morphology Using GIS (Bablrood Mazandaran)**, Geography Researches, Vol. ۳۸, No. ۵۷, PP. ۶۱-۷۱.
- Haji Abadi, A. R., Ghodsian, M. & Alavi panah, K., ۲۰۰۵, **Survey of River Statement of Gezel Owzan by Mathematical Methods, Remote Sensing and GIS**, The Fifth Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University of Kerman.

- Julin, P. Y., ۲۰۰۸, **River Mechanics**, Translation of Jafarzade, M. R., Publications of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad.
- Kaufmann, R., Faustini, M., Larsen, P., Shirazi, A., ۲۰۰۸, **A Roughness-corrected Index of Relative Bed Stability for Regional Stream Surveys**, *Geomorphology*, Vol. ۹۹, PP. ۱۵۰-۱۷۰.
- Lane, E. W., ۱۹۵۵, **The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering**, In Proceedings of: American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. ۸۱, PP. ۱-۱۷.
- Lepold, L. B., Wolman, M.G. and Miller, J.P., ۱۹۶۴, **Fluvial Processes in Geomorphology**, San Francisco, W.H. Freeman and Company San Francisco.
- Minghui, Y., Hongyan, W., Yanjie, L., and Chunyan, H., ۲۰۱۰, **Study on the Stability of Non-cohesive River Bank**, *International Journal of Sediment Research*, Vol. ۲۵, No. ۴, PP. ۳۹۱-۳۹۸.
- Nohehegar, A. & Mahmoodi, F.A., ۲۰۰۲, **Removal Effects of Material (Sand) on form and the Bed of the Minab River**, *Geography Research*, Vol. ۳۰, No. ۴۵, PP. ۴۵-۵۸.
- Orfeo, O., and Stevaux, J., ۲۰۰۲, **Hydraulic and Morphological Characteristics of Middle and Upper Reaches of the Parana River (Argentina and Brazil)**, *Geomorphology*, Vol. ۴۴, No. ۵, PP. ۳۰۹-۳۲۲.
- Sasani, F., Afzali Mehr, H. & Heydarpoor, M., ۲۰۰۵, **Effect of Shear Stress Factor on the Lateral Shift along the Curved Slot in a Coarse River**, The Fifth Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University of Kerman.
- Stephen, P., Rice, Jill Lancaster and Paul Kemp, P., ۲۰۱۰, **Experimentation at the Interface of Fluvial Geomorphology, Stream Ecology and Hydraulic Engineering and the Development of an Effective, Interdisciplinary River Science**, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. ۳۵, PP. ۶۴-۷۷.
- Swamee, P. K. and Mittal, M. K., ۱۹۷۶, **An Explicit Equation for Critical Shear Stress in Alluvial Streams**, *Irrigation and Power*, Vol. ۲۳, No. ۲, PP. ۲۳۷-۲۳۹.
- Talori, A. R., ۱۹۹۱, **Understanding of Rivers Erosion in Flood Plains**, Research Institute of Forests and Pastures.
- Thorne, C. R., and Tovey, N. K., ۱۹۸۱, **Stability of Composite River Banks, Earth Surface Processes and Landforms**, Vol. ۶ No. ۵, PP. ۴۶۹-۴۸۴.
- Tokaldany, E. A., Darby, S. E. and Tossell, P., ۲۰۰۷, **Coupling Bank Stability and Bed Deformation Models to Predict Equilibrium Bed Topography in River Bends**, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ۱۳۳, No. ۱۰, PP. ۱۱۶۷-۱۱۷۰.
- Vejdani, N. & Ghomshi, M., ۲۰۰۶, **Laboratory Study of the Critical Shear Stress of Cohesive Sediment Erosion for Six Irrigation Canals in the Province Khozestan**, *Journal of Agricultural*, Vol. ۲۹, No. ۴, PP. ۴۵-۵۶.

