

## بررسی پارامترهای رسوب‌شناسی، آنالیز رخساره‌های سنگی و مدل رسوبگذاری رودخانه افین، جنوب شرق قائن

مریم مرتضوی مهریزی\*؛ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران

نجمه کریمی؛ کارشناس ارشد رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند  
خراسان جنوبی، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

### چکیده

حوضه آبریز رودخانه افین با مساحت ۱۱۸۱ کیلومتر مربع در جنوب شرقی شهرستان قائن (خراسان جنوبی) واقع شده است. به منظور مطالعه روند ریزشوندگی رسوبات رودخانه افین تعداد ۵۵ نمونه رسوب از کانال اصلی بررسی شده است. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که ریزشوندگی ذرات به سمت پایین دست جریان از روند یکنواختی برخوردار نبوده و شامل ۶ پیوستگی و ۵ ناپیوستگی رسوبی است. ورود رسوبات دانه درشت از رودخانه‌های فرعی، تغییرات سنگ‌شناسی، فعالیت‌های تکتونیکی و ظهور سنگ بستر از مهم‌ترین عوامل ایجاد این ناپیوستگی‌های رسوبی است. شناسایی رخساره‌های رسوبی موجود در دیواره کانال رودخانه مورد مطالعه بر اساس اختصاصات بافتی و ساختمان‌های رسوبی صورت گرفته که بر اساس آن رخساره‌های آواری (گراولی، ماسه‌ای و گلی) و غیرآواری (کربنات‌های خاکزا) از هم تفکیک شده‌اند. با توجه به رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری شناسایی شده در دیواره کانال رودخانه افین (CH، GB، SG، SB و FF) دو نوع کانال رودخانه‌ای برای بخش‌های بالادست تا پایین دست جریان پیشنهاد و مدل رسوبی مربوط به هر یک ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: پیوستگی رسوبی، خراسان جنوبی، رخساره‌های سنگی، طرح کانال رودخانه، افین.

### مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان مهم‌ترین عامل تغییر شکل سطح زمین، بیش از هر عامل دیگری در شکل بخشیدن به محیط زندگی بشر مؤثر بوده‌اند. پارامترهای زمین‌ریخت‌شناسی و رسوب‌شناسی سیستم‌های رودخانه‌ای توسط عوامل متعددی چون شرایط اقلیمی، فیزیوگرافی حوضه آبریز، زمین‌شناسی و فعالیت‌های تکتونیکی منطقه مورد نظر تحت تأثیر قرار گرفته‌اند و این عوامل نقش اساسی در تغییرات سرعت، نوع و عمق جریان رودخانه، میزان حمل و نقل رسوب و در نهایت تشکیل

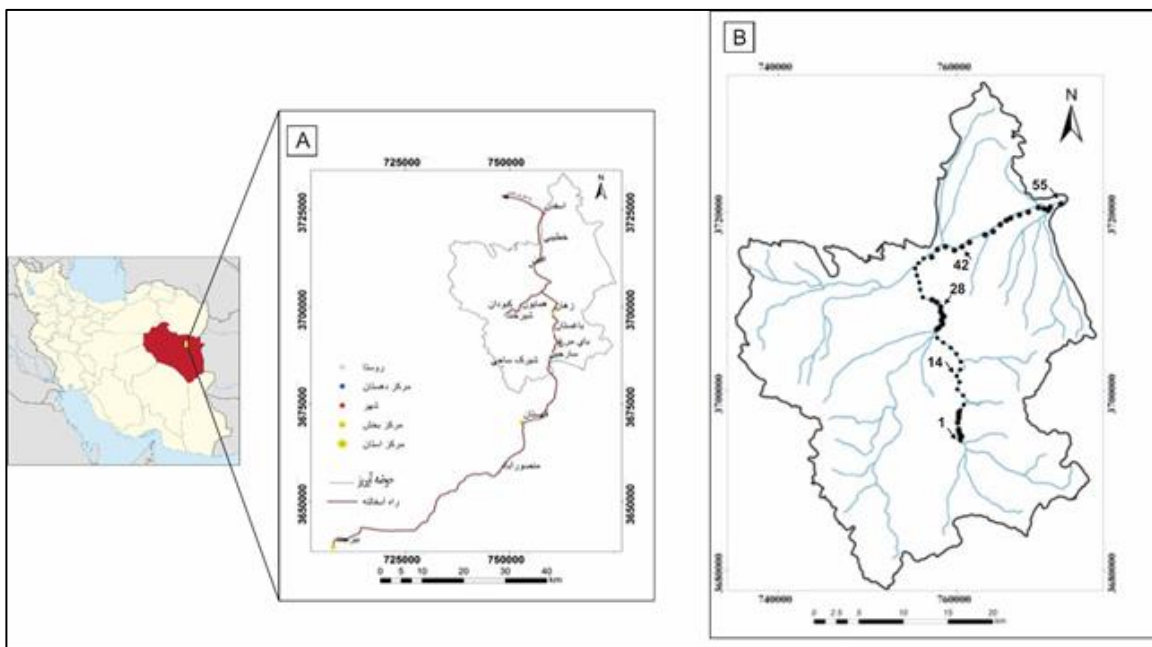
رخساره‌های رسوبی مختلف داشته‌اند (سیر و نیوسون، ۲۰۰۳: ۱۷؛ فرند و دید، ۲۰۰۵: ۳۹۸؛ دمولین، ۲۰۱۱: ۹۸؛ پاپانگلاکیس و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۳۴۳). یکی از مناسب‌ترین روش‌های مطالعه سیستم‌های رودخانه‌ای عهد حاضر بررسی نیمرخ طولی آنها است. این نیمرخ برش فرضی رودخانه را از منشأ موسوم به سرچشمه رودخانه تا مصب آن یعنی نقطه‌ای در پایین دست که رودخانه آب خود را به داخل توده آب دیگر می‌ریزد، نشان می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی نیمرخ طولی رودخانه کاهش تدریجی شیب بستر رودخانه به سمت پایین دست آن است که البته ممکن است با بی‌نظمی‌هایی همراه باشد. این کاهش شیب با تغییر اندازه ذرات به سمت پایین دست جریان همراه است که باعث ایجاد روند ریزشوندگی مشخص در میانگین و میانه اندازه ذرات به سمت پایین دست جریان می‌شود که تحت عنوان پیوستگی رسوبی نامیده می‌شود (رایس و همکاران، ۲۰۰۸: ۲). البته تغییرات اندازه ذات به سمت پایین دست جریان در رودخانه‌های با بار بستر گراولی بسیار نامنظم بوده و از روند ریزشوندگی ساده فوق پیروی نمی‌کنند. عوامل متعددی در پیچیده ساختن این الگو نقش دارند که شامل عوامل طبیعی و انسانی می‌باشند (رایس و چرچ، ۲۰۱۰: ۲۳۳). از جمله عوامل طبیعی می‌توان به ورود شاخه‌های فرعی، جنس سنگ‌ها، زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های تکتونیکی اشاره کرد. عوامل انسانی نظیر احداث سدهای تنظیمی و فعالیت‌های کشاورزی در دشت سیلابی رودخانه‌ها، گاهی اوقات تأثیرگذاری بیشتری نسبت به عوامل طبیعی دارند (مااب و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۱۹). به همین دلیل، شناخت فرآیندهای رودخانه‌ای و عوامل کنترل‌کننده رفتار رودخانه‌ها از دیدگاه‌های مختلف از جمله رسوب‌شناسی حائز اهمیت است. بررسی ویژگی‌های بافتی و شاخص‌های آماری رسوبات رودخانه‌ای علاوه بر کاربردهای عمرانی، می‌تواند ابزار مفیدی در تفسیر محیط‌های رسوبی رودخانه‌ای دیرینه باشد. علاوه بر این، رخساره‌های رسوبی که در شرایط مختلف بر جای گذاشته می‌شوند ناشی از تغییرات رژیم جریان یا در مقیاس بزرگتر تغییر در محیط رسوبی می‌باشند (رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵۰). تشخیص عناصر ساختاری رودخانه‌ای در نهشته‌های رسوبی این سیستم، نقش مهمی در تفسیر توالی‌های رسوبی دیرینه داشته و به بازسازی الگوی کانال‌های دیرینه کمک می‌کند (بنیتو و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۰).

حوضه آبریز رودخانه افین در استان خراسان جنوبی و در جنوب شرق قائن قرار دارد. این رودخانه منبع اصلی تأمین آب کشاورزی روستاهای واقع در این حوضه بوده و بیشترین تأثیر را از لحاظ تولید رسوب در حوضه آبریز سد حاجی آباد دارد. هدف اصلی از انجام این تحقیق (۱) بررسی خصوصیات رسوب‌شناسی (پارامترهای بافتی) و تعیین عوامل مؤثر در ایجاد ناپیوستگی‌های رسوبی، (۲) شناسایی رخساره‌های سنگی و ارائه مدل رسوبگذاری رودخانه افین است.

### موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه افین به شکل کشیده و با مساحتی حدود ۱۱۸۱ کیلومتر مربع و با مختصات جغرافیایی  $04^{\circ} 44' 59''$  و  $02^{\circ} 15' 33''$  و  $02^{\circ} 43' 33''$  عرض شمالی، در فاصله تقریباً ۱۳۵ کیلومتری شمال شرق بیرجند (استان خراسان جنوبی) و در جنوب شرق قائن قرار دارد (شکل ۱A). طول رودخانه اصلی این حوضه به حدود ۶۰ کیلومتر می‌رسد و شبکه هیدروگرافی حوضه دارای الگوی دندریتی است. حداکثر ارتفاع این حوضه از سطح دریا ۲۷۲۶ متر در مقلان و حداقل ارتفاع از سطح دریا ۱۴۱۰ متر در افین می‌باشد (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان جنوبی، ۱۳۸۸: ۳۶). شیب متوسط این رودخانه ۴/۷ درصد بوده و جزء رودخانه‌های با شیب زیاد محسوب می‌شود. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۱۸۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالیانه حدود ۲۸ درجه سانتی‌گراد است.

رودخانه افین در بخش زهان و افین به صورت فصلی جریان داشته و مسیر کلی این رودخانه در ابتدا به سمت شمال و سپس به سمت شمال شرق تغییر می‌یابد. این رودخانه پس از اتصال به رودخانه‌های علی‌آباد، مولید و بشیران به درون سد حاجی‌آباد می‌ریزد.



شکل ۱: (A) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به حوضه آبریز رودخانه افین، (B) حوضه آبریز رودخانه مورد مطالعه و موقعیت نمونه‌های رسوبی برداشت شده.

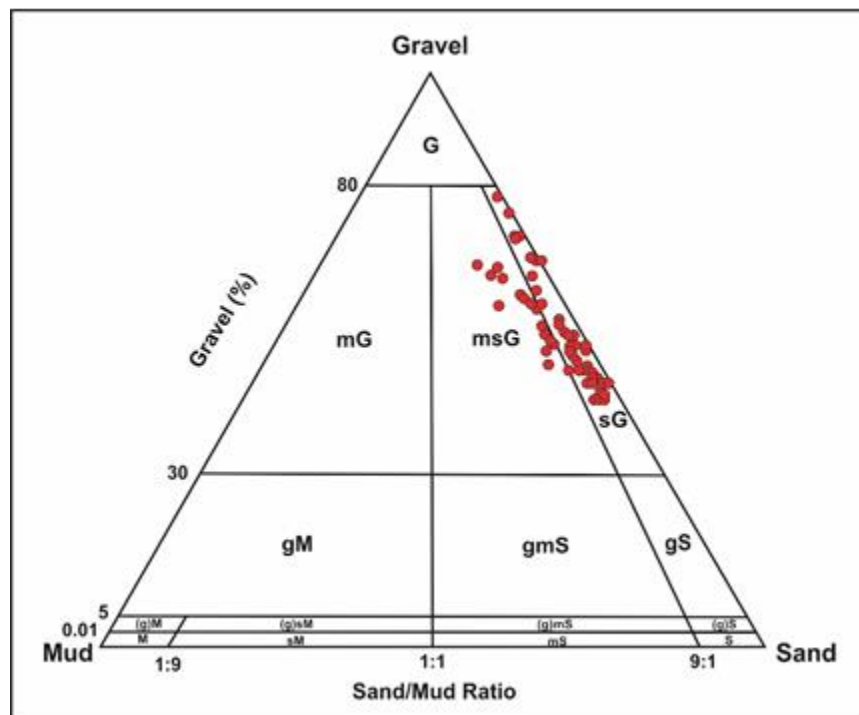
## روش مطالعه

در طی عملیات صحرایی تعداد ۵۵ نمونه از رسوبات کف کانال و با حفر چاله‌هایی به عمق ۲۰ سانتی‌متری و با فواصل نمونه‌برداری منظم از بالادست تا پایین دست جریان جهت آزمایش دانه‌سنجی برداشت شده و موقعیت جغرافیایی و ارتفاع هر نمونه توسط GPS ثبت گردیده است (شکل ۱B). قسمت‌های فعال کانال رودخانه جهت انجام نمونه‌برداری انتخاب شده است. نمونه‌های جمع‌آوری شده پس از خشک شدن در آزمایشگاه با استفاده از روش غربال خشک با بازه ۲- تا ۴ فی به فاصله نیم فی دانه‌سنجی و با دقت وزنی ۰/۰۲ گرم وزن شده‌اند. نتایج آنالیز نمونه‌های مورد مطالعه توسط نرم افزار Excel به صورت منحنی‌های هیستوگرام و تجمعی ترسیم شده و نامگذاری رسوبات بر اساس طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴) انجام شده است. پارامترهای آماری نظیر میانگین، میانه، جورشدگی، کج‌شدگی و کشیدگی برای هر کدام از نمونه‌ها به روش ترسیمی جامع فولک محاسبه شده است. در مطالعات صحرایی ویژگی‌های بافتی و ساختارهای رسوبی رسوبات دیواره کانال رودخانه از بالادست تا پایین دست جریان بررسی و تفکیک رخساره‌های رسوبی بر اساس طبقه‌بندی میال (۲۰۰۶) صورت گرفته است. در این مطالعه برای محاسبه میزان فرسایش سالانه در حوضه آبریز رودخانه افین از مدل EPM استفاده شده است.

## یافته‌های پژوهش و بحث

### - آنالیز ذرات

بررسی توزیع اندازه، مقادیر فراوانی و نوع شکل دانه‌ها برای درک فرآیندهای مؤثر در انتقال رسوب در سیستم‌های رودخانه‌ای ضروری است. توزیع اندازه دانه‌ها علاوه بر اینکه امکان طبقه‌بندی مجموعه دانه‌ها را فراهم می‌کند، به توصیف مورفولوژی و شکل رسوبات بستر رودخانه‌ای نیز کمک می‌کند (گارفالاکیس و همکاران، ۲۰۲۳: ۲). نتایج دانه‌سنجی رسوبات کانال فعال و نیز فراوانی رخساره‌های رسوبی موجود در دیواره کانال رودخانه افین نشان می‌دهد که این رودخانه، رودخانه‌ای با بار بستر گراولی است. در نمونه‌های رسوب مورد مطالعه درصد وزنی ذرات در اندازه گراول از ۴۵/۹۴ تا ۷۸/۵۴ درصد (با میانگین ۵۸/۲۶ درصد)، درصد ذرات در اندازه ماسه از ۲۰/۲۴ تا ۵۰/۹۶ درصد (با میانگین ۳۸/۰۶ درصد) و درصد ذرات در اندازه گل از ۰/۱۶ تا ۱۰/۴۴ درصد (با میانگین ۳/۶۷ درصد) متغیر است. نامگذاری نمونه‌های رسوب مورد مطالعه بر مبنای طبقه‌بندی بافتی فولک (۱۹۷۴) نشان می‌دهد که ۷۲/۷ درصد از نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی گراول ماسه‌ای (sG) و حدود ۲۷/۳ درصد از آنها در محدوده‌ی گراول ماسه‌ای گلی (msG) قرار می‌گیرند (شکل ۲).



شکل ۲: نامگذاری رسوبات رودخانه افین بر اساس طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴).

شکل ۳A نمودار پروفیل طولی رودخانه و شکل ۳B تغییرات درصد شیب در طول رودخانه افین را نشان می‌دهند که با کاهش تدریجی شیب به سمت پایین دست جریان همراه است. بررسی مقادیر میانگین و میانه اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر از بالادست به سمت پایین دست رودخانه (جدول ۱) نشان می‌دهد که مقادیر میانه از ۱/۱۸ تا ۳/۳۶ میلی‌متر (به طور

متوسط ۱/۹۶ میلی‌متر) و مقادیر میانگین از ۱ تا ۳/۶۵ میلی‌متر (به طور متوسط ۱/۷۴ میلی‌متر) در تغییر است (جدول ۱). همانطور که در شکل‌های ۴A و ۴B مشاهده می‌شود روند منظمی در کاهش مقادیر میانه و میانگین از بالادست به سمت پایین دست جریان ملاحظه نمی‌شود. با توجه به روند تغییرات اندازه دانه‌ها در رودخانه مورد مطالعه می‌توان توالی‌های مجزایی از روندهای ریزشوندگی اندازه دانه‌ها به سمت پایین دست جریان را از هم تفکیک کرد. در واقع، در رودخانه افین تعدادی پیوستگی رسوبی مشخص از منشأ تا مصب رودخانه وجود دارد که هر یک با افزایش تأمین رسوب درشت آغاز شده و با ریزشوندگی تدریجی ذرات بستر به سمت پایین دست دنبال می‌شود (شکل ۵). روند کاهش اندازه ذرات به سمت پایین دست در بیشتر رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد، اما این روند توسط عوامل متعدد دچار تغییر می‌شود. جورشدگی هیدرولیکی و سایش دو عامل اصلی کنترل‌کننده روند ریزشوندگی اندازه ذرات به سمت پایین دست در سیستم‌های رودخانه‌ای می‌باشند (موسوی حرمی، ۱۳۹۳: ۷۴). دانه‌ها در اندازه‌های متفاوت به طرق مختلفی حرکت می‌کنند که باعث جدا شدن آنها از یکدیگر در رسوبات می‌گردد و آن را جورشدگی هیدرولیکی می‌نامند (موسوی حرمی، ۱۳۹۳: ۷۵). سایش شامل فرآیندهای ورقه‌ای شدن، ساییده شدن، شکستگی و برخورد ذرات به یکدیگر است که میزان قابلیت فرسایش سنگ در مقابل عوامل فرساینده نظیر آب، باد و غیره را نشان می‌دهد (موسوی حرمی، ۱۳۹۳: ۸۴). عواملی چون ورود شاخه‌های فرعی، ریزش در اطراف دره و تماس با مخروط‌های افکنه مجاور، فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه مورد مطالعه، تغییرات سنگ‌شناسی، تغییرات شیب کف بستر و وضعیت مورفولوژیکی و هیدرولیکی کانال رودخانه و فعالیت‌های انسانی باعث تغییر روند ریزشوندگی اندازه ذرات در طول پروفیل طولی رودخانه شده و با ایجاد پیوستگی‌های رسوبی متعدد از بالادست به سمت پایین دست جریان همراه هستند (رستمی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶: ۷۵؛ قلعه‌نوئی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱). با توجه به آنچه گفته شد و بررسی نمودار تغییرات میانگین اندازه ذرات و الگوی ریزشوندگی آنها (شکل ۵)، در رودخانه افین ۶ پیوستگی و ۵ ناپیوستگی رسوبی مشخص شده است.

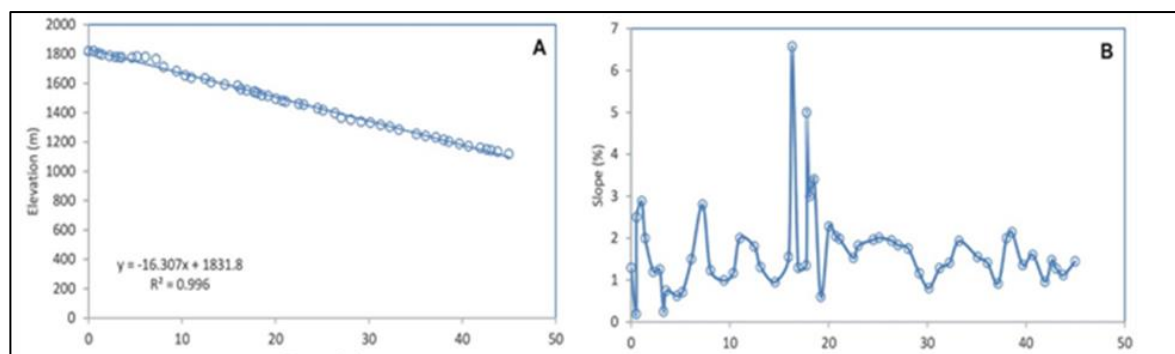
همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود اولین ناپیوستگی رسوبی در محل نمونه ۶ واقع شده و طول پیوستگی رسوبی قبل از آن (از نمونه ۱ تا ۵) حدود ۱/۴۲ کیلومتر است. علت ایجاد این ناپیوستگی اتصال شاخه فرعی به کانال اصلی رودخانه می‌باشد که مقدار میانگین اندازه ذرات با نزدیک شدن به این شاخه‌های فرعی افزایش می‌یابد (شکل ۶A). به طور کلی ورود یک شاخه فرعی به کانال اصلی با تغییراتی در انرژی و هیدرولیک جریان همراه است که متعاقباً باعث ایجاد تغییرات پارامترهای بافتی رسوب نظیر میانگین و میانه می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۳: ۷). دومین ناپیوستگی رسوبی در محل نمونه شماره ۲۱ واقع شده و طول پیوستگی رسوبی مربوط به آن حدود ۱۳/۱۷ کیلومتر است. در این قسمت از رودخانه، ورود رسوبات دانه درشت ناشی از ناپایداری شیب و ریزش دیواره‌های کانال اصلی رودخانه عامل اصلی ایجاد این ناپیوستگی است (برای مثال، اسلندر و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۹۵؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳: ۷) (شکل ۶B). سومین پیوستگی از نمونه ۲۱ تا نمونه ۲۳ دیده می‌شود و حدود ۲/۳۴ کیلومتر طول دارد. سومین ناپیوستگی رسوبی در محل نمونه ۲۴ واقع شده و علت ایجاد آن ورود کانال فرعی با رسوبات خیلی دانه درشت است که باعث افزایش مقدار میانگین اندازه ذرات شده است (شکل ۶C). چهارمین ناپیوستگی رسوبی در محل نمونه ۲۷ ملاحظه شده و طول پیوستگی رسوبی قبل از آن حدود ۱/۶۲ کیلومتر است. ناپایداری دیواره کانال اصلی رودخانه در این منطقه و ریزش رسوبات دانه درشت به درون کانال، باعث بهم خوردن روند ریزشوندگی ذرات و ایجاد این ناپیوستگی رسوبی شده است (شکل ۶D). آخرین ناپیوستگی رسوبی مربوط به نمونه شماره ۴۰ بوده و طول پیوستگی رسوبی مرتبط با آن حدود ۱۱/۶۲ کیلومتر است. تغییرات سنگ‌شناسی منطقه باعث تغییر روند منظم ریزشوندگی ذرات و ایجاد این ناپیوستگی رسوبی شده است (برای مثال، موسوی حرمی و همکاران،

۱۳۸۰:۳۵۵؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳: ۸) (شکل ۶E). در این منطقه تغییر واحدهای سنگ‌شناسی از گدازه‌های آتشفشانی مقاوم نسبت به هوازگی و فرسایش به رسوبات پادگانه‌ای آبرفتی با مقاومت کمتر، باعث افزایش تولید گراول شده است (برای مثال، خدابخش، ۱۳۹۳: ۱۰۴). آخرین پیوستگی رسوبی از نمونه ۴۰ تا نمونه ۵۵ ادامه دارد که با ریزشوندگی تقریباً منظم اندازه ذرات به سمت پایین دست جریان همراه است. در برخی نواحی بی‌نظمی‌های کوچکی مشاهده می‌شود که به رخنمون سنگ بستر (شکل ۶F)، ورود شاخه‌های فرعی و ورود رسوبات دانه درشت‌تر نسبت داده شده است. در نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه علاوه بر مقدار میانگین و میانه اندازه ذرات، شاخص‌های بافتی دیگر نظیر جورشدگی، کج‌شدگی و کشیدگی نیز محاسبه شده (جدول ۱) و نحوه تغییرات آنها از بالادست به سمت پایین دست جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

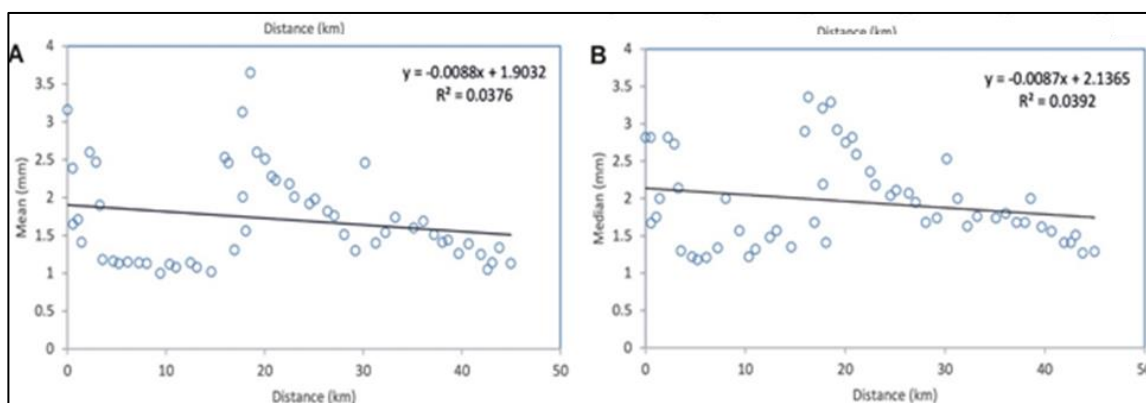
جدول ۱: مشخصات مکانی، درصد شیب و پارامترهای بافتی محاسبه شده در نمونه‌های رسوب رودخانه‌ای مورد مطالعه.

شماره نمونه	فاصله تا نمونه ۱ (Km)	ارتفاع (m)	شیب (%)	میانگین (mm)	میانه (mm)	جورشدگی (Phi)	کج‌شدگی	کشیدگی	نام رسوبات
۱	۰	۱۸۱۹	۱/۲۹	۳/۱۶	۲/۸۲	۲/۸۷	-۰/۲	۱/۲۴	گراول ماسه‌ای گلی
۲	۰/۵۱	۱۸۲۰	-۰/۱۹	۲/۳۹	۲/۸۲	۲/۶۶	۰/۲	۱/۰۳	گراول ماسه‌ای گلی
۳	۰/۵۵	۱۸۱۹	۲/۵	۱/۶۵	۱/۶۷	۲/۱۵	-۰/۰۵	۱/۷۳	گراول ماسه‌ای گلی
۴	۱/۰۷	۱۸۰۴	۲/۸۸	۱/۷۱	۱/۷۵	۲/۳۳	-۰/۰۶	۱/۲۸	گراول ماسه‌ای
۵	۱/۴۲	۱۷۹۷	۲/۰	۱/۴۱	۲/۰	۲/۹۱	-۰/۱۸	۱/۳۹	گراول ماسه‌ای گلی
۶	۲/۲۵	۱۷۸۷	۱/۲	۲/۶	۲/۸۲	۲/۹۳	-۰/۱۵	۱/۳۷	گراول ماسه‌ای
۷	۲/۸۹	۱۷۷۹	۱/۲۵	۲/۴۷	۲/۷۳	۱/۸۵	-۰/۲۸	۱/۵۷	گراول ماسه‌ای گلی
۸	۳/۲۸	۱۷۷۸	-۰/۲۵	۱/۹	۲/۱۴	۲/۳۹	-۰/۱۱	۱/۱۱	گراول ماسه‌ای
۹	۳/۵۵	۱۷۷۶	-۰/۷۴	۱/۱۸	۱/۳	۲/۲۱	-۰/۱۳	۱/۱	گراول ماسه‌ای
۱۰	۴/۶۵	۱۷۷۵	-۰/۶۲	۱/۱۶	۱/۲۲	۱/۹۲	-۰/۹۹	-۰/۱۲	گراول ماسه‌ای
۱۱	۵/۲۰	۱۷۸۲	-۰/۷۱	۱/۱۳	۱/۸	۱/۸۷	-۰/۹۵	-۰/۱۹	گراول ماسه‌ای
۱۲	۶/۱۱	۱۷۷۹	۱/۵	۱/۱۵	۱/۲۱	۱/۲۹	۱/۰۵	-۰/۲۳	گراول ماسه‌ای
۱۳	۷/۲۳	۱۷۶۴	۲/۸	۱/۱۴	۱/۳۴	۱/۹۸	۱/۱	-۰/۲۹	گراول ماسه‌ای
۱۴	۸/۰۴	۱۷۱۱	۱/۳۳	۱/۱۳	۲/۰	۲/۱۴	۱/۹	-۰/۱۸	گراول ماسه‌ای
۱۵	۹/۴۱	۱۶۸۳	-۰/۹۹	۱/۰	۱/۵۷	۱/۷۹	۱/۰۶	-۰/۱	گراول ماسه‌ای
۱۶	۱۰/۲۵	۱۶۵۴	۱/۱۷	۱/۱۲	۱/۲۲	۱/۶۲	۱/۰۹	-۰/۱۷	گراول ماسه‌ای
۱۷	۱۱/۰	۱۶۳۸	۲/۰	۱/۰۸	۱/۳۳	۱/۹۳	-۰/۸۶	-۰/۲۵	گراول ماسه‌ای
۱۸	۱۲/۴۷	۱۶۳۲	۱/۸	۱/۱۴	۱/۶۸	۲/۰۴	۱/۰۲	-۰/۲۱	گراول ماسه‌ای
۱۹	۱۳/۱۲	۱۶۰۸	۱/۳۱	۱/۰۸	۱/۵۷	۱/۹۹	۱/۰	-۰/۲۸	گراول ماسه‌ای
۲۰	۱۴/۵۹	۱۵۹۱	-۰/۹۵	۱/۰۲	۱/۳۵	۱/۷۵	-۰/۹۸	-۰/۱۸	گراول ماسه‌ای
۲۱	۱۵/۹۶	۱۵۸۳	۱/۵۵	۲/۵۳	۲/۹	۱/۳۹	-۰/۲۶	۱/۳۲	گراول ماسه‌ای گلی
۲۲	۱۶/۳۱	۱۵۶۰	۶/۵۷	۲/۴۶	۳/۳۴	۳/۴	-۰/۱۹	۱/۱	گراول ماسه‌ای گلی
۲۳	۱۶/۹۳	۱۵۵۲	۱/۲۹	۱/۳۱	۱/۶۸	۲/۳۱	۰/۲	۱/۴۲	گراول ماسه‌ای گلی
۲۴	۱۷/۷۴	۱۵۴۱	۱/۳۵	۳/۱۳	۳/۲۱	۱/۲۶	-۰/۰۸	۱/۱۸	گراول ماسه‌ای
۲۵	۱۷/۷۸	۱۵۴۳	۵	۲/۰۱	۲/۱۹	۱/۳۳	-۰/۱۱	-۰/۹۲	گراول ماسه‌ای
۲۶	۱۸/۰۸	۱۵۳۴	۳	۱/۵۶	۱/۴۱	۱/۵	-۰/۱۷	۱/۵۷	گراول ماسه‌ای
۲۷	۱۸/۵۵	۱۵۱۸	۳/۴	۳/۶۵	۳/۲۹	۱/۸	-۰/۱۹	۱/۱۷	گراول ماسه‌ای
۲۸	۱۹/۲۱	۱۵۱۴	-۰/۶	۲/۶	۲/۹۲	۱/۷۷	-۰/۲۹	۱/۳۱	گراول ماسه‌ای
۲۹	۲۰/۰۴	۱۴۹۵	۲/۲۸	۲/۵۱	۲/۱۸	۱/۱۸	۰/۱	-۰/۹۹	گراول ماسه‌ای
۳۰	۲۰/۷۲	۱۴۸۱	۲/۰۵	۲/۲۸	۲/۸۲	۱/۶	-۰/۳۳	۱/۰۴	گراول ماسه‌ای
۳۱	۲۱/۱۲	۱۴۷۵	۱/۹۸	۲/۲۳	۲/۵۹	۱/۸۱	-۰/۹۷	-۰/۲۱	گراول ماسه‌ای
۳۲	۲۲/۵۱	۱۴۶۱	۱/۵۳	۲/۱۸	۲/۳۶	۲/۱	-۰/۸۱	-۰/۲۸	گراول ماسه‌ای
۳۳	۲۳/۰۲	۱۴۵۵	۱/۸۲	۲/۰۱	۲/۱۸	۱/۹۶	-۰/۱۱	-۰/۱۱	گراول ماسه‌ای
۳۴	۲۴/۵۴	۱۴۲۹	۱/۹۶	۱/۹۲	۲/۰۴	۲/۰۷	-۰/۸۷	-۰/۲۸	گراول ماسه‌ای
۳۵	۲۵/۱۱	۱۴۱۶	۲/۰۱	۱/۹۸	۲/۱۱	۱/۰۲	-۰/۹۲	-۰/۳۱	گراول ماسه‌ای
۳۶	۲۶/۳۷	۱۳۹۷	۱/۹۴	۱/۸۲	۲/۰۷	۲/۱۱	-۰/۹	-۰/۲۴	گراول ماسه‌ای
۳۷	۲۷/۰۵	۱۳۶۶	۱/۸۳	۱/۷۶	۱/۹۵	۲/۱۳	-۰/۸۵	-۰/۳۹	گراول ماسه‌ای
۳۸	۲۸/۰۷	۱۳۵۲	۱/۷۵	۱/۵۱	۱/۶۸	۱/۸۶	-۰/۴۳	۱/۲۸	گراول ماسه‌ای
۳۹	۲۹/۱۹	۱۳۳۹	۱/۱۶	۱/۳	۱/۷۴	۲/۴۵	-۰/۲۱	-۰/۹۷	گراول ماسه‌ای گلی

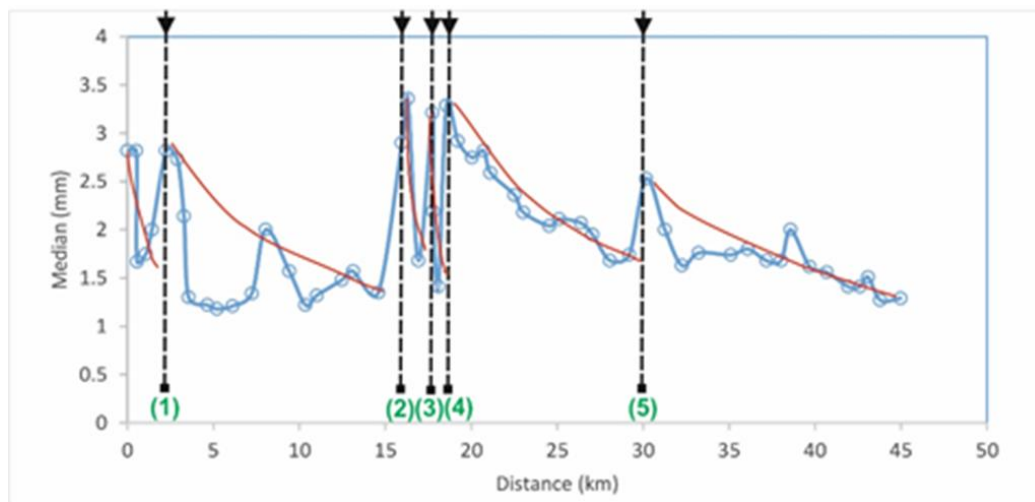
گراول ماسه‌ای گلی	۱/۳۲	-۰/۴	۲/۷۱	۲/۵۳	۲/۴۶	-۰/۸۱	۱۳۳۱	۳۰/۱۷	۴۰
گراول ماسه‌ای گلی	۱/۱۹	-۰/۳۳	۲/۱۲	۲	۱/۴	۱/۲۸	۱۳۱۷	۳۱/۳۶	۴۱
گراول ماسه‌ای	۱/۰۲	--۰/۰۶	۱/۵۸	۱/۶۳	۱/۵۴	۱/۴۱	۱۳۰۲	۳۲/۲۵	۴۲
گراول ماسه‌ای	۱/۴۳	-۰/۰۲	۱/۸۳	۱/۷۶	۱/۷۴	۱/۹۳	۱۲۸۴	۳۳/۲۳	۴۳
گراول ماسه‌ای گلی	۱/۵۵	-۰/۲۸	۱/۰۴	۱/۷۴	۱/۶	۱/۵۵	۱۲۵۵	۳۵/۱۰	۴۴
گراول ماسه‌ای	۱/۱۶	-۰/۱۸	۱/۸۵	۱/۸	۱/۶۹	۱/۴۱	۱۲۴۱	۳۶/۰۹	۴۵
گراول ماسه‌ای	۱/۴۵	-۰/۰۱	۱/۳۱	۱/۶۸	۱/۵۱	-۰/۹۲	۱۲۳۱	۳۷/۱۷	۴۶
گراول ماسه‌ای گلی	۱/۲۷	-۰/۲	۲/۱۹	۱/۶۸	۱/۴۱	۲	۱۲۱۴	۳۸/۰۲	۴۷
گراول ماسه‌ای گلی	۱/۰۶	-۰/۳۸	۲/۳۱	۲	۱/۴۴	۲/۱۴	۱۲۰۲	۳۸/۵۸	۴۸
گراول ماسه‌ای	۱/۲۸	-۰/۳۱	۱/۷۹	۱/۶۲	۱/۲۶	۱/۳۶	۱۱۸۷	۳۹/۶۸	۴۹
گراول ماسه‌ای گلی	۱/۲۸	-۰/۲۱	۲/۲۵	۱/۵۶	۱/۳۹	۱/۶	۱۱۷۱	۴۰/۶۸	۵۰
گراول ماسه‌ای	۱/۰۸	-۰/۳	۱/۹۷	۱/۴۱	۱/۲۵	-۰/۹۶	۱۱۵۹	۴۱/۹۳	۵۱
گراول ماسه‌ای	۱/۲۹	-۰/۳۲	۲/۱۱	۱/۴۱	۱/۰۵	۱/۴۷	۱۱۴۹	۴۲/۶۱	۵۲
گراول ماسه‌ای	۱/۱۲	-۰/۳۴	۲/۲۶	۱/۵۱	۱/۱۴	۱/۲۷	۱۱۴۳	۴۳/۰۸	۵۳
گراول ماسه‌ای	۱/۰۹	--۰/۰۸	۱/۳۵	۱/۲۷	۱/۳۴	۱/۱۲	۱۱۳۵	۴۳/۷۹	۵۴
گراول ماسه‌ای	-۰/۹۶	-۰/۱۴	۱/۹۹	۱/۲۹	۱/۱۳	۱/۴۴	۱۱۱۸	۴۴/۹۷	۵۵



شکل ۳: (A) پروفیل طولی و (B) تغییرات درصد شیب رودخانه مورد مطالعه از بالادست به سمت پایین دست جریان.



شکل ۴: تغییر پارامترهای بافتی (A) میانه و (B) میانگین نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه از بالادست به سمت پایین دست رودخانه افین.



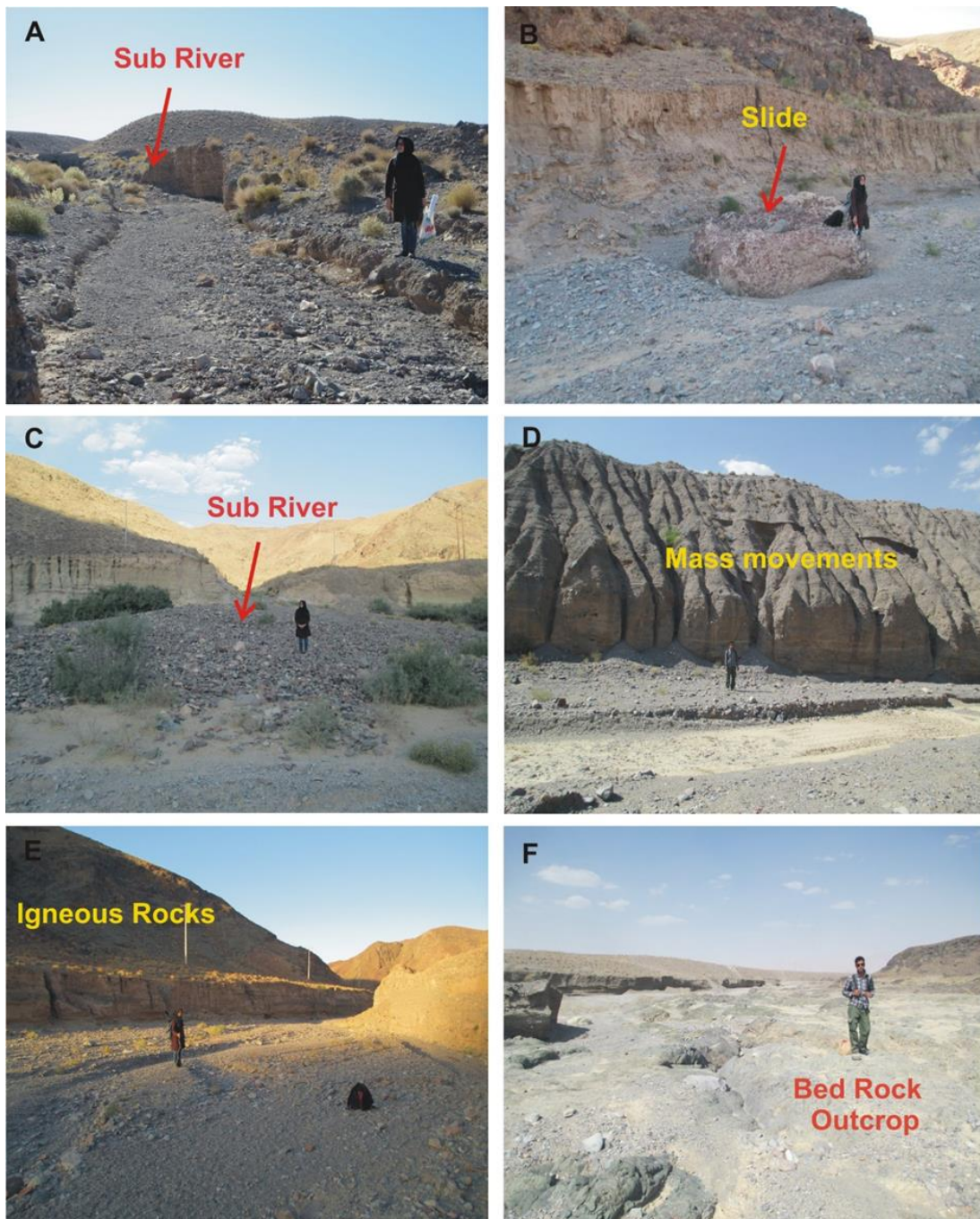
شکل ۵: تغییرات طولی میانگین اندازه ذرات و پیوستگی (خطوط منحنی قرمز رنگ) و ناپیوستگی‌های رسوبی موجود در رودخانه افین از بالادست به سمت پایین دست جریان که با شماره‌های سبز رنگ و خط چین مشکی نشان داده شده‌اند.

جورشدگی شاخصی است که یکنواختی ذرات تشکیل‌دهنده رسوب و نزدیک بودن قطر آنها را نشان می‌دهد و بر حسب فی قابل محاسبه است. مقادیر جورشدگی رسوبات مورد مطالعه در محدوده بین ۱/۰۲ فی (جورشدگی بد) تا ۳/۴ فی (جورشدگی بسیار بد) (به طور متوسط ۱/۹۷ فی؛ جورشدگی بد) در تغییر است (جدول ۱). همانطور که در شکل ۷A مشاهده می‌شود، در تغییرات مقادیر جورشدگی رسوبات رودخانه افین از بالادست به سمت پایین دست جریان روند منظمی وجود ندارد ولی به طور کلی مقادیر این پارامتر بافتی به سمت پایین دست کاهش یافته ( $R^2 = 0.0569$ ) و جورشدگی رسوبات بهتر می‌شود. علت نبود روند کاهشی منظم در مقادیر جورشدگی رسوبات رودخانه افین به ناپیوستگی‌های رسوبی ذکر شده مربوط می‌شود که با تغییرات دبی و قدرت جریان، شیب و مورفولوژی کانال و تغییرات سنگ‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی مجاور با کانال اصلی رودخانه همراه است. این عوامل باعث تغییرات نامنظم در اندازه رسوبات گردیده و روند بهبود جورشدگی ذرات به سمت پایین دست جریان را دچار تغییر می‌سازد. مقادیر کج‌شدگی رسوبات رودخانه افین از ۰/۱۹- (کج‌شدگی منفی) تا ۰/۴۳ (کج‌شدگی مثبت) با میانگین ۰/۱۹ (کج‌شدگی مثبت) در تغییر است (جدول ۱). به استثناء ۵ نمونه که دارای کج‌شدگی منفی هستند بقیه نمونه‌ها دارای کج‌شدگی مثبت هستند (جدول ۱). کج‌شدگی مثبت در محیط‌های رودخانه‌ای طبیعی است و حکایت از نبودن فرصت کافی برای شست و شوی ذرات دانه ریز توسط جریان آب دارد. شکل ۷B تغییرات کج‌شدگی رسوبات را در طول رودخانه مورد مطالعه نشان می‌دهد. تغییرات فوق احتمالاً بدلیل وجود ناپیوستگی‌های رسوبی ذکر شده، تغییرات شیب بستر رودخانه و دبی جریان می‌باشد. با افزایش میزان کج‌شدگی جورشدگی رسوبات کاهش می‌یابد ( $R^2=0.0311$ ) (شکل ۷C)، این امر به علت رسوبگذاری مقادیر زیادی مواد معلق، از قبیل سیلت و رس در رسوبات رودخانه‌ای است که معمولاً به سمت پایین دست جریان افزایش می‌یابد. کشیدگی آخرین پارامتر بافتی است که نمایش‌دهنده توزیع اندازه ذرات در رسوب است و از نسبت جورشدگی دنباله منحنی به جورشدگی قسمت وسط منحنی به دست می‌آید. هر چقدر کشیدگی بیشتر باشد، جورشدگی رسوب بهتر است. مقادیر کشیدگی رسوبات رودخانه افین محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به تقسیم‌بندی فولک، این مقادیر از ۰/۸۱ (پهن) تا ۱/۷۳ (بسیار کشیده)

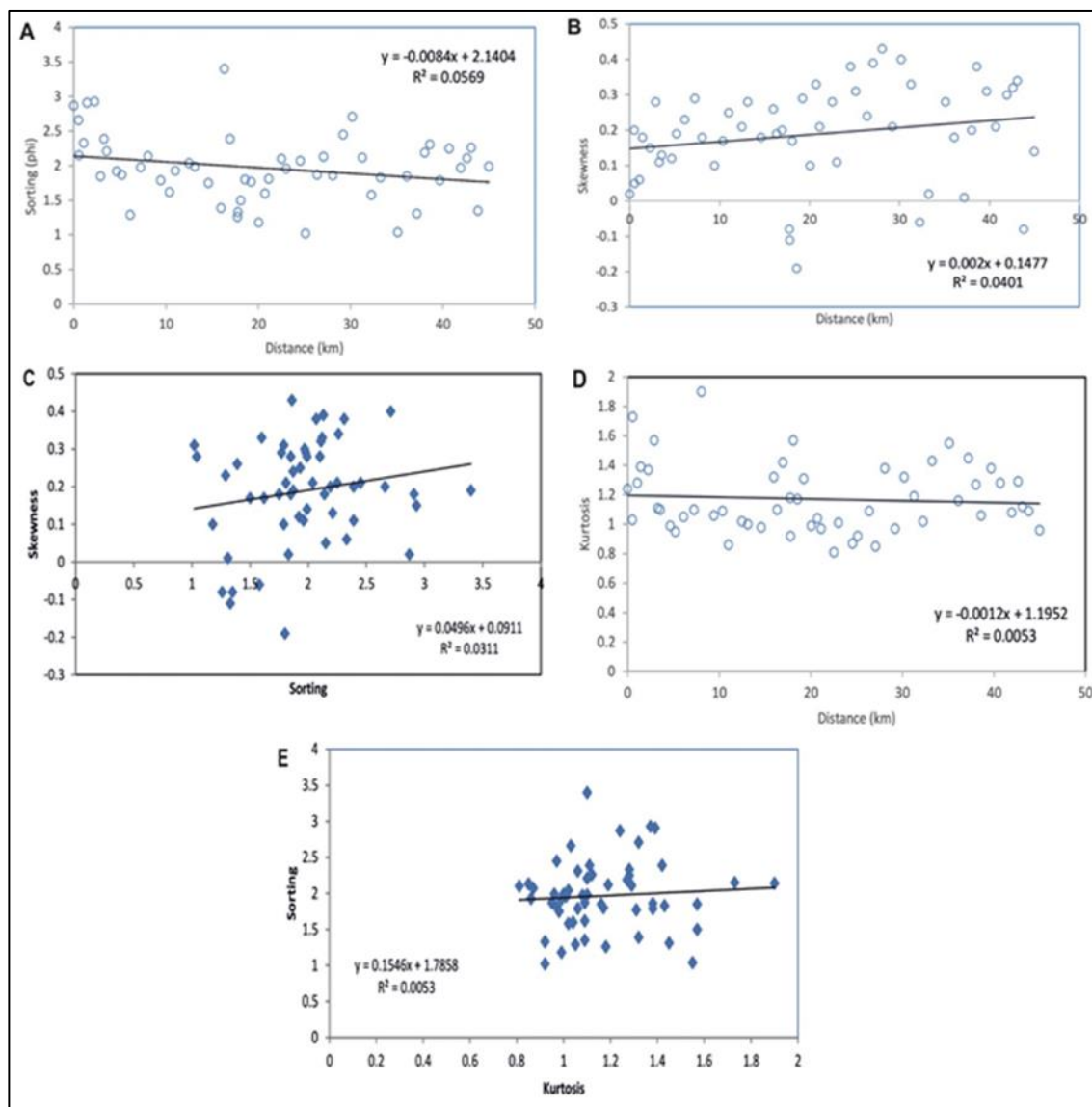
با متوسط ۱/۱۹ (کشیده) در تغییر است. باتوجه به شکل ۷D مقادیر کشیدگی رسوبات رودخانه افین از پراکندگی نسبتاً زیادی برخوردار بوده و تغییرات آن در مسیر رودخانه از روند خاصی تبعیت نمی‌کند ( $R^2=0.0053$ ). شکل ۷E ارتباط جورشدگی و کشیدگی در رسوبات مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در اکثر نمونه‌ها هیچگونه ارتباطی بین این دو پارامتر ملاحظه نمی‌شود. با اینکه کشیدگی رسوبات از حالت پهن تا بسیار کشیده در تغییر است، جورشدگی اکثر نمونه‌ها در محدوده بد و بسیار بد قرار می‌گیرد. این امر شاید به علت فراوانی ذرات گراولی نسبت به ذرات دانه ریزتر ماسه‌ای و گلی باشد.

#### - رخساره‌های رسوبی

آنالیز رخساره‌های رسوبی رودخانه‌ای به عنوان ابزاری مفید، در برقراری ارتباط بین نهشته‌های مرتبط با هم، بازسازی شرایط محیط رسوبگذاری و ارائه مدل رسوبی کاربرد دارد (برای مثال، هوارتا و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۳۶؛ شوکلا و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۱۲). اختصاصات رخساره‌های رسوبی موجود در دیواره کانال رودخانه افین توسط شرایط جریان در زمان رسوبگذاری و اختصاصات رسوب تعیین شده است (برای مثال، حسن و همکاران، ۲۰۰۹: ۵۹). طبق تقسیم‌بندی میال (۲۰۰۶: ۷۹) و بر مبنای اختصاصات بافتی رسوبات و ساختمان‌های رسوبی موجود، رخساره‌های رسوبی آواری (رخساره‌های گراولی، ماسه‌ای و گلی) و غیرآواری (رخساره کربنات‌های خاکزا) در دیواره کانال رودخانه افین شناسایی شده که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می‌شود.



شکل ۶: علل ایجاد ناپیوستگی‌های رسوبی مشاهده شده در رودخانه افین، (A) ورود شاخه فرعی، (B) لغزش و ریزش قطعات سنگی دیواره به درون کانال، (C) ورود شاخه فرعی، (D) حرکات توده‌ای در رسوبات آبرفتی دیواره کانال، (E) تغییرات سنگ‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی اطراف کانال و (F) ظهور سنگ بستر.



شکل ۷: تغییر پارامترهای بافتی جورشدگی (A)، کج‌شدگی (B) و کشیدگی (D) از بالادست به سمت پایین دست رودخانه افین. (C) ارتباط کج‌شدگی و جورشدگی و جورشدگی و کشیدگی (E) ارتباط جورشدگی و کشیدگی در نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه.

## مجموعه رخساره‌های گراولی

این مجموعه رخساره‌ای شامل رخساره‌های سنگی Gp و Gh، Gt، Gmm، Gcm می‌باشد.

### رخساره گراول ماتریکس پشتیبان توده‌ای (Matrix-supported Massive Gravel: Gmm)

**توصیف:** فراوانی این رخساره رسوبی در بالادست رودخانه افین بیشتر بوده و رفته رفته به سمت پایین دست از حضور آن در میان رخساره‌های رسوبی دیگر کاسته می‌شود (شکل ۸۸). اندازه رسوبات گراولی در این رخساره از ۲ تا ۷۰ میلی‌متر (در حد گرانول تا کابل) متغیر بوده و هیچگونه ایمبریکاسیون یا جهت‌یافتگی در این قطعات مشاهده نشده است. رخساره رسوبی فوق به فرم پهن و گسترده، همراه با رخساره رسوبی گراول دانه پشتیبان توده‌ای (Gcm) مشاهده شده و دارای قاعده فرسایشی و مشخص است. مشخصه اصلی این رخساره نبود ساختمان رسوبی مشخص در آن و وجود حالت توده‌ای است. به عبارت دیگر، هیچگونه چینه‌بندی در این رسوبات ملاحظه نشده و دارای ماتریکس گلی است. قطعات گراولی در این رخساره نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده بوده و از جورشدگی ضعیفی برخوردارند.

**تفسیر:** وجود قاعده فرسایشی، نبود ساختمان‌های رسوبی و چینه‌بندی مشخص، جورشدگی ضعیف ذرات گراولی و فقدان ایمبریکاسیون در آنها و فراوانی ماتریکس گلی در این رخساره رسوبی نشان‌دهنده رسوبگذاری این نهشته‌ها از جریان‌های توده‌ای نزدیک به منشأ است. به علت فاصله کوتاه حمل و نقل، رسوبگذاری از جریان‌های خرده‌دار با ویسکوزیته بالا و نیز تمرکز بالای رسوب در این جریان‌ها امکان تشکیل ساختمان‌های رسوبی و فابریک خاص در رسوبات وجود نداشته و رسوبگذاری به صورت ناگهانی انجام شده است (میل، ۲۰۰۶: ۱۰۶، کالمیر و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۹؛ کویکا، ۲۰۱۱: ۹۵؛ جاویدان و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۱۵؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵).

### رخساره گراول دانه پشتیبان توده‌ای (Clast-supported Massive Gravel: Gcm)

**توصیف:** این رخساره فراوان‌ترین رخساره شناسایی شده در رودخانه مورد مطالعه است (شکل ۸۸). این رخساره شامل گراول دانه پشتیبان و توده‌ای است که اندازه قطعات آن از ۲ تا ۳۰۰ میلی‌متر (در اندازه گرانول تا بولدر) متغیر است. ذرات و قطعات تشکیل‌دهنده این رخساره نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده بوده و از جورشدگی بدی برخوردارند. اندازه ذرات تشکیل‌دهنده این رخساره از بالادست به سمت پایین دست جریان با کاهش انرژی برشی رودخانه کاهش می‌یابد. قاعده رخساره گاه به صورت فرسایشی و گاه به صورت تدریجی است. رخساره‌های رسوبی گراول ماتریکس پشتیبان توده‌ای (Gmm) و گل توده‌ای (Fm) به صورت متناوب و همراه با این رخساره مشاهده شده است. هیچگونه ایمبریکاسیونی در قطعات گراولی مشاهده نشده است. ماتریکس این رخساره شامل رسوبات ماسه‌ای متوسط تا درشت دانه است. در بالادست جریان ضخامت این رخساره بیشتر بوده و به سمت پایین دست جریان از ضخامت آن کاسته می‌شود. شکل هندسی رسوبات گاه به صورت عدسی شکل و گاه به صورت پهن و گسترده است.

**تفسیر:** فراوانی قطعات گراولی، نبود چینه‌بندی و فقدان ایمبریکاسیون در این رخساره رسوبی رسوبگذاری آن توسط جریان‌های خرده‌دار با پلاستیسیته کاذب و با بار رسوبی زیاد را نشان می‌دهد (جو و چو، ۲۰۰۱: ۳۱۱؛ میل، ۲۰۰۶: ۱۰۸؛ لانگ، ۲۰۰۶: ۸۲، حسن و همکاران، ۲۰۰۹: ۶۳؛ کوسونال و همکاران، ۲۰۰۹: ۴۷۱؛ کویکا، ۲۰۱۱: ۹۶). پوشش‌های گلی که در برخی نواحی مورد مطالعه بر روی این رخساره رسوبی مشاهده شده است (رخساره رسوبی Fm)، فروکش سیلاب، افت سرعت جریان و رسوبگذاری ذرات دانه‌ریزتر بر روی رخساره فوق را نشان می‌دهد.

### رخساره گراول دارای طبقه‌بندی مورب مسطح (Planar Cross Bedded Gravel: Gp)

**توصیف:** این رخساره رسوبی شامل قطعات گراولی در اندازه گرانول تا کابل (۲ تا ۳۶ میلی‌متر) است (شکل ۸C). فراوانی این رخساره رسوبی در بالادست جریان بیشتر است. ضخامت دسته‌های مورب در این رخساره به طور متوسط حدود ۱۲ سانتی‌متر است. تماس زیرین و فوقانی رخساره Gp با رخساره‌های Gcm و Gmm به صورت مشخص است. قطعات گراولی نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده بوده و از جورشدگی متوسط برخوردارند. ماتریکس بین قطعات از رسوبات در اندازه ماسه است. شکل هندسی این رخساره رسوبی در اکثر نقاط به صورت پهن و گسترده است.

**تفسیر:** رخساره رسوبی Gp احتمالاً در اثر مهاجرت سدهای متقاطع زبانه‌ای در یک سیستم رودخانه‌ای بریده بریده شکل می‌گیرد (برای مثال، میال، ۲۰۰۶: ۱۰۸؛ ون تا و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۵۷؛ فامبرینی و همکاران، ۲۰۱۷: ۵۲۲). ذرات تشکیل دهنده این رخساره در اثر جریان‌های کششی و به صورت بار بستر حمل شده‌اند. تشکیل طبقات مورب مسطح در این رخساره در اثر حمل و نقل ذرات گراولی، مهاجرت اشکال لایه‌ای فوق و برفازایی رسوبات صورت گرفته است (میال، ۲۰۰۶: ۱۰۸؛ فامبرینی و همکاران، ۲۰۱۷: ۵۲۳؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵؛ فو و همکاران، ۲۰۲۴: ۸).

### رخساره گراول دارای طبقه‌بندی مورب عدسی شکل یا تراف (Trough Cross Bedded Gravel: Gt)

**توصیف:** فراوانی رخساره رسوبی Gt نسبت به رخساره‌های گراولی دیگر کمتر بوده و اغلب در نواحی بالادست جریان مشاهده شده است (شکل ۸D). اندازه ذرات گراول در این رخساره از ۴ تا ۱۶ میلی‌متر (در اندازه گرانول تا پیل) در تغییر بوده و از جورشدگی متوسط تا بدی برخوردارند. اغلب ذرات گراولی نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده بوده و ماتریکس بین آنها را ذرات در اندازه ماسه متوسط تا درشت تشکیل می‌دهد. گاهی اوقات در قاعده دسته‌های طبقه‌بندی مورب عدسی شکل رسوبات گراول درشت‌تر به صورت بقایای کف کانال (Channel Lags) مشاهده می‌شود. ضخامت دسته‌های طبقه‌بندی مورب عدسی شکل در این رخساره به طور متوسط ۳۵ سانتی‌متر است. رخساره Gt معمولاً همراه با رخساره‌های Gcm و Gh مشاهده شده و تماس زیرین و فوقانی آن با این رسوبات به صورت مشخص است. شکل هندسی رسوبات این رخساره به صورت عدسی شکل است.

**تفسیر:** این رخساره سنگی معمولاً بر اثر مهاجرت دون‌های گراولی سه بعدی و به شکل رسوبات پرکننده کانال‌های فرعی گراولی شکل می‌گیرد (برای مثال، میال، ۲۰۰۶: ۱۰۸؛ فامبرینی و همکاران، ۲۰۱۷: ۵۲۳؛ فو و همکاران، ۲۰۲۴: ۸).

### رخساره گراول دارای چینه‌بندی افقی (Horizontally Stratified Gravel: Gh)

**توصیف:** این رخساره دارای قطعات گراولی در اندازه ۲ تا ۲۸ میلی‌متر (در اندازه گرانول تا کابل)، نیمه زاویه‌دار تا نیمه گردشده با جورشدگی متوسط تا ضعیف است (شکل ۸E). رخساره رسوبی Gh دانه پشتیبان بوده و دارای ماتریکس ماسه‌ای است. ساختمان رسوبی موجود در این رخساره چینه‌بندی افقی بوده و در برخی نقاط جهت‌یافتگی تقریباً افقی در قطعات گراولی این رخساره مشاهده می‌شود. رخساره رسوبی فوق دارای شکل هندسی ورقه‌ای شکل بوده و معمولاً همراه با رخساره Gcm دیده می‌شود. تماس رخساره Gh با رخساره Gcm در اکثر نقاط به صورت مشخص است.

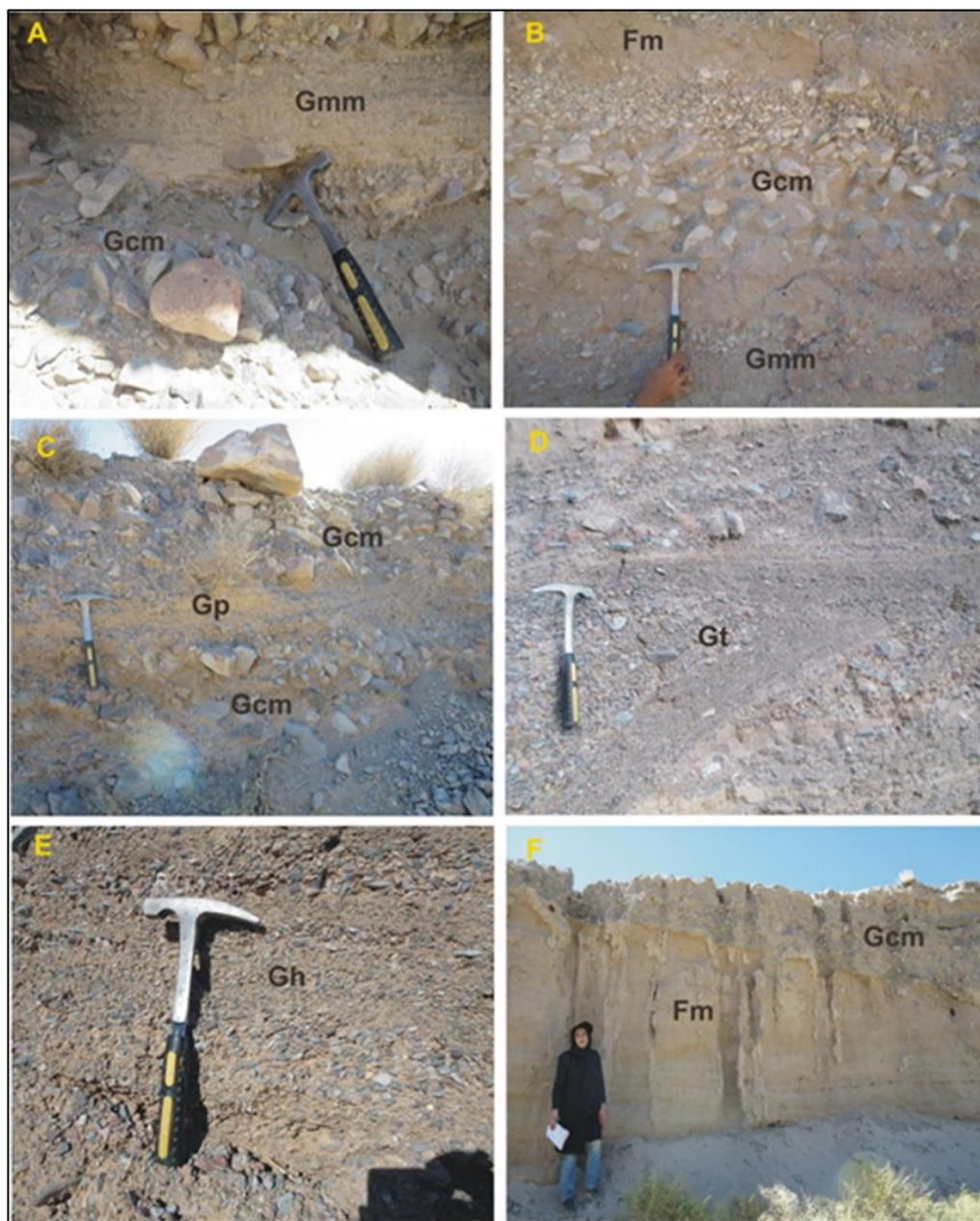
**تفسیر:** رخساره گراول غنی از قطعه دارای چین‌بندی افقی احتمالاً توسط برافزایی عمودی در سدهای طولی یا به شکل رسوبات باقیمانده در کف کانال تشکیل شده و در کانال‌های رودخانه‌ای با پیچش کم نهشته شده‌اند (برای مثال، میال، ۲۰۰۶: ۱۰۸؛ سیلور و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۸۵؛ عزمی و گلدبرگ، ۲۰۲۲: ۲۸۸).

#### **مجموعه رخساره‌های ماسه‌ای**

رخساره‌های ماسه‌ای شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه شامل رخساره‌های Sh, Sm, Sl, Sp و Sr است.

#### **رخساره ماسه با طبقه‌بندی توده‌ای (Massive Sand: Sm)**

**توصیف:** فراوانی این رخساره رسوبی نسبت به دیگر رخساره‌های ماسه‌ای در رودخانه مورد مطالعه کمتر است (شکل ۹A). اندازه ذرات ماسه در این رخساره رسوبی از ماسه متوسط تا درشت در تغییر است. سطح تماس تحتانی و فوقانی این رخساره با رخساره‌های رسوبی همراه (Gmm, Gcm و Fm) به صورت مشخص بوده و شکل هندسی آن ورقه‌ای است. هیچگونه ساختمان رسوبی در رخساره رسوبی Sm مشاهده نشده است.



شکل ۸: تصاویر صحرایی از رخساره‌های رسوبی گراولی و گلی در دیواره کانال رودخانه افین، (A) تناوب رخساره‌های Gcm و Gmm، (B) رخساره‌های Gcm، Gmm و Fm، (C) تناوب رخساره‌های Gp و Gcm، (D) رخساره رسوبی Gt، (E) رخساره رسوبی Gh و (F) تناوب رخساره Fm و Gcm.



شکل ۹: تصاویر صحرایی از مجموعه رخساره‌های ماسه‌ای شناسایی شده، (A) رخساره Sm، (B) رخساره Sh، (C) حضور رخساره P در رخساره رسوبی میزبان Sh، (D) رخساره رسوبی Sl، (E) رخساره Sp و (F) رخساره رسوبی Sr.

**تفسیر:** عدم تشکیل ساختمان رسوبی و ایجاد حالت توده‌ای در این رخساره رسوبی نهشته شدن آن توسط جریان‌های گراویده‌ای و یا رسوبگذاری سریع در طی فروکش جریان‌های سیلابی و پرشدگی سریع کنده‌شدگی‌ها را پیشنهاد می‌کند (برای مثال، میال، ۲۰۰۶: ۱۲۳؛ ون تا و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۶۰؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵).

### رخساره ماسه دارای چینه‌بندی افقی (Horizontally Stratified Sand: Sh)

**توصیف:** ضخامت این رخساره رسوبی از ۰/۰۶ تا ۰/۲۵ متر متغیر است. ذرات تشکیل‌دهنده آن در محدوده ماسه متوسط تا درشت بوده و دارای لایه‌بندی افقی است (شکل ۹B). از جمله رخساره‌های همراه با این رخساره می‌توان به رخساره Gcm، Sp و Fm اشاره کرد که در برخی نقاط مرز تحتانی و فوقانی این رخساره رسوبی با رخساره‌های همراه به صورت مشخص و در برخی نواحی به صورت تدریجی است. در برخی قسمت‌های دیواره کانال مورد مطالعه قطعاتی در حد گرانول هم به صورت پراکنده در این رخساره دیده می‌شود. شکل هندسی ورقه‌های این رخساره رسوبی به صورت ورقه‌ای است و در برخی نقاط تجمع کربنات‌های خاکزا در رخساره فوق مشاهده می‌شود (شکل ۹C).

**تفسیر:** این رخساره رسوبی به صورت طبقات مسطح، در شرایط رژیم جریانی پائین تجمع یافته است (میال، ۲۰۰۶: ۱۱۵؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵). شکل هندسی ورقه مانند و نازک لایه این رخساره رسوبی نشان می‌دهد که رسوبگذاری به صورت ورقه‌های ماسه‌ای قسمت فوقانی سدها یا به صورت نهشته‌های درون کانال در طی مرحله فروکش رویدادهای سیلابی صورت گرفته است (میال، ۲۰۰۶: ۱۲۰؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۰۹).

### رخساره ماسه با طبقه‌بندی مورب با زاویه کم (Low Angle Cross Bedded Sand: Sl)

**توصیف:** رخساره Sl با فراوانی بسیار کم و تنها در قسمت‌های میانی رودخانه افین مشاهده شده است. ویژگی اصلی این رخساره رسوبی وجود طبقه‌بندی‌های مورب با زاویه کم است و اندازه ذرات آن در حد ماسه متوسط تا ریز است (شکل ۹D). از جمله رخساره‌های همراه که در بالا و پایین این رخساره رسوبی مشاهده شده‌اند می‌توان به رخساره‌های Sp و Sh اشاره کرد که معمولاً سطح تماس زیرین و فوقانی رخساره Sl با رخساره‌های فوق به صورت مشخص است.

**تفسیر:** برای تشکیل این رخساره بایستی سرعت جریان آب بالاتر و بار رسوبی جریان کمتر باشد. این رخساره همچنین می‌تواند در صورت وجود شیب در زمان رسوبگذاری و به شکل پرشدگی کنده‌شدگی‌ها، حرکت دون‌های شسته‌شده و آنتی‌دون‌ها شکل بگیرد (میال، ۱۹۷۷: ۵۹۸؛ میال، ۲۰۰۶: ۱۲۰؛ ون تا و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۶۰).

### رخساره ماسه با لایه‌بندی مورب مسطح (Planar Cross Bedded Sand: Sp)

**توصیف:** این رخساره رسوبی دارای طبقه‌بندی مورب مسطح بوده و اندازه دانه‌های آن از ماسه ریز تا درشت در تغییر است (شکل ۹E). این رخساره معمولاً همراه با رخساره‌های گراول غنی از ماتریکس توده‌ای (Gmm) و رخساره ماسه دارای لایه‌بندی افقی (Sh) یافت شده است. ضخامت هر دسته طبقه‌بندی مورب بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر در نوسان است. تماس این رخساره رسوبی با رخساره Gmm به صورت مشخص و با رخساره Sh به صورت تدریجی است.

**تفسیر:** این رخساره معمولاً بر اثر مهاجرت اشکال لایه‌ای با مقیاس متوسط نظیر دون‌های دوبعدی با خط الرأس مستقیم یا توسط جریان‌های سیلابی ورقه‌ای ایجاد شده است. این اشکال لایه‌ای در شرایط رژیم جریانی پایین در رسوبات ماسه‌ای فوق تشکیل شده‌اند (میال، ۲۰۰۶: ۱۱۳؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۰۹؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۳۶۰).

### رخساره ماسه با لامیناسیون مورب ریپلی (Ripple Cross Laminated Sand: Sr)

**توصیف:** رخساره رسوبی Sr در ماسه‌های بسیار دانه ریز تا متوسط دانه مشاهده شده است (شکل ۹F). رخساره رسوبی فوق بر روی رخساره Sh قرار گرفته و توسط رخساره Fl پوشیده می‌شود. آثار ریپلی موجود از نوع ریپل مارک‌های جریانی بوده و تماس تختانی و فوقانی این رخساره با رخساره‌های همراه به صورت مشخص است.

**تفسیر:** وجود لامیناسیون‌های مورب ریپلی نشان‌دهنده رسوبگذاری توسط جریان‌های کششی زیر آب می‌باشد (میال، ۱۹۷۷: ۵۹۸). رخساره سنگی Sr ممکن است در اثر مهاجرت به سمت پائین دست مجموعه‌های ریپلی نامتقارن با خط‌الرأس پیچیده، در شرایط رژیم جریانی پائین، شکل بگیرد. این رخساره سنگی رسوبگذاری آرام در کانال‌های غیر فعال را به صورت رسوبات پرکننده ثبت می‌کند. بنابراین، رخساره سنگی Sr در بخش‌های فوقانی اشکال لایه‌ای و سدها، در کانال و نهشته‌های کروس‌های پهن بویژه در نواحی دشت سیلابی یافت می‌شود (برای مثال، میال، ۲۰۰۶: ۱۱۵؛ ون تا و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۶۰؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵).

### مجموعه رخساره‌های گلی

تنها رخساره گلی شناسایی شده در منطقه، رخساره سنگی Fm می‌باشد.

### رخساره گلی توده‌ای (Massive Mud, Silt: Fm)

**توصیف:** این رخساره از رسوبات در اندازه سیلت متوسط و ریز تا رس تشکیل شده که دارای لایه‌بندی توده‌ای است (شکل ۸F). ضخامت این رخساره در منطقه مورد مطالعه از چندین سانتی‌متر تا چند متر متغیر است. این رخساره همراه با رخساره‌های رسوبی گراولی و ماسه‌ای یافت شده است. شکل هندسی این لایه‌ها به صورت ورقه‌ای است. کنتاکت تختانی این رخساره با رخساره‌های زیرین به صورت تدریجی و کنتاکت فوقانی آن به صورت فرسایشی است. رگه‌های کربناته و ریشه گیاهان در این رخساره رسوبی مشاهده شده است.

**تفسیر:** رخساره رسوبی گل توده‌ای در اثر ته‌نشست ذرات معلق در جریان‌های ضعیف و بر روی دشت سیلابی رودخانه (در محیط‌های خارج کانال) تشکیل شده است (میال، ۲۰۰۶: ۱۲۵؛ ون تا و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۶۳؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۱۰؛ رای و یوشیدا، ۲۰۲۱: ۵). در مواردی که ضخامت این رخساره کم است، می‌توان آن را مربوط به رسوب‌گذاری بار معلق در دشت سیلابی و یا به صورت پوشش گلی روی سدها در داخل رودخانه در نظر گرفت (میال، ۱۹۷۷: ۵۹۸؛ میال، ۲۰۰۶: ۱۲۵) و لایه‌های نسبتاً ضخیم گل توده‌ای احتمالاً بیانگر نهشته شدن توسط سیلاب‌های صفحه‌ای در طی رویدادهای سیلابی اصلی است. وجود رگه‌های کربناته و ریشه گیاهان نشانه خروج رسوبات از آب است (میال، ۲۰۰۶: ۱۲۵).

### رخساره غیرآواری کربناتهای خاکزا (P: Pedogenic Carbonates)

**توصیف:** کربنات‌های خاکزا به شکل لکه‌ها، رگه‌ها و افق‌های کلسیتی در رسوبات گلی و ماسه‌ای رودخانه مورد مطالعه یافت شده‌اند (شکل ۹C).

**تفسیر:** زمانی که دشت سیلابی رودخانه برای مدت زمان زیادی در معرض رخنمون قرار می‌گیرد، نفوذ باران باعث شسته شدن یون‌های محلول به سمت پائین شده و سپس در طی دوره‌های خشک، تبخیر و جریان موئینه آب زیرزمینی باعث تمرکز همان یون‌ها در نزدیک سطح زمین می‌شود. نتیجه این فرآیند، توسعه تدریجی سیمان‌های کربناته به شکل‌های مختلف در رسوب میزبان می‌باشد که معمولاً در توالی‌های رسوبی رودخانه‌ای مشاهده می‌گردد (میال، ۱۹۷۷: ۵۹۸؛ میال، ۲۰۰۶: ۱۲۷؛ آلونزو-زارزا و رایت، ۲۰۱۰: ۲۲۶).

### عناصر ساختاری

پنج عنصر ساختاری که در رسوبات رودخانه افین شناسایی شده‌اند شامل رسوبات پرکننده کانال (CH)، سدها و اشکال لایه‌ای گراولی (GB)، نهشته‌های حاصل از جریان گراولته‌ای رسوب (SG)، اشکال لایه‌ای ماسه‌ای (SB) و رسوبات دانه‌ریز دشت سیلابی (FF) است. این عناصر بر اساس سطوح بالا و پایین رسوبات، شکل هندسی، الگوی جریان‌های قدیمه و سنگ‌شناسی و رسوبات داخل و خارج کانال رودخانه (میال، ۲۰۰۶: ۱۳۱) شناسایی و تفکیک شده‌اند.

#### - عنصر ساختاری رسوبات پرکننده کانال

این عنصر ساختاری شامل رخساره‌های گراولی (Gh, Gp, Gt) و رخساره‌های ماسه‌ای (Sh, Sp, Sl, Sm, Sr) است. رسوبات کانالی دارای شکل هندسی عدسی شکل بوده و قاعده آنها فرسایشی و به صورت مقعر به سمت بالاست (شکل ۱۰A). ضخامت رسوبات پرکننده کانال از ۰/۵ تا ۲/۵ متر متغیر بوده و عرض کانال از کمتر از ۱ متر تا ۳ متر متغیر است. در رسوبات پرکننده کانال حالت چرخه‌ای و روند ریزشوندگی به سمت بالا قابل مشاهده است و در قاعده هر چرخه بقایای کف کانال به فرم رسوبات دانه درشت گراولی دیده می‌شود.

#### - عنصر ساختاری سدها و اشکال لایه‌ای گراولی (GB: Gravel bars and Bed forms)

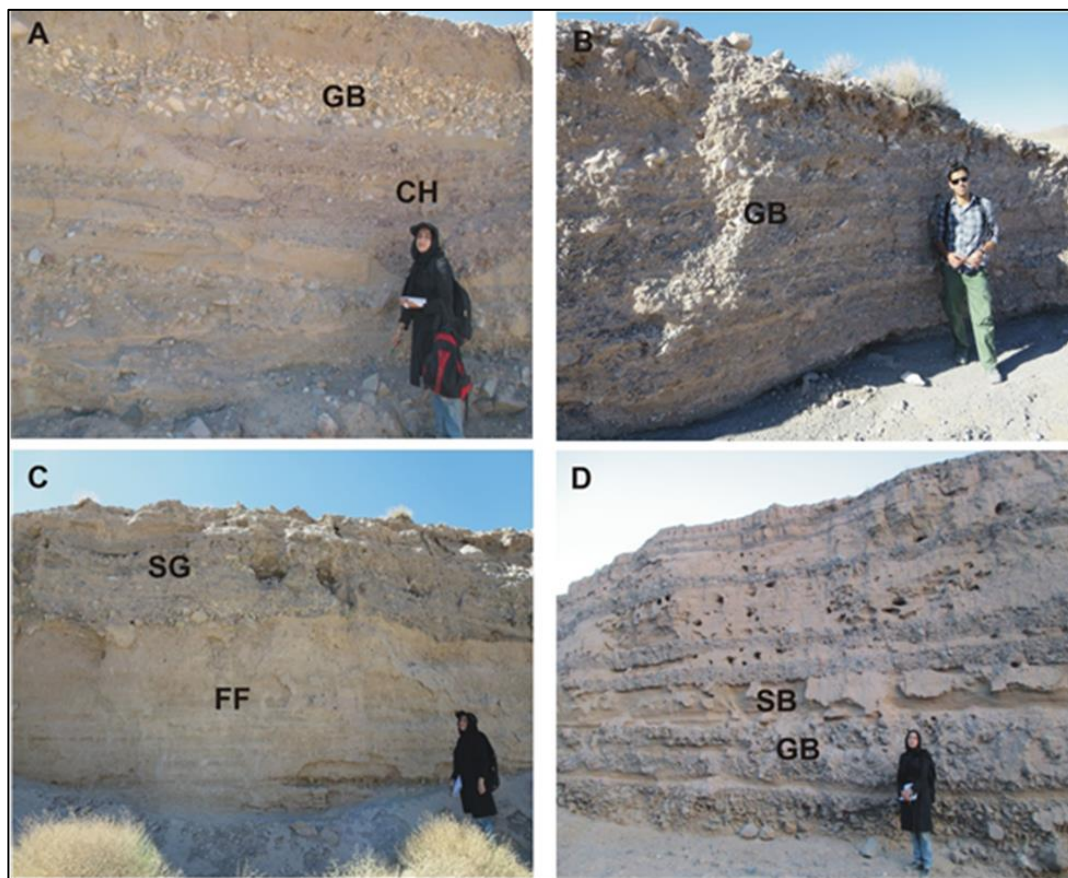
این عنصر ساختاری از رخساره‌های رسوبی Gh, Gt, Gp تشکیل شده است (شکل ۱۰B, D). از نظر شکل هندسی پهن و گسترده و صفحه‌ای شکل بوده و در برخی نقاط دارای قاعده فرسایشی است. دو عنصر SG و CH معمولاً همراه با این عنصر ساختاری مشاهده شده‌اند. ضخامت این عنصر بین ۰/۳ تا ۲/۷۵ متر متغیر است. این عنصر ساختاری در رودخانه‌های بریده بریده با بستر گراولی متداول بوده و معمولاً بطور گسترده در کف کانال و به دلیل مهاجرت سدهای طولی در بالادست جریان رودخانه تشکیل می‌شود (میال، ۲۰۰۶: ۱۳۹؛ کمار و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۳۷).

### - عنصر ساختاری نهشته‌های جریان گراویده‌ای رسوب (Sediment Gravity Flow Deposits: SG)

این نهشته‌ها شامل رخساره‌های رسوبی Gcm و Gmm می‌باشند (شکل ۱۰C). عنصر ساختاری SG در برخی نقاط دارای قاعده فرسایشی و در برخی نواحی دارای قاعده نامنظم و غیرفرسایشی است. شکل هندسی رسوبات عنصر فوق به صورت پهن، صفحه‌ای و گسترده است. این رسوبات معمولاً توسط اشکال لایه‌ای گراولی (عنصر GB)، ماسه‌ای (عنصر SB) و یا حتی رسوبات دانه‌ریز خارج کانال (عنصر FF) پوشیده می‌شوند و حتی ممکن است در قاعده رسوبات پرکننده کانال وجود داشته باشند. فراوانی این عنصر ساختاری در نواحی بالادست رودخانه مورد مطالعه بیشتر است. ضخامت نهشته‌های فوق گاه به بیش از ۲/۵ متر و گسترش آنها به بیش از ۳۰ متر می‌رسد. ذرات درشت گراولی با جورشدگی ضعیف و فقدان چینه‌بندی در این نهشته‌ها نشان‌دهنده رسوبگذاری از جریان‌های خرده‌دار با بار رسوبی زیاد و نزدیک به منشأ است. این عنصر ساختاری معمولاً در رودخانه‌های بریده بریده با بستر گراولی و نزدیک منشأ وجود دارد.

### - عنصر ساختاری اشکال لایه‌ای ماسه‌ای (Sandy Bed forms: SB)

عنصر ساختاری SB دارای شکل هندسی ورقه‌ای و گسترده بوده و از رخساره‌های رسوبی ماسه‌ای (Sm, Sp, Sh, Sl, Sr) تشکیل شده است (شکل ۱۰D). این عنصر دارای قاعده مشخص بوده و گاه به شکل رسوبات پرکننده کانال مشاهده می‌شود. عنصر SB همراه با عناصر ساختاری SG و GB یافت می‌شود. ضخامت اشکال لایه‌ای ماسه‌ای از ۰/۱۲ متر تا ۰/۷۶ متر متغیر است. طول این توده‌های ماسه‌ای گاه به بیش از ۱۰ متر می‌رسد. اشکال لایه‌ای ماسه‌ای معمولاً بر اثر مهاجرت دون‌ها درون کانال یا در اثر برافزایی عمودی رسوبات در رژیم جریان‌ی بالا یا پایین شکل گرفته‌اند. اگرچه ممکن است به صورت رسوبات پرکننده کانال یا به صورت پوششی بر روی سدهای درون کانال نیز شکل بگیرند.



شکل ۱۰: تصاویر صحرایی از انواع عناصر ساختاری شناسایی شده در رسوبات دیواره کانال رودخانه مورد مطالعه، (A) دو عنصر CH و GB، (B) عنصر ساختاری GB، (C) عناصر ساختاری SG و FF و (D) تناوب عناصر ساختاری SB و GB.

### عناصر ساختاری رسوبات دانه ریز خارج کانال (FF: Overbank Fines)

این عنصر ساختاری شامل رخساره‌های رسوبی Fm و P است که معمولاً همراه با نهشته‌های جریان گراوینته‌ای رسوب (عنصر SG) و اشکال لایه‌ای ماسه‌ای و گراولی (عناصر GB, SB) مشاهده شده است (شکل C-۱۰). شکل هندسی این رسوبات ورقه‌ای و دارای قاعده مشخص و سطح فوقانی فرسایش یافته است. ضخامت این رسوبات از ۱/۰ متر تا بیش از ۳/۲ متر متغیر است. رسوبات آواری دانه‌ریز در اثر کاهش انرژی سیال و در محیطی آرام از حالت تعلیق ته نشست کرده‌اند و به علت امکان در معرض رخنمون بودن رسوبات در این ناحیه، آثار تجمع کربنات‌های خاکزا و ریشه گیاهان در این رسوبات وجود دارد.

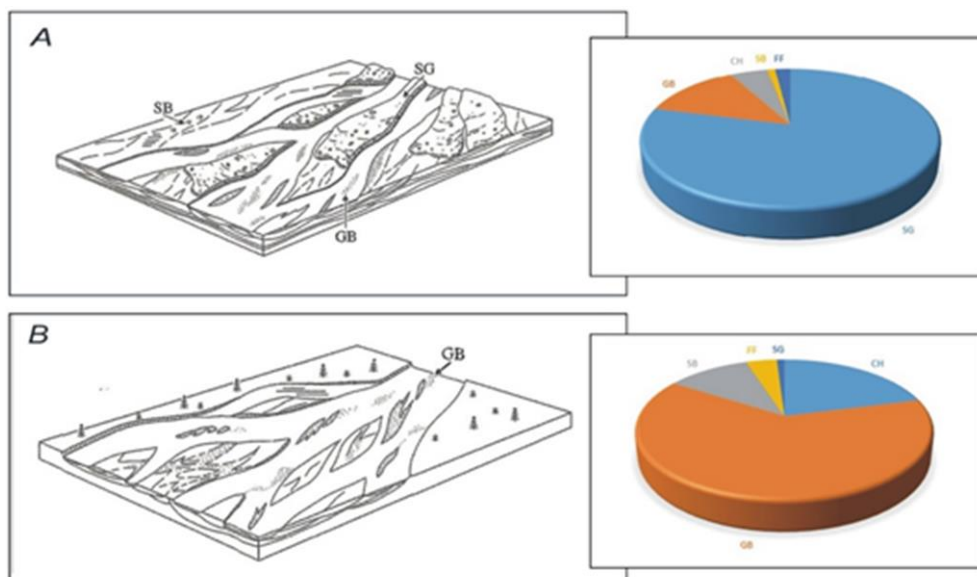
### مدل رسوبی رودخانه مورد مطالعه

در محیط‌های رودخانه‌ای، هر چند تغییر مورفولوژی آبراهه بیشتر متأثر از حمل بار رسوبی است، اما به طور کلی فعالیت‌های انسانی و عوامل خارج از سیستم رودخانه‌ای نظیر تغییرات آب و هوایی، زمین‌شناسی منطقه و تکتونیک اثر زیادی بر هیدرولوژی رودخانه داشته و باعث تغییر در مورفولوژی کانال آن می‌شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۶۸۹). تأثیر عواملی چون تغییرات آب‌وهوایی، زمین‌شناسی و تکتونیک تدریجی بوده و در کوتاه مدت ناچیز است. در حالیکه تأثیر فعالیت‌های انسانی در حریم و بستر رودخانه در کوتاه مدت تأثیرگذار بوده و با تغییر در رژیم و دبی جریان، بار رسوبی، شیب و ابعاد رودخانه باعث تغییر در الگوی کانال می‌شود (گرگوری و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۵۶). طبقه‌بندی سبک‌های رودخانه‌ای بر اساس عوامل کنترل‌کننده کانال نظیر میزان تخلیه، شیب کانال و بار رسوبی صورت می‌گیرد. عوامل فوق تأثیر مستقیم بر شکل‌گیری و مهاجرت انواع اشکال لایه‌ای رسوبی داشته و از این جهت در تشکیل و حفظ رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری رودخانه‌ای مؤثرند. بررسی رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری دیواره کانال در رودخانه افین وجود کانال‌هایی با عمق و پیچش کم را منعکس می‌کند. فراوانی رخساره‌های رسوبی دانه درشت گراولی و ضخامت بیشتر نهشته‌های داخل کانال نسبت به رسوبات خارج کانال نیز تأییدکننده این امر است. بررسی اختصاصات نهشته‌های رودخانه‌ای فوق در نواحی مختلف نشان می‌دهد که سبک کانال در قسمت‌های بالادست جریان با قسمت‌های میانی و پایین دست متفاوت بوده است. با توجه به رخساره‌های رسوبی شناسایی شده و عناصر ساختاری موجود و بر اساس مدل‌های ارائه شده توسط میال (۲۰۰۶: ۲۰۳ تا ۲۰۵) دو مدل رسوبی زیر برای رودخانه مورد مطالعه پیشنهاد شده است:

**الف- رودخانه بریده بریده گراولی با رسوبات جریان ثقلی:** این سبک کانال بیشتر در نواحی بالادست رودخانه افین قابل مشاهده است (شکل ۱۱A). ۱۸ درصد از نهشته‌های دیواره کانال رودخانه افین در بالادست جریان به این مدل رسوبی تعلق دارد که مسافتی حدود ۸/۰۴ کیلومتر از طول رودخانه فوق را در بر می‌گیرد. در بالادست جریان و در این مدل رخساره‌ای فراوانی عناصر ساختاری SG ۷۹ درصد، GB ۱۳ درصد، CH ۵ درصد، SB ۱ درصد و FF ۲ درصد است (شکل ۱۱A). رخساره‌های سنگی Gcm و Gmm از جمله رخساره‌های رسوبی شاخص این سیستم رودخانه‌ای هستند (میال، ۲۰۰۶: ۲۰۶). این رخساره‌های رسوبی شامل رسوباتی هستند که توسط جریان‌های خرده‌دار بر جای گذاشته شده‌اند. بافت این رسوبات عامل اصلی تمایز نهشته‌های جریان‌های خرده‌دار از نهشته‌های آبی است. بافت بدون چینه‌بندی این رسوبات و جورشدگی ضعیف قطعات آنها از ویژگی‌های اصلی نهشته‌های حاصل از جریان‌های خرده‌دار است.

**ب- رودخانه بریده بریده کم عمق با بار بستر گراولی:** مورفولوژی کانال رودخانه افین در قسمت‌های میانی و پایین دست جریان به شکل رودخانه بریده بریده کم عمق با بار بستر گراولی است (شکل ۱۱B). این مدل رخساره‌ای حدود ۸۲ درصد حوضه آبریز رودخانه افین و حدود ۳۶/۹۳ کیلومتر از طول این رودخانه را در بر می‌گیرد. رسوبات دیواره‌های کانال در این بخش بیشتر از رسوبات دانه درشت گراولی است که توسط جریان‌های کشتی و به صورت بار بستر حمل شده‌اند. اگرچه فراوانی رخساره‌های ماسه‌ای و گلی نسبت به نواحی بالادست جریان افزایش یافته ولی به طور کلی این رسوبات از فراوانی کمتری نسبت به رخساره‌های گراولی برخوردارند. حضور رخساره‌های فوق در میان رخساره‌های رسوبی گراولی نشان‌دهنده کاهش انرژی جریان و پایین رفتن سطح آب رودخانه است (برای مثال، میال، ۲۰۰۶: ۲۰۸). عناصر ساختاری اصلی در این مدل دو عنصر CH و GB هستند که علاوه بر آنها عناصر ساختاری SG، SB و FF نیز در این رسوبات قابل شناسایی هستند. درصد فراوانی عناصر ساختاری فوق در قسمت‌های میانی و پایین دست جریان به صورت

زیر است: ۲۱ درصد عنصر ساختاری CH، ۶۳ درصد عنصر ساختاری GB، ۱۱ درصد عنصر ساختاری SB، ۴ درصد عنصر ساختاری FF و ۱ درصد عنصر ساختاری SG (شکل ۱۱B). از جمله رخساره‌های رسوبی تشکیل دهنده دیواره کانال رودخانه در این بخش می‌توان به رخساره‌های Gcm, Gmm, Gh, Gp, Gt, Sm, Sp, Sh, Sl, Sr, Fm اشاره کرد. ضخامت بالای رخساره‌های رسوبی گراولی نسبت به رخساره‌های ماسه‌ای و گلی نشان دهنده وجود سیستم رودخانه‌ای بریده بریده کم عمق با بار بستر گراولی و نزدیک به منشأ است. در دیواره کانال رودخانه مورد مطالعه پرشدگی‌های عدسی شکل کانالی دیده می‌شود که دارای قاعده فرسایشی و سطح مقعر رو به بالا می‌باشند. در این پرشدگی‌های کانالی چرخه‌های ریزشونده به سمت بالا قابل مشاهده است که مؤید کاهش عمق یا انرژی جریان است. وجود ساختمان‌های رسوبی مشخص و چرخه‌های ریزشونده به سمت بالا در این رخساره‌های رسوبی نهشته شدن این رسوبات را از جریان‌های آبی کششی تأیید می‌کند. آنچه باعث تمایز مدل‌های رسوبی الف و ب از یکدیگر می‌شود نوع عنصر ساختاری غالب و رخساره‌های رسوبی تشکیل دهنده است. نوع الگوی کانال در بخش‌های مختلف رودخانه مورد مطالعه توسط عواملی چون دبی یا میزان تخلیه جریان، بار رسوبی و مقدار شیب پروفیل طولی رودخانه کنترل شده که این عوامل خود توسط پارامترهایی چون شرایط آب و هوایی، زمین شناسی و تکتونیک منطقه متأثر شده‌اند. مدل رسوبی الف در نواحی نزدیک به منشأ و با شیب زیاد تشکیل شده است. در این نواحی میزان دبی یا تخلیه جریان بالا، مقدار بار رسوبی بالا و شیب پروفیل طولی رودخانه زیاد است.



شکل ۱۱: مدل رسوبی پیشنهادی برای بخش‌های بالادست (A) و میانی و پایین دست جریان (B) در منطقه مورد مطالعه. انواع عناصر ساختاری مربوط به هر مدل نیز در کنار آن آورده شده است.

این عوامل همراه با بارندگی‌های فصلی و فراوانی فرآیندهای تکتونیک در نواحی نزدیک به منشأ به افزایش تأمین رسوب، تشکیل جریان‌های گراویته‌ای و کاهش فضای رسوبگذاری کمک کرده و باعث تشکیل سبک کانال بریده بریده گراولی همراه با رسوبات جریان‌های ثقیلی شده است. فراوانی رسوبات حاصل از جریان‌های کششی بویژه رسوبات ماسه‌ای و گلی در این مدل کم است.

در مدل رسوبی ب و در بخش‌های میانی و پایین دست جریان، با افزایش فاصله از نواحی نزدیک به منشأ، میزان شیب پروفیل طولی رودخانه کاهش یافته و متعاقب آن میزان دبی و انرژی جریان و مقدار بار رسوبی حمل شده کاهش می‌یابد. بدین ترتیب مقدار تأمین رسوب کاهش و بر میزان فضای رسوبگذاری موجود افزوده می‌شود. نتیجه این امر کاهش جریان‌های خرده‌دار و رسوبات حاصل از آن و افزایش جریان‌های کشتی و رخساره‌های رسوبی حاصل از آن می‌باشد. کاهش انرژی جریان ممکن است به عوامل آب و هوایی و تکتونیکی منطقه مورد مطالعه مربوط باشد. کاهش نرخ تأمین رسوب و افزایش فضای رسوبگذاری با افزایش درصد فراوانی رخساره‌های ماسه‌ای و گلی در این ناحیه همراه است.

### نتیجه‌گیری

مطالعات رسوب‌شناسی رودخانه افین نشان می‌دهد که عوامل متعددی چون ورود حجم زیادی رسوبات دانه درشت توسط شاخه‌های فرعی (ورود رسوبات کناری)، تکتونیک فعال، تغییرات سنگ‌شناسی و رخنمون سنگ بستر باعث تغییر پارامترهای بافتی از جمله میانگین، میانه، جورشدگی، کج‌شدگی و کشیدگی در این رسوبات شده و ایجاد روندی نامنظم در ریزشوندگی ذرات به سمت پایین دست جریان را به همراه داشته است. در رسوبات دیواره کانال رودخانه افین، سه مجموعه رخساره رسوبی آواری (شامل پنج رخساره گراولی Gcm, Gmm, Gt, Gh, Gp، پنج رخساره ماسه‌ای Sh, Sm, Sl, Sp, Sr و یک رخساره گلی Fm) و رخساره‌های غیرآواری کربنات‌های خاکزا (P) شناسایی شده که بر مبنای آنها و اختصاصات رسوب‌شناسی دیگر پنج عنصر ساختاری SG, SB, CH, FF, GB از هم تفکیک شده است. برای رودخانه افین در جنوب شرق قائن دو مدل رسوبی پیشنهاد شده است. این رودخانه در قسمت بالادست رودخانه به فرم رودخانه بریده بریده با رسوبات جریان ثقلی و در قسمت میانی و پایین دست رودخانه به سبک رودخانه بریده بریده کم‌عمق با بار بستر گراولی است.

## منابع

- اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان جنوبی، (۱۳۸۸). مطالعات تفصیلی آبخیزداری حوزه آبخیز افین-قائن، جلد چهارم، ص ۴۳.
- خدابخش، سعید، (۱۳۹۳). عوامل موثر بر روند ریزشوندگی به سوی پایین دست در رودخانه‌های با بستر گراولی. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۱۶، دوره ۸، صص. ۹۸-۱۰۷.
- رستمی زاده، قاسم، موسوی حرمی، رضا، محبوبی، اسداله، (۱۳۸۶). شناسایی فرآیندهای مؤثر در پیوستگی رسوبی و تغییرات بافتی در رسوبات رودخانه‌ای حوضه آبریز بیدواز- شرق اسفراین، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و سوم، شماره ۱، صص. ۷۵-۸۵.
- قلعه‌نوئی، سهیلا، خانه‌باد، محمد، موسوی حرمی، سید رضا، محبوبی، اسداله، (۱۳۹۴). رخساره‌های سنگی، پیوستگی رسوبی و ترکیب رسوبات در رودخانه صد خرو (غرب سبزوار)، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، سال سی و یکم، شماره پیاپی ۵۹، شماره دوم، صص. ۱-۲۰.
- موسوی حرمی، سید رضا، محبوبی، اسداله، خانه‌باد، محمد، غفوری، محمد، (۱۳۸۰). بررسی ترکیب ذرات و تغییرات اندازه رودخانه مایان واقع در جنوب غرب مشهد، مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۸-۶ شهریور ماه، دانشگاه تهران، صص. ۳۵۲-۳۵۷.
- موسوی حرمی، سید رضا، (۱۳۹۳). رسوب‌شناسی، چاپ پانزدهم، انتشارات به نشر وابسته به آستان قدس رضوی، ۴۷۴ ص.
- Alonso-Zarza, A.M., Wright, V.P., 2010, Calcretes. In: Alonso-Zarza, A.M., Tanner, L.H. (Eds.), Carbonates in Continental Environments: Processes, Facies and Applications, Developments in Sedimentology, Vol. 61, PP. 226-267.
- Azmi, I., Goldberg, K., 2022, Facies analysis and depositional model of the midcontinent rift system in Kansas, USA, The Depositional Record, Vol. 10, PP. 282-297.
- Benito, G., Greenbaum, N., Medialdea, A., Calle, M., Sanchez-Moya, Y., Machado, M., Ballesteros-Canovas, J.A., Corella, J.P., 2023, Late Pleistocene-Holocene multi-decadal patterns of extreme floods in NW Iberia: The Duero River Palaeoflood record, Quaternary Science Reviews, Vol. 321, No. 108356, PP. 1-22.
- Demoulin, A., 2011, Basin and river profile morphometry: A new index with a high potential for relative dating of tectonic uplift, Geomorphology, Vol. 126, PP. 97-107.
- Fambrini, G.L., Neumann, N.H.M.L., Menezes-Filho, J.A.B., Silva-Filho, W.F.D., Oliveira, E.V.D., 2017, Facies architecture of the fluvial Missao Velha Formation (Late Jurassic-Early Cretaceous), Araripe Basin, northeast Brazil: paleogeographic and tectonic implications, Acta Geologica Polonica, Vol. 67, No. 4, PP. 515-545.
- Folk, R.L., 1974, Petrology of Sedimentary Rocks: Hemphill Publishing Co., Austin, Texas, 182p.
- Friend, P.F., Dade, W.B., 2005, Transport modes and grain size patterns in fluvial basins. In: Blum, M.D., Marriott, S.B., Leclair, S.F., (eds.) Fluvial Sedimentology VII, Special Publication of International Association of Sedimentologists, Vol. 35, PP. 399-407.
- Fu, J., Wang, J., Li, C., Xu, S., Wang, J., Zhang, J., Xie, J., Yue, D., 2024, Study on the sedimentary characteristics of braided fluvial fan, Journal of Taibah University for Science, Vol. 18, No. 1, PP. 1-19.
- Garefalakis, P., do Prado, A.H., Mair, D., Douillet, G.A., Nyffenegger, F., Schlunegger, F., 2023, Comparison of three grain size measuring methods applied to coarse-grained gravel deposits, Sedimentary Geology, Vol. 446, No. 106340, PP. 1-22.

- Gregory, K. J., Benito, G., Downs, P. W., 2008, Applying Fluvial Geomorphology to River Channel Management: Background for Progress towards a Paleohydrology Protocol, *Journal Geomorphology*, Vol. 98, PP. 153-172.
- Hassan, M.A., Marren, P.M., Schwartz, U., 2009, Bar structure in an arid ephemeral stream, *Sedimentary Geology*, Vol. 221, PP. 57-70.
- Huerta, P., Armenteros, I., Recio, C., Antonio Blanco, J., 2010, Palaeogroundwater evolution in playa-lake environments Sedimentary facies and stable isotope record (Palaeogene, Almazán basin, Spain), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 286, PP. 135-148.
- Javidan, M., Mokhtarpour, H., Sahraeyan, M., Kheyrandish, H., 2015, Lithofacies, architectural elements and tectonic provenance of the siliciclastic rocks of the Lower Permian Dorud Formation in the Alborz Mountain Range, Northern Iran, *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 109, PP. 211-223.
- Jo, H.R. & Chough, S.K., 2001. Architectural analysis of fluvial sequences in the northwestern part of Kongsang Basin (Early Cretaceous), SE Korea, *Sedimentary Geology*, 144: 307-334.
- Kallmeier, C., Breitzkreuz, H., Kiersnowski, M., Geibler, M., 2010, Issues associated with the distinction between climate and tectonic controls on Permian alluvial fan deposits from the Kotzen and Barnim Basins, *Sedimentary Geology*, Vol. 223, PP. 15-34.
- Kosunal, E., Poisson, A., Ciner, A., Wernli, R., Monod, O., 2009, Syn-tectonic sedimentary evolution of the Miocene Attallar Basin, southwestern Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 34, PP. 466-479.
- Koykka J., 2011, Precambrian alluvial fan and braidplain sedimentation patterns: Example from the Mesoproterozoic Rjukan Rift Basin, southern Norway, *Sedimentary Geology*, Vol. 234, PP. 89- 108.
- Kumar, P., Shekhar, S., Shukla, A., Chakraborty, P.P., 2021, Facies architecture and spatio-temporal depositional variability in the Pliocene Sandhan fluvial system, Kutch Basin, India, *Journal of Earth System Sciences*, Vol. 130, No. 237, PP. 1-23.
- Li, P., Gao, H., Yan, T., Li, Z., Wu, Y., Liu, F., 2023, The nature and controls on downstream change of channel sediment along the Shiyang River, Northwest China, *Frontiers in Earth Science*, vol. 11, PP. 1-10.
- Long, D.G.F., 2006, Architecture of pre-vegetation sandy-braided perennial and Ephemeral River deposits in the Paleoproterozoic Athabasca Group, northern Saskatchewan, Canada as indicators of Precambrian fluvial style, *Sedimentary Geology*, Vol. 190, PP. 71-95.
- Maab, A., Schuttrumpf, H., Lehmkuhl, F., 2021, Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today's river restorations, *Environmental Sciences Europe*, Vol. 33, No. 119, PP. 1-13.
- Miall, A.D., 2006, *The Geology of Fluvial Deposits-Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*, Springer-Verlag, Berlin, 582p.
- Miall, A.D., 1977, Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: A summary. In: Miall, A.D., Ed., *Fluvial Sedimentology*, Geological Survey of Canada, Calgary, PP. 597-604.
- Papangelakis, E., Hassan, M.A., Luzi, D., Burge, L.M., Peirce, S., 2022, Measuring geomorphology in river assessment procedures 1: A global overview of current practices, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 59, PP. 1342-1359.
- Rai, L.K., Yoshida, K., 2021, Sedimentary facies analysis of the fluvial environment in the Siwalik Group of eastern Nepal: deciphering its relation to contemporary Himalayan tectonics, climate and sea-level change, *Earth and Planetary Science*, Vol. 8, No. 49, PP. 1-18.
- Rice, S.P., Church, M., 2010, Grain-size sorting within river basin relation to downstream fining along a wandering channel, *Sedimentology*, Vol. 57, PP. 232-251.
- Rice, S.P., Roy, A.G., Rhoads, B.L., 2008, *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, John Wiley & Sons, Ltd, 457 p.

- Saylor, J.E., Horton, B.K., Nie, J., Herrera, J.A.C., 2011, Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia, *Basin Research*, Vol. 23, PP. 377-402.
- Sear, D.A., Newson, M.D., 2003, Environmental change in river channels: a neglected element. Towards geomorphologic typologies, standard and monitoring, *The Science of the Total Environment*, Vol. 310, PP. 17-23.
- Shukla, U.K., Bachmann, G.H., Singh, I.B., 2010, Facies architecture of the Stuttgart Formation (Schilfsandstein, Upper Triassic), central Germany, and its comparison with modern Ganga system, India, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 297, PP. 110-128.
- Snelder, T.H., Lamouroux, N., Pella, H., 2011, Empirical modeling of large scale patterns in river bed surface grain size, *Geomorphology*, Vol. 127, PP. 189-197.
- Tang, L., Jones, S., Gluyas, J., 2017, Facies architecture of the fluvial- Aeolian Buchan Formation (Upper Devonian) and its implications on field, Central North Sea, UK, *International Journal of Geosciences*, Vol. 8, PP. 902-924.
- Van Tha, H., Wysocka, A., Pha, P.D., Cuong, N.Q., Ziolkowski, P., 2015, Lithofacies and depositional environments of the Paleogene/ Neogene sediments in the Hoanh Bo Basin (Quang Ninh province, NE Vietnam), *Geology, Geophysics, Environment*, Vol. 41, No. 4, PP. 353-369.
- Wang, J., Ishidaria, H., Xu, Z.X., 2012, Effects of climate change and human activities on inflow into the Hoabinh Reservoir in the red River basin, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 13.

