

## تحلیل رسوب‌شناختی سیستم‌های رودخانه‌ای

رضا بهبهانی<sup>۱\*</sup> و سعید خدابخش<sup>۲</sup>

۱ و ۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: Rezabehbahani30@yahoo.com\*

دریافت: ۹۷/۳/۲۲ پذیرش: ۹۷/۵/۷

### چکیده

در این پژوهش علاوه بر آن که برخی از دیدگاه‌های پژوهشی رودخانه‌ها مطرح می‌گردند، دستاوردها و دیدگاه‌های رسوب‌شناختی رودخانه‌های ایران با تفصیل بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین مسایل زیست‌محیطی، مساله آلودگی در رسوبات یا آب رودخانه است. تمرکز فلزات آلاینده در رسوبات رودخانه‌ای به شاخص‌های گوناگونی مانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رودخانه و ویژگی‌های ژئوشیمیایی فلزات مورد نظر بستگی دارد. روش‌های تعیین غلظت کل (Total content) و استخراج ترتیبی (Sequential extraction) گونه‌های مختلف فلزات در تعیین آلاینده‌گی فلزات کاربرد دارند. در پژوهش‌های با محوریت GIS، نقشه‌های تغییرات رودخانه (در بازه‌های زمانی مشخص) و پهنه‌بندی سیلاب در مدیریت دشت سیلابی کاربرد وسیعی دارند. در بحث مهندسی رودخانه، برخی از روش‌های معمول در بررسی پدیده سیلاب شامل مدل رقومی ارتفاعی، مدل روندهای هیدرولوژیکی و شبکه نامنظم مثلثی (Triangular irregular net) به کار برده می‌شود. از مباحث دیگر مرتبط در این راستا، بررسی آستانه حرکت دانه‌ها و پیش‌بینی رفتار رودخانه‌ها (بر مبنای مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های بر پایه روش‌های آماری مانند روش رگرسیون خطی و غیر خطی، روش‌های همبستگی پیرسون، اسپیرمن و من-کندال) است. بررسی آستانه حرکت دانه‌های رسوبی با روش‌هایی مانند دبی واحد جریان، تنش برشی بحرانی و میانگین سرعت بحرانی جریان انجام می‌گردد. مهم‌ترین محورهای مرتبط با رسوب‌شناسی رودخانه‌ای شامل ریخت‌شناسی رودخانه، رژیم جریان و اشکال بستر، طبقه‌بندی توده‌های کانال رودخانه‌ای و دره‌های پرشده، فرم سیستم‌های رودخانه‌ای، مقیاس‌های رسوبی در رسوبات رودخانه‌ای، رخساره‌های رسوبی، عناصر ساختاری، بار رسوبی و روند ریزشوندگی رسوبات می‌باشد. ساختار رودخانه‌ای شامل شکل هندسی و آرایش داخلی نهشته‌های کانال و سرریز در توالی‌های رودخانه‌ای است. تحلیل عناصر ساختاری یک روش نسبتاً جدید برای تفسیر رخساره‌های رودخانه‌ای است. تنوع انواع کانال و انواع نهشته‌ها در محیط‌های رودخانه‌ای به دلیل گستردگی عوامل وابسته به یکدیگر حاکم بر رسوب‌گذاری رودخانه‌ای است. طبقه‌بندی‌های رخساره سنگی، سطوح محدودکننده و عناصر ساختاری از مهم‌ترین روش‌های تحلیل عناصر ساختاری رودخانه‌ای هستند.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب‌شناسی رودخانه‌ای، ساختار رودخانه‌ای، عناصر ساختاری، آلاینده‌گی فلزات، پهنه‌بندی سیلاب، ریخت‌شناسی رودخانه

### مقدمه

بر روی رودخانه‌ها) هستند به شرح زیر مورد بحث قرار می‌گیرند:

### کاربردها و اهمیت مطالعات رودخانه‌ها

۱- پژوهش‌های جغرافیایی: این موضوع شامل طیف وسیعی از پژوهش‌ها از جمله کاربرد GIS در پهنه‌بندی سیلاب و زیر محیط‌های رودخانه‌ای، جغرافیای طبیعی و جغرافیای انسانی می‌گردد.

۲- مهندسی رودخانه: این موضوع دربرگیرنده مسایل مرتبط با رژیم جریان و روش‌های محاسباتی رواناب (دبی)، پایداری کانال رودخانه، آستانه حرکت مواد بستر، سازه‌های آبی و حریم رودخانه می‌باشد.

رودخانه‌ها مورد توجه علوم مختلفی است که هر یک از آن‌ها از دیدگاه ویژه‌ای به بررسی رودخانه‌ها می‌پردازند (جدول‌های ۱ و ۲). بیش از چند دهه از پژوهش‌های با اهداف علمی بر روی رودخانه‌ها در کشور ما نمی‌گذرد. به همین دلیل یافتن منابع علمی مرتبط با این موضوع برای پژوهشگران جوان گاهی دشوار است. با توجه به تقاضای روزافزون جامعه علمی کشور در این مقاله مروری، دیدگاه‌ها (محورهای اصلی پژوهش) که مرتبط با رسوب‌شناسی (به عنوان یکی از محورهای مهم پژوهشی

گرفته است و شامل موارد زیر است: آلاینده‌های آب و رسوبات بستر و منشا آن‌ها، اثرات زیست‌محیطی این آلاینده‌ها بر انسان و جانداران مرتبط با رودخانه‌ها. بنابراین محورهای اصلی این مقاله، معرفی مهم‌ترین پژوهش‌های اخیر در کشور (با تکیه بر رسوب‌شناسی رودخانه)، اصول و مبانی علمی و مهم‌ترین دستاوردهای آن‌ها می‌باشد.

**۳- رسوب‌شناسی رودخانه:** در این گروه از پژوهش‌ها می‌توان مباحثی مانند زیر محیط‌های رودخانه‌ای، شاخص‌های بافتی رسوبات، روند ریزشوندگی/پیوستگی رسوبی، رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری، اشکال بستر، بررسی بار رسوبی، ریخت‌شناسی رودخانه، مدل‌ها و سیستم‌های رودخانه‌ای را مورد توجه قرار داد.

**۴- بررسی‌های زیست‌محیطی:** این موضوع از پژوهش‌های نوین مرتبط با رودخانه است که با توجه به پیشرفت صنعتی کشورها، به تازگی بسیار مورد توجه قرار

#### جدول ۱. برخی از پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با رودخانه‌ها در ایران (در یک دهه گذشته)

نویسنده/ نویسنده‌گان	محور اصلی پژوهش	نویسنده/ نویسنده‌گان	محور اصلی پژوهش
پاسبان و همکاران، ۱۳۹۶	مهندسی رودخانه	خدابخش و حسام‌زاده، ۱۳۹۲	رده‌بندی ریخت‌شناسی رودخانه
حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶	پایداری رسوبات بستر	لشکری و همکاران، ۱۳۹۲	پژوهش‌های جغرافیایی (GIS)
قادر فیجانی و همکاران، ۱۳۹۵	رسوب‌شناسی اشکال بستر	خدابخش و همکاران، ۱۳۹۲	رده‌بندی ریخت‌شناسی رودخانه و رخساره‌های رسوبی
مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵	محیط رسوبی	کافظم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲	مهندسی رودخانه
قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵	بررسی زیست محیطی	اسماعیلی، ۱۳۹۱	پژوهش‌های جغرافیایی
خدابخش و همکاران، ۱۳۹۴	روند ریزشوندگی	تقدیسی نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۱	روند ریزشوندگی
اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۹۴	رده‌بندی ریخت‌شناسی رودخانه	پور سلطانی و معینی صالح، ۱۳۹۱	رسوب‌شناسی رودخانه
یمانی و همکاران، ۱۳۹۴	رده‌بندی ریخت‌شناسی رودخانه	حسینی تودشکی و همکاران، ۱۳۹۰	پژوهش‌های جغرافیایی
مقصودی و همکاران، ۱۳۹۳	پژوهش‌های جغرافیایی	پاکزاد و مروت، ۱۳۹۰	رخساره‌های رسوبی
صلاحی، ۱۳۹۳	مهندسی رودخانه	باقری و همکاران، ۱۳۹۰	بررسی زیست محیطی
فرقانی و همکاران، ۱۳۹۳	بررسی زیست محیطی	پاکزاد و امینی، ۱۳۸۸	رخساره‌های رسوبی
ادیب و همکاران، ۱۳۹۳	مهندسی رودخانه		
خدابخش، ۱۳۹۳	روند ریزشوندگی		

#### جدول ۲. مهم‌ترین کاربردهای عمرانی-اقتصادی مرتبط با رسوب‌شناسی رودخانه‌ها

موضوع	کاربرد
۱- ماده خام صنایع	منابع پلاسر (اورانیوم و فلزات سنگین)، منابع شن و ماسه و پیت
۲- آورد رسوب	محاسبه عمر مفید سدها
۳- تعیین منشا رسوبات	برآورد و کنترل فرسایش حوضه رودخانه
۴- ریخت‌شناسی رودخانه	ارتباط تغییرات کانال و یا زیر محیط‌های رودخانه با فرایندهای رسوبی آن‌ها
۵- پهنه‌بندی رودخانه	ارزیابی خطر سیلاب، حریم رودخانه و کاربری زمین
۶- مباحث عمرانی	پایداری کانال، مقابله با فرسایش کانال و طراحی کانال پایدار
۷- اکولوژی و مسایل زیست محیطی	ارتباط رخساره‌ها و زیر محیط‌های رودخانه با شدت آلودگی رسوبات
۸- رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری	تعیین زیر محیط‌های رودخانه و فرایندهای رسوب‌گذاری
۹- رخساره‌های رادار	تفکیک مجموعه‌های رسوبی و سطوح محدود کننده آن‌ها در زیر زمین

صورت کیفی (بحرانی، شدید، متوسط، کم) ارزیابی می‌گردد. آلاینده‌ها ممکن است حاصل فعالیت‌های انسانی یا با منشا طبیعی باشند (هیم و شوارزباثر، ۲۰۱۳). به دلیل جنبش کم‌تر رسوبات نسبت به آب و ماهیت جذب‌کنندگی‌شان، آن‌ها می‌توانند آلاینده‌های گوناگون (خصوصاً عناصر فلزی) را بیش‌تر در خود متمرکز سازند. بدین دلیل میزان تمرکز آلاینده‌ها در رسوبات رودخانه‌ای

#### ۱- بررسی‌های زیست‌محیطی

از نقطه نظر آلودگی، رودخانه‌ها دارای ظرفیت پالایش طبیعی هستند و چنانچه آلاینده‌ها بیش از ظرفیت آن‌ها وارد رودخانه شوند، در این صورت رودخانه آلوده محسوب می‌شود. محور این بررسی‌ها بر روی آب، رسوبات، گیاهان و یا جانداران رودخانه و هدف نهایی یافتن خطرات زیستی برای انسان و یا آبزیان است. شدت آلاینده‌های

مثلثی (TIN) جهت مدل‌سازی زهکشی سیلاب (ژوکیچ و مایدمنت، ۱۹۹۱)، مدل‌های روندهای هیدرولوژیکی به منظور پیش‌بینی سیلاب (هئون-لی و همکاران، ۱۹۹۳) و مدل HEC-RAS جهت پهنه‌بندی سیل در رودخانه (صفری، ۱۳۸۰) می‌باشند.

### ۳- مهندسی رودخانه

آشنایی با عملکرد رودخانه در نحوه بهره‌برداری بهینه از منابع آب، پیش‌بینی محل و عملیات حفاظت سازه‌های حاشیه آن یکی از موضوعات مهم در بحث مهندسی رودخانه است. مهندسی رودخانه یکی از رشته‌های جدید (با قدمت ۵۰-۶۰ سال) در کشور ما است (بوستانی و اسماعیلی، ۱۳۹۴). رفتار و واکنش اغلب حوضه‌های آبریز در برابر بارش‌های جوی به علت عوامل هیدرولوژیکی گوناگون حوضه‌ها مبهم هستند. در گذشته مدل‌های گوناگونی که عمدتاً بر اساس روش‌های آماری هستند (روش رگرسیون خطی و غیر خطی در پیش‌بینی دبی، جریان‌های رودخانه‌ای و مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب، روش‌های همبستگی پیرسون، اسپیرمن، من-کندال و کندال-تائو جهت تحلیل و بررسی سری‌های زمانی بارش، دبی و دما (زانگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ کاهایا و کالایسی، ۲۰۰۴؛ کارپوزوس و همکاران، ۲۰۱۰؛ رمضان‌پور و روشنی، ۲۰۱۱) برای پیش‌بینی رفتار رودخانه‌ها پیشنهاد شده است. اما امروزه، مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی به علت موثر و کارا تر بودن جایگزین روش‌های آماری قدیمی شده‌اند. این مدل‌ها در تخمین مقادیر رواناب حوضه رودخانه‌ای (هسو و همکاران، ۱۹۹۵)، در مدل‌سازی بارش-رواناب جریان رودخانه‌ای (آگراوال و همکاران، ۲۰۰۹)، در پیش‌بینی مقادیر رواناب و رسوب در حوضه آبریز (اختر و همکاران، ۲۰۰۹)، شبیه‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای (وو و چائو، ۲۰۰۱)، پیش‌بینی دبی حداکثر خروجی از حوضه آبریز (رضایی و همکاران، ۱۳۸۶)، و تعیین تراز سطح آب در رودخانه‌های جزر و مدی (ادیب، ۲۰۰۸) کاربرد وسیعی دارند.

نیروی هیدرولیکی رودخانه در بخش‌های مختلف رودخانه (با توجه به شیب و زمین‌شناسی حوضه) صرف فرسایش، حمل و رسوب‌گذاری می‌گردد. یکی از مسایل مهم در این رابطه، تعیین رودخانه پایدار (رودخانه‌ای که بستر آن در طول زمان دچار تغییر نشود) (کافمن و

می‌تواند شدت آلودگی آن رودخانه را نسبت به آب بهتر تعیین نماید. تمرکز فلزات آلاینده در رسوبات به شاخص‌های گوناگونی نظیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رودخانه (pH، پتانسیل اکسایش-کاهش و...) و ویژگی‌های ژئوشیمیایی فلز مورد نظر بستگی دارد. معمولاً در تعیین آلاینده‌های فلزات در رسوبات از روش‌هایی نظیر تعیین غلظت کل<sup>۱</sup> و استخراج ترتیبی<sup>۲</sup> گونه‌های مختلف فلزات و جهت منشأی فلزات آلاینده از روش آنالیز خوشه‌ای استفاده می‌گردد (فرقانی و همکاران، ۲۰۰۹). در بررسی‌های زیست‌محیطی تمرکز بر روی فلزات سمی (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg) و یا مواد نفتی است. در این راستا شاخص‌های ژئوشیمیایی گوناگونی برای ارزیابی آلاینده‌ها به کار می‌رود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از (داوودی و همکاران، ۲۰۱۷):

۱- روش تحلیل شاخص‌ها، شامل: شاخص آلودگی (C<sub>f</sub>)، درجه آلودگی (C<sub>d</sub>)، پتانسیل خطر زیست‌محیطی توسط فلزات (E<sub>f</sub>)

۲- سطوح کیفیت رسوبات، شامل: سطح تاثیر آستانه (TEL)، سطح تاثیر احتمالی (PEL)، سطح محدوده اثر (ERL)

برای اطلاعات بیشتر در زمینه زیست‌محیطی به منابع زیر مراجعه شود: (مارکت و فرایس، ۲۰۰۰؛ آندروس و همکاران، ۲۰۰۴؛ گایلاردت و همکاران، ۲۰۰۴؛ اسمول، ۲۰۰۸؛ بارینگر و همکاران، ۲۰۱۱؛ هیم و شوارزباثر، ۲۰۱۳).

### ۲- پژوهش‌های جغرافیایی

مطالعه جغرافیای انسانی و بررسی الگوی سکونت‌گاه‌ها در امتداد رودخانه در طول تاریخ نشان می‌دهد که این سکونت‌گاه‌ها تحت تاثیر سیلاب بوده‌اند (آندرسون و نف، ۲۰۱۱). به منظور برنامه‌ریزی جهت استفاده از حواشی رودخانه و نواحی سیل‌گیر، ابتدا نواحی با پتانسیل خطر بالا مشخص می‌شوند. نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب یکی از ابزار مهم در مدیریت بحران محسوب می‌شوند. این نقشه‌ها در مدیریت دشت سیلابی کاربرد وسیعی دارند. برخی از روش‌های معمول در مطالعه پدیده سیلاب شامل آنالیز DEM ها (مدل رقومی ارتفاعی) جهت کاربردهای آب‌شناسی (مارک و اکالاگین، ۱۹۸۴)، شبکه نامنظم

<sup>1</sup> Total content

<sup>2</sup> Sequential extraction

توجه به ریخت‌شناسی کانال‌های رودخانه‌ای در چهار سطح متفاوت I تا IV بررسی می‌شوند.

رودخانه‌ها به دلیل پویایی ذاتی، همواره در معرض تغییرات کانال هستند (به عنوان مثال تراز افزایشی یا پهن‌شدگی). عوامل گوناگونی موجب تغییرات زمین‌ریخت‌شناسی و آب‌شناسی رودخانه‌ها می‌گردند؛ این عوامل را می‌توان به دو گروه اصلی، عوامل با منشأ طبیعی (بیرونی و درونی) و عوامل انسانی تقسیم نمود از جمله عوامل طبیعی با منشأ درونی می‌توان به دبی جریان، حجم و اندازه رسوبات، مقاومت دیواره کانال، وقوع سیلاب و از عوامل بیرونی می‌توان به تکتونیک، شرایط آب و هوایی و تغییرات سطح آب دریا اشاره نمود (زیلانی و سوریان، ۲۰۱۲؛ باوا و همکاران، ۲۰۱۴؛ برانیر و همکاران، ۲۰۱۴؛ ماگیلیگن و همکاران؛ ۲۰۱۶).

بسیاری از خسارت‌های ایجاد شده در اطراف رودخانه‌ها، در نتیجه‌ی تغییرات کانال رودخانه است که شدیداً تحت تاثیر عملیات انسانی است و اغلب در نتیجه رعایت نکردن حریم رودخانه است. این تغییرات در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (معمولاً چند دهه) رخ می‌دهند و شامل موارد زیر است: پهن‌شدگی و باریک‌شدگی کانال<sup>۳</sup>، تبدیل کانال چند مجرا به کانال تک مجرا<sup>۴</sup>، تغییر کانال تک مجرا به کانال چند مجرا<sup>۵</sup>، مهاجرت ماندر<sup>۶</sup>، رشد پیچش<sup>۷</sup>، قطع‌شدگی تدریجی<sup>۸</sup> و ناگهانی گلویی<sup>۹</sup>، ترک کانال<sup>۱۰</sup>، تغییرات ساده و بی‌نظمی در کناره‌ها<sup>۱۱</sup> و ترکیبی از دو یا چند نوع تغییر است.

در بررسی‌های ریخت‌شناسی رودخانه می‌توان درباره شکل هندسی، فرم بستر، پروفیل طولی و مقاطع عرضی رودخانه‌ها در طول زمان اظهار نظر کرد. شاخص‌های گوناگونی از جمله زمان، دبی، بار رسوبی و سطح اساس بر آن‌ها تاثیرگذار بوده و پاسخ رودخانه‌ها به صورت حفر، رسوب‌گذاری، تغییر الگو و تغییر شکل کانال می‌باشد (شام، ۲۰۰۵). هم‌چنین ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌تواند جهت بررسی حرکات زمین‌ساختی فعال در ناحیه مورد

همکاران، ۲۰۰۸)) است. هم‌چنین از دیگر موضوعات مطروحه مهم در بحث مهندسی رودخانه، آستانه حرکت رسوبات می‌باشد. نمودارهای شیلدز و هیولستروم در ارتباط با آستانه حرکت دانه‌ها و سرعت حمل رسوبات بنا نهاده شده است. بررسی آستانه حرکت اولیه دانه‌های رسوبی با روش‌هایی نظیر میانگین سرعت بحرانی جریان، تنش برشی بحرانی و دبی واحد جریان انجام می‌گردد (باترست و همکاران، ۱۹۸۷؛ وهل، ۲۰۰۰). تحلیل و ارزیابی مقاومت رسوبات در مقابل فرسایش سبب شناسایی نقاط پایدار و ناپایدار در بستر رودخانه می‌شود. ناپایداری کانال و حواشی رودخانه در توسعه دشت سیلابی حائز اهمیت است (مینگوی و همکاران، ۲۰۱۰).

#### ۴- رسوب‌شناسی رودخانه

مهم‌ترین محورهای پژوهشی مرتبط با رسوب‌شناسی رودخانه شامل موارد زیر می‌گردد:

##### ۴-۱- ریخت‌شناسی رودخانه

طبقه‌بندی اشکال و فرایندهای رودخانه‌ای یک روش اساسی در شناسایی رودخانه‌ها است (میلز و همکاران، ۲۰۱۲). شکل رودخانه عمدتاً متأثر از دو عمل اصلی رودخانه (انشعاب و پیچش) است. بررسی ریخت‌شناسی رودخانه در شناخت رفتار آن در طول زمان، مهاجرت کانال و تغییرات شکل هندسی کانال که نقش مهمی در کاربری عمرانی آن‌ها دارند، بسیار مهم است (لئوپولد و همکاران، ۱۹۹۵؛ دان و همکاران، ۲۰۱۰؛ هریسون و همکاران، ۲۰۱۱؛ لگ و السون، ۲۰۱۴). طبقه‌بندی رودها به دو گروه بزرگ توصیفی (عموماً کمی و نیازمند اندازه‌گیری شاخص‌های فیزیکی) و فرایندی (کیفی و بر اساس مکانیسم ایجاد کانال و بررسی فرایندهای فیزیکی در ارتباط با ریخت‌شناسی کانال) تقسیم می‌شوند (بافینگتون و مونت‌گومری، ۲۰۱۳). از جمله این طبقه‌بندی‌های ژئومرفیک می‌توان به روش‌های برابرس (برایس، ۱۹۸۴) بر مبنای شاخص‌های پیچش و انشعاب و سدهای حاشیه‌ای و میانی، شام (شام، ۱۹۸۱) بر اساس بار رسوبی، روسگن (روسگن، ۱۹۹۶)، لاگاسه (لاگاسه و همکاران، ۲۰۰۴) بر مبنای بود و نبود تغییرات در پهنای کانال و استیل‌رود (بافینگتون و مونت‌گومری، ۲۰۱۳) اشاره نمود. در روش طبقه‌بندی روسگن، رودخانه‌ها با

<sup>3</sup> Channel widening and narrowing

<sup>4</sup> Channel simplification

<sup>5</sup> Braiding

<sup>6</sup> Meander migration

<sup>7</sup> Sinuosity growth

<sup>8</sup> Chute cut-off

<sup>9</sup> Neck cut-off

<sup>10</sup> Avulsion

<sup>11</sup> Simple irregularities in the bank

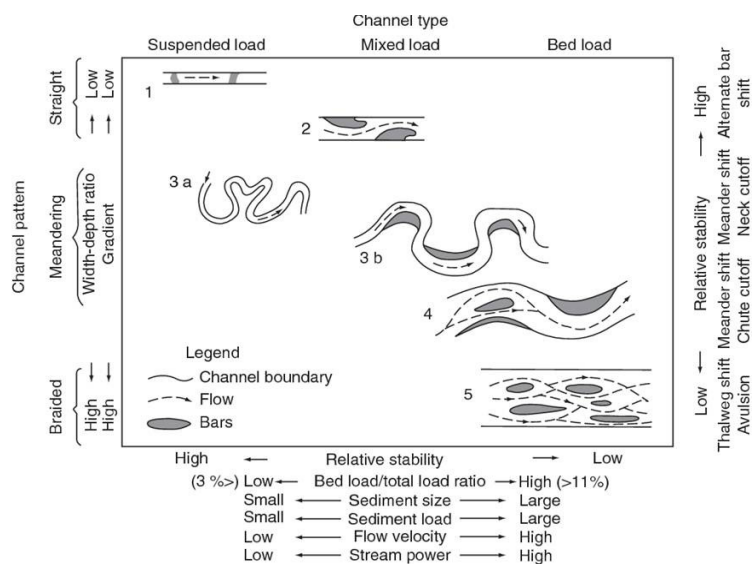
بطری رسوب‌گیر (به ترتیب برای بار بستر و معلق) اندازه‌گیری می‌شود. این میزان شاخص بسیار مهمی در تعیین عمر مفید سدهای مخزنی است (رک به وبگاه دفتر حفاظت رودخانه‌های کشور، [www.iranrivers.com](http://www.iranrivers.com)).

تعیین جریان آب در رودخانه‌ها (کانال باز) بر پایه ژرفا و سرعت جریان به انواع خطی (عدد رینولدز کم‌تر از ۵۰۰)، آشفته (عدد رینولدز بیش از ۵۰۰)، زیربحرانی (عدد فرود کم‌تر از ۱) و فرا بحرانی (عدد فرود بیش از ۱) طبقه‌بندی می‌شوند (آلن، ۱۹۸۲) (شکل ۲). در جریان‌های آبی، ارتباط بین اندازه دانه و سرعت جریان برای حرکت رسوب (سرعت فرسایش بحرانی؛ آستانه حرکت) به طور تقریبی بوسیله دیاگرام‌های هیلستروم و شیلدز بیان می‌شود.

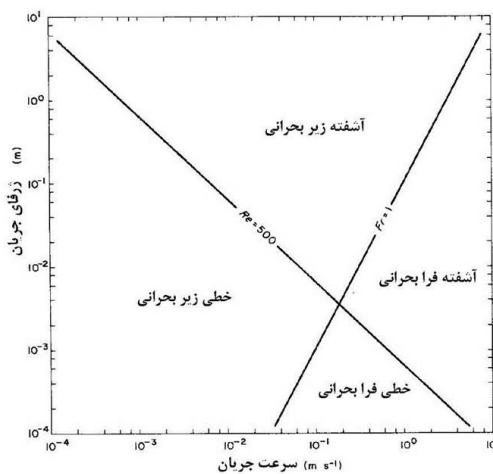
مطالعه مورد استفاده قرار گیرد. انحنای شدید و ناگهانی در مسیر رودخانه و تغییرات در پیچش رودخانه می‌تواند نشان‌دهنده حرکات زمین‌ساختی فعال باشد. ارتباط نزدیکی بین لندفرم‌های رودخانه‌ای و حرکات زمین‌ساختی (گسل‌ها و چین‌خوردگی) وجود دارد. حرکات زمین‌ساختی فعال موجب کج‌شدگی طولی و یا کج‌شدگی جانبی (عمود بر جهت دشت سیلابی) در روی نیمرخ رودخانه‌ها می‌شود (هالبروک و شام، ۱۹۹۹).

#### ۴-۲- رژیم جریانی، بار رسوبی و اشکال بستر

بار رسوبی (بار معلق/بار بستر) و الگوی کانال در نمای افقی (Plan view) دو معیار مهم تقسیم‌بندی نوع رودخانه است (شکل ۱). میزان بار رسوبی با توری و



شکل ۱. تعیین نوع رودخانه بر اساس نوع بار رسوبی (بار معلق/بار بستر) و الگوی کانال در نمای افقی و ارتباط آن با پایداری نسبی کانال (شام ۱۹۸۱ و ۲۰۰۵)



شکل ۲. رژیم‌های جریانی در یک کانال باز با نسبت زیاد پهنا/ژرفا (آلن، ۱۹۸۲)

ایجاد شده و جریان‌های آشفته و سلول‌های گردابی<sup>۴</sup> در داخل خط‌القع و بخش با شیب تند تشکیل می‌گردد (نیکولز، ۲۰۰۹) (شکل ۴). اکثر پژوهشگران زاویه شیب ۱۰ تا ۱۵ درجه بخش تند اشکال بستر را برای جدایش جریان مناسب می‌دانند (راک و ماکولیا، ۱۹۹۰؛ بست و کوستاچوک، ۲۰۰۲). شکل ریپل‌ها و دون‌ها در ارتباط با قدرت جریان است. با افزایش سرعت جریان، ریپل‌ها توالی با خط‌الراس مستقیم، مارپیچی و زبانه‌ای و دون‌ها توالی با خط‌الراس مستقیم، مارپیچی، زنجیره‌ای، هلالی و زبانه‌ای را نشان می‌دهند (آلن، ۱۹۸۲).

ریخت‌شناسی مسطح دون‌ها نشان‌دهنده مقادیر بالای جریان زیربحرانی با عدد فرود حدود ۰/۸۴ و مرحله تدریجی تبدیل به لایه‌های مسطح بالایی (رژیم‌های جریان بالایی) یا در نتیجه تبدیل به مرحله لایه‌های مسطح پایینی در طی جریان‌های کاهشی است (کارلینگ و شویچنکو، ۲۰۰۲). حد بالایی عدد فرود (بیش از ۰/۸۴)، آستانه تبدیل دون‌ها به آنتی‌دون‌ها در حالت تئوری است و می‌تواند این مقدار در جریان‌های ژرف کاهش پیدا کند. دون‌ها در شرایط حد واسط تبدیل رژیم جریان پایینی به بالا تمایل دارند که با کاهش ارتفاع توسط لایه‌های مسطح بالایی و آنتی‌دون‌ها جایگزین شوند (کارلینگ، ۱۹۹۹). حفظ آنتی‌دون‌ها به صورت یک شکل بستر در لایه به دلیل تخریب شدن یا تغییر یافتن به سایر اشکال بستر بسیار نادر است. در رژیم‌های جریان پایینی و رسوبات قدیمی غیر معمول هستند (ماجیما و همکاران، ۲۰۰۹). حفظ آن‌ها در سنگ‌ها به شرایط غیر معمول نظیر رسوب‌گذاری بسیار سریع دارد. اما با این شرایط آنتی‌دون‌ها در رسوبات رودخانه‌ای نیز گزارش شده‌اند (راست و گیبلینگ، ۱۹۹۰). در رودخانه‌ها اشکال بستر کوچک، دون یا مگا ریپل و اشکال بستر بزرگ، سدهای مورب<sup>۵</sup> یا سدهای زبانه‌ای<sup>۶</sup> نامیده می‌شوند (کرالی، ۱۹۸۳). اشکال بستر بزرگ، معمولاً در محیط‌های رسوبی مدرن ماسه‌ای (ژرفای آب بیش از ۱ متر، اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر (ماسه بسیار ریز) و میانگین سرعت جریان آب بیش از ۰/۴ متر بر ثانیه) ایجاد می‌شوند (اشلی، ۱۹۹۰). بنابراین، بررسی اشکال بستر در سیستم‌های رودخانه‌ای منجر به شناخت سیستم

روش‌های حمل و جابجایی دانه‌ها به صورت‌های بار معلق (بدون تماس با بستر)، بار جهشی (متناوباً در تماس با بستر) و بار کششی (تماس دائم با بستر؛ به صورت‌های غلتیدن، سرخوردن و مارپیچی) هستند (لوئیس و مک-کونچی، ۱۹۹۴). اشکال بستر<sup>۱</sup>، عارضه‌های ریخت‌شناسی بر روی بستر می‌باشند که توسط واکنش متقابل بین رسوبات و جریان ایجاد می‌شوند (نیکولز، ۲۰۰۹). شاخص‌های گوناگونی نظیر سرعت، ژرفا و دمای جریان (کنترل‌کننده چگالی و ویسکوزیته سیال)، اندازه، شکل، چورشدگی و چگالی ذرات بر گسترش اشکال بستر دخالت دارند (بست، ۲۰۰۵). فرم اشکال بستر به طور اساسی بستگی به تعادل میان بار بستر (تماس متناوب با بستر) و بار معلق دارد (پروترو و شواب، ۲۰۰۳). با کاهش بار معلق، اشکال بستر پرشیب و با افزایش بار معلق، اشکال بستر کم‌شیب تشکیل می‌شوند (چیل، ۱۹۹۰). در دیگرام پایداری اشکال بستر (قدرت جریان بر متوسط اندازه ذرات)، در رژیم جریان پایینی، طبقات مسطح پایینی، ریپل‌ها و دون‌ها و در رژیم جریان بالایی، طبقات مسطح بالایی و آنتی‌دون‌ها تشکیل می‌شوند (آلن، ۱۹۸۲؛ نیکولز، ۲۰۰۹) (شکل ۳ الف). در این دیگرام، ارتباط بین اندازه ذرات و سرعت جریان ذکر شده است و دو منطقه برای ایجاد طبقات مسطح<sup>۲</sup> وجود دارد (شکل ۳ ب). طبقات مسطح پایینی در ذرات در اندازه ماسه درشت با افزایش سرعت به میزان بحرانی ایجاد می‌شوند. ریپل‌ها در ذرات درشت به علت زبر و خشن بودن سطح بستر و جلوگیری از پیدایش جدایش جریان<sup>۳</sup> نمی‌توانند تشکیل شوند (نیکولز، ۲۰۰۹). اشکال بستر بر اساس جهت جریان به انواع یک‌جهته (ریپل جریان و دون)، دو‌جهته (ریپل موجی) و چندجهته (چینه‌بندی مورب پشته‌ای) تقسیم می‌شوند. ایجاد ریپل‌های جریان مستقل از ژرفای آب و تحت تاثیر اندازه دانه‌ها انجام می‌شود و به همین علت است که ریپل‌ها در محدوده ژرفاهای متفاوتی از آب (چند سانتی‌متر تا یک کیلومتر) ایجاد می‌شود. اما تشکیل سایر اشکال بستر زیرآبی (دون‌های آبی، ریپل‌های موجی و امواج ماسه‌ای) بستگی به ژرفای آب دارد (نیکولز، ۲۰۰۹). بر اثر عبور جریان از روی اشکال بستر، یک جدایش جریانی در خط‌الراس و نقطه شکست

<sup>4</sup> Roller Vortex

<sup>5</sup> Transvers bar

<sup>6</sup> Linguoid bar

<sup>1</sup> Bedforms

<sup>2</sup> Flat bed

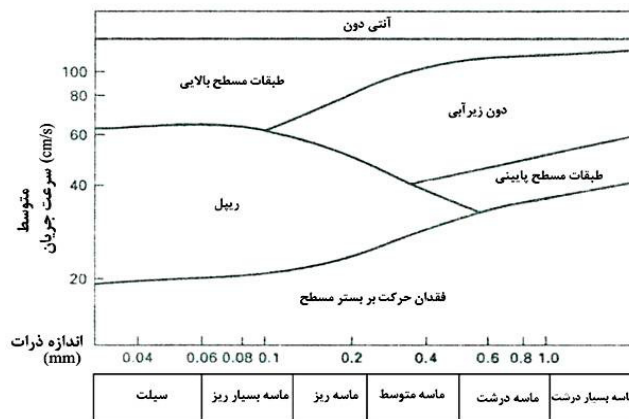
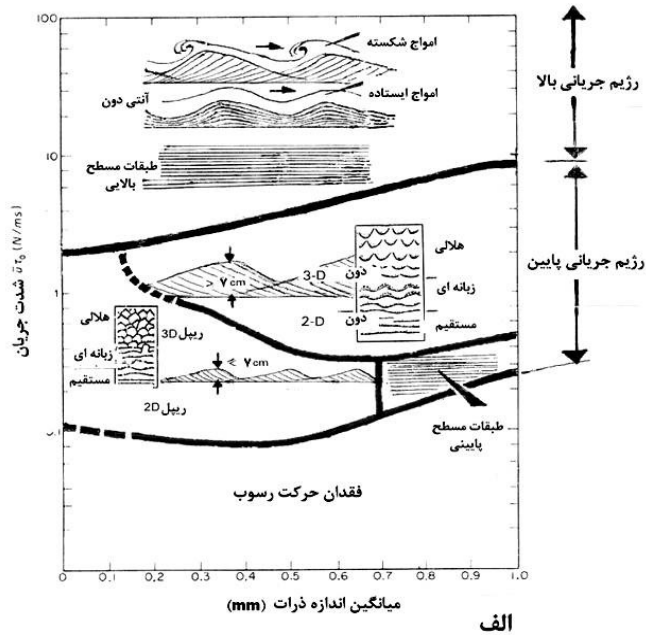
<sup>3</sup> Separation point

$10^7$  سال صورت می‌پذیرد. هم‌چنین تکامل سیستم‌های رسوبی صدها تا هزاران سال، ایجاد اشکال بستر و توالی‌های محلی تجمعی (Aggradational) در پاسخ به فرایندهای روزانه تا فصلی و پدیده‌های دینامیکی اتفاق می‌افتد (مایل، ۲۰۱۳). با این حال مقیاس و اندازه رسوبات مورد استفاده برای شاخه‌های گوناگون زمین‌شناسی متفاوت است. در جدول ۳ مقیاس‌های رسوبی سیستم‌های رسوب‌گذاری رودخانه‌ای مورد علاقه و استفاده چینه‌شناسان مخازن نفتی ذکر شده است.

رسوب‌گذاری و نحوه حمل دانه‌ها در آن‌ها می‌شود که اساس و پایه‌ی مباحث زیادی در مهندسی و رسوب‌شناسی رودخانه است.

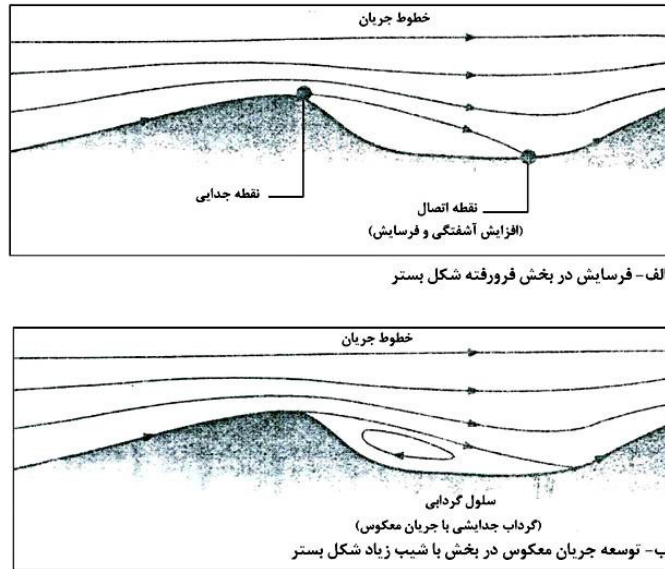
### ۳-۴- مقیاس‌های رسوبی در رسوبات رودخانه‌ای

یکی از ویژگی‌های متمایزکننده علوم زمین، طیف وسیعی از مقیاس‌ها در پژوهش‌های آن‌ها است (جدول ۳ و شکل ۵). ایجاد قاره‌ها، حوضه‌های رسوبی و توالی‌های پرکننده آن‌ها میلیون‌ها سال به طول می‌انجامد. تاثیرات زمین‌ساخت و تغییرات اقلیمی در مقیاس زمانی  $10^4$  تا



ب

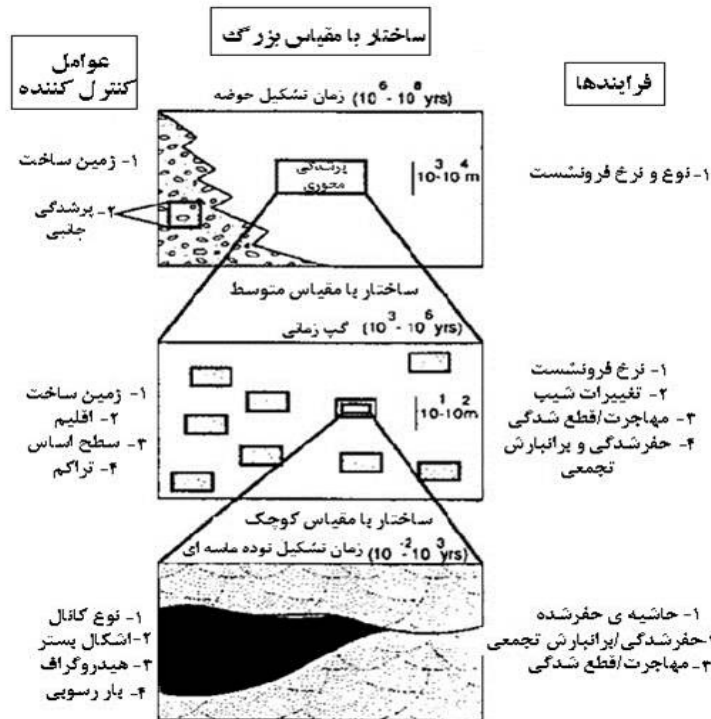
شکل ۳ الف- مناطق پایداری اشکال بستر در رژیم‌های جریان پایین و بالا و انواع چینه‌بندی مرتبط با آن‌ها که توسط جریان‌های یک‌جهته ایجاد شده‌اند (تغییر شکل یافته از آلن (آلن، ۱۹۸۲)). ب- محدوده‌های مختلف نشان‌دهنده اشکال بستر ایجاد شده در رسوبات با اندازه‌های گوناگون و جریان‌های با سرعت متفاوت می‌باشد (نیکولز، ۲۰۰۹). طبقات مسطح بالایی و آنتی‌دون‌ها در ذرات در اندازه سیلت و ماسه در جریان‌های با سرعت بالا ایجاد می‌شوند.



شکل ۴. خطوط جریان بر روی اشکال بستر. الف- فرسایش در بخش فرورفته در اثر جریان. ب- توسعه جریان‌های گردابی (معکوس) در بخش با شیب زیاد (نیکولز، ۲۰۰۹)

جدول ۳. طبقه‌بندی توده‌های کانالی-رودخانه‌ای و دره‌های پرشده رودخانه‌ای بر اساس اندازه و شکل (گیبلینگ، ۲۰۰۶)

مساحت (کیلومتر مربع)	نسبت پهنا به ضخامت	ضخامت واحدها (متر)	پهنا (متر)
بسیار بزرگ (بیش از ده هزار)	ورقه‌های بسیار وسیع (بیش از هزار)	بسیار ضخیم (بیش از ۵۰ متر)	بسیار پهن (بیش از ده هزار متر)
بزرگ (بیش از هزار)	ورقه‌های وسیع (بیش از ۱۰۰)	ضخیم (بیش از ۱۵ متر)	پهن (بیش از هزار متر)
متوسط (بیش از ۱۰۰)	ورقه‌های باریک (بیش از ۱۵)	ضخیم (بیش از ۱۵ متر)	متوسط (بیش از ۱۰۰ متر)
کوچک (بیش از ۱۰)	نوارهای وسیع (بیش از ۵)	نازک (بیش از ۱ متر)	باریک (بیش از ۱۰ متر)
بسیار کوچک (کم‌تر از ۱۰)	نوارهای باریک (کم‌تر از ۵)	بسیار نازک (کم‌تر از ۱ متر)	بسیار باریک (کم‌تر از ۱۰ متر)



شکل ۵. فرایندها، عوامل کنترل‌کننده و مقیاس‌ها در رسوبات رودخانه‌ای (لیدر، ۱۹۹۳)



آن‌ها که قابل تشخیص در مطالعات جدید چینه‌شناسی هستند، پیشنهاد داده است و این مقیاس‌ها رابه ۱۲ رده تقسیم کرده است (جدول ۴).

هم‌چنین، مایل (مایل، ۲۰۱۳) مفهوم مقیاس‌های نرخ رسوب‌گذاری (Sedimentation rate scales; SRS) را که شامل طیفی از مقیاس‌های زمانی و فرایندهای موثر بر

جدول ۴. سلسله مراتب واحدهای ساختاری در رسوبات روخانه‌ای (مایل، ۲۰۱۳)

رده مقیاس‌های نرخ رسوب‌گذاری	مقیاس زمانی فرایندها (سال)	نرخ رسوب‌گذاری سریع (m/Ka)	نمونه‌هایی از فرایندها	واحد رسوبی	نوع فرایند	مفهوم تفسیری	روش تحقیقی
۱	$10^{-6}$	$10^6$	توالی رفت و برگشتی	لامیناسیون موازی	اتوزنیک	بی‌اهمیت	برش نازک
۲	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^5$	جریان‌های زودگذر و فصلی	ریبل (میکروفرم)	اتوزنیک	نوسان‌های هیدرولیکی سطحی	مغزه دستی
۳	$10^{-3}$	$10^5$	افزایش دونه‌های روزانه، سطوح دوباره فعال‌شونده	روزانه	اتوزنیک	رخنمون کوچک با تغییرات روزانه	مغزه
۴	$10^{-1} - 10^{-2}$	$10^4$	توفان (مزوفرم)	دون	اتوزنیک	حوادث دینامیکی	مغزه، رخنمون کوچک
۵	$10^0 - 10^1$	$10^3 - 10^2$	سیلاب‌های فصلی تا ده ساله	افزایش رشد ماکروفرم	اتوزنیک	حوادث دینامیکی عمده	رادارهای نفوذی در رودخانه امروزی
۶	$10^2 - 10^3$	$10^2 - 10^3$	خاکریز سیلابی صد ساله	ماکروفرم (پوینت-بار)	اتوزنیک	حوادث دینامیکی عمده	رادارهای نفوذی در رودخانه امروزی
۷	$10^3 - 10^4$	$10^1 - 10^1$	قطع‌شدگی کانال	کانال	اتوزنیک	طبیعت سیستم رودخانه	برش‌های لرزای سه بعدی افقی
۸	$10^4 - 10^5$	$10^{-1}$	توالی‌های رده پنجم (میلانکوویچ)	کمبرند کانالی	اتوزنیک یا آلوزنیک	پاسخ‌های ژئومرفیک به تغییرات جهانی	شبکه برش‌های لرزای سه بعدی افقی
۹	$10^5 - 10^6$	$10^{-1} - 10^{-2}$	توالی‌های رده چهارم (میلانکوویچ)	سیستم رسوبی، مخروط‌افکنه و اکثر دلتاها	آلوزنیک	زمین‌ساخت، تغییرات سطح اساس، تغییرات اقلیمی	شبکه لرزای دو بعدی ناحیه‌ای
۱۰	$10^6 - 10^7$	$10^0 - 10^{-1}$	توالی‌های رده دوم و سوم	مجموعه پرکننده حوضه	آلوزنیک	زمین‌ساخت سریع	شبکه لرزای دو بعدی ناحیه‌ای
۱۱	$10^6 - 10^7$	$10^0 - 10^{-2}$	توالی‌های رده دوم و سوم	مجموعه پرکننده حوضه	آلوزنیک	زمین‌ساخت	شبکه لرزای دو بعدی ناحیه‌ای
۱۲	$10^6 - 10^7$	$10^{-2} - 10^{-3}$	توالی‌های رده دوم و سوم	مجموعه پرکننده حوضه	آلوزنیک	فرونشینی آرام کراتونیک	شبکه لرزای دو بعدی ناحیه‌ای

واحدهای رسوبی رودخانه‌ای در زیر زمین می‌نماید (ری و همکاران، ۲۰۱۳).

این دو پژوهش شامل مطالعات بنیادین روش‌های ساختاری جدید است که برای تمام رسوبات رودخانه‌ای می‌توانند به کار گرفته شوند. تنوع انواع کانال<sup>۸</sup> و انواع نهشته‌ها<sup>۹</sup> در محیط‌های رودخانه‌ای به دلیل گستردگی عوامل وابسته به یکدیگر حاکم بر رسوب‌گذاری رودخانه‌ای است. از نظر تئوریک می‌توان با مجزا کردن هر کدام از این عوامل کنترل‌کننده و تغییر دادن تاثیرات آن‌ها همگام با ثابت نگه‌داشتن سایر عوامل کنترل‌کننده آن‌ها را بررسی نمود (مایل، ۱۹۸۵ و ۲۰۱۳).

اطلاعات ارزشمندی از رخنمون‌های نهشته‌های رودخانه‌ای توسط روش‌های مرسوم نظیر تحلیل رخساره<sup>۱۰</sup> در نیمرخ‌های عمودی بدست می‌آید. با این وجود، تحلیل عناصر ساختاری اطلاعات تکمیلی بسیار خوبی را در تفسیر نهشته‌های رودخانه‌ای ارائه می‌دهد.

#### ۴-۴- رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری

تحلیل عناصر ساختاری یک روش نسبتاً جدید برای تفسیر رخساره‌های رودخانه‌ای است (مایل، ۲۰۰۶). ساختار رودخانه‌ای<sup>۱</sup> شامل شکل هندسی<sup>۲</sup> و آرایش داخلی نهشته‌های کانال و سرریز<sup>۳</sup> در توالی‌های رودخانه‌ای است (مایل، ۲۰۰۶). فریند (۱۹۸۳) یک طبقه‌بندی از عناصر ساختاری رودخانه‌ای بر مبنای معیار دوگانه رسوبات درون کانال و بین کانالی پیشنهاد داده است. کانال‌ها بر اساس جابجایی جانبی به انواع ثابت<sup>۴</sup> و متحرک<sup>۵</sup> تقسیم شده است. آلن (۱۹۸۳) هشت نوع عارضه رسوبی یا عناصر ساختاری داخلی<sup>۶</sup> را در بررسی رسوبات رودخانه‌ای شاخه‌شاخه<sup>۷</sup> معرفی کرده است. امروزه روش‌های ژئوفیزیکی (مانند روش رادار فرو زمین) کمک زیادی در شناخت شکل هندسی و ساختار داخلی

<sup>1</sup> Fluvial architecture

<sup>2</sup> Geometry

<sup>3</sup> Overbank

<sup>4</sup> Fixed

<sup>5</sup> Mobile

<sup>6</sup> Internal architectural elements

<sup>7</sup> Braided stream deposits

<sup>8</sup> Channel styles

<sup>9</sup> Deposit types

<sup>10</sup> Facies analysis

در ادامه به برخی روش‌ها و طبقه‌بندی‌های مرسوم جهت تحلیل عناصر ساختاری پرداخته می‌شود. مشاهدات و طبقه‌بندی رخساره‌های سنگی<sup>۱۱</sup> از اجزای استاندارد روش‌شناسی تحلیل رخساره‌ها جهت مطالعه سنگ‌های رسوبی است (مایل، ۱۹۸۵). طبقات<sup>۱۲</sup> بر اساس ویژگی‌های رسوبی اولیه (در مورد رسوبات آواری رودخانه‌ای)، مخصوصاً طبقه‌بندی، اندازه ذرات، بافت و ساختمان‌های رسوبی طبقه‌بندی می‌شوند. ساختارهای زیستی و محتوای فسیلی به طور محلی به عنوان ویژگی‌های توصیفی اضافی دارای اهمیت هستند (مایل، ۲۰۰۶). رسوبات شیمیایی نظیر کالکرت‌های پدوژنیک، زغال و تخییری‌ها از اجزای فرعی اکثر سیستم‌های رودخانه‌ای به شمار می‌روند. جهت تحلیل عناصر ساختاری، مراحل نسبتاً کوچکی از توصیف‌ها و زیرتقسیم‌ها ضروری است. فرایندهای رسوبی کنترل کننده توسعه رخساره‌های سنگی رودخانه‌ای آواری نظیر حمل و نقل کشتی<sup>۱۳</sup> همراه با آشفتنی سیال و تاثیرات آن بر طبقات ذرات آواری در همه رودخانه‌ها معمول هستند و از قوانین فیزیکی مشابه تبعیت و رخساره‌های سنگی مشابه ایجاد می‌نمایند. مایل (۱۹۸۵ و ۲۰۰۶) طبقه‌بندی ساده‌ای را با استفاده از کدهای دو کلمه‌ای جهت بررسی‌های میدانی سریع و شناسایی آزمایشگاهی رسوبات رودخانه‌ای پیشنهاد کرده است. حرف بزرگ در این کدهای رخساره‌ای نشان‌دهنده اندازه ذرات غالب است (جدول ۵). حرف دوم نشان‌دهنده بافت یا ساختمان رخساره سنگی است. پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران از مفاهیم جدول ۵ به عنوان پایه و اساس مطالعات صحرایی استفاده کنند و در صورت امکان بر اساس مشاهدات جزئی، واحدهای جدید به کار برند.

در ادامه به برخی روش‌ها و طبقه‌بندی‌های مرسوم جهت تحلیل عناصر ساختاری پرداخته می‌شود. مشاهدات و طبقه‌بندی رخساره‌های سنگی<sup>۱۱</sup> از اجزای استاندارد روش‌شناسی تحلیل رخساره‌ها جهت مطالعه سنگ‌های رسوبی است (مایل، ۱۹۸۵). طبقات<sup>۱۲</sup> بر اساس ویژگی‌های رسوبی اولیه (در مورد رسوبات آواری رودخانه‌ای)، مخصوصاً طبقه‌بندی، اندازه ذرات، بافت و ساختمان‌های رسوبی طبقه‌بندی می‌شوند. ساختارهای زیستی و محتوای فسیلی به طور محلی به عنوان ویژگی‌های توصیفی اضافی دارای اهمیت هستند (مایل، ۲۰۰۶). رسوبات شیمیایی نظیر کالکرت‌های پدوژنیک، زغال و تخییری‌ها از اجزای فرعی اکثر سیستم‌های رودخانه‌ای به شمار می‌روند. جهت تحلیل عناصر ساختاری، مراحل نسبتاً کوچکی از توصیف‌ها و زیرتقسیم‌ها ضروری است. فرایندهای رسوبی کنترل کننده توسعه رخساره‌های سنگی رودخانه‌ای آواری نظیر حمل و نقل کشتی<sup>۱۳</sup> همراه با آشفتنی سیال و تاثیرات آن بر طبقات ذرات آواری در همه رودخانه‌ها معمول هستند و از قوانین فیزیکی مشابه تبعیت و رخساره‌های سنگی مشابه ایجاد می‌نمایند. مایل (۱۹۸۵ و ۲۰۰۶) طبقه‌بندی ساده‌ای را با استفاده از کدهای دو کلمه‌ای جهت بررسی‌های میدانی سریع و شناسایی آزمایشگاهی رسوبات رودخانه‌ای پیشنهاد کرده است. حرف بزرگ در این کدهای رخساره‌ای نشان‌دهنده اندازه ذرات غالب است (جدول ۵). حرف دوم نشان‌دهنده بافت یا ساختمان رخساره سنگی است. پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران از مفاهیم جدول ۵ به عنوان پایه و اساس مطالعات صحرایی استفاده کنند و در صورت امکان بر اساس مشاهدات جزئی، واحدهای جدید به کار برند.

هم‌چنین مجموعه<sup>۱۴</sup> رخساره‌های رودخانه‌ای توسط سطوح محدودکننده<sup>۱۵</sup> از یکدیگر جدا می‌شوند. دوازده نوع عمده لایه‌بندی و سطوح محدودکننده<sup>۱۶</sup> نهشته‌های رودخانه‌ای توسط مایل (۲۰۱۳) معرفی شده است. این نوع طبقه‌بندی برای اولین بار برای رسوبات ماسه‌ای بکار گرفته شد. اما برخی محققین (اسمیت، ۱۹۹۰؛ سواگارد،

#### ۴-۴-۱- طبقه‌بندی عناصر ساختاری

اولین کوشش در طبقه‌بندی عناصر ساختاری توسط مایل (۱۹۸۵) انجام شد. پژوهش‌های جدید نیز توسط مایل (۱۹۹۴ و ۱۹۹۵) و فیلدینگ (۱۹۹۳) نشان‌دهنده برخی مشکلات در استفاده از عناصر ساختاری در بررسی‌های صحرایی است. کانال‌ها و سدها از عناصر سازنده رسوبی رودخانه‌ها هستند و رسوبات تشکیل‌دهنده آن‌ها عناصر ساختاری نامیده می‌شوند. یک عنصر ساختاری ممکن است به عنوان جزئی یک سیستم رسوبی مشابه در اندازه، یا کوچک‌تر از کانال پرشده، و بزرگ‌تر از یک واحد رخساره‌ای منفرد تعریف شود. این عنصر توسط مجموعه رخساره‌ای متمایز، شکل هندسی داخلی، شکل خارجی و در برخی موارد نیمرخ قائم مشخص می‌شوند. واژه عنصر ساختاری برای واحدهای محصور شده توسط سطوح محدودکننده با رده سوم تا پنجم استفاده می‌شود (مایل، ۲۰۱۳). طبقه‌بندی اصلی مایل (۱۹۸۵) توسط پژوهش‌های جدید دارای تغییراتی شده است (جدول ۷). هم‌چنین بریلرلی (۱۹۹۱) و پلات و کلر (۱۹۹۲) طبقه‌بندی‌های استاندارد دیگری از عناصر ساختاری بر اساس سطوح مطالعه شده از دشت سیلابی رودخانه‌ای امروزی و در محیط‌های سرریز<sup>۱۷</sup> ارائه داده‌اند (جدول‌های ۸ و ۹). لازم به ذکر است که در بکارگیری طبقه‌بندی‌های عناصر ساختاری در صحرا سه شاخص مقیاس، میان‌لایه‌ها و تغییرات تدریجی بایستی در نظر گرفته شود (مایل، ۲۰۱۳). با توجه به اینکه نوع رخساره‌های سنگی و نحوه گسترش و انباشتگی ساختارهای رسوبی خصوصیات مخزنی متفاوتی دارند، فورد و پایلس (فورد و پایلس، ۲۰۱۴) طبقه‌بندی جدیدی را برای عناصر ساختاری رسوبی و تعیین سیستم‌های رودخانه‌ای ارائه نمودند.

<sup>11</sup> Lithofacies

<sup>12</sup> Beds

<sup>13</sup> Traction

<sup>14</sup> Package

<sup>15</sup> Bounding surfaces

<sup>16</sup> Bounding surface

<sup>17</sup> Depositional units

<sup>18</sup> Overbank environments

جدول ۵. طبقه‌بندی رخساره‌های سنگی در سیستم‌های رودخانه‌ای (تغییر یافته از طبقه‌بندی اصلی مایل (۱۹۷۸، ۲۰۰۶))

کد رخساره‌ای	رخساره	ساختمان رسوبی	تفسیر
Gmm	ماتریکس پش‌تیبان، گراول توده‌ای	دانه‌بندی تدریجی ضعیف	جریان پلاستیکی خرده‌دار (مقاومت بالا)
Gmg	گراول ماتریکس-پش‌تیبان	دانه‌بندی تدریجی عادی تا معکوس	جریان خرده‌دار پلاستیکی دروغین (مقاومت پایین)
Gci	گراول قطعه-پش‌تیبان	دانه‌بندی تدریجی معکوس	جریان خرده‌دار قطعه-پش‌تیبان (مقاومت بالا) یا جریان خرده‌دار پلاستیکی دروغین (مقاومت پایین)
Gcm	گراول توده‌ای قطعه-پش‌تیبان	-	جریان خرده‌دار پلاستیکی دروغین (جریان آشفته)
Gh	قطعه‌پش‌تیبان، گراول با طبقه‌بندی خام	طبقه‌بندی افقی، جهت‌یافتگی	اشکال بستر طولی، رسوبات برجای‌مانده، رسوبات غربالی
Gt	گراول، لایه‌بندی شده	طبقه‌بندی مورب عدسی	پرشدگی‌های جزئی کانال
Gp	گراول، لایه‌بندی شده	طبقه‌بندی مورب مسطح	اشکال بستر مورب، ایجاد دلتا از سدهای باقیمانده دیرینه
St	ماسه ریز تا بسیار درشت، احتمالاً پبلی	طبقه‌بندی مورب عدسی منفرد یا گروه‌بندی شده	دون‌های سه بعدی زبانه‌ای و سینوسی
Sp	ماسه ریز تا بسیار درشت، احتمالاً پبلی	طبقه‌بندی مورب مسطح منفرد یا گروه‌بندی شده	اشکال بستر مورب و زبانه‌ای (دون‌های دو بعدی)
Sr	ماسه بسیار ریز تا درشت	لامیناسیون مورب ریپلی	ریپل‌ها (رژیم جریان‌ی پایین)
Sh	ماسه بسیار ریز تا درشت	لامیناسیون افقی یا لیناسیون	جریان بستر مسطح (جریان بحرانی)
Sl	ماسه بسیار ریز تا درشت، احتمالاً پبلی	طبقه‌بندی مورب با زاویه کم (کم‌تر از ۱۵ درجه)	کنده‌شدگی‌های پرشده، دون‌های شسته‌شده، آنتی‌دون‌ها
Ss	ماسه ریز تا بسیار درشت، احتمالاً پبلی	کنده‌شدگی‌های کم‌رُفا و وسیع	کنده‌شدگی پرشده
Sm	ماسه ریز تا درشت	توده‌ای یا لامیناسیون ضعیف	نهشته‌های جریان گرانشی-رسوبی
Fl	ماسه، سیلت و گل	لامیناسیون ریز، ریپل‌های بسیار کوچک	کانال‌های متروک، مناطق دور از کانال، نهشته‌های سیلابی ضعیف شده
Fsm	سیلت و گل	توده‌ای	نهشته‌های مناطق پشت مرداب، کانال‌های متروک
Fm	گل و سیلت	توده‌ای، ترک گلی	مناطق دور از کانال، کانال متروک، رسوبات پوششی
Fr	گل و سیلت	توده‌ای، ریشه گیاه و زیست‌آشفته‌گی	طبقات با ریشه گیاه، خاک‌های اولیه
C	گل کربن‌دار، زغال	گیاه، غشای گلی	نهشته‌های مردابی با گیاه
P	خاک دیرینه کربناته (کلسیت و سیدریت)	اشکال خاک‌زایی: ندول‌ها و رشته‌ها	خاک با رسوبات شیمیایی

جدول ۶. مقایسه بین طبقه‌بندی مایل (۲۰۱۳) و بریج (۱۹۹۳) برای سطوح محدودکننده رسوبات رودخانه‌ای

طبقه‌بندی مایل (۲۰۱۳)	طبقه‌بندی بریج (۱۹۹۳)
واحد رده اول	مجموعه با مقیاس کوچک (نظیر ریپل)
واحد رده اول	مجموعه با مقیاس متوسط (نظیر دون)
واحد رده دوم	مجموعه پیوسته با مقیاس کوچک و متوسط
واحد رده سوم (افزایش ماکروفرم)	چینه‌های مایل با مقیاس بزرگ
واحد رده چهارم (ماکروفرم)	مجموعه چینه‌های مایل با مقیاس بزرگ
واحد رده پنجم (کانال)	گروهی از مجموعه‌های با مقیاس بزرگ
واحد رده ششم (نظیر کمر بند کانالی)	گروهی از مجموعه‌های با مقیاس بزرگ

جدول ۷. عناصر ساختاری در رسوبات رودخانه‌ای (تغییر یافته از طبقه‌بندی اصلی مایل (۱۹۸۵، ۲۰۰۶)

عناصر ساختاری	نماد	مجموعه رخساره‌های اصلی	شکل هندسی و ارتباطات
کانال	CH	ترکیب‌های متفاوت	ورقه‌ای یا لنزی، قاعده فرسایشی مقعر به سمت بالا، مقیاس و شکل بسیار متغیر، سطح فرسایشی داخلی رده سوم مقعر به سمت بالا به طور معمول.
سدهای گراولی و اشکال بستر	GB	Gm, Gp, Gt	لنزی یا روکشی، معمولاً توده‌های تابولار، معمولاً میان‌لایه با SB.
اشکال بستر ماسه‌ای	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	لنزی، ورقه‌ای، روکشی و گوه‌ای، ایجاد در کانال‌های پرشده، کروس پهن و به مقدار کم‌تر در سد.
افزایش ماکروفرم‌ها به سمت پایین دست جریان	DA, FM	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	لنزه‌ها بر قاعده مسطح یا کانالی قرار گرفته است. سطوح فرسایشی داخلی رده سوم محدب به سمت بالا و سطوح محدودکننده فوقانی رده چهارم معمول است.
افزایش جانبی ماکروفرم‌ها	LA	St, Sp, Sh, Sl, Se, Ss, Gm, Gt, Gp	گوه‌ای، ورقه‌ای و لوبی شکل. سطوح رده سوم داخلی جانبی-تجمعی معمول است.
آثار کنده‌شدگی	HO	Gh, Gt, St, Sl	آثار کنده‌شدگی یا پرشدگی‌های نامتقارن.
جریان‌های گرانشی رسوبی	SG	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	لوب و ورقه‌ای، به طور معمول میان‌لایه با GB.
صفحات ماسه‌ای دارای لامیناسیون	LS	Sh, Sl, کم‌تر Sp, Sr	ورقه‌ای یا روکشی.
مناطق سرریز	FF, OF	Fm, Fl	روکش‌های ضخیم تا نازک، معمولاً به صورت میان‌لایه با SB، احتمالاً پرکننده کانال‌های متروک.

جدول ۸. عناصر ساختاری در رسوبات رودخانه‌ای بر اساس سطوح مطالعه شده در دشت سیلابی (برایلری، ۱۹۹۱)

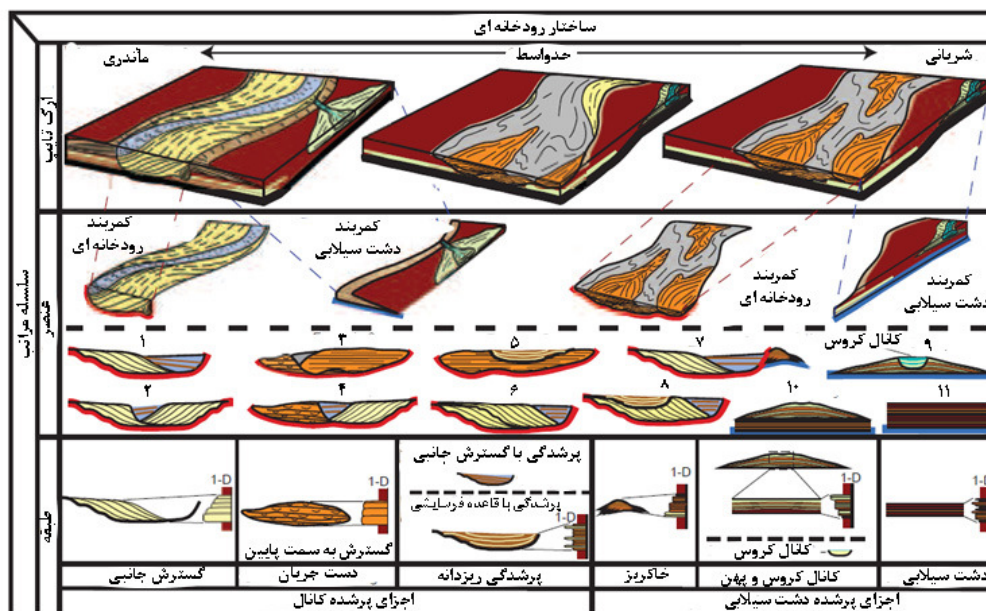
عناصر ساختاری	تفسیر	کد
سطح فوقانی لایه	رسوبات دشت سیلابی	FF
	خاکریز	LV
۱- گوه ماسه‌ای	ورقه‌های دور از کانال حاشیه‌ای	CS
	ورقه‌های دور از کانال دور از منشا	CS
۲- ورقه ماسه‌ای نزدیک به منشا	رسوبات برافزاینده مرتبط با حرکت کانال	CH, LA, DA
۳- ورقه ماسه‌ای دور از منشا		
پشته	کانال قطع شده	CH
کانال شوت	ذرات دانه‌درشت در رسوبات کانال	GB, SB, ....
سکوی سدی	رسوبات برجای مانده بستر کانال	GB

جدول ۹. عناصر ساختاری آواری در محیط دور از کانال (پلات و کلر، ۱۹۹۲)

عناصر	نماد	لیتولوژی	شکل هندسی	تفسیر
خاکریز	LV	Fl	گوه تا ده متر ضخامت و سه کیلومتر عرض	سیلاب در مناطق دور از کانال
کانال کروس	CR	St, Sr, Ss	نوار تا چند صد متر عرض، پنج متر ژرفا و ده کیلومتر طول	شکستگی در حاشیه کانال اصلی
کروس پهن	CS	St, Sr, Fl	لنز تا صد کیلومتر عرض و ۲ تا ۶ متر ضخامت	جابجایی رخساره‌ها از کانال کروس به دشت سیلابی نظیر دلتا (Progradation)
دشت سیلابی	FF	Fsm, Fl, Fm, Fr	ورقه‌ای و احتمالاً چندین کیلومتر اندازه جانبی	رسوبات جریان صفحه‌ای مناطق دور از کانال، برکه‌های دشت سیلابی و باتلاقی‌ها
کانال متروک	CH (FF)	Fsm, Fl, Fm, Fr	نوار، از نظر اندازه قابل مقایسه با کانال فعال	ایجاد قطع‌شدگی ناگهانی

کمر بند دشت سیلابی است. عنصر پرکننده کانال شامل طبقه‌های رسوبی برافزایشی جانبی (با گسترش جانبی)، برافزایشی پایین‌دستی (با گسترش پایین‌دستی) و طبقه پرکننده ریزدانه می‌باشد و عنصر دشت سیلابی شامل طبقه‌های رسوبی خاکریز، کانال، دشت کروس و دشت سیلابی است. بزرگ‌ترین رده (آرکتایپ) شامل انواعی چون مئاندری و آرکتایپ شاخه‌شاخه می‌باشد و بر اساس گسترش عناصر ساختاری نوع سیستم رودخانه‌ای را مشخص می‌کند.

در این طبقه‌بندی که تلفیقی از دو روش پیشین (عناصر ساختاری و رده‌بندی سطوح محدودکننده رخساره‌ها) است ساختارهای رسوبی در سیستم‌های رودخانه‌ای به سه رده آرکتایپ (Archetype)، عنصر (Element) و طبقه (Storey) رسوبی تقسیم می‌گردد و چارچوب هر رده براساس رخساره‌های سنگی، فرم هندسی واحد رسوبی، سطوح رسوبی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر تعیین می‌شود (شکل ۶). در این روش عناصر ساختاری شامل دو گروه: الف) کمر بند کانالی (channel-belt) و ب)



شکل ۶. طبقه‌بندی عناصر ساختاری رسوبی و تعیین سیستم‌های رودخانه‌ای (فورد و پایلس، ۲۰۱۴). در این طبقه‌بندی سه رده آرک-تایپ (مئاندری، حدواسط و شریانی)، عنصر (کمر بند رودخانه‌ای و کمر بند دشت سیلابی با یازده نوع پرشدگی) و طبقه (اجزای پرشده کانال و اجزای پرشده دشت سیلابی) معرفی شده‌اند.

چینه‌شناسی نهشته‌های رودخانه‌ای (نظیر آرایش برانبارش) هستند، انجام می‌شود (شکل ۷). بر اساس شکل هندسی خارجی<sup>۷</sup>، آرایش داخلی<sup>۸</sup> و ماهیت تماس طبقه‌ها<sup>۹</sup>، چهار نوع شکل‌های هندسی توده کانال<sup>۱۰</sup> تعریف شده است (آون و همکاران، ۲۰۱۷). این-شامل شکل‌های هندسی توده کانال توده‌ای<sup>۱۱</sup>، نیمه‌ادغام شده<sup>۱۲</sup>، بطور داخلی ادغام شده<sup>۱۳</sup> و برانبارش شده<sup>۱۴</sup> هستند.

#### ۴-۵- طبقه‌بندی چندمقیاسی ساختارهای رودخانه‌ای

ساختارهای رسوبی برجای گذاشته توسط رودخانه‌ها و آب‌های جاری<sup>۱</sup> در مقیاس‌های گوناگونی نظیر شکل بستر<sup>۲</sup>، شکل سد<sup>۳</sup>، طبقه<sup>۴</sup>، توده کانال<sup>۵</sup>، سیستم و مقیاس حوضه<sup>۶</sup> مشاهده می‌شوند (شکل ۷). بررسی ساختارهای رودخانه‌ای معمولاً در سه مقیاس عمده که شامل شکل هندسی داخلی توده‌های ماسه‌سنگی، شکل هندسی خارجی توده‌های ماسه‌سنگی و ساختار

<sup>7</sup> External geometric form

<sup>8</sup> Internal arrangement

<sup>9</sup> Storey contact

<sup>10</sup> Channel body geometries

<sup>11</sup> Massive

<sup>12</sup> Semi-amalgamated

<sup>13</sup> Internally amalgamated

<sup>14</sup> Stacked

<sup>1</sup> Alluvial architecture

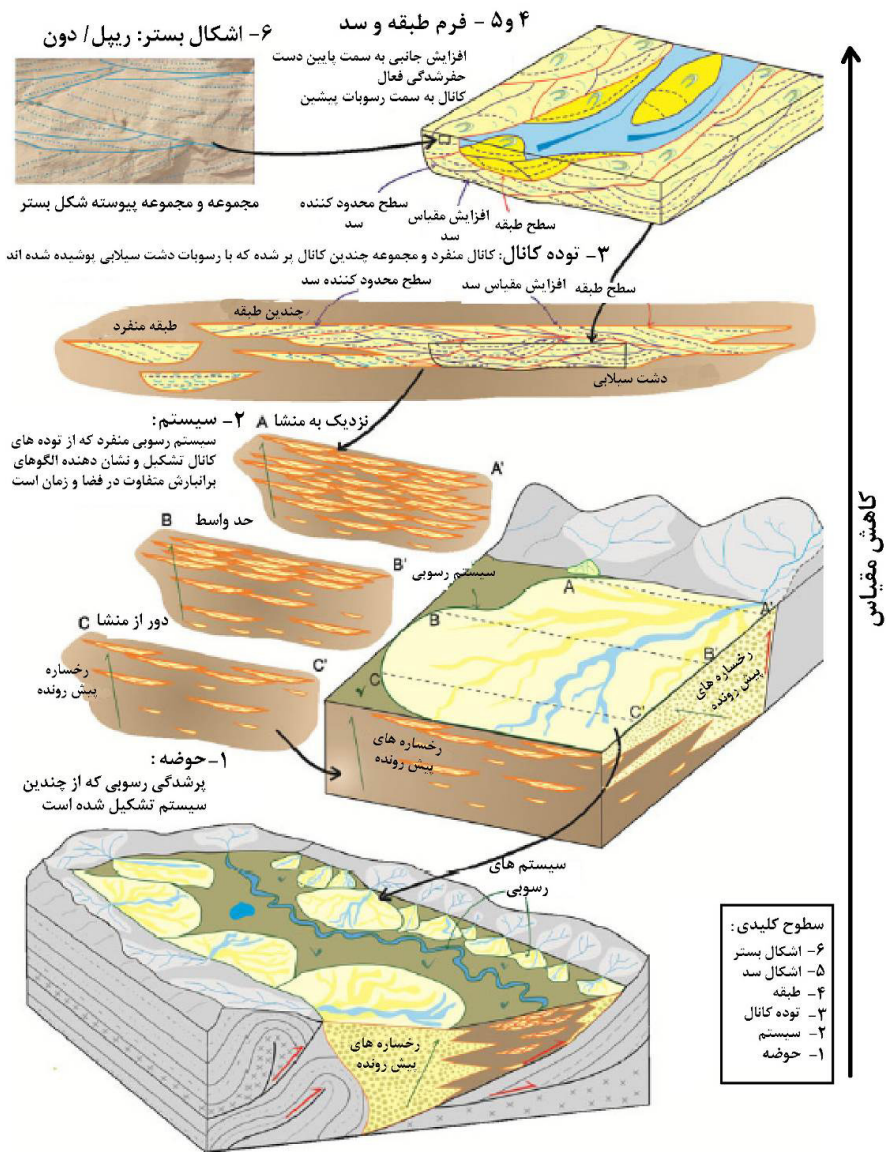
<sup>2</sup> Bedform

<sup>3</sup> Barform

<sup>4</sup> Storey

<sup>5</sup> Channel body

<sup>6</sup> Basin scale



شکل ۷. طرحی از انواع مقیاس‌ها در ساختارهای رودخانه‌ای (آون و همکاران، ۲۰۱۷). مقیاس‌های کلیدی شامل حوضه، سیستم، توده کانال، طبقه، اشکال سد و اشکال بستر به ترتیب از پایین به بالا هستند.

#### ۴-۶ طبقه‌بندی توده‌های کانال رودخانه‌ای و

##### دره‌های پرشده

گیبلینگ (۲۰۰۶) این طبقه‌بندی را بر مبنای موقعیت ژئومورفیک، شکل هندسی و ویژگی‌های داخلی (اندازه دانه، اشکال بستر و عناصر ساختاری) معرفی کرده است. در این طبقه‌بندی، رودخانه‌های شریانی و با پیچش کم و رودخانه‌های ماندری با کمربندهای کانال متحرک، سیستم‌های فرعی<sup>۳</sup> با کانال‌های ثابت (کانال‌ها بر مخروط‌های بزرگ، مخروط‌افکنه‌های دور از منشأ و

ماهیت و درجه ادغام‌شدگی مقیاس طبقات<sup>۱</sup> در ایجاد شکل‌های هندسی متفاوت با اهمیت هستند. مقیاس طبقات در ارتباط با مهاجرت و حرکت کانال‌ها، تامین رسوب و میزان فضای رسوب‌گذاری در دسترس<sup>۲</sup> هستند. در مقایسه با طبقه‌بندی‌های پیشین، این طبقه‌بندی اهمیت شکل‌های هندسی تدریجی و حدواسط را بیان می‌کند (آون و همکاران، ۲۰۱۷).

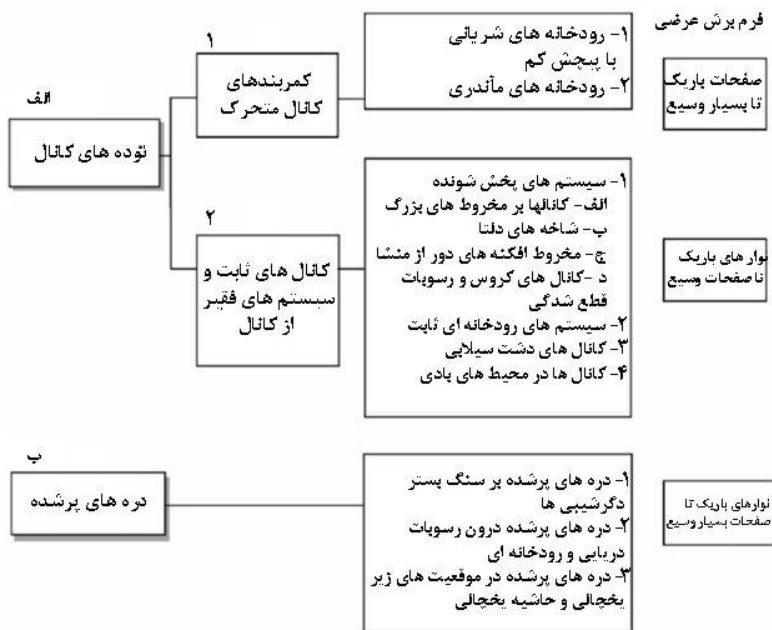
<sup>3</sup> Distributary systems

<sup>1</sup> Storey scale

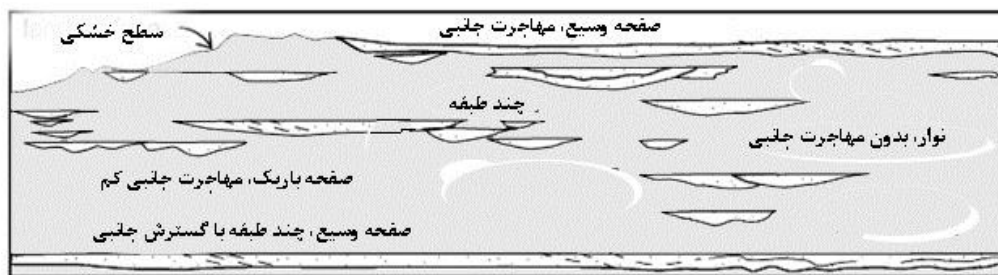
<sup>2</sup> Available accommodation

ساحلی با وجود برخی رسوبات دریایی به راحتی قابل تشخیص است. اما شناسایی این دره‌ها در رسوبات رودخانه‌ای بسیار مشکل‌تر است (گیبلینگ، ۲۰۰۶). برخی از دره‌های پر شده دارای توده‌های کانالی مجزا از یکدیگر هستند (وینسنت، ۲۰۰۱). در شکل‌های ۸ و ۹ طبقه‌بندی کاملی از توده‌های کانال رودخانه‌ای و دره‌های پر شده و فرم‌های برش عرضی آن‌ها نمایش داده شده است (گیبلینگ، ۲۰۰۶).

کانال‌های فرعی (دلتا) و دره‌های پر شده (در سنگ بستر، در رسوبات دریایی و رودخانه‌ای و در حاشیه یخچال‌ها) معرفی شده‌اند. در محیط‌های قاره‌ای، نوسانات درزه‌کشی آب و رسوبات در نتیجه زمین‌ساخت، اقلیم و قطع‌شدگی منجر به حفر و تجمع قائم رسوبات می‌شوند (گودبرد، ۲۰۰۳). بنابراین کانال‌ها در طی هزاران سال تبدیل به دره‌ها می‌شوند (برعکس آن نیز می‌تواند اتفاق بیفتد). دره‌های پر شده در سنگ بستر و یا در چینه‌های دریایی و



شکل ۸. طبقه‌بندی توده‌های کانال رودخانه‌ای و دره‌های پر شده بر مبنای ابعاد، موقعیت ژئومرفیک و ساختار (گیبلینگ، ۲۰۰۶)



شکل ۹. فرم‌های برش عرضی توده‌های کانالی (گیبلینگ، ۲۰۰۶)

ساختاری ویژه و محیط رسوبی بیان شده است (مایل، ۱۹۸۵). هدف از بیان این مدل‌ها، به تصویر کشیدن ریخت‌شناسی و ساختارهای رودخانه‌ای طیف گوناگونی از فرم‌های رودخانه‌ای توسط دیگرام‌های بلوکی است. کدهای عناصر ساختاری بکار رفته در جدول ۱۰ قبل در جدول ۷ معرفی شده‌اند. مدل‌های ۱، ۲، ۱۱ و ۱۲ دارای شاخص پیچش کم و شاخص انشعاب زیاد، مدل‌های ۴، ۶

#### ۴-۷- فرم یا نوع ساختاری سیستم‌های رودخانه‌ای

فرم ساختاری رودخانه‌ها<sup>۱</sup> توسط واژه‌های استاندارد تعریف می‌شود و به ۱۲ مدل تقسیم می‌شود (جدول ۱۰). در این جدول ارتباط بین مدل‌های ساختاری رودخانه‌ها و شاخص‌های پیچش و انشعاب، نوع رسوب، عناصر

<sup>۱</sup> Fluvial style

از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در فرایند جورشدگی هیدرولیکی در رودخانه‌ها دانست (لوین و برور، ۲۰۰۲). تغییرات جورشدگی رسوبات در مسیر یک رودخانه تابع تغییر انرژی آب، تغییرات شیب کانال و تغییرات لیتولوژی است (رایس و چرچ، ۲۰۱۰). معمولاً روند ریزشوندگی در رودخانه‌های گراولی از رودخانه‌های با بار رسوبی ماسه‌ای یا گلی محسوس‌تر است. روند ریزشوندگی توسط ناپیوستگی‌هایی قطع می‌شود. ورود منابع جانبی، تغییر لیتولوژی، برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای، وجود گسل در مسیر و افزایش شیب بستر شش عامل ایجاد ناپیوستگی در روند ریزشوندگی به سوی پایین‌دست رودخانه‌ها می‌باشند (خدابخش، ۱۳۹۳). خدابخش و همکاران (۱۳۹۴) نشان دادند این ناپیوستگی‌ها عمدتاً توسط ورود منابع رسوبی جانبی ایجاد می‌شوند. منابع نقطه‌ای (مانند شاخه‌های فرعی) موجب پرش موقتی در روند ریزشوندگی و منابع خطی (مانند مخروط‌افکنه) موجب روند درشت‌شوندگی موقتی در مسیر رودخانه می‌شود (شکل ۱۰).

و ۷ دارای شاخص پیچش زیاد و شاخص انشعاب کم (به جز مدل ۴ که دارای شاخص انشعاب کم تا متوسط هستند) و سایر مدل‌ها دارای محدوده گوناگونی از شاخص‌های پیچش و انشعاب هستند. مدل‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده رودخانه گراولی، مدل‌های ۵، ۶ و ۷ منعکس کننده رودخانه ماندری و مدل ۸ بیان‌کننده سیستم‌های کانالی آناستوموزینگ هستند (مایل، ۱۹۸۵).

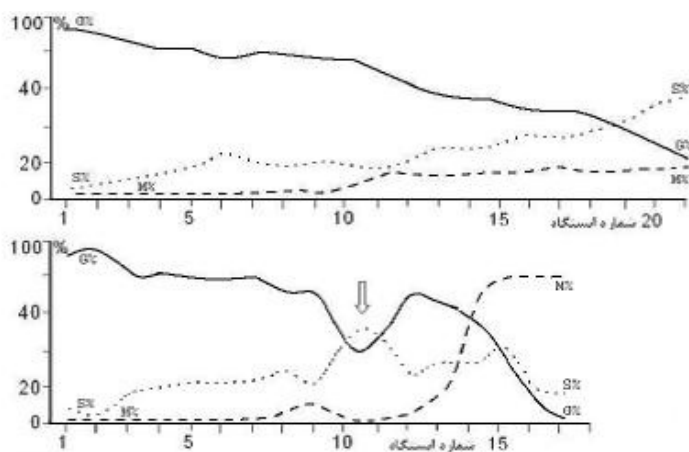
#### ۴-۸- روند ریزشوندگی رسوبات

اندازه دانه‌ها عامل مهمی در بررسی شدت جریان و انتقال رسوبات است (رید و همکاران، ۱۹۹۷). جورشدگی هیدرولیکی، تغییر سطح اساس، زمین‌ساخت حوضه، هیدرولیک رودخانه و سایش ذرات سبب ریزشوندگی اندازه ذرات به طرف پایین‌دست رودخانه می‌شود. لازم به ذکر است که شاخص‌هایی نظیر میزان اندک تولید رسوب و منابع فرعی تامین رسوب می‌تواند سبب تغییر در این روند ریزشوندگی (پیوستگی رسوبی) گردد (داوی و لاپوینت، ۲۰۰۷). شکل، چگالی و اندازه دانه‌ها را می‌توان

جدول ۱۰. فرم ساختاری برخی سیستم‌های رودخانه‌ای امروزی (مایل، ۱۹۸۵)

مدل	شاخص پیچش	شاخص انشعاب	نوع رسوب	عناصر ساختاری ویژه	محیط رسوبی
۱	کم	زیاد	گراول، به مقدار کم‌تر ماسه	GB, SG (SB)	مخروط‌های افکنه نزدیک به منشا با جریان رسوبی گرانشی
۲	کم	زیاد	گراول، به مقدار کم‌تر ماسه	GB (SB)	مخروط‌های افکنه نزدیک به منشا یا دشت شریانی شسته‌شده
۳	کم تا متوسط	متوسط تا زیاد	گراول، به مقدار کم‌تر ماسه و ذرات دانه‌ریزتر	GB, SB (OF)	رودخانه عمدتاً گراولی با پیچش کم با سطوح توپوگرافی مشخص
۴	زیاد	کم تا متوسط	گراول، به مقدار کم‌تر ماسه و ذرات دانه‌ریزتر	GB, LA, OF (SB)	رودخانه گراولی با پیچش زیاد
۵	متوسط تا زیاد	کم تا متوسط	ماسه پبلی و ذرات دانه ریزتر	SB, LA, OF (GB)	رودخانه ماندری دانه درشت ماسه‌ای و ماسه پبلی
۶	زیاد	کم	ماسه، به مقدار کم‌تر ذرات دانه ریزتر	LA, SB, OF	رودخانه ماندری ماسه‌ای کلاسیک
۷	زیاد	کم	ماسه ریز، سیلت، گل	LA, SB, OF	رودخانه ماندری دانه‌ریز گلی
۸	کم تا زیاد	زیاد	ماسه، ذرات دانه ریزتر	SB, OF (LA)	سیستم کانالی آناستوموزینگ پایدار با پیچش کم تا زیاد
۹	کم تا متوسط	زیاد	ماسه	SB, FM	رودخانه با پیچش کم با سدهای زبانه-ای و ماکروفرم‌های صفحه‌ای شکل
۱۰	کم تا متوسط	متوسط تا زیاد	ماسه، به مقدار کم‌تر ذرات دانه ریزتر	FM, SB, OF	رودخانه با پیچش کم و نسبتاً ژرف با سدهای مورب و زبانه‌ای
۱۱	کم	زیاد	ماسه، به مقدار کم‌تر ذرات دانه ریزتر	SB (OF)	دشت شریانی دور از کانال، معمولاً فصلی و زودگذر
۱۲	کم	زیاد	ماسه، به مقدار کم‌تر ذرات دانه ریزتر	LS (OF)	دشت رودخانه‌ای با سیلاب‌های صفحه‌ای مرتبط با تخلیه ناگهانی زیاد





شکل ۱۰. روند ریزشوندگی دانه‌های در اندازه گراول بدون ناپیوستگی (بالا) در رودخانه قلقلرود تویسرکان و با ناپیوستگی رسوبی (پایین) در رودخانه سیمینه‌رود (خدابخش، ۱۳۹۳). علامت پیکان نشان‌دهنده محل پیوستن شاخه فرعی صالح‌آباد به سیمینه‌رود است. S, G و M به ترتیب نشان‌دهنده دانه‌های در اندازه گراول، ماسه و گل است.

جدول ۱۱. نمونه‌های کاربردی از پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران ایرانی درباره محورهای اصلی مطرح‌شده در این مقاله

موضوع پژوهش	مهم‌ترین نتایج بدست آمده
ارزیابی میزان آلودگی آب و رسوبات رودخانه‌ای (باقری و همکاران، ۱۳۹۰؛ فرقانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ قشلاقی و رستمی، ۱۳۹۵).	۱- یکنواخت نبودن تغییرات غلظت فلزات سنگین در مسیر رودخانه. ۲- همبستگی مثبت بین برخی فلزات (نظیر مس و نیکل) با میزان ماده آلی و رس. ۳- تعیین منشا عناصر (زمین‌زاد یا انسان‌زاد). ۴- نامناسب بودن آب رودخانه برای مصارف کشاورزی به علت ورود پساب‌های کشاورزی. ۵- نقش اصلی رودخانه‌های ورودی به محیط دریایی در آلودگی آن. ۶- استفاده از شاخص زمین‌شیمیایی جهت تفکیک سهم عوامل طبیعی از عوامل انسانی در تمرکز فلزات سنگین. ۷- نقش موثر pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و میزان مواد آلی در افزایش نگره‌داشت عناصر.
تحلیل روند جریان رودخانه‌ای (کاظم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ صلاحی، ۱۳۹۳).	۱- وجود دلایل طبیعی (افزایش دما، تبخیر و تعرق) و غیر طبیعی (ایجاد کانال مصنوعی و افزایش بهره‌برداری از رودخانه‌ها جهت مصارف کشاورزی) در روند کاهش دبی جریان رودخانه‌ای. ۲- مناسب بودن شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی دبی جریان‌های رودخانه‌ای.
بررسی پایداری رسوبات بستر (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶).	۱- تاثیر زبری بستر کانال، آشفستگی و سزعت جریان بر مقادیر تنش برشی در رودخانه‌ها. ۲- شناخت نوع حرکت رسوب و حساسیت کانال نسبت به فرسایش یا رسوب‌گذاری از شاخص‌های مهم در مدیریت رفتار رودخانه به شمار می‌رود. ۳- روش‌های تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی از روش‌های مناسب جهت تعیین آستانه حرکت ذرات رسوبی بستر رودخانه به شمار می‌رود.
طبقه‌بندی ریخت‌شناختی رودخانه بر اساس روش روزگن (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۹۴؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۴).	۱- تاثیر وضعیت زمین‌ساختی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه بر طبقه‌بندی روسگن. ۲- عدم کارایی روش روزگن در پیش‌بینی رفتار رود و نامناسب بودن آن در پروژه‌های طراحی در سیستم رودخانه‌ای پایدار. ۳- مناسب بودن روش روزگن جهت پیش‌بینی کمی ژئومورفیکی رودخانه‌ها.
رخساره‌های رسوبی و عناصر ساختاری (پاکزاد و امینی، ۱۳۸۸؛ پاکزاد و مروت، ۱۳۹۰؛ پورسلطانی و معینی‌صالح، ۱۳۹۱؛ تقدیسی‌نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۱؛ قادری فیجانی و همکاران، ۱۳۹۵).	۱- تعیین مدل رسوبی و فرایندهای رسوب‌گذاری موثر بر رودخانه‌ها بر اساس مجموعه‌های رخساره‌ای و عناصر ساختاری. ۲- شناخت مفاهیم اساسی رسوب‌گذاری و محیط‌های رسوبی.
روند ریزشوندگی رسوبات رودخانه‌ای (تقدیسی‌نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۱؛ خدابخش، ۱۳۹۳؛ خدابخش و همکاران، ۱۳۹۴).	۱- تعیین پیوستگی و ناپیوستگی‌های رسوبی در مسیر رودخانه. ۲- تاثیر شاخص‌هایی نظیر تغییر شیب حوضه، جورشدگی هیدرولیکی، نوع بار رسوبی، انرژی جریان، جنس واحدهای سنگی، معدن-کاری در مسیر رودخانه، ورود رسوبات از منابع کناری و وجود گسل در مسیر رودخانه در روند ریزشوندگی به سوی پایین‌دست در رسوبات رودخانه‌ای.

### نتیجه‌گیری

مباحث مطرح شده در این پژوهش در چهار رده کلی بررسی‌های زیست‌محیطی (آلودگی آب و رسوبات بستر و منشا آن‌ها)، پژوهش‌های جغرافیایی (پهنه‌بندی سیلاب در زیرمحیط‌های رودخانه‌ای)، مهندسی رودخانه (تعیین

رژیم جریان، آستانه حرکت مواد بستر، پایداری کانال رودخانه و بررسی دبی جریان) و رسوب‌شناسی رودخانه (روند ریزشوندگی رسوبات، رخساره‌های رسوبی، اشکال بستر، مدل‌های رودخانه‌ای و عناصر ساختاری) بیان شده است. برخی از پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران

در رسوبات رودخانه گرگان‌رود، اقیانوس‌شناسی، شماره ۵، ص ۳۵-۳۹.

بوستانی، ا. و اسماعیلی، ک (۱۳۹۴) مهندسی رودخانه. از گذشته تا آینده (بررسی رویکردها و چشم‌انداز)، آب و توسعه پایدار، ۳، ص ۶۷-۷۲.

پاسبان، ع.، خدابخش، س. و غریب‌رضا، م.، ر.، ملکی، م.، رفیعی، ب (۱۳۹۶) برآورد و واکاوی رواناب و انتقال رسوب و تاثیر آن بر سیستم رسوبی رودخانه‌های الموت و شاهرود (شمال استان قزوین)، رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۹، ص ۹۹-۱۱۵.

پاکزاد، ح.، ر.، امینی، ع (۱۳۸۸) رخساره‌ها و فرایندهای رسوب‌گذاری نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای بخش پایینی حوضه رودخانه زاینده‌رود، جنوب شرق اصفهان، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره ۳۶، ص ۱۱۳-۱۳۲.

پاکزاد، ح.، ر.، مروت، م.، ح (۱۳۹۰) رخساره‌ها و عناصر ساختاری رودخانه زاینده‌رود در منطقه ورزنه (قورتان-ورزنه)، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره ۴۲، ص ۱۳۷-۱۵۴.

پورسلطانی، م.، ر.، معینی‌صالح، م (۱۳۹۱) مطالعات رسوب‌شناسی رودخانه‌های مطرب‌آباد و صلح‌آباد، حوضه آبریز نوبهار، ایران مرکزی، رخساره‌های رسوبی، شماره ۵، ص ۱۶۹-۱۸۴.

تقدیسی نیکبخت، س.، محبوبی، ا.، محمودی قزایی، م.، ح.، خانه‌باد، م.، پاسبان، ع (۱۳۹۱) رخساره‌های رسوبی و روند ریزشوندگی رسوبات در رودخانه عشق‌آباد-سوله (جنوب غرب قوچان)، رخساره‌های رسوبی، شماره ۵، ص ۱۳-۳۰.

حسینی تودشکی، و.، پورکرمانی، م.، آری، م.، خسروتهرانی، خ (۱۳۹۰) تاثیر ساختارها بر روی رودخانه قزل‌اوزن، فصل‌نامه علوم زمین، شماره ۸۱، ص ۵۵-۶۰.

حسین‌زاده، م.، م.، صدوق، س. ح.، بیرانوند، س. م.، اسماعیلی، ر (۱۳۹۶) بررسی پایداری رسوبات بستر رودخانه لاریج با استفاده از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۹، ص ۷۵-۸۶.

خدابخش، س (۱۳۹۳) عوامل موثر بر روند ریزشوندگی به سوی پایین‌دست در رودخانه‌های با بستر گراولی: نمونه‌هایی از باختر و شمال ایران، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۱۶، ص ۹۸-۱۰۷.

خدابخش، س.، حسام‌زاده، م (۱۳۹۲) شناخت الگوی کانال رودخانه خررود (جنوب استان قزوین) بر اساس شاخص‌های ریخت‌شناسی و رسوب‌شناسی، رخساره‌های رسوبی، شماره ۶، ص ۱۸۶-۲۰۱.

ایرانی و نتایج حاصل از آن‌ها درباره مباحث مطرح شده در این مقاله در جدول ۱۱ ذکر شده است. در این پژوهش، موضوع رسوب‌شناسی رودخانه بیش‌تر مورد بحث و کنکاش قرار گرفته است. روش‌های بیان شده درباره رسوب‌شناسی رودخانه منجر به توصیف دقیق‌تر ساختارهای چینه‌شناسی به منظور تحلیل عوامل کنترل‌کننده رسوبی در ایجاد ساختارهای رودخانه‌ای است. چارچوب بدست آمده از تحلیل عناصر ساختاری نقش بسزایی در شناخت مفاهیم پایه رسوب‌گذاری و محیط‌های رسوبی دارد. علاوه بر شناسایی رخساره‌های سنگی، به منظور شناسایی دقیق زیرمحیط‌های تشکیل رخساره‌ها در سیستم‌های رودخانه‌ای از دو روش تعیین عناصر ساختاری و رده‌بندی سطوح مرزی (محدودکننده) رخساره‌ها و ارتباط بین آن‌ها استفاده می‌شود. روش‌های موجود تحلیل رخساره‌ها برای رسوبات رودخانه‌ای بر اساس بررسی نیمرخ‌های قائم استوار است. هم‌چنین جهت تحلیل عناصر ساختاری از طبقه‌بندی‌های رخساره‌های سنگی، سطوح محدودکننده، عناصر ساختاری، کانال‌ها و دره‌های پرشده و طبقه‌بندی چند مقیاسی استفاده می‌شود. هشت عنصر ساختاری عمده شامل کانال‌ها، سدها و اشکال بستر گراولی، اشکال بستر ماسه‌ای، ماکروفرم‌ها، رسوبات با گسترش جانبی، رسوبات جریان رسوبی-گرانشی، ورقه‌های ماسه‌ای لامینه‌ای و رسوبات ریزدانه سرریز شده جهت تحلیل عناصر ساختاری بکار می‌رود. هم‌چنین دوازده نوع فرم ساختاری جهت ترکیب احتمالی این عناصر معرفی شده است.

## منابع

ادیب، آ.، تقوی‌فر، ا.، واقفی، م (۱۳۹۳) بررسی اثرات جزر و مد دریایی خلیج فارس بر روی منحنی اشل-دبی در رودخانه کارون، مجله علوم و فنون دریایی، شماره ۱، ص ۲۵-۳۲.

اسماعیلی، ر (۱۳۹۱) بررسی نقش مورفوتکتونیک بر ناهنجاری الگوی زه‌کشی رود، البرز شمالی، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۹، ص ۱-۱۳.

اسماعیلی، ر.، حسین‌زاده، م. م (۱۳۹۴) مقایسه روش‌های روزگن و استیل‌رود در طبقه‌بندی رودخانه‌های کوهستانی، مطالعه موردی البرز شمالی، حوضه آبریز لاریج، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۱، ص ۶۴-۷۹.

باقری، ح.، شامد، ت.، خیرآبادی، و.، درویش بسطامی، ک.، باقری، ز (۱۳۹۰) سنجش و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

- محوطه‌های باستانی با تاکید بر آنالیز اندازه رسوبات رودخانه (مطالعه موردی: تپه باستانی میمنت‌آباد و مافین آباد)، فصل‌نامه کواترنری ایران، شماره ۱، ص ۴۱-۵۱.
- یمانی، م.، مقصودی، م.، محمدخان، ش.، مرادی، ا. (۱۳۹۴) طبقه‌بندی مورفولوژیکی آبراهه رودخانه تلوار بر اساس روش رزگن و کارایی آن (حداصل روستای کچی‌گرد تا حسن‌خان)، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۳، ص ۱-۱۸.
- Adib, A (2008) Determining water surface elevation in tidal rivers by ANN. Proc. Institution Civ. Engrs, 161: 83-88.
- Agarwal, A., Rall, R. K., Upadhyay, A (2009) Forecasting of runoff and sediment yield using artificial neural networks, 5: 368-375.
- Akhtar, M. K., Corzo, G. A., Van-Andel, S. J., Jonoski, A (2009) River flow forecasting with artificial neural networks using satellite observed precipitation pre-processed with flow length and travel time information: case study of the Ganges river basin. Hydrology and earth System Sciences, 13: 1607-1618.
- Allen, J. R. L (1982) Sedimentary structures: their character and physical basis. Developments in sedimentology. Elsevier, Amsterdam, 593 pp.
- Allen, J. R. L (1983) Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. Sediment. Geol, 33: 237-293.
- Anderson, K. C., Neff, T (2011) The influence of paleofloods on archaeological settlements patterns during A. D. 1050-1170 along the Colorado River in the Grand Canyon, Arizona, USA. Catena, 85: 168-186.
- Andrews, J. E., Brimblecombe, P., Jickells, T. D., Liss, P. S., Reid, B. J (2004) An introduction to environmental chemistry. Blackwell Publishing, Oxford, 2<sup>nd</sup> edition, 296 pp.
- Ashley, G. M (1990) Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. J. Sediment. Petrol, 60: 160-172.
- Barringer, J., Reilly, P. A., Eberl, D. D., Blum, A. E (2011) Arsenic in sediments, groundwater, and stream water of a glauconitic Coastal plain terrain, New Jersey, USA-chemical fingerprints for geogenic and anthropogenic sources: Applied Geochemistry, 26: 763-776.
- Bathurst, J. C., Graf, W. H., Cao, H. H (1987) Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In: Thorne, C. R., Bathurst, J. C., Hey, R. D., (eds.), Sediment transport in gravel-bed rivers. Wiley & Sons, New York, p. 453-477.
- Bawa, N., Jaina, V., Shekhar, S., Kumar, N., Jyani, V (2014) Controls on morphological variability and role of stream power distribution pattern, Yamuna River, western India. Geomorphology, 227: 60-72.
- خدابخش، س.، کریمی، م.، رفیعی، ب.، رشنو، ح.، صحرارو، ن (۱۳۹۴) بررسی اثر منابع جانبی بر روند ریزشوندگی رسوبات به سوی پایین‌دست حوضه رودخانه حرم‌آباد (دشت باختری ملایر)، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۱۷، ص ۹۱-۹۹.
- خدابخش، س.، محسنی، ح.، حسام‌زاده، م.، مهاجروطن، م.، کرم‌الهی، ل (۱۳۹۲) بررسی سرشاخه‌های غربی رودخانه قره‌چای بر اساس نوع رودخانه و رخساره‌های رسوبی، رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۱، ص ۷۳-۸۸.
- رضایی، ع.، مهدوی، م.، لوکس، ک.، فیض‌نیا، س.، مهدیان، م (۱۳۸۶) مدل‌سازی منطقه‌ای دبی‌های اوج در زیرحوضه‌های آبریز سد سفیدرود با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۱، ص ۲۵-۳۹.
- صفری، ع (۱۳۸۰) تعیین الگوی مدیریت بهینه در دشت‌های سیلابی، پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۱۲ص.
- صلاحی، ب (۱۳۹۳) مدل‌سازی و پیش‌بینی دبی‌های رودخانه‌های استان اردبیل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۱۷، ص ۵۰-۶۲.
- فرقانی، گ.، جعفری، ه.، قشلاقی، ا.، تیموری، ع (۱۳۹۳) آلودگی زیست‌محیطی آب و رسوبات رودخانه گرگانرود در محدوده شهر گنبد، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره ۵۶، ص ۸۱-۹۴.
- قادری فیجانی، ح.، خانه‌باد، م.، موسوی حرمی، ر.، محبوبی، ا (۱۳۹۵) رسوب‌شناسی سدهای طولی در رودخانه الیاتو (جنوب باختر فریمان)، فصل‌نامه علوم زمین، شماره ۱۰۱، ص ۶۹-۷۸.
- قشلاقی، ا.، رستمی، ش (۱۳۹۵) آلودگی و گونه‌سازی فلزات سنگین در رسوبات بستر رودخانه سیاهرود (منطقه قائم‌شهر-استان مازندران)، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره ۶۳، ص ۷۳-۹۰.
- کاظم‌زاده، م.، ملکیان، آ.، رسول‌زاده، ع (۱۳۹۲) تحلیل روند جریان‌های رودخانه‌ای با استفاده از رویکردهای آماری پارامتری و ناپارامتری در استان اردبیل، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۱۵، ص ۵۱-۶۳.
- لشکری، ح.، رشیدی، ع.، رضایی، ع (۱۳۹۲) پهنه‌بندی سیلاب رودخانه زرینه‌رود با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۱۳، ص ۵۱-۶۸.
- مقصودی، م.، زمان‌زاده، س.، م.، نویدفر، ا.، محمدی، ا.، یوسفی زسک، ر (۱۳۹۵) مطالعه شرایط محیطی حاکم بر

- Djokic, J., Maidment, D (1991) GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M. F., Parks, B. O., Steyaert, L. T., (eds.), *Environmental modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, p. 147-167.
- Dunne, T., Constantine, J. A., Singer, M. B (2010) The role of sediment transport and sediment supply in the evolution of river channel and flood plain complexity: *Transactions. Japanese Geomorphological Union*, 31: 155-170.
- Fielding, C. R (1993) A review of recent research in fluvial sedimentology. *Sediment Geol*, 85: 3-14.
- Ford, G. L., Pyles, D. R (2014) A hierarchical approach for evaluating fluvial systems: Architectural analysis and sequential evolution of the high net-sand content, middle Wasatch Formation, Uinta Basin, Utah. *AAPG Bull*, 98: 1273- 1304.
- Forghani, G., Moore, F., Lee, S., Qishlaqi, A (2009) Geochemistry and speciation of metals in sediments of the Maharlou Salin Lake, Shiraz, SW Iran, *Environmental earth Science*, 59: 173-184.
- Friend, P. F (1983) Towards the field classification of alluvial architecture or sequence. In: Collinson, J. D., Lewin, J., (eds.), *modern and ancient fluvial systems*. Int. Assoc. Sediment. Spec. Publ. 6, p. 345-354.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupre, T (2004) Trace elements in river surface and ground water, weathering and soils. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., (eds.), *Treatise on geochemistry*. Oxford: Elsevier-Pergamon, 5: 225-272.
- Gibling, M. R (2006) Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification. *Jour. of Sed. Res*, 76: 731-770.
- Goodbred, S. L. J (2003) Response of the Ganges dispersal system to climate change: a source-to-sink view since the last interstade. *Sedimentary Geology*, 162: 83-104.
- Harrison, L. R., Legleiter, C. J., Wydzga, M. A., Dunne, T (2011) Channel dynamics and habitat development in meandering, gravel bed river. *Water resources research*, 47: 1-21.
- Heim, S., Schwarzbauer, J (2013) Pollution history revealed by sedimentary records: A review. *Environmental chemistry letters*, 11: 255-270.
- Heon Lee, J., Lee Eun, T., Lee Do, H., Kim Nam, W (1993) Flood analysis in the Tidal Reaches of the Nakdong River, *Journal of Korea Water Resources Association*, 31: 235-242.
- Holbrook, J., Schumm, S. A (1999) Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, 305: 287-306.
- Best, J (2005) Kinematics, topology and significance of dune-related macroturbulence: some observations from the laboratory and field. *Spec. Publ. Ass. Sediment*, 35: 41-60.
- Best, J., Kostaschuk, R. A (2002) An experimental study of turbulent flow over a low-angle dune. *J. Geophys. Res*, 107: 3135-3154.
- Brice, J. C (1984) Planform properties of meandering rivers. Keynote paper in river meandering, proceeding of the conference rivers, 83 New Orleans, LA, 24-26 October 1983, edited by Elliott, C. M., p. 1-15, American Society of Civil Engineers, N. Y.
- Bridge, J. S (1993) Description and interpretation of fluvial deposits: a critical perspective. *Sedimentology*, 40: 801-810.
- Brierley, G. J (1991) Floodplain sedimentology of the Squamish River, British Columbia: relevance of element analysis. *Sedimentology*, 38: 735-750.
- Brunier, G., Anthony, E.J., Goichot, M., Provansal, M., Dussouillez, P (2014) Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilization. *Geomorphology*, 224: 177-191.
- Buffington, J. M., Montgomery, D. R (2013) Geomorphic classification of rivers. *Treatise on Geomorphology*, 9: 730-767.
- Carling, P. A (1999) Subaqueous gravel dunes. *Journal of Sedimentary Research*, 69: 534-545.
- Carling, P. A., Shvidchenko, A. B (2002) A consideration of the dune/anti-dune transition in the fine gravel. *Sedimentology*, 49: 1269-1282.
- Cheel, R. j (1990) Horizontal lamination and the sequence of bed phases and stratification under upper flow regime conditions. *sedimentology*, 37: 517-530.
- Crowley, K. D (1983) Large-scale bed configurations (macro forms), Platte River Basin, Colorado and Nebraska: primary structures and formative processes. *Geol. Soc. Am. Bull*, 94: 117- 133.
- Davey, C., Lapointe, M (2007) Sedimentary links and the spatial organization of Atlantic salmon spawning habitat in a Canadian Shield River. *Geomorphology*, 83: 82-96.
- Davoodi, H., Gharibreza, M.R., Negarestan, H., Sedigh-Mortazavi, M., Lak, R (2017) Ecological risk assessment of the Assaluyeh and Bassatin estuaries (northern Persian Gulf) using sediment quality indices. *Estuaries, Coastal and shelf science*, 192: 17-28.
- Devon, M. B., Carling, P. A., Bayer, R. I., Lancaster, N (2004) Flood-formed dunes in Athabasca Valles, Mars: morphology, modeling and implications. *Icarus*, 171: 68-83.

- Market, B., Friese, K (2000) Trace elements, their distribution and effects in the environment, Elsevier, 582 p.
- Melles, S. J., Jones, N. E., Schmidt, B (2012) Review of theoretical developments in stream ecology and their influence on stream classification and conservation planning. *Freshwater Biology*, 57: 415-434.
- Miall, A. D (1978) Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In: Miall, A. D., (ed.), *fluvial sedimentology*. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., 5: 597-604.
- Miall, A. D (1985) Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22: 261-308.
- Miall, A. D (1990) Principles of sedimentary basin analysis. 2<sup>nd</sup> edition, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 668 p.
- Miall, A. D (1994) Reconstructing fluvial macroform architecture from two-dimensional outcrops: examples from the Castlegate Sandstone, Book Cliffs, Utah. *Jour. of Sed. Res.*, 64: 146-158.
- Miall, A. D (1995) Description and interpretation of fluvial deposits: a critical perspective: discussion. *Sedimentology*, 42: 379-384.
- Miall, A. D (2006) The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum Geology. Springer, Berlin, 4<sup>th</sup> corrected printing, 582 p.
- Miall, A. D (2013) Fluvial depositional systems. Springer, Switzerland, 316 p.
- Minghui, Y. U., Hongyan, W., Yanjie, L., Chunyan, H. U (2010) Study on the stability of non-cohesive river bank. *International Journal of sediment Research*, 25: 391-398.
- Nichols, G (2009) Sedimentology and stratigraphy. 2<sup>nd</sup> edition, Blackwell Science, 419 p.
- Owen, A., Ebinghaus, A., Hartley, A. J., Santos, M. G. M., Weissmann, G. S (2017) Multi-scale classification of fluvial architecture: an example from the Palaeocene-Eocene Bighorn Basin, Wyoming. *Sedimentology*, 64: 1572-1596.
- Platt, N. H., Keller, B (1992) Distal alluvial deposits in a foreland basin setting- the Lower Freshwater Molasse (Lower Miocene), Switzerland: sedimentology, architecture and palaeosols. *Sedimentology*, 39: 545-565.
- Prothero, D. R., Schwab, F (2003) An Introduction to sedimentary rocks and stratigraphy. W. H. Freeman and company, New York, 559 p.
- Ramazanpour, M., Roshani, M (2011) Seasonal trend analysis of precipitation and discharge parameters in Guilan, North of the Iran. *World Applied Sciences Journal*, 14: 1286-1290.
- Reid, I., Bathurst, J. C., Carling, P. A., Walling, D. E., Webb, B. W (1997) Sediment erosion, Hsu, K., Gupta, H. V., Sorooshian, S (1995) Artificial neural network modeling of the rainfall process. *Water Resources*, 31: 2317-2330.
- Kahaya, E., Kalayci, S (2004) Trend analysis of streamflow in Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 289: 128-144.
- Karpouzou, D. K., Kavalieratos, S., Babajimopoulos, C (2010) Non-parametric trend analysis of precipitation data in Pieria Region (Greece). *European Water*, 30: 31-40.
- Kaufmann, P. R., Faustini, J. M., Larsen, D. P., Shirazi, M. A (2008) A roughness-corrected index of relative bed stability for regional stream surveys. *Geomorphology*, 99: 150-170.
- Lagasse, P., Spitz, W., Zevenbergen, L., Zachmann, D (2004) Handbook for predicting stream meander migration. NHCRP Report 533, Nalt. Coop. Highway Res. Program, Washington, 107 pp.
- Leeder, M. R (1993) Tectonic controls upon drainage basin development, river channel migration and alluvial architecture: implications for hydrocarbon reservoir development and characterization. In: North, C. P., Prosser, D. J., (eds.), *characterization of fluvial and Aeolian reservoirs*. Geo. Soc., London, Spec. Publ. 73, p. 7-22.
- Legg, N. T., Olson, P. L (2014) Channel migration processes and patterns in western Washington shorelands and environmental assistance program. Department of ecology, Olympia, Washington, Publication no. 14-6-028, 27 pp.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., Miller, J. P (1995) Fluvial processes in geomorphology. Courier Dover Publications, 502 p.
- Lewin, J., Brewer, P. A (2002) Predicting channel patterns. *Geomorphology*, 40: 329-339.
- Lewis, D. W., McConchie, D (1994) Practical sedimentology. 2<sup>nd</sup> edition, Chapman & Hall, New York, London, 123 pp.
- Maejima, W., Hota, R. N., Mishra, B (2009) Antidunes and antidune stratification in the Permo-Carboniferous Talchir Formation, Talchir Gondwana basin, Orissa, India. *Journal of Geosciences, Osaka University*, 52: 11-20.
- Magilligan, F. J., Nislow, K. H., Kynard, B. E., Hackman, A. M (2016) Immediate changes in stream channel geomorphology, aquatic habitat, and fish assemblages following dam removal in a small upland catchment. *Geomorphology*, 252: 158-170.
- Mark, S., Ocallaghin, E. R (1984) On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response. In: Gupta, V. K., Rodriguez-Iturbe, I., Wood, E. F., (eds.), *Scale problems in hydrology*. D. Reidel Publishing Company, p. 1-17.

- drainage basin development in response to Pyrenean mountain building. *Sedimentology*, 48: 1235-1276.
- Wohl, E (2000) Mountain rivers. American Geophysical Union, Washington, 320 p.
- Wu, C. L., Chau, K. W (2011) Rainfall-runoff modeling using artificial neural network coupled with singular spectrum analysis, *Journal of Hydrology*, 399: 394-409.
- Zhang, X. B., Harvey, K. D., Hogg, W. D., Yuzyk, T. R (2001) Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37: 987-998.
- Ziliani, L., Surian, N (2012) Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river. *Geomorphology*, 173: 104-117.
- transport and deposition. In: Thorn, C. R., Hey, R. D., Newson, M. D., (eds.), *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*. John Wiley, Chichester, p. 95-135.
- Rey, J., Martinez, J., Hidalgo, M.C (2013) Investigating fluvial features with electrical resistivity imaging and ground-penetrating radar: The Guadalquivir River terrace (Jaen, Southern Spain). *Sedimentary Geology*, 295: 27-37.
- Rice, S. P., Church, M (2010) Grain-size sorting within river basin relation to downstream fining along a wandering channel. *Sedimentology*, 57: 232-251.
- Rosgen, D. L (1996) *Applied river morphology*. Wildland Hydrology Books, Pagosa Springs, Colorado, 486 p.
- Ruck, B., Makiola, B (1990) Flow over a single-sided back ward facing step with step angle variations. In: Turner, J. T., (eds.), *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Laser Anemometry*: Springer-Verlag, New York, p.369-378.
- Rust, B. R., and Gibling, M. R (1990) Three-dimensional antidunes as HCS mimics in a fluvial sandstone: the Pennsylvanian South Bar Formation near Sydney, Nova Scotia. *Sed. Petrol*, 60: 540-548.
- Schumm, S. A (1981) Evolution and response to the fluvial system, sedimentologic implications. In: Ethridge, F. G., Flores, R. M., (eds.), *Recent and ancient non-marine environments: models for exploration*. SEPM, Special Publication 31, p. 19-29.
- Schumm, S. A (2005) *River variability and complexity*. Cambridge University Press, United States of America, 469 p.
- Smith, S. A (1990) The sedimentology and accretionary style of an ancient gravel-bed stream: the Budleigh Salterton Pebble Beds (Lower Triassic), southwest England. *Sediment Geol*, 67: 199-219.
- Smol, J. P (2008) *Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective*, 2<sup>nd</sup> edition, Blackwell, 383 p.
- Soegaard, K (1992) Architectural elements of fan delta complex in Pennsylvanian Sandia Formation, Taos Trough, northern New Mexico. In: Miall, A. D., Tyler, N., (eds.), *the three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments, and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral Conc. Models Ser., p. 217-223.
- Vincent, S. J (2001) The Sis palaeovalley: a record of proximal fluvial sedimentation and

## Sedimentological analysis of fluvial systems

R. Behbahani<sup>1\*</sup> and S. Khodabakhsh<sup>2</sup>

1, 2- Dept., of geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan

\* Rezabehbahani30@yahoo.com

Received: 2018/6/12 Accepted: 2018/7/29

### Abstract

In this research, in addition to some of the researching views of rivers are discussed, achievements and sedimentological views of the Iranian rivers are studied in more detail. One of the most important environmental problems, is pollution of sediments or river water. Concentration of pollutant metals in fluvial sediments depends on various indicators such as the physico-chemical properties of the fluvial environment and geochemical characteristics of the metals. Methods for determination of total content and sequential extraction of different species of metals are used to determine the pollution of metals. In GIS-based researchs, river changes maps (in specific time periods) and flood zoning are widely used in flood plan management. In the river engineering debate, some common methods for investigating the flood phenomenon, including digital altitudinal model, hydrological trend model and triangular irregular net, are used. Also, other related topics in this regard, include the threshold of grain movement and predicting the behavior of rivers (based on artificial neural networks models and models based on statistical methods such as linear and nonlinear regression, Pearson, Spesarman and Man-Kendall correlation methods). Investigation of the threshold of grains movement will be done by methods such as flow unit discharge, critical shear stress and critical mean flow velocity. The most important subject in fluvial sedimentology include river morphology, flow regime and bedforms, classification of fluvial channel bodies and valley fills, fluvial styles, sedimentary scales in fluvial sediments, sedimentary facies, architectural elements, sediment load and fining trend of river sediments. Fluvial architecture consists of geometry and internal arrangement of channel and overbank deposits in fluvial sequences. The analysis of architectural elements is a relatively new method for the interpretation of fluvial facies. The variation of channel types and sediments in fluvial environments are due to the wide range of dependent factors governing on the fluvial sedimentation. Classifications of lithofacies, bounding surfaces and architectural elements are one of the most important methods for analyzing of fluvial architectural elements.

**Keywords:** Fluvial sedimentology, Fluvial architecture, Architectural elements, Pollution of metals, Flood zoning, River morphology