پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال سوم، شماره ٤، بهار ١٣٩٤
صص. ٨٩-٧٤

مورفومتری و مقایسه تغییرات عرضی رودخانه ارس طی سه دهه اخیر

مطالعه موردی : پایین‌دست سد میل مغان

مجتبی یمانی *– استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
مسعود رحیمی– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز
عبدالکریم ویسی– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

تغییرات و جابجایی‌های کلی و حتی جزئی الگوی رودخانه از عمده‌ترین مباحث مربوط به ژئومورفولوژی رودخانه‌ای به شمار می‌رود. به همین علت تحقیقات و مطالعات زیادی توسط ژئومورفولوژیست ها در این زمینه انجام‌گرفته است. با بررسی الگوی یک رودخانه می‌توان شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی آن را در آینده بهتر درک کرد و همچنین می‌توان پاسخ رودخانه را نسبت به تغییرات طبیعی و انسانی پیش‌بینی کرد. رودخانه ارس یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های مرزی ایران در حوضه آبریز دریای خزر می‌باشد که بنا به دلایل مختلف زمین‌های ساحلی خود را به‌واسطه تغییرات جانبی موردتهاجم قرار داده و نهایتاً موجب تخریب اراضی زراعی و مسکونی و جاده ساحلی شده است که خصوصاً در مناطق دشتی حمله رودخانه به سواحل تشدید یافته و باعث تغییرات عرضی شدید شده است. وجود تأسیسات زیربنایی مهم کشاورزی، پروژه‌های عمرانی و صنعتی در حاشیه رودخانه ارس موجب شده که تغییر مسیر این رودخانه از اهمیت بالایی برخوردار باشد. در این مطالعه به‌منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی بستر رودخانه ارس از تصاویر ماهواره‌ای Landsat سنجنده OLI و TM در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۷ الی ۲۰۱۳ و همچنین از تصاویر ماهواره IRS سنجنده‌P5 هم برای تفسیر دقیق‌تر عوارض کناره‌های رودخانه استفاده گردید. ضرایب هندسی رودخانه برای دو دوره زمانی فوق مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج حاصله تغییرات و جابجایی عرضی زیادی را طی ٢٦ سال اخیر (در بعضی نقاط ۱/۷ کیلومتر) نشان داد. بیش‌ترین میزان این تغییرات در قسمت پایین‌دست بازه انتخابی صورت گرفته است. مطالعه عوامل مؤثر در تغییرات عرضی رودخانه ارس نیز نشان داد که پایین بودن شیب رودخانه و همچنین جریان رودخانه بر روی بستر آبرفتی جوان فرسایش پذیر از مهم‌ترین عوامل تغییرات عرضی این رودخانه بوده است و سایر عوامل تأثیرگذار در مرتبه بعدی قرارگرفته‌اند.

واژگان کلیدی: تغییرات جانبی، پیچان‌رود، مورفولوژی رودخانه، رودخانه ارس.

---

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۱۹۷۶۸۲ E-mail: Myamani@ut.ac.ir

مقدمه

ریخت‌شناسی یا مورفولوژی[1] رودخانه، علمی است که خصوصیات ظاهری شکل رودخانه را موردبررسی قرار می‌دهد. موضوع اصلی در این علم، مطالعه ساختار و فرم رودخانه‌ها ازنظر شکل هندسی در پلان[2]، هندسه شکل مقطع[3]، اشکال بستر و ویژگی‌های نیمرخ طولی آن است. چون رودخانه‌ها مسیر طبیعی حرکت آب بر سطح زمین به شمار می‌رود، لذا ریخت‌شناسی رودخانه در اثر تغییرات کمی و کیفی دبی جریان و بار رسوبی، جنس مصالح تشکیل‌دهنده بستر و سواحل رودخانه به‌طور طبیعی در طول زمان و یا براثر فعالیت‌های بشری از قبیل عملیات ساختمانی یا مهندسی تغییر می‌کند (راهنمای شکل هندسی مقطع و راستای رودخانه، وزارت نیرو : ۵ و ۶). مورفولوژی رودخانه‌ها در حفاظت و مقابله با سیلاب به‌واسطه پیوند و ارتباط آن با زیستگاه‌های طبیعی و انتقال سیلاب از اهمیت خاصی برخوردار است (Sear et al, 2003:2). در دهه‌های گذشته به‌منظور شناخت و کشف تغییرات موجود در سطح زمین به‌خصوص رودخانه‌ها از روش‌های مختلفی مانند عملیات صحرایی، نقشه‌برداری سطحی استفاده می‌کردند. معمولاً بررسی تغییرات به‌صورت سنتی، همراه با عملیات صحرایی وقت‌گیر بوده و مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد. لذا در شرایط کنونی منطقی‌ترین روش برای بررسی تغییرات رودخانه‌ها استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری (تصاویر ماهواره‌ای) می‌باشد(Wang et al ,2004:15).

رودخانه مرزی ارس در طی سال‌های اخیر درنتیجه تغییرات بستر و پیچان‌رودی شدن موجب گردیده که سطح اراضی اطراف رودخانه در ساحل ایران و جمهوری آذربایجان مورد هجوم فرسایش قرار گیرد. تعیین این تغییرات درگذشته و پیش‌بینی این تغییرات در آینده موجب می‌گردد که برای تثبیت سواحل رودخانه اقدامات لازم به عمل‌آورده شود. این اقدامات موجب می‌گردد تا در بخش‌هایی که رودخانه به سمت سواحل ایران هجوم آورده، خاک کشور حفظ شود و نیز درجاهایی که رودخانه به سمت آذربایجان حرکت کرده است، آب رودخانه از دسترس مردم حاشیه‌نشین آن خارج نگردد. درواقع می‌توان گفت یکی از اهداف اساسی این پژوهش استخراج میزان تغییرات جانبی رودخانه ارس طی ۳۰ سال اخیر بوده است چراکه این رودخانه مرزی بوده و جابجایی‌های جانبی آن در آینده می‌تواند، تنش‌هایی رابین دو کشور ایران و جمهوری آذربایجان ایجاد نماید.

یمانی و حسین زاده (۱۳۸۱) مورفولوژی رودخانه تالار را در مقطع زمانی ۳۹ ساله با روش‌های تغییرات زمانی و مکانی و روش میدانی مورداستفاده قرار داده‌اند. این محققین نتیجه گرفته‌اند که رودخانه هنوز تعادل دینامیکی خود را به دست نیاورده است و همچنان در حال تغییر و جابجایی و ایجاد پیچ‌وخم‌های جدید و توسعه در قسمت‌های علیا و تغییراتی خیلی کند و بطئی در قسمت سفلا خود می‌باشد. رضایی مقدم و خوش‌دل (۱۳۸۸) با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳۶۳ و ۱:۴۰۰۰۰ سال ۱۳۷۷وضعیت مورفولوژیکی و هندسی پیچان‌رودهای اهر چای در محدوده دشت ازومدل ورزقان را موردمطالعه قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که رودخانه در محدوده موردمطالعه به علت شیب بسیار کم حالت مئاندری پیداکرده و بیش‌ترین درصد مئاندر مربوط به مئاندرهای دارای سینوسیته بالا ۱/۵ می‌باشد. شریفی کیا و امیری (۱۳۹۲) الگوی تغییرات مکانی رودخانه هیرمند در نیم‌قرن گذشته (۱۳۹۰-۱۳۴۴) را از طریق تحلیل تصاویر سنجش‌ازدوری دو زمانه موردبررسی قراردادند یافته‌های پژوهش در خصوص عوامل ایجاد تغییر در الگوی فضایی و هندسی رودخانه، علاوه بر تأکید بر عوامل ثابت محیطی، مسئله خشکسالی های پی‌درپی و انسداد بستر توسط ماسه‌های انباشته‌شده (حاصل از عمل باد) را عامل محوری و مؤثر این تغییرات می‌داند. قاسم‌نژاد و همکاران(۱۳۹۲) در پژوهشی به بررسی اثرات احداث سد مخزنی گیلان غرب بر مورفولوژی رودخانه گیلان غرب پرداختند. روش پژوهش آن‌ها پایش تغییرات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی دوره‌های قبل و بعد احداث سد بوده است. نتایج

---

[1] - Morphology

[2] -Channel Configuration or Planform

[3] -Cross –Section Geometry

پژوهش آن‌ها نشان‌داد که شیب بستر رودخانه در بخش بالادست، پس از احداث سد کاهش‌یافته است. محاسبه ضریب پیچشی رود حاکی از افزایش سینوزیته مجرا در بالادست سد است. همچنین آن‌ها نشان‌دادند که احداث سد سطح اساس جدیدی در منطقه ایجادکرده که موجب گسترش فرسایش شیاری و خندقی در دامنه‌های مشرف به دریاچه سد شده است. روستایی و همکاران(۱۳۹۲) مورفولوژی مجرای رودخانه لیقوان را با استفاده از روش طبقه‌بندی راسگن موردبررسی قراردادند. آن‌ها نشان‌دادند که این روش طبقه‌بندی، توانایی تمرکز روی برخی از ویژگی‌های فیزیکی رودخانه لیقوان مانند نسبت گود افتادگی بستر، نسبت عرض به عمق و مواد بستر را دارد. به گفته آن‌ها درواقع این روش یک ارزیابی منطقی است که اطلاعات ریزتر و دقیق‌تری را برای بحث‌های مدیریتی و احیای رودخانه فراهم می‌کند. همچنین از بین محققین خارجی نیز می‌توان به مطالعاتی اشاره کرد : فایوز[1] و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای تأثیر سدها و تغییر کاربری اراضی را بر مورفولوژی رودخانه در حوضه آبریز رگوتیوای[2] اسپانیا موردبررسی قرار داده‌اند. نتیجه این مطالعه نشان داد که احداث سد در قسمتی از رودخانه به علت کاهش میزان دبی و تنظیم جریان دبی و کنترل سیلاب‌هایی که بیش‌ترین تأثیر در تغییر مورفولوژی رودخانه را دارند، باعث باریک شدن مجرای فعال در پایین‌دست رودخانه شده است. ماتیکومو[3] و همکاران (۲۰۰۸)، در مقاله‌ای به بررسی آشکارسازی تغییرات کناری رودخانه مکونگ[4] در دو بازه زمانی با استفاده از سنجش‌ازدور در منطقه وینتیانس – نوگوخای[5] پرداخته‌اند و بدین نتیجه رسیدند که میزان انباشت رسوبات برای کناره‌های رودخانه در دو دوره به ترتیب ۰/۴، ۰/۷ متر در سال بوده است.برتولدی[6] (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای نقش تغییرات مورفولوژیکی حادث‌شده به‌وسیله جریان‌های عادی و سیل را در رودخانه تاقلیمانتو[7] در ایتالیا موردبررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه تغییرات مورفولوژیکی حادث‌شده به‌وسیله ۶ سیل متفاوت موردبررسی قرارگرفته است و پس از بررسی توپوگرافیکی پروفیل مقطع عرضی بعد از وقوع هر سیل موردبررسی قرار گرفت که میزان تغییرات مورفولوژیکی را نشان داده‌ها پرداخته است. این مطالعه رابطه‌ی بسیار خوبی رابین اوج جریان پهنای فعال و میانگین تغییرات بستر نشان داده است.

موقعیت پهنه موردمطالعه

رودخانه ارس یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های مرزی ایران در حوضه آبریز دریای خزر می‌باشد. رودخانه ارس از کوه‌های هزار برکه (مین گل داغ) ترکیه واقع در جنوب ترکیه سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از طی مسیری در حدود ۴۵۰ کیلومتر در روستای تازه کند پارس‌آباد از مرز ایران جداشده وارد خاک جمهوری آذربایجان می‌شود و با رودخانه کورا در داخل این کشور تلاقی و سپس وارد دریای خزر می‌گردد. منطقه موردمطالعه بازه‌ای از این رودخانه به طول تقریبی ۷۰ کیلومتر می‌باشد که از پایین‌دست سد میل مغان شروع‌شده و تا خروجی رودخانه از ایران ادامه دارد (شکل ۱).

ازنظر تقسیمات سیاسی این رودخانه مرز استان اردبیل با کشور جمهوری آذربایجان محسوب می‌شود. همچنین ازنظر موقعیت جغرافیایی این محدوده در عرض‌های ″۵۹ ′۱۷ °۳۹ تا ″۴۱ ′۵۱ °۳۹ شمالی و ″۱۱ ′۲۹ °۴۷ تا ″۵۸ ′۵۳ °۴۷

---

[1] -Fayos

[2] -Rogativa

[3] -Matiti kummu

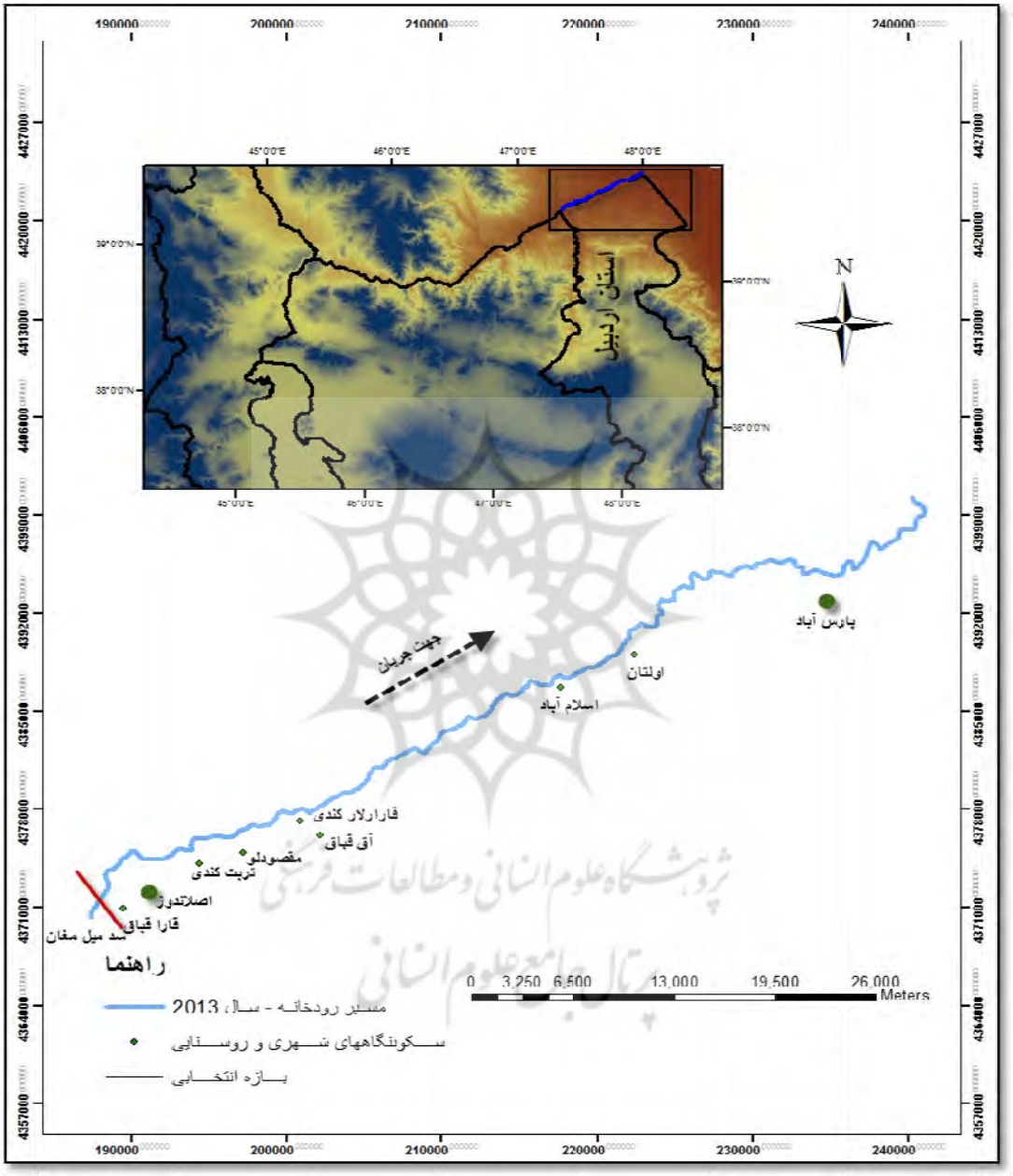
[4] -Mekong river

[5] -Vientianee nogokhai

[6] -Bertoldi

[7] -Tagliamento

شرقی قرارگرفته است.ازجمله مناطق مسکونی مهم در حاشیه رودخانه در این محدوده، شهرستان اصلاندوز و پارس‌آباد و همچنین روستاهای مقصودلو، آق قباد، اسلام‌آباد و اولتان می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت منطقه موردمطالعه

مواد و روش‌ها

تغییرات بستر رودخانه ارس در دو مقطع زمانی ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. جهت استخراج تغییرات بستر از تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. بدین‌صورت که ابتدا قدیمی‌ترین تصویر ماهواره‌ای موجود (تصاویر ماهواره‌ی Landsat 5 سنجنده TM) برای سال ۱۹۸۷ و جدیدترین تصویر ماهواره‌ای منطقه (تصاویر ماهواره‌ی

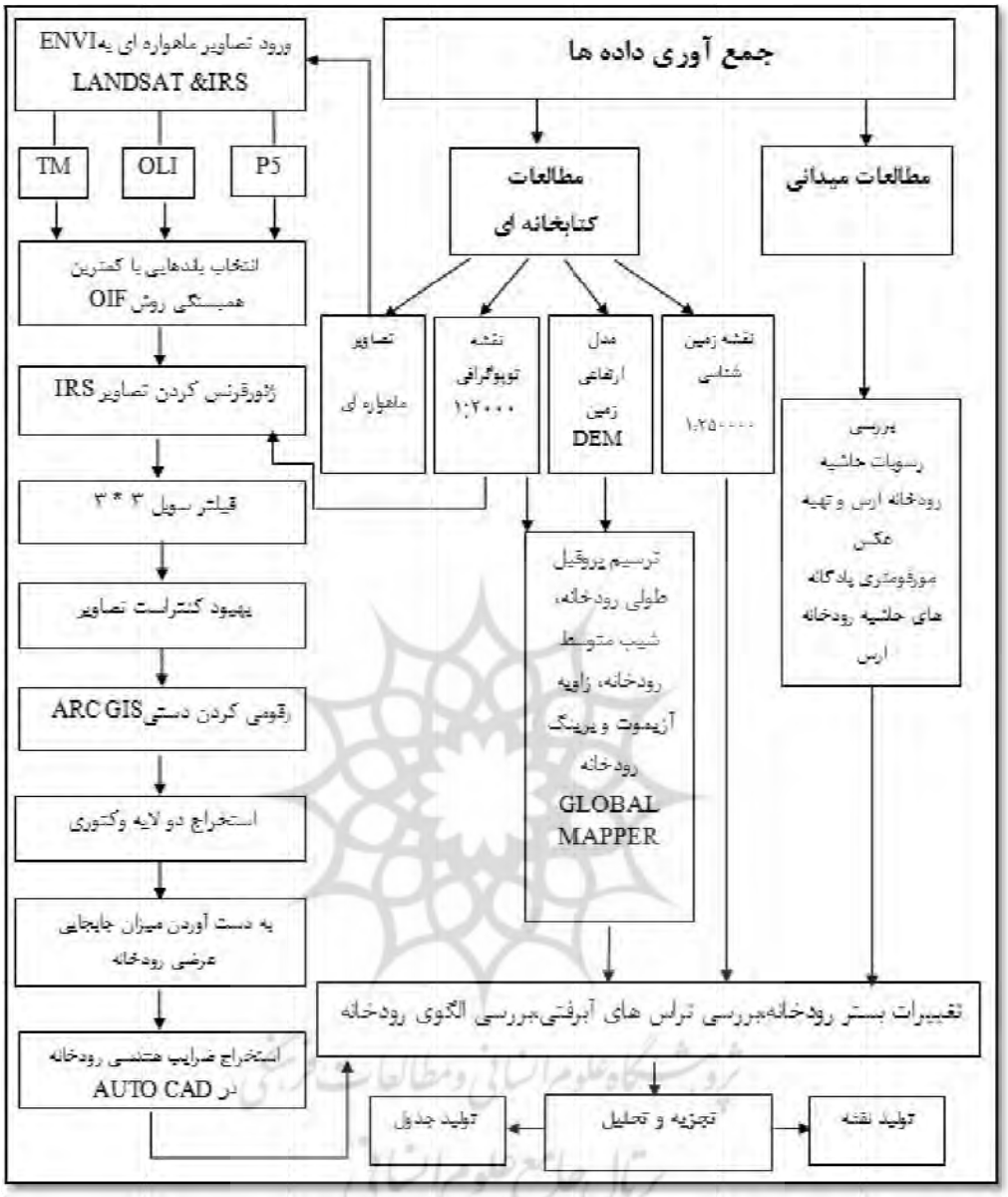
Landsat 8 سنجنده OLI) برای سال۲۰۱۳ باقدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا [1] دانلود گردید. همچنین تصاویر IRS منطقه نیز از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح تهیه گردید. با توجه به زمین مرجع[2] بودن تصاویر Landsat نیازی به عملیات زمین مرجع وجود نداشت. اما تصاویر ماهواره‌ای IRS با استفاده از نقاط و پدیده‌های ثابت (پل، تقاطع راه‌ها مناطق مسکونی و غیره) در نقشه توپوگرافی ۱:۲۰۰۰ منطقه، زمین مرجع گردید و دیتوم WGS 1984 و سیستم مختصات UTM زون ۳۹ برای آن تعریف شد.

در ادامه تصاویر Landsat وارد نرم‌افزار ENVI شد و سپس ضریب همبستگی بین کلیه باندهای تصویر محاسبه شد. سپس با استفاده از فاکتور OIF[3]، سه باند با کمترین وابستگی انتخاب شد و تصویر رنگی کاذب[4] منطقه تولید گردید و محدوده منطقه موردمطالعه از تصویر برش داده شد[5]. به‌منظور تشخیص هرچه بهتر رودخانه از فیلتر بالا گذر سوبل[6] استفاده شد. نحوه عمل کرد این سیستم این‌گونه است که با تقویت فرکانس‌های بالا در تصویر موجب شفافیت و وضوح بیشتر لبه‌ها در تصویر می‌شود. با توجه به این‌که رودخانه به‌عنوان یک عارضه فرکانس بالا در تصویر ظاهر می‌شود، بنابراین توسط فیلتر سوبل به‌عنوان لبه در نظر گرفته‌شده و با اعمال این فیلتر تشخیص رودخانه در تصاویر ماهواره‌ای راحت‌تر صورت می‌گیرد.

در مرحله بعد به‌منظور افزایش کنتراست تصویر از روش یکسان‌سازی هیستوگرام[7] در نرم‌افزار ENVI استفاده گردید. سپس این تصاویر وارد نرم‌افزار Arc GIS شد و مسیر رودخانه از روی تصویر ماهواره‌ای رقومی گردید و پلان رودخانه برای هر دو سال ترسیم شد. با همپوشانی پلان‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای میزان جابجایی بستر رودخانه طی ۲۶ سال مشخص گردد. در ادامه پس از ترسیم پلان رودخانه، شیب فایل‌های ایجادشده به فرمت dwg تبدیل‌شده تا به محیط Auto CAD منتقل گردد در ادامه این پلان‌ها وارد نرم‌افزار Auto CAD شد و مشخصات هندسی پلان رودخانه شامل شعاع دایره محاط بر پیچان‌رود، طول‌موج پیچان‌رود، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی قوس‌ها، طول دره و غیره برای هر دو مقطع زمانی در محیط این نرم‌افزار به‌صورت بسیار دقیق اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری شعاع دایره محاط بر پیچان‌رود، دوایری بر قوس‌های رودخانه برازش داده شد که بهترین تطبیق را با قوس‌های رودخانه داشته باشد. در ادامه بر اساس رابطه یک ضریب خمیدگی برای هر یک از قوس‌های رودخانه موردراندازه‌گیری قرارگرفته و محاسبه شد. زاویه مرکزی هر یک از قوس‌ها نیز بر اساس رابطه دو اندازه‌گیری شده و محاسبه گردید در ادامه تجزیه‌وتحلیل‌های آماری این ضرایب نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت گرفت و نتایج آن به‌صورت نمودارهای ستونی نشان داده شد.

پرتال جامع علوم انسانی

1 -Www.glovis.usgs.gov
2 -Geo reference
3 -Optimum index factor
4 -False color
5 -Spatial subset
6 -Sobel Filter
7 -Histogram Equalization



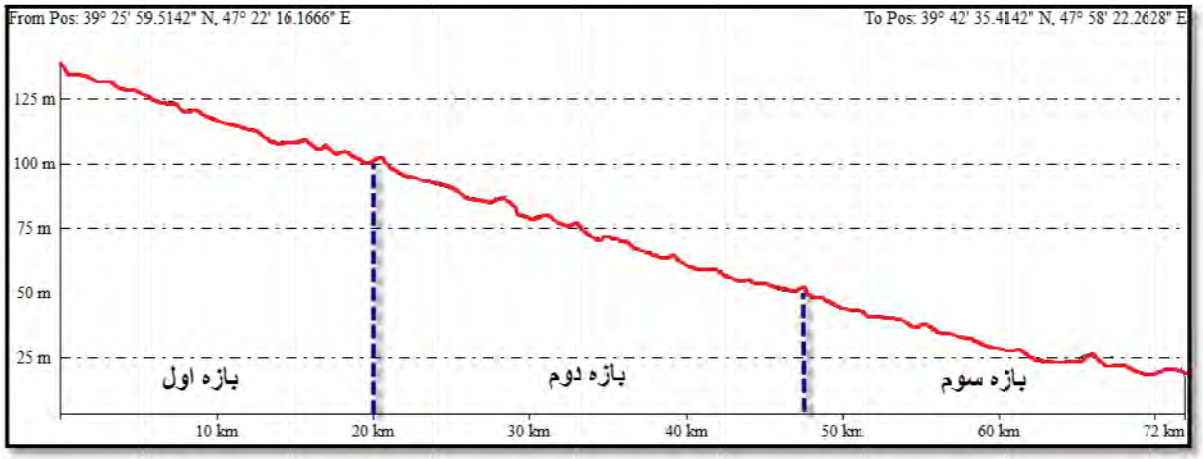
شکل ۲. روند نمای اجرای تحقیق

یافته‌های پژوهش

نیمرخ طولی رودخانه

گیلبرت در سال ۱۸۷۷ بر اساس آزمایش‌های تجربی نشان داد که نیمرخ طولی به‌طور معکوس با دبی متناسب است و تغییرات دبی و ابعاد بار بستری در توضیح شکل نیمرخ رودخانه خیلی مهم هستند. دیگر فاکتورها همانند مقاومت لیتولوژیکی، دریافت و عدم دریافت شاخه و حرکات تکتونیکی در تکامل نیمرخ و تفسیر شکل عمومی نیمرخ طولی مهم هستند. (نیری ،۱۳۸۹). بررسی نیمرخ طولی رودخانه ارس نشان می‌دهد رودخانه از ارتفاع تقریباً ۱۵۶ متر تا تقریباً ۱۴ متر در حال جریان می‌باشد و شیب رودخانه نیز به سمت پایین‌دست کاهش‌یافته است. همچنین این پروفیل نشان می‌دهد که نیمرخ طولی رودخانه ارس حالت مقعر داشته و این حالت مقعر[1] پروفیل نیز، نشان‌دهنده‌ی رودخانه‌هایی است که نیروهای بازدارنده‌ی آن به تعادل رسیده است (شکل ۳).

[1]- Concave

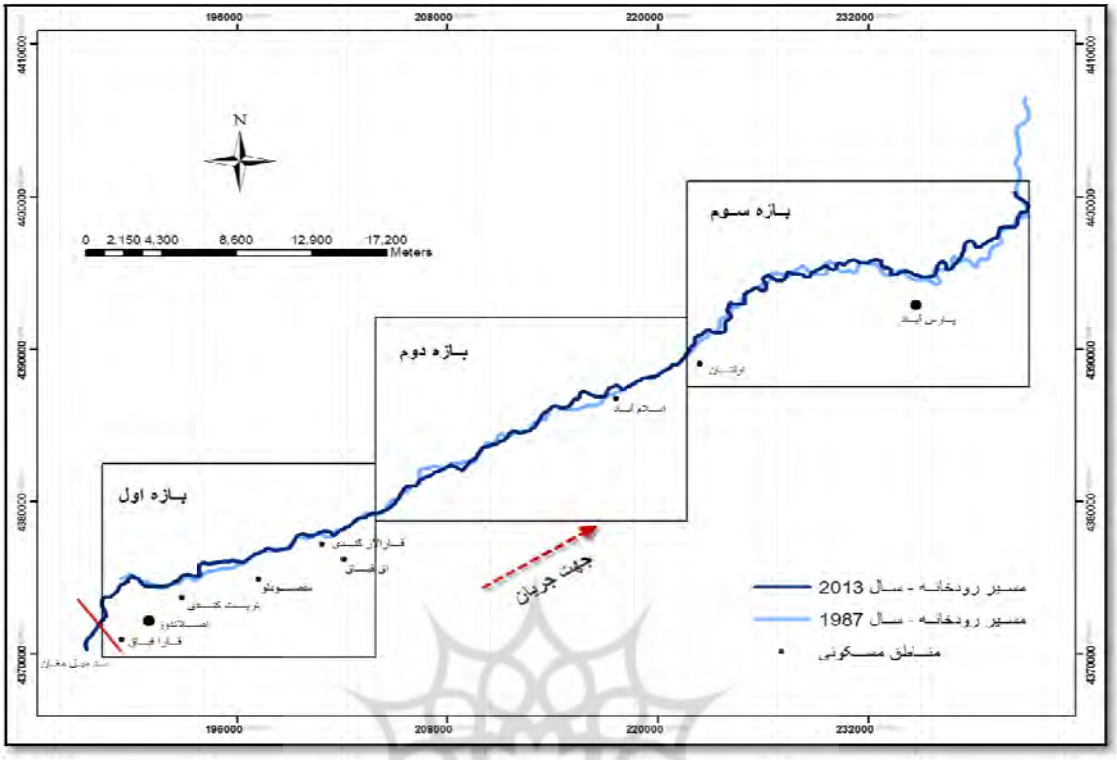


شکل ۳. پروفیل طولی رودخانه ارس از ابتدای سد میل مغان تا خروجی رودخانه از ایران

همچنین تغییرات پروفیل طولی رودخانه ارس تحت تأثیر اندازه قطر ذرات می‌باشد بدین‌صورت که بستر رودخانه ارس از ابتدای مسیر رودخانه تا انتهای مسیر از نوع رسوبات درشت‌دانه به رسوبات ریزدانه تغییر شکل داده‌اند. این کاهش اندازه قطر ذرات از ابتدا تا انتها از بررسی نمونه‌های برداشتی در طول مسیر قابل‌مشاهده می‌باشد.

جابجایی عرضی رودخانه ارس

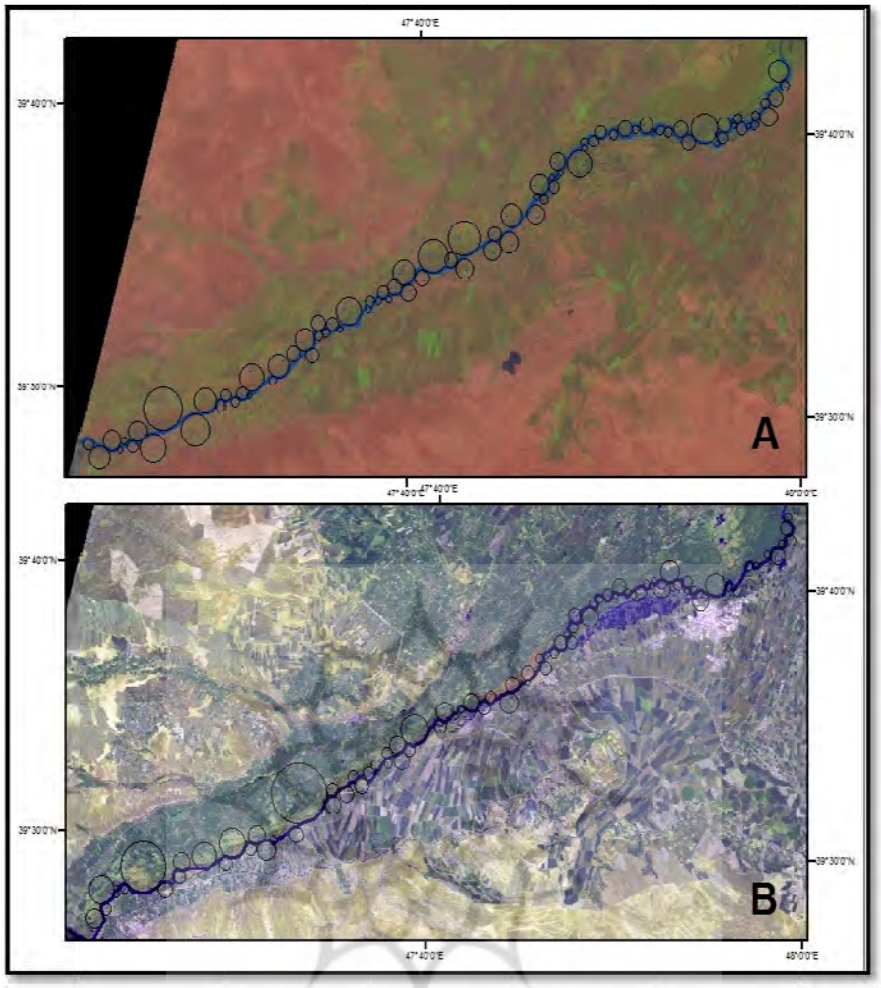
موضوع اصلی در مطالعه مورفولوژی رودخانه، بررسی ساختار و فرم آبراهه ازنظر شکل هندسی در پلان، شکل هندسی در مقطع عرضی و مشخصات نیمرخ طولی است. چون رودخانه‌ها مسیر طبیعی حرکت آب بر سطح زمین به شمار می‌رود، لذا مورفولوژی رودخانه در اثر تغییرات کمی و کیفی دبی جریان و سرعت، بده یا بار رسوبات، جنس مصالح تشکیل‌دهنده‌ی بستر و سواحل رودخانه به‌طور طبیعی در طول زمان و یا براثر فعالیت‌های بشری از قبیل عملیات ساختمانی یا مهندسی تغییر می‌کند.(نیری، ۱۳۸۹). جهت بررسی بهتر و دقیق‌تر مسیر ۷۰ کیلومتری ارس، این مسیر به بازه‌های سه‌گانه تقسیم گردید. علت انتخاب سه بازه، تنوع سه‌گانه‌ی میزان جابجایی عرضی رودخانه ارس طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ بوده است. بدین‌صورت که رودخانه ارس طی این ۲۶ سال در بازه اول (از سد میل مغان تا نزدیکی روستای آق قباق) جابجایی کم، در بازه دوم (از نزدیکی روستای آق قباق تا روستای اولتان) جابجای متوسط و در بازه سوم (از روستای اولتان تا خروجی رودخانه) جابجایی زیادی داشته است. حداکثر میزان جابجایی در بازه شماره سوم حدود ۱/۷۰ کیلومتر، در بازه دوم ۹۰۲ متر و در بازه اول ۵۸۳ متر می‌رسد. این میزان جابجایی در طی ۲۶ سال نشان‌دهنده تغییرات سریع این رودخانه و پویایی هرچه بیشتر آن می‌باشد (شکل ۴).



شکل۴. جابجایی عرضی بستر رودخانه ارس در طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳

شعاع قوس‌های پیچان‌رود

به‌منظور تعیین شعاع قوس‌های پیچان‌رودی بعدازاین‌که مسیر رودخانه ترسیم گردید، بر هر یک از قوس‌های رودخانه دوایری برازش داده می‌شود که بیش‌ترین و بهترین تطابق را با قوس داشته باشند. بعد از ترسیم دوایر، شعاع خمیدگی به دست می‌آید (یمانی، شرفی،۱۳۸۹). ترسیم این دوایر در محیط اتوکد انجام گرفت. کمترین شعاع دایره در هر دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ در بازه شماره سوم (از روستای اولتان تا خروجی رودخانه) قابل‌مشاهده می‌باشد. با توجه به این‌که هرچه شعاع دایره مماس بر خم رودخانه کوچک‌تر باشد، خم رودخانه پیچان‌رودی‌تر می‌شود، پایین بودن میانگین شعاع قوس‌ها در بازه سوم نسبت به بازه اول و دوم نشان‌دهنده توسعه‌یافتگی خم‌های این بازه می‌باشد. این میانگین برای سال ۱۹۸۷ عدد ۳۷۰ و برای سال ۲۰۱۳ عدد ۳۶۲ می‌باشد که نشانگر کاهش شعاع دوایر مماس بر خم‌ها از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ است. پس از بازه سوم، بازه دوم با متوسط شعاع ۵۴۹ برای سال ۱۹۸۷ و ۴۵۷ برای سال ۲۰۱۳ دارای خم‌های توسعه‌یافته‌تری می‌باشد. در آخر، بازه اول با میزان شعاع حداکثری ۵۷۹ برای سال ۱۹۸۷ و ۶۱۹ برای سال ۲۰۱۳ ، دارای خم‌هایی با میزان توسعه‌یافتگی پایین می‌باشد.



شکل ۵. برازش دوایر بر خم‌های رودخانه ارس A :۱۹۸۷ B : ۲۰۱۳

ضریب سینوسی لئوپلد[1]

ضریب خمیدگی یک رودخانه نسبت طول رودخانه (در امتداد مرکز کانال یا خط القعر) به طول دره است که رودخانه در آن جریان دارد. با استفاده از رابطه (۱) اندازه ضریب خمیدگی برای هر قوس به‌طور مجزا تعیین شد که در این رابطه L طول آبراهه و λ طول‌موج پیچان‌رود می‌باشد. معمولاً در یک رودخانه تعداد متنابهی خم با مشخصات گوناگون وجود دارد و این خم‌ها در طول زمان توسعه‌یافته و باعث افزایش ضریب خمیدگی رودخانه می‌شود. طبق تعریف ضریب پیچشی بزرگ‌تر از ۱/۴ تا ۱/۵ بیانگر پیچشی بودن رودخانه و کمتر از آن نشان‌دهنده مستقیم بودن رودخانه و بازه موردنظر است (تلوری، ۱۳۷۳).

$$P = \frac{L}{\lambda/2} \qquad (1)$$

[1]- Leopold

جدول۲: شکل الگوی رودخانه ارس برای سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳

بازه‌های انتخابی	بازه اول	بازه دوم	بازه سوم
سال ۱۹۸۷	سینوسی	سینوسی	پیچان‌رودی
سال ۲۰۱۳	سینوسی	سینوسی	پیچان‌رودی

با توجه به جدول ۲ ، رودخانه ارس در هر دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ در کلاس رودخانه‌های سینوسی و پیچان‌رودی قرار دارد. به‌طوری‌که در بازه‌های اول و دوم در هر دو سال ۱۹۸۷و ۲۰۱۳ رودخانه به شکل سینوسی و همچنین در بازه سوم برای هر دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ رودخانه به شکل پیچان‌رودی ظاهرشده است. در هر دو بازه اول و دوم میزان ضریب خمیدگی از ۱/۸ و ۱/۷ برای سال ۱۹۸۷ به ۱/۲۵ و ۱/۲۱برای سال ۲۰۱۳ افزایش‌یافته است. اما چنان چه گفته شد همچنان هر دو بازه در هر دو سال در کلاس سینوسی قرارگرفته‌اند. میزان ضریب خمیدگی در بازه شماره سوم برای در هر دو سال انتخابی تقریباً عددی نزدیک به هم است. به این صورت که این ضریب برای سال ۱۹۸۷ عدد ۱/۴۶ و برای سال ۲۰۱۳ عدد ۱/۴۲ می‌باشد. که این اعداد مشخص‌کننده الگوی پیچان‌رودی هستند. میزان تحول یک رودخانه با میزان سینوزیته آن رابطه مستقیم دارد و هرچه میزان سینوزیته یک بازه بالا باشد نشان‌دهنده میزان تحول بالاتری است. بر این اساس بازه سوم با میزان سینوزیته بالا نسبت به دو بازه اول و دوم از میزان تحول بالاتری برخوردار می‌باشد.

شکل ۶. تغییرات ضریب خمیدگی رودخانه ارس در سال‌های ۱۹۷۸و۲۰۱۳

با بررسی نوسانات ضریب پیچان‌رودی می‌توان گفت که تغییرات ضریب خمیدگی در یک دامنه محدود مشاهده می‌شود که این نشان‌دهنده وجود قوس‌های تقریباً مشابه در طول رودخانه است. در سال ۱۹۸۷ بالاترین نوسان تغییرات در بازه شماره سوم دیده می‌شود ولی در بازه‌های اول و دوم نوسان تغییرات بسیار پایین بوده است. در سال ۲۰۱۳ هم بالاترین نوسان تغییرات در بازه سوم مشاهده می‌گردد، بازه دوم همچنان دارای نوسان کم ولی بازه اول نسبت به سال ۱۹۸۷ نوسان متوسطی را نشان می‌دهد. علت حداکثری نوسانات و تغییرات ضریب خمیدگی در بازه شماره سوم برای هر دو سال ۱۹۸۷و ۲۰۱۳، کاهش شیب رودخانه در این بازه به کمتر از یک درصد، جریان رودخانه بر روی رسوبات آبرفتی، رسوب‌گذاری رودخانه در این بازه و فرسایش کناری رودخانه می‌باشد. با بررسی جدول۳ متوجه می‌شویم که الگوی رودخانه‌ای سینوسی رودخانه ارس از سال ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۳ از ۴۲ به ۳۹ کاهش‌یافته اما تعداد الگوی رودخانه‌ای

پیچان‌رودی از عدد ۳۲ به ۴۲ افزایش‌یافته است که این به معنای حرکت رودخانه به سمت الگوی رودخانه‌ای پیچان‌رودی و تکامل می‌باشد.

جدول۳ . تعداد الگوهای پیچان‌رودی رودخانه ارس برای سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳

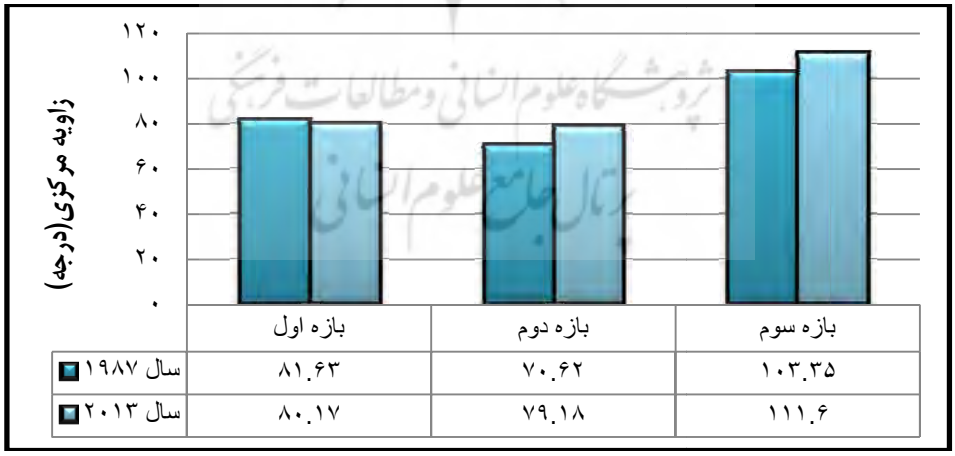
ضریب پیچشی	۱-۱/۰۵	۱/۵۲-۱/۰۶	۱/۲۵-۲	> ۲
نوع رودخانه	مستقیم	سینوسی	پیچان‌رودی	پیچان‌رودی شدید
سال ۱۹۸۷	۵	۴۲	۳۲	۶
سال ۲۰۱۳	۶	۳۹	۴۰	۳

زاویه مرکزی کورنایس[1]

زاویه مرکزی معیاری برای تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان‌رودی یک رودخانه می‌باشد. با در اختیار داشتن طول قوس و شعاع خمیدگی و با استفاده از رابطه زیر می‌توان زاویه مرکزی قوس را اندازه‌گیری کرد. (تلوری،۱۳۷۳)

$$A = \frac{180}{R\pi} \qquad (2)$$

در این رابطه A زاویه مرکزی،L طول قوس، R شعاع خمیدگی است.



شکل۷. تغییرات میزان زاویه مرکزی رودخانه ارس در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳

در بازه اول زاویه مرکزی برای سال ۱۹۸۷ به میزان ۸۳/۶۳ درجه و برای سال ۲۰۱۳ به میزان۸۰/۱۷ درجه می‌باشد. همچنین در بازه دوم این ضریب برای سال ۱۹۸۷به میزان ۷۰/۶۲ درجه و برای سال ۲۰۱۳ به میزان ۷۹/۱۸ درجه محاسبه‌شده است. درواقع این اعداد نشان می‌دهند، هر دو بازه اول و دوم برای هر دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ در رده مئاندر

[1] -Kornise

توسعه‌نیافته قرارگرفته‌اند. اما در بازه سوم این ضریب برای سال ۱۹۸۷ به میزان ۱۰۳/۳۵درجه و برای سال ۲۰۱۳ به میزان ۱۱۱/۶ درجه می‌رسد که باعث گردیده هر دو بازه در رده پیچان‌رود توسعه‌یافته قرار بگیرند.

جدول شماره ۴. میزان زاویه مرکزی رودخانه ارس برحسب درصد برای سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳

شکل رودخانه	زوایای مرکزی برحسب درجه	سال ۱۹۸۷	سال ۲۰۱۳
شبه مئاندری	۱-۴۱	۵/۳ ٪	۳/۴ ٪
مئاندر توسعه‌نیافته	۴۱-۸۵	/۳ ٪۴۵	/۵ ٪۳۷
مئاندر توسعه‌یافته	۸۵-۱۵۸	٪۴۶	/۵ ٪۵۴
مئاندر خیلی توسعه‌یافته	۱۵۸-۲۹۶	۴/۸ ٪	۴/۵ ٪
نعل اسبی	> ۲۹۶	–	–
میانگین درجه		/۸۵ ٪۲	/۹۰ ٪۳
شکل رودخانه		مئاندری توسعه‌یافته	

بررسی میانگین زاویه مرکزی پیچان‌رود نشان می‌دهد که میزان توسعه‌یافتگی پیچان‌رود از سال ۱۹۸۷ نسبت به سال ۲۰۱۳ افزایش پیداکرده است. همچنین مطالعه زاویه مرکزی نشان می‌دهد که در سال ۱۹۸۷ در بازه اول تعداد پیچان‌رود با رده پیچان‌رودی توسعه‌یافته از عدد ۷ به ۱۰ و در بازه دوم از عدد ۷ به ۱۱ و در آخر در بازه سوم از عدد ۲۰ به عدد ۲۷ افزایش پیداکرده است. درواقع این افزایش تعداد پیچان‌رودی در رده پیچان‌رودی توسعه‌یافته نشان می‌دهد که در طول ۲۶ سال رودخانه به سمت پیچان‌رودی شدن تغییر شکل داده است. که در این میان بیش‌ترین افزایش مربوط به بازه سوم بوده است.

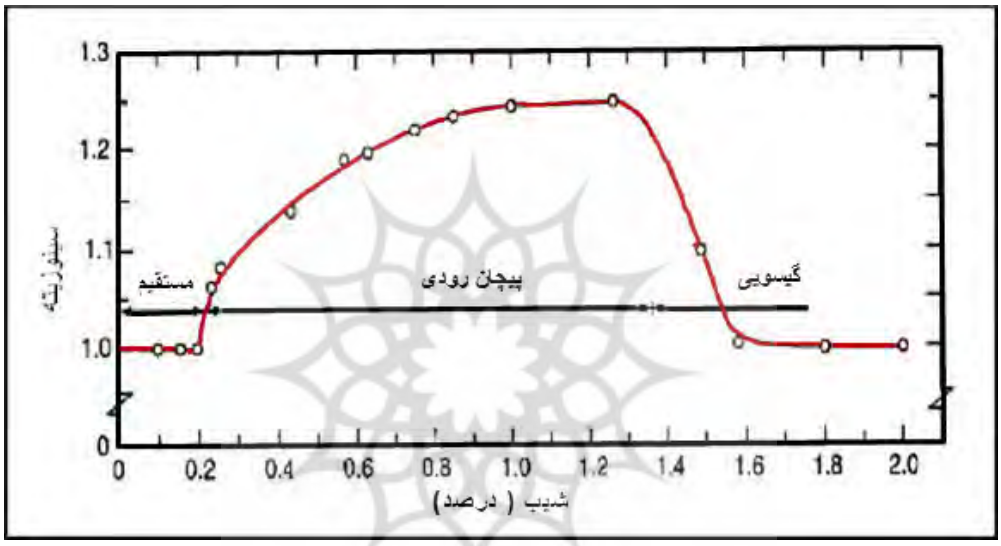
همچنین با نگاه به جدول شماره ۴ متوجه می‌شویم که در کل مسیر رودخانه در سال ۱۹۸۷ تعداد پیچان‌رودهایی با رده توسعه‌نیافته از ۴۵/۳ درصد به ۳۷/۵ درصد در سال ۲۰۱۳ کاهش‌یافته اما تعداد پیچان‌رودهایی با رده توسعه‌یافته از سال ۱۹۸۷ از ۴۶ درصد به ۵۴/۵ افزایش پیدا گرده است. در کل مسیر رودخانه در هیچ‌کدام از بازه‌های مشخص‌شده چه در سال ۱۹۸۷ و چه در سال ۲۰۱۳ پیچان‌رودی با رده نعل اسبی وجود نداشته است.

مهم‌ترین عوامل مؤثر در تغییرات عرضی رودخانه ارس

جهت مطالعه عوامل مؤثر در تغییرات عرضی رودخانه ارس چندین عامل تأثیرگذار به‌تفصیل موردبررسی قرار گرفت. معمولاً میزان شیب با مقدار تخلیه آب رابطه عکس و با اندازه رسوب و مقدار آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین در پایین‌دست رودخانه ارس به همان صورت که دبی افزوده می‌شود متوسط اندازه بار بستر کاهش‌یافته و به دنبال آن شیب

نیز کاهش می‌یابد. در بالادست رودخانه ارس به دلیل درشت‌دانه بودن رسوبات، شیب دره و شیب رودخانه تقریباً یکی بوده به همین دلیل رودخانه دارای الگوی سینوسی شده که با طول‌موج‌های خیلی بزرگ همراه است. هر چه به‌طرف پایین‌دست رودخانه پیش برویم، رسوبات ریزتر شده، شیب رودخانه کمتر از شیب دره می‌شود و الگوی رودخانه حالت پیچان‌رودی با طول‌موج‌های کوچک به خود می‌گیرد.

تغییرات سینوسی رودخانه‌های تک مجرایی با دبی معین در ابتدا همراه با افزایش شیب دره تا مقدار محدودی افزایش می‌یابد و سپس به‌طور ناگهانی در نزدیکی مراحل تبدیل به حالت گیسویی، کاهش پیدا می‌کند (Schomm et al,1972). بنابراین تغییرات بازه‌ها با استفاده از شیب مسیر رودخانه ارس طبق شکل ۸ نشان می‌دهد که تغییرات بازه‌ها از این نمودار تبعیت می‌کند و هر سه این بازه‌ها در بخش دوم نمودار (مئاندری) قرار دارند.



شکل۸. رابطه بین شیب و میزان سینوسی رودخانه‌ها با دبی ثابت (شوم،۱۹۷۲)

مسیر رودخانه ارس بر روی رسوبات آبرفتی عهد حاضر Qa^1 و آبرفت‌های پادگانه‌ای جدید Qt^2 قرارگرفته است(آقانباتی، ۱۳۸۵). جنس این رسوبات کواترنری (عموماً سیلت، رس و ماسه) ازلحاظ سختی به گونه است که نتوانسته‌اند در برابر عوامل فرسایشی مقاومت نشان دهند (شکل ۹و ۱۰). بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از مطالعات میدانی ، بافت رسوبات بستر رودخانه ارس نیز از بالادست به‌طرف پایین‌دست رودخانه، ریزدانه‌تر شده است. به‌گونه‌ای که در بالادست رودخانه (بازه اول) بستر رودخانه بیشتر قلوه‌سنگی، شن و ماسه‌ای بوده ولی به‌طرف پایین‌دست(بازه سوم) بافت بستر سیلتی، رسی و گل‌ولای دار می‌شود. مطالعه ساختارهای تکتونیکی منطقه نیز نشان می‌دهد که محدوده موردمطالعه ازلحاظ پویایی و تحرکات تکتونیکی زمین چندان فعال نیست. اگرچه این عامل به دلیل تبعیت از دوران‌های طولانی زمین‌شناسی، تأثیر خود را در درازمدت نشان می‌دهد اما انطباق خاصی بین الگوی ساختاری رودخانه و روند عمومی تکتونیک منطقه در کوتاه‌مدت مشاهده نشده است.

شکل۹. وجود رسوبات سیلتی و رسی ریزدانه مستعد به فرسایش(بازه دوم، چهار کیلومتری روستای اسلام‌آباد)

شکل ۱۰. تراس‌های آبرفتی قدیمی‌رودخانه ارس در ساحل ایران(ابتدای بازه دوم)

پوشش گیاهی نیز یکی از عوامل مهم در بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه می‌باشد. بدین‌صورت که مقاومت دیواره‌های رودخانه‌ها درنتیجه حضور پوشش گیاهی دست‌خوش تغییر می‌شود. در کل مسیر رودخانه ارس ازنظر پوشش گیاهی، پوشش یکسانی وجود ندارد. با توجه به مشاهدات به‌عمل‌آمده از منطقه به‌ویژه در بازه سوم، سواحل رودخانه ارس به‌صورت گسترده به زیر کشت رفته است. به دلیل استقرار شهرستان پارس‌آباد در بازه سوم این بازه بیش از سایر بازه‌ها متأثر از عوامل انسانی بوده است. قطع‌شدگی[1] از مهم‌ترین خصوصیات رودخانه‌های مئاندری می‌باشد. این قسمت‌های رودخانه ارس به علت پر شدن به‌وسیله مواد سیلابی توسط کشاورزان منطقه اشغال‌شده است. بیشتر زمین‌های قطع‌شده در این بازه به زیر کشت برنج رفته است. بالادست رودخانه ارس در قسمت ابتدایی بازه دوم نگارنده شاهد کارگاه‌های برداشت شن و ماسه بوده است. برداشت شن و ماسه در درازمدت به کاهش شیب و بار بستر در پایین‌دست محل می‌انجامد. درواقع در مواقعی که حجم شن و ماسه برداشتی از یک منطقه رودخانه زیاد باشد باعث ایجاد تند آب‌هایی با ارتفاع چند متر در مسیر جریان می‌شود. در این حالت رژیم هیدرولیکی رودخانه به‌شدت تحت تأثیر قرارگرفته و آب در محل شستگی بستر به‌صورت ریزشی جریان خواهد یافت که فرسایش بستر را به دنبال خواهد داشت.

[1] -Cut off

شکل ۱۱. کارگاه برداشت شن و ماسه از ساحل رودخانه ارس (بازه دوم)

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه و بررسی میزان پارامترهای هندسی برای دو بازه زمانی ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ نشان داد که طی ۲۶ سال اخیر در بازه‌ی مطالعاتی تعداد خم‌های رودخانه ارس با الگوی مئاندری توسعه‌نیافته کاهش‌یافته و در عوض خم‌های رودخانه ارس با الگوی مئاندری توسعه‌یافته رو به افزایش بوده است. درواقع این موضوع نشان‌دهنده درحال‌توسعه بودن خم‌های این رودخانه می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی ضریب سینوزیته لئوپلد نشان داد که الگوی رودخانه ارس هم در سال ۱۹۸۷ و هم در سال ۲۰۱۳ از نوع الگوی رودخانه‌ای سینوسی بوده اما بازه سوم دارای الگوی رودخانه‌ای پیچان‌رودی می‌باشد. همچنین باید اشاره کرد که از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ تعداد الگوی رودخانه‌ای سینوسی و پیچان‌رودی در هر سه بازه اول، دوم و سوم رو به افزایش بوده است.

بررسی میزان جابجایی رودخانه ارس نیز تغییرات زیادی را در طول ۲۶ سال اخیر آشکار ساخت، به‌گونه‌ای که حتی در بخش‌هایی از بازه سوم میزان جابجایی عرضی رودخانه ارس به ۱/۷ کیلومتر هم رسیده بود. در رابطه با جابجایی عرضی رودخانه ارس باید اشاره کرد که از بالادست رودخانه به سمت پایین‌دست، میزان جابجایی رودخانه رو به افزایش بوده است. نتایج حاصل از نمونه‌برداری‌های انجام‌شده از مسیر رودخانه ارس نیز نشان داد که بافت رسوبات رودخانه از بالادست به‌طرف پایین‌دست ریزدانه‌تر شده و بیش‌ترین تفاوت در نمونه رسوب‌های برداشتی از سه بازه در طبقه مربوط به ماسه بسیار درشت و ماسه درشت بوده است. در راستای بررسی عوامل مؤثر در تغییرات بستر رودخانه ارس، پارامترهای اثرگذار موردبررسی و مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصله نشان داد که در بین این عوامل، شیب و جنس رسوبات ، مهم‌ترین عامل جابجایی عرضی رودخانه ارس طی ۲۶ سال اخیر بوده است. در رابطه با عامل شیب باید افزود که میزان شیب رودخانه ارس در بازه سوم به زیر یک درصد نزول کرده و باعث رسوب‌گذاری رودخانه و به‌تبع آن افزایش جابجایی رودخانه ارس و مئاندری شدن خم‌های آن شده است.

همچنین با توجه به عبور رودخانه از روی آبرفت‌های جوان کواترنری که نسبت به فرسایش مستعد می‌باشند، تغییر مسیر رودخانه ارس با سرعت بسیار بالایی در طی این ۲۶ سال اتفاق افتاده است. سایر عوامل نیز، مانند عوامل انسانی و غیره در بروز این تغییرات دارای نقش بوده‌اند اما میزان اثرگذاری آن‌ها به‌اندازه عوامل ذکرشده نبوده و در مرتبه بعدی جای گرفته‌اند.

منابع

- آقا نباتی، سید علی، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- تلوری، عبدالرسول، ۱۳۷۳، رودخانه‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها، انتشارات تحقیقات جهاد کشاورزی.
- راهنمای شکل هندسی مقطع و راستای رودخانه، وزارت نیرو، نشریه شماره ۳۶۶-الف، مهرماه ۱۳۸۹
- رضایی مقدم، محمدحسین، خوشدل، کاظم ،۱۳۸۸، بررسی پیچ‌وخم‌های مئاندری اهر چای در محدوده دشت ازرو مدل ورزقان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی ، شماره ۳۳.
- روستایی، شهرام، خورشید دوست، علی‌محمد، سمیه، خالقی، ۱۳۹۲، ارزیابی مورفولوژی مجرای رودخانه لیقوان با روش طبقه‌بندی راسگن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی،شماره ۴، صص ۱۶-۱.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح ،۱۳۹۱، تصاویر ماهواره *IRS* باقدرت تفکیک مکانی ۲/۵ متر .
- سازمان زمین‌شناسی آمریکا، تصاویر ماهواره *Landsat* ۱۹۸۷ و ۲۰۱۳ ، *www.usgs.gov*
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۳، نقشه زمین‌شناسی مغان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰
- شریفی کیا، محمد ، نعمت مال، امیری، ۱۳۹۲، آشکارسازی تغییرات الگوی مکانی رودخانه هیرمند و تحلیل مورفولوژیکی آن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، شماره ۴، صص ۱۶۰-۱۴۹.
- قاسم نژاد، مریم، شایان، سیاوش، یمانی، مجتبی،۱۳۹۲، اثرات احداث سد مخزنی گیلان غرب بر مورفولوژی بستر رودخانه گیلان غرب(محدوده بالادست و مخزن سد)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، شماره ۱، صص ۱۳۲-۱۱۳.
- نیری، هادی ،۱۳۸۹، تحلیل دینامیک و شکل مجرا در حوضه آبریز رودخانه مهاباد، پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- یمانی، مجتبی، حسین زاده، محمدمهدی، نوحه‌گر، احمد ، ۱۳۸۵، هیدرودینامیک رودخانه‌های تالار و بابل و نقش آن در ناپایداری و تغییرات مشخصات هندسی آن‌ها، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۵.
- یمانی، مجتبی، شرفی، سیامک، مقامی، یاسر، ۱۳۸۹، ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان، مجله جغرافیا و برنانه ریزی محیطی، سال ۲۳ ، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱.
- *Bertoldi, W.L. Zanoni, M.Tubino ,2012, Assessment of morphological changes induced by flow and flood pulses in a gravel bed braided river : the Tagaliamento river Italy Gemorphology 114 p 348-260.*
- *Fayos, boix, G.G. Barbera, f. Lopez – bermudez , V.M . Castillo ,2007, Effects of check dams reforestation and land – use changes: Case stady of the rogativa catchments (Murica. Spain) geomorphology 91p03-123.*
- *Leopold, L.B. and Wolman, M.G. , 1987, River Channel Pattern: Braieded , meandering and straight. US ,Geo Survey. No , 282.*
- *Matti Kummu, X.X.Lu, Akchousand, Rasphone, Juha Sarkkula ,Jormakoponen, , 2008, River bank change Along The Mekong River : Remote Sensing Detection in The Vientiance Nong Khai Area, Quaternary International , 186 , 100, 112.*
- *Schomm, S.A. and khan H.R. ,1972, experimental study channel patterns, bulletin of the geological society of America, 83 ,1755 -1770.*
- *Sear et al ,2003, Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology, R&D Technical Report FD1914. Defra, London.*
- *Wang, J. P. M., Rich, K. P., Price and W. D. Kttle ,2004, Relations Bettween NDVI and Tree Productivity in The Central Great Plains. International Journal of Remot Sensing. Vol 25, Issue 16, pp. 3127-3138.*