



واکنش سیستم‌های رودخانه‌ای به وقایع سیلابی بزرگ

نمونه موردی: رودخانه مادرسو

مهناز جهادی طرقي^۱، سیدرضا حسین‌زاده^۲

چکیده

سیلاب سال ۱۳۸۰ حوضه رودخانه مادرسو در جنوب شرق دریای خزر یکی از شدیدترین و مهم‌ترین سیلابهای مؤثر بر چشم‌انداز طبیعی داخل کشور در دهه اخیر بوده است. در مقاله حاضر از روش‌های تحقیق توصیفی-تحلیلی، تاریخی و علی استفاده شده، ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق، عکس‌های هوایی قبل از سیلاب، تصاویر ماهواره‌ای IRS و Quick Bird بعد از سیلاب، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی محدوده، اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده از میدان بوسیله GPS و تصویرهای برداشته شده، و معادلات هیدرولیکی بوده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در اثنای این سیلاب، میزان توان و سرعت جریان در تمام آبراهه‌های فرعی و سراسر کانال اصلی بیش از میزان توان بحرانی و سرعت لازم برای غلبه بر تنش برشی بستر بوده و به همین دلیل قادر بوده حجم زیادی از رسوبات درشت دانه را با خود حمل و موجب شکل‌زایی وسیعی از جمله تعریض و تعمیق قابل توجه کانال اصلی، تغییر مقاطع عرضی کانال‌های فرعی، تغییر در الگوی کانال‌ها و خلق چشم‌اندازهای تراکمی جدید مانند مخروط‌های افکنه گردد. تغییرات ناشی از سیلاب مرداد ماه سال ۱۳۸۰ نیز باعث عملکرد شدیدتر سیلابهای بعدی یعنی سیلابهای مرداد ماه سالهای ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴ حوضه (علیرغم دبی کمتر آنها) و برجا گذاشتن آثار ژئومورفیک شدیدتر شده است.

کلمات کلیدی:

سیلابهای بزرگ، اثرات ژئومورفیکی، واکنش سیستم‌های رودخانه‌ای، ناپایداری ژئومورفیکی، رودخانه مادرسو

۱. استادیار ژئومورفولوژی دانشگاه پیام‌نور مرکز فریمان: m.jahadi@pnu.ac.ir ..

۲. دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه فردوسی مشهد: Srhosszadeh@um.ac.ir ..



The Response of Fluvial Systems to Large Flood Events

Jahadi Toroghi M¹, Hosseinzadeh S R²

Abstract

In the Summer of 2001, an intense thunderstorm in the southeastern Caspian Sea triggered a catastrophic flood in the Madarsoo Basin. Methods that included high-resolution aerial photographs, interpretation of satellite images, multi-date mapping, hydraulic calculations and field observations enabled documentation of the geomorphic impact of this flood on the Madarsoo River and its tributaries. Geomorphologic effects of this catastrophic flooding included the uprooting of trees up to 2 m in diameter from the main river channels; locally as much as 80% of the tree crown cover was removed from the riparian zones. Uprooting of the trees exposed the underlying flood plain to macro turbulent scour, leading to extensive removal of flood plain sediments that had accumulated over centuries. Other hydro-geomorphic impacts of this flood have been drainage network modifications, the creation of new alluvial fans, and a new meandering pattern and gully development, all of which have been documented. Subsequent to the mentioned flood, two other extreme floods have also affected this basin in August of 2002 and 2005. In addition to causing further landform modifications, these floods wiped out the infrastructure which had been reconstructed after 2001. All three floods were of the same conditions based on their time, climatic and triggering characteristics. The peak flood was estimated to be 700m³/s in August 2002 and 1060 m³/s in August 2005. The occurrences of the two above mentioned catastrophic floods and related processes were the result of triggering variables and the formation new dynamic environments by the main event (August 2001 flood), which prolonged the required time for recovery of the stream channels. Geomorphic instabilities lead to consecutive crises in this new environment. This condition accelerated geomorphic hazards in combination with the effects of the recent climate.

Keywords:

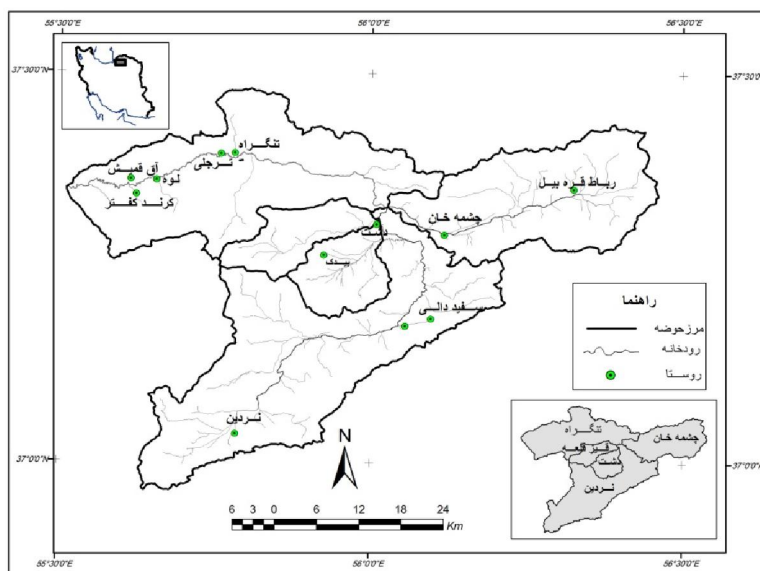
Large flood events, Geomorphic impacts, Fluvial system responses, Geomorphic instability, Madarsoo River

مقدمه

با شروع دهه ۱۹۷۰ علاقه فزاینده‌ای به بررسی اثرات ژئومورفیکی سیلابهای نادر و بزرگ بوجود آمد زیرا محققین به این نتیجه دست یافته بودند که تأثیرگذاری ژئومورفیکی سیلابهای بزرگ که حجم عظیمی از رسوبات درشت دانه را حمل می‌نمایند بسیار شدیدتر از سیلابهای کوچک‌تر ولی دارای فراوانی بیشتر است (ولمن و جرسون، ۱۹۷۸). نقش سیلابهای بزرگ و نادر در سپتامبر ۱۹۸۷ و در هیجدهمین کنفرانس سالانه ژئومورفولوژی در انگلستان با عنوان سیلابهای کاتاستروفیک برجسته‌تر شد و مقالات مربوط به اینگونه سیلابها به سرعت مورد توجه قرار گرفته و باعث پیشرفت شاخه‌ای از ژئومورفولوژی تاریخی تحت عنوان هیدرولوژی سیلابهای قدیمی گردید که البته شروع آن به سال ۱۹۲۰ در ایالات متحده آمریکا برمی‌گردد. برتز^۱ (۱۹۲۳) اولین شخصی بود که بطور گسترده اثرات ژئومورفیکی سیلابهای بزرگ و قدیمی را در فلات معروف کلمبیا در ایالات متحده آمریکا مطالعه کرد و در مقاله معروف خود^۲ کانال‌های بزرگ فلات (اسکابلند) را به یک جریان سیلابی عظیم در اثر شکستن سد یخچالی آخرین دوره یخچالی پلیستوسن نسبت داد (برتز، ۱۹۲۳، ص ۶۲۰). در سال ۱۹۴۹، پیتر پاتون^۳ مقاله‌ای تحت عنوان «کاربرد شواهد باستان‌شناسی و ژئومورفیکی در تعیین وقایع پالئوهیدرولوژیکی در غرب تکزاس» منتشر ساخت و در سال ۱۹۸۲ بیکر^۴ اصطلاح پالئوفلاد هیدرولوژی را برای کشف شدت و دوره برگشت سیلابهای بزرگ قدیمی و کاربرد آن پیشنهاد نمود (بیکر، ۲۰۰۸، ص ۵).

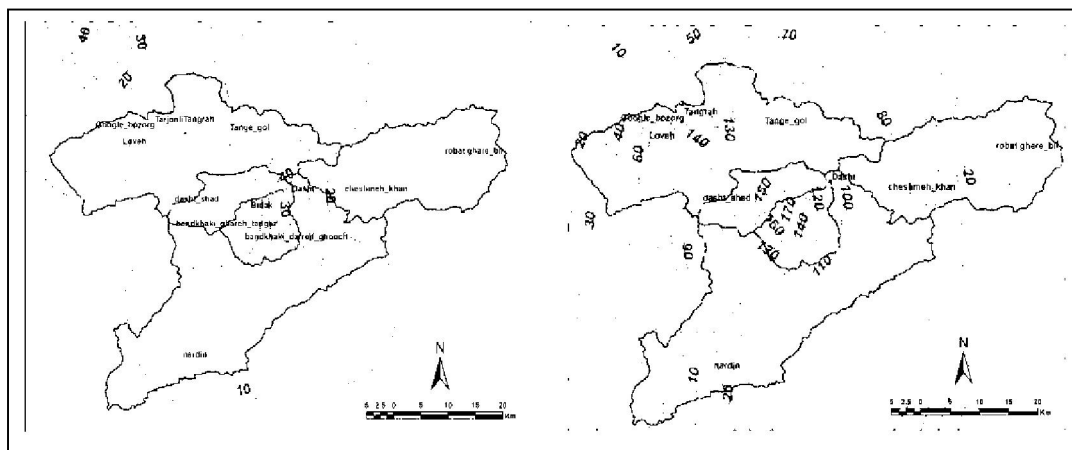
در این مقاله به بررسی اثرات ژئومورفیک سیلاب بزرگ مرداد ماه ۱۳۸۰ و واکنش سیستم رودخانه‌ای به وقایع سیلابی بعد از آن (سیلابهای شدید مردادماه سالهای ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴) و تغییرات ژئومورفیکی حاصل از آنها در حوضه آبریز رودخانه مادرسو واقع در جنوب شرق دریای خزر می‌پردازیم. نگارندگان سیلاب مرداد ماه ۱۳۸۰ را براساس شواهد تاریخی، رسوب‌شناختی و اکولوژیکی جزو سیلابهای بزرگ و نادر و بر اساس اثرات عمده بر چشم‌انداز در زمره سیلابهای کاتاستروفیک قرار داده (حسین‌زاده و همکار، ۱۳۸۵) و دو علت اصلی وقوع آن را بارش شدید و ناگهانی و شرایط مورفولوژیکی، رسوب‌شناختی و اکولوژیکی حوضه عنوان نمودند.

1. J H., Bretz
2. The channeled scablands of the Columbia plateau
3. Peter C. Patton
4. Victor R. Baker



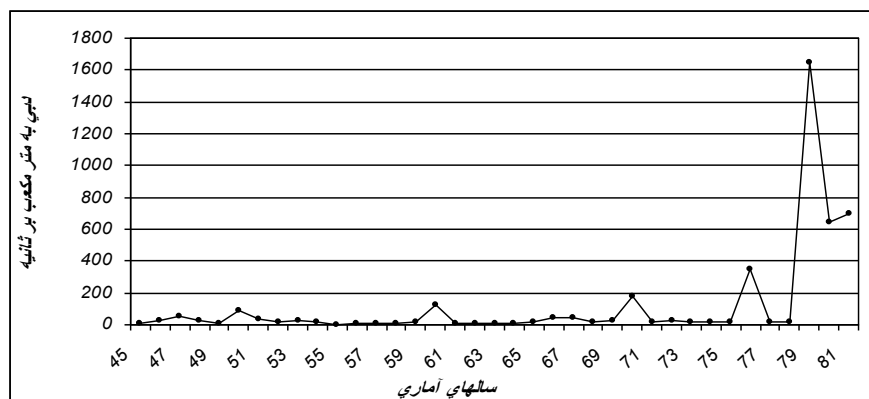
شکل شماره ۱- حوضه آبریز رودخانه مادر سو و زیرحوضه‌های اصلی تر

میزان بارندگی روز قبل از سیلاب (۱۹ مرداد ۱۳۸۰) در نواحی مختلف حوضه ۱۰ تا ۵۰ میلی متر ثبت گردیده ولی روز واقعه (۲۰ مردادماه) میزان بارش در قسمت اعظم حوضه بیش از ۱۰۰ میلی متر (در ۲۴ ساعت) گزارش شده که حداکثر آن در مرکز طوفان حدود ۱۸۰ میلی متر رسیده است (شکل شماره ۲).



شکل شماره ۲- وضعیت بارش در روزهای ۱۹ و ۲۰ مرداد ۱۳۸۰ (جایکا، ۲۰۰۵، ص ۶۳-۲)

بارش شدید و تمرکز سریع رواناب، سیلابی را ایجاد کرد که ارتفاع آب را در برخی مقاطع طولی رودخانه به بیش از ۱۰ متر و دبی آن را به بیش از ۲۰۰۰ مترمکعب در ثانیه رساند (محاسبات دبی نگارندگان بر مبنای خطوط داغاب). لازم به ذکر است که مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای اعلام شده توسط وزارت نیرو (شکل شماره ۳) برای سیلاب‌های مرداد ماه سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ به ترتیب ۱۶۵۰ و ۶۴۴ مترمکعب بر ثانیه بوده که البته با توجه به محاسبات میدانی دبی در مقاطع عرضی بستر رود، مقادیر واقعی خیلی بیشتر از آن بوده است.



شکل شماره ۳- نمودار مقادیر حداکثرهای دبی لحظه‌ای حوضه مادرسو در ایستگاه هیدرومتری تنگراه (بر اساس مقادیر اعلام شده توسط وزارت نیرو)

این مقاله دو هدف کلی را دنبال می‌کند:

- ۱- مستندسازی اثرات سیلاب بزرگ سال ۱۳۸۰ در منطقه به‌عنوان یک واقعه نادر
- ۲- نقش‌آینگونه وقایع در ایجاد محیط‌های ژئومورفیکی جدید و واکنش‌های رودخانه‌ای به آن

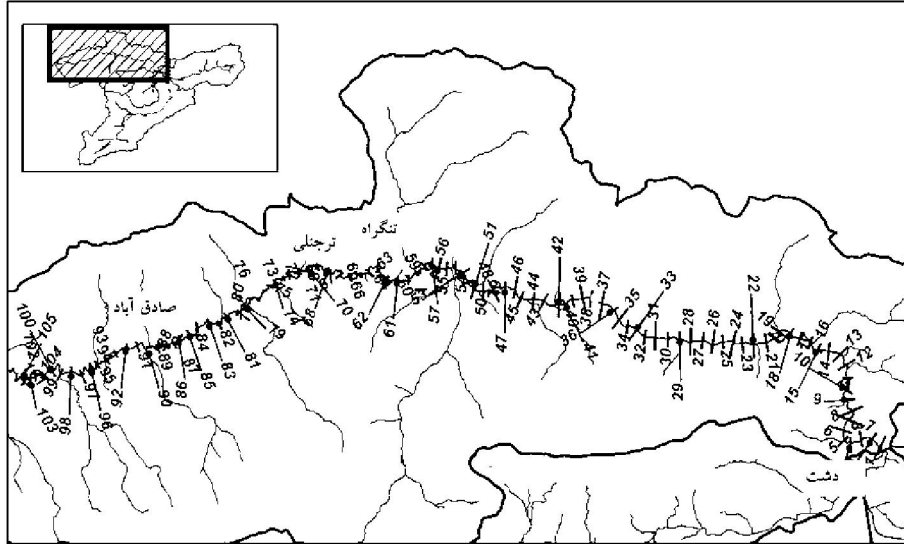
مواد و روش‌ها

در این مقاله از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نتایج حاصل از عملیات میدانی و معادلات هیدرولیکی به عنوان مواد تحقیق به شرح زیر استفاده شده است:

- تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای:

در جهت مستند ساختن اثرات ژئومورفیک سیلاب اصلی (مرداد سال ۱۳۸۰) و واکنش سیستم رودخانه‌ای از عکس هوایی ۵۵۰۰۰ : ۱ سال ۱۳۳۵، عکس‌های هوایی ۲۰/۰۰۰ : ۱ مربوط به سال ۱۳۴۸، تصویر ماهواره‌ای ETM سال ۱۹۹۸ با قدرت تفکیک ۳۶×۳۶ متر، تصویر ماهواره‌ای IRS Pan شهریور ماه ۱۳۸۰ با قدرت تفکیک ۵×۵ متر و تصویر ماهواره‌ای Quick bird اسفندماه ۱۳۸۱ با قدرت تفکیک ۰/۶×۰/۶ متر استفاده شده است. در گام اول عکس‌های هوایی با توان تفکیک بالا اسکن و در محیط نرم‌افزاری ArcGIS به کمک نقاط زمینی و در مختصات UTM ژئورفرنس گردید تا بعنوان مدارک قبل از وقوع سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. تصاویر ماهواره‌ای نیز با مختصاتی مشابه بعنوان مدارک اصلی بررسی شرایط بعد از وقوع سیلاب مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی نتایج حاصل از عکس‌ها و تصاویر ماهواره‌ای از دو جنبه مورد توجه و بررسی قرار گرفت؛ اول برای تهیه نقشه‌های ژئومرفولوژی و مطالعه سایت‌های ویژه و دوم تحلیل‌های سیستماتیک تغییرات عرض، عمق و طول رود. به همین منظور تعداد ۱۰۵ سایت یا به عبارت بهتر مقطع عرضی با فواصل نسبتاً مساوی (۴۰۰ تا ۵۰۰ متر) در امتداد رودخانه اصلی انتخاب گردید (شکل شماره ۴). این مقاطع ۵۰ کیلومتر از طول کانال اصلی را از محل پیوستن شاخه اصلی

زیرحوضه دشت و چشمه‌خان یعنی از محل گرفتن آبراه اصلی مادرسو بطرف پائین‌رود را دربرمی‌گیرد.



شکل شماره ۴- پراکنش مقاطع عرضی انتخاب شده در امتداد کانال اصلی

در این مقاطع، تغییرات عرض بستر رودخانه مورد توجه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و طی بازدیدهای میدانی نیز کنترل گردید. سطوح جدید کاوشی و تراکمی بعد از سیلاب (لغزش‌ها، سطوح پوشیده شده بوسیله رسوب تازه، بستر فعال رودها و...) نیز بر روی تصاویر ماهواره‌ای مشخص و ترسیم گردید.

- مطالعات میدانی:

مطالعات میدانی در تابستان سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴ انجام گرفته که شامل نقشه‌برداری‌های تکمیلی در سایت‌های ویژه یعنی برداشت‌های شیب طولی و مقاطع عرضی بستر اصلی رودخانه بوده است. برای محاسبه دبی جریان، بالاترین داغاب روی دیواره‌های سنگی کانال اصلی بعنوان سطح بالای سیلاب در نظر گرفته شده و سعی شده حجم کلی مواد فرسایش یافته شامل میزان فرسایش جانبی رودها، مواد لغزشی حمل شده بویژه لایه‌های ریگی و سنگی نهشته شده روی مخروط افکنه‌ها بصورت کمی برآورد گردد. حجم مواد تراکمی روی مخروط‌ها با بازسازی سه بعدی لایه ریگی و سنگی صورت گرفت که عمق این مدل سه بعدی بعنوان سطح پایه قبل از سال ۱۳۸۰ در نظر گرفته شد که در مسیر شاخه‌های اصلی دو زیر حوضه دشت و چشمه‌خان بدلیل برش قائم رود قابل شناسایی بود. گسترش سطحی مواد نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Quick bird و بطور نمونه با دستگاه GPS تعیین شده است. برای محاسبه حجم مواد، معادله پیشنهاد شده به وسیله فستا و همکاران (۲۰۰۵، ص ۴۸) مورد استفاده قرار گرفت. این فرمول بر مبنای برداشت‌های میدانی حجم رسوب نهشته شده را در اشکال جدید تراکمی بدست می‌دهد:

$$V_A = S_A TA - V_E$$

در این معادله:

V_A : حجم کل مواد رسوبی روی مخروط افکنه به مترمکعب

S_A : سطح فعال مخروط به مترمربع

T_A : میانگین ضخامت لایه رسوبی جدید به متر

V_E : حجم فضای خالی شده در محل کانال‌های روی مخروط به مترمکعب است.

بافت ذرات رسوبی هر سایت برای محاسبه میانه و میانگین تخمین زده شد و بدلیل درشتی بافت رسوبات همه سایت‌ها نیازی به انتقال آنها به آزمایشگاه نبود.

- معادلات هیدرولیکی:

به منظور کمی نمودن ویژگی‌های هیدرودینامیکی و توانایی جریان در حمل بار رسوبی کف، تعدادی از پارامترهای هیدرودینامیکی مانند توان و توان رود^۱، تنش برشی بستر^۲ و میانگین سرعت جریان^۳ محاسبه گردید. توان جریان (W) با استفاده از معادله بگنولد^۴ (بگنولد، ۱۳۸۰) به شرح زیر تخمین زده شد:

در این معادله wp غلظت آب برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، g شتاب جاذبه زمین برحسب متر بر ثانیه، Q دبی برحسب متر مکعب بر ثانیه، S شیب برحسب متر در متر و w عرض کانال فعال برحسب متر است. همچنین بدلیل عدم دسترسی به داده‌های مربوط به دبی در سایت‌های مطالعاتی، میزان دبی از معادله تغییر یافته مانینگ^۵ بدست آمده است (گودی، ۱۹۹۸، ص ۸۳ و کوچل و همکاران، ۱۹۸۲، ص ۱۱۷۳).

$$Q = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} . A$$

در این فرمول n ضریب زبری مانینگ، A مساحت نیمرخ عرضی متر مربع و R شعاع هیدرولیکی به متر است. توان بحرانی رود^۶ (Wcr) و تنش برشی بحرانی بستر^۷ (Tcr) براساس معادله‌های پیشنهاد شده بوسیله کوستا (کوستا، ۱۹۸۳) محاسبه شده است، این معادلات عبارتند از:

$$wcr(Wm^{-2}) = 0.009 D_{50}^{1.686}$$

$$tcr(Nm^{-2}) = 0.056 dg^{1.213}$$

در این فرمول‌ها D_{50} میانه بافت مواد بستر به میلی‌متر و dg میانه بافت به سانتی‌متر است. مقادیر تقریبی حداقل

1. Stream Power
2. bed shear stress
3. Mean velocity flow
4. Bagnold
5. Manning
6. Critical stream power
7. Critical bed shear stress

تنش برشی بستر (t) ، حداقل توان رود (w) و حداقل سرعت (v) مورد نیاز برای جابجائی ریگ‌ها، قلوه‌سنگها و تخته سنگها از طریق معادلات زیر که توسط ویلیامز^۱ (ویلیامز، ۱۹۸۳) ارائه شده محاسبه گردیده است:

$$w = 0.079dg^{1.27}$$

$$t = 0.17dg$$

$$v = 0.065dg^{0.5}$$

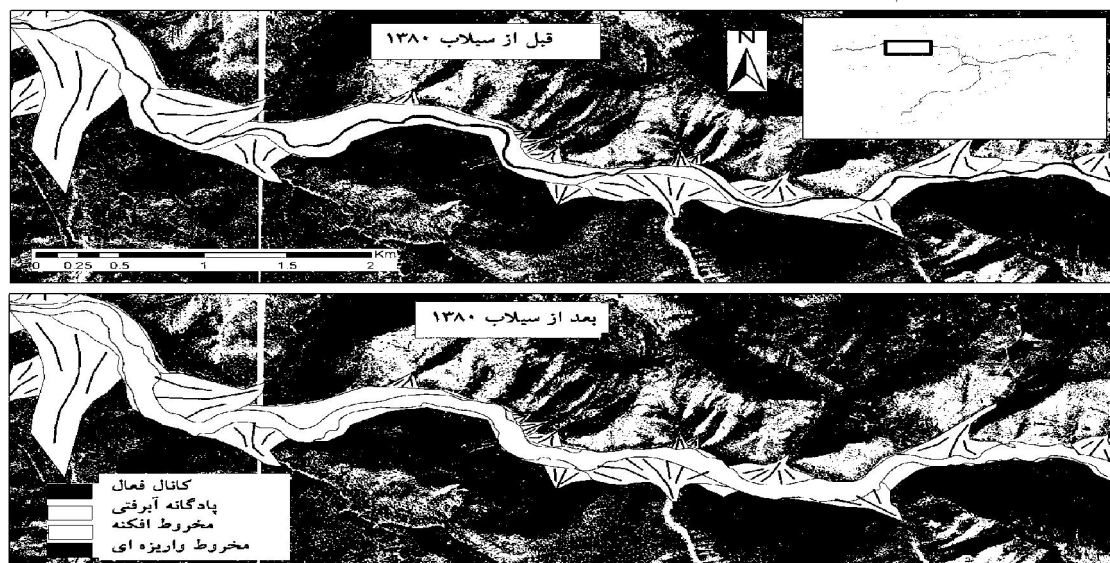
در این فرمول‌ها dg میانه قطر ذرات به میلی‌متر است. بدلیل طولانی بودن جداول مربوط به محاسبات این مقاطع (۱۰۵ مقطع)، از ارائه آن‌ها خودداری و تنها نمودارهای مربوطه نمایش داده شده است.

- بحث و نتایج:

اثرات ژئومورفیکی سیلاب سال ۱۳۸۰ را می‌توان براساس میزان اهمیت و درجه تأثیرگذاری در دو بخش به شرح زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار داد:

- اثرات ژئومورفیکی بر کانال اصلی رود:

شکل شماره ۵ نقشه مرفولوژی بستر رود را قبل و بعد از سیلاب نمایش می‌دهد. به‌طوری که ملاحظه می‌شود بخش وسیعی از پادگانه‌های آبرفتی، مخروط‌های افکنه و مخروط‌های جریان مواد^۲ متعلق به پلیستوسن پایانی بوسیله سیلاب حفر و حمل گردیده است. این تغییرات (گسترش بستر فعال رود) بی‌شک ناشی از سرعت و توان زیاد جریان و همچنین حجم زیاد بار جامد همراه آب بوده است.



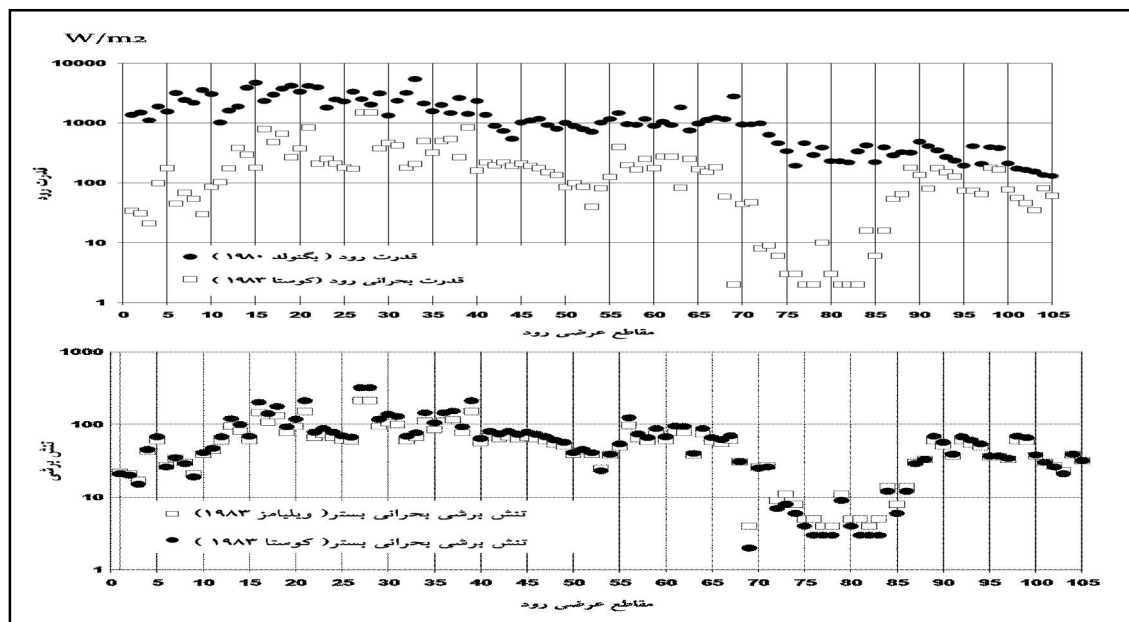
شکل شماره ۵- وضعیت قسمتهایی از بستر اصلی رودخانه قبل و بعد از سیلاب ۱۳۸۰

براساس محاسبات انجام شده میزان توان جریان در سراسر طول کانال مطالعه شده بیش از توان بحرانی رود یا به

1. Williams
2. Debris flow fans

اصطلاح آستانه بحرانی رود برای حمل رسوبات درشت دانه بوده است. براساس مطالعات نظری حداکثر توان رود برای جابجائی قلوه‌سنگها (با قطر ۶۴ میلی‌متر)، تکه‌سنگها (با قطر ۲۵۶ میلی‌متر) و تخته‌سنگها (با قطر ۰/۵ متر) بین ۱۶/۹ تا ۲۱۲ و تنش برشی آن بین ۱۱/۴۴ تا ۶۵ نیوتن بر مترمربع است (کاله و هایلر، ۲۰۰۴). این در حالی است که مقادیر محاسبه شده برای سیلاب سال ۱۳۸۰ ارقام بسیار بزرگتری را نشان می‌دهد که توجیه کننده حجم عظیم رسوبات درشت دانه حمل شده بوسیله سیلاب مزبور بوده است. لازم به ذکر است که در برخی مقاطع درصد قابل-توجهی از مواد حمل شده دارای قطر ۱ متر و بیشتر بوده‌اند.

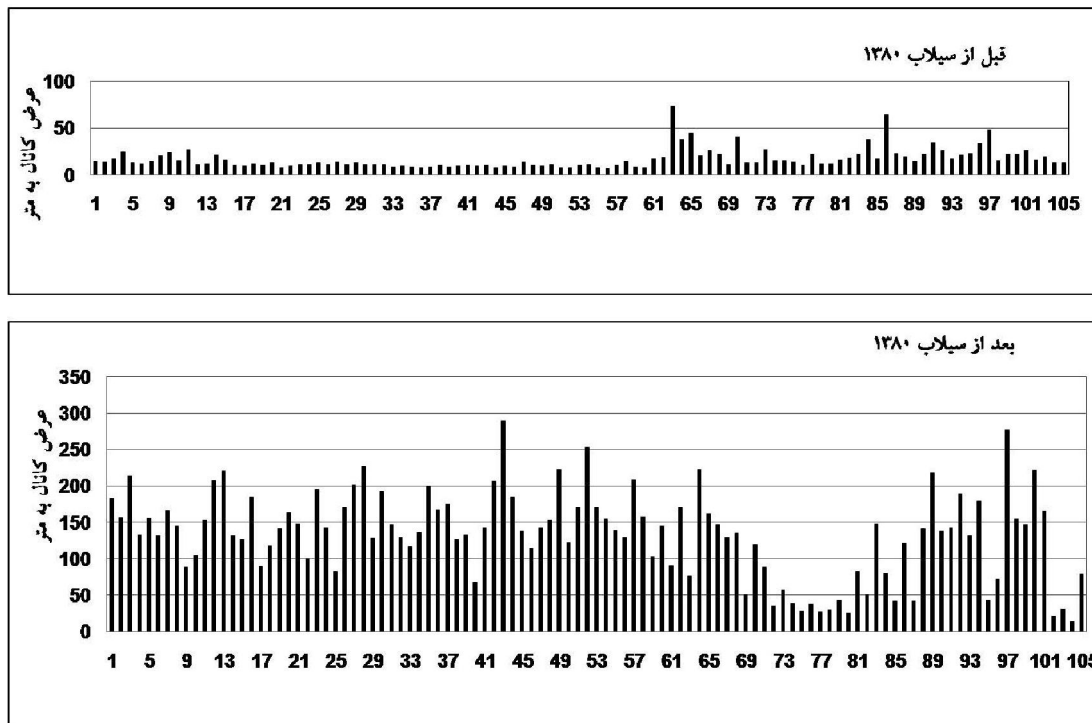
شکل شماره ۶ نشان دهنده وجود حداکثر توان و شدت جریان در نواحی میانی مسیر مورد مطالعه در امتداد کانال اصلی است که منطبق بر بستر سنگی نسبتاً مقاوم و تنگ است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود نوسانات زیادی در مقادیر توان رود وجود دارد که احتمالاً حکایتگر حرکت موجی سیلاب است. با توجه به نتایج حاصل از فرمول ویلیامز، آستانه سرعت جریان برای حمل مواد کف در مقاطع مختلف از حداقل ۰/۳ تا حداکثر ۲/۳ متر بر ثانیه (با میانگین ۱/۱ متر بر ثانیه) بدست آمده است. این در حالی است که میانگین سرعت جریان برای سیل سال ۱۳۸۰ از حداقل ۲ متر بر ثانیه تا حدود ۱۰ متر بر ثانیه در مناطق مختلف تغییر می‌کرده است. بنابراین میزان حداکثر سرعت برای تمام مسیر رود بیش از سرعت آستانه برای جابجایی رسوبات درشت دانه و میزان توان رود در تمام مقاطع چندین برابر میزان تنش برشی بستر بوده است (شکل ۶).



شکل شماره ۶- میزان توان رود و تنش برشی بستر در محل مقاطع عرضی

یکی از اثرات عمده این سیلاب گسترش جانبی بستر اصلی رود بوده است. شکل شماره ۷ عرض بستر رود را در

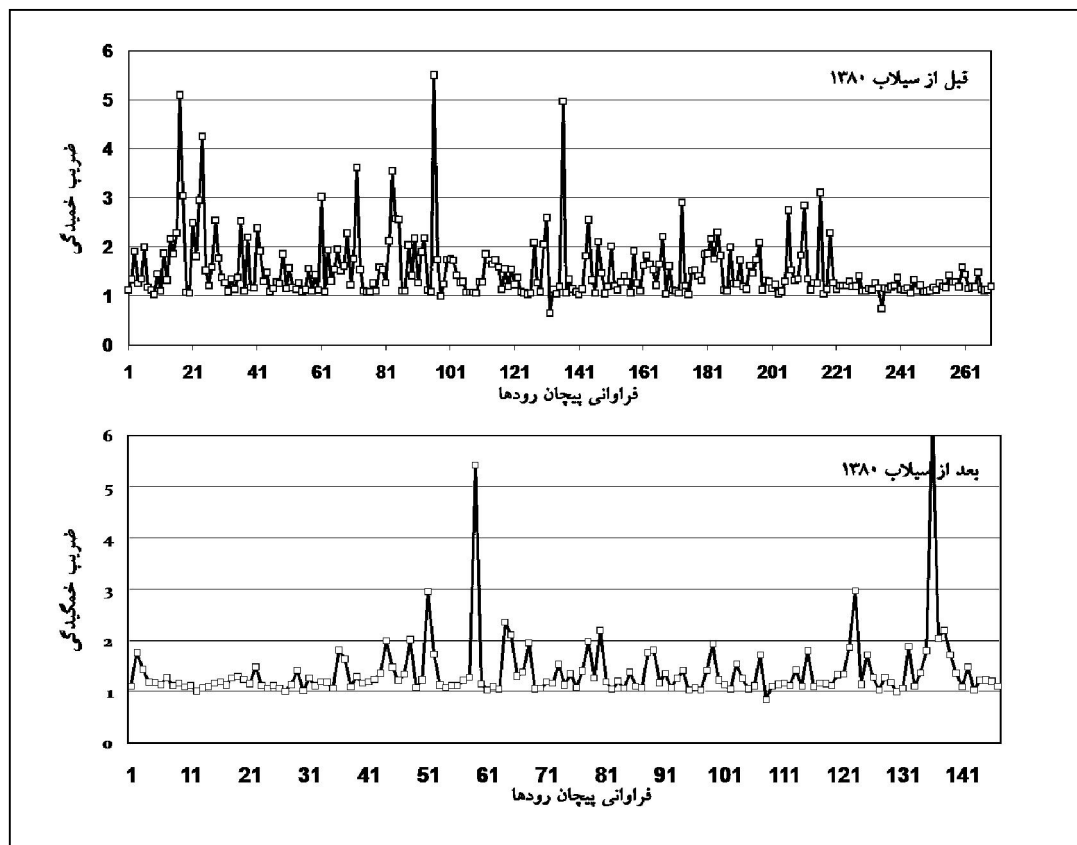
مقاطع مزبور قبل و بعد از وقوع سیلاب نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از مقاطع، مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر عرض کانال قبل از وقوع سیلاب به ترتیب $7/2$ ، 17 و $73/5$ متر بوده که پس از وقوع سیلاب به 14 ، $133/4$ و 290 متر افزایش یافته است. میانگین عمق کانال نیز قبل از سیلاب 2 متر برآورد گردیده که پس از وقوع سیلاب به حداقل $4/5$ تا بیش از 10 متر رسیده است.



شکل شماره ۷- تغییرات عرض کانال اصلی قبل و بعد از سیلاب ۱۳۸۰ در محل مقاطع نمونه

بررسی دقیق‌تر نمودار عرض بستر نشان می‌دهد که بیشترین میزان عریض‌شدگی در مئاندرها، بعد از بسترهای سنگی تنگ و قبل و بعد از پلها رخ داده که بطور طبیعی متأثر از مورفولوژی اولیه کانال و پس‌آبهای ایجاد شده بوسیله موانع فوق بوده است.

از تغییرات عمده دیگر کاهش میزان خمیدگی و انحناء رود و بعبارتی کوتاه شدن طول کانال فعال بعد از وقوع سیلاب بوده است. شکل شماره ۸ نشان دهنده مقادیر فراوانی و ضریب خمیدگی مئاندرهای رود قبل و بعد از سیلاب سال ۱۳۸۰ است. قبل از سیلاب تعداد ۲۴۰ مئاندر در این قسمت از مسیر رود وجود داشت که بر اثر هجوم سیلاب به تعداد ۱۴۰ مئاندر کاهش یافت. همچنین میانگین ضریب خمیدگی پیچان رودها از $1/52$ به $1/38$ کاهش یافت. به همین علت طول کانال فعال که قبل از سیلاب 65 کیلومتر بوده به حدود 52 کیلومتر کاهش یافته که خود بر زمان انتقال سیلابهای بعدی تأثیر مهمی داشته است.

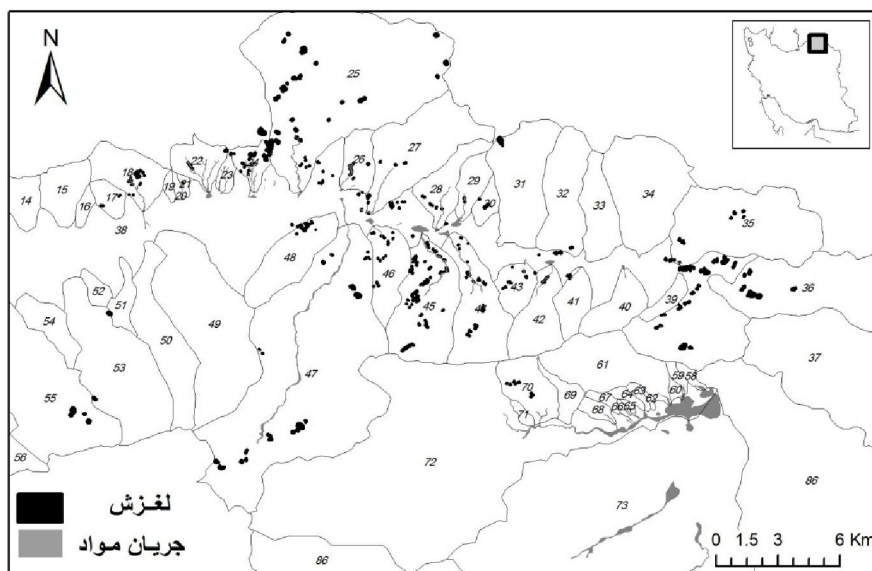


شکل شماره ۸- تغییر فرآوانی و ژئومتری منادرها در بستر اصلی رود

- اثرات ژئومورفیکی بر زیرحوضه‌ها و شاخه‌های فرعی:

نقشه نواحی لغزشی جدید که از طریق مقایسه تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد سیلاب تهیه گردیده نشان می‌دهد که بارش شدید و سیلاب شدگی مردادماه ۱۳۸۰، باعث وقوع ۵۲۵ لغزش کوچک و بزرگ بر روی دامنه‌های حوضه مورد مطالعه و حواشی بستر شاخه‌های فرعی گردیده است. با انطباق نقشه‌های بارش (شکل شماره ۲) و میزان شیب حوضه بر نقشه لغزش‌های جدید مشخص می‌گردد که پهنه‌های لغزشی جدید منطبق بر نواحی‌ای از حوضه بوده که مقادیر بارش در آن بیش از ۹۰ میلی‌متر و میزان شیب بیش از ۳۰ درصد بوده است. این پهنه‌ها عموماً منطبق بر محل زمین لغزشهای قدیمی (مربوط به پلیستوسن پایانی) بوده که بعداً با پوشش متراکم درختان جنگلی تثبیت شده اما پس از یک دوره‌ی طولانی ثبات مجدداً فعال گردیده‌اند.

بخشی از این مواد لغزشی وارد دره‌ها شده و بوسیله سیلاب حمل و تبدیل به جریان‌های مواد بزرگی شدند که تا خروجی زیرحوضه‌ها ادامه یافته و بصورت مخروط‌افکنه‌های جدید نهشته شدند. مساحت کلی سطوح لغزشی ۱۵۳۲۳۵۱ مترمربع بوده، کوچکترین و بزرگترین آنها بترتیب ۲۲ و ۷۱۸۴۵ مترمربع وسعت دارند. حجم کل مواد حمل شده بوسیله این لغزش‌ها، ۲۸۴۵۵۳۰ مترمکعب و حجم مواد نهشته شده جریان مواد حدود ۶ میلیون مترمکعب برآورد گردیده است.

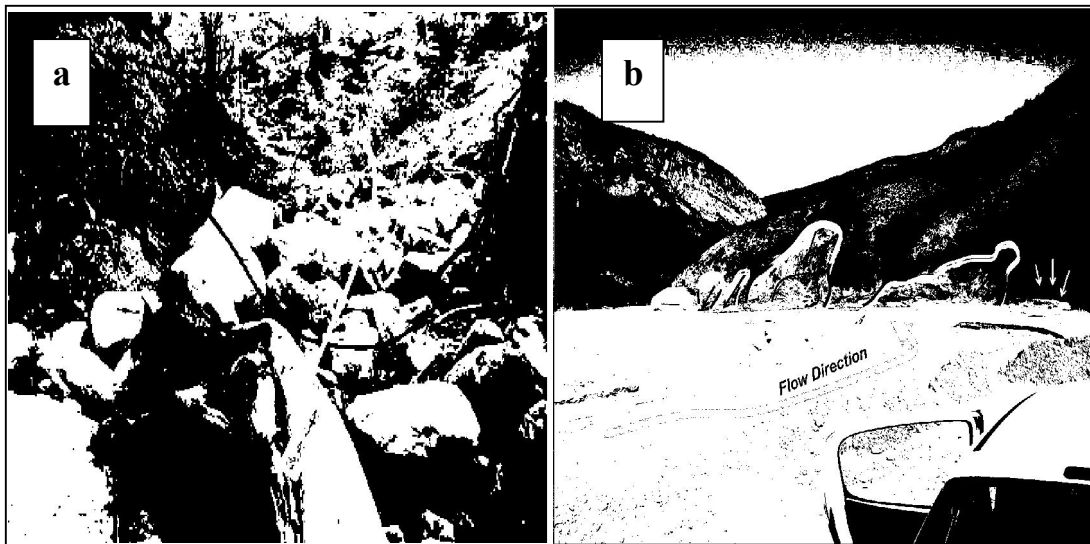


شکل شماره ۹ - پهنه‌های لغزشی و مسیرهای وقوع جریان مواد و مخروط‌افکنه‌های جدید در اثنای بارش شدید مرداد ماه ۱۳۸۰

بدین ترتیب میتوان نتیجه گرفت که حدود ۳ میلیون مترمکعب از رسوبات مربوط به مخروط‌افکنه‌ها از بدنه و کف دره‌های مسیر برداشت شده است. فرآیند جریان مواد دو تغییر شکل مهم را نیز بهمراه داشت که یکی کاهش نسبت عرض به عمق دره‌های فرعی و تبدیل نیمرخ آنها از V به U (شکل ۱۰-a) و دیگری خلق مخروط‌افکنه‌های جدید بر روی مخروط افکنه‌های نسل قدیم بوده است. بطور کلی در منطقه مطالعاتی تعداد ۳۵ مخروط افکنه جدید تشکیل گردیده که بافت رسوبات نهشته شده آنها در حد ریگ، قلوه سنگ و تخته سنگ بوده است (شکل ۹).

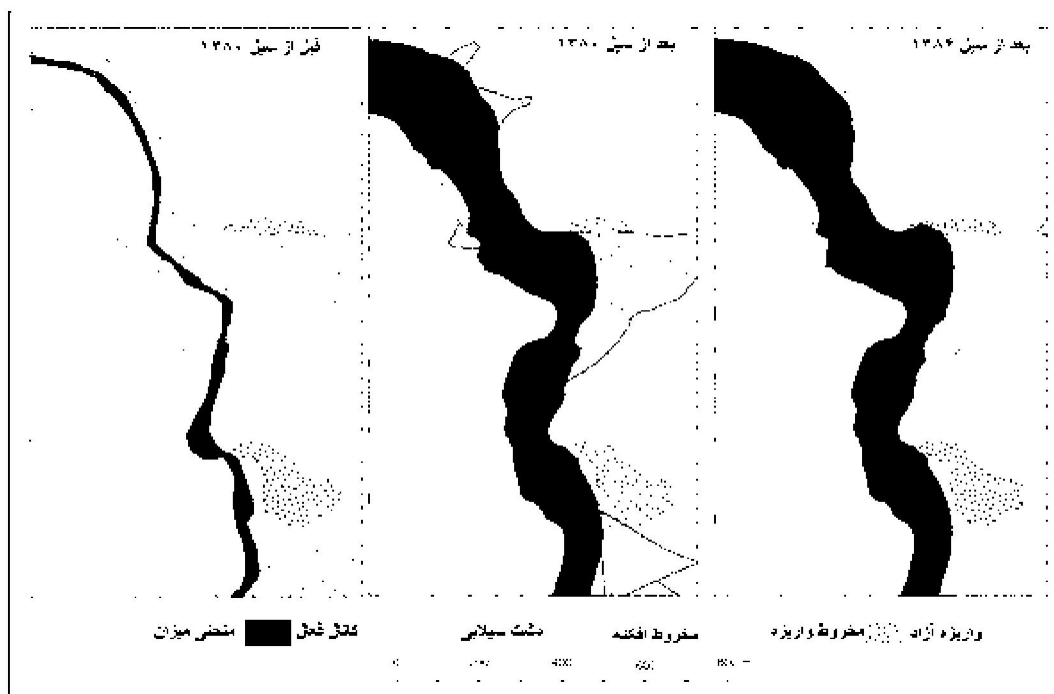
واکنش حوضه آبریز به تغییرات ژئومورفیک جدید

همانگونه که قبلا اشاره شده در مرداد ماه سالهای ۸۱ و ۸۴ نیز سیلابهای شدیدی رخ داد که ناپایداری بیشتر دامنه‌های حوضه را بدنبال داشت و باعث ایجاد جریان‌های مواد بزرگی شد که سطوح رسوبی وسیع و درشت دانه‌تری در خروجی زیرحوضه‌های دیگر حوضه تشکیل داد (شکل ۱۰-b). پس تشدید فرآیندهای دامنه‌ای چون لغزش و ریزش را میتوان بعنوان یکی از اثرات مهم ژئومورفیکی این سیلاب بزرگ به شمار آورد که در فاصله سالهای ۸۰ تا ۸۱ و ۸۱ تا ۱۳۸۴ مواد زیادی را به داخل بستر شاخه‌های اصلی و فرعی منتقل نموده که در زمان وقوع سیلابهای احتمالی آتی میتواند بعنوان مصالح مهمی بخدمت گرفته شود.



شکل شماره ۱۰- a و b: تشدید حرکات دامنه‌ای در حواشی ناپایدار بستر و نقش جریان مواد در تغییر مقاطع عرضی بسترهای فرعی

مطالعه تصاویر ماهواره‌ای Quick bird و مشاهدات میدانی نشان‌دهنده افزایش تعداد شاخه‌های رتبه ۱ رود هم در مناطق جنگلی و هم سازندهای سست نواحی خشک این حوضه است. یکی از مهمترین عوامل بوجود آورنده آبراهه‌های رتبه ۱ در مناطق مرتفع جنگلی، حفره‌ها و خراشهای ناشی از وقوع زمین لغزه‌هاست که حتی با گذشت بیش از ۶ سال هنوز تازگی خود را حفظ کرده‌اند. در محدوده خشک حوضه نیز افزایش تعداد آبراهه‌های رتبه اول بدلیل گسترش و توسعه گالی‌ها در سازندهای سست و منفصل نئوژن بوده است. تغییر در شرایط هیدروگرافی حوضه و کاهش ضریب زبری بدلیل حذف پوشش گیاهی از مسیر رودها نیز افزایش سرعت و توان رود در سیلابهای سال ۱۳۸۱ و بخصوص ۱۳۸۴ را در پی داشته و رسوبهای درشت دانه حاصل از فرآیندهای دامنه‌ای باعث تشدید فرسایش کاوشی سیلابها و گسترش جانبی و عمقی بستر فعال گردیده است. شکل شماره ۱۱، گسترش عرض بستر را در یکی از مقاطع عرضی بعد از تونل بین استانهای خراسان شمالی و گلستان نشان می‌دهد که در آن اثرات شدیدتر سیلابهای جدید بخوبی قابل مشاهده است. فرسایش عمقی رود در اثنای سیلاب سال ۱۳۸۴ باعث رخنمون آبرفتهای مربوط به جریانهای سیلابی پلیستوسن و حتی سنگ بستر کف کانال اصلی و در نتیجه تمرکز انرژی رود بطرف سواحل کانال و تشدید فرسایش جداری گردیده است. عمیق‌شدگی بستر و ایجاد پرتگاههای عظیم آبرفتی در محل پیوستن شاخه‌های فرعی به اصلی باعث ایجاد گالی‌های بزرگی در جریانهای جدیدتر شده که شکل شماره ۱۲ نمونه‌ای از آنها را در محل پیوستن آبراهه دشت به رودخانه مادر سو نشان می‌دهد.



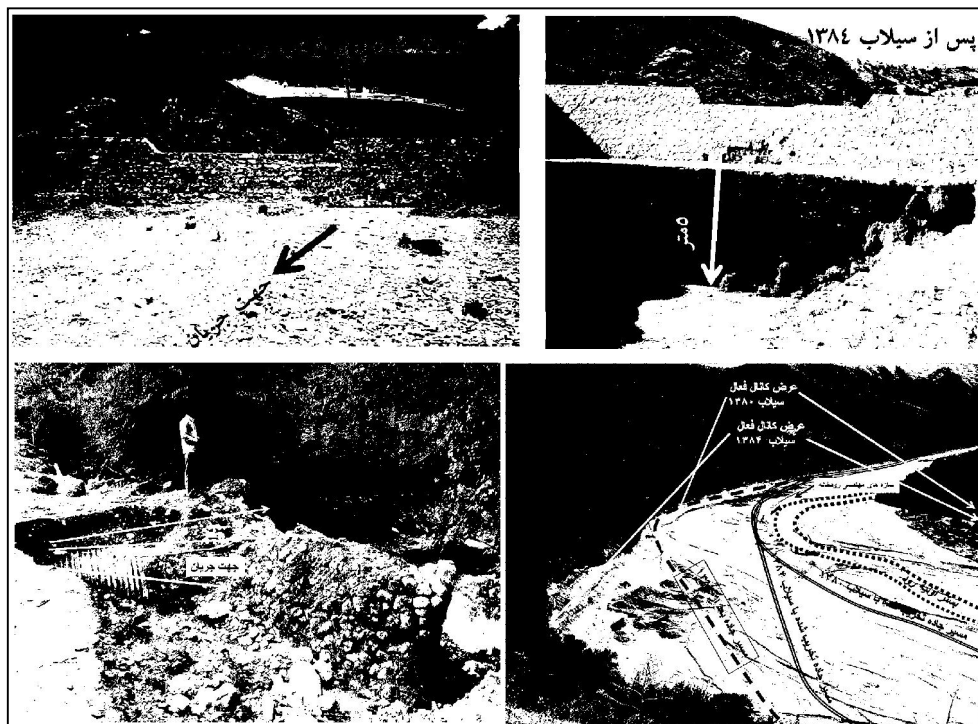
شکل شماره ۱۱- تشدید فرسایش جانبی بستر بعد از سیلاب ۱۳۸۰ (محل عکس بعد از تونل بین خراسان شمالی و استان گلستان)



شکل شماره ۱۲- تشدید و توسعه گالی ها بعد از وقوع سیلاب ۱۳۸۰ در محل اتصال شاخه فرعی دشت به شاخه اصلی مادرسو

فعالیت‌های مهندسی در محیط دینامیکی جدید

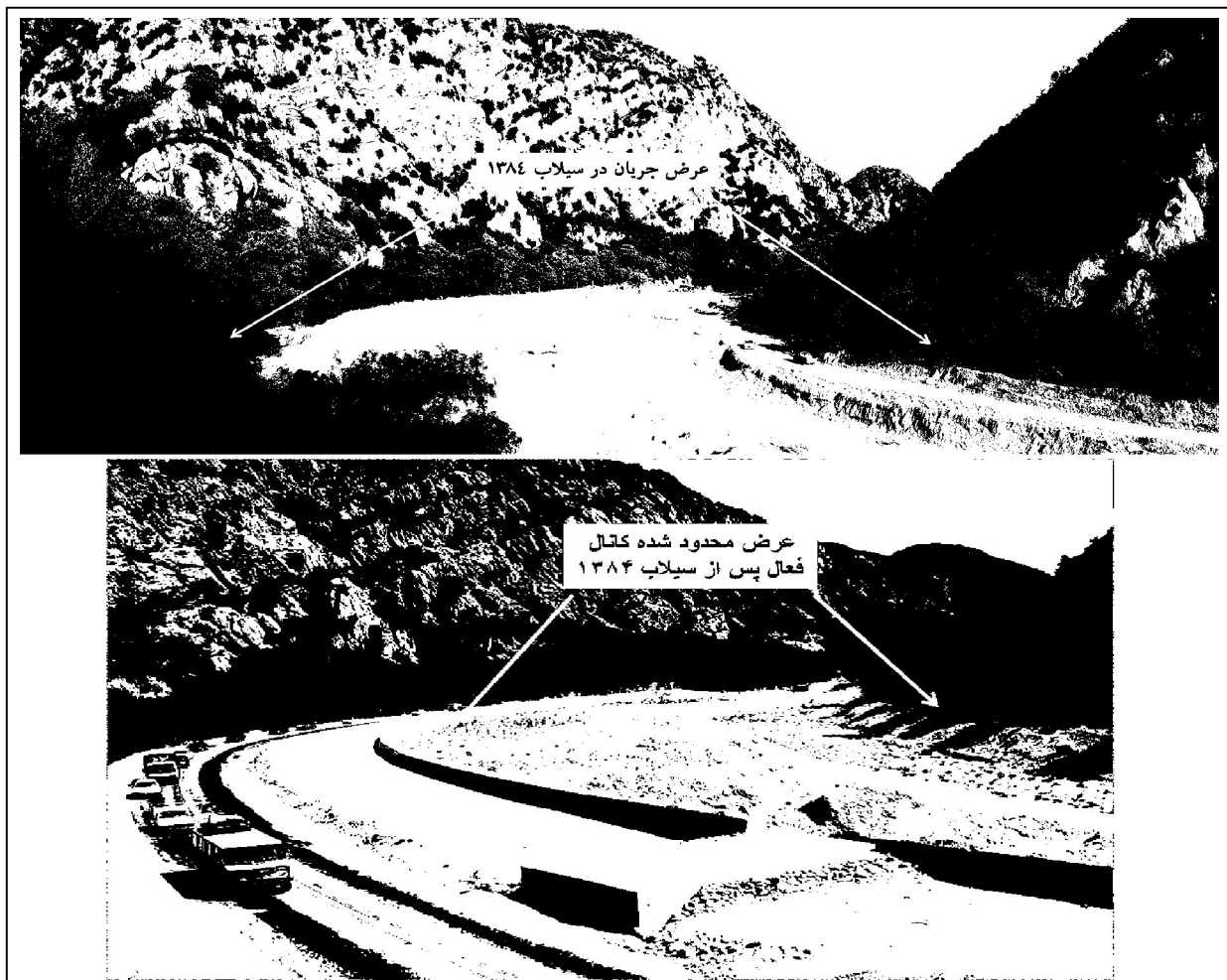
پس از وقوع سیلاب مرداد ۱۳۸۰، سازمان‌های مسئول و بخصوص مهندسين عمران بدون در نظر گرفتن شرایط دینامیکی جدید، جاده ارتباطی را ترمیم و پل‌های موقتی ایجاد کردند که بخش اعظم آن و قسمتهای زیادی از مسیر جدیدالاحداث بوسیله سیلاب مردادماه سال ۱۳۸۱ از بین رفت. پس از سیلاب سال ۱۳۸۱ جاده ارتباطی بطور کامل بازسازی گردید، دیواره‌های بتنی و گابیونی، بندهای کوچک رسوبگیر و سدهای سنگی - ملاتی و سازه‌های مشابه در داخل شاخه‌های فرعی و در امتداد آبراهه اصلی احداث گردیدند و دستکاری‌های وسیعی در بستر رود و محیط تازه انجام شد. سیلاب سال ۱۳۸۴ علاوه بر برخورداری از شرایط دینامیکی ویژه (تغییرات طبیعی ایجاد شده بوسیله سیلابهای ۸۰ و ۸۱) با موانع تازه تأسیس بیشتری روبرو شد و از اینرو علیرغم دبی کمتر نسبت به سیلاب نخستین، میزان خسارتهای آن بسیار شدید بود بطوری که ضمن تخریب مجدد تمام جاده تازه تأسیس، پل‌ها و سازه‌های مهندسی رودخانه، بستری عمیق‌تر را خلق کرده بود که عملیات بازسازی بعدی را بسیار پرهزینه‌تر نمود (شکل شماره ۱۳). بندهای سنگی - ملاتی داخل حوضه‌های آبخیز به سرعت از رسوب پرگردید و تغییرات شیب شدیدی در امتداد نیمرخ طولی رودهای فرعی بوجود آورد و بدلیل حجم زیاد دبی و رسوبهای محموله زیربنای بسیاری از این سازه‌ها (در پائین‌رود آنها) به شدت فرسایش یافت.



شکل شماره ۱۳- تخریب شدیدتر جاده و سازه‌های مهندسی در اثنای سیلاب جدید (۱۳۸۴)

در تمام عملیات اصلاح مجاری هیچگاه توجهی به نوع غالب جریان سیلابی (جریان‌های پر رسوب مواد و غلیظ) نگردید در حالی که مهندسی سازه‌های رودخانه‌ای در معرض جریانهای مواد و غلیظ (جریانهای پر رسوب

حاوی قطعات درشت) بایستی متفاوت از جریان‌های سیلابی عادی باشد. پس از سیلاب سال ۱۳۸۴ عملیات ساخت جاده و سازه‌های وابسته با شدت و گسترش بیشتری شروع که هنوز هم ادامه دارد. متأسفانه بخش وسیعی از عرض کانال رودخانه برای پهن یا دو بانده کردن جاده ارتباطی پر تردد (مشهد- گرگان) آنهم در ارتفاع بالاتری از سطح اولیه خود (سیلاب سال ۱۳۸۰) اختصاص یافت که قسمت اعظم آن نیز بوسیله دیواره‌های ضخیم بتنی حفاظت گردیده است. ارتفاع پلهای احداث شده کم، تعداد پایه‌ها زیاد و فواصل آنها نسبتاً کم بوده و قابلیت عبور جریانهای سیلابی احتمالی مملو از رسوبهای درشت دانه به ابعاد متریک را نخواهد داشت و در اینصورت خسارتهای (جانی و مالی) احتمالی باز هم شدیدتر خواهد بود (شکل شماره ۱۴).



شکل شماره ۱۴- مقایسه عرض بستر فعال سیلاب ۱۳۸۰ و فشار جاده جدید بر بستر فعال

نتیجه‌گیری

وقوع سیلابهای کاتاستروفیک رودخانه مادر سو در سالهای ۸۰، ۸۱ و ۸۴ (که شاید بتوان آنها را با تغییرات اقلیمی سایر نواحی دنیا مرتبط دانست) مؤید لزوم نگرشهای جدیدتری در هیدرولوژی سیلاب، تجدید نظر در محاسبات حداکثر دبی احتمالی و دوره برگشت سیلابهای بزرگ، اصلاح روشهای کنترل سیلاب و سازه‌های رودخانه‌ای است.



استفاده از هیدرولوژی پالئوفلاد و اطلاعات تاریخی روشهایی است که امروزه در بسیاری از کشورهای جهان برای تحلیل‌های خطر و برآورد حداکثر دبی احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرد هیدرولوژی پالئوفلاد یعنی ارزیابی و محاسبه بزرگی و فراوانی سیلابهای قدیمی با استفاده از شاخصهای طبیعی (PSI^۱) چون شواهد زمین شناسی و ظواهر ژئومورفولوژیک که همانا شامل خسارات بجامانده روی تنه درختان، مواد بجا مانده از سیلاب چون نهشته‌های سیلابی (SWD)^۲، خاکهای عریان شده قدیمی، خطوط سیل‌تزی، خطوط فرسایشی و داغاب سیلاب روی دیواره‌های دره‌ها، چوبهای سرگردان و کنده‌های حمل شده بوسیله جریان که در امتداد کانال و تراسهای آبرفتی حفظ شده‌اند و ... است (بنیتو و تورندیکرافت، ۲۰۰۵، ص ۴). برای تعیین سن و دوره برگشت این سیلابها پس از مشخص ساختن سایت‌های مناسب و تهیه مقاطع عرضی و نمونه گیریهای لازم، سن مطلق نهشته‌های حاوی مواد ارگانیک با یکی از روشهای مرسوم سن سنجی بدست می‌آید.

نکته دیگری که بایستی به آن توجه کرد این است که زمان بازسازی مورفولوژی کانال به عواملی چون ویژگی دشت سیلابی، پوشش گیاهی و تکرار وقایع مشابه بعد از یک واقعه کاتاستروفیک بستگی دارد (ولمن و جرسون ۱۹۷۸ و بوون، ۱۹۸۱). در رودخانه‌های کم شیب مناطق مرطوب که دشت سیلابی به سرعت با پوشش گیاهی پوشیده می‌شود زمان بازسازی و رسیدن به پایداری نسبی چند هفته تا یک سال (کوستا ۱۹۷۴، ماس و کوچل ۱۹۷۸، کوچل ۱۹۸۸، ص ۱۸۰ و ۱۸۱) و در برخی موارد بین ۱ تا ۱۰ سال (گرت و می‌یر ۲۰۰۱، ص ۲۸۶) به طول می‌انجامد زیرا در این مناطق جریان‌های سیلابی معمولی (کم شدت و مکرر) رسوبهای ریزدانه‌ای را بر سطح و کناره‌های بستر گسترش داده و کانال را به سرعت به حالت قبلی برمی‌گردانند (هک و گودلت ۱۹۶۰).. البته کانالهای دارای توان زیاد حمل رسوب در همین مناطق ممکن است برای دوره‌های طولانی‌تری عریض باقی مانند (کوستا، ۱۹۷۴).

در بستر رودخانه‌های نواحی خشک و نیمه خشک با جریان‌های ضعیف و پوشش گیاهی فقیر این دوره‌ها بسیار طولانی‌تر خواهد بود (کوستا، ۱۹۸۸، ص ۱۸۱ به نقل از جرسون، ۱۹۷۸). لذا می‌توان گفت که با توجه به ناپایداری‌های ایجاد شده در نواحی مختلف منطقه مورد مطالعه، حجم زیاد رسوب و برخورد ناشیانه انسان با سیستم رودخانه‌ای، فاصله وقوع سیلابهای بزرگ در حوضه احتمالا کمتر و دوره بازسازی طولانی‌تر خواهد شد.

منابع

۱- حسین‌زاده، سیدرضا، جهادی طرقي، مهناز، ۱۳۸۵. تجزیه و تحلیل ژئومورفولوژیکی سیلابهای کاتاستروفیک

رودها، مادرسو، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، صص ۸۹-۱۱۵.

۲- سازمان جغرافیایی کشور، عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰ سال ۱۳۳۷، ۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳۴۸ و تصاویر ماهواره‌ای

منطقه مطالعاتی.

3- Baker, V. R., 2008. Paleoflood hydrology: origin, Progress, prospects. *Geomorphology* 101, 1-13.

4- Benito, G., Thorndy Craft. V. R., 2005. paleoflood Hydrology and Its role in applied hydrological sciences. *Journal of Hydrology* 313, 3-15.

5- Beven, k., 1981. The effect of ordering on the geomorphic effectiveness of hydrologic events. *IAHS-AISH publication* 132,510-526

6- Bretz, J. H., 1923. The Channeled Scabland of the Columbia plateau. *Journal of Geology* 31, 617-649.

7- Costa, J.E., 1983. Paleohydrologic Reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Rang. *Geological Society American Bulletin* 94.986-1004.

8- Costa, J.E., 1974a. Stratigraphic, morphologic and pedologic evidence of large floods in humid environments. *Geology* 2, 301-303.

9- Fassetta, G.A, Cossart, E and fort, M., 2005. Hydrogeomorphic hazards and impact of Man-Made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guli catchment (southern French Alps) *Geomorphology* 66. 41-61

10- Goudie, A., Anderson. M, Burt. T., Lwein, J., Richards, K., Whalley, B., Worsley, P., 1998 *Geomorphological Techniques*, Routledge. 570 pp.

11- Grant, A and Meyer., 2001, Recent Large-magnitude floods and their impact on valley-floor environments of northeastern Yellowstone. *Geomorphology* 40. 271-290.

12- Hack, J.T and Goodlitt, J.C., 1960. *Geomorphology and Forest ecology of a Mountain Region in the Central Appalachians*. US Geological Survey Professional Paper 347, 66 pp.

13- JICA CTI Engineering International Co. Ltd. The study on flood and debris flow in the coastal area focusing on the flood – hit Region in Golestan Province 2004 unpublished reports

14- Kale, V.S and Hire, P.S., 2004. Effectiveness of monsoon floods on the Tapi River, India: role of channel geometry and hydrologic regime. *Geomorphology* 57.275-291

15- Kochel, R. C., Baker, V. R., Patton, P. C., 1982. Paleohydrology of southwestern Texas, water Resources Research, vol 18, No 4, 1165-1183.

16- Kochel, R.C., 1988. Geomorphic Impact of large floods. In *flood Geomorphology* PP 169-187.

17- Moss, J.H., Kochel, R.C., 1987. Unexpected geomorphic effects of the Hurricane Agnes storm and flood, Conestoga drainage basin, south-eastern Pennsylvania. *Journal of Geology* 86, 1-11.

18- Williams, G.P., 1983. Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments: I. Cobble and boulder deposits. *Geografika Annaler* 65A, 227-243.

19. Wolman, M.G and Gerson, R., 1978. Relative scales of time and effectiveness of Climate in watershed *Geomorphology*. *Earth surface processes and land Forms* 3, PP 189-203