

## ارزیابی کمی رسوب زایی زمین لغزش ها در حوضه آبخیز سد ایلام

شمس اله عسگری دانشجوی دکتری دانشگاه خوارزمی و مربی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران  
عزت الله قنواتی<sup>۱</sup> دانشیار، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
صمد شادفر دانشیار، پژوهشگر حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران،

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۳ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱

### چکیده

ارزیابی کمی رسوب زایی زمین لغزش از مباحث جدید و مسائل پیچیده حوضه آبخیز می باشد. داشتن معلومات کافی از حجم دقیق زمین لغزش ها، میزان رسوب زایی زمین لغزش ها به ویژه در حوضه سد ایلام که حیات شهر ایلام و توابع آن به عمرسد ایلام وابسته است اهمیت و ضرورت تحقیق می باشد، با این فرض، که بخش عمده ای از رسوب تجمع یافته در سد ایلام مربوط به زمین لغزش های سطح حوضه است. بنابراین در این تحقیق ابتدا نقاط زمین لغزش با عملیات میدانی، تصاویر ماهواره ای +ETM و Google Earth شناسایی شد. استفاده از مدل خود همبستگی فضایی موران نشان داد که زمین لغزش ها از الگوی خوشه ای برخوردارند بنابراین روابط متغیر وابسته زمین لغزش به متغیرهای مستقل در مدل منطق فازی، تحلیل شده تا علت الگوی خوشه ای زمین لغزش ها در سطح حوضه تبیین شود. جهت تدقیق نتایج کمی رسوب زایی زمین لغزش ها از مدل های تجربی برآورد فرسایش رسوب، مدل هیدرولوژیکی منحنی سنج دبی و رسوب، آمار مشاهده ای رسوب در طول دوره آماری، زمان رخداد زمین لغزش در تطبیق با پیک رسوب ایستگاه هیدرومتری در طول دوره آماری محاسبات انجام شده است. داده های رسوب مشاهده ای و برآوردی سه زیر حوضه سرجوی گل گل، زیر حوضه چاویز و زیر حوضه اما (ملکشاهی) مقایسه شد. افزایش رسوب مشاهده ای در دو ایستگاه گل گل و چاویز نسبت به رسوب برآوردی و مقایسه پیک های رسوبی افزایش دبی رسوب نسبت به دبی آب در طول دوره آماری دلایلی بر رخدادهایی در سطح حوضه است. بر اساس آمار داده های آبی روزانه در طول دوره آماری ۲۹ ساله در ایستگاه هیدرومتری گل گل ۱۵۵۶۸۶۰ تن بار رسوب معلق عبوری ثبت شده است از این مقدار ۸۹۴۰۷۸ تن بار رسوب معلق عبوری مربوط به ۹ رخداد زمین لغزش سال های ۱۳۶۶، ۱۳۷۱، ۱۳۷۲، ۱۳۷۳، ۱۳۷۶، ۱۳۷۵، ۱۳۷۸، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۸ می باشد. طبق محاسبات نتیجه گرفته می شود که در زیر حوضه گل گل ۵۰/۳۷ درصد معادل ۹/۴ تن در هر هکتار در سال افزایش رسوب مربوط به رخداد های زمین لغزش ذکر شده می باشد در نتیجه به میزان ۲۸/۲ تن رسوب در هر هکتار در یک سال وارد سد ایلام می شود. بر اساس آمار داده های آبی در طول دوره آماری ۱۳ ساله در ایستگاه هیدرومتری چاویز در کل دوره ۲۶۰۳۸۳ تن بار رسوب معلق عبوری ثبت شده است از این مقدار ۱۱۹۴۴۳ تن بار رسوب معلق عبوری مربوط به ۷ رخداد زمین لغزش سال های ۱۳۸۶، ۱۳۸۳، ۱۳۸۲، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ می باشد. نتایج نشان داد که در زیر حوضه چاویز ۳۸/۲ درصد معادل ۴/۶ تن در هر هکتار در سال افزایش رسوب مربوط به رخداد های زمین لغزش ذکر شده است در نتیجه به میزان ۱۵/۴ تن رسوب در هر هکتار در یک سال وارد سد ایلام شده است. در زیر حوضه اما (ملکشاهی) بدون رخداد زمین لغزش فعال افزایش رسوب در طول دوره مشاهده نشد. در مجموع ۱۲۳۷۳۱۴ تن رسوب دهی زمین لغزش ها وارد سد ایلام شده است. جهت کنترل این مخاطره اقدام مناسب توسط دستگاه اجرایی برای توسعه پایدار بکار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، حوضه آبخیز سد ایلام، رسوب زایی، زمین لغزش، دبی آب- دبی رسوب.

## مقدمه

لغزش زمین بمانند دیگر عوامل طبیعی پدیده‌ای است که همواره بشر را تهدید نموده و خسارات جانی و مالی زیادی برای مناطق مختلف مستعد فراهم نموده است و در حال حاضر نقش زیادی در فرسایش خاک، حرکات توده‌ای خاک، جریانهای گلی دامنه‌ای و انباشت رسوب در مخازن پشت سدها دارد. با وجود اینکه نقش زمین لغزشها در فرسایش، انتقال رسوب و رسوبگذاری حوضه‌های لغزشخیز مورد تأیید میباشد و متخصصین مختلف درک و تعیین رابطه بین ناپایداری دامنه‌ها و سیستم فلوویال را از بسیاری جهات مهمتر از سایر زمینهای پژوهشی میدانند، چراکه براساس نتایج آن میتوان تغییرات زیست محیطی گسترده بوجود آمده را ارزیابی کرد، ولی در این رابطه پژوهشهای جامع در مقیاس حوضه‌های آبخیز بسیار کم انجام شده است (Harvey ۲۰۰۲). برخی از پژوهشگران زمین لغزشها را به عنوان یک بلای طبیعی مهم در گروه مخاطراتی همچون آتشفشان، زلزله، سیل، آتش سوزیهای گسترده در طبیعت قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که همچون سایر بلایای طبیعی نقش مهمی در ایجاد تغییرات گسترده در چهره زمین، فرآیندهای فرسایش و جریان رسوب دارند (Korup ۲۰۰۶، و Clague et al Hewitt ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹). زمین لغزشهای فعال شده و زمین لغزشهای جدیدی که در اثر بارندگیهای همراه با طوفانها و زلزله‌های سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ در حوضه Tachia River در تایوان مرکزی بوقوع پیوسته‌اند با استفاده از تصاویر ماهواره و سنجش از دور مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Chuang et al ۲۰۰۹). افزایش رسوبدهی رودخانه‌های حوضه مورد مطالعه خسارتهای زیادی را به سدها، نیروگاهها، پلها، روستاها و سایر سازه‌ها وارد ساخته است (et al, Chiou ۲۰۰۷). در این پژوهشها تحلیل دبیهای رسوب ایستگاههای هیدرومتری پائین دست حوضه نشان داد که زمین لغزشهای بعد از زلزله میزان دبی رسوب را زیاد کرده‌اند و این میزان نسبت به دبی رسوب حاصل از بارندگیهای شدید نیز بیشتر است. در بررسیهای نوین، زمین لغزشهای بزرگ دنیا یکی از عوامل اصلی تولید رسوب با حجم بالا معرفی شده‌اند و نتایج این مطالعات نشان میدهد که یک دوره چند ساله بعد از وقوع زمین لغزشهای متعاقب زلزله یا بارندگیهای شدید رسوبدهی به بیش از ۱۰ تن در کیلومتر مربع افزایش یافته است (Korup ۲۰۱۲). نتایج به دست آمده در این مطالعات نشان داد که حجم اصلی رسوبات تولید شده بعد از زلزله چه در مواقع بارندگیهای شدید و چه در مواقع عادی مربوط به ناپایداریهای دامنه‌ای است که همزمان یا بعد از زلزله بوجود آمده‌اند (Lio et al ۲۰۱۴). مدل‌های مختلفی جهت برآورد میزان رسوب وارد شده به رودخانه‌ها از طریق زمین لغزشها پیشنهاد شده است. مدل SHETRAN جهت ارزیابی میزان رسوب حاصل از زمین لغزش (Bathurst, et al ۲۰۰۶). علاوه بر مدل فوق میتوان از مدل‌های دیگری همچون مدل شاخص فرسایش خاک<sup>۱</sup> (SEIM) (2006 Cover) و مدل<sup>۲</sup> LAPSUS-LS که در منطقه لغزش خیز اوگاندا به اجرا در آمد (Claessens ۲۰۰۷). برنامه شبیه سازی هیدرولوژیکی<sup>۳</sup> (HSPF) ۲۰۱۲ نام برد. شبیه سازی فرسایش و رسوب ناشی از زمین لغزش با استفاده از مدل<sup>۴</sup> WEPP Geo (مطالعه موردی: حوضه گرم چای میانه) نتایج پژوهش نشان داد

1- soil erosion index model

2-Landslide model performance in a high resolution small-scale landscape<sup>۲</sup>

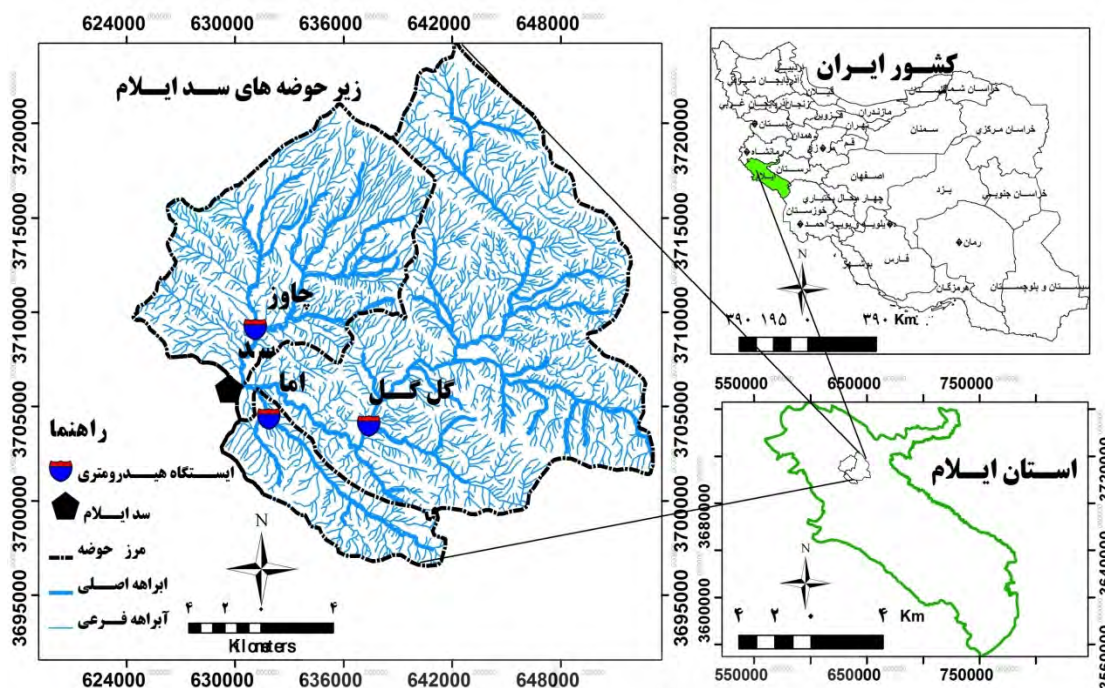
3- Hidrology similar program Fortran

4- Water Erosion Prediction Projec

که بار رسوبی سطوح ناپایدار دامنه ای در ارتباط با مورفولوژی دامنه و مدیریت حاکم بر آن در قالب کاربری زمین و اقلیم منطقه متغیر بوده و مدل یاد شده به خوبی قادر به شبیه سازی مقادیر رسوب و ته نشست در ارتباط با عوامل تاثیرگذار بر آن بوده است (یاراحمدی و روستایی، ۲۰۱۵). تا به حال مطالعه مناطق لغزش خیز در ایران بیشتر در زمینه های عوامل، حساسیت و خطرات آنها بوده است، شریعت جعفری و غیومیان (۲۰۱۰)، پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۲)، محمدی و همکاران (۲۰۱۲)، فیض زاده و همکاران (۲۰۱۴)، نورانی و همکاران (۲۰۱۴)، طلایی (۲۰۱۴)، صفاری و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۶). در کشور ایران در زمینه نقش زمین لغزشها در تشدید فرسایش و تولید رسوب مطالعات بسیار اندک بوده و یا به عبارت دقیقتر مطالعاتی صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت تخمین دقیق فرسایش و رسوبدهی به دلیل احداث سازه های مختلف بر روی رودخانه ها، وجود مناطق مسکونی در مسیر آنها، حفاظت از منابع طبیعی و مسائل زیست محیطی و ... امروزه نیاز به بررسی دقیقتر رابطه زمین لغزش و رسوبدهی در حوضه های لغزش خیز کشورمان بیشتر احساس می شود.

### داده ها و روش کار

حوضه آبخیز سد ایلام در جنوب شرقی شهرستان ایلام در موقعیت جغرافیایی بین ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۲ ثانیه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۲۳ دقیقه و ۲۷ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه و ۵۴ ثانیه عرض شمالی قرار دارد. بیشترین ارتفاع درکوه قلازنگ واقع در شمال حوضه ۲۴۰۰ متر و کمترین ارتفاع حوضه در محل سد ۱۲۰۰ متر و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۴۳۰ متر می باشد. متوسط بارندگی سالانه حوضه سد ایلام ۶۸۵ میلیمتر متوسط درجه حرارت سالیانه آن ۱۵/۸ درجه سانتیگراد و متوسط حداقل درجه حرارت سالیانه ۶/۹ درجه سانتیگراد و میانگین حداکثر درجه حرارت سالیانه ۲۴/۷، حداکثر مطلق در ماههای تیر و مرداد ۴۳ و حداقل مطلق ۱۵- درجه سانتیگراد بوده است اقلیم منطقه نیمه مرطوب معتدل است و تشکیلات زمین شناسی حوضه سازندهای سروک، سورگاه، ایلام، پابده، گورپی، گچسارن و رسوبات کواترنری است. با توجه به خصوصیات ذکر شده این حوضه از حساسیت فرسایش بالایی برخوردار است و فرایند زمین لغزش در طول زمان همواره فرسایش خاک و رسوب زایی را تشدید نموده است.



شکل (۱) نقشه موقعیت حوضه آبخیز سد ایلام

### روش تحقیق

جهت بررسی رسوب دهی زمین لغزش نیازمند شناسایی ژئومورفولوژیکی از حوضه آبخیز، آمار و اطلاعات دقیق از دبی آب- دبی رسوب، فراوانی رخدادهای زمین لغزش در سطح حوضه و اطلاعات دقیق از زمان وقوع زمین لغزش، سطح، حجم و مقدار گسیختگی زمین لغزش به شبکه آبراهه ای و انتقال بار رسوب توسط جریان آب می باشد. با توجه به اهمیت حوضه سد ایلام، تشکیلات فرسایش پذیر زمین شناسی دوران سوم در سطح حوضه و فراوانی رخدادهای زمین لغزش در سطح حوضه و سه ایستگاه هیدرومتری با طول دوره آماری در خروجی سه زیر حوضه اصلی منتهی به سد ایلام و شرایطی که بر حوضه حاکم است بعد از بررسی های لازم و با استفاده از اطلاعات و منابع موجود، حوضه سد ایلام انتخاب شد. ابتدا با استفاده از روش سیستمی ژئومورفولوژی با تهیه نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس هوایی ۱:۲۰۰۰۰، تصاویر ماهواره ای لندست ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ ETM2002، TM1988 و Google Earth در محیط GIS محدوده زیر حوضه ها و رخدادهای زمین لغزش در سطح زیر حوضه ترسیم شد. داده های دبی آب و دبی رسوب سه ایستگاه هیدرومتری سرجوی گل گل، چاویز و ایستگاه اما (ملکشاهی) از آب منطقه استان ایلام تهیه شد. اطلاعات پایان نامه ها، مقالات، طرح های تحقیقاتی در ارتباط با فرسایش خاک، برآورد رسوب، زمین لغزش، حوضه سد ایلام جمع آوری شده و با تدقیق، صحت علمی و استنادی داده ها کنترل و در صورت نیاز استفاده شده است. برای برآورد فرسایش خاک و رسوب زیر حوضه ها از دو مدل شناخته شده برآوردی MPSIAC و مدل EPM استفاده شده است (عسگری، ۲۰۰۹).

جهت تفکیک زمین لغزش های قدیمی و غیر فعال از زمین لغزش های فعال و دقت در شناسایی زمین لغزش های فعال جدید ابتدا شناسنامه ای بصورت پرسشنامه طراحی شد. شناسنامه ای از یک زمین لغزش قابل اعتماد است که تمام اطلاعات ممکن با دقت در آن ذکر شده باشد. قبل از هر نوع تحلیلی از زمین لغزش و ارتباط آن با شرایط محیطی

باید داده‌های شناسنامه‌ها، همچون توزیع مکانی، تاریخچه فعالیت، مورفومتری و ... آنها در دست باشد. زمین لغزش های فعال حوضه سد ایلام با استفاده از عملیات میدانی شناسایی شده و زمین لغزش ها کدبندی و شماره گذاری شده اند و همه اطلاعات موجود در پرسشنامه شامل مشخصات زمین لغزش، تاریخ وقوع لغزش، زمین شناسی، ژئومتری با استفاده از دستگاه GPS، عوامل فرسایش و داده هایی که به رابطه زمین لغزش و رسوبدهی کمک می نماید جمع آوری شده و در نهایت نقشه پراکنش مکانی زمین لغزشها به صورت رقومی و در قالب سیستم GIS تهیه شده است. در این تحقیق سعی شده است که رابطه زمین لغزش و تاریخ وقوع زمین لغزش با مقدار رسوبدهی بررسی شود به همین منظور مهمترین عامل در این رابطه که تاریخ وقوع زمین لغزش، حجم و میزان زمین لغزش می باشد جهت مقایسه با میزان افزایش رسوب در ایستگاه هیدرومتری و مقایسه روند تغییرات جریان تحت عنوان رابطه دبی رسوب و دبی آب جمع آوری و در طول دوره آماری تجزیه و تحلیل شده است.

### برآورد دبی رسوب

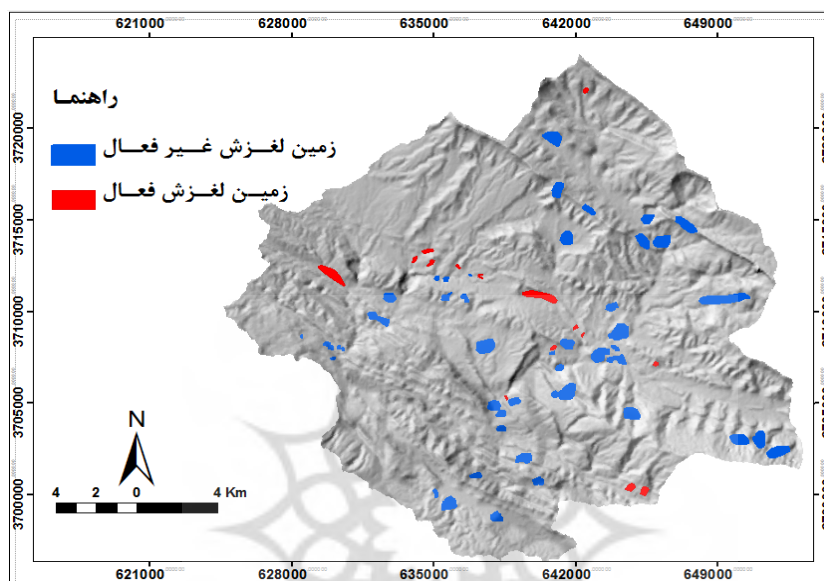
برای برآورد بار رسوب معلق روشهای متعددی وجود دارد که در این پژوهش از رابطه توانی بین دبی جریان و دبی رسوب معلق که به منحنی سنج رسوب معروف است استفاده شده است. در ابتدا میزان رسوب روزانه، ماهانه و سالانه در کل دوره آماری محاسبه گردید سپس جهت ترسیم منحنی سنج رسوب نیز روش حدوسط بکار برده شد. منحنی سنج رسوب با استفاده از دادههای آماری دبی جریان و دبی رسوب ترسیم میشود. برای ترسیم منحنی سنج رسوب سری دادهها برای یک دوره آماری مورد استفاده قرار گرفت. براساس دادههای ایستگاه هیدرومتری موجود، که در آن سالیانه دبی رسوب همزمان با دبی آب در چند نوبت ثبت گردیده است، منحنی سنج رسوب در مقیاس لگاریتمی رسم شد. به دلیل اینکه اندازه گیریها در ایستگاه رسوبسنجی فقط چند بار در سال انجام گرفته است لذا باید با برازش دادهها رابطه نمایی بین دبی رسوب و دبی جریان تعیین گردد یکی از سادهترین روشهای آزمون همگنی دادهها آزمون رشتها<sup>۱</sup> از روشهای آماری غیر پارامتری است (عربخدری و همکاران، ۲۰۱۰). این آزمون با استفاده از نرم افزارنسخه ۱۶ Spss انجام گرفت.

### الگوی تحلیل فضایی زمین لغزش های سطح حوضه سد ایلام

شناخت الگوها و کشف روابط متغیر وابسته زمین لغزش و روند های موجود در داده های فضایی و متغیر های مستقل از اهمیت زیادی در این تحقیق برخوردار است. اینکه زمین لغزش ها چگونه در سطح حوضه آبخیز توزیع شده اند و آیا توزیع زمین لغزشها از الگوی خاصی پیروی می کند، روند داده ها چگونه است به چه شکلی توزیع فضایی زمین لغزش ها با رسوب زایی در ارتباط می باشد و... جهت پاسخگویی به سئوالات مطرح شده مدلهای توزیع الگوی فضایی بررسی شده و با استفاده از بهترین مدل الگوی توزیع فضایی زمین لغزش های سطح حوضه آبخیز سد شناسایی و معرفی شده است. بطور کلی الگوهای توزیع فضایی عبارتند از: متوسط نزدیکترین فاصله همسایگی، خوشه بندی، خوشه بندی زیاد و کم، خوشه بندی چند فاصله ای، خود همبستگی فضایی (عسگری، ۲۰۱۲).

### نحوه اجرای تحلیل شاخص موران (Moran) در ArcGIS

برای اجرای این ابزار ابتدا جعبه ابزارهای تحلیل های آماری فضایی<sup>۱</sup> را انتخاب و سپس تحلیل الگوها<sup>۲</sup> بسط داده و آنگاه خود همبستگی فضایی<sup>۳</sup> را انتخاب می کنیم (عسگری، ۲۰۱۲). در این ابزار هدفمان آن است که ببینیم آیا تعداد زمین لغزش ها در زیرحوضه های مختلف سد ایلام از خود همبستگی فضایی برخوردار است و یا خیر. در جعبه مربوطه اطلاعات مورد نیاز را وارد و گزینه های مناسب را انتخاب می کنیم. در قسمت Feature class Input لایه زمین لغزش را جهت تحلیل خودهمبستگی فضایی انتخاب نمودیم شکل ۲.



شکل (۲) زمین لغزش های حوضه آبخیز سد ایلام

### مدل منطق فازی

جهت اجرای مدل، عوامل موثر در خطر زمین لغزش عبارت از: شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از شبکه جاده ای و فاصله از گسل در سه مرحله رستری نمودن لایه ها، دادن توابع فازی به هر لایه، وزن دهی لایه ها انجام شد. بعد از همپوشانی لایه ها بهترین عملگر فازی که با نقشه پهنه بندی زمین لغزش از دقت بالایی برخوردار بود عملگر فازی ۰/۹ می باشد. با این مدل مناطق دارای زمین لغزش از تجمع پیکسل های لغزشی در سطح حوضه تحلیل شد و با نتایج دیگر مدلها مقایسه شد (صفاری، و هاشمی، ۲۰۱۶).

### شرح و تفسیر نتایج

نتایج تحلیل خود همبستگی فضایی زمین لغزش های حوضه سد ایلام

تحلیل خود همبستگی فضایی دو نوع خروجی به صورت گرافیکی و عددی ارائه می نماید. خروجی گرافیکی نشان می دهد که آیا داده ها پراکنده و یا خوشه بندی شده هستند. شکل ۳ فیلدهای معرفی شده جهت تحلیل فضایی زمین لغزش ها را نشان می دهد، در این تحلیل چنانچه در شکل ۴ نشان داده شده است تعداد زمین لغزش ها در مناطق

<sup>۱</sup> Spatial Statistics Tooles

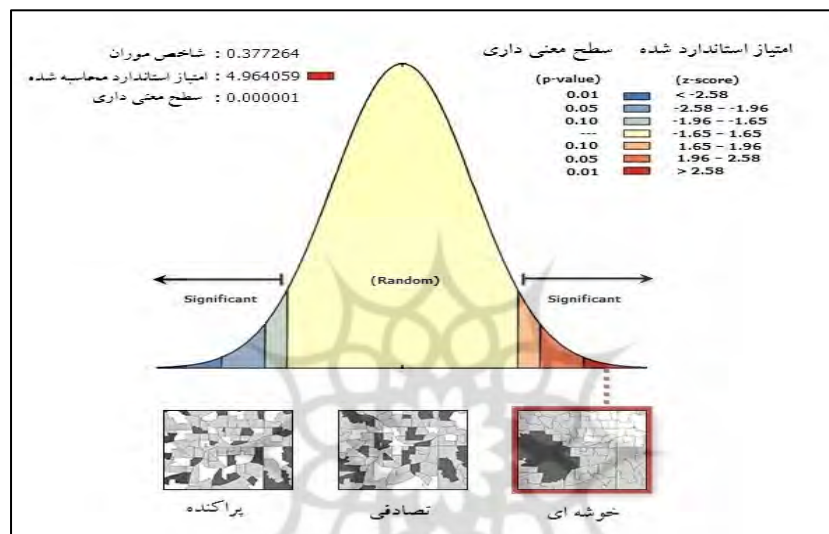
<sup>۲</sup> Analyzing Patterns

<sup>۳</sup> spatialautocorrelation

مختلف حوضه سد ایلام دارای خودهمبستگی فضایی می باشند. علاوه بر این خروجی ها به صورت عددی نیز در شکل ۵ نمایش داده شده اند.

Input Feature Class:	landslide
Input Field:	ORIG_FID
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	EUCLIDEAN
Standardization:	Row

شکل (۳) فیلدهای معرفی شده در دستور



شکل (۴) تحلیل موران از نقاط لغزشی

Global Moran's I Summary	
Moran's Index	0.377264
Expected Index	-0.015625
Variance	0.006264
z-score	4.964059
p-value	0.000001

شکل (۵) نتایج تحلیل خود همبستگی فضایی

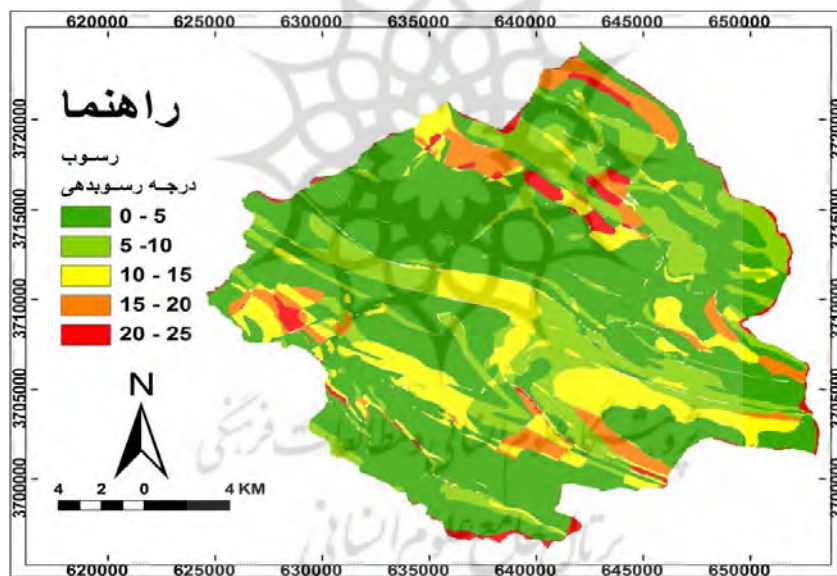
بطور کلی اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد مثبت یک (+۱) باشد داده ها دارای خود همبستگی و دارای الگوی خوشه ای بوده و اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد منفی یک (-۱) باشد آنگاه داده ها از هم گسسته و پراکنده می باشند. البته این مقدار از نظر معناداری آماری سنجیده می شود.

در مورد این ابزار فرضیه صفر آن است که هیچ نوع خوشه بندی فضایی بین مقادیر خصیصه مرتبط با عوارض جغرافیایی مورد نظر وجود ندارد. حال زمانیکه مقدار **P-Value** بسیار کوچک و مقدار **Z** محاسبه شده (قدر مطلق آن) بسیار بزرگ باشد (خارج از محدوده اطمینان قرار میگیرد) آنگاه می توان فرضیه صفر را رد کرد اگر مقدار شاخص

موران بزرگتر از صفر باشد، داده ها نوعی خوشه بندی فضایی را نشان می دهند. اگر مقدار شاخص کمتر از صفر باشد عوارض مورد مطالعه دارای الگوی پراکنده می باشند (عسگری، ۲۰۱۲). در این تحلیل چنانچه ملاحظه می شود شاخص موران  $0.377264$  می باشد واز آنجا که مقدار آن ثابت و بالای صفر است می توانیم نتیجه بگیریم که داده ها دارای خودهمبستگی فضایی هستند. اگر قرار بود این داده ها به طور نرمال در فضا پخش شده باشند شاخص باید مقدار منفی را اختیار می نمود همچنین با استناد به بالا بودن امتیاز استاندارد  $Z$  و بسیار کوچک بودن مقدار  $P$  Value می توان فرضیه عدم وجود خود همبستگی فضایی بین داده ها را رد نمود.

### نتایج مدل MPSIAC

پس از ورود لایه های اطلاعاتی به محیط (GIS) و تلفیق ۹ لایه اطلاعاتی مدل MPSIAC، حوضه به ۲۱۶ واحد رسوب زا تفکیک گردید. حداقل و حداکثر میزان رسوب تولیدی در این واحدها به ترتیب  $2/3$  و  $22/7$  تن در هکتار در سال و میانگین کل رسوب تولیدی حوضه در مدل MPSIAC در زیر حوضه گل گل معادل  $13/3$  تن در هکتار در سال در زیر حوضه چاويز  $10/3$  تن در هکتار در یکسال و در زیر حوضه اما (ملکشاهی)  $4/4$  تن در هکتار در یکسال برآورد گردیده است شکل ۶ نقشه کلاس رسوبدهی حوضه سد ایلام را نشان می دهد.



شکل (۶) نقشه رسوبدهی حوضه آبخیز سد ایلام (واحد تن در هکتار)

### نتایج مدل EPM

با اجرای مدل EPM رسوب ویژه در زیر حوضه گل گل  $997$  مترمکعب در کیلومترمربع در سال ( با توجه به وزن مخصوص رسوبات) معادل  $12/7$  تن رسوب در هکتار در سال برآورد گردید. رسوب ویژه در زیر حوضه چاويز  $783$  مترمکعب در کیلومترمربع در سال ( با توجه به وزن مخصوص رسوبات) معادل  $9/3$  تن رسوب در هکتار در سال برآورد گردید. رسوب ویژه در زیر حوضه اما (ملکشاهی)  $497$  مترمکعب در کیلومترمربع در سال ( با توجه به وزن مخصوص رسوبات) معادل  $6/4$  رسوب تن در هکتار در سال برآورد گردید.

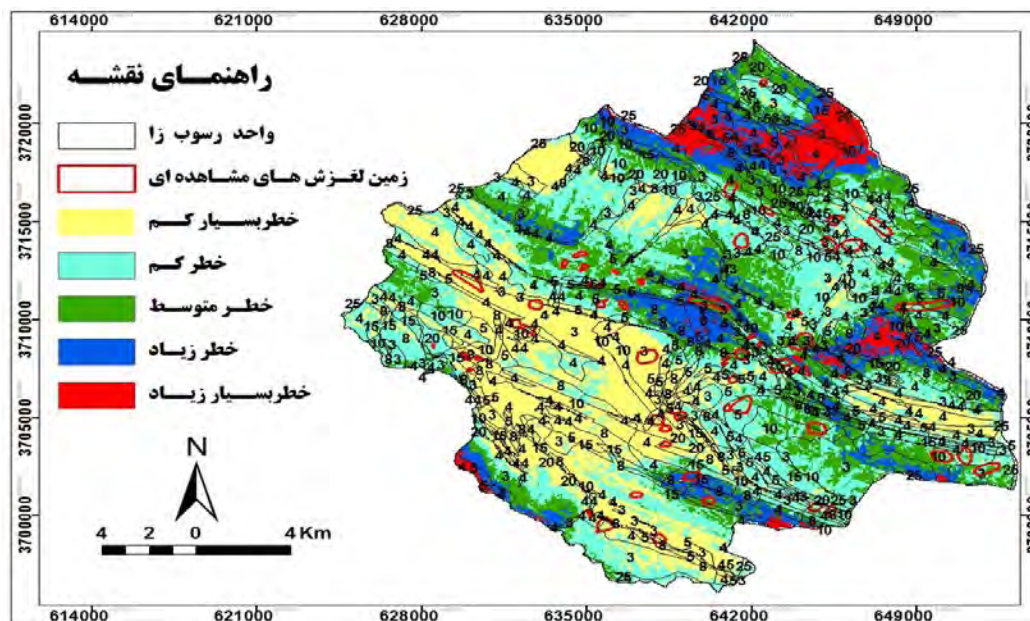


### نتایج مدل منحنی سنجه دبی - رسوب

با اجرای مدل هیدرولوژیکی منحنی سنجه دبی - رسوب با تحلیل آماری داده های دبی آب و دبی رسوب در طول دوره آماری میانگین رسوب در طول دوره آماری در ایستگاه هیدرومتری زیرحوضه گل گل ۱۸/۸ تن در هکتار، ایستگاه چاویز ۱۰/۴ تن و ایستگاه اما (ملکشاهی) ۰/۹ تن رسوب در هکتار در سال محاسبه شد.

### تلفیق لایه های خروجی مدل ها

با تلفیق لایه پیکسلی خروجی مدل منطق فازی با لایه واحد های رسوب زا حاصل از مدل های تجربی فرسایش خاک با محاسبات پیکسل های لغزشی و غیر لغزشی از میزان پیکسل های فرسایشی دیگر عوامل نتایج کیفی و کمی از فرسایش خاک و زمین لغزش در سطح حوضه تحلیل شد. تلفیق لایه واحد رسوب زا، لایه پتانسیل خطر زمین لغزش و لایه زمین لغزش های مشاهده ای در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در نتایج مدل MPSIAC توزیع داده شد حوضه به ۲۱۶ واحد رسوب زا تفکیک شد که این واحدها از ۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۲۵ تن در هر هکتار در سال کلاس بندی شده است. که ۷۵ درصد زمین لغزش ها در واحدهای رسوب زا بین ۱۵ تا ۲۵ تن رسوب در هکتار در سال در سطح حوضه توزیع شده اند. نتایج مدل های روش تحقیق، افزایش رسوب مشاهده ای در دو ایستگاه گل گل و چاویز نسبت به رسوب برآوردی و کاهش رسوب مشاهده ای زیر حوضه اما (ملکشاهی) نسبت به رسوب برآوردی مدل های تجربی کاملاً واضح و روشن است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزایش رسوب در زیر حوضه های گل گل و چاویز مربوط به رخدادهایی است که در این دو زیر حوضه به وقوع پیوسته است. با توجه به همپوشانی نقشه های واحدهای رسوب زایی خروجی مدل تجربی و نقشه مناطق خطر زمین لغزش خروجی مدل منطق فازی و نقشه پراکنش زمین لغزش ها در سطح حوضه آبخیز سد ایلام، یافته های این قسمت تحقیق نشانگر رخدادهای زمین لغزش در سطح حوضه است، در این راستا بررسی زیر حوضه ها به تفکیک از لحاظ زمین لغزش فعال و تاریخ دقیق رخداد زمین لغزش با داده های دبی و رسوب ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری هر زیر حوضه، اطلاعات دقیق تری از رسوب زایی کمی زمین لغزش ها ارائه خواهد شد.



شکل (۷) تلفیق لایه فازی خطر زمین لغزش با واحد رسوب زا تن در هکتار و زمین لغزش های مشاهده ای در حوضه سد ایلام

### حجم و مقدار زمین لغزش در زیر حوضه ها

از بین ۶۴ نقطه زمین لغزشهای قدیمی و جدید که در حوضه سد ایلام شناسایی شد. مشخصات ۱۶ زمین لغزش فعال ثبت گردید که در زیر حوضه گل گل ۹ رخداد زمین لغزش در سالهای ۱۳۶۶، ۱۳۷۱، ۱۳۷۲، ۱۳۷۳، ۱۳۷۶، ۱۳۷۵، ۱۳۸۰، ۱۳۷۹، ۱۳۸۸ و در زیر حوضه چلوپیز ۷ رخداد زمین لغزش در سالهای ۱۳۸۲، ۱۳۸۳، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸، ۱۳۸۸، ۱۳۸۸، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ طبق تحقیقات بعمل آمده محلی از پرسشنامه، اطلاعات اداره کل راه و ترابری و تحلیل تاریخی تصاویر ماهواره ای زمان رخداد زمین لغزش ثبت شده بود و با پیک رسوبی طول دوره آماری برآورد رسوب در زیرحوضه ها تقریباً همزمانی داشت. با استفاده از محاسبات مساحت زمین لغزش، طول و عرض زمین لغزش و میزان گسیختگی زمین لغزش اطلاعات جمع آوری شده شناسنامه زمین لغزشها و اندازه گیریهایی ابعاد فیزیکی زمین لغزشها، عمق زمین لغزش، حجم زمین لغزش و تبدیل حجم به تن از وزن واحد حجم خاک  $V=1.4$  مواد زمین لغزش جهت مقایسه با میزان بار رسوب خروجی زیر حوضه ها در ایستگاه هیدرومتری و مقدار زمین لغزش محاسبه که نتایج در (جداول ۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱) حجم و مقدار زمین لغزش های زیر حوضه سرجوی گل گل حوضه سد ایلام

کد لغزش	زمان رخداد زمین لغزش	حجم زمین لغزش به $m^3$	زمین لغزش به (ton)	واحد رسوبزا مدل تجربی $(t/h/y)$	پهنه مدل منطق فازی	زمان تمرکز به ساعت
1	2/10/1366	2915000	4081000	۲۵ تا ۲۰	خطر متوسط	3/16
2	13/08/1376	186588000	261223200	۵ تا ۱۰	خطر متوسط تا زیاد	1/28
3	<b>25/07/1373</b>	800000	1126000	۵ تا ۱۰	خطر کم	0/59
4	28/01/1371	600000	980000	۵ تا ۱۰	خطر کم	0/98
5	2/02/1372	3450000	4830000	۱۰ تا ۵	خطر زیاد	0/58
6	25/01/1375	17748000	24847200	۲۵ تا ۲۰	خطر کم	1/21
7	21/12/1383	14580000	20412000	۲۵ تا ۲۰	خطر کم	1/21

36/0	خطر خیلی کم	۵ تا ۰	1071000	765000	13/11/1388	15
54/1	خطر زیاد	۵ تا ۰	1264578	903270	17/10/1380	16
			322364000	227446000		جمع کل

جدول (۲) حجم و مقدار زمین لغزش‌های زیر حوضه چاويز حوضه سد ایلام

کد لغزش	زمان رخداد زمین لغزشی	حجم زمین لغزش به (متر مکعب)	زمین لغزش به (تن)	واحد رسوبزا مدل تجربی (t/h/y)	مدل منطبق فازی	زمان تمرکز به ساعت
8	14/10/1382	130419000	182586600	۵ تا ۰	خطر کم	0/23
9	13/11/1388	10858000	15201200	۵ تا ۰	خطر کم	1/18
10	18/6/1386	4914000	6879600	۱۰ تا ۵	خطر متوسط	0/50
11	23/11/1387	5428000	7599200	۱۰ تا ۵	خطر متوسط	0/56
12	5/9/1383	1265000	1771000	۱۰ تا ۵	خطر متوسط	11/0
13	8/12/1388	440000	616000	۱۰ تا ۵	خطر متوسط	0/88
14	5/10/1394	1008000	1411200	۱۰ تا ۵	خطر متوسط	0/88
جمع کل		154332000	216064800			

## تحلیل ارتباط دبی آب- دبی رسوب با زمین لغزش

مقایسه روند تغییرات دبی آب به دبی رسوب روزانه در سه ایستگاه، گل گل، چاويز و اما(ملکشاهی) نشان میدهد که تغییرات میزان مواد معلق عبوری از محل ایستگاهها کاملاً تابع دبی جریان میباشد. اما تغییرات افزایشی مکرر در میزان رسوب ایستگاه گل گل و چاويز در طول دوره آماری در سالهای ۱۳۶۵-۶۷ و ۱۳۶۹-۷۰ و ۱۳۷۱-۷۴ و ۱۳۸۲-۸۸ و ۱۳۹۲ نسبت به ایستگاه اما(ملکشاهی) نشان دهنده ناهنجاری‌های آشکار در میزان رسوب آنها میباشد. همزمانی وقوع زمین لغزش‌های فعال در طول دوره آماری در سالهای افزایش ناگهانی رسوب در زیر حوضه‌های گل گل و چاويز رابطه معنی داری است که باتوجه به ثبت اطلاعات دقیق ۱۶ رخداد زمین لغزش فعال در سطح حوضه مقدار کمی رسوب زایی زمین لغزش‌ها محاسبه شده است. میانگین رسوب دوره آماری در ایستگاه گل گل ۳۱۵/۸۵ تن می‌باشد و میانگین دبی پیک رسوب دوره آماری ایستگاه مذکور ۷۵۰۸۸/۱۹ می‌باشد. میانگین رسوب دوره آماری در ایستگاه چاويز ۲۴/۲۰ تن می‌باشد و میانگین دبی پیک رسوب دوره آماری ایستگاه مذکور ۱۹۹۰۷/۳۰ می‌باشد.

رابطه ۱: میانگین بار معلق عبوری دوره آماری- میانگین دبی پیک بار معلق دوره آماری همزمان با رخداد

زمین لغزش = مقدار بار معلق رخداد زمین لغزش سطح حوضه

$$75088/19 - 315/85 = 74772/34$$

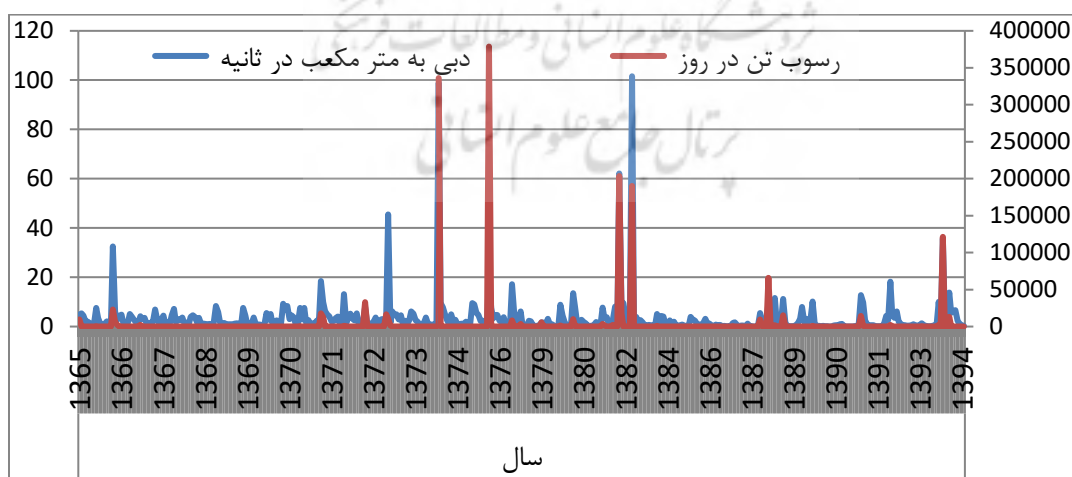
مقدار بار معلق زمین لغزش زیر حوضه گل گل

$$19907/30 - 24/20 = 19887$$

مقدار بار معلق زمین لغزش زیر حوضه چاويز

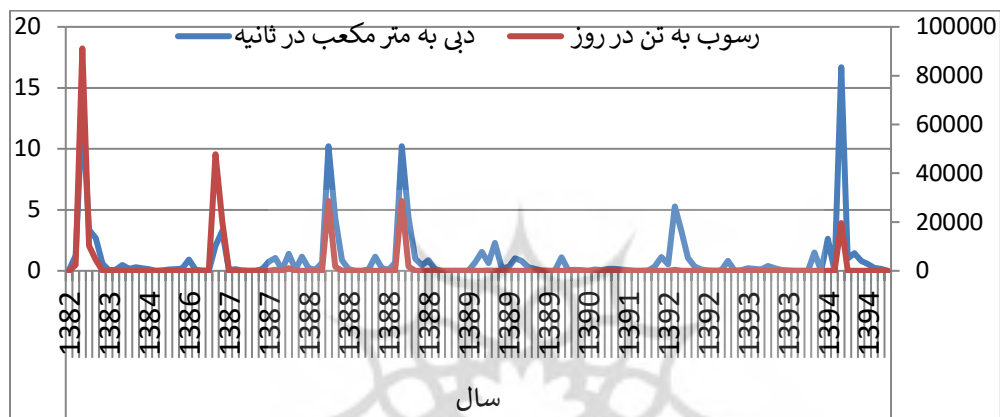
مساحت زیر حوضه گل گل حدود ۲۹۰۰۰ هکتار و مساحت زمین لغزش‌های فعال در حدود ۱۰۰ هکتار می‌باشد. طبق محاسبات ۷۴۷۷۲/۳۴ تن رسوب معلق عبوری پیک رسوبی است که در ایستگاه هیدرومتری گل گل ثبت شده است (تحلیل آمار دبی آب و دبی رسوب شرکت آب منطقه ای ایلام) که با ضریب ۱/۴ تبدیل بار معلق به رسوب دهی (رفاهی، ۱۳۷۵) تقریباً معادل ۱۰۴۶۸۱ تن رسوبزایی زمین لغزش‌ها را در این زیر حوضه نشان میدهد که این مقدار رسوب نتیجه ۱۰۰ هکتار زمین لغزش می‌باشد بنابراین هر هکتار زمین لغزش در حدود ۱۰۴۶/۸۱ تن رسوب بطور

میانگین رسوبدهی داشته است که در ایستگاه هیدرومتری گل گل ثبت شده است. مساحت زیر حوضه چاويز در حدود ۱۴۰۰۰ هکتار و مساحت زمین لغزش‌های فعال این زیر حوضه در حدود ۶۵ هکتار می‌باشد. طبق ثبت داده‌های دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری چاويز ۱۹۸۸۷ تن بار رسوب معلق است که با ضریب ۱/۴ معادل ۲۷۸۴۲ تن رسوبزایی زمین لغزش‌ها را در این زیر حوضه نشان می‌دهد یعنی معادل هر هکتار زمین لغزش ۴۲۸/۳۳ تن رسوب دهی می‌باشد. تغییرات ناگهانی رسوبدهی در ایستگاه‌های هیدرومتری زیرحوضه‌ها با یک سیستم مورفولوژیک حاکم بر حوضه آبخیز سد ایلام هم از لحاظ کیفی این فرایند را تایید می‌کند. وقوع زمین لغزش‌ها بر روی دامنه‌های پرشیب با مواد خاکی و زیرشویی کناری آبراهه‌های اصلی که موجب شده زمین لغزش مستقیماً وارد آبراهه شود عاملی است که این فرایند را تشدید می‌کند. میزان چند برابری زمین لغزش‌ها نسبت به میزان رسوبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری با کسر عملیات عمرانی طبق اطلاعات جمع آوری شده در نمودارها و جداول و نقشه‌های مربوطه از لحاظ کمی و کیفی با احتساب انواع فرسایش در سطح حوضه، نمود و تاثیر زمین لغزش را در زیر حوضه‌ها و حوضه سد ایلام نمایان ساخته است. البته نمودار و جداول سال‌های آماری به تفکیک در پیوست آمده است. بر اساس آمار داده‌های آبی روزانه در طول دوره آماری ۲۹ ساله در ایستگاه هیدرومتری گل گل ۱۵۵۶۸۶۰ تن بار رسوب معلق عبوری ثبت شده است از این مقدار ۸۹۴۰۷۸ تن بار رسوب معلق عبوری مربوط به ۹ سال دارای رخداد زمین لغزش ۱۳۶۶، ۱۳۷۱، ۱۳۷۲، ۱۳۷۳، ۱۳۷۶، ۱۳۷۵، ۱۳۷۸، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۸ می‌باشد. میانگین دبی پیک رسوبی معادل ۱۰۹۷۵۵ تن رسوب می‌باشد که میانگین دبی آب متناظر معادل ۲۷/۹۸ مترمکعب در ثانیه است که این مقدار از رسوب معلق عبوری کسر شده است و مقدار رسوب اضافه بر میانگین دبی نرمال برابر ۷۸۴۳۲۳ تن بار رسوب معلق عبوری می‌باشد. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که در زیرحوضه گل گل ۵۰/۳۷ درصد افزایش رسوب مربوط به رخدادهای زمین لغزش ۹ سال ذکر شده می‌باشد. یعنی افزایش ۹/۴ تن بار رسوب در هر هکتار در یکسال اضافه بر ۱۸/۸ تن رسوب مشاهده‌ای بنابراین در حدود ۲۸/۲ تن بار رسوب ویژه در هر هکتار در یک سال وارد سد ایلام می‌شود و این مقدار تقریباً دو برابر نتایج مدل‌های تجربی می‌باشد، بنابراین در حوضه‌های دارای لغزش برآورد رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد.



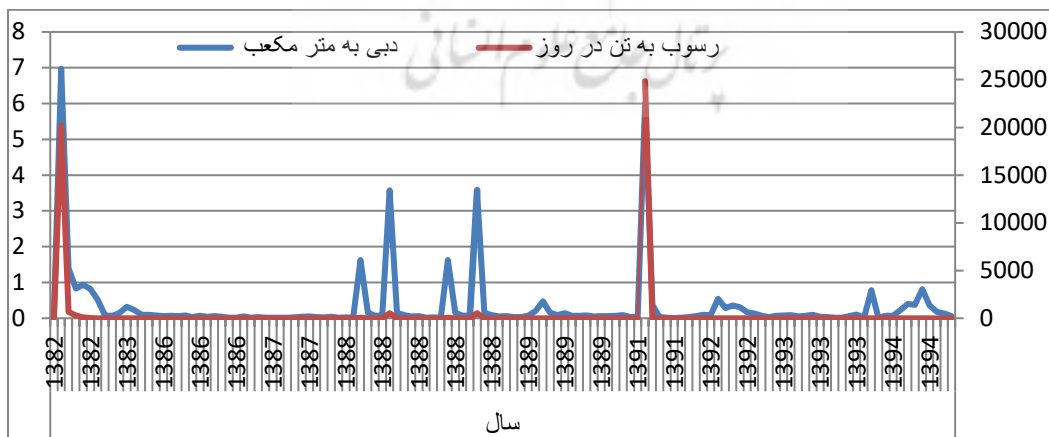
شکل (۸) نمودار دوره آماری دبی رسوب روزانه حوضه آبخیز گل گل از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴

زیر حوضه چاويز هم در بعضی سالهای آماری دبی آب و دبی رسوب روزانه از رابطه همبستگی مستقیم و نرمالی برخوردار نیست و در بعضی سالها پیکهای رسوب روند افزایشی نسبت به جریان متعارف داشته‌اند که این خود نشانگر رخدادهایی در سطح این زیر حوضه می‌باشد. بر اساس آمار داده‌های آبی در طول دوره آماری ۱۳ ساله در ایستگاه هیدرومتری چاويز در کل دوره ۲۶۰۳۸۳ تن بار رسوب معلق عبوری ثبت شده است از این مقدار ۱۱۹۴۴۳ تن بار رسوب معلق عبوری مربوط به ۷ رخداد زمین لغزش سالهای، ۱۳۸۶، ۱۳۸۳، ۱۳۸۲، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ می‌باشد. میانگین پیک رسوبی معادل ۱۹۹۷۰ تن بار رسوب معلق عبوری است که از مقدار رسوب مربوط به ۷ رخداد زمین لغزش کم شده است و معادل ۹۹۴۷۳ تن بار رسوب معلق عبوری است. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که در زیر حوضه چاويز ۲/۳ درصد افزایش رسوب مربوط به ۷ رخداد زمین لغزش ذکر شده است.

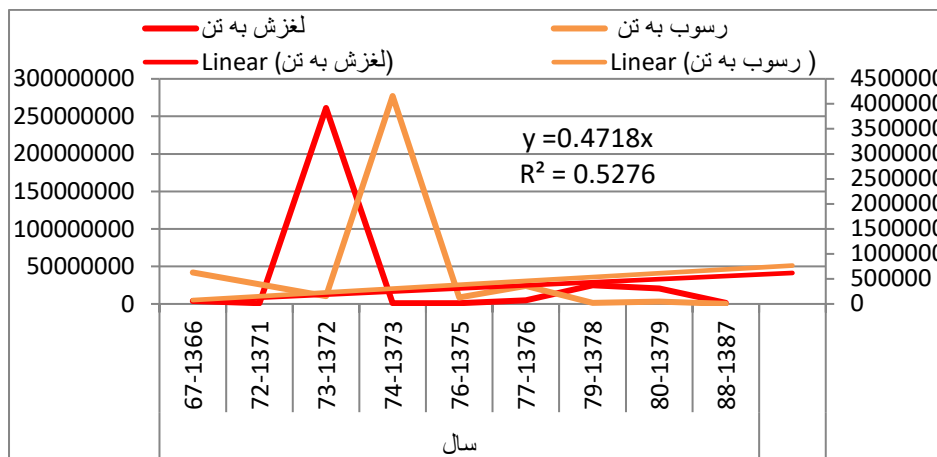


شکل (۹) نمودار دوره آماری دبی رسوب روزانه حوضه آبخیز چاويز از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴

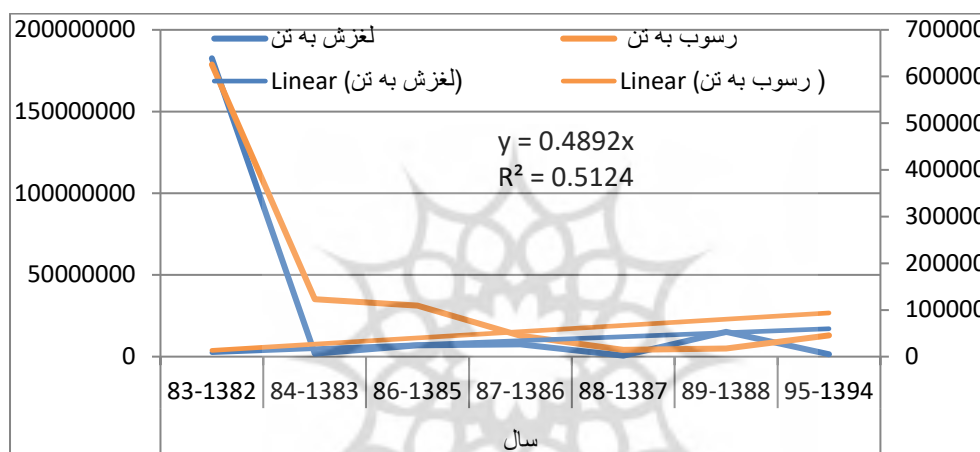
زیر حوضه اما (ملکشاهی) دبی آب و دبی رسوب از روند متعارف و از همبستگی مستقیمی برخوردار است و در هیچ سالی تغییرات معکوس یا غیر نرمال در این رابطه همبستگی مشاهده نمی‌شود بنا براین هیچ رخدادی در سطح حوضه در طول دوره آماری موجود مورد انتظار نیست و سال ۱۳۹۱ پیک دبی آب بسیار بالا در مقابل پیک رسوب نشان داده که اگر رسوبی در مسیر جریان آب نباشد دبی آب نمی‌تواند به تنهایی دبی رسوب را بالا ببرد شکل ۱۰.



شکل (۱۰) نمودار دوره آماری دبی رسوب روزانه حوضه آبخیز اما (ملکشاهی) از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴



شکل (۱۱) ارتباط میانگین سالانه رسوب و زمین لغزش در زیر حوضه گل گل



شکل (۱۲) ارتباط میانگین سالانه رسوب و زمین لغزش در زیر حوضه چاويز

### نتیجه گیری

ارزیابی کمی رسوب زایی زمین لغزش‌ها با نتایج منطقی و ضریب اطمینان معنی دار در حوضه آبخیز مساله پیچده‌ای است. هدف این تحقیق برآورد کمی رسوب زایی زمین لغزش‌ها است. در این تحقیق برای اولین بار با استفاده از یک روش جدید بر اساس داده‌های رسوب سنجی ایستگاه‌های هیدرومتری و میزان آمار رسوب روزانه و سالانه در طول دوره آماری رابطه زمین لغزش و رسوب با استفاده از دو مدل تجربی در برآورد فرسایش خاک و رسوب و مدل هیدرولوژیکی منحنی سنجه حدوسط دبی - رسوب در برآورد رسوب و تحلیل فضایی زمین لغزش‌ها از روش خودهمبستگی فضایی موران و مدل منطق فازی در معنی داری روابط متغیرها در تحلیل خوشه‌ای زمین لغزش‌ها در سطح حوضه و تطبیق با واحدهای رسوب زا منتج شده از مدل تجربی برآورد فرسایش و رسوب با محاسبات حجم و مقدار زمین لغزش‌ها، رابطه مکانی و زمانی رخداد زمین لغزش و دبی پیک رسوب، محاسبات رسوب زایی دیگر عوامل با کسر و تعدیل از میزان رسوب دهی، سه زیر حوضه سد ایلام جهت تحلیل کمی رسوب زایی زمین لغزش بررسی شد که این روش از نتایج تحقیق می‌باشد. طبق محاسبات  $74772/34$  تن رسوب معلق عبوری پیک رسوبی است، که در ایستگاه هیدرومتری گل گل ثبت شده است، که با ضریب  $1/4$  تبدیل بار معلق به رسوب دهی تقریباً معادل  $104681$  تن رسوب‌زایی زمین لغزش‌ها را در این زیر حوضه نشان میدهد که این مقدار رسوب نتیجه  $100$  هکتار زمین لغزش

می‌باشد بنابراین هر هکتار زمین لغزش در حدود ۱۰۴۶/۸۱ تن رسوب بطور میانگین رسوبدهی در ایستگاه هیدرومتری گل‌گل برآورد شده است. طبق ثبت داده‌های دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری چاوین ۱۹۸۸۷ تن بار رسوب معلق است که با ضریب ۱/۴ معادل ۲۷۸۴۲ تن رسوبزایی زمین لغزش‌ها را در این زیر حوضه نشان می‌دهد یعنی معادل هر هکتار زمین لغزش ۴۲۸/۳۳ تن رسوب دهی می‌باشد. در مجموع ۱۲۳۷۳۱۴ تن رسوب دهی زمین لغزش هر دو زیر حوضه وارد سد ایلام شده است. پیشنهاد می‌شود جهت برآورد رسوب زایی زمین لغزش در حوضه آبخیز از روش این تحقیق استفاده شود. مدل‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب در حوضه‌های دارای زمین لغزش کارایی مناسبی ندارند. بهترین راه کار کنترل رسوب زایی زمین لغزش‌ها و فرسایش خاک در حوضه سد ایلام شناسایی گونه‌های پوشش گیاهی (مرتعی، درختچه‌ای و جنگلی) سازگار بر روی واحدهای رسوب‌زا و دارای زمین لغزش فعال و توسعه این گونه‌ها با عملیات بیولوژیکی مناسب توسط دستگاه اجرایی در یک برنامه بلند مدت پیشنهاد می‌شود.

### منابع

- رفاهی، حسینقلی. ۱۳۸۶. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۴۰ صفحه.
- صفاری، امیر؛ و معصومه هاشمی. ۱۳۹۵. پهنه بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با مدل‌های آنتروپی و منطق فازی مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه. فصلنامه جغرافیا و پایداری محیط، 34: 43-62.
- عربخردی، محمود؛ شاهرخ حکیم خانی و جواد وروانی. ۱۳۸۸. اعتبار روشهای برونیابی در برآورد میانگین رسوبدهی معلق سالانه (۱۷ ایستگاه هیدرومتری کشور). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، 3: 123-131.
- عسگری، شمس اله؛ محمدرضا ثروتی و محمدرضا جعفری. ۱۳۸۷. برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC. مجله پژوهشهای جغرافیایی، ۶۴: ۳۹-۵۶.
- عسگری، علی. ۱۳۹۰. تحلیل‌های آمار فضایی با *ARCGIS* انتشارات سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران، ۱۲۷ صفحه.
- شریعت جعفری، محسن و جعفر غیومیان. ۲۰۰۵. بررسی ارتباط و همبستگی بین رسوب دهی با گسیختگی شیب‌ها و رانش زمین در حوضه طالقان مرکزی. فصلنامه علوم زمین، ۹۷: ۵۵-۹۷.
- فیض‌نیا، سادات؛ علی کلارستانی، حسن احمدی و مهرداد صفایی. ۲۰۰۵. بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها و پهنه بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شیرین رود تجن). مجله منابع طبیعی ایران، 1: 5-1.
- یاراحمدی، جمشید و شهرام روستایی. ۲۰۱۵. شبیه‌سازی فرسایش و رسوب ناشی از زمین لغزش با استفاده از مدل GeoWEPP (مطالعه موردی: حوضه گرم‌چای میانه). تحقیقات ژئومورفولوژی کمی، 2: 133-119.

Bathurst, J.C., A. Burton, B.G. Clarke, F.Gallart. (2006). Application of the SHETRAN basin-scale, landslide sediment yield model to the Llobregat basin, Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, **20**: 3119–3138.

DOI: 10.1002/hyp. 6151.

Borgomeo, E., K.V. Hebdtich, A.C.Whittaker, L.Lonergan. (2014). Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, **226**: 148–161.

Chiou, S.J., C.T. Cheng, S.M. Hsu, Y.H. Lin, S.Y. Chi. (2007). Evaluating landslides and sediment yields induced by the chi-chi earthquake and followed heavy rainfalls along the Ta-Chia River. *Journal of GeoEngineering*, **2**: 73-82.

- Chuang S.C., H. Chen, G.W. Lin, C.W. Lin, C.P. Chang. (2009). Increase in basin sediment yield from landslides in storms following major seismic disturbance. *Engineering Geology*, **103**, 59–65.
- Claessens L., A. Knapen, M.G. Kitutu, J. Poesen, J.A. Deckers. (2007). Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon. *Geomorphology*, **90**: 23–35.
- Corominas, J., C. van Westen, P. Frattini, L. Cascini, J.-P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. Van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi, K. Pitilakis, M.G. Winter, M. Pastor, S. Ferlisi, V. Tofani, J. Hervás, J.T. Smith. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ*, **73**: 209–263.
- Cover, M., C. May, V. Resh, W. Dietrich. (2006). Technical Report on Quantitative Linkages Between Sediment Supply, Streambed Fine Sediment, and Benthic Macroinvertebrates in Streams of the Klamath National Forest United States Forest Service, Pacific Southwest Region, and Klamath National Forest. *Technical Report*, pp. 33.
- Dadson, S.J., N. Hovius, H.Chen, W.B. Dade, J.C. Lin, M.L. Hsu, C.W. Lin, M.J. Horng, T.C. Chen, J. Milliman, C.P. Stark. (2004). Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology*, **32**: 733–736. doi: 10.1130/G20639.1
- Feizizadeh, B., M. ShadmanRoodposhti, P. Jankowski, T. Blaschke. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers and Geosciences*, **73**:208–221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.001>.
- Hewitt, K., J.J. Clague, J.F. Orwin. (2008). Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes. *Earth Science Reviews*, **87**: 1–38.
- Hsu, S.M., H.Y. Wen, N.C. Chen, S.Y. Hsu, S.Y. Chi., (2012). Using an integrated method to estimate watershed sediment yield during heavy rain period: a case study in Hualien County, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **12**: 1949–1960.
- Korup, O., J.J. Clague. (2009). Natural hazards, extreme events, and mountain topography. *Quaternary Science Reviews*, **28**: 977–990.
- Mohammady, M., H.R. Pourghasemi, B. Pradhan. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, **61**: 221–236.