

## پایش زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری InSAR (مطالعه موردی: منطقه اهر تا ورزقان)

لیلا خدائی قشلاق<sup>۱</sup>  
شهرام روستایی<sup>۲</sup>  
داود مختاری<sup>۳</sup>  
خلیل ولیزاده کامران<sup>۴</sup>

### چکیده

زمین‌لغزش به علت ماهیت خطرناک خود در مناطق کوهستانی مورفولوژی را به طور ناگهانی برهم می‌زند و خسارت‌هایی عمده به مناطق مسکونی، جاده‌ها زمین‌های کشاورزی و ... وارد می‌کند. دید یکپارچه تصاویر سنجش از دور راداری آن را به ابزاری قدرتمند برای تهیه نقشه‌های پراکنش و ارزیابی خطر و ریسک وقوع زمین‌لغزش‌ها و ناپایداری‌ها در فواصل زمانی مختلف تکرار شونده تبدیل نموده است. از این رو این پژوهش با هدف شناسایی، پایش و سنجش خطرپذیری منطقه در برابر زمین‌لغزش‌ها در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ برای منطقه اهر- ورزقان در حوضه آبریز اهر چای با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی SAR به اجرا درآمد. بدین منظور تعداد ۱۰ تصویر راداری از سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT انتخاب و به روش InSAR پردازش شد. نتیجه پردازش‌های اولیه نشان داد که از بین زوج‌های تصویری تشکیل شده، ۸ تصویر انتخابی از سنجنده ASAR جهت استفاده در پردازش اینترفرومتری InSAR مناسب بودند. بر اساس نتایج پردازش تصاویر راداری، بیشترین میزان جابجایی صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه مربوط به سمت‌های شرق و غرب به صورت لغزش بوده است. نتایج این پژوهش حاکی از فعال بودن تنها برخی از زمین‌لغزش‌های موجود در جنوب منطقه در طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری است. همچنین نتایج نشان داد که داده‌های راداری و روش پردازش تداخل‌سنجی InSAR در شناسایی، پایش زمین‌لغزش‌ها و محاسبه میزان جابجایی آن‌ها از پتانسیل خوبی برخوردار است و جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر در این زمینه سودمندتر خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** اهر - ورزقان، تصاویر راداری، InSAR، زمین‌لغزش، سنجنده ASAR.

### مقدمه

حرکات توده‌ای از جمله پدیده‌های مورفودینامیک هستند که تحت تاثیر عوامل مختلفی در سطح دامنه‌های مناطق کوهستانی به وقوع می‌پیوندند و مهم‌ترین آن‌ها زمین‌لغزش در اشکال مختلف است. زمین‌لغزش‌ها را می‌توان به عنوان حرکت توده‌ای از سنگ، مواد

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته دکتری گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) Email: khodaeileila@yahoo.com - Tel:09379528176

<sup>۲</sup> استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

<sup>۴</sup> دانشیار گروه سنجش از دور GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

واریزه‌ای و یا بخشی از زمین در جهت شیب دامنه تعریف کرد (جردن<sup>۱</sup> و همکاران: ۱۹۹۶ و دائی<sup>۲</sup>: ۲۰۰۲ به نقل از یاراحمدی: ۱۳۹۲: ۴۵). این حالت مربوط به مناطقی است که در آن تنش برشی مواد بیشتر از مقاومت برشی آن باشد و در قالب واژه رایج ناپایداری دامنه‌ای<sup>۳</sup> از آن یاد می‌شود. بر اساس برآوردهای اولیه، سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارات مالی از طریق وقوع زمین‌لغزش‌ها بر کشور ما وارد می‌شود (کرم، ۱۳۸۰). کشور ایران به دلیل مساعد بودن شرایط جغرافیایی، ضعف مدیریت جامع و عدم رعایت آستانه‌های محیطی به عنوان یک کشور پرخطر بشمار می‌رود. بنابراین در مناطقی که خطر ناشی از زمین‌لغزش بالاست، روش‌های نقشه برداری در ارزیابی دقیق مکان شکستگی‌های شیب و اندازه زمین‌لغزش‌ها، همچنین برآورد میزان فعالیت و ویژگی‌های جابجایی آن‌ها بسیار لازم است. در اوایل، شناسایی لغزش‌ها بیشتر بر اساس تفسیر بصری زوج‌های استریووی عکس‌های هوایی و از طریق مشاهدات صحرایی صورت می‌گرفت. هرچند تفسیر بصری عکس‌های هوایی در ترکیب با بررسی‌های صحرایی، تا به امروز نیز یکی از منابع اصلی در نقشه برداری زمین‌لغزش‌ها باقی مانده است (هونگ<sup>۴</sup> و همکاران: ۲۰۰۷ به نقل از شیرانی: ۱۳۹۳: ۵۴). در دهه گذشته با فراگیر شدن ابزار GPS امکان پایش زمین‌لغزش با هدف رفتارسنجی مورد توجه قرار گرفت اما در سال‌های اخیر تکنیک دورسنجی راداری InSAR که قابلیت کار در تمام شرایط بد جوی و طول مدت شب و روز را دارد، از جمله تکنیک‌های موثر و کارآمد در پایش تغییرات آرام سطح زمین محسوب می‌شود. به گونه‌ای که این روش با برخورداری از پوشش زمینی وسیع و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، یکی از دقیق‌ترین (در مقیاس میلی‌متر) و کم‌هزینه‌ترین فنون سنجش از دور در شناسایی جابجایی‌های اتفاق افتاده در سطح زمین به کار رفته است (گابریل<sup>۵</sup> و همکاران: ۱۹۸۹). ساده‌ترین روش در این زمینه استفاده از حداقل دو تصویر حاصل از سنجنده‌های راداری با روزنه مصنوعی به صورت تداخل نگار است (ماسونت<sup>۶</sup> و همکاران: ۱۹۹۸). با توجه به پیشرفت‌های اخیر در تکنیک تداخل سنجی راداری InSAR، در زمینه شناسایی و پایش زمین‌لغزش‌ها پژوهش‌های متعددی انجام پذیرفته است. کاستاندا<sup>۸</sup> (۲۰۰۹) در مقاله‌ای با عنوان اندازه‌گیری‌های DInSAR دگرگونی سطح زمین ناشی از نشست زمین در اثر گودال‌ها، معدن‌کاری و زمین‌لغزش‌ها در رودخانه‌ی ایبرو<sup>۹</sup> اسپانیا، ۲۷ فریم تصویر راداری ERS از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ را با استفاده از تکنیک اینترفرومتری تفاضلی به روش SBAS تجزیه و تحلیل نموده، بزرگی و میزان جابجایی‌ها را در محدوده دگرگونی آشکار نمود. نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر نشان داد که بدلیل نبود یا کمبود کوهورنس<sup>۱۰</sup> در نواحی کشاورزی، اکثر گودال‌های فعال در دشت سیلابی و تراس‌های پایینی اتفاق می‌افتند که عمدتاً به کشت آبی اختصاص دارند. عثمان اوغلو<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۱) در رساله‌ی دکتری خود در دانشگاه میامی تحت عنوان کاربردها و توسعه‌ی الگوریتم‌های جدید برای آنالیز جابجایی‌ها با استفاده از سری‌های زمانی InSAR پرداخته است، ایشان مطالعه‌ی موردی خود را شهر مکزیکوستی انتخاب کرده است. و برای مطالعه‌ی میزان فرونشست در این شهر، بسیاری از سازه‌های ساخت بشر را به عنوان پراکنده ساز ثابت در

1 . Jordan

2 . Dai

3 . Slope instability

4 . Hong

5 . Global Poison system

6 . Gabriyel

7 . Massonet

8 .Castaneda

9 . Ebro

10 . Coherence

11 . OSMANOGLU



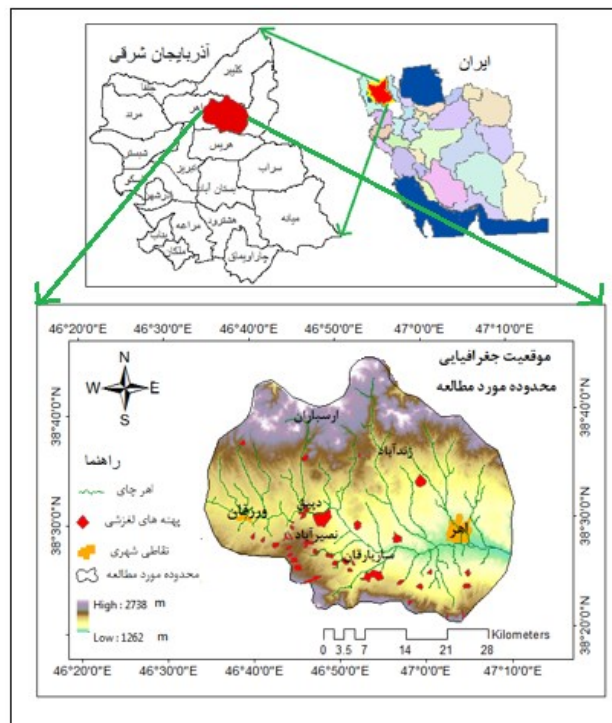
روش PSI انتخاب و به کار گرفت. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که مجموعه InSAR شامل ابعاد سه گانه (دو بعد مکانی و یک بعد زمانی) هستند. نکولا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به تجزیه و تحلیل داده‌های InSAR برای جابجایی زمین لغزش‌ها با استفاده از داده‌های سنتینل - ۱ در دامنه‌های شمال شرقی کوپو در شهر ایسای رومانی پرداختند. نهایتاً آنها به این نتیجه دست یافتند که منطقه ایسا تحت تاثیر حرکات آهسته زمین لغزش است که باعث می‌شود منطقه مورد مطالعه مکان مناسبی برای بررسی و ارزیابی تکنیک‌های فوق باشد. بر اساس نتایج حاصل شده در بخش قابل توجهی از منطقه سرعت جابجایی بیش از ۳ میلی‌متر در سال بود. این مقادیر نشان دهنده میانگین سرعت در راستای دید ماهواره و روند جابجایی سطح زمین در طول دوره مورد مطالعه بود. شی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی جابجایی زمین لغزش‌ها با استفاده از تکنیک تداخل سنجی پهناوی باند دو بخشی در منطقه سه جرح برای زمین لغزش شپینگ پرداختند. نتایج آنها حاکی از پتانسیل بالای تکنیک‌های فوق برای مطالعه جابجایی زمین لغزش‌ها بود. در منابع داخل کشور، شیرانی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی کارایی سنجنده های ASAR و PALSAR به کمک تداخل سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها در زاگرس پرداختند. آنها در این پژوهش با هدف مقایسه و ارزیابی دو سنجنده راداری در شناسایی، پایش و تهیه نقشه ثبت زمین لغزش در ارتفاعات دنای زاگرس واقع در جنوب استان اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی تصاویر ماهواره‌ای راداری با گشودگی ترکیبی (DInSAR) اجرا نمودند. شیرانی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین لغزش نقل، سمیرم) پرداختند. نتایج این پژوهش حاکی از فعال بودن توده لغزشی نقل در طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری است. لذا با توجه به اینکه تکنیک تداخل سنجی راداری یکی از روش‌های بسیار قدرتمند در تشخیص و پایش زمین لغزش‌ها نسبت به روش‌های کلاسیک و قدیمی می‌باشد در همین راستا، این پژوهش با هدف بررسی و پایش زمین لغزش‌های واقع در منطقه اهر - ورزقان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) انجام گرفت. همچنین فعالیت ناپایداری‌ها و لغزش‌های موجود و میزان جابجایی آنها در منطقه نیز مورد بررسی قرار گرفت.

### محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخشی از حوضه آبریز اهر چای با وسعتی معادل ۱۵۹۳ کیلومتر مربع می‌باشد و یکی از بزرگترین حوضه‌های آبریز استان آذربایجان شرقی است. این محدوده مطالعاتی در مختصات جغرافیایی ۳۵° ۴۶' تا ۱۰' ۴۷° طول شرقی و ۲۰' ۳۸° تا ۴۵' ۳۸° عرض شمالی گسترش یافته و از لحاظ ارتفاعی، دامنه‌های شمالی با ارتفاع بیش از ۲۷۳۰ متر و در منطقه آلپاوت و چالوق با ارتفاع کمتر از ۱۲۶۰ متر قرار گرفته است (روستائی، ۱۳۷۹: ۳۷). منطقه مذکور از شمال به جنگل‌های ارسباران، از شرق محدود به دامنه‌های شرقی کوه اورتات سخور، از غرب دامنه‌های شرقی کوه کهنه‌لو و از جنوب به حوضه آبی‌چای محدود می‌گردد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه از شهر ورزقان تا اهر را نشان می‌دهد. از نظر توپوگرافی، منطقه شامل واحد کوهستانی شمالی، واحد کوهستانی جنوبی، واحد پایکوهی و دشت اهر می‌باشد.

1 . Necula

2 . Shi



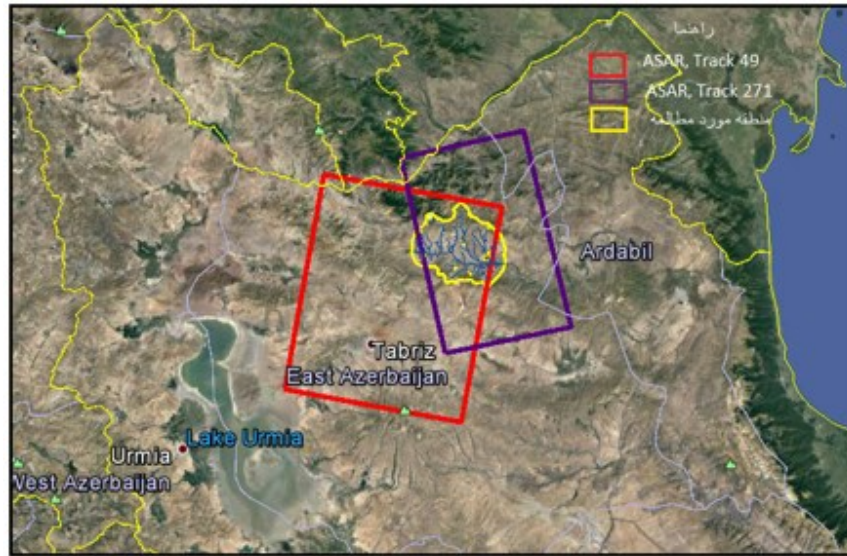
شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی مورد مطالعه (ماخذ : نگارنده)

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از انواع مختلف داده شامل تصاویر راداری ENVISAT- ASAR, و داده‌های برداشت شده از سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) در طی عملیات میدانی استفاده گردید. همچنین از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ مربوط به سازمان نقشه برداری کشور و نقشه‌های زمین شناسی ۱ : ۲۵۰۰۰۰ مربوط به سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور جهت بررسی زمین شناسی و مرفولوژی منطقه استفاده گردید. نرم افزارهای، ArcGIS, SAR scape نسخه ۵,۲ و نرم افزار ENVI5.3 به منظور انجام آماده سازی و پردازش تصاویر راداری و تهیه نقشه جابجایی مربوط به زمین لغزش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۱) داده‌های ارایه شده توسط آژانس فضایی اروپا برای استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. شکل (۲) موقعیت تصاویر و محدوده مورد مطالعه را بر روی گوگل ارث نشان می‌دهد.

جدول (۱). داده‌های ارائه شده توسط آژانس فضایی اروپا (ماخذ : نگارنده).

Nom	Mission	Sensor	Product	Date(mm-dd - yyyy )	Orbit	Track	Swath	Pass
1	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2005/05/22	16865	278	12	DESCENDING
2	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2005/06/26	17366	278	12	DESCENDING
3	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2006/05/06	21868	271	16	ACSCENDING
4	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2006/08/19	23371	271	16	ACSCENDING
5	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2007/04/06	26656	49	12	DESCENDING
6	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2007/05/11	27157	49	12	DESCENDING
7	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2009/08/28	39181	49	12	DESCENDING
8	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2009/11/06	40183	49	12	DESCENDING
9	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2010/05/15	42910	271	16	ACSCENDING
10	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA IMS 1P	2010/07/24	43912	271	16	ACSCENDING



شکل (۲). موقعیت تصاویر و محدوده مورد مطالعه بر روی گوگل ارث.

### پردازش اینترفرومتری (InSAR):

انتخاب تصاویر مناسب و بهینه زوج تصاویر راداری از اولین و اساسی‌ترین گام‌های ضروری در فرآیند پردازش اینترفرومتری است. در مرحله نخست یک زوج تصویر انتخاب و پس از تبدیل به فرمت SLC جهت استفاده در پردازش‌های اینترفرومتری، مورد استفاده قرار گرفت. در کاربردهای مرتبط با مباحث اینترفرومتری، مقادیر مربوط به خط مبنای عمودی مد نظر بوده و از نظر تئوریک این مقدار که به عنوان خط مبنای نرمال نیز گفته می‌شود همیشه بایستی از خط مبنای بحرانی کوچکتر باشد و از نظر عملی، نیز نباید از خط مبنایی استفاده کرد که بیشتر از نصف خط مبنای بحرانی باشد (راهنمای SAR Scape، 2010 به نقل از یاراحمدی ۱۳۹۲: ۸۲) به منظور اجرای روش InSAR در این پژوهش، ابتدا قابلیت و کیفیت تصاویر راداری مورد استفاده برای تهیه اینترفروگرام با محاسبه مقادیر خط مبنای زمانی و مکانی آن‌ها بررسی شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه مقادیر خط مبنای بحرانی و نرمال نشان داد که تصاویر منتخب برای استفاده در پردازش تداخل سنجی مناسب بوده که علاوه بر خط مبنای مکانی مناسب برای هر زوج تصویر، خط مبنای زمانی مناسب، یعنی اختلاف زمانی میان تصاویر کمتر از شش ماه مد نظر قرار گرفت. این موضوع به کاهش عدم همبستگی و افزایش هم‌دوسی فاز بین دو تصویر برمی‌گردد. بر طبق بررسی‌های صورت گرفته، از ۱۰ تصویر انتخاب شده، ۸ تصویر انتخابی از سنجنده ASAR جهت استفاده در پردازش اینترفرومتری InSAR مناسب بود. جدول (۳) مقادیر محاسبه شده هم‌دوسی بین اینترفروگرام‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. بر طبق اطلاعات حاصل، خط مبنای زمانی تصاویر انتخابی از ۲۶ تا ۶۹ روز متغیر بوده و بدیهی است که هر چقدر این بازه زمانی کوتاه‌تر انتخاب گردد باعث خواهد شد تا عدم همبستگی زمانی تصاویر یاد شده به حداقل برسد و این امر به نوبه خود باعث افزایش کیفیت اینترفروگرام حاصله خواهد گردید. از بین اینترفروگرام‌های تهیه شده زوج تصویر راداری برای سال ۲۰۰۵ از مقدار هم‌دوسی پایین تری برخوردار است لذا، این اینترفروگرام از ادامه پردازش بعدی حذف گردید.

جدول (۲). مقادیر خط مبنای محاسباتی زوج تصاویر راداری انتخابی (ماخذ: نگارنده)

تصویر مرجع	۲۰۰۵/۰۵/۲۲	۲۰۰۶/۰۸/۱۹	۲۰۰۷/۰۴/۰۶	۲۰۰۹/۰۸/۲۸	۲۰۱۰/۰۵/۱۵
تصویر پیرو	۲۰۰۵/۰۶/۲۶	۲۰۰۶/۰۹/۲۳	۲۰۰۷/۰۵/۱۱	۲۰۰۹/۱۱/۰۶	۲۰۱۰/۰۷/۲۴
خط مبنای نرمال (m)	۷۴۲/۶۹	۸۹/۳۲۲	۱۹۰/۵۸۱	۷۸/۹۰۷	۵۸/۹۴۲
خط مبنای بحرانی (m)	۲۱۶۰/۶۶	۲۱۶۰/۷۸۰	۹۳۳/۰۹۶	۹۳۳/۵۶۲	۲۱۶۱/۶۲۰
ابهام ارتفاع (m)	۲۴/۸۹	۲۰۷/۰۲۷	۴۸/۳۹۸	۱۱۶/۹۴۵	۳۳۶/۶۵۳
جابجایی رنج (Pixels)	-۵۰/۲۷۱	۱۳/۰۷۹	۴۸/۳۸۰	-۱۳/۴۲۴	-۲۴/۴۷۱

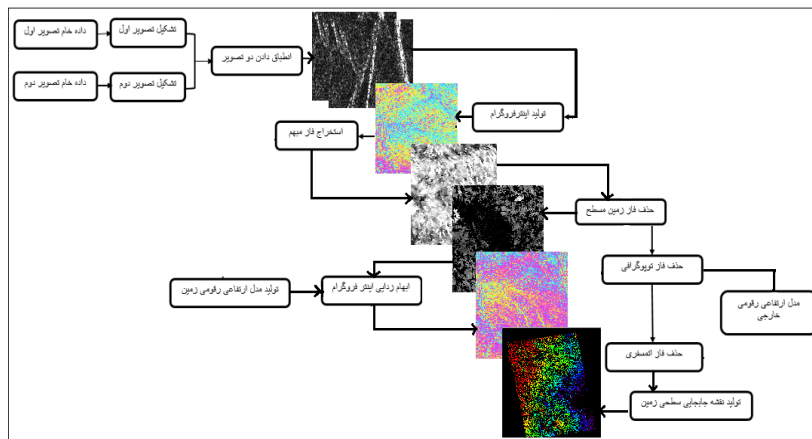
جابجایی آزیموت (Pixels)	۴۶۶۵/۶۵	-۴۷۰/۱۸۱	۸۹/۵۳۰	۴۸۸/۰۹۲	۹۱۸/۰۵۳
تفاوت داپلر مرکزی	۳/۷۳۰	-۱۲/۱۸۷	-۲/۵۵۱	-۵/۴۰۶	-۱۴/۴۷۳
بحرانی	۱۷۰۵/۲۲	۱۷۰۵/۲۲۷	۱۶۵۲/۴۱۶	۱۶۵۲/۴۱۶	۱۷۰۵/۲۲۷

جدول (۳). مقادیر همدوسی برای زوج تصاویر سنجنده ASAR

اینترفروگرام		خط مبنای زمانی (روز)	مقدار همدوسی (Coherence)			
تصویر پایه Master	تصویر پیرو Slave		کمترین Min.	میانگین Mean	بیشترین Max.	انحراف معیار Stdev.
۲۰۰۵/۰۵/۲۲	۲۰۰۵/۰۶/۲۶	۳۴	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۵۳	۰/۹۱۳۱	۰/۰۷۳۸
۲۰۰۶/۰۸/۱۹	۲۰۰۶/۰۹/۲۳	۲۶	۰/۰۰۰۱	۰/۷۰۹۴	۰/۹۹۶۲	۰/۱۰۷۰
۲۰۰۷/۰۴/۰۶	۲۰۰۷/۰۵/۱۱	۳۵	۰/۰۰۰۳	۰/۶۰۰۰	۰/۹۹۶۰	۰/۱۴۰۸
۲۰۰۹/۰۸/۲۸	۲۰۰۹/۱۱/۰۶	۶۸	۰/۰۰۰۲	۰/۵۵۱۵	۰/۹۹۹۳	۰/۱۶۵۸
۲۰۱۰/۰۵/۱۵	۲۰۱۰/۰۷/۲۴	۶۹	۰/۰۰۰۰	۰/۶۰۵۸	۰/۹۹۶۵	۰/۱۱۱۲

در پژوهش حاضر، از الگوریتم Minimum Cost Flow به منظور ابهام زدایی فاز یا اصلاح فاز در اینترفروگرام استفاده شد. در مرحله‌ی بعد به منظور تبدیل صحیح فاز اصلاح شده به مقادیر ارتفاعی، محاسبه‌ی میزان جابه‌جایی سطح زمین، رفع خطاهای احتمالی مداری تصحیح شده و کسب مقدار انحراف<sup>۱</sup> فاز و مقادیر فاز مطلق، فرآیند تصحیح مجدد فاز با استفاده از نقاط کنترل زمینی<sup>۲</sup> (GCP) انجام گرفت. سپس با تبدیل فاز مطلق به نقشه جابه‌جایی و ژئوکد کردن آن در محیط SAR scape 5.2.1، اقدام به شناسایی جابه‌جایی سطح زمین در دامنه‌ها ناپایدار و محاسبه مقدار این جابجائی‌ها در بازه زمانی مربوط به اخذ زوج تصاویر راداری (۲۰۰۵-۲۰۱۰) شد.

در نهایت و در راستای صحت‌سنجی نتایج، اطلاعات کسب شده در مراحل پیشین به محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد شد. پس از جداسازی محدوده‌ی مورد مطالعه (اهر تا ورزقان) از تصاویر پردازش شده، اقدام به انطباق نتایج کسب شده از طریق تکنیک راداری مورد استفاده با اطلاعات بدست آمده از طریق مطالعات میدانی و برنامه گوگل ارث<sup>۳</sup> شد. شکل (۳) فلوجارت روش تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۳). فلوجارت روش تحقیق.

1. Offset

2. Ground Control Point

3. Google Earth





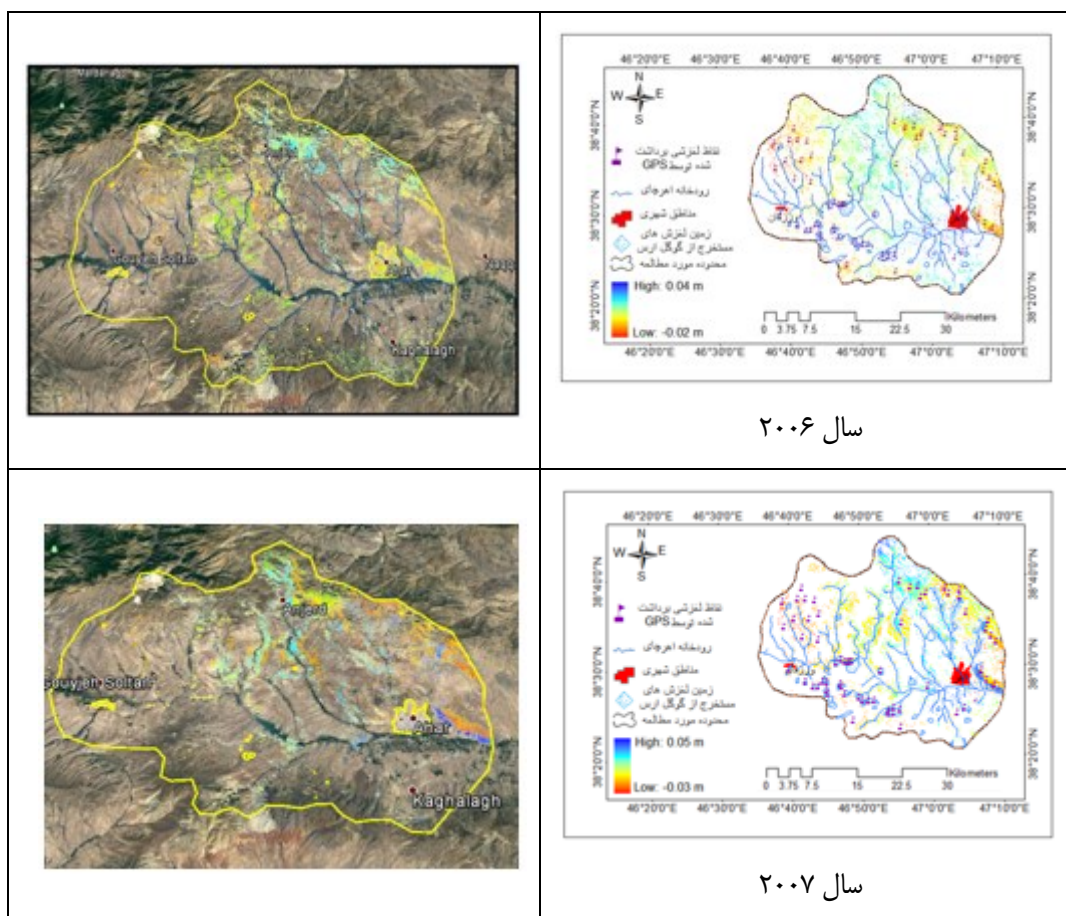
## بحث و یافته‌ها

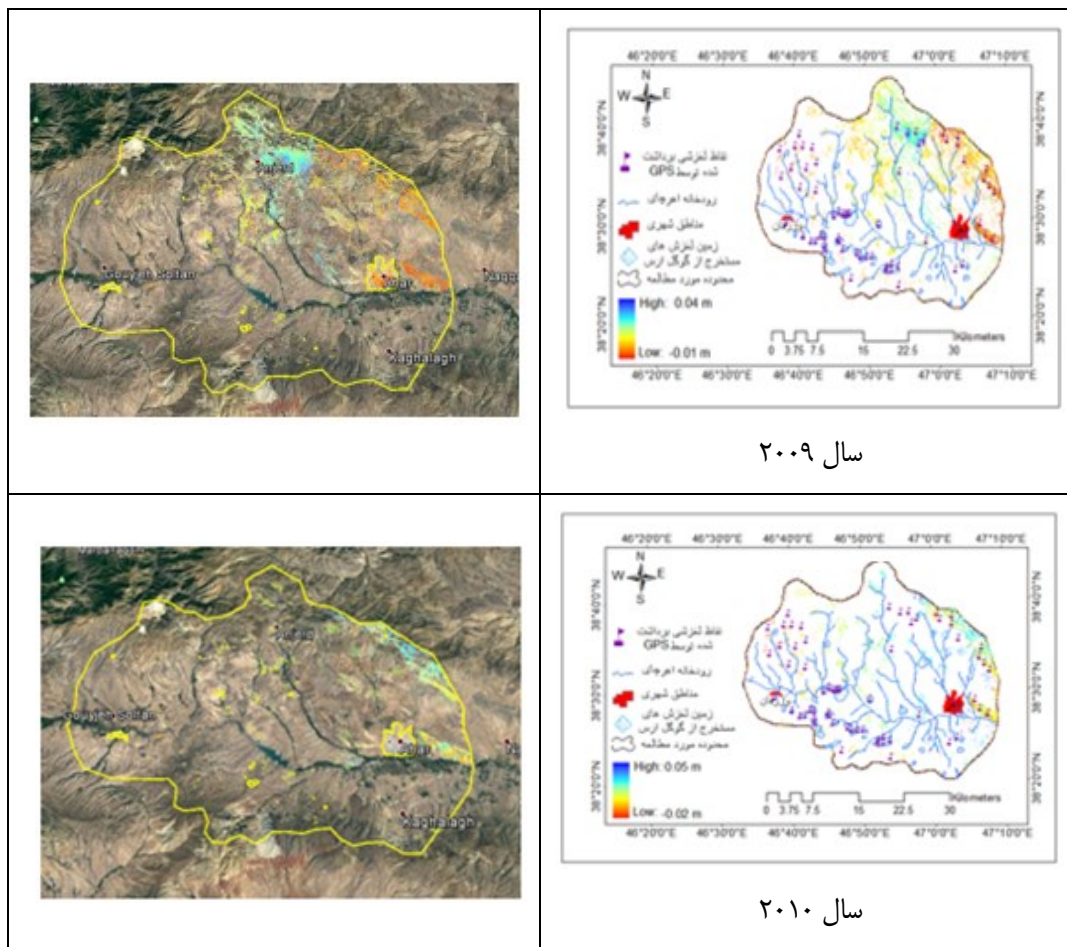
در این پژوهش با توجه به نتایج حاصل از بررسی خط مبنای زمانی و مکانی برای تصاویر ASAR، تعداد ۸ زوج تصویر مربوط به سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰، پس از کنترل پارامترهای حاصل از خط مبنا و هم‌دوسی برای پردازش‌های بعدی مناسب تشخیص داده شد و مبنای تهیه نقشه جابجایی سطح زمین در دامنه‌های ناپایدار در محدوده مورد مطالعه قرار گرفت و نهایتاً نرخ جابجایی برای سالهای مذکور بدست آمد که در جدول (۴) نتایج کسب شده ارائه شده است.

جدول (۴). نرخ تغییرات سطح زمین در دامنه‌های ناپایدار، منطقه اهر - ورزقان (۲۰۰۶-۲۰۱۰)

سال	مناطق ناپایدار از نظر جابجایی سطح زمین	نرخ بالآمدگی در کل منطقه	نرخ فروافتادگی در کل منطقه
۲۰۰۶	بیشترین مقدار جابجایی در قالب تغییرات منفی (لغزش) در غرب و شرق محدوده مورد مطالعه دیده می‌شود.	۰/۰۴ متر	۰/۰۲ - متر
۲۰۰۷		۰/۰۵ متر	۰/۰۳ - متر
۲۰۰۹		۰/۰۴ متر	۰/۰۱ - متر
۲۰۱۰		۰/۰۵ متر	۰/۰۲ - متر

نتایج حاصل به صورت نقشه‌های جابجایی برای سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ در شکل (۴) همراه با انطباق نقشه‌ها بر روی گوگل ارث در راستای صحت سنجی نشان داده شده است.





شکل(۴). نقشه توزیع زمین لغزش‌های موجود در محدوده مورد مطالعه و نرخ سالانه تغییرات سطح آن (۲۰۰۶ - ۲۰۱۰).

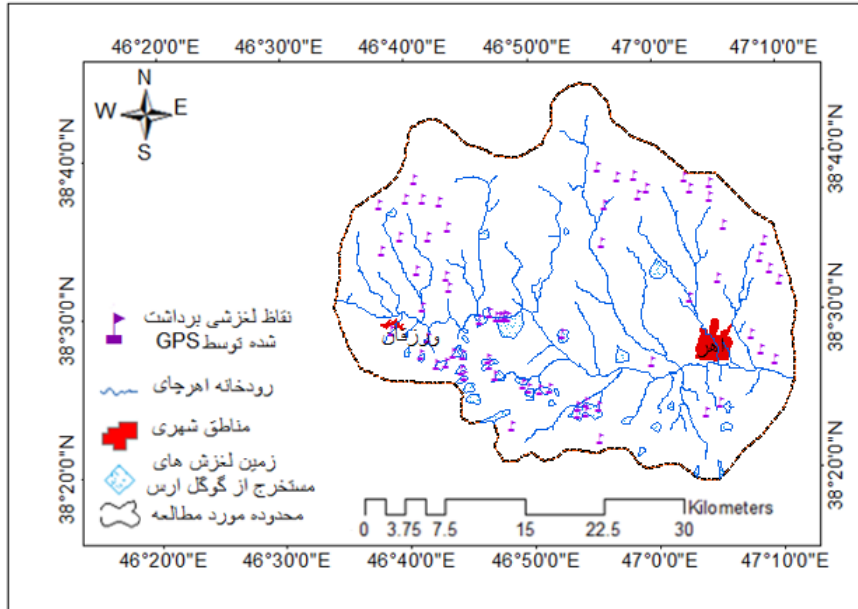
در نقشه‌های نهایی مربوط به جابجایی حاصل از پردازش اینترفرومتری، همیشه مقادیر مثبت به معنی کاهش فاصله سنجنده تا سطح زمین یا به عبارت دیگر بالا آمدگی سطح زمین بوده و مقادیر منفی نیز به معنی عکس این عمل یا همان فروافتادگی سطح زمین در جهت دید ماهواره (LOS<sup>۱</sup>) تفسیر می‌شوند (یاراحمدی: ۱۳۹۷: ۴). بر اساس اطلاعات موجود در این نقشه‌ها، بیشترین و کمترین میزان شدت تغییرات سطح زمین در محدوده مورد مطالعه، بین ۰/۰۵ تا -۰/۰۲ متر در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ استخراج شده است. بیشترین مقدار جابجایی در قالب تغییرات منفی (لغزش) در مناطق شرق و غرب منطقه اهر - ورزقان مشاهده شده است. در ادامه از طریق تقسیم بندی منطقه به دو بخش شمالی و جنوبی اقدام به استخراج میزان جابجایی سطح دامنه‌های شمالی و جنوبی به صورت منفرد گردید که بر اساس نتایج حاصل در قسمت شمالی منطقه مورد مطالعه، متوسط دامنه تغییرات سطح زمین بین ۰/۰۴ تا -۰/۰۱ متر محاسبه شده است. در حالیکه، در قسمت جنوبی رودخانه اهر چای که حداکثر تراکم زمین لغزش‌ها در آن دیده می‌شود متوسط دامنه تغییرات آن بین ۰/۰۲ تا -۰/۰۲ متر بدست آمده است. متوسط سالانه تغییرات دامنه‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه به صورت فروافتادگی‌ها ۰/۰۲ - متر بدست آمد که بیانگر جابجایی سطح زمین در برخی مناطق ناپایدار در دامنه‌های جنوبی رودخانه می‌باشد. در ادامه و در راستای صحت‌سنجی نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی InSAR جهت پایش ناپایداری‌های دامنه‌ای در منطقه اهر - ورزقان، اقدام به انجام عملیات صحرائی و ثبت نقاط لغزشی توسط GPS همچنین اطلاعات مستخرج از تصاویر گوگل ارث، و نقاط لغزشی گزارش شده توسط محققان

<sup>۱</sup> . Line of Sight





پیشین (یاراحمدی: ۱۳۹۷)، مناطق لغزشی شناسائی شده و موقعیت آنها در شکل (۵) نشان داده شده است. با رویهم اندازی نقاط لغزشی حاصل از پردازش راداری و محدوده‌های لغزشی شناسائی شده، مشخص شد که در اکثر موارد انطباق کامل بین آنها وجود دارد.

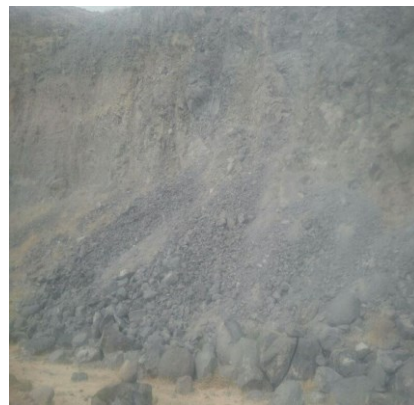


شکل (۵). سیاهه لغزشهای موجود در منطقه اهر- ورزقان.

در مرحله بعد، پس از انطباق نتایج حاصل از نقشه‌های جابجائی با نقشه سیاهه لغزشی و طی پایش میدانی در محدوده مورد مطالعه، انواع لغزش‌ها به صورت زمین لغزش، ریزش و مخروط‌های واریزه، و نیز خزش شناسایی گردید. نتایج نقشه‌های جابجائی نشان دهنده مستعد بودن منطقه برای وقوع انواع حرکات دامنه‌ای است زیرا، در طول دوره‌های یخچالی، در حوضه آبریز اهر چای که محدوده مورد مطالعه بخش اعظم آن را در بر می‌گیرد سیستم فرسایش پریگلاسیر فعالیت داشته است. تسلط این سیستم سبب پیدایش نهشته‌های ضخیم در منطقه شده است؛ این نهشته‌ها به دلیل جوان بودن بسیار ناپایدار هستند. تراسهای رودخانه‌ای و آبرفتی بصورت تودرتو در کنار هم قرار گرفته‌اند و با جهتی غربی و شرقی در کناره‌های روخانه اصلی مستقر شده‌اند و در نتیجه این سطوح از ناپایداری‌های بیشتری برخوردار هستند (روستائی: ۱۳۷۹: ۲۲۷). شکل (۶) برخی از ناپایداری‌های موجود در دامنه‌ها را نشان می‌دهند.



ب: توده‌های سنگی جدا شده از شیبهای تند دامنه‌ای مشرف به جاده مابین اهر- ورزقان و نزدیک رودخانه اهر چای.



الف: مخروط‌های واریزه در روستای دبیق.



ت: نمونه ای از ریزش خاک و سنگ در دامنه‌های ناپایدار در جنوب شهر ورزقان

پ: نمایی از بستر رودخانه اهر چای و افت سنگ در بستر رودخانه (روستای دیپق)

شکل (۶). نمایی از ناپایداری‌های موجود در محدوده مورد مطالعه.

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش پردازش تداخل سنجی راداری InSAR به منظور شناسایی محدوده زمین لغزش‌ها و برآورد میزان جابجائی مناطق لغزشی و ناپایدار استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه اهر- ورزقان از جمله مناطقی است که در آن انواع حرکات دامنه‌ای مانند زمین لغزش، ریزش و مخروط‌های واریزه‌ای و خزش با گسترش مکانی غیر یکنواخت قابل مشاهده هستند. همچنین نتایج حاصله حاکی از این است که منطقه دارای ناپایداری‌های زیاد در دامنه‌ها خصوصاً در قسمت‌های شرقی و غربی می‌باشد. همچنین برخی از زمین لغزش‌های موجود در سطح منطقه هنوز هم فعال هستند. بیشترین و کمترین میزان تغییرات سطح زمین در منطقه مورد مطالعه، بین  $0/05$  تا  $-0/02$  متر در بازه زمانی سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ استخراج شد. بر اساس مقایسه نتایج حاصل از این کار پژوهشی با نتایج پژوهش انجام یافته توسط یار احمدی در سال ۱۳۹۷ که با استفاده از روش PSInSAR برای منطقه فوق انجام گرفته است تطابق نسبتاً خوبی مابین نتایج حاصل شده از دو کار پژوهشی صورت گرفته، دیده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از پردازش اینترفرومتری PSInSAR توسط ایشان متوسط شدت تغییرات جابجائی سطح زمین در دامنه‌های ناپایدار بین  $58$  تا  $-22/5$  میلی‌متر در سال برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استخراج گردیده است. هرچند لازم است برای صحت بیشتر نتایج بدست آمده در کارهای پژوهشی بعدی از روش‌ها و تکنیک‌های پیشرفته‌تر تداخل سنجی راداری استفاده گردد از سوی دیگر لازم است که به منظور بررسی وضعیت زمین لغزش‌های بزرگ موجود در منطقه مثل زمین لغزش دیپق و نصیرآباد و سایر لغزشها، هرکدام از آنها به صورت منفرد و جداگانه توسط تکنیک‌های تداخل سنجی اینترفرومتری مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند.



## منابع

- روستائی، شهرام (۱۳۷۹) "پژوهشی در دینامیک لغزشهای زمین و علل وقوع آنها با استفاده از روشهای مورفومتری در حوضه اهرچای"، رساله ی دکتری، دانشگاه تبریز.
- شیرانی، کورش. خوش‌باطن، محبوبه(۱۳۹۳)"بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری" مطالعه موردی: زمین لغزش سمیرم "فصلنامه کواترنری/ایران، دوره ۲۱، شماره ۱، صص: ۵۳ – ۶۵.
- کرم، عبدالامیر(۱۳۸۰)"مدل سازی کمی و پهنه بندی خطر زمین لغزش در زاگرس چین خورده، مطالعه موردی: حوزه آبخیز سرخون در استان چهارمحال بختیاری" رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.
- مهندسین مشاور جامع ایران(۱۳۷۲)"زمین شناسی" مهندسین مشاور جامع ایران، شرکت سهامی خاص، ۱۳۷۲.
- یار احمدی، جمشید (۱۳۹۲)"آشکارسازی و پایش زمین لغزش‌ها به روش اینترفرومتری راداری و برآورد میزان رسوب ناشی از وقع آنها با استفاده از مدل WEPP. مطالعه موردی: حوضه آبریز گرم چای." رساله دکتری، استاد راهنما: دکتر شهرام روستائی، دانشگاه تبریز، گروه ژئومورفولوژی، دی ماه.
- یار احمدی، جمشید (۱۳۹۷)"آشکارسازی ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از پراکنشگر دائمی (PSI) در حوزه آبخیز اهر چای" سیزدهمین همایش ملی علوم مهندسی آبخیزداری ایران و سومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست. ۱۰ و ۱۱ مهرماه ۱۳۹۷، دانشگاه محقق اردبیلی.
- Castaneda, C., Gutierrez, F., Manunta, M., Galve, J.P. 2009. DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Process and Landforms* 34, 1562–1574.
- Cruden, D., D.J. Varnes, 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. .
- Dai, F. C., C.F. Lee, and Y. Y. Nagai, 2002. Landslide risk assessment and management: an
- Gabriel, A.K, Goldstein, R.M, and Zebker, H. A (1989) Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *Journal of Geography si cal Research*, 94: 9183-9191.
- Hong, Y.; Adler, R.F. and Huffman, G. (2007). An experimental global prediction system for rainfall-triggered
- Landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*,
- Massonnet, D. and Feigl, K.l. (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441-500.
- Nicușor Necula, Mihai Niculiță, Giulia Tessari, Mario Floris(2017) InSAR analysis of Sentinel-1 data for monitoring landslide displacement of the north-eastern Copou hillslope, Iași city, Romania” DOI 10.15551/prgs.2017.85.
- Osmanoglu Batuhan., 2011. Application and development of new algorithm for displacement analysis using InSAR time series. PhD thesis, University of Miami.164p.
- SARscape User guide, 2010, www.itvis.com
- Synthetic Aperture Radar Land Applications Tutorial, Part I: Background and Theory, Prepared by ESSA”, 2009.

- Xuguo Shi 1 , Houjun Jiang, , Lu Zhang, and Mingsheng Liao(2017) Landslide Displacement Monitoring with Split-Bandwidth Interferometry: A Case Study of the Shuping Landslide in the Three Gorges Area “Remote Sens. 2017, 9, 937; doi:10.3390 /rs9090937.