بررسی تغییر شکل میانگذر دریاچه ارومیه با استفاده از روش تداخلسنجی راداری

رقیه شمشیری*'، مهدی معتق'، محمدعلی شریفی^۳

^۱کارشناس ارشد سنجش از دور- گروه مهندسی نقشهبرداری- پردیس دانشکدههای فنی- دانشگاه تهران r.shamshiri@ut.ac.ir

> ^۲استادیار گروه مهندسی نقشهبرداری- پردیس دانشکدههای فنی- دانشگاه تهران motagh@ut.ac.ir

> آدانشیار گروه مهندسی نقشهبرداری- پردیس دانشکدههای فنی- دانشگاه تهران sharifi@ut.ac.ir

> > (تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۲، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۳)

چکیدہ

پل دریاچه ارومیه به طول ۱۳۰۰ متر و عرض ۳۰ متر به منظور اتصال دو خاکریز آذربایجان غربی و شرقی در اواخر سال ۲۰۰۹ ساخته شده است. ساخت این پل نقش مهمی در توسعه ی گردشگری، حملونقل و بازرگانی منطقه دارد. از آنجا که تغییر شکل نامتقارن خاکریزهای موجود در طرفین پل ممکن است به سلامت پل آسیب برساند، مسأله پایش دقیق خاکریزها در زمان از اهمیت ویژهای برخوردار است.

پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی (۲۰–۱ متر) و زمانی (۴۶–۱۱ روز) بالا و دقت قابل قبول (میلیمتر-سانتیمتر)، دادههای تداخل-سنجی راداری را به ابزاری قدرتمند در اینگونه مطالعات تبدیل کرده است. در میان روشهای تداخلسنجی راداری، روشهای تحلیل سری زمانی مانند خطوط مبنای کوتاه^۱، ابزاری قدرتمند در زمینه پایش سازهها هستند که نقشههای تغییر شکل را با دقت میلیمتر فراهم میکنند.

در این مطالعه، روش فوق در مجموع بر روی ۵۸ تصویر سنجندههای ALOS ،ENVISAT و TerraSAR-X (TSX) از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳، بکار گرفته شد. نتایج نشان میدهد تغییر شکل در این بازه زمانی با حداقل سرعت بیشینهی ۵۰ میلیمتر در سال در جهت خط دید ماهواره^۲ روی خاکریزها در حال وقوع است و در طول این زمان بر سرعت تغییر شکل افزوده شده است.

واژگان كليدى : تداخل سنجى رادارى، تغيير شكل، ميان گذر درياچه اروميه

* نویسنده رابط

[\] Small BAseline Subset (SBAS)
\ Line Of Sight (LOS)

۱– مقدمه

پلها یکی از سازههای مهم در سیستم حملونقل هستند و از جنبههای اجتماعی، اقتصادی، اکولوژیکی و فرهنگی بر زندگی بشر تأثیر میگذارند. از این رو تغییر شکل پل میتواند یک مشکل جدی باشد، زیرا ممکن است خسارات مالی و جانی فراوانی وارد کند. به همین دلیل پایش پلها بسیار مهم است.

اهمیت اطلاعات بدست آمده از طریق پایش، در چندین حوزه آشکار است. نخست این که موجب پیشرفت دانش مربوط به رفتار سازه و تنظیم دقیق مدلهای عددی که رفتار سازه را پیشبینی می کنند، میشود. دوم این که با پایش دائمی میتوان علائم اولیه ناشی از وجود نقوص در سازه را متوجه شد. بنابراین میتوان شاخص ایمنی را در طول زمان در نظر گرفت و بلافاصله و با کمترین تلفات مالی اقدامات لازم جهت ترمیم سازه را انجام داد. و در نهایت، پایش در طول هر دورهی زمانی از عمر پل مهم است و اطلاعات با ارزشی بهمنظور دانش بهتر رفتار سازه را میدهد و در نتیجه موجب برنامهریزی بهتر و مدیریت کمهزینهتر می گردد [۱].

منطقه مورد مطالعه، دریاچه ارومیه، در شمالغربی ایران با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۴۵/۵ و ۳۷/۵ واقع شدهاست. این دریاچه بین استانهای آذربایجان شرقی و غربی است.



شکل ۱- (الف) دریاچه ارومیه روی Google Earth، (ب) بزرگ نمایی میانگذر دریاچه ارومیه که از سه بخش تشکیل شده است: خاکریز غربی، خاکریز شرقی و پل که دو خاکریز را بههم وصل کرده است

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شدهاست، میانگذر دریاچه ارومیه از سه بخش تشکیل شده است: خاکریز به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر از سمت استان آذربایجان غربی و حدود ۳ کیلومتر از سمت استان آذربایجان شرقی که در

سال ۱۹۹۰ ساخته شدهاند. و یک پل که در اواخر دهه ۲۰۰۹ ساخته شدهاست و این دو خاکریز را بههم وصل می-کند. این پل به طول تقریبی ۱۳۰۰ متر و عرض ۳۰ متر از پروژههای عظیم ایرانی بهشمار میرود و نقش مهمی در توسعهی مبادلات فرهنگی، گردشگری، حملونقل و بازرگانی دارد. به دلیل دارا بودن شرایط خاص محیطی نظیر خورندگی بسیار بالا، بستر ناپایدار دریاچه و از طرفی تغییر شکل نامتقارن خاکریزهای موجود در طرفین پل، مسأله پایش اهمیت ویژهای پیدا میکند.

روشهای نقشهبرداری مرسوم مانند ترازیابی و سیستم تعیینموقعیت جهانی، اطلاعات دقیق مربوط به تغییر شکل سازه را در نقاط از پیش تعیین شده میدهند. اما برای مناطق وسیع، زمانبر، پرهزینه و پرزحمت هستند [۲]. از طرفی بر روی میانگذر دریاچه ارومیه اندازهگیریهای میدانی دقیقی وجود ندارد. در مقایسه با روشهای فوق، میدانی دقیقی وجود ندارد. در مقایسه با روشهای فوق، وسیع، قدرت فکیک مکانی و زمانی بالا و مقرون به صرفه فراهم میکنند و برای مطالعه تغییر شکل مورد استفاده قرار میگیرد [۳]. اما این روشها نیز محدودیت هایی نظیر عدم همبستگی زمانی و هندسی و اختلالات جوی دارند.

روشهای سری زمانی مثل تداخلسنجی پراکندهساز پایدار¹ [۴–۶] و خطوط مبنای کوتاه [۲۸] این مشکلات را حل کرده است. بهجای تحلیل یک اینترفروگرام، این روشها سری زمانی تغییر شکل را در پیکسلهای قابل اعتماد فراهم میکند. توانایی روشهای سری زمانی در موارد مختلف نظیر زمینلغزش [۹،۱۰]، حرکت ماگما ناشی از فعالیت کوههای زمینلغزش [۱۱]، نشست زمین [۲۱–۱۵]، پایش فعالیتهای گسل [۱۶،۱۷] ثابت شده است. در این مطالعه یکی دیگر از قابلیتهای روشهای مذکور در پایش سازهای مهندسی به

۲- دادهها و روش کار

در ایــن مطالعــه تصـاویر راداری ســه ســنجنده ALOS ،ENVISAT و TerraSAR-X (TSX) بـا اسـتفاده از روش خطوط مبنای کوتـاه پـردازش شـدهانـد. در ایـن بخش مشخصات تصاویر و روش فوق ارائه شده است.

¹ Permanent Scatterer Interferometry (PSI)

در این مطالعه، از ۲۰ تصویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱) از ۲۰۰۳/۰۹/۰۳ تا ۲۰۰۶/۱۱/۰۱ تا ENVISAT (مسیر (مسیر ۹۲) از ۲۰۰۷/۰۲ تا ۲۰۰۶/۰۱/۰۲ در مسیر پایین گذر با زاویه برخورد^{(۲} ۲۱، ۱۰ تصویر ALOS در بازهی زمانی ۲۰۰۶/۱۲/۲۶ تا ۲۰۰۶/۰۱/۰۲ در مسیر بالا-گـذر با زاویه برخورد °۳۹ و ۱۸ تصویر TSX از زاویه برخورد °۲۶ استفاده شده است. پوشش مکانی این تصاویر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- منطقه مطالعاتی بر روی تصویر Landsat. پوشش مکانی سنجندههای ENVISAT (با زاویه برخورد °۲۱)، ALOS (با زاویه برخورد °۳۹) و TSX (با زاویه برخورد °۲۶) که بهترتیب با کادرهای ضخیم، خطچین و نقطهچین نمایش داده شده است.

۲-۲- روش کار

یکی از پرکاربردترین و دقیقترین روشهای پیشرفته سری زمانی، روش خطوط مبنای کوتاه است. که بطور کلی از سه مرحله تشکیل شده است: تولید اینترفروگرام-هایی با خطوط مبنای کوتاه، انتخاب پیکسلهایی با فاز ثابت و مرحله نهایی شامل بازیابی فاز و معکوسسازی با روش کمترین مربعات.

ایـن روش بـرای غلبـه بـر مشـکل عـدم همبسـتگی اینترفروگرام ارائه شده است. لذا بـهمنظـور کمینـهسـازی اثرات ناشی از عدم همبسـتگی، اینترفروگـرامهـا از میـان

جفت تصاویری با کمترین خطوط مبنای زمانی و مکانی و فرکانس داپلر مرکزی^۲ تولید میشوند [۱۸].

در این مطالعه ۴۳، ۲۳، ۲۳ و ۵۱ اینترفروگرام به ترتیب از بین تصاویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TST با روش تکرار گذر^۳ تحت نرمافزار DORIS [۱۹] تولید شده است. شبکه اینترفروگرامهای مورد استفاده در این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. بهمنظور حذف اثر انحنای زمین و فاز ارتفاعی و زمین مرجع کردن از مدل رقومی زمین SRTM

در مرحلهی بعد با تحلیل دامنه و فاز، پیکسلهایی با پراکنش پایدار شناسایی میشوند. سپس فاز این پیکسلها بازیابی شده و ترمهای نویز آن حذف می شوند. در نهایت فاز ناشی از تغییر شکل بدست میآید. تعداد بالای اینترفروگرامها در این روش، باعث ایجاد افزونگی داده می شود. لذا فاز تغییر شکل با روش کمترین مربعات بدست میآید. این مراحل با استفاده از نرمافراز StaMPS. انجام شده است [۲۰].

۳- نتايج

سرعت تغییر شکل بدست آمده از پردازش تصاویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX بهترتیب در اشکال ۴-۷ نشان داده شده-اند. همان طور که مشاهده می شود، در طول خاکریزها بر سرعت تغییر شکل افزوده می شود و بیشترین سرعت سرعت تغییر شکل افزوده می شود و بیشترین در ENVISAT سرعت آمده توسط سنجندههای TSX و ۲۵ مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و ۲۵ میلی متر در (مسیر ۱۳۲۱)، LOS بهترتیب ۵۶، ۵۰، ۵۷ و ۵۵ میلی متر در سال است. با نادیده فرض کردن جابجایی افقی، این مقادیر بهترتیب ۲۰، ۹۲ و ۹۴ میلی متر در سال در راستای قائم خواهد بود.

۱ Incident angle

۲ frequencyDoppler centroid

۳ repeat-pass

٤ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)



شکل ۳- شبکه اینترفروگرامهای مورد استفاده در روش خطوط مبنای کوتاه با تصاویر (الف) ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، (ب) ENVISAT (مسیر ۹۲)، (پ) ALOS و (ت) TSX. دوایر نشاندهنده تصاویر، دایره توپر بیانگر تصویر مرجع و خطوط بیانگر اینترفروگرامهای بین زوج تصاویر است.

شکل ۴–۷ (ب، پ) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در هر دورهی زمانی تغییر شکل با سرعت خطی در حال افزایش است. همچنین بین تغییر شکل دو دماغه، اختلاف وجود دارد. لذا تغییر شکل نامتقارن موجود در دو سمت پل ممکن است به سلامت پل آسیب برساند.

با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، علاوه بر تعیین سرعت تغییر شکل، میتوان میزان تغییر در طول زمان را نیز برای هر پیکسل با پراکنش پایدار تعیین نمود. سری زمانی دو پیکسل در دماغهی خاکریزها در دو طرف پل (که در تصاویر ۴-۷ (الف) با A و B نشان داده شده است)، در



شکل ۴– (الف) سرعت تغییر شکل میان گذر دریاچه ارومیه با تصاویر ENVISAT (مسیر ۳۲۱) در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶. منطقه مرجع با ستاره مشخص شده است. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.

www.SID.ir



شکل ۵- (الف) سرعت تغییر شکل میان گذر دریاچه ارومیه با تصاویر ENVISAT (مسیر ۹۲) در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰. منطقه مرجع با ستاره مشخص شدهاست، تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.



شکل ۶- (الف) سرعت تغییر شکل میانگذر دریاچه ارومیه با تصاویر ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰. منطقه مرجع با ستاره مشخص شدهاست. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.



. شکل ۷- (الف) سرعت تغییر شکل میانگذر دریاچه ارومیه با تصاویر TSX در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳. منطقه مرجع با ستاره مشخص شدهاست. تصاویر (ب) و (پ) سری زمانی دو نقطه A و B (مشخص شده در شکل (الف)) است.

به منظور مقایسه بهتر، پروفیل سرعت تغییر شکل در طول میان گذر از نقطه C تا C (شکل ۴. الف) در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط بنفش، قرمز، آبی و مشکی به-ترتیب سرعت تغییر شکل بدست آمده از ENVISAT و (مسیر ۲۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX را مشخص می کند.

همانطور که در این شکل مشاهده میشود، بطورکلی هرچه از مبدأ خاکریزها (صفر کیلومتر و ۱۵ کیلومتر) به-سمت پل نزدیکتر میشویم بر نرخ تغییر شکل افزوده میشود.



شکل۸- پروفیل سرعت تغییر شکل میان گذر دریاچه ارومیه از نقطهC تا D (در شکل ۴. الف مشخص شده است) نقاط بنفش، قرمز، آبی و مشکی بهترتیب سرعت تغییر شکل بدست آمده از ENVISAT (مسیر ۳۲۱)، ENVISAT (مسیر ۹۲)، ALOS و TSX در امتداد میان گذر است.

همان طور که در پروفیل ENVISAT (مسیر ۳۲۱) دیده می شود، از ۱۵ کیلومتر (مبدأ خاکریز شرقی) تا ۱۳/۵ کیلومتر به میزان ۵۵ میلیمتر بر سال بر سرعت تغییر شکل افزوده می شود. از ۱۳/۵ کیلومتر تا دماغه خاکریز شرقی، از سرعت تغییر شکل به میزان ۲۰ میلیمتر بر سال کاسته می-شود. اما در پروفیل ENVISAT (مسیر ۹۲) سرعت تغییر شکل در طول خاکریز شرقی، به میزان ۵۰ میلیمتر بر سال افزایش می یابد.

طبق گزارش شرکت صدرا (شرکت سازنده پل) در سال طبق گزارش شرکت صدرا (شرکت سازنده پل) در سال پیچش خاکریز شرقی اتفاق افتاده است. بنابراین تغییر شکل بالا در ۱۳/۵ کیلومتر نسبت به مناطق اطراف که توسط سنجنده ۲۰۱۸ کیلومتر نسبت به مناطق اطراف که توسط دهنده همان گسیختگی است. سرعت تغییر شکل در خاکریز غربی در سالهای ۲۰۰۳–۲۰۰۹، به ۴۰ میلیمتر بر سال است، در سالهای ۲۰۰۷–۲۰۱۰، به ۴۰ میلیمتر بر سال رسیده است و در سال ۲۰۱۲–۲۰۱۳، به ۸۰ میلیمتر بر سال افزایش یافته است. همچنین اختلاف بین پروفیلهای

ALOS و ENVISAT (مسیر ۹۲) در بازه زمانی مشترک ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ در خاکریز شرقی نشاندهنده جابجایی افقی در خاکریز است که در بخش ۴–۱ بررسی میشود.

۴– بحث

این بخش شامل چهار قسمت است، در بخش نخست سرعت تغییر شکل در بازهی زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۰ در دو راستای قائم (نشست) و شرقی-غربی تجزیه شده است. در بخش دوم ارتباط جابجایی میانگذر در دو راستا با نوسانات سطح آب بررسی میشود. در بخش سوم علت تفاوت سرعت تغییر شکل با توجه به تفاوت در نوع لایهبندی ذکر میشود و در بخش نهایی عملکرد سنجندهها بررسی میشود.

۴-۱- تصویر سرعت تغییر شکل در دو راستا

تغییر شکلهای بدست آمده با استفاده از روشهای تداخل سنجی راداری، در راستای LOS است. با استفاده از معادله زیر می توان میزان جابجایی در سه راستا را بدست آورد.

 $[\Delta LOS] = [-\cos\alpha \times \sin\theta \quad \sin\alpha \times \sin\theta \quad \cos\theta] \begin{bmatrix} d_e \\ d_n \\ d_v \end{bmatrix}$ (1)

 α ،LOS در این رابطه ΔLOS ، تغییر شکل در راستای α ،LOS و d_n d_e ، ماهواره، d_r و d_r d_r و d_r میل ماهواره، d_r و d_r و d_r - منوبی مراحت مدار ماهواره، θ زاویه میل ماهواره، ممالی – جنوبی ترییب جابجایی در سه راستای شرقی ΔLOS داشته باشیم. می و قائم است [۲۱]. ولی برای این کار می بایست در یک بازه زمانی مشخص، سه تغییر شکل ΔLOS داشته باشیم. می - وزانی با نادیده فرض کردن جابجایی در راستای شمالی – جنوبی جنوبی، با استفاده از معادله زیر، تغییر شکل را در راستای قائم و شرقی – غربی تصویر نمود.

$$[\Delta LOS] = \left[-\cos\alpha \times \sin\theta \quad \cos\theta \right] \begin{bmatrix} d_e \\ d_v \end{bmatrix}$$
(Y)

شکل ۹ سرعت نشست و حرکت در راستای شرقی خربی بدست آمده از تصاویر ALOS و ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ را نشان میدهد. همان طور که در شکل ۹ (الف) مشاهده می شود، با افزایش فاصله از مبدأ و نزدیک شدن به پل، بر میزان سرعت نشست هر دو خاکریز افزوده می شود. به طوری که از یک کیلومتری مبدأ خاکریز غربی تا ۶/۵

کیلومتری، سرعت نشست از ۱۰ میلیمتر در سال به ۵۰ میلی-متر در سال افزایش یافته و پس از آن تا انتهای خاکریز ۵ میلی-متر در سال از سرعت نشست کاسته شده است. سرعت نشست خاکریز شرقی نیز از ۱۵ کیلومتری مبدأ تا ۱۲/۵ کیلومتری، به ۵۵ میلیمتر در سال افزایش یافته است. اگر این نشست ادامه داشته باشد، اختلاف ۱۰ میلیمتر در سال در سرعت نشست بین دو دماغه خاکریز، ممکن است به سلامت پل آسیب بزند.

شکل ۹ (ب) سرعت حرکت در راستای شرقی غربی را نشان میدهد. سرعت مثبت بیانگر حرکت به سمت شرق و سرعت منفی نشاندهنده حرکت به سمت غرب میباشد. همان طور که مشاهده میشود، خاکریز غربی با سرعت متوسط ۱۰ میلیمتر در سال به سمت شرق حرکت میکند. سرعت حرکت به سمت شرق در خاکریز شرقی از ۱۵ کیلومتری مبدا تا ۱۴ کیلومتری، ۲۵ میلیمتر در سال کاهش یافته است و از ۱۴ کیلومتری تا (۱۲/۵ کیلومتری، ۳۵ میلیمتر در سال افزایش یافته است. اگر این حرکت نیز ادامه داشته باشد، اختلاف ۲۰ میلیمتر در سال در سرعت جابجایی فوق بین دو دماغه خاکریز، ممکن است به سلامت پل آسیب بزند. همچنین مقطع ۱۴ کیلومتر به دلیل وجود اختلاف در جابجایی نسبت به مقاطع اطراف و با توجه به این که مقطع ۱۳/۵ کیلومتر یکبار در سال ۲۰۰۵ گسیخته شده



سکل ۲ - پروفیل سرعت (الف) نشست و (ب) خرفت در راستای شرقی-غربی میان گذر، بدست آمده از تصاویر ALOS و ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰

با مقایسه دو شکل ۹. الف و ۹. ب میتوان به این نتیجه رسید که سرعت جابجایی افقی در مقایسه با جابجایی قائم ناچیز است. لذا میتوان جابجایی افقی را

$$d_{v} = \frac{\Delta LOS}{\cos\theta} \tag{(7)}$$

شکل ۱۰ پروفیل سرعت جابجایی در راستای قائم را با نادیده فرض کردن جابجایی افقی نشان می دهد. نقاط قرمز، آبی و مشکی بهترتیب سرعت نشست بدست آمده از ENVISAT (مسیر ۳۲۱) در سال ۲۰۰۳–۲۰۰۷، سرعت نشست محاسبه شده با ENVISAT (مسیر ۹۲) و ALOS در بازه زمانی ۲۰۰۷–۲۰۱۰ و سرعت نشست بدست آمده از بازه زمانی ۲۰۰۷–۲۰۱۰ و سرعت نشست بدست آمده از بازه ترانی ۲۰۱۲–۲۰۱۳ است. با مقایسه سرعت نشست در بازه ۲۰۱۲–۲۰۱۳ است. با مقایسه سرعت نشست در تصاویر اخذ شده در مدار پایین گذر هستند، میتوان به این نتیجه رسید که در خاکریز شرقی از ۱۳/۵ کیلومتر تا ۱۲/۵ نتیجه رسید که در خاکریز شرقی از ۱۳/۵ کیلومتر تا ۱۲/۵ نشست افزوده شده است. همچنین سرعت نشست از مقطع کیلومتر با بیشینه مقدار ۵۰ میلیمتر در سال بر سرعت نشست افزوده شده است. همچنین سرعت نشست از مقطع این بازه زمانی در بخش ۴–۲ بررسی شده است.



شکل ۱۰- پروفیل سرعت نشست در طول میان گذر دریاچه ارومیه از نقطه C تا D (در شکل ۴. الف مشخص شده است.) نقاط قرمز، آبی و مشکی بهتر تیب سرعت نشست بدست آمده از ENVISAT (مسیر ALOS و سرعت نشست محاسبه شده با TSX در امتداد میان گذر است.

۲-۴- ارتباط تغییر شکل با نوسانات سطح آب

در این بخش ارتباط نوسانات سطح آب و تغییر شکل در دو راستای قائم و شرقی-غربی بررسی شدهاست. برای محاسبه میزان همبستگی^۱ این ارتباط، ابتدا میانگین پروفیل نشست و حرکت شرقی-غربی میانگذر بدست آمده در بخش ۴–۱ در هر تاریخ، محاسبه شد. سپس ارتفاع سطح آب دریاچه از طریق ارتفاعسنج راداری در هر تاریخ اخذ دادهی راداری بدست آمد.

نتایج نشان میدهد میانگین پروفیلهای نشست میانگذر با نوسانات سطح آب ارتباط ۸۰/۰ دارند. این ارتباط در شکل مشاهده (الف) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده میشود، سرعت نشست خاکریز با کاهش سطح آب بیشتر می-شود. زیرا تغییر سطح آب منجر به تغییر در فشار حفرهای آب میشود. به طوری که با کاهش سطح آب، فشار حفرهای کم میشود. لذا زهکشی در لایه های رسی به دلیل کاهش فشار آب، با سرعت بیشتری انجام می شود. به عبارت دیگر سرعت تحکیم افزایش می یابد. لذا بر نرخ نشست نیز افزوده می شود.

علاوه بر این میانگین جابجایی در راستای شرقی-غربی میانگذر با نوسانات سطح آب ارتباط ۲/۷۲ دارند. این ارتباط در شکل ۱۱ (ب) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود، با کاهش سطح آب سرعت حرکت به سمت شرق بیشتر می شود.



نوسانات سطح آب

۴–۳– علت تفاوت در نرخ تغییر شکل

شکل ۱۲ نقشه لایهبندی خاک در بستر دریاچه و خاکریز را نشان میدهد. سه مقطع اول مربوط به خاکریز غربی، مقطع چهارم مربوط به پل و مقطع آخر، خاکریز شرقی است. همانطور که مشاهده

می شود، لایه بندی خاک در بستر دریاچه و خاکریز در نیمرخ طولی متفاوت است. هرچه از مقطع اول به سمت پل پیش می رویم، ضخامت لایه های رسی (لایه های آبی رنگ در شکل) و عمق نفوذ خاکریز های رسی با چسبندگی و ضخامت متفاوت موجب می شود سرعت پراکندگی فشار حفره ای آب در طول خاکریز متغیر باشد. به همین دلیل سرعت تحکیم خاک در مقاطع مختلف، متفاوت خواهد بود. از این-رو سرعت تغییر شکل در امتداد میان گذر متغیر است.



شکل ۱۲-نیمرخ طولی از لایهبندی خاک در بستر دریاچه و میان گذر

۴-۴- مقایسه عملکرد سنجندهها

یکی از مهمترین مراحل پردازش حذف خطای بازیابی فاز است. فرایند بازیابی فاز بین دو پیکسلی انجام میشود که اختلاف فاز کمتر از π داشته باشند. لذا هر چه تراکم پیکسل-هایی با پراکنش ثابت بیشتر باشد، خطا کمتر خواهد بود. از سوی دیگر هر چه طول موج بزرگتر باشد، بدلیل اینکه اختلاف فاز کمتر میشود، بازیابی فاز دقیقتر میشود. همچنین هر چه میزان همدوسی^۲ اینترفروگرام بیشتر باشد، خطای بازیابی فاز کمتر خواهد شد. بازیابی فاز در پردازشهای سنجنده ALOS

۲ Coherence

در این مطالعه، یکی از روشهای تحلیل سری زمانی؛ خطوط مبنای کوتاه، بر روی ۳۰ تصویر ENVISAT و ۱۰ تصویر ALOS با پوشش زمانی ۳۰۰۳ تا ۲۰۱۰، بکار گرفته شد. نتایج نشان داد در این دورهی زمانی، تغییر شکل با سرعت بیشینه بیش از ۵۰ میلیمتر در سال در راستای LOS روی خاکریزها در حال وقوع است. به منظور پایش دقیق تر میانگذر از ۱۸ تصویر (TST) TerraSAR-X که بهدلیل داشتن قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ متر) و دوره زمانی کوتاه داشتن قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ متر) و دوره زمانی کوتاه سازههای عمرانی میباشد، استفاده شد. نتایج نشان داد در این سازههای عمرانی میباشد، استفاده شد. نتایج نشان داد در این سال در راستای LOS روی خاکریزها در حال وقوع است. لذا میتوان به این نتیجه رسید که به مرور زمان بر سرعت تغییر شکل افزوده میشود.

نتایج نشان میدهد دادههای راداری و همچنین روش خطوط مبنای کوتاه، ابزار و روشی کارآمد در زمینه پایش سازههای عمرانی هستند. ولی با توجه به نسبی بودن نتایج تداخلسنجی راداری توصیه میشود دو ایستگاه گیرنده سیستم تعیین موقعیت جهانی در دو استان آذربایجان شرقی و غربی نصب شوند، تا تغییر شکل بدست آمده با روش بکار گرفته شده مطلق گردد. بدلیل داشتن طول موج بزرگتر و همچنین همدوسی بالا، بسیار دقیق انجام شد. ولی در پردازشهای سنجنده TSX با وجود داشتن همدوسی بسیار بالای اینترفروگرامها، بدلیل داشتن طول موج بهنسبت کوتاه، بازیابی فاز با خطا همراه شد. دلیل این مسئله اختلاف در سرعت تغییر شکل بین دماغه خاکریز و پل بود، که این موجب شده بود اختلاف فاز از π بیشتر شود. برای حل این مشکل مجبور به ماسک پل از پردازشهای TSX شدیم.

۵- نتیجهگیری

در این مطالعه تغییر شکل خاکریزهای میانگذر دریاچه ارومیه در بازهی زمانی ۲۰۰۳–۲۰۱۳ که در این دوره با هیچ ابزار ژئودتیکی پایش نشده بود، با استفاده از دادههای تداخل سنجی راداری محاسبه شد. این میانگذر از دو خاکریز غربی و شرقی تشکیل شده است. بهمنظور اتصال دو خاکریز، پلی به طول ۱۳۰۰ متر در سال ۲۰۰۹ ساخته شده است. این پل که از پروژههای عظیم ایرانی به شمار می رود، نقش مهمی در توسعهی گردشگری، حملونقل و بازرگانی دارد. از آنجا که تغییر شکل نامتقارن خاکریزهای موجود در طرفین پل ممکن است به سلامت پل آسیب برساند، مسأله پایش خاکریزها از اهمیت ویژهای برخوردار است.

مراجع

- [1] G. B and I. D, "Structural Monitoring of Concrete Bridges during Whole Lifespan," 2002.
- [2] T. R. Lauknes, "Long-Term Surface Deformation Mapping using Small-Baseline Differential SAR Interferograms," Candidatus Scientiarum, Department of Physics, University of Tromsø, 2004.
- [3] M. Motagh, J. Klotz, F. Tavakoli, Y. Djamour, S. Arabi, H.-U. Wetzel, and J. Zschau, "Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake," Pure and Applied Geophysics, 2006.
- [4] W.-C. Hung, C. Hwang, Y.-A. Chen, C.-P. Chang, J.-Y. Yen, A. Hooper, and C.-Y. Yang, "Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan," Remote Sensing of Environment, 2010.
- [5] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent Scatterers in SAR Interferometry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing vol. 39, pp. 8-20, 2001.
- [6] M. Motagh, J. r. Hoffmann, B. Kampes, M. Baes, and J. Zschau, "Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements," Earth and Planetary Science Letters, vol. 255, pp. 432-444, 2007.
- [7] P.Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 40, pp. 2375–2383, 2002.

- [8] J. Anderssohn, M. Motagh, T. R. Walter, M. Rosenau, H. Kaufmann, and O. Oncken, "Surface deformation time series and source modeling for a volcanic complex system based on satellite wide swath and image mode interferometry: The Lazufre system, central Andes," Remote Sensing of Environment, vol. 113, pp. 2062-2075, 2009.
- [9] M. Motagh, H.-U. Wetzel, S. Roessner, and H. Kaufmann, "A TerraSAR-X InSAR study of landslides in southern Kyrgyzstan, Central Asia," Remote Sensing Letters, 2013.
- [10] C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique," Engineering Geology, vol. 68, pp. 3-14, 2003.
- [11] J. Ruch, J. Anderssohn, T. R. Walter, and M. Motagh, "Caldera-scale inflation of the Lazufre volcanic area , South America: Evidence from InSAR," Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008.
- [12] M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetzel, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," Geophysical Journal International, 2007.
- [13] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Laczniak, "Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation ", Geology, vol. 27, pp. 483-486, June 1, 1999 1999.
- [14] J. W. Bell, F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, and F. Novali, "Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge," Water Resour. Res., vol. 44, p. W02407, 02/05 2008.
- [15] J. r. Hoffmann, H. A. Zebker, D. L. Galloway, and F. Amelung, "Seasonal Subsidence and Rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry," Water Resour. Res .vol. 37, pp. 1551-1566, 2001.
- [16] M. Motagh, J. Hoffmann, B. Kampes, M. Baes, and J. Zschau, "Strain accumulation across the Gazikoy– Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements " Earth and Planetary Science Letters, 2007.
- [17] Y. Fialko, "Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system," Nature, vol. 441, pp. 968-971, 2006.
- [18] A. Hooper, "A combined multi-temporal InSAR method incorporating Persistent Scatterer and Small Baseline approaches," 2007.
- [19] B. Kampes, R. Hanssen, and Z. Perski, "Radar Interferometry with Public Domain Tools," in Fringe 2003, 2003.
- [20] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," Geophys. Res. Lett., vol. 31, p. L23611, 2004.
- [21] R. F. Hanssen, "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis," ISBN-10: 0792369459, 2001.