

# استفاده از داده‌های سری زمانی راداری در تعیین جابجایی سدهای خاکی (منطقه مورد مطالعه: سد خاکی ماملو)

الناز علی‌اصل‌خیابانی<sup>۱\*</sup>، محمدجواد ولدان‌زوج<sup>۲</sup>، یاسر مقصودی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

elnaz.khiabani073@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

valadanzouj@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۹، تاریخ تصویب فروردین ۱۴۰۱)

## چکیده

مهندسان سال‌هاست به تلاش برای دستیابی به روشی بهینه برای پایش سازه‌ها به منظور جلوگیری از وقوع فاجعه‌های جبران‌ناپذیر پرداخته‌اند. یکی از این سازه‌های مهم که نیازمند پایش مداوم است، سد می‌باشد؛ چراکه ناپایداری سدهای بزرگ و گسیختگی آن‌ها عاملی تهدیدکننده برای جان و مال انسان‌ها به حساب می‌آید و اثرات زیست محیطی قابل ملاحظه‌ای به دنبال خواهد داشت. مسئله اصلی در این تحقیق، ارائه روشی کم‌هزینه، سریع و دقیق برای محاسبه جابجایی و تغییرشکل بدنه سدهای خاکی می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری جابجایی بدنه سازه سد وجود دارد که در میان آن‌ها استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری از جمله تداخل‌سنجی راداری به دلیل فراهم نمودن مشاهدات گسترده و منظم از سطح زمین می‌تواند در امر اندازه‌گیری جابجایی و نشست سازه سد مفید واقع شود. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، سد خاکی ماملو واقع در استان تهران می‌باشد. روش استفاده شده برای برآورد جابجایی بدنه این سد، تکنیک پراکنشگر دائمی (PSI) می‌باشد، داده‌های مورد نیاز در این تحقیق، داده‌های باندهای C و X سنجنده‌های Sentinel-1A و CosmoSkyMed-X می‌باشد. در پردازش سری زمانی این تصاویر از گراف ستاره‌ای و مثلث‌بندی دلونی استفاده شده و دو مدل خطی و غیرپارامتریک برای برآورد جابجایی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل با اعمال دو مدل مختلف جابجایی بررسی گردیده و در نهایت مدلی که دارای هم‌دوسی زمانی بالاتری بود، به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید و مدل دیگر کنار گذاشته شد. در پردازش داده‌های سنجنده Sentinel-1A سد ماملو مدل مناسب برای جابجایی‌ها، مدل غیرپارامتریک و برای داده‌های سنجنده CosmoSkyMed-X همین سد مدل خطی به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید. به دلیل عدم برداشت داده‌های زمینی از سد ماملو در بازه زمانی مشترک با داده‌های راداری، به منظور ارزیابی دقت و اثبات درستی نتایج بدست‌آمده، نتایج دو دسته داده‌ی راداری CosmoSkyMed-X و Sentinel-1A مربوط به سد ماملو با یکدیگر مقایسه شده و همخوانی بسیار بالایی بین نتایج این دسته داده ملاحظه شد که میزان RMSE محاسبه شده برای داده‌های ASC این دو سنجنده برابر با ۰,۷۷۰۳ میلی‌متر و برای داده‌های DSC برابر با ۰,۹۵۵۱ میلی‌متر محاسبه گردید که این همخوانی بسیار بالای نتایج، امریست که می‌تواند دلیلی بر درستی نتایج استخراج شده باشد.

**واژگان کلیدی:** تداخل‌سنجی راداری، تکنیک پراکنشگر دائم، سد خاکی، CosmoSkyMed\_X.Sentinel-1A

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

پدیده‌ها و رویدادهای طبیعی و غیر طبیعی براساس نوع واکنش و تأثیرگذاری می‌توانند برای جامعه بشری و محیط زیست مخرب یا مفید باشند [۱]. یکی از پدیده‌هایی که در صورت به وقوع پیوستن، خسارت‌های مالی و جانی بسیاری را به بار خواهد آورد، تخریب سازه‌ها و ابرسازه-هایبست که از جمله زیرساخت‌های مهم هر کشور محسوب می‌گردند. از اینرو پایش مداوم و مطالعه رفتار جابجایی و تغییر شکل در این سازه‌ها امری ضروری به-شمار می‌آید. یکی از مهم‌ترین سازه‌های عظیم در هر کشوری، سد می‌باشد. با توجه به مزایای بسیار این سازه و به علت بالا بودن هزینه ساختمان سدها و نیز شدت وخامت عواقب ناشی از خرابی آن‌ها، مسئله حفاظت، نگهداری و ارزیابی مستمر پایداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تکنیک‌های متفاوتی از گذشته تا امروز به منظور پایش و اندازه‌گیری جابجایی و تغییر شکل سطح زمین و پدیده-های موجود بر روی آن معرفی و به‌کارگرفته شده‌اند. تکنیک نقشه‌برداری زمینی و ترازیبی<sup>۱</sup> به واسطه جمع-آوری مشاهدات زمینی به عنوان قابل اطمینان‌ترین روش-ها در اندازه‌گیری جابجایی‌های قائم و افقی در سطح زمین شناخته شده‌اند اما این روش بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر می-باشد. تکنیک مکان‌یابی جهانی یا GPS<sup>۲</sup> توسط اطلاعات ماهواره‌ای قادر به جمع‌آوری اطلاعات جابجایی سطح زمین به صورت پیوسته در زمان می‌باشد، اما همانند تکنیک ترازیبی و نقشه‌برداری زمینی تنها قادر به پایش جابجایی در تعداد محدودی نقاط بر روی سطح زمین می-باشد. از جمله روش‌های دیگری که برای پایش جابجایی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده از ابزار دقیق و حسگرهای تغییر شکل می‌باشند که این دو روش نیز هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و علاوه بر این، استفاده و پیاده سازی الگوریتم آن‌ها پیچیدگی بسیار زیادی دارا می-باشد [۲]. در میان این روش‌ها، استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری از جمله تداخل‌سنجی راداری<sup>۳</sup> به‌دلیل فراهم نمودن مشاهدات گسترده و منظم از سطح زمین،

هزینه پایین و صرف زمان کوتاه می‌توانند در امر اندازه-گیری جابجایی و نشست سازه‌ها مفید واقع شوند. این روش اولین بار به‌منظور مطالعه‌ی حرکات سطح زمین در سال ۱۹۷۴ ابداع شد [۳]. اساس این روش، اندازه‌گیری تفاضلی فازهای تصاویر رادار اخذشده از یک منطقه در یک بازه‌ی زمانی می‌باشد. به طور کلی خصوصیات چگون برداشت پیوسته در سطح وسیع، دقت بالا، مقرون به صرفه بودن و امکان اخذ اطلاعات تحت هر شرایط آب و هوایی دلایل عمده استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در پایش جابجایی است. همچنین فراوانی مکانی بالا در پهنه-ای با ابعاد وسیع و فراوانی نسبتاً خوب زمانی مشاهدات رادار در مقایسه با ترازیبی و سیستم مکان‌یابی جهانی در سال‌های اخیر دیدگاهی گسترده را برای پایش تغییرات سطح زمین با استفاده از این تکنیک فراهم کرده‌است [۴].

با توجه به مزایای عمده ذکر شده برای تکنیک‌های راداری، هدف اصلی این مقاله محاسبه نرخ جابجایی‌های بدنه سد خاکی ماملو با به‌کارگیری داده‌های راداری سری زمانی<sup>۴</sup> و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم<sup>۵</sup> می‌باشد. ساختار کلی تحقیق بدین گونه است که در بخش اول، مقدمه کوتاهی در مورد ضرورت انجام تحقیق و روش مورد استفاده برای دستیابی به هدف ذکر شد. در بخش دوم اشاره کوتاهی به تحقیقات انجام شده خواهیم داشت. بخش سوم معرفی منطقه مطالعاتی، بخش چهارم داده‌های مورد استفاده در تحقیق و بخش پنجم شامل ارائه مبانی و روند انجام تحقیق می-باشد. بخش نهایی نیز شامل ارائه نتایج و خروجی‌های حاصل از انجام پروژه، بحث و نتیجه‌گیری خواهد بود.

## ۲- پیشینه تحقیق

با توجه به استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به منظور محاسبه جابجایی سدهای خاکی در این تحقیق، بررسی تاریخچه‌ی تکنیک تداخل‌سنجی راداری در خصوص این موضوع، ضروری به نظر می‌رسد. در این بخش تحقیقات انجام‌گرفته به همراه اهداف موردنظر، روش‌های به‌کار رفته و نرم‌افزارهای استفاده شده در هر یک عنوان می‌گردند. لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از تکنیک

۴ Time Series  
۵ Persistent Scatterer

۱ Levelling  
۲ Global Positioning System  
۳ Radar Interferometry

منظور سادگی در بیان روش‌های ارائه شده برای خوانندگان این مقاله، بخش پیشینه تحقیق به صورت یک جدول آورده شده است.

تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم در این تحقیق، تمرکز اصلی این بخش در رابطه با تاریخچه‌ی مطالعات صورت گرفته با بکارگیری روش ( Persistent Scatterer In-SAR) در خصوص پایش سد می‌باشد. به-

جدول ۱- مطالعات صورت گرفته در خصوص پایش سد با استفاده از داده‌های راداری

نویسندگان	هدف	داده مورد استفاده	روش	نرم افزار
سوسا و همکاران [۵]	بررسی پتانسیل داده‌های راداری C باند برای پایش تغییر شکل سدها	ENVISAT, ERS, Sentinel1-A	PSI	StaMPS, SARPROZ
جعفری [۶]	برآورد میزان جابجایی‌های سد مسجد سلیمان	ENVISAT	SBAS	PLAXIS, StaMPS
وانگ تنگ و همکاران [۷]	پایش سدی بتنی در چین (سد TGD)	ENVISAT	PSI, QPSI	-
عمادعلی و همکاران [۸]	بررسی پتانسیل تصاویر راداری برای پایش سد مسجد سلیمان	TerraSAR-X	SBAS	-
لازکی و همکاران [۹]	بررسی و مشاهده تغییرات سدها، سه سد TGD (واقع در چین)، Charvak (واقع در ازبکستان) و Plover Cove (واقع در هنگ کنگ)	COSMO-SkyMED, ENVISAT, TerraSAR-X	PSI	StaMPS, SARPROZ
میلیلو و همکاران [۱۰]	پایش سلامت سازه سد بتنی قوسی Pertusillo	COSMO-SkyMED, ALOS, TerraSAR-X	PSI	SARPROZ
لازکی و همکاران [۱۱]	پایش سد Plover Cove	TerraSAR-X, TanDEM-X	PSI	SARPROZ
باکن و همکاران [۱۲]	پایش سه سازه پل، ساختمان و سد	ENVISAT	PSI	SARPROZ

حوزه‌های آبریز می‌باشد. سد ماملو در ۴۵ کیلومتری جنوب شرق تهران و در پایین دست سد لتیان، بر روی رودخانه جاجرود ۲۵ کیلومتر پایین‌تر از پیوند رودخانه دماوند به آن ساخته شده است. این سد از نوع خاکی با هسته ناتراوای رسی به ارتفاع ۸۶ متر از سنگ بستر بوده و دریاچه‌ای به حجم تقریبی ۲۵۰ میلیون متر مکعب ایجاد کرده است. تاج این سد در مختصات  $35.585^{\circ}$  شمالی و  $51.788^{\circ}$  شرقی واقع شده است. طول تاج این سد ۸۰۷ متر و ارتفاع سد از کف پی ۱۱۰ متر می‌باشد.

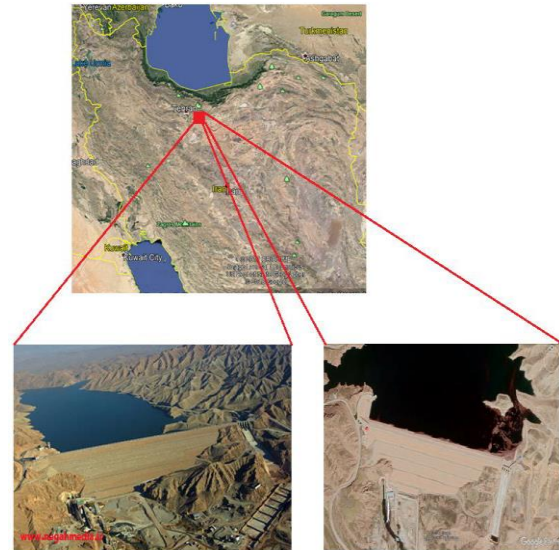
از نظر زمین شناسی ساختگاه سد عمدتاً از کنگلومرای نئوژن تشکیل شده است. این کنگلومرا در محدوده ساختگاه سد از عدسی مقاومی ساخته شده که به سمت کناره چپ (شرق) از مقاومت آن کاسته می‌شود. در کناره راست با توجه به مقاومت بیشتر، از تراکم درز و شکاف بیشتری نیز برخوردار است. منطقه از لحاظ تکتونیکی آرام بوده و تنها گسل محدوده، گسل روراند ماملو می‌باشد که در محل پیوند رودخانه دماوند و جاجرود قرار دارد. علاوه بر عوامل زمین‌شناسی که در بالا ذکر شد، دو عامل قوس‌زدگی بدنه و

با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوزه پایش جابجایی سدها با استفاده از داده‌های راداری سری زمانی همانطور که در جدول ۱ آورده شده است، حضور کم‌رنگ داده‌های رایگان و به روز Sentinel-1A و عدم ارزیابی دقت نتایج حاصل از داده‌های بکارگرفته شده، به وضوح به چشم می‌خورد. به همین دلیل هدف اصلی این تحقیق استفاده از داده‌های رایگان سنجنده Sentinel-1A و بررسی دقت نتایج استخراج شده از داده‌های مورد استفاده خواهد بود. همچنین به منظور مقایسه نتایج حاصل از داده‌های C باند نسبت به داده‌های X باند، از داده‌های سنجنده Cosmo نیز استفاده شد.

### ۳- منطقه مطالعاتی

عملیات ساختمانی سد ماملو در سال ۱۳۷۹ آغاز و آبدگیری اولیه سد در دی ماه ۱۳۸۶ انجام گردید. هدف از احداث سد ماملو، ذخیره جریان‌های غیریکنواخت رودخانه جاجرود\_ دماوند، تأمین بخشی از آب شرب شهر تهران و آب کشاورزی اراضی دشت ورامین و مهار سیلاب‌های

شکاف حرارتی از جمله عوامل تأثیرگذار دیگر بر سلامت سازه سد ماملو بوده و می‌توانند پایداری آن را تهدید کنند. از اینرو بررسی پایداری و سلامت این سازه مورد اهمیت و توجه قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و نمای کلی سد ماملو نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد ماملو

#### ۴- داده‌های مورد استفاده

داده‌های استفاده شده در این تحقیق، داده‌های باند C سنجنده Sentinel-1A و داده‌های باند X سنجنده CosmoskyMed-X می‌باشد. به منظور انجام پردازش‌ها در این تحقیق از ۲۵ تصویر S-1A در حالت Ascending با شماره گذر ۱۳۰ و همچنین ۲۹ تصویر در حالت Descending با شماره گذر ۳۵ و در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ استفاده گردید. تصاویر سری زمانی سنجنده CosmoskyMed-X نیز در بازه زمانی مشابه با تصاویر S-1A بوده و در مسیر بالاگذر شامل ۲۴ تصویر و در مسیر پایین گذر شامل ۲۱ تصویر می‌باشند.

#### ۵- مبانی و روند انجام پروژه

تکنیک تداخل‌سنجی راداری به موازات توانایی‌های بالا دارای محدودیت‌هایی است که استفاده از آن را در برخی موارد ناممکن می‌سازد. از جمله عوامل محدودکننده تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی، کمبود همدوسی ناشی از عدم همبستگی زمانی و مکانی است. جهت رفع این مشکل، در دو دهه‌ی اخیر روش‌های خاصی براساس

تکنیک تداخل‌سنجی راداری ارائه شده‌اند که تنها از نقاطی که در طول زمان دارای ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً ثابتی هستند با عنوان پراکنشگرهای دائم برای پایش جابجایی استفاده می‌کنند [۱۵]. پیکسل‌های پراکنشگر دائمی با وجود خط‌مبناهای زمانی و مکانی بلند نیز همدوسی بالایی را موجب می‌شوند و از عدم همبستگی تصاویر راداری کمتر تأثیر می‌پذیرند. در این روش، یک مجموعه از پیکسل‌های پراکنشگر دائمی از طریق آنالیز رفتار دامنه آن‌ها در یک سری از تداخل‌نماها شناسایی می‌شوند و سپس بر اساس تطبیق فاز آن‌ها با یک مدل جابجایی از پیش تعیین‌شده تصفیه می‌گردند. بنابراین فقط پراکنشگرهای روشن با یک رفتار فاز جابجایی نزدیک به مدل از پیش تعریف شده به عنوان پیکسل‌های پراکنشگر دائم شناسایی می‌شوند. روش‌های موجود تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش-کننده‌های دائمی یک تکنیک مؤثر در افزایش تعداد و کیفیت فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی می‌باشند. در این تکنیک سری زمانی از تصاویر SAR در بازه زمانی بلند مدت با استفاده از پراکنشگرهای دائمی پردازش شده و جابجایی زمین با دقت‌های میلیمتری برآورد می‌گردد [۴]. با توجه به مزایای یاد شده در مورد داده‌های راداری، صرف زمان و هزینه کمتر و از طرفی توجه به این امر که سازه‌های دست‌ساز بشر به‌عنوان پراکنشگر دائمی شناسایی می‌گردند، استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روشی مناسب و دقیق برای مطالعه سلامت سازه‌ها پیشنهاد می‌گردد، از اینرو روش مورد استفاده در این تحقیق نیز روش PSI در نظر گرفته شد که در ادامه به معرفی دقیق آن خواهیم پرداخت.

#### ۵-۱- پردازش سری زمانی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی

می‌توان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی و یا پراکنش‌کننده‌های دائمی رفتار تغییرشکل یک پدیده را در زمان بررسی نمود که به آن تحلیل سری زمانی می‌گوییم. در این صورت می‌بایست چندین تصویر در بازه‌های زمانی متفاوت از منطقه در دسترس باشد و چندین تداخل‌نما<sup>۱</sup> بین بازه‌های زمانی متفاوت جهت محاسبه‌ی نرخ تغییرشکل وارد محاسبات گردد. هدف اصلی در تحلیل

<sup>۱</sup> Interferogram

$$\gamma^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(B_{\perp}^{i,k} \cdot B_{\perp,max}) g(T^{i,k} \cdot T_{max}) g(f_{dc}^{i,k} \cdot f_{dc,max}) \quad (2)$$

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & \text{for } |x| \leq c \\ 0 & \text{for } |x| > c \end{cases}$$

در رابطه بالا،  $\gamma^k$  هم‌دوسی تجمعی برای تصویر پایه  $m_k$  و  $f_{dc,max}$ ،  $T_{max}$ ،  $B_{\perp,max}$  به ترتیب مقادیر بیشینه برای خط مبنای مکانی قائم، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکزی داپلر می‌باشند. پس از انتخاب تصویر پایه و تشکیل تداخلنماها، فاز تداخلنما برای هر PS در تداخلنمای تشکیل شده از تصویر پیرو  $m$  و تصویر پایه  $k$  بصورت رابطه ۳ خواهد بود. [۱۵]

$$\Delta\Phi_{i,k} = \Delta\Phi_{i,k}^{flat}(p) + \Delta\Phi_{i,k}^{height}(p) + \Delta\Phi_{i,k}^{disp}(p) + \Delta\Phi_{i,k}^{atmo}(p) + \Delta\eta_{i,k}(p) \quad (3)$$

رابطه ۳ به ترتیب شامل فازهای زمین مسطح، توپوگرافی، جابجایی در راستای خط دید سنجنده (LOS) <sup>۳</sup>، اثر اتمسفر و نویز می‌باشد. ترم اول (فاز زمین مسطح) با استفاده از اطلاعات دقیق مداری قابل حذف است. ترم دوم رابطه ۳ فاز ناشی از توپوگرافی می‌باشد که با استفاده از رابطه ۴ و یک مدل رقومی ارتفاعی قابل محاسبه و حذف می‌باشد؛ باید توجه داشت که چون مدل رقومی مورد استفاده دارای خطاست لذا پس از حذف ترم توپوگرافی، باقی‌مانده فاز توپوگرافی بر روی تداخلنماها خواهد ماند که به عنوان یکی از مجهولات بایستی برآورد گردد [۱۵]

$$\Delta\Phi_{i,k}^{height}(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{h(p)}{\sin\theta} \quad (4)$$

که در رابطه ۴،  $B_{n,i}$  خط مبنای مکانی قائم،  $\Delta h$  ارتفاع هدف مورد نظر نسبت به یک نقطه مرجع،  $\theta$  زاویه فرودی و  $R_k$  فاصله سنسور تا هدف در تصویر پایه می‌باشند. ترم سوم رابطه ۳ جابجایی در راستای خط دید سنجنده است، روش رایج به منظور مدل کردن جابجایی، خطی فرض کردن این ترم در زمان می‌باشد که می‌توان به صورت رابطه ۵ نوشت:

$$\Delta\Phi_{i,k}^{disp}(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V(P) B_{t,i} \quad (5)$$

سری زمانی، معکوس نمودن فاز تداخلنماها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های اخذ تصویر با استفاده از روش کمترین مربعات می‌باشد. اگر تعداد تداخلنماها حداقل به تعداد تصاویر راداری باشد و زنجیره‌ی آن‌ها درجایی گسسته نشده باشد، می‌توان با استفاده از تحلیل سری زمانی مقادیر جابجایی را در زمان‌های مربوط به اخذ تصاویر برآورد کرد. در برخی مناطق به دلیل تغییرات سریع ویژگی پراکنشی عوارض در فاصله‌ی زمانی بین برداشت دو تصویر و یا بلند بودن طول خط‌مبنای مکانی میان تصاویر نمی‌توان تداخلنمای همبسته ایجاد نمود. همچنین فاز تداخلنماهایی که درجه‌ی همبستگی پایینی دارند را نمی‌توان به درستی بازیابی کرد. در نتیجه، عدم همبستگی مکانی و زمانی حاصل می‌گردد و نمی‌توان شبکه‌ای پیوسته از تداخلنماها تولید نمود که از جمله نقاط ضعف تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی محسوب می‌گردد. محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی، موجب توسعه‌ی تکنیکی با عنوان پراکنشگرهای دائمی در تداخل‌سنجی راداری شد. پیکسل‌های پراکنشگر دائم حتی در حدود بحرانی خطوط مبنای زمانی و مکانی نیز دارای هم‌دوسی بالایی هستند. [۴]

پراکنشگرهای دائمی بر پایه آنالیز دامنه تصاویر SAR در کل سری زمانی و از طریق محاسبه شاخص پراکنندگی دامنه <sup>۱</sup> (ADI) انتخاب می‌شوند. شاخص پراکنندگی دامنه برای پیکسل  $m$  با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$D_n = \frac{\sigma_n}{m_n} \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma_n$  و  $m_n$  به ترتیب انحراف معیار و میانگین مقادیر دامنه برای پیکسل  $m$  در تمام تصاویر هستند. با انتخاب پراکنشگرهای دائمی تداخلنماهای تمام تصاویر SAR نسبت به یک تصویر (تصویر پایه) در نقاط PS محاسبه می‌گردد، لذا برای یک سری زمانی متشکل از  $N+1$  تصویر،  $N$  تداخلنما تولید می‌شود. تصویر پایه تصویری خواهد بود که هم‌دوسی تجمعی کل تداخلنماها نسبت به آن تصویر بیشترین مقدار باشد [۱۳]. هم‌دوسی تجمعی تابعی از خط مبنای مکانی قائم، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکز داپلر <sup>۲</sup> می‌باشد و از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد [۱۴].

<sup>۱</sup> Amplitude Dispersion Index

<sup>۲</sup> Doppler Centroid Frequency

<sup>۳</sup> Line of Sight

پراکنشگرهای دائم و محاسبه اختلاف فاز بین PSهای مجاور استفاده می‌شود [۱۴].

با محاسبه اختلاف فاز بین PSهای دو سر هر یال شبکه در هر تداخلنما، فاز یال‌های شبکه مکانی برآورد می‌گردد که مشابه رابطه ۹ فاز هر یال شبکه، بین دو پراکنشگر دائمی P1 و P2 برابر خواهد بود با:

$$\Delta\Phi_{i,k}^{p1,p2} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{\Delta h(p1,p2)}{\sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V(P1,p2) B_{t,i} + \Delta\Phi_{i,k}^{atmo}(p1,p2) + \Delta\eta_{i,k}(p1,p2) \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $\Delta h(p1,p2)$  و  $\Delta V(p1,p2)$  و  $\Delta\Phi_{i,k}^{atmo}(p1,p2)$  به ترتیب باقیمانده توپوگرافی، سرعت جابجایی و فاز اتمسفر بین دو پراکنشگر P1 و P2 خواهد بود.

در این حالت با توجه به اینکه فاصله PSها کمتر از یک کیلومتر است، لذا می‌توان از ترم دوم  $\Delta\Phi_{i,k}^{atmo}(p1,p2)$  بر روی هر یال شبکه صرف نظر کرد، در نتیجه مجهولات مسئله باقیمانده توپوگرافی ( $\Delta h(p1,p2)$ ) و سرعت جابجایی ( $\Delta V(p1,p2)$ ) برای یال بین دو پراکنشگر دائمی خواهند بود؛ که با همان روش پریودوگرام برآورد می‌گردند. پس از برآورد سرعت جابجایی و باقیمانده توپوگرافی برای یال‌های شبکه مکانی، با استفاده از یک فرآیند تجمیع<sup>۲</sup> دو پارامتر سرعت جابجایی و باقی‌مانده توپوگرافی در نقاط PS محاسبه می‌گردند. با کسر فاز دو پارامتر محاسبه شده، از تداخلنماها، فاز باقیمانده شامل اتمسفر و نویز در نقاط پراکنشگر دائمی خواهد بود. با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر مکانی و بلاگذر زمانی سهم فاز اتمسفر نیز جدا می‌شود [۱۵]. به این ترتیب پس از جداسازی سهم اتمسفر، فاز باقی‌مانده فقط شامل نویز خواهد بود که به منظور ارزیابی صحت مدل مورد استفاده برای برآورد پارامترهای مجهول از رابطه ۱۰ که معروف به همدوسی زمانی است، استفاده می‌شود و هرچه مقدار این کمیت به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده انطباق مدل با داده‌های مورد استفاده خواهد بود.

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{i\phi} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰ فاز تداخلنماها پس از کسر سهم فاز پارامترهای جابجایی، باقی‌مانده توپوگرافی و اتمسفر می‌-

در رابطه ۵،  $\Delta V(p)$  سرعت هدف مورد نظر نسبت به نقطه مرجع،  $B_{t,i}$  خط مبنای زمانی می‌باشد [۱۵]. ترم چهارم رابطه ۳، فاز ناشی از اتمسفر است که پارامتری همبسته در مکان برای فواصل کمتر از یک کیلومتر و ناهمبسته در زمان می‌باشد و براساس همین ویژگی برآورد می‌گردد [۱۵] که در ادامه به آن می‌پردازیم.

با توجه به مطالب بیان شده فاز زمین مسطح و توپوگرافی برآورد گردیده و از روی تمامی تداخلنماها حذف می‌شوند. پس از حذف دو ترم مذکور رابطه ۳ به صورت رابطه ۶ قابل بازنویسی می‌باشد:

$$\Delta\Phi_{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{\Delta h(p)}{\sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V(P) B_{t,i} + \Delta\Phi_{i,k}^{atmo}(p) + \Delta\eta_{i,k}(p) \quad (6)$$

در رابطه ۶،  $B_{t,i}$  مقدار باقی‌مانده توپوگرافی است. به منظور حل معادله در صورتی که ابعاد منطقه مورد مطالعه کوچکتر از یک کیلومتر مربع باشد، چون اتمسفر در مکان همبسته است می‌توان از اثر اتمسفر صرف نظر کرد، لذا در رابطه ۱۱، مجهولات مسئله  $\Delta h(p)$  و  $\Delta V(P)$  خواهند بود. باتوجه به این نکته که سمت چپ معادله ۶ بین  $-\pi$  و  $\pi$  مدوله (اصطلاحاً Wrap) می‌باشد ولی سمت راست این رابطه شامل فازهای Unwrap است، لذا سیستم غیر خطی خواهد بود. برای حل مسئله از جست و جو در فضای فرکانسی دو بعدی (که بعدها این فضا  $\Delta h(p)$  و  $\Delta V(p)$  هستند) و تابع پریودوگرام<sup>۱</sup> (رابطه ۷) استفاده می‌شود. [۱۵]

$$\xi[\Delta V(P), \Delta h(p)] = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} e^{j[\Delta\Phi_{i,k}(p) - C_v \Delta V(p) B_{t,i} - C_h \Delta h(p) B_{n,i}]} \quad (7)$$

که در معادله ۷،  $C_v = \frac{4\pi}{\lambda}$  و  $C_h = \frac{4\pi}{\lambda R_k \sin\theta}$  می‌باشد. جواب مسئله  $\Delta h(p)$ ،  $\Delta V(p)$  خواهد بود که به ازای آن‌ها مقدار مطلق پریودوگرام بیشینه شود:

$$\Delta V(P), \Delta h(p) = \operatorname{argmax}\{\xi[\Delta V(P), \Delta h(p)]\} \quad (8)$$

اما در صورتی که منطقه مورد پردازش از یک کیلومتر مربع بزرگتر باشد نمی‌توان از فاز اتمسفر صرف نظر کرد، لذا برای حل مسئله از یک شبکه مکانی بین نقاط

<sup>۲</sup> Integration

<sup>۱</sup> Periodogram

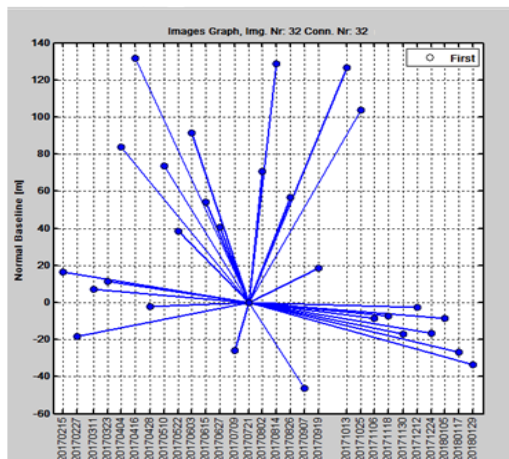
## ۵-۲- پردازش داده‌های مربوط به سد ماملو

همانطور که در بخش ۴ ذکر شد، داده‌های سد ماملو در چهار بخش تقسیم‌بندی میشوند که دو بخش آن داده‌های بالاگذر و پایین‌گذر سنجنده S-1A و دو بخش دیگر داده‌های بالاگذر و پایین‌گذر سنجنده CSK هستند. در ادامه پردازش هر یک از این تصاویر سری زمانی به تفصیل شرح داده خواهد شد.

### ۵-۲-۱- پردازش داده‌های سنجنده Sentinel-1A

#### منطقه سد ماملو در حالت Ascending

ابتدا پردازش سری زمانی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی بر روی داده‌های مسیر ۱۳۰ شامل ۲۵ تصویر اعمال گردید. در تمامی پردازش‌ها ثبت هندسی تصاویر نسبت به یک تصویر (تصویر پایه) انجام گرفت. تصویر پایه همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد براساس بیشینه نمودن همدوسی جمع‌ی با در نظر گرفتن تمامی تصاویر انتخاب می‌گردد. از این رو تصویر ۲۰۱۷/۱۱/۸ به عنوان تصویر پایه انتخاب گردید و ۲۴ تصویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و نمونه‌برداری شدند. پس از ثبت هندسی تصاویر، تداخلنماها بر اساس گراف ستاره‌ای (به منظور حفظ Spatial and Temporal Coherence)، مطابق شکل ۳ تشکیل شدند.



شکل ۳. گراف تصاویر به منظور تولید تداخلنماها به ازای ۲۵ تصویر سنجنده S-1A در منطقه سد ماملو در حالت Ascending

فاز زمین مسطح با استفاده از اطلاعات دقیق مداری تصاویر اخذ شده از روی تداخلنماها حذف گردید. همچنین به منظور حذف فاز توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی تولید

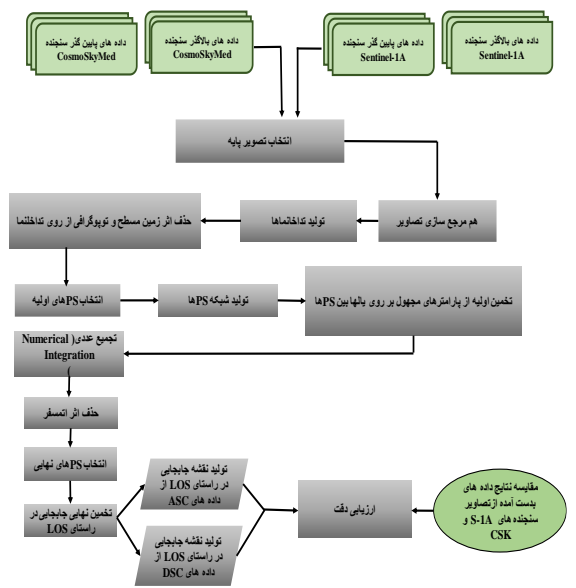
باشد. در نهایت واریانس جابجایی و باقیمانده توپوگرافی برآورد شده به پراکندگی باقی‌مانده فاز (یا همان فاز نویز) و پراکندگی خطوط مبنای مکانی و زمانی در مجموعه تداخلنماها بستگی دارد [۱۶] که بصورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\Delta h}^2 = \left(\frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi}\right)^2 \frac{\sigma_{\phi}^2}{M \sigma_{B_n}^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{\Delta v}^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{\sigma_{\phi}^2}{M \sigma_{B_t}^2}$$

در رابطه (۱۱)،  $\sigma_{\Delta h}^2$ ، واریانس باقیمانده توپوگرافی برآورد شده  $\sigma_{\Delta v}^2$ ، واریانس جابجایی برآورد شده و  $M$ ،  $\sigma_{\phi}^2$ ،  $\sigma_{B_n}^2$ ،  $\sigma_{B_t}^2$  به ترتیب تعداد تداخلنماها، واریانس نویز، واریانس خطوط مبنای مکانی قائم و واریانس خطوط مبنای زمانی می‌باشند که می‌تواند به عنوان دقتی از برآوردهای انجام شده در نظر گرفته شود.

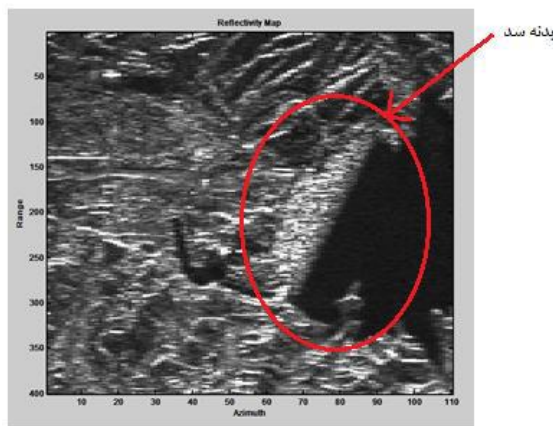
بر اساس مطالب ذکر شده در بخش قبل، فرآیند تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی به منظور پردازش سری زمانی تصاویر و برآورد جابجایی نقاط PS که روش مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد، به صورت کامل تشریح شد. فلوجارت شکل ۲ مراحل انجام شده در این تحقیق از آغاز تا پایان را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار استفاده شده در این پژوهش برای پردازش داده‌های راداری S-1A نرم‌افزار SARPROZ می‌باشد.



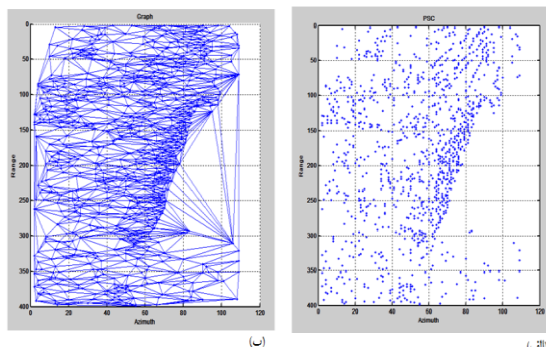
شکل ۲- فلوجارت مراحل اجرایی



شده توسط سنجنده ALOS استفاده شد که دارای قدرت تفکیک مکانی 30 متر و دقت ارتفاعی 7 متر می‌باشد. مدل رقومی ارتفاعی سنجنده ALOS توسط سازمان فضایی ژاپن به صورت رایگان در اختیار محققان قرار گرفته است. با حذف دو ترم زمین مسطح و توپوگرافی، تداخلناهای تفاضلی حاصل شامل فازهای جابجایی، باقیمانده توپوگرافی و اتمسفر هستند. پراکنشگرهای دائمی کاندید با استفاده از شاخص پراکنشگری دامنه با حد آستانه 0.3 انتخاب شده و سایر نقاط کنار گذاشته شدند که به این ترتیب تعداد 1059 پراکنشگر کاندید در ناحیه سد ماملو با 25 تصویر SAR شناسایی گردید. شبکه مکانی بین نقاط پراکنشگر کاندید با استفاده از مثلث بندی دلونی تشکیل شد که تعداد یالهای شبکه مکانی برابر 3144 شد. شکل 4 تصویر دامنه منطقه مورد پردازش و شکل 5 نقاط پراکنشگر کاندید و شبکه مکانی دلونی متناظر با آنها را نمایش میدهد.



شکل ۴- تصویر دامنه منطقه سد ماملو حاصل از سنجنده S-1A در حالت Ascending



شکل ۵- الف) نقاط پراکنشگر کاندید انتخابی با استفاده از 25 تصویر سنجنده S-1A در منطقه سد ماملو در حالت Ascending ب) شبکه مکانی تشکیل شده بین پراکنشگرهای کاندید

در مرحله بعد با استفاده از دو مدل خطی و غیرپارامتریک، جابجایی و باقیمانده خطای توپوگرافی بر

روی هر یال محاسبه شده و مجهولات برآورد شده به نقاط PS منتقل خواهند شد، سپس اثر اتمسفر نیز محاسبه شده و از روی نقاط حذف می‌گردد. حال باقیمانده فاز تداخلنا نویز خواهد بود که از آن برای محاسبه همدوسی زمانی، مطابق رابطه 10 استفاده شد. به منظور انتخاب مدل مناسب، همدوسی زمانی برای هر یک از این دو مدل برآورد شده و مدلی که دارای همدوسی زمانی بالاتری (مقادیر بالاتر از 0.9 بیشتری) بود، به عنوان مدل مناسب برای برآورد جابجایی در این منطقه توسط تصاویر سنجنده S-1A انتخاب شده و جابجایی‌ها بر اساس این مدل بدست خواهند آمد و مدل دیگر کنار گذاشته خواهد شد. پس از تشکیل تصاویر همدوسی هر یک از این دو مدل، مشخص شد که همدوسی زمانی حاصل از مدل غیرپارامتریک نسبت به مدل خطی بالاتر بوده و مقادیر بزرگتر از 0.9 بیشتری دارا می‌باشد، از اینرو مدل غیرپارامتریک، به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تصاویر بالاگذر منطقه سد ماملو انتخاب گردید. با انتخاب مدل غیرپارامتریک برای جابجایی‌های سد ماملو، نقشه جابجایی این سد در حالت Ascending به صورت شکل 6 حاصل شد. در شکل 6، نقاط با همدوسی زمانی بالاتر از 0.8 نمایش داده شده‌اند.

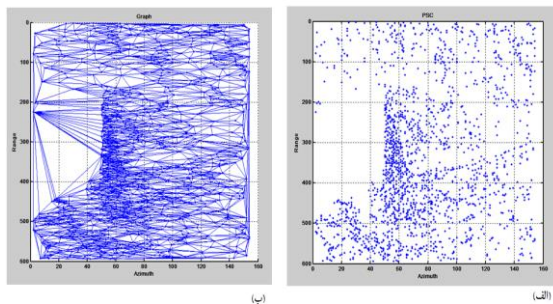


شکل ۶- نقشه جابجایی بدست آمده برای سد ماملو با استفاده از تصاویر سنجنده S-1A در حالت Ascending

#### ۵-۲-۲- پردازش داده‌های سنجنده Sentinel-1A منطقه سد ماملو در حالت Descending

تصاویر اخذ شده از سنجنده S-1A برای سد ماملو در حالت DSC، شامل 29 تصویر در بازه زمانی 2017/01 تا 2018/01 می‌باشد. در پردازش این سری داده‌ها، تصویر مربوط به تاریخ 2017/08/29 به عنوان تصویر پایه انتخاب گردید و 28 تصویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و





شکل ۹- الف) نقاط پراکنشگر کاندید انتخابی با استفاده از تصویر سنجنده S-1A در منطقه سد ماملو در حالت Descending (ب) شبکه مکانی تشکیل شده بین پراکنشگرهای کاندید  
 پس از اعمال هر دو مدل خطی و غیرپارامتریک برای برآورد مجهولات، مشخص شد که همدوسی زمانی حاصل از مدل غیرپارامتریک نسبت به مدل خطی بالاتر بوده و مقادیر بزرگتر از 0.9 بیشتری دارا می‌باشد، اینرو مدل غیرپارامتریک، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای تصاویر پایین‌گذر منطقه سد ماملو انتخاب گردید. در نهایت نقشه جابجایی این سد در در بازه زمانی ذکر شده با استفاده از داده‌های Descending بدست آمد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌است.

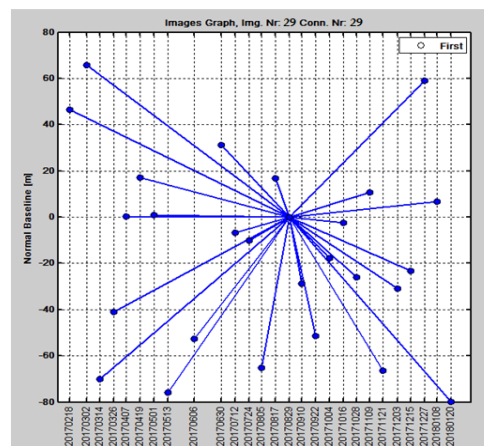


شکل ۱۰- نقشه جابجایی بدست آمده برای سد ماملو با استفاده از تصاویر سنجنده S-1A در حالت Descending

### ۵-۲-۳- پردازش داده‌های سنجنده-CosmoskyMed X منطقه سد ماملو در حالت Ascending

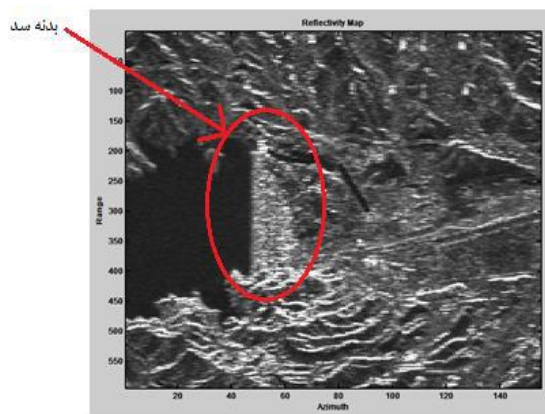
تصاویر اخذ شده از سنجنده CSK برای سد ماملو در حالت ASC، شامل ۲۴ تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۱ تا ۲۰۱۸/۰۱ می‌باشد. در پردازش این سری داده‌ها، تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۷/۰۳/۳۱ به عنوان تصویر پایه انتخاب گردید و ۲۳ تصویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و نمونه-برداری شدند. همچنین همانند مراحل قبل، گراف استفاده شده در روند پردازش، گراف ستاره‌ای می‌باشد. همچنین به منظور حذف فاز توپوگرافی، همانند مرحله قبل، از DEM

نمونه‌برداری شدند. همچنین همانند مراحل قبل، گراف استفاده شده در روند پردازش، گراف ستاره‌ای می‌باشد که در شکل ۷ نمایش داده شده‌است.



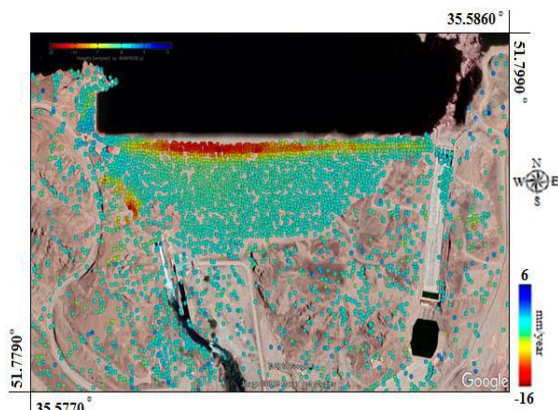
شکل ۷- گراف تصاویر به منظور تولید تداخل‌ها با ازای ۲۹ تصویر سنجنده S-1A در منطقه سد ماملو در حالت Descending

همچنین به منظور حذف فاز توپوگرافی، همانند مرحله قبل، از DEM مربوط به ALOS استفاده شد و فاز زمین مسطح با استفاده از اطلاعات دقیق مداری از روی تداخل‌ها حذف گردید. پراکنشگرهای دائمی کاندید با استفاده از شاخص پراکنندگی دامنه با حد آستانه 0.3 انتخاب شده و سایر نقاط کنار گذاشته شدند که به این ترتیب تعداد 1715 پراکنشگر کاندید در ناحیه سد ماملو با ۲۸ تصویر SAR شناسایی گردید. شبکه مکانی بین نقاط پراکنشگر کاندید با استفاده از مثلث بندی دلونی تشکیل شد که تعداد یال‌های شبکه مکانی برابر 5121 شد. شکل ۸ تصویر دامنه منطقه مورد پردازش و شکل ۹ نقاط پراکنشگر کاندید و شبکه مکانی دلونی متناظر با آن‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۸- تصویر دامنه منطقه سد ماملو حاصل از تصاویر سنجنده S-1A در حالت Descending

این سد در در بازه زمانی ذکر شده با استفاده از داده‌های Ascending سنجنده CSK بدست آمد که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

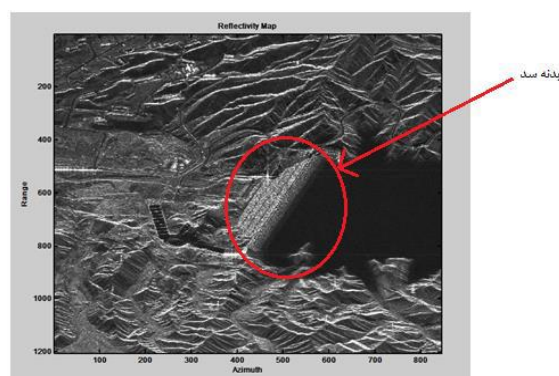


شکل ۱۳ - نقشه جابجایی بدست آمده برای سد ماملو با استفاده از تصاویر سنجنده CSK در حالت Ascending

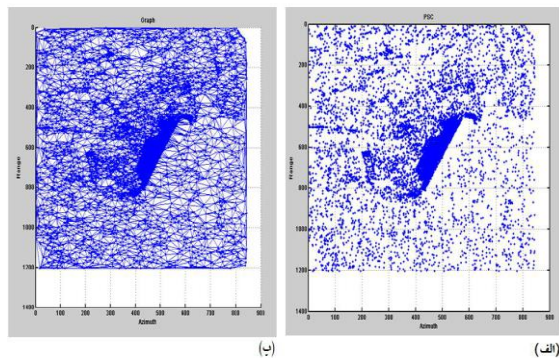
#### ۴-۲-۵- پردازش داده‌های سنجنده-CosmoskyMed X منطقه سد ماملو در حالت Descending

تصاویر اخذ شده از سنجنده CSK برای سد ماملو در حالت DSC، شامل 21 تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۱ تا ۲۰۱۸/۰۱ می‌باشد. در پردازش این سری داده‌ها، تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۷/۱۰/۲۶ به عنوان تصویر پایه انتخاب گردید و 20 تصویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و نمونه برداری شدند. همچنین همانند مراحل قبل، گراف استفاده شده در روند پردازش، گراف ستاره‌ای می‌باشد. همچنین به منظور حذف فاز توپوگرافی، همانند مرحله قبل، از DEM مربوط به ALOS استفاده شد و فاز زمین مسطح با استفاده از اطلاعات دقیق مداری از روی تداخل‌ها حذف گردید. پراکنشگرهای دائمی کاندید با استفاده از شاخص پراکنندگی دامنه با حد آستانه 0.3 انتخاب شده و سایر نقاط کنار گذاشته شدند که به این ترتیب تعداد 12599 پراکنشگر کاندید در ناحیه سد ماملو با ۲۸ تصویر SAR شناسایی گردید. شبکه مکانی بین نقاط پراکنشگر کاندید با استفاده از مثلث بندی دلونی تشکیل شد که تعداد یال‌های شبکه مکانی برابر ۳۷۷۵۳ شد. شکل ۱۴ تصویر دامنه منطقه مورد پردازش و شکل ۱۵ نقاط پراکنشگر کاندید و شبکه مکانی دلونی متناظر با آن‌ها را نمایش می‌دهد.

مربوط به ALOS استفاده شد و فاز زمین مسطح با استفاده از اطلاعات دقیق مداری از روی تداخل‌ها حذف گردید. پراکنشگرهای دائمی کاندید با استفاده از شاخص پراکنندگی دامنه با حد آستانه 0.3 انتخاب شده و سایر نقاط کنار گذاشته شدند که به این ترتیب تعداد ۸۰۹۶ پراکنشگر کاندید در ناحیه سد ماملو با ۲۸ تصویر SAR شناسایی گردید. شبکه مکانی بین نقاط پراکنشگر کاندید با استفاده از مثلث بندی دلونی تشکیل شد که تعداد یال‌های شبکه مکانی برابر ۲۴۲۶۰ شد. شکل ۱۱ تصویر دامنه منطقه مورد پردازش و شکل ۱۲ نقاط پراکنشگر کاندید و شبکه مکانی دلونی متناظر با آن‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱ - تصویر دامنه منطقه سد ماملو حاصل از تصاویر سنجنده Ascending در حالت CSK



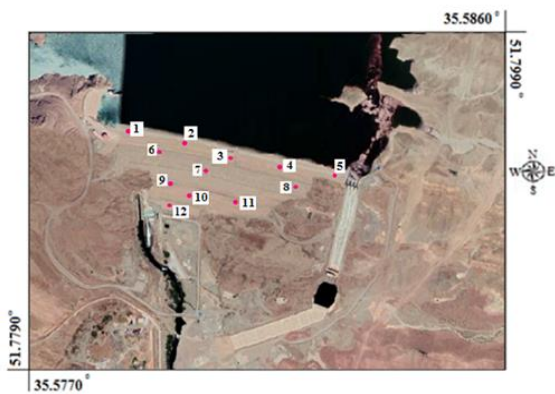
شکل ۱۲ - الف) نقاط پراکنشگر کاندید انتخابی با استفاده از ۲۴ تصویر سنجنده CSK در منطقه سد ماملو در حالت Ascending (ب) شبکه مکانی تشکیل شده بین پراکنشگرهای کاندید

پس از اعمال هر دو مدل خطی و غیرپارامتریک برای برآورد مجهولات، مشخص شد که هم‌دوسی زمانی حاصل از مدل خطی نسبت به مدل غیرپارامتریک بالاتر بوده و مقادیر بزرگتر از 0.9 بیشتری دارا می‌باشد، این‌رو مدل خطی، به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تصاویر بالاگذر منطقه سد ماملو انتخاب گردید. در نهایت نقشه جابجایی

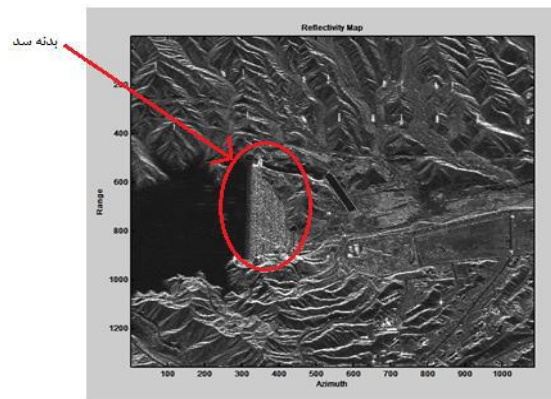


### ۵-۲-۵- ارزیابی دقت

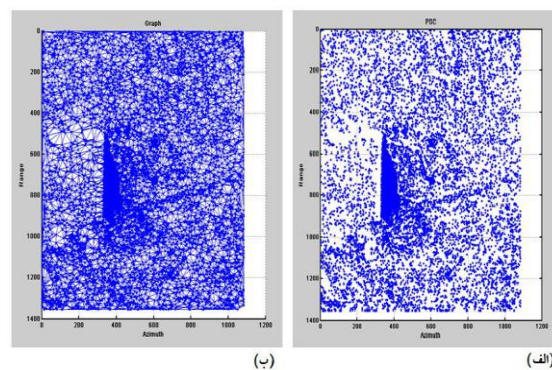
همانطور که پیشتر نیز ذکر شد، به دلیل عدم برداشت داده‌های زمینی از سد ماملو در بازه زمانی مشترک با داده‌های راداری، به منظور ارزیابی دقت و اثبات درستی نتایج بدست آمده، بایستی نتایج این دو دسته داده‌ی راداری را با یکدیگر مقایسه کرده و همخوانی این دو دسته داده، می‌تواند دلیلی بر اثبات ادعای ما برای درستی نتایج بدست آمده باشد. به منظور دستیابی به این هدف، چند نقطه PS در حالت ASC و چند نقطه در حالت DSC انتخاب کرده (در هر حالت بایستی نقاطی که مختصات برابر یا نزدیک دارند انتخاب گردد) و نتایج هر یک با هم مقایسه می‌گردد. به منظور دستیابی به هدف موردنظر، نتایج تصاویر ASC دو سنجنده S-1A و CSK با هم و نتایج تصاویر DSC آن‌ها نیز با هم مقایسه خواهد شد. 12 نقطه PS که مختصات مشترک در تصاویر ASC این دو سنجنده داشتند انتخاب شد، مشابه همین روند برای تصاویر DSC این دو سنجنده نیز انجام شد، این نقاط در دو شکل ۱۷ و ۱۸ نمایش داده شده‌اند. نتیجه مقایسه نرخ جابجایی سالانه این دو دسته داده نیز در دو شکل ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. محور افق در دو شکل ۱۹ و ۲۰ نشان‌دهنده شماره نقاط بر روی بدنه سد در دو شکل ۱۷ و ۱۸ می‌باشد. (لازم به ذکر است که برای مقایسه نتایج داده‌های دو سنجنده در راستای ASC و DSC از آنجا که زاویه دید هر سنجنده متفاوت است، ابتدا نتایج داده‌های سنتینل را با استفاده از اختلاف زاویه دید این دو سنجنده به جابجایی در راستای دید سنجنده Cosmo تبدیل کرده و در نهایت نتایج این دو دسته داده با یکدیگر مقایسه گردید).



شکل ۱۷- نقاط با مختصات برابر یا مشابه در تصاویر ASC دو سنجنده S-1A و CSK سد ماملو

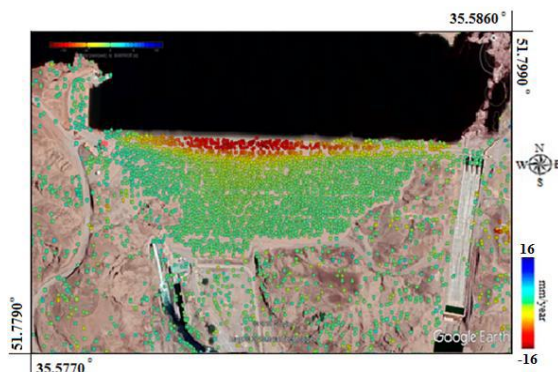


شکل ۱۴- تصویر دامنه منطقه سد ماملو حاصل از تصاویر سنجنده CSK در حالت Descending



شکل ۱۵- الف) نقاط پراکنشگر کاندید انتخابی با استفاده از تصویر سنجنده CSK در منطقه سد ماملو در حالت Descending (ب) شبکه مکانی تشکیل شده بین پراکنشگرهای کاندید

پس از اعمال هر دو مدل خطی و غیرپارامتریک برای برآورد مجهولات، مشخص شد که همدوسی زمانی حاصل از مدل خطی نسبت به مدل غیرپارامتریک بالاتر بوده و مقادیر بزرگتر از 0.9 بیشتری دارا می‌باشد، اینرو مدل خطی، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای تصاویر پایین‌گذر منطقه سد ماملو انتخاب گردید. در نهایت نقشه جابجایی این سد در بازه زمانی ذکر شده با استفاده از داده‌های Descending سنجنده CSK بدست آمد که در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶- نقشه جابجایی بدست آمده برای سد ماملو با استفاده از تصاویر سنجنده CSK در حالت Descending

قابل قبول بوده و نتایج حاصل از پردازش دو دسته داده CSK و S-1A همخوانی بسیار بالایی با یکدیگر دارند، استفاده از این دو دسته داده راداری، چه به صورت جداگانه و چه به صورت ترکیبی، نتایجی قابل قبول و مورد اعتماد حاصل خواهد کرد و روش PSI می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی که زمانبر و هزینه‌بر می‌باشند، باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

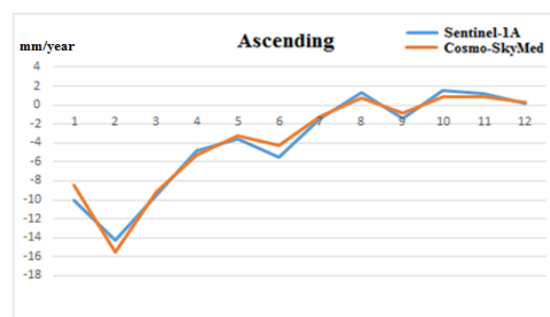
در این تحقیق به کمک تکنیک تداخلسنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم، جابجایی‌های سد ماملو (واقع در استان تهران) اندازه‌گیری شد. در این مطالعه از دو مجموعه داده‌ی متفاوت جهت آنالیز سری زمانی استفاده شد که یکی از این مجموعه داده‌ها متعلق سنجنده X باند Cosmo-SkyMed و دیگری مربوط به سنجنده C باند Sentinel-1A می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده از پردازش داده‌های ذکر شده، مشخص شد که بیشینه جابجایی بدنه سد ماملو در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ برابر با ۱۶- میلی‌متر در سال در راستای LOS<sup>۱</sup> سنجنده Cosmoskymed و ۳۰- میلی‌متر در راستای LOS سنجنده Sentinel-1A می‌باشد که این بیشینه جابجایی مربوط به مرکز تاج این سد بوده و هرچه از این نقطه فاصله بیشتری بگیریم، میزان جابجایی در راستای LOS کاهش می‌یابد، بطوریکه میزان جابجایی در مناطق پایین دست بدنه، تقریباً برابر با صفر می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان از پایداری و ثبات بالای سازه این سد و عدم وجود رفتارهای غیر طبیعی در آن طی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ می‌باشد.

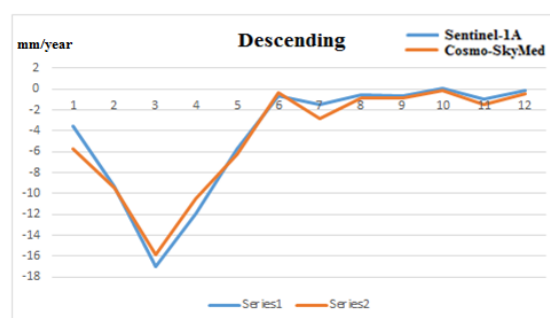
با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوزه پایش جابجایی سدها با استفاده از داده‌های راداری سری زمانی همانطور که در جدول ۱ آورده شده است، در بیشتر مقالات تنها از داده‌های سنجنده‌های X باند که داده‌هایی تجاری می‌باشند استفاده شده و قابلیت استفاده از داده‌های رایگان، به روز و در دسترس سنجنده‌های C باند مغفول مانده است و حتی در مقالاتی هم که از داده‌های C باند استفاده گردیده است، نتایج بدست آمده با نتایج داده‌های X باند مقایسه نگردیده است تا بتوان تفاوت نتایج این دو دسته داده را مشاهده کرده و با دلیل و مدرک



شکل ۱۸- نقاط با مختصات برابر یا مشابه در تصاویر DSC دو سنجنده S-1A و CSK سد ماملو



شکل ۱۹- مقایسه نتایج حاصل برای جابجایی سالانه نقاط PS در تصاویر ASC دو سنجنده S-1A و CSK



شکل ۲۰- مقایسه نتایج حاصل برای جابجایی سالانه نقاط PS در تصاویر DSC دو سنجنده S-1A و CSK

همانطور که در دو شکل ۱۹ و ۲۰ مشخص است، نتایج حاصل از این دو دسته داده‌ی راداری، همخوانی بسیار بالایی با یکدیگر داشته و میزان RMSE محاسبه شده بین دو دسته داده راداری Sentinel و Cosmoskymed در حالت ASC برابر با 0.7703 میلی‌متر و در حالت DSC برابر با 0.9551 میلی‌متر محاسبه گردید که این امر می‌تواند دلیلی بر درستی نتایج استخراج شده باشد، همچنین از آنجا که داده‌های پردازش شده، در بازه زمانی کاملاً یکسانی نبودند، می‌توان گفت که در صورت یکسان بودن بازه زمانی داده‌ها، دقت نتایج مناسب‌تر بوده و مقدار RMSE کاهش خواهد یافت. پس با توجه به اینکه میزان RMSE عددی

<sup>۱</sup> Line Of Sight

داده‌های C و X باند با یکدیگر هستند. با توجه به نتایج بدست آمده حاصل از مقایسه دقت‌های این دو دسته داده و از آنجا که داده‌های سنجنده S1-A رایگان و به روز بوده و به سادگی قابل دسترس هستند، می‌توان گفت که استفاده از داده‌های این سنجنده برای محاسبه پایداری و جابجایی‌های سدهای خاکی مناسب‌تر و مقرون به صرفه تر خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی نیز از داده‌های این سنجنده استفاده گردد.

هم‌چنین لازم به ذکر است که هرچه ابعاد بدنه سد بزرگتر باشد یا به عبارتی مساحت بدنه سد بیشتر باشد، تراکم نقاط PS بیشتر بوده و مختصات بدست آمده برای این نقاط صحیح‌تر خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از هر دو دسته داده راداری X باند و C باند، پتانسیل محاسبه جابجایی سدهای خاکی را دارا بوده و این تکنیک که تحت عنوان تداخلسنجی راداری شناخته شده‌است، قابلیت جایگزینی به‌جای روش‌های سنتی و هزینه‌بر را دارا می‌باشد و نتایجی با دقت‌های میلیمتری حاصل خواهد کرد که از نظر دقت، توانایی رقابت با روش‌های متداول و سنتی را دارا می‌باشند.

دقیق بودن داده‌های C باند را اثبات نمود. به همین دلیل در این مقاله سعی شد تا در بازه زمانی تقریباً مشابه، جابجایی سد خاکی ماملو با دو دسته داده راداری C و X باند و روش PSI مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. هدف اصلی این تحقیق نشان دادن دقیق بودن و قابل اعتماد بودن داده‌های سنجنده S1-A برای پایش جابجایی بدنه سدهای خاکی می‌باشد.

نتایج حاصل از ارزیابی دقت حاکی از آن بود که استفاده از دو دسته داده راداری C باند و X باند، قابلیت برآورد جابجایی‌های سازه‌های عظیم از جمله سدهای خاکی را دارا بوده و نتایج دارای دقت‌های قابل قبولی می‌باشند. ذکر این نکته ضروری است که نتایج داده‌های X باند به دلیل رزولوشن بالاتر این تصاویر نسبت به تصاویر C باند، دارای تراکم بالاتری از نقاط PS بوده و همچنین هم‌خوانی بالاتری با واقعیت داشته و در نهایت با استفاده از این نوع داده، دقت‌های بالاتری حاصل خواهد شد. اما با توجه به مقایسه نتایج دو دسته داده C و X باند نسبت به هم مشخص شد که تفاوت دقت این دو دسته داده در راستای ASC برابر با ۰٫۷ و در راستای DSC برابر با ۰٫۹ می‌باشد که این اعداد خود نشان‌دهنده تطابق بسیار بالای

## مراجع

- [1] Poland, J. F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.
- [2] Taherinejad M, Vosoghi B, Haji Aghajany S. Monitoring and Predicting of Dam 3D Deformations By PS-InSAR Method and Geodetic Data . GEJ. 2018; 9 (2) :1-10.
- [3] Graham, L. C., Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 6, pp. 763-768, 1974.
- [4] Foroughnia M. Radar interferometry time series analysis based on PS-InSAR by using ENVISAT and Sentinel-1A data to monitoring the subsidence of Tehran. Master thesis, Remote sensing group, Khajeh Nasir Toosi university of technology.
- [5] Joaquim J. Sousa, Antonio M. Ruiz, Matus Bakon, Milan Lazecky, Ivana Hlavacova, Gloria Patricio, Manuel Delgado, Daniele Perissin. "Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring". Conference ENTERprise Information Systems. October, 5-7, 2016.
- [6] Aminjafari, Saeed. "Monitoring of Masjed-Soleiman embankment dam's deformation using a combination of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and finite element modeling." Geodesy and Cartography 43.1 (2017): 14-21.
- [7] Wang, Teng, Daniele Perissin, Fabio Rocca, and Ming-Sheng Liao. "Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis." Science China Earth Sciences 54, no. 5 (2011): 720-732.
- [8] Emadali, Lotfollah, Mahdi Motagh, and Mahmud Haghshenas Haghghi. "Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery." Engineering Structures 143 (2017): 261-273.
- [9] Lazecký, Milan, Daniele Perissin, Wang Zhiying, Lei Ling, and Qin Yuxiao. "Observing dam's movements with spaceborne SAR interferometry." In Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5, pp. 131-136. Springer, Cham, 2015.

- [10] Milillo, Pietro, Daniele Perissin, Jacqueline T. Salzer, Paul Lundgren, Giusy Lacava, Giovanni Milillo, and Carmine Serio. "Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52 (2016): 221-229.
- [11] Lazecky, Milan, Daniele Perissin, Ling Lei, Yuxiao Qin, and Marco Scaioni. "Plover Cove dam monitoring with spaceborne InSAR technique in Hong Kong." In *Proc. 2nd Joint Int. Symp. on Deformation Monitoring*, pp. 9-11. 2013.
- [12] Bakon, Matus; Daniele Perissin, Milan Lazecky, and Juraj Papco. "Infrastructure non-linear deformation monitoring via satellite radar interferometry." *Procedia Technology* 16 (2014): 294-300.
- [13] Maghsoudi, Y & Mahdavi, S. (2015). *The Principles of Radar Remote Sensing*: K. N. Toosi University of Technology
- [14] Kampes, B. M. (2006). *Radar interferometry*: Springer.
- [15] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20
- [16] Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., & Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1685-1701 .