

آنالیز جابجایی‌های بزرگ مقیاس با استفاده از فناوری تداخل سنجی راداری در معادن روباز (مطالعه موردی: معدن گل گهر سیرجان)

سیاوش شامی^{۱*}، مسعود مشهدی حسینعلی^۲، سید ساسان بابایی^۳

^۱ کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
siavashshami@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
hossainali@kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
s.sasan_babaei@email.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۷، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۸)

چکیده

معادن با جابجایی‌های خود باعث ایجاد خسارت به زیر ساخت‌ها و زمین می‌شوند، از این رو کنترل جابجایی‌های ناشی از معادن مهم می‌باشد. همچنین میزان حجم برداشتی مواد معدنی از معادن همواره مورد توجه مدیران قرار داشته است. از طرف دیگر تداخل‌سنجی راداری با توجه به تولید تصاویر مکرر و وسیع و دقت قابل قبول این روش، در بررسی جابجایی‌های حاصل از معادن روباز و خطرات ناشی از نشست معدن در مقابل روش‌هایی همچون ترازیابی و سیستم تعیین موقعیت جهانی که عموماً گران‌قیمت و وقت‌گیر هستند، پیشنهاد می‌شود. مهندسی نقشه‌برداری در معادن روباز وظیفه محاسبه میزان جابجایی معدن و حجم برداشتی را با استفاده از ترازیابی و سیستم تعیین موقعیت جهانی بر عهده دارند. در این پژوهش هدف محاسبه جابجایی‌های ناشی از برداشت در معادن روباز و محاسبه حجم معدن می‌باشد. به دلیل اینکه معادن روباز جابجایی در مقیاس بزرگ را شامل می‌شوند، حداکثر جابجایی که از طریق فناوری تداخل‌سنجی راداری قابل استخراج است، تحت تاثیر دو عامل طول موج تصاویر راداری و ابعاد پیکسل‌های تصاویر راداری است، که با افزایش طول موج تصاویر و یا کاهش ابعاد پیکسل‌های تصاویر می‌توان به حداکثر جابجایی حاصل از فناوری تداخل‌سنجی راداری دست پیدا کرد. از طرفی برداشت سریع از معادن، باعث ایجاد ناهمدوسی در بین تصاویر می‌شود که باعث کاهش دست‌یابی به حداکثر جابجایی می‌شود. برای رفع ناهمدوسی تصاویر، انتخاب تصاویر با خط‌مبنای زمانی و مکانی کم می‌تواند این مشکل را حل نماید. در این پژوهش بر روی معدن گل گهر سیرجان با استفاده از تصاویر راداری ماهواره انویست مطالعه انجام گرفته است. پردازش تصاویر راداری نیز با استفاده از نرم‌افزار StaMPS انجام گرفت. در این پژوهش با تغییر مقدار چندمنظر سازی تصاویر از مقدار ۲۰ برای آزیموت و ۴ برای رنج به مقدار ۵ برای آزیموت و ۱ برای رنج (کوچک کردن ابعاد پیکسل‌های تصویر)، میزان جابجایی قابل تشخیص بیشتر می‌شود. بیشترین نشست بدست آمده برای یک نقطه در معدن بعد از تغییر چندمنظر سازی از منفی ۵۱ میلی‌متر به منفی ۷۵ میلی‌متر تغییر پیدا کرد و حجم محاسبه شده از ۶۱ هزار مترمکعب به ۶۷ هزار مترمکعب بعد از تغییر چندمنظر سازی تصویر، تغییر پیدا کرد. پس با کوچک کردن ابعاد پیکسل‌های تصویر راداری، مقدار جابجایی بیشتری قابل تشخیص است و میزان حجم برداشتی از معدن واقع بینانه‌تر خواهد شد.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، معادن روباز، چندمنظر سازی تصاویر راداری، جابجایی، معدن گل گهر سیرجان

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

بررسی و پایش میدان جابه‌جایی ناشی از دگرشکلی، از پژوهش‌های مهم و کاربردی در مباحث گوناگون علوم- زمین در پیش‌گیری و رفتارشناسی سوانح طبیعی از قبیل زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش و مانند آن نقش بسزایی دارد. در این میان می‌توان به روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و پایش دگرشکلی نظیر ترازیابی دقیق، سامانه‌های تعیین موقعیت جهانی^۱ و فناوری تداخلسنجی راداری اشاره کرد. از میان روش‌های فوق، فناوری تداخلسنجی راداری با برخورداری از پوشش زمینی وسیع، مکرر و پیوسته، و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، به یکی از فناوری‌های مهم و قابل توجه تبدیل شده است. در دهه‌های اخیر، تلاش گسترده‌ای به منظور اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین با استفاده از فن‌هایی چون ترازیابی دقیق صورت گرفته است. ترازیابی دقیق اگرچه جابه‌جایی ارتفاعی سطح زمین را با دقت زیادی اندازه‌گیری می‌کند، اما با محدودیت‌های قدرت کم تفکیک مکانی و زمانی، روبه‌رو است. در دو دهه اخیر، با معرفی دو فناوری سامانه تعیین موقعیت جهانی و سامانه تصویربرداری رادار با درجه‌مصنوعی^۲ گام بزرگی در زمینه فناوری ژئودتیک فضایی برداشته شده است. این فناوری‌ها، اندازه‌گیری دگرشکلی را با دقت بهتر از سانتی‌متر بدست می‌آورند. در این میان مشاهدات پیوسته GPS با دو ویژگی قدرت تفکیک مکانی کم ولی قدرت تفکیک زمانی زیاد، ابزار مفیدی برای بررسی تغییرات پوسته زمین است. تولید پوشش‌های مکرر و وسیع و قدرت تفکیک مکانی زیاد تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، در بررسی پدیده‌های گوناگون زمین‌شناسی همچون زلزله، نشست^۳، زمین‌لغزش^۴ و مانند آن، ابزار نیرومندی برای محققان فراهم آورده است [۱].

از طرفی معادن می‌توانند جابجایی‌های عمودی و افقی را در سطوح زمین ایجاد نمایند و در نتیجه باعث خسارت به زیرساخت‌ها، زمین و غیره شوند. کنترل جابجایی در معادن از جهات، ارزیابی محدوده مکانی آسیب ناشی از برداشت معادن، طراحی و یا تعدیل برنامه استخراج معادن،

پیش‌بینی خطرات احتمالی زمین‌شناسی و آماده‌سازی برای تخلیه احتمالی کارگران معدن و تجهیزات، می‌تواند مهم باشد. از طرفی مهندسين نقشه‌بردار با بررسی مقدار جابجایی‌های معادن روباز با استفاده از ابزاری نظیر ترازیابی به محاسبه مقدار جابجایی در معادن روباز، و در نهایت تعیین میزان حجم جابه‌جا شده در معادن روباز می‌پردازند. روش‌های معمول برای پایش جابجایی‌های سطحی، روش‌های کلاسیک و مدرن ژئودزی، مانند ترازیابی و سیستم تعیین موقعیت جهانی است. با این حال، این روش‌ها عموماً گران‌قیمت و وقت‌گیر هستند. روش تداخلسنجی راداری برای پایش یا کنترل جابجایی‌های معدن به دلیل هزینه کم، قابلیت اندازه‌گیری همه ابعاد، پوشش مکانی گسترده و غیره پیشنهاد شده است. دست‌یابی به دقت بهتر در کلیه کارهای مهندسی از جمله نقشه‌برداری می‌تواند قابل توجه باشد و از طرفی کاهش هزینه و سرعت انجام کارها نیز ملاک است. از این رو فناوری تداخلسنجی راداری می‌تواند با داشتن دقت مناسب در ارزیابی جابجایی‌های معادن روباز، موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت کارها شود. لذا ضرورت و انگیزه اصلی این تحقیق، برآورد جابجایی‌های معادن روباز از طریق فناوری تداخلسنجی راداری و محاسبه مقدار حجم برداشت شده از معدن و بررسی روش‌های بهبود نتایج حاصل از تداخلسنجی راداری می‌باشد [۲].

برای بدست آوردن اختلاف فاصله از طریق تداخل-سنجی راداری نیاز به دو تصویر راداری می‌باشد که در آن تداخل‌نگار از حاصل ضرب یک تصویر راداری در مختلط مزدوج تصویر دوم بدست می‌آید. بنابراین فاز تداخل‌نگار، اختلاف فاز زوج‌تصویر و دامنه آن، حاصل ضرب دامنه‌های زوج‌تصویر است [۳].

اصول ریاضی تداخلسنجی راداری به این صورت است که، تصاویر SAR می‌تواند به صورت رابطه زیر نوشته شود:

$$y = |a| e^{i\phi} \quad (1)$$

که در این رابطه $|a|, i, \phi$ به ترتیب، فاز، واحد موهومی و دامنه می‌باشند.

فاز تداخلسنجی از ضرب مختلط تصویر اصلی^۵ با مزدوج مختلط تصویر فرعی^۶ طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

^۱ Global Positioning System

^۲ Synthetic Aperture Radar

^۳ Subsidence

^۴ Landslide

^۵ Master

^۶ Slave

سنجی راداری که تغییر فاز تصادفی بین دو پیکسل مربوط به تغییر در جابجایی می‌شود، ولی با این حال در تداخل سنجی راداری هر جابجایی بزرگ را نمی‌توان از طریق تداخل سنجی راداری اندازه‌گیری کرد. زیرا تغییر شکل بیش از حد، منجر به ایجاد ناهمدوسی در تصاویر راداری می‌شود. طبق رابطه (۵) برای ماهواره‌های مختلف با توجه به ابعاد پیکسل تصاویر و طول موج راداری متفاوتی که دارند، حداکثر جابجایی قابل تشخیص متفاوت می‌باشد. برای مثال حداکثر جابجایی قابل تشخیص ۱٫۴ میلی‌متر بر متر برای ماهواره انویست^۴ با ابعاد پیکسل ۲۰×۲۰ متر و مقدار منظر ۵ می‌باشد و این مقدار برای ماهواره آلوس^۵ با ابعاد پیکسل ۱۰×۱۰ متر و مقدار منظر ۳، برابر ۱۱٫۵ میلی‌متر بر متر می‌باشد [۶].

رابطه شماره (۵) تاثیر منابع خطای خارجی را لحاظ نکرده است، یعنی فرض می‌شود هیچ نویزی در تصاویر راداری وجود ندارد. با این حال در کاربردهای عملی تشخیص جابجایی در تداخل سنجی تفاضلی، همیشه کمتر از مقدار تئوری است.

علاوه بر تاثیر منابع خارجی می‌توان به تاثیر پارامتر همدوسی نیز اشاره نمود. مقدار همدوسی هر چقدر کمتر باشد یا اصطلاحاً ناهمدوسی یا ناهمبستگی اتفاق افتاده باشد، ماکزیمم جابجایی قابل تشخیص، اتفاق نخواهد افتاد. باران^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۵ یک مدل برای جابجایی با استفاده از روش آمار تجربی که در آن همبستگی، یک متغیر مستقل می‌باشد، ارائه دادند [۷].

$$D_{\max} = d_{\max} + 0.002(\gamma - 1) \quad (6)$$

D_{\max} ، نشان دهنده حداکثر مقدار جابجایی قابل تشخیص است که در آن پارامتر همدوسی (γ)، مقداری بین صفر و ۱ را دارا می‌باشد. تصویر همدوس، تصویری است که میزان وابستگی (همبستگی) بین تصاویر را نشان می‌دهد، از این تصویر برای تخمین کیفیت تداخل‌نگار تولید شده استفاده می‌شود. از معادله (۶) ملاحظه می‌گردد که حداکثر تغییر شکل تداخل سنجی تفاضلی از یک تابع خطی همبسته بدست می‌آید که به طور کلی با

$$y_m \bar{y}_s = |a_m| |a_s| e^{i(\phi_m - \phi_s)} \quad (2)$$

در نتیجه تداخل‌نگار تولید می‌شود. مؤلفه‌های اصلی سهمیم در فاز تداخل‌نگار تولیدی عبارت‌اند از:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{def}} + \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{fe}} + \Delta\phi_{\text{noise}} \quad (3)$$

که در آن $\Delta\phi_{\text{def}}$ اثر تغییر شکل‌های زمین، $\Delta\phi_{\text{topo}}$ اثر فاز توپوگرافی، $\Delta\phi_{\text{fe}}$ اثر فاز زمین مسطح و $\Delta\phi_{\text{noise}}$ اثر باقی نویزها (فاز اتمسفری، فاز مداری و ...) می‌باشد. از بین اثرات فوق، توپوگرافی و دگرشکلی، مؤثرترین عوامل‌اند. هدف اصلی تداخل سنجی تفاضلی^۱، استخراج میزان دگرشکلی از فاز اندازه‌گیری شده کلی با حذف کردن یا کمینه کردن اثر دیگر مؤلفه‌ها است.

۲- روش انجام کار

شرط اساسی برای انجام تداخل سنجی راداری، برقراری رابطه زیر می‌باشد [۴].

$$\mu \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) < \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

که در آن μ نشان دهنده اندازه پیکسل، λ طول موج رادار، θ_1 و θ_2 زاویه برخورد مرکزی مربوط به پیکسل در تصاویر اصلی و فرعی می‌باشد. همان‌طور که از معادله (۴) مشخص است، حداکثر مقدار جابجایی در طول خط دید ماهواره^۲ در یک پیکسل نمی‌تواند، بیشتر از نصف طول موج باشد [۵].

تغییر شکل و فرمول تئوری آن برای حداکثر جابجایی قابل تشخیص در طول خط دید ماهواره در تداخل سنجی تفاضلی که برای اولین بار توسط ماسونت^۳ معرفی گردید، به شکل زیر می‌باشد [۵].

$$d_{\max} = \frac{\lambda}{2\mu} \quad (5)$$

d_{\max} ، حداکثر جابجایی قابل تشخیص از تداخل-سنجی تفاضلی راداری می‌باشد. با توجه به اصول تداخل-

^۴ ENVISAT

^۵ ALOS

^۶ Baran

^۱ DInSAR

^۲ Line of sight

^۳ Massonnet

غیر قابل قبول می‌شود. علاوه بر این اگر جابجایی با ماکزیمم و مینیمم مقدار قابل تشخیص برابر گردد، جابجایی قابل تشخیص مورد اطمینان نمی‌باشد [۷].
به طور کلی عوامل زیادی می‌توانند بر مقدار ناهمبستگی تاثیر گذار باشند. از میان عوامل مختلف، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱۷].

$$\gamma_{\text{total}} = \gamma_{\text{geometry}} \times \gamma_{\text{temporal}} \times \gamma_{\text{thermal}} \times \gamma_{\text{atmosphere}} \quad (8)$$

γ_{geometry} ناهمبستگی مکانی که از تفاوت در هندسه تصویربرداری در دو تصویر اصلی و فرعی حاصل می‌شود، γ_{temporal} ناهمبستگی زمانی تغییرات منطقه در طول زمان سبب می‌شود که تصاویر با اختلاف زمانی بالا از همبستگی پایینی برخوردار باشند، γ_{thermal} ناهمبستگی ناشی از نویز گرمایی سنجنده که سبب کاهش نسبت سیگنال به نویز و کاهش همبستگی می‌شود و $\gamma_{\text{atmosphere}}$ عدم یکسان بودن پارامترهای جوی در زمان اخذ زوج-تصویر که سبب کاهش همبستگی بین تصاویر می‌شود.
ژاپانه^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۵ بیش از ۱۷۰ جفت تداخل‌نگار را که از یک منطقه بدست آمده بود را بررسی کردند و یک رابطه کلی برای همبستگی ارائه دادند [۱۶].

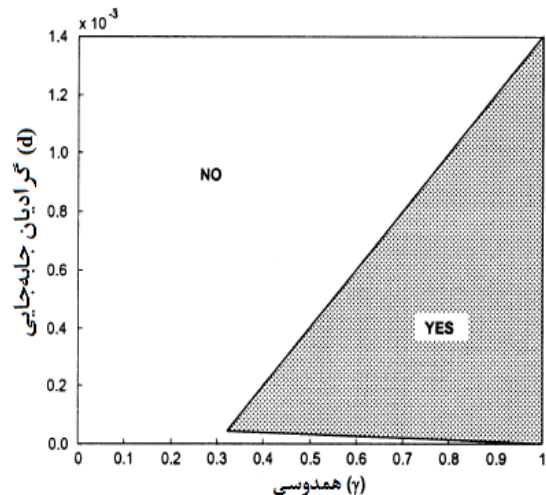
$$\gamma_{\text{total}} \approx \gamma_{\text{geom}} \cdot \gamma_{\text{temporal}} = \frac{B_{\perp}}{[1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}}] \cdot \exp(-\beta \Delta T^2)} \quad (9)$$

که در آن، B_{\perp} نشان دهنده مولفه عمودی خط‌مبنا، $B_{\perp c}$ خط‌مبنای قائم بحرانی و ΔT خط‌مبنای زمانی است.
بنابراین ناهمبستگی زمانی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\gamma_{\text{temporal}} \approx \frac{\gamma_{\text{total}}}{\gamma_{\text{geom}}} = \gamma / [1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}}] = \frac{\gamma \cdot B_{\perp c}}{B_{\perp c} - B_{\perp}} \quad (10)$$

به این صورت خط‌مبنای زمانی و مکانی بین تصاویر با پارامتر همدوسی مرتبط هستند. از این‌رو، کاهش طول

افزایش همبستگی، افزایش می‌یابد. وقتی که ما همدوسی کامل برای یک پیکسل داریم (مقدار آن برابر ۱)، مدل فوق به رابطه تئوری ماسونت (رابطه ۵) تبدیل شده و حداکثر جابجایی از آن قابل استخراج است [۶].
علاوه بر حداکثر جابجایی قابل تشخیص با فناوری تداخل‌سنجی راداری، حداقل جابجایی قابل تشخیص (d_{\min}) نیز وجود دارد که برابر ۰ می‌باشد، زمانی که هیچ تغییرشکلی اتفاق نیفتاده باشد و مقدار فاز ثابت باقی مانده باشد.



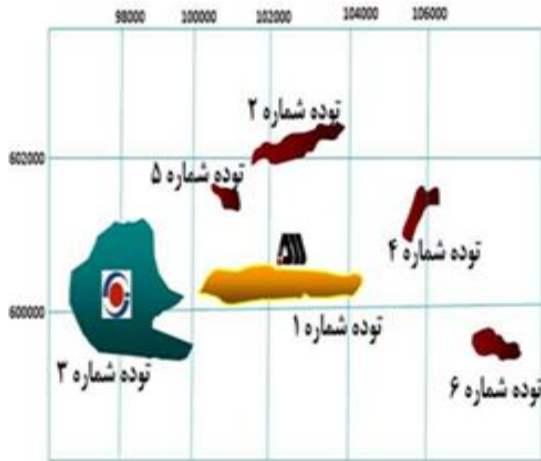
شکل ۱- ارتباط بین همدوسی تصاویر و جابجایی قابل تشخیص با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری [۷]

در شکل (۱) محور افقی نمودار، نشان دهنده میزان همدوسی است که بین ۰ تا ۱ می‌باشد و محور عمودی نشان دهنده مقدار جابجایی قابل تشخیص است که این مقدار برای سنجنده‌ای با طول موج ۵,۶ سانتی-متری (انویست) بین ۰ تا ۱,۴ میلی‌متر در هر متر برای هر پیکسل می‌باشد. همچنین دو محدوده YES و NO در شکل شماره (۱) بیان می‌نماید که مقدار همدوسی تصویر اگر در محدوده YES قرار گرفته باشد و توسط فناوری تداخل‌سنجی راداری تشخیص داده شود، قابل اطمینان است و چنانچه در محدوده NO قرار گرفته باشد، جابجایی قابل تشخیص توسط فناوری تداخل‌سنجی راداری قابل اطمینان نمی‌باشد [۷].

$$\begin{aligned} d_{\min} \leq d \leq d_{\max} &\Rightarrow \text{YES} \\ d > d_{\max} &\Rightarrow \text{NO} \\ d < d_{\min} &\Rightarrow \text{NO} \end{aligned} \quad (7)$$

همچنین اگر مقدار جابجایی بدست آمده بیشتر از ماکزیمم مقدار و کمتر از مینیمم مقدار باشد، جابجایی

^۱ Chaabane



شکل ۲- ذخایر شش گانه معدن گل گهر سیرجان

در این پژوهش بر روی توده شماره ۳ مطالعه انجام شده است. روش استخراجی در توده شماره ۳ گل گهر، به صورت روباز-پله‌ای^۳ می‌باشد و ابعاد آن حدوداً ۱,۱ در ۱,۳ کیلومتر و ارتفاع از سطح دریا ۱۷۵۰ متر می‌باشد.

۴- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر ماهواره نویست استفاده شده است. این تصاویر از طریق وبسایت^۴ سازمان فضایی اروپا^۵ و به وسیله نرم افزار Eolisa تهیه شده است. پس از جستجوی کلیه تصاویر موجود، که منطقه معدن گل گهر سیرجان را پوشش می‌دادند، از مسیر^۶ شماره ۲۰۶ که تصاویر پایین‌گذر^۷ را شامل می‌شود، دو تصویر مربوط به روز بیست و هفتم اردیبهشت ۸۴ و چهارم مرداد ماه سال ۱۳۸۴ که تصاویر دارای اختلاف زمانی ۷۰ روز و خط-مبنای مکانی این دو تصویر برابر با ۱۷۷ متر و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، می‌باشند، انتخاب گردید. دلیل انتخاب این تصاویر پوشش زمانی مناسب و توجه به خط-مبنای زمانی و مکانی کوتاه بین تصاویر که منجر به حفظ هم‌دوسی بین تصاویر می‌شود و در نهایت ماکزیمم جابجایی از تداخل‌نگار قابل محاسبه می‌باشد. همچنین برای حذف مولفه فاز توپوگرافی در خلال پروسه تداخل-سنجی، از مدل ارتفاعی رقومی با قدرت تفکیک ۳۰ متری حاصل از ماهواره راداری ناسا^۸ استفاده شده است.

خط‌مبنای مکانی و زمانی تداخل‌نگار منجر به افزایش همبستگی زمانی و مکانی آنها می‌شود که به لحاظ کمی با پارامتر دامنه هم‌دوسی قابل ارزیابی است [۱۶]. برای کنترل فرونشست مناطق معدنی، ناهم‌دوسی زمانی دلیل عمده ای برای ناهم‌دوسی تصویر است. از این رو خط‌مبنای زمانی باید تا حد ممکن کوچک باشد [۱۳]. در مناطق معدن، میزان ناهم‌دوسی زمانی متناسب است با رابطه زیر [۱۶].

$$\gamma_{\text{temporal}} = 0.22767 \cdot \exp(-t / 30.27134) + 0.21896 \cdot \exp(-t / 235.90387) + 0.17506 \quad (11)$$

که در آن t برابر است با فاصله زمانی (روز) و به طور کلی خط‌مبنای زمانی باید کوتاه تر از ۱۴۰ روز باشد [۱۳]. در نهایت طبق رابطه (۵) دو پارامتر اصلی در محاسبه حداکثر جابجایی‌های اتفاق افتاده در مقیاس بزرگ، طول موج سنجنده‌های راداری و ابعاد پیکسل‌های تصویر می‌باشند که با چندمنظر سازی^۱ تصاویر و تغییر مقدار منظر در راستای رنج و آزیموت، می‌توان تعداد پیکسل‌ها (قسمت‌های تصویر) را افزایش داد و ابعاد پیکسل‌ها را کاهش، تا در نهایت ماکزیمم جابجایی‌های اتفاق افتاده، قابل تشخیص و اندازه‌گیری باشد. همچنین با انتخاب تصاویر مناسب که دارای خط‌مبنای زمانی و مکانی کوتاه و مناسبی باشند، می‌توان ناهم‌دوسی زمانی تصاویر را کاهش داد و به حداکثر جابجایی دست پیدا کرد.

۳- منطقه مورد مطالعه

معدن سنگ‌آهن گل‌گهر در استان کرمان در شمالی-ترین منطقه دگرگونی زون سهندج سیرجان در طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۷ دقیقه شمالی قرار دارد. نزدیک‌ترین شهر به آن سیرجان است که در ۵۰ کیلومتری شمال شرقی منطقه قرار دارد. معدن سنگ‌آهن گل‌گهر در شش توده مجزا در مجموع با ذخیره ای در حدود ۱۲۰۰ میلیون تن در محدوده‌ای به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۴ کیلومتر قرار گرفته است.^۲

^۳ Open Pit

^۴ <http://earth.esa.int>

^۵ European Space Agency

^۶ Track

^۷ Descending

^۸ Shuttle Radar Topographic Mission

^۱ Multi-looking

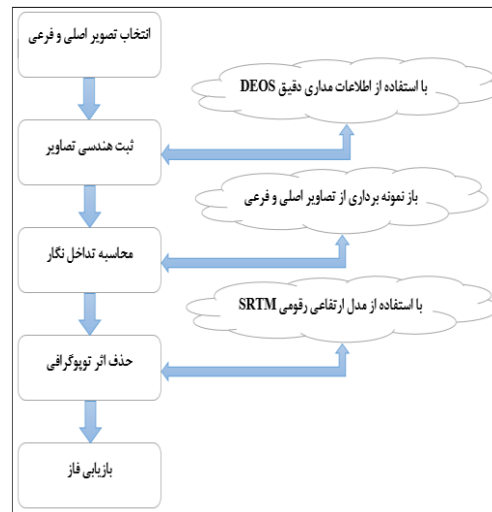
^۲ <http://geg.ir>

جدول ۱- اطلاعات تصاویر مدار پایین گذر مسیر ۲۰۶

شماره تصویر	تاریخ تصویر	شماره مدار	نوع سنجنده
۱	۲۷ اردیبهشت ۸۴	۱۶۷۹۳	ASAR
۲	۴ مرداد ۸۴	۱۷۷۹۵	ASAR

۵- پردازش تصاویر

در این پژوهش برای پردازش تصاویر راداری از نرم افزار StaMPS^۱ نسخه 3/3b1 استفاده شده است. این نرم افزار به زبان برنامه نویسی ++C و در دانشگاه لیدز توسط هوپر^۲ توسعه داده شده است. نرم افزار StaMPS در محیط سیستم عامل لینوکس نصب و اجرا می گردد [۱۱].



شکل ۳- مراحل ایجاد تداخل نگار در نرم افزار StaMPS [۱۲]

در پردازش تصاویر، از داده های اطلاعات مداری دقیق DEOS که توسط دانشگاه دلف^۳ هلند منتشر می شود برای از بین بردن اثر فاز مداری، و برای حذف فاز توپوگرافی از مدل ارتفاع رقومی SRTM^۴ با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شده است. در نهایت برای انطباق دقیق تصاویر نسبت به یکدیگر، از ثبت هندسی دقیق^۵ استفاده شد. بعد از انطباق تصاویر اصلی و فرعی با استفاده از اطلاعات مداریشان، در مرحله ثبت هندسی دقیق انطباق دو تصویر بر روی همدیگر در حد زیر پیکسل^۶ انجام گردید تا تصویر فرعی نسبت به تصویر اصلی با دقت زیرپیکسل تنظیم گردد. انطباق دو تصویر در مرحله

ثبت هندسی دقیق براساس مقدار دامنه تصاویر انجام می-گردد. با این کار خطای هم مرجع سازی تصویر کمتر می-شود. هم مرجع سازی تصاویر با دقت پایین منجر به متناظر نمودن پیکسل هایی می شود که هر یک معرف مختصات -جغرافیایی متفاوتی هستند. همچنین بخاطر پایدار بودن شرایط آب و هوایی در زمان اخذ تصویر طبق اطلاعات هواشناسی ایستگاه نزدیک به منطقه مورد مطالعه و اعمال فیلتر پایین گذر در پردازش تصاویر، می توان از اغتشاشات فاز اتمسفری صرف نظر نمود [۱۸]. مهم ترین عامل خطای اتمسفری بخار آب موجود در لایه تروپوسفر است که در مناطق خشک کمتر از مناطق مرطوب است [۲۲]. همچنین تصویر-برداری در شب به دلیل کاهش موجودی بخار آب در جو می-تواند تاثیر بسزایی در کاهش اختلال ناشی از اتمسفر و در نتیجه افزایش همبستگی بین تصاویر داشته باشد [۵]. حال با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در این پژوهش در حدود ۱ کیلومتر می باشد و منطقه کوچکی را شامل می شود و تصاویر اخذ شده نیز در تابستان اتفاق افتاده و با بررسی ایستگاه هواشناسی سیرجان در این فصل از سال که کمترین بارش را دارا می باشد و اعمال فیلتر پایین گذر در پردازش تصاویر، از بررسی فاز اتمسفری صرف نظر شد. علاوه بر این معدن گل گهر سیرجان در منطقه گرم و خشک واقع شده و تصاویر پردازش شده در ساعت ۶ بامداد تصویربرداری شده اند. با بررسی اطلاعات مجموع بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی شهرستان سیرجان در سال ۱۳۸۴ مشخص شد که مجموع بارش در دو ماه اردیبهشت و مرداد که تصاویر پردازش شده متعلق به این دو ماه هستند، مقدار بارش کمی به ثبت رسیده و می توان آب و هوای پایدار برای منطقه مورد مطالعه تصور نمود و از خطای فاز ناشی از اتمسفر صرف نظر کرد.

جدول ۲- مجموع بارش ماهانه بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی شهرستان سیرجان در سال ۸۴^۷

ماه	مجموع بارش (میلی متر)	ماه	مجموع بارش (میلی متر)
فروردین	۲,۱	مهر	۰
اردیبهشت	۲	آبان	۰
خرداد	۲,۴	آذر	۳۴,۶
تیر	۰	دی	۷
مرداد	۰,۲	بهمن	۲۲
شهریور	۳	اسفند	۲۳,۸

^۷ <http://irimo.ir>

^۱ Stanford Method for Persistent Scatterers

^۲ Hooper

^۳ Delft

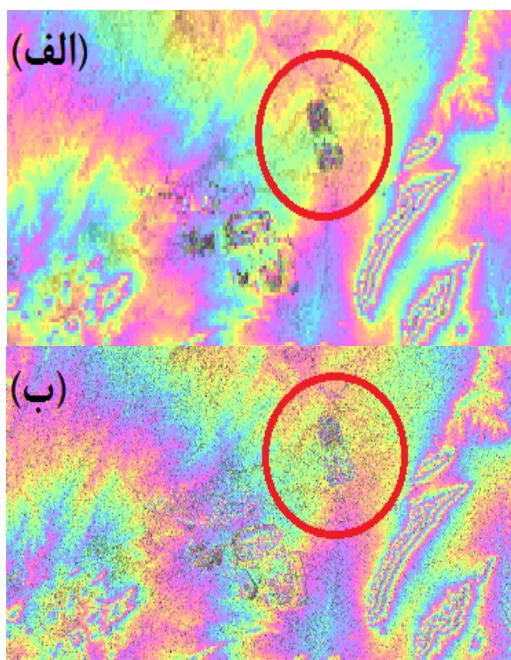
^۴ <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex>

^۵ Fine Co-registration

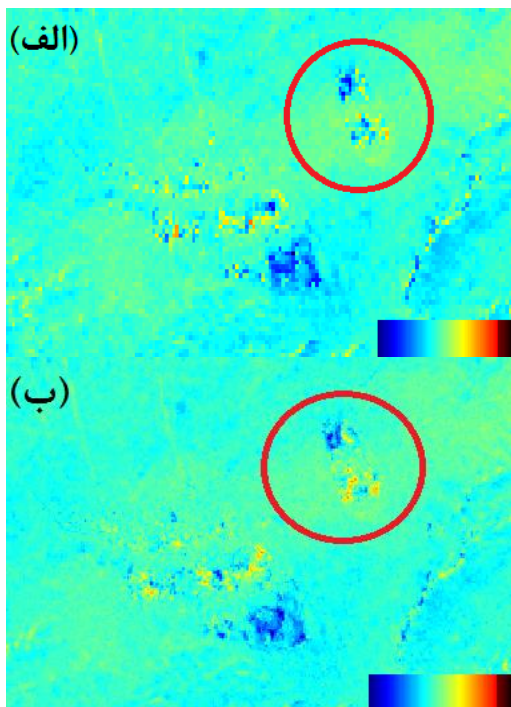
^۶ Sub-pixel

۶- پردازش‌ها و نتایج

سپس در ادامه بر روی تداخل‌نگارهای حاصل، بازیابی- فاز انجام شد و تصاویر حاصل از بازیابی‌فاز بر روی مسیر پایین‌گذر به شکل زیر می‌باشند.

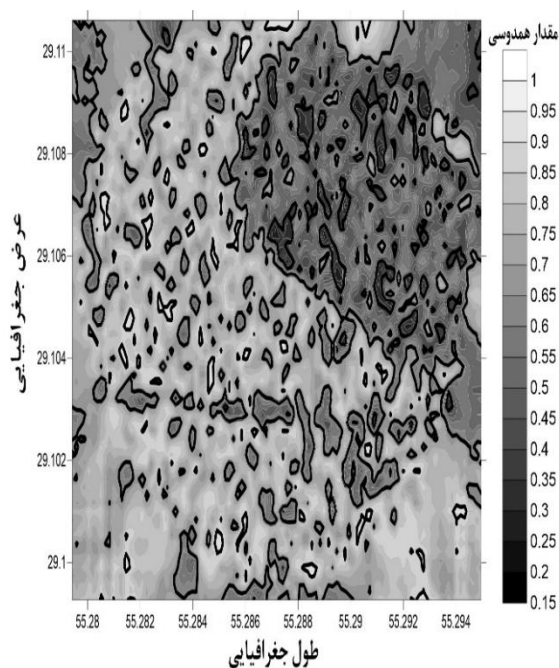


شکل ۵- تداخل‌نگار حاصل از تصاویر پایین‌گذر و محدوده توده شماره ۳ معدن گل‌گهر (الف) تداخل‌نگار حاصل از چندمنظر سازی 20×4 (ب) تداخل‌نگار حاصل از چندمنظر سازی 5×1



شکل ۶- تصاویر حاصل از بازیابی‌فاز بر روی تداخل‌نگارهای حاصل از تصاویر پایین‌گذر و محدوده توده شماره ۳ معدن گل‌گهر (الف) تصویر فاز بازیابی شده حاصل از چندمنظر سازی 20×4 (ب) تصویر فاز بازیابی شده حاصل از چندمنظر سازی 5×1

با بررسی مقدار همدوسی تصاویر برای توده شماره ۳ معدن گل‌گهر سیرجان، تصویر همدوسی معدن نشان می‌دهد که از 3926 پیکسل موجود برای توده شماره ۳ فقط 139 پیکسل همدوسی زیر 0.3 را دارا می‌باشند و مقدار جابجایی بدست آمده برای این پیکسل‌ها از اطمینان کافی برخوردار نیست. به عبارت دیگر فقط 3.5 درصد از پیکسل‌ها با همدوسی زیر 0.3 وجود دارند و 96.5 درصد پیکسل‌ها همدوسی بالای 0.3 را شامل می‌شوند و جابجایی بدست آمده قابل اطمینان می‌باشد.



شکل ۴- تصویر همدوسی توده شماره ۳ معدن گل‌گهر

در ادامه پردازش تصاویر، در نوبت اول، مقدار 20 برای آزمون و مقدار 4 برای رنج در اعمال چندمنظر سازی در نظر گرفته شد. سپس در نوبت دوم، مقدار 5 برای آزمون و مقدار 1 برای رنج در اعمال چندمنظر سازی اعمال گردید. در نهایت تداخل‌نگارهای حاصل شده از تصاویر پایین‌گذر به همراه محدوده توده شماره ۳ معدن گل‌گهر به شکل زیر می‌باشند.

ملاحظه می‌گردد که با تغییر چندمنظر سازی تصاویر که کوچک شدن ابعاد پیکسل‌های تصاویر را به دنبال دارد مقدار فاز دقیق‌تری از تداخل‌نگار بدست می‌آید و قسمت‌های سیاه رنگ موجود (عدم تشخیص جابجایی) در تداخل‌نگار کمتر می‌شود.

در ادامه با تغییر چندمنظر سازی، تصاویر فاز بازیابی شده، محدوده معدن را با جزئیات بهتری نشان می‌دهند و تغییرات بیشتری نسبت به حالت قبل از تغییر چندمنظر سازی دارند.

در نهایت پس از بازیابی فاز، که حاصل از استخراج مواد معدنی از معدن می‌باشد و با استفاده از رابطه زیر، مقدار فاز حاصل شده به مقدار جابجایی تبدیل گردید [۵].

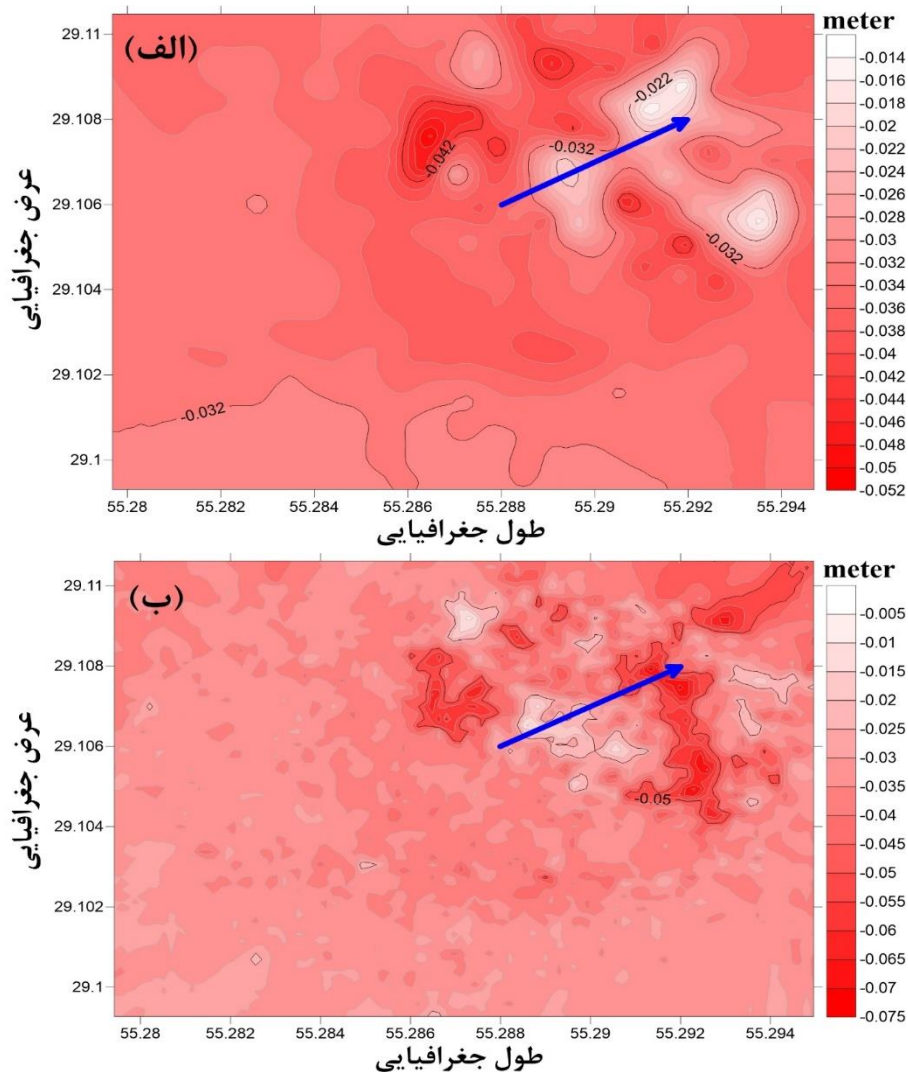
$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} D \rightarrow D = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi \quad (12)$$

که در رابطه فوق، $\Delta\phi$ اختلاف فاز حاصل از تداخل‌نگار و λ طول موج سنجنده راداری می‌باشد، که برای ماهواره انویست این مقدار برابر ۵,۶ سانتی‌متر می‌باشد. با قرار دادن مقدار طول موج و اختلاف فاز حاصل از نشست معدن در رابطه (۱۲)، مقدار جابجایی بدست می‌آید.

همچنین با استفاده از مختصات طول و عرض جغرافیایی تصویر که از مرحله زمین‌مرجع کردن در هنگام پردازش تصاویر بدست آمده است و در اختیار داشتن مقدار جابجایی برای هر پیکسل از تصویر، اقدام به محاسبه جابجایی معدن گردید. همچنین جابجایی بدست آمده در طول خط دید ماهواره با استفاده از رابطه زیر به جابجایی قائم تبدیل گردید [۹].

$$D_{\text{vertical}} = \frac{D_{\text{Los}}}{\cos(\theta)} \quad (13)$$

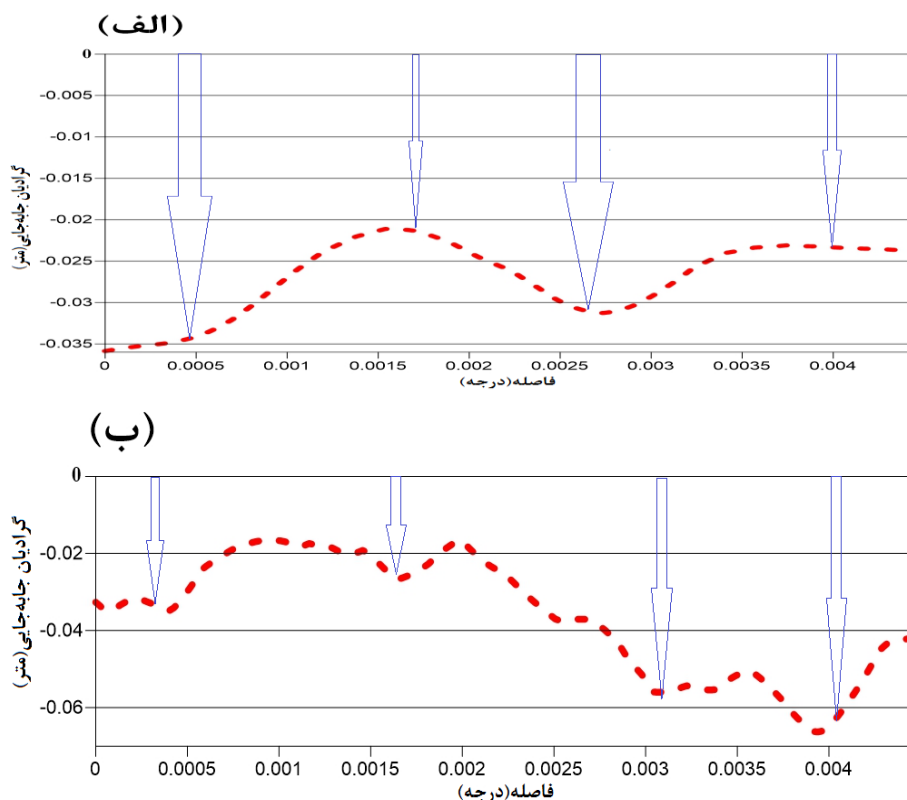
که در رابطه فوق، D_{Los} جابجایی در طول خط دید ماهواره و θ زاویه ارسال سنجنده می‌باشد که در ماهواره انویست این مقدار برابر با ۲۳,۵ درجه است.



شکل ۷- نقشه توپوگرافی حاصل از مقدار جابجایی معدن (الف) جابجایی حاصل از اعمال چندمنظر سازی ۴×۲۰ (ب) جابجایی حاصل از اعمال چندمنظر سازی ۱×۵

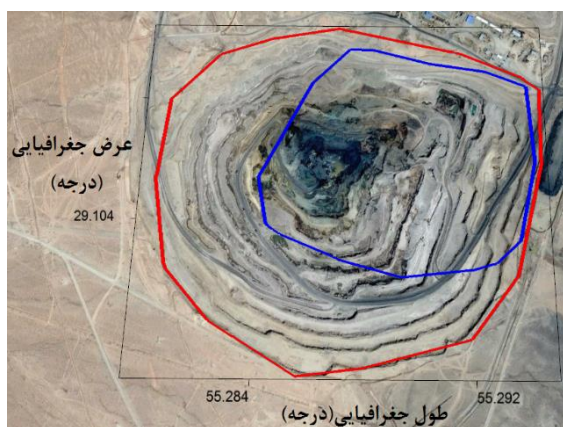
بیشترین جابجایی اتفاق افتاده برای یک نقطه در معدن با تغییر مقدار چندمنظر سازی تصاویر، از منفی ۵۱ میلی متر به منفی ۷۵ میلی متر تغییر پیدا نموده است که نشانگر این است که با تغییر چندمنظر سازی تصویر می توان جابجایی بیشتری را تشخیص داد.

در نقشه های توپوگرافی حاصل از جابجایی معدن مشاهده می شود که با تغییر مقدار چندمنظر سازی تصاویر، علاوه بر اینکه مقدار جابجایی بیشتری قابل تشخیص است، قادر خواهیم بود تا جزئیات بهتر و دقیق تری از منطقه مورد مطالعه را در اختیار داشته باشیم.



شکل ۸- پروفیل میزان جابجایی معدن (الف) میزان جابجایی حاصل از اعمال چندمنظر سازی ۲۰×۴ (ب) میزان جابجایی حاصل از اعمال چندمنظر سازی ۵×۱

شماره ۳ تغییراتی به شکل زیر داشته است و نتایج بدست آمده برای تصاویر که پوشش زمانی سال ۱۳۸۴ را دارا می باشند، با نقشه تغییرات معدن هم خوانی دارد.



شکل ۹- محدوده توده ۳ معدن در سال ۱۳۹۷ (زمان فعلی با رنگ قرمز) و سال ۱۳۸۵ (زمان مربوط به اخذ تصاویر با رنگ آبی)

همچنین پروفیل جابجایی از میزان استخراج مواد معدنی از معدن برای دو حالت مختلف چندمنظر سازی اعمال شده بر روی تصاویر که دقیقاً از یک منطقه مشابه در توده شماره ۳ معدن گل گهر عبور کرده اند (مسیر آبی رنگ) بر روی نقشه توپوگرافی، نشان می دهد که در همه نقاط، جابجایی بیشتری بعد از کوچک کردن ابعاد پیکسل های تصویر قابل تشخیص است. خط چین قرمز که مشخص کننده مقدار جابجایی معدن است و فلش های آبی رنگ نیز مقدار جابجایی را از سطح صفر بیان می کنند. حداکثر جابجایی اتفاق افتاده بعد از تغییر چندمنظر سازی تصاویر در یک منطقه کاملاً مشابه در توده شماره ۳ معدن از مقدار منفی ۳۶ میلی متر به منفی ۷۰ میلی متر تغییر پیدا نموده است.

علاوه بر این، با بررسی نقشه های تغییرات معدن با استفاده از نرم افزار گوگل ارث^۱ می توان متوجه شد که توده

^۱ Google Earth

در ادامه با تبدیل مختصات طول و عرض جغرافیایی حاصل شده از تداخل‌نگار به مختصات UTM و محاسبه میزان مساحت معدن و استفاده از مقدار جابجایی معدن در طول خط دید ماهواره و تبدیل آن به جابجایی در راستای قائم، و روش درونیایی کریجینگ (Kriging) در نرم‌افزار Surfer میزان حجم خاکبرداری و خاکریزی حاصل از معدن محاسبه گردید.

جدول ۳- مقدار حجم محاسبه شده

چند منظر سازی	خاکبرداری (متر مکعب)	خاکریزی (متر مکعب)
۲۰×۴	۶۱۳۲۰,۴۳۶	۰
۵×۱	۶۷۵۵۹,۳۴۹	۰

ملاحظه می‌گردد که با تغییر چندمنظر سازی تصاویر و افزایش مقدار جابجایی بدست آمده از معدن، حجم بدست آمده نیز دچار افزایش می‌شود. علاوه بر این با تغییر مقدار چندمنظر سازی تصویر از ۲۰×۴ به مقدار ۵×۱ باعث افزایش تعداد نقاط شده (کوچک شدن ابعاد پیکسل تصاویر منجر به افزایش تعداد پیکسل‌ها می‌شود) و در نتیجه محاسبه حجم، به صورت دقیق‌تری انجام می‌گیرد.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

طبق رابطه شماره (۵) حداکثر مقدار جابجایی قابل تشخیص از تغییرات بزرگ مقیاس نظیر معادن روباز از طریق فناوری تداخل‌سنجی راداری بستگی به دو کمیت طول موج تصاویر راداری و ابعاد پیکسل تصاویر راداری دارد. لذا تغییر ابعاد پیکسل تصاویر با تغییر چندمنظر سازی تصاویر، می‌تواند جابجایی بیشتری را قابل تشخیص نماید. علاوه بر این جزئیات بیشتری نیز پس از تغییر چندمنظر سازی تصاویر قابل شناسایی می‌باشد. در تصاویر پایین‌گذر استفاده شده،

پس از تغییر چندمنظر سازی تصاویر که ابعاد پیکسل‌های تصویر را در راستای رنج و آزیموت کوچک می‌نماید، حداکثر مقدار جابجایی اتفاق افتاده برای معدن از منفی ۵۱ میلی‌متر به منفی ۷۵ میلی‌متر تغییر پیدا کرد و مقدار جابجایی بیشتری قابل تشخیص می‌باشد. در محاسبه مقدار حجم برداشت شده از معدن نیز با تغییر مقدار چندمنظر سازی تصاویر و افزایش میزان جابجایی قابل تشخیص، میزان حجم محاسبه شده نیز همزمان افزایش یافت و از مقدار ۶۱ هزار مترمکعب به مقدار ۶۷ هزار مترمکعب رسید و محاسبه حجم معدن به صورت واقع بینانه‌تری انجام گرفت. در تصاویر پایین‌گذر علاوه بر افزایش مقدار حجم با افزایش میزان جزئیات نیز همراه بود که باعث محاسبه دقیق‌تر جزئیات و تغییرات معدن می‌گردد. علاوه بر این تأثیری که مقدار همدوسی بر روی ماکزیمم جابجایی قابل تشخیص دارد، در نحوه انتخاب تصاویر که با مینیمم کردن اختلاف بین خط‌مبنای زمانی و مکانی بین تصاویر اصلی و فرعی، می‌توان همدوسی (همبستگی) را افزایش و تغییرات بیشتری را تشخیص داد.

پیشنهاد می‌شود بر اساس رابطه شماره (۵) که طول موج راداری نقش بسزایی در محاسبه ماکزیمم جابجایی دارد، از تصاویر راداری با طول موج بیشتری، همچون تصاویر ماهواره آلوس که طول موج ۲۴ سانتی‌متری را دارا می‌باشند، استفاده شود تا به تغییرات و جزئیات بیشتر و بهتری از جابجایی‌های بزرگ مقیاس مانند معادن روباز دست پیدا کرد. علاوه بر این استفاده از تصاویر سنجنده‌هایی که دارای مدت زمان کمتری برای عبور دوباره از منطقه مورد مطالعه هستند، باعث بدست آمدن تصاویر با خط‌مبنای زمانی کمتری شده و در نهایت منجر به افزایش همدوسی می‌شود و تغییرات بیشتری قابل تشخیص می‌گردد.

مراجع

- [1] Fialko, Y., Simons, M. and Agnew, D., (2001), The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine earthquake, California, 234 from space 2 geodetic observations, *Geophysical Research Letters* 28(16) 2353063–3066.
- [2] Li, Z. W., Yang, Z. F., Zhu, J. J., Hu, J., Wang, Y. J., Li, P. X., & Chen, G. L. (2015). Retrieving three-dimensional displacement fields of mining areas from a single InSAR pair. *Journal of Geodesy*, 89 (1), 17-32.
- [3] Strozzi, T., et al., Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002. 40(11): p. 2384-2391.
- [4] Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.

- [5] Chen, B., Deng, K., Fan, H., & Hao, M. (2013). Large-scale deformation monitoring in mining area by D-InSAR and 3D laser scanning technology integration. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (4), 555-561.
- [6] Baran, I., Stewart, M., & Claessens, S. (2005). A new functional model for determining minimum and maximum detectable deformation gradient resolved by satellite radar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(4), 675-682.
- [7] Chang, Z. Q., Gong, H. L., Zhang, J. F., & Gong, L. X. (2007). A feasible approach for improving accuracy of ground deformation measured by D-InSAR. *Journal of China University of Mining and Technology*, 17 (2), 262-266.
- [8] Barcelonnette, I., (2013). *Traditional Differential Interferometry Synthetic-Aperture Radar*.
- [9] Ji, M., Li, X., Wu, S., Gao, Y., & Ge, L. (2011). Use of SAR interferometry for monitoring illegal mining activities: a case study at Xishimen iron ore mine. *Mining Science and Technology (China)*, 21 (6), 781-786.
- [10] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.
- [11] Sousa, J. J., Hooper, A. J., Hanssen, R. F., Bastos, L. C., & Ruiz, A. M. (2011). Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2652-2663.
- [12] Chengsheng, Y. A. N. G., Zhang, Q., Chaoying, Z. H. A. O., Lingyun, J. I., & Wu, Z. H. U. (2010). Monitoring mine collapse by D-InSAR. *Mining Science and Technology (China)*, 20(5), 696-700.
- [13] Zhang, A., Lu, J., & Kim, J. W. (2018). Detecting mining-induced ground deformation and associated hazards using spaceborne InSAR techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9 (1), 211-223.
- [14] Li, Z. W., Yang, Z. F., Zhu, J. J., Hu, J., Wang, Y. J., Li, P. X., & Chen, G. L. (2015). Retrieving three-dimensional displacement fields of mining areas from a single InSAR pair. *Journal of Geodesy*, 89 (1), 17-32.
- [15] Ding, M. J., Zong, Z. M., Ying, Z., Ouyang, X. D., Huang, Y. G., Lei, Z. H. O. U., ... & Wei, X. Y. (2008). Group separation and analysis of a carbon disulfide-soluble fraction from Shenfu coal by column chromatography. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(1), 27-32.
- [16] Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- [17] Li Z W. (2004). *Modeling Atmospheric Effects on Repeat-Pass InSAR Measurements [Ph.D. dissertation]*. Hong Kong Polytechnic University
- [18] Fan, H., Deng, K., Ju, C., Zhu, C., & Xue, J. (2011). Land subsidence monitoring by D-InSAR technique. *Mining Science and Technology (China)*, 21(6), 869-872.
- [19] Hu, Z. L., Li, H. Q., & DU, P. J. (2009). Case study on the extraction of land cover information from the SAR image of a coal mining area. *Mining Science and Technology (China)*, 19 (6), 829-834.
- [20] Raucoules, D., Colesanti, C., & Carnec, C. (2007). Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *Comptes Rendus Geoscience*, 339 (5), 289-302.
- [21] Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), 7547-7563.