

تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یابی جهانی

پریسا حقیقت‌مهر^{۱*}، محمدجواد ولدان زوج^۲، رضا تاجیک^۳، سعید جباری^۴، محمودرضا صاحبی^۴، رضا اسلامی^۳، مصطفی گنجیان^۳ و مریم دهقانی^۵

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۳ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۴ استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۵ استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳

چکیده

در این مقاله برای نخستین بار در ایران، به منظور ارزیابی قابلیت روش تداخل سنجی راداری (InSAR) از مقایسه همزمان مشاهدات سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و داده‌های راداری در دشت هشتگرد که به علت استخراج نامناسب آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر فرونشست است، استفاده شد. به منظور تحلیل سری زمانی جابه‌جایی سطح زمین، الگوریتم خط مبنای کوتاه موسوم به SBAS به کار گرفته شد. تحلیل سری زمانی فرونشست، با استفاده از ۶ تداخل‌نگاشت (اینترفروگرام) محاسبه شده از ۴ تصویر راداری ماهواره ENVISAT ASAR در بازه زمانی ۴ ماهه در سال ۲۰۰۸ انجام شد. یک عامل نرم‌کنندگی بهینه که نطفه ناشی از اتمسفر، خطای بازیابی فاز و اثرات مداری را کاهش می‌دهد و در عین حال تغییر شکل‌های غیرخطی را حفظ می‌کند، به حل کمترین مربعات اضافه شد. نتایج تحلیل سری زمانی نشان می‌داد که منطقه به طور پیوسته در حال نشست است. نقشه سرعت میانگین تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره که از تحلیل سری زمانی به دست آمده، آهنگ قابل توجه فرونشست را ۴۷ میلی‌متر در ماه نشان داد. به منظور ارزیابی نتایج سری زمانی تداخل سنجی راداری، یک شبکه مترامک GPS متشکل از ۱۸ ایستگاه در منطقه طراحی شد. در مکان‌یابی ایستگاه‌ها از الگوی مکانی فرونشست حاصل از تداخل‌نگاشت محاسبه شده از داده‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۴ و بررسی‌های میدانی استفاده شد. ایستگاه‌های GPS همزمان با داده‌های راداری اقدام به جمع‌آوری و ثبت داده‌های خام کردند. سپس با استفاده از پردازش مشاهدات صورت گرفته، میزان جابه‌جایی افقی و قائم ایستگاه‌ها محاسبه شد. سری زمانی حاصل شده از دو روش تداخل سنجی راداری و GPS، با یکدیگر مقایسه شدند. مقایسه نتایج به دست آمده، سازگاری بسیار بالای تداخل سنجی راداری و روش ژئودیتیک را ارائه داد که نشان‌دهنده عملکرد بالای روش تداخل سنجی راداری است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، تحلیل سری زمانی، تداخل سنجی راداری، GPS.

* نویسنده مسئول: پریسا حقیقت‌مهر

E-mail: haghightmehrs@yahoo.com

۱- مقدمه

برخی از استان‌ها مانند کرمان و یزد رخ می‌داد، اینک استان‌های اصفهان، خراسان، تهران و غیره نیز متحمل فرونشست هستند و این مشکل به طور روز افزون در استان‌های بیشتری خودنمایی می‌کند. در همه فرونشست‌هایی که در ایران رخ می‌دهد، استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تنها عامل یا مهم‌ترین عامل ایجاد فرونشست است. دشت هشتگرد در ۶۰ کیلومتری باختر تهران و میان شهرهای کرج و آبیگ قرار دارد (شکل ۱). محدوده مورد بررسی از نظر ساختار زمین‌شناسی شامل دو محدوده کاملاً جدا است. بخش شمال‌خاوری در پهنه البرز مرکزی و بخش جنوبی و مرکزی در پهنه ایران مرکزی جای می‌گیرد. مرز میان البرز و ایران مرکزی فروافتادگی اشتهاارد است که بر اثر راندگی شمال تهران با راستای باختری-خاوری تا شمال باختر-جنوب خاوری به وجود آمده است و ادامه دشت تهران به شمار می‌آید. این منطقه از شمال به راندگی شمال تهران و از جنوب به راندگی اشتهاارد منتهی می‌شود. بیشتر این دشت از زمین‌های کشاورزی پوشیده شده است که بیشترین مقدار آب مورد نیاز برای مقاصد کشاورزی از سفره آب زیرزمینی تأمین می‌شود. هیدروگراف واحد محاسبه شده به کمک اطلاعات آب زیرزمینی، نشان‌دهنده افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه است (شکل ۲).

با توجه به هیدروگراف واحد دشت هشتگرد بیشترین مقدار افت سطح آب در این منطقه مربوط به بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۱ است. بنابراین اشاره به این نکته ضروری است که لزوماً یک رابطه خطی میان افت سطح آب زیرزمینی و ایجاد پدیده فرونشست وجود ندارد. در بیشتر مواقع، سبترای رسوبات ریزدانه و هدایت هیدرولیکی پایین این رسوبات، باعث ایجاد تأخیر زمانی بین افت سطح

فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی به عنوان مشکلی اساسی همراه با پیامدهای محیطی در بسیاری از نواحی، شناخته شده است (به عنوان نمونه رجوع شود به: Abidin et al., 2001; Amelung et al., 1999; Galloway et al., 1998; Longfield, 1932; Poland & Davis, 1969; Tolman & Poland, 1940). در ایجاد پدیده فرونشست در اثر برداشت نامناسب آب زیرزمینی، عوامل زمین‌شناسی و آب زمین‌شناسی بسیاری مؤثرند. تخلخل مصالح تشکیل‌دهنده لایه‌های خاک، تراکم، نوع، جنس و ترکیب لایه‌ها، نحوه پمپاژ، ساختار زمین‌شناسی منطقه، هدایت هیدرولیکی لایه‌های آبدار، بارندگی و دما، همگی از عوامل مؤثر در فرونشست زمین به شمار می‌روند.

استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار سیال و در نتیجه افزایش فشار میان ذره‌ای می‌شود که منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست زمین می‌شود (Terzaghi, 1925). افت ناموزون سطح آب زیرزمینی و ناهمگنی بافت، ستبرای و ویژگی آبرفت‌های منطقه نیز موجب فرونشست ناموزون سطح زمین می‌شود و شکاف‌هایی در پوسته زمین به وجود می‌آورد. چرخه فصلی تخلیه و تغذیه ناهمگن آبخوان‌ها، موجب فشردگی و انبساط می‌شود (Riley, 1969; Amelung et al., 1999; Heywood, 1997; Hoffman et al., 2001; Poland & Ireland, 1998). پیامدهای محیطی پدیده فرونشست، اساساً شامل آسیب رساندن به سازه‌های دست‌ساز بشر مانند ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو، ایجاد شکاف‌هایی بر روی سطح زمین و سیلاب است (Hoffman et al., 2003). در ایران فرونشست زمین، پیشینه سی و چند ساله دارد و اگر زمانی این پدیده تنها در

۴ ماهه در سال ۲۰۰۸ است. همچنین تحلیل سری زمانی فرونشست در این بازه زمانی صورت گرفته و نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری و GPS با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

تحلیل سری زمانی و تعیین آهنگ فرونشست به کمک الگوریتم خط مبنای کوتاه (Small Baseline Subset (SBAS)) انجام شده است که به برآورد فاز تجمعی در زمان‌های تصویربرداری می‌پردازد (Berardino et al., 2002). به منظور برآورد مقادیر فاز از برآورد کمترین مربعات استفاده شده است. همچنین به منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطای باقیمانده مداری، نوفه و خطاهای مربوط به عمل بازیابی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی در تحلیل کمترین مربعات مورد استفاده قرار گرفته است. شرط نرم‌کنندگی با اعمال یک عامل نرم‌کنندگی تحقق می‌یابد. این عامل باید به صورت بهینه برآورد شود تا نخست، خطاها و نوسانات ناخواسته مربوط به اثرات اتمسفری و غیره در سری زمانی کاهش یابد و دوم، جابه‌جایی‌های ناپایدار که بیشتر مربوط به اثرات فصلی هستند در سری زمانی حفظ شوند.

در این دشت براساس الگوی فرونشست استخراج شده به کمک روش تداخل‌سنجی راداری که در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ پیش‌تر به دست آمده بود (Dehghani et al., 2008)، یک شبکه مترامک GPS متشکل از ۱۸ ایستگاه طراحی شد و مشاهدات جابه‌جایی سطح زمین همزمان با داده‌های راداری ثبت شد. همچنین برای تعیین میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، تصاویر ماهواره ENVISAT ASAR در بازه زمانی متناسب با مشاهدات GPS، مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱. تحلیل سری زمانی با استفاده از تداخل‌سنجی راداری

یکی از روش‌هایی که در اندازه‌گیری فرونشست زمین به کار می‌رود، روش تداخل‌سنجی راداری است. در این روش تصاویر مختلط راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویری به نام تداخل‌نگاشت (Interferogram) تولید می‌شود. تداخل‌نگاشت تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر به دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند، حاصل می‌شود (Daniel et al., 2003). لازم به بیان است که ثبت هندسی دو تصویر طی دو مرحله به صورت تقریبی و دقیق انجام می‌شود (Hanssen, 2001). در یک تداخل‌نگاشت اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد. به کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان متغیرهای مختلف از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین تا کسری از سانتی‌متر و اطلاعات توپوگرافی سطح زمین را با دقت ۱۰ متر استخراج کرد. باید در نظر داشت که جابه‌جایی به دست آمده از یک تداخل‌نگاشت در راستای خط دید رادار ((Line Of Sight (LOS)) بوده و تجزیه این بردار جابه‌جایی در جهات قائم و افق نیازمند تداخل‌نگاشت‌های دیگر با هندسه تصویربرداری متفاوت و یا داده‌های زمینی اضافی است. برای اندازه‌گیری میزان فرونشست دشت هشتگرد، از ۴ تصویر راداری ENVISAT ASAR در سطح (Single Look Complex (SLC)) از گذر ۱۴۹ در بازه زمانی ۱۱ جولای ۲۰۰۸ تا ۲۴ اکتبر ۲۰۰۸ استفاده شد. لازم به یادآوری است سفارش دریافت این داده‌ها در سال ۲۰۰۷ به آژانس فضایی اروپا ارسال شد و پس از بررسی پیشنهاد توسط این آژانس، سفارش یادشده در برنامه اخذ داده سنجنده ASAR قرار گرفت. با استفاده از این تصاویر ۶ تداخل‌نگاشت پردازش شد.

جدول ۱، مشخصات تداخل‌نگاشت‌های پردازش شده دشت هشتگرد را به همراه خط مبنای مکانی و زمانی نشان می‌دهد. تمام مراحل پردازش تداخل‌سنجی راداری در نرم‌افزار گاما (Wegmuller et al., 1995) تحت سیستم عامل لینوکس انجام شده است. فاز تداخل‌نگاشت دارای اثر توپوگرافی، خطاهای مداری، جابه‌جایی هدف و

آب زیرزمینی و نشست سطح زمین می‌شود. شواهد زمینی متعددی نشان‌دهنده وجود پدیده فرونشست در این منطقه است. اولین گام در مطالعه این پدیده، اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ایجاد شده در سطح زمین است.

برای اندازه‌گیری فرونشست زمین روش‌های مختلف ژئودتیک و غیر ژئودتیک مانند استفاده از GPS (Global Positioning System) توتال استیشن، لیزر اسکنر و غیره وجود دارد. ایستگاه‌های GPS اندازه‌گیری‌های دقیق و پیوسته‌ای را در نقاط محدودی از نواحی فرونشست می‌دهند (Lanari et al., 2004). بنابراین آنها توانایی تعیین وسعت و الگوی فرونشست را ندارند.

روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نیز در سال‌های اخیر به عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودتیک با توجه به مزایایی که نسبت به دیگر روش‌ها دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (Crosetto et al., 2002; Fruneau & Sarti, 2000; Peltzer et al., 1998; Tesauro et al., 2000).

برخی مطالعات، روش تداخل‌سنجی راداری را به منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده کرده‌اند (Carbognin et al., 2004; Chang et al., 2004; Motagh et al., 2006). از جمله مزایای این روش می‌توان به دقت بسیار بالا، پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی بالا و نداشتن نیاز به کار میدانی، مقرون به صرفه بودن و امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی اشاره کرد. در ایران نیز در چند سال اخیر از این روش در پایش تغییر شکل‌های سطح زمین استفاده شده است. اما تاکنون توانایی روش تداخل‌سنجی راداری در مطالعه تغییر شکل‌های سطح زمین در مقایسه با مشاهدات سامانه موقعیت‌یابی جهانی به طور دقیق و گسترده مورد ارزیابی قرار نگرفته است. یکی از دلایل آن را می‌توان محدود بودن تعداد ایستگاه‌های GPS دائم مربوط به شبکه ژئودینامیک ایران ((Iranian Permanent Network for Geodynamic (IPGN)) دانست. بررسی توانایی و دقت این روش در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین ضروری به نظر می‌رسد. در این فناوری با استفاده از تلفیق داده‌های به دست آمده از سامانه‌های تصویربرداری رادار نصب شده بر سکوها ماهواره‌ای یا هواپیمایی، حرکت، ارتفاع و تغییرات سطح زمین نقشه‌برداری می‌شوند. اساس کار در اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می‌شود، با تصویری که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌شود، تلفیق می‌شود. روش تداخل‌سنجی راداری، شناسایی مناطق در حال نشست و تعیین وسعت آنها را ممکن می‌سازد. روش‌های تداخل‌سنجی راداری سنتی، به‌طور گسترده‌ای به منظور مشخص کردن فشرده‌گی سفره آب زیرزمینی در مقیاس زمانی زیاد، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اگرچه تحلیل سری زمانی به تازگی به عنوان فنی برای توصیف رفتار مکانی و زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت فرونشست توسعه یافته است (Berardino et al., 2002).

همان‌گونه که اشاره شد، دشت هشتگرد به علت استخراج آب‌های زیرزمینی دچار پدیده فرونشست شده است. میزان فرونشست آن در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری بدون تحلیل سری زمانی، تعیین شده بود (Dehghani et al., 2008). از آنجا که فرونشست زمین در این منطقه همچنان ادامه دارد، بررسی دقیق‌تر سطح زمین در این دشت دارای اهمیت است. استفاده از مشاهدات GPS به منظور ارزیابی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری بسیار مفید است. اما تاکنون برداشت همزمان نقاط GPS و اطلاعات راداری در ایران انجام نشده است.

هدف اصلی در این مطالعه، استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و مشاهدات GPS به طور همزمان برای تعیین میزان فرونشست دشت هشتگرد در یک بازه زمانی

در این رابطه γ عامل نرم‌کنندگی است که باید به صورت بهینه تعیین شود. با توجه به این که مشتق دوم (شتاب) صفر است، مشتق اول حالت خطی دارد. بنابراین، رابطه ۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\left(\begin{array}{c} A\phi \\ \gamma^2 * \left(\frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \end{array} \right) = \begin{pmatrix} \delta\phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

i در این معادله شماره تصویر راداری است. اگر عامل نرم‌کنندگی کوچک انتخاب شود، سری زمانی به دست آمده دارای نوسانات زیاد بوده و اگر بزرگ در نظر گرفته شود، سری زمانی بیش از اندازه نرم می‌شود و در نتیجه مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی از بین می‌رود. بنابراین عامل نرم‌کنندگی باید به گونه‌ای انتخاب شود که نخست خطاهایی که در سری زمانی نوسانات ناخواسته ایجاد می‌کند، حذف شوند و دوم تغییر شکل‌های ناپایدار مانند اثرات فصلی در سری زمانی حفظ شوند. یک روش برای تعیین بهینه عامل نرم‌کنندگی، رسم مقادیر مختلف جذر میانگین مربع بردار باقیمانده‌های برآورد شده از حل کمترین مربعات (Root Mean Square Error (RMSE))، به ازای عامل‌های مختلف نرم‌کنندگی است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{r}^i)^2}{n}} \quad (5)$$

اگر ماتریس ضرایب را در معادله ۳ با B نشان دهیم، \hat{r} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{r} = B\phi - \delta\phi \quad (6)$$

ϕ فاز برآورد شده از حل کمترین مربعات است.

نمودار حاصل یک منحنی با یک بازو خواهد بود. اگرچه انتخاب عامل نرم‌کنندگی بهینه اختیاری است، بسته به مقیاس نمودار با توجه به مطالب بیان شده در بالا، نقطه میانی روی منحنی تقریبی از عامل نرم‌کنندگی است که نوسانات نوفه‌ای را حذف کرده و در عین حال تغییر شکل‌های غیر خطی را حفظ می‌کند. چنانچه عامل نرم‌کنندگی از مقدار بهینه بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر انتخاب شود، سری زمانی به ترتیب نرم و یا خشن می‌شود. شکل ۳، نمودار مربوطه را نشان می‌دهد. با تعیین عامل نرم‌کنندگی بهینه و با استفاده از معادله ۳، حل کمترین مربعات تکرار شده و مقادیر فاز مربوط به هر تصویر رادار برآورد می‌شوند. در مرحله آخر مقادیر فاز برآورد شده به کمک ضریب $\frac{-\lambda}{4\pi}$ به جابه‌جایی تبدیل می‌شوند.

۲-۲. رفتارسنجی فرونشست با استفاده از شبکه سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS)

امروزه استفاده از فناوری GPS، امکان اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق مختصات جغرافیایی، فواصل افقی و قائم بین نقاط زمینی را ممکن کرده است. افزون بر این، از مهم‌ترین کاربردهای این سامانه به واسطه دقت بسیار بالایی که دارد، می‌توان به اندازه‌گیری در زمینه شناسایی حرکات با منشأ ژرف و سطحی اشاره کرد. مطالعات کاهش خطر بلایای طبیعی با استفاده از سامانه موقعیت‌یابی در اوایل راه‌اندازی سامانه GPS تنها منحصراً به روش برداشت دوره‌ای بوده است. در سال‌های اخیر، گرایش به برداشت دائمی داده‌های ژئودزی ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری تغییرات دگرریختی و جابه‌جایی پوسته‌ای رو به گسترش است. در کشورمان ایران نیز از چند سال پیش به کارگیری سامانه موقعیت‌یابی مورد توجه قرار گرفته است.

در مرحله اولیه مطالعات، مکان‌یابی مناسب برای ایستگاه‌های GPS، اهمیت بسیار بالایی دارد. زیرا مکان‌یابی صحیح و مناسب ایستگاه‌های GPS تأثیر مستقیم بر روی اندازه‌گیری و تفسیر داده‌های برداشت شده و نتایج حاصل از پردازش آنها بر اساس مفاهیم زمین‌شناسی و ژئودینامیکی دارد.

تأثیرات اتمسفر است. برای به‌دست آوردن جابه‌جایی سطح زمین در یک بازه زمانی، باید خطاهای مداری، اثرات توپوگرافی و نوفه اتمسفر از تداخل‌نگاشت حذف شوند. برای حذف اثر توپوگرافی، از مدل ارتفاعی رقومی (Farr & Kobrick, 2000) SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است. خطاهای مداری نیز برای هر تداخل‌نگاشت با برازش یک رویه درجه یک به مناطقی که فاقد جابه‌جایی هستند، مدل‌سازی شد و از تداخل‌نگاشت مورد نظر کم شد (به عنوان نمونه مراجعه شود به Fanning et al., 2005). برای این منظور از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

فاز تداخل‌نگاشت با اعمال ضریب $\frac{-\lambda}{4\pi}$ ، به جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل می‌شود. از آن‌جا که زاویه دید ماهواره بسیار کوچک است (۲۳ درجه) و بیشترین بخش تغییر شکل ناشی از فرونشست، می‌تواند به صورت قائم در نظر گرفته شود، می‌توان از تداخل‌نگاشت‌های محاسبه شده، بیشترین بخش تغییر شکل مربوطه را اندازه‌گیری کرد. مقادیر منفی در تداخل‌نگاشت‌ها نشان‌دهنده سیگنال فرونشست هستند. لازم به بیان است که سیگنال‌های فرونشست در تداخل‌نگاشت‌ها سیگنال‌های پایدار در زمان هستند. به عبارت دیگر، مکان و موقعیت جغرافیایی آنها در تمام تداخل‌نگاشت‌ها ثابت است. بنابراین موقعیت اثرات اتمسفری، نوفه‌ها و خطاهای دیگر در زمان، تغییر می‌کند و موقعیت مشخصی در تداخل‌نگاشت‌ها ندارند، بنابراین به راحتی می‌توان آنها را از سیگنال‌های تغییر شکل مجزا کرد (Massonnet & Feigl, 1998).

مرحله بعدی ایجاد سری زمانی تغییر شکل با استفاده از تداخل‌نگاشت‌ها است. هدف اصلی در تحلیل سری زمانی، وارون کردن تداخل‌نگاشت‌ها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های دریافت تصاویر با استفاده از روش کمترین مربعات است. فرض کنید فاز تداخل‌سنجی راداری که همان فاز تداخل‌نگاشت است، $\delta\phi_k$ ، از فاز دو تصویر راداری در زمان‌های t_j و t_k به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta\phi_k = \phi(t_j) - \phi(t_k), \quad k = 1, \dots, M, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (1)$$

در رابطه با M و N به ترتیب تعداد تداخل‌نگاشت‌های پردازش شده و تعداد تصاویر راداری و $\phi(t_j)$ و $\phi(t_k)$ مقادیر مجهول فاز در هر تصویر راداری در دو تاریخ است. بنابراین سامانه‌ای از M معادله مشاهده و N مجهول به صورت زیر وجود خواهد داشت:

$$A\phi = \delta\phi \quad (2)$$

که در آن N بردار ϕ تایی از مجهولات، $\delta\phi$ بردار متشکل از M فاز تداخل‌سنجی و A ماتریس ضرایب در سامانه معادلات کمترین مربعات است. با حل کمترین مربعات سامانه معادله ۲، می‌توان مقدار فاز مربوط به هر تصویر راداری را برآورد کرد. لازم به بیان است که مقدار فاز اولین تصویر صفر در نظر گرفته می‌شود ($\phi_1 = 0$). چنانچه سیگنال مربوط به جابه‌جایی نسبت به مؤلفه‌های دیگر فاز مانند سیگنال اتمسفر بزرگ باشد، می‌توان فاز برآورد شده ϕ ، را به جابه‌جایی نسبت داد. می‌توان به منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطای باقیمانده مداری، نوفه و خطاهای مربوط به عمل بازیابی فاز از شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات استفاده کرد (برای نمونه رجوع شود به Schmidt & Burgman (2003); Lundgren et al. (2001)). شرط نرم‌کنندگی که در این مطالعه از آن استفاده شده، بر اساس تقریب تفاضل محدود (finite difference) برای مشتق درجه دو از سری زمانی است که مفهوم آن انحنای کمینه و یا سرعت ثابت تغییر شکل است. به عبارتی ساده‌تر در این شرط فرض می‌شود که سرعت جابه‌جایی در دو بازه زمانی متوالی کم و بیش ثابت و فاقد تغییرات ناگهانی است. در نتیجه با به کار بردن قید یادشده، خطاهایی که باعث ورود نوسانات غیر طبیعی و ناگهانی به سری زمانی می‌شود کاهش یافته و سری زمانی تغییرات به صورت نرم شده برآورد می‌شود. با وارد کردن شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات، معادله ۲، به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\left(\begin{array}{c} A \\ \gamma^2 * \frac{\partial^2}{\partial t^2} \end{array} \right) \phi = \begin{pmatrix} \delta\phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری است. سپس تداخل‌نگاشت میانگین که آهنگ متوسط فرونشست دشت را در ماه برای این بازه زمانی تعیین می‌کند، محاسبه شد. شکل ۹، میانگین فرونشست دشت هشتگرد را نشان می‌دهد. بیشینه مقدار آهنگ فرونشست در این دشت که از نقشه آهنگ متوسط استخراج شد حدود ۴۷ میلی متر در ماه است. باید توجه داشت که مقدار فرونشست در راستای خط دید ماهواره است.

برای ارزیابی نتایج روش تداخل‌سنجی راداری، سری زمانی نقاط GPS منطقه با استفاده از تداخل‌نگاشت‌های محاسبه شده به دست آمد. شکل ۱۰، موقعیت نقاط GPS را بر روی تداخل‌نگاشت میانگین نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر به دست آمده توسط مشاهدات GPS، میزان جابه‌جایی قائم نقاط محاسبه شد. همچنین با در نظر گرفتن تغییرات طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها در فواصل زمانی بین دوره‌های برداشت، مقدار و جهت بردارهای جابه‌جایی افقی محاسبه شد. شکل ۱۱، جهت و مقدار میانگین بردارهای جابه‌جایی افقی نقاط GPS را بر روی تداخل‌نگاشت میانگین نشان می‌دهد. واحد در نظر گرفته شده برای رسم بردارها، میلی‌متر بر ماه است که با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نمایش داده شده است. برای رسم بردارها، جابه‌جایی نسبت به اولین دوره برداشت مبنا قرار داده شده است تا بتوان دیدگاه مناسبی از حرکت افقی ایستگاه‌ها به دست آورد.

با توجه به شکل ۱۱، منطقه فرونشست دارای ۴ پهنه اصلی فرونشست است. جهت بردارهای جابه‌جایی افقی ایستگاه‌های GPS به سمت مرکز پهنه‌هاست. ایستگاه ۱۴ با توجه به این که در حاشیه منطقه فرونشست قرار دارد، باید جهت بردار جابه‌جایی افقی آن به سمت مرکز فرونشست باشد، اما به سمت خارج است، احتمالاً "علت آن وجود یک پهنه کوچک فرونشست در آن ناحیه است که در تداخل‌نگاشت با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر مشخص نشده است.

۴- بحث و بررسی

سرانجام، سری زمانی به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری و سری زمانی حاصل از اندازه‌گیری‌های GPS با یکدیگر مقایسه شدند. از آنجا که تداخل‌سنجی راداری مقدار فرونشست را در راستای خط دید ماهواره می‌دهد، میزان فرونشست اندازه‌گیری شده توسط GPS به فرونشست در راستای خط دید ماهواره تبدیل شده است. شکل ۱۳، سری‌های زمانی هر یک از نقاط GPS را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های ۳، ۷، ۱۵ و ۱۷ خارج از محدوده فرونشست بوده و به عنوان مرجع در نظر گرفته شده‌اند، به عبارت دیگر، میزان فرونشست این نقاط صفر فرض شده است. نقاط نشان داده شده با مربع خالی بیانگر نتایج به دست آمده از مشاهدات GPS و نقاط نمایش داده شده با مربع پرمتناظر با نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری، است.

نتایج سری زمانی، فرونشست شدید دشت هشتگرد را در بازه زمانی مربوطه نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۱۲ مشخص است، سری‌های زمانی به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری، سازگاری بسیار بالایی با مشاهدات GPS دارد. لازم به بیان است که تصاویر راداری استفاده شده، با مشاهدات GPS صورت گرفته یک اختلاف چند روزه دارند. ایستگاه‌های ۹، ۱۲ و ۱۳ که در مرکز منطقه فرونشست قرار دارند، فرونشست شدیدتری نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارند. ایستگاه ۵ نیز با این که دور از مرکز است، فرونشست شدیدی را نشان می‌دهد. هر چه از مرکز به سمت کناره‌ها می‌رویم، میزان فرونشست کاهش می‌یابد. ایستگاه‌های ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۶ فرونشست تقریباً یکسانی را شامل می‌شوند. ایستگاه ۱، به دلیل مشکلات ایجاد شده هنگام برداشت به‌طور صحیح اندازه‌گیری نشده است، به همین دلیل، سری زمانی تداخل‌سنجی راداری با مشاهدات GPS همخوانی ندارد. سری‌های زمانی ایستگاه ۶، نیز اختلاف نسبتاً زیادی با یکدیگر دارند که آن را می‌توان به خطای اتمسفر باقیمانده در تداخل‌نگاشت، اثرات مداری، خطای توپوگرافی نسبت داد. زیرا

برای ایجاد ایستگاه‌های ثابت، قبل از هر مطلبی، باید تأسیسات احداث شده را برای مدت‌های طولانی در مکان مورد نظر مستقر و از سوی دیگر، باید ایستگاه‌ها از بیشترین بازده برای اهداف شبکه برخوردار باشند. ایستگاه‌ها لازم است در نقاط منحصر به فردی واقع شوند تا بتوانند اندازه‌گیری‌های ارائه شده را به عنوان نماینده آماری از منطقه پیرامون خود مطرح کنند. طراحی شبکه GPS در منطقه دشت هشتگرد به همراه عملیات جمع‌آوری داده و پردازش آنها توسط گروه ژئودینامیک سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد. از آنجا که الگوی جابه‌جایی سطح زمین کمک بزرگی به طراحی بهینه شبکه GPS دارد، برای مکان‌یابی ایستگاه‌های GPS در منطقه از تصویر تداخل‌نگاشت مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ که پیش‌تر به دست آمده و در بردارنده الگوی مکانی میدان جابه‌جایی بود و نیز مشاهدات و بررسی‌های میدانی استفاده شد.

با توجه به تداخل‌نگاشت مربوطه (شکل ۴) در طراحی اولیه تعداد ۳۷ ایستگاه منظور شد. اما پس از بررسی عوامل ضروری در طراحی و قرارگیری ایستگاه‌ها و همچنین با توجه به امکانات موجود سرانجام تعداد ۲۰ ایستگاه برای ایجاد شبکه GPS دشت هشتگرد، انتخاب و احداث شد. لازم به بیان است که ۲ تا از ایستگاه‌ها به دلیل تخریب توسط ساکنان محلی، از شبکه برداشت حذف شد. از ۱۸ ایستگاه باقیمانده، ۴ ایستگاه در خارج از محدوده فرونشست (ایستگاه‌های ۳، ۷، ۱۵ و ۱۷) و تعداد ۱۴ ایستگاه داخل محدوده فرونشست انتخاب شد. با توجه به حرکات ناچیز ۴ ایستگاه خارج محدوده فرونشست، می‌توان حرکت آنها را نسبت به محدوده داخل فرونشست صفر در نظر گرفت تا بتوان حرکات ایستگاه‌های داخل فرونشست را نسبت به این ۴ ایستگاه، برآورد کرد.

در این تحقیق برای برداشت داده‌های خام شبکه GPS دشت هشتگرد از دوازده دستگاه گیرنده GPS Leica GX1220 استفاده شد. دقت دستگاه‌های یادشده پس از پردازش داده‌های خام ۳ mm ± در جهت عمودی و 3 mm ± در جهت افقی است. شایان توجه است که دقت محاسبه فاصله بین ایستگاه‌ها (Base Line) و مختصات نقاط پس از پردازش در نرم‌افزار به دهم میلی‌متر می‌رسد. با استفاده از روش مقایسه‌ای برای محاسبه مقادیر جابه‌جایی‌ها و با توجه به ثابت بودن ادوات و روش برداشت و یکسان بودن تقریبی شرایط محیطی، میزان جابه‌جایی‌ها با دقت قابل قبول کمتر از میلی‌متر محاسبه شد. این دقت برای رفتارسنجی آهنگ فرونشست که آهنگی در حدود چندین سانتی‌متر بر سال دارد، مناسب است.

شبکه GPS دشت هشتگرد با توجه به الگوی مکانی محدوده فرونشست، به شکل یک مثلث شامل ۱۸ ایستگاه ایجاد شد. برداشت داده‌های خام در ۵ دوره از ۱۳ جولای شروع و تا ۵ دسامبر ۲۰۰۸ به صورت ماهانه انجام شد. در جدول ۲، تاریخ برداشت‌های هر دوره آمده است.

در این روش ۴ ایستگاه در خارج محدوده فرونشست و ۲ ایستگاه در مرکز منطقه فرونشست تا پایان زمان برداشت به صورت ثابت داده‌های خام را ثبت کرده و دیگر ایستگاه‌ها به صورت شبکه‌های چهار ضلعی با یک ضلع مشترک به صورت گردشی ثبت داده‌های خام را انجام می‌دادند.

در پردازش داده‌های شبکه GPS دشت هشتگرد، از مدل‌های مختلف چهار ضلعی با دو قطر، شبکه‌ای و ستاره‌ای استفاده شد (شکل ۵). پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار تخصصی Leica Geo Office v.5 انجام گرفت. پس از پردازش تمام داده‌ها، مختصات دقیق ایستگاه‌ها در هر دوره مشخص شد و در نتیجه مقدار جابه‌جایی قائم و افقی ایستگاه‌ها در فواصل زمانی میان دوره‌های برداشت، محاسبه شد.

۳- سری زمانی فرونشست دشت هشتگرد

برای نشان دادن الگوی رشد فرونشست دشت هشتگرد، با استفاده از تحلیل سری زمانی میزان فرونشست در بازه‌های زمانی مربوطه محاسبه شد. شکل‌های ۶، ۷ و ۸،

به برداشت کردند. میزان جابه‌جایی قائم و افقی ایستگاه‌ها محاسبه شد. از آنجا که تداخل‌سنجی راداری میزان فرونشست را در راستای خط دید ماهواره می‌دهد، مؤلفه قائم جابه‌جایی ایستگاه‌های GPS به جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل شده است. سپس سری زمانی ایستگاه‌های GPS که از دو روش به دست آمده‌اند با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج، سازگاری بسیار بالای تداخل‌سنجی راداری و مشاهدات GPS را با RMSE حدود ۰/۰۰۵ متر نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که روش تداخل‌سنجی راداری دقت بسیار بالایی در اندازه‌گیری تغییر شکل‌های سطح زمین دارد، در عین حال پوشش وسیع و پیوسته‌ای از منطقه فراهم می‌کند که این امر تعیین پهنه منطقه تحت تأثیر فرونشست را ممکن می‌سازد، اما مشاهدات GPS با وجود محاسنی چون تعیین جابه‌جایی‌های افقی و قائم با دقت بسیار بالا (کمتر از میلی‌متر) دارای مشکلاتی است. از آن جمله می‌توان به محدود بودن نقاط اندازه‌گیری تغییر شکل در این روش و در عین حال زمان و هزینه‌بر بودن آن در مناطق وسیع اشاره کرد. آهنگ دقیق‌تر فرونشست با پردازش تعداد بیشتر داده راداری قابل برآورد است. برای تعیین مؤلفه قائم و افقی جابه‌جایی نیز می‌توان از داده‌های راداری با گذر بالا (ascending) و پایین (descending) به طور همزمان بهره جست. با توجه به فرونشست شدید دشت هشتگرد نیاز به مدیریت صحیح و نظارت کافی بر استخراج آب‌های زیرزمینی آشکار می‌شود.

سپاسگزاری

مؤلفان مقاله از آژانس فضایی اروپا به خاطر فراهم کردن داده‌های راداری ENVISAT ASAR و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به دلیل تهیه و در اختیار گذاشتن نرم‌افزار گاما برای پردازش‌های مربوطه و همچنین گروه زمین‌شناسی مهندسی سازمان زمین‌شناسی برای تأمین هزینه برداشت مشاهدات GPS تشکر و قدردانی می‌کنند.



شکل ۱- موقعیت هشتگرد در شمال ایران © Google Earth

این نقطه در لبه منطقه فرونشست قرار گرفته است و احتمال نبود سیگنال فرونشست مربوط به جابه‌جایی قائم در آن زیاد است (مطابق با برداشت‌های GPS در این نقطه). همچنین اختلاف نتایج حاصل از GPS و تداخل‌سنجی راداری را در این ایستگاه می‌توان به بزرگ بودن اندازه پیکسل مکانی ۹۰ متر در تداخل‌نگاشت‌ها نسبت داد که نمی‌توان آن را نماینده تنها یک نقطه از منطقه در نظر گرفت. زیرا هر پیکسل از تداخل‌نگاشت نشان‌دهنده میانگین مقدار جابه‌جایی در مساحتی با ابعاد ۹۰ در ۹۰ متر است. سری‌های زمانی ایستگاه‌های ۲، ۴ و ۱۸ که در حاشیه منطقه وجود دارند، فرونشست کمتری را نشان می‌دهند. سری زمانی تداخل‌سنجی راداری ایستگاه ۱۸، اختلاف به نسبت زیادی با مشاهدات GPS دارد که علت را می‌توان وجود خطاهای باقیمانده اتمسفر، توپوگرافی و اثرات مداری دانست، البته الگوی سری زمانی به دست آمده از دو روش مشابه است.

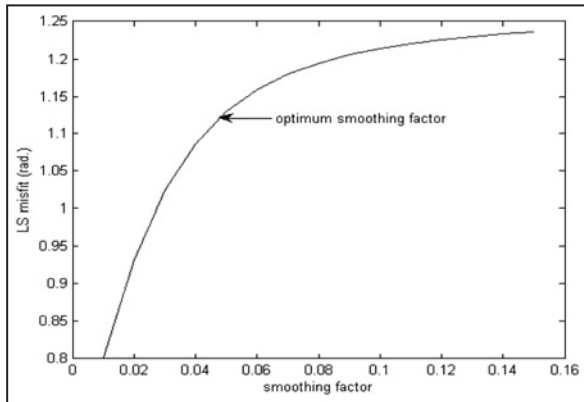
با توجه به سری‌های زمانی ایستگاه‌های GPS، می‌توان نتیجه گرفت که میزان فرونشست منطقه در بازه زمانی اول و دوم شدیدتر بوده و به صورت خطی است، یعنی تقریباً با یکدیگر برابر است. در بازه زمانی سوم فرونشست نسبت به بازه‌های پیشین، کمی کاهش می‌یابد. مشاهدات GPS بازه زمانی چهارمی هم دارند که با توجه به سری زمانی ایستگاه‌ها می‌توان گفت که میزان فرونشست در این بازه نیز نسبت به بازه‌های پیشین، اندکی کاهش یافته است. علت آن را می‌توان به تغذیه آبخوان دشت هشتگرد در این دوره به دلیل بارندگی نسبت داد. ایستگاه ۱۰ در بازه زمانی چهارم، بالاآمدگی شدیدی را نشان می‌دهد که با الگوی فرونشست در دیگر ایستگاه‌ها تفاوت دارد و علت را شاید بتوان به نادرستی مشاهده GPS و وجود خطای دریافت سیگنال در این ایستگاه و در این بازه نسبت داد.

به منظور مقایسه کمی نتایج تداخل‌سنجی راداری و GPS، مقادیر RMSE برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شد. شکل ۱۳، هیستوگرام RMSE را برای ایستگاه‌های GPS نشان می‌دهد.

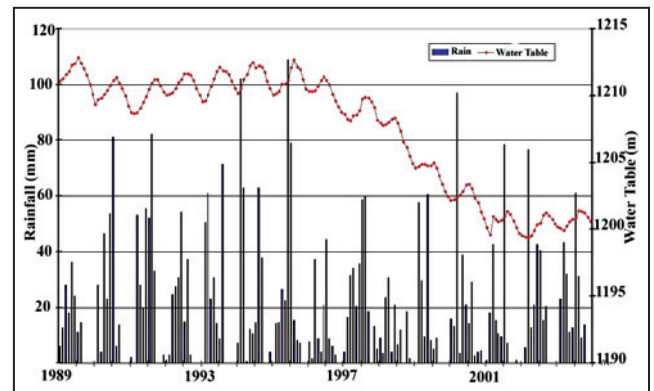
با توجه به این که بیشترین فراوانی مربوط به RMSE با مقدار کمتر از ۰/۰۰۵ متر است، می‌توان نتیجه گرفت که سری زمانی تداخل‌سنجی راداری حتی با توجه به تعداد اندک تصاویر در یک بازه زمانی کوتاه، توانسته است میزان فرونشست را با دقت بسیار مطلوبی نسبت به GPS محاسبه کند. همچنین استفاده از عامل نرم‌کنندگی بهینه در سری زمانی خطای ناشی از اتمسفر، اثرات مداری و بازیابی فاز را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. البته لازم به بیان است که هنوز هم خطاهای اتمسفر و غیره در تداخل‌نگاشت‌ها وجود دارند که برای تعدیل آنها می‌توان از مدل‌های اتمسفری و یا سنجده‌هایی مانند MODIS بهره گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

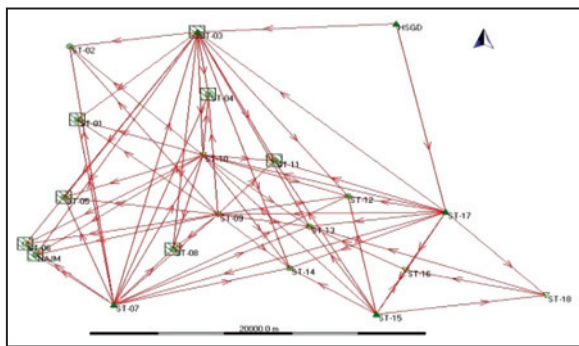
در این مطالعه، قابلیت روش تداخل‌سنجی راداری در تعیین پهنه و گستره منطقه تحت تأثیر فرونشست در دشت هشتگرد به تصویر کشیده شد. دشت هشتگرد به دلیل استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی دچار فرونشست شده است. به منظور تعیین میزان فرونشست از دو روش تداخل‌سنجی راداری و GPS استفاده شد. برای محاسبه سری زمانی فرونشست با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، از ۴ تصویر راداری ENVISAT ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۱۰/۲۴ استفاده شد. به منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطای باقیمانده مداری، نوفه و خطاهای مربوط به عمل بازیابی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی در سری زمانی مورد استفاده قرار گرفته است که این امر با اعمال یک عامل نرم‌کنندگی بهینه تحقق یافت. سپس آهنگ میانگین فرونشست در این بازه زمانی محاسبه شد. بیشترین مقدار میانگین فرونشست در این بازه زمانی ۴۷ میلی‌متر در ماه است. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری، یک شبکه تراکم GPS متشکل از ۱۸ ایستگاه در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۳ تا ۲۰۰۸/۱۲/۰۵ به صورت ماهانه اقدام



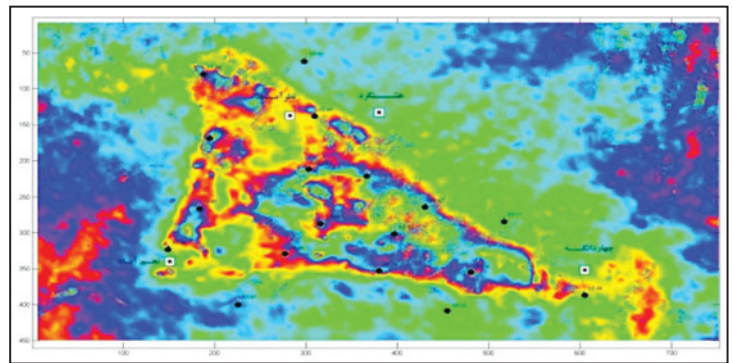
شکل ۳- عامل نرم‌کنندگی بهینه انتخاب شده روی بازوی منحنی. محور افقی عامل نرم‌کنندگی و محور قائم خطای کمترین مربعات را نشان می‌دهد.



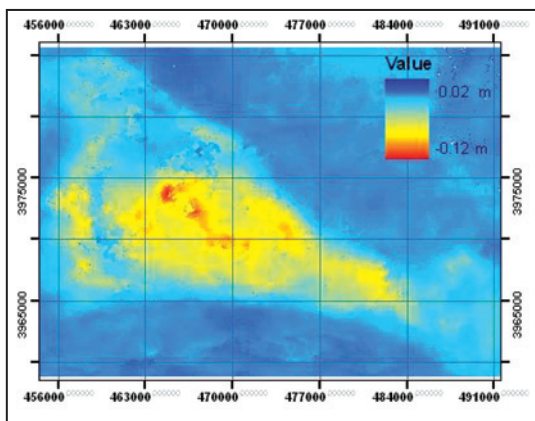
شکل ۲- هیدروگراف واحد دشت هشتگرد



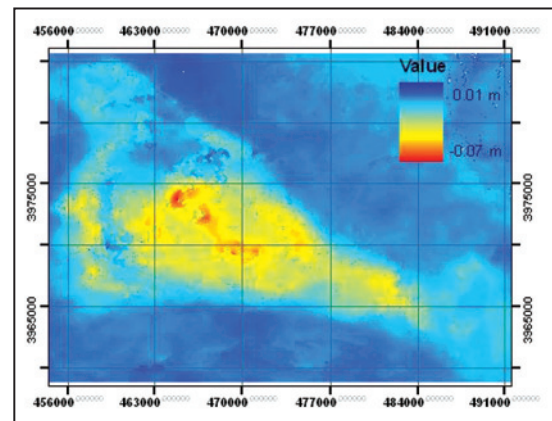
شکل ۵- مدل مورد استفاده در پردازش داده‌های GPS دشت هشتگرد



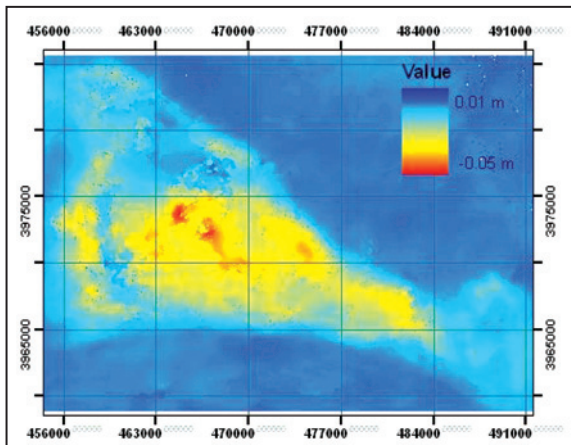
شکل ۴- تداخل‌نگاشت میانگین دشت هشتگرد در بازه زمانی ۲۰۰۳/۰۸/۲۲ تا ۲۰۰۴/۱۲/۲۴ به همراه ایستگاه‌های طراحی شده GPS که با نقاط سیاه دیده می‌شود.



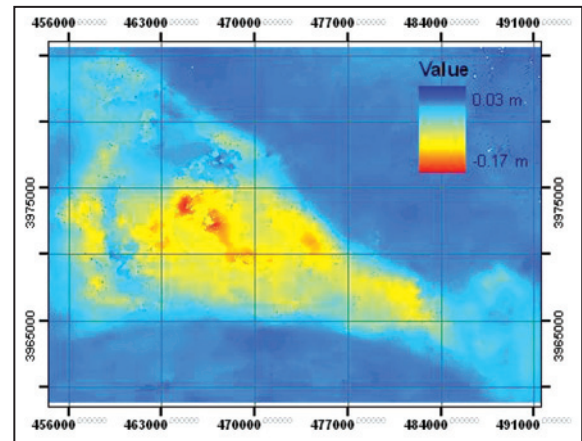
شکل ۷- میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۰۹/۱۹ (برحسب متر)



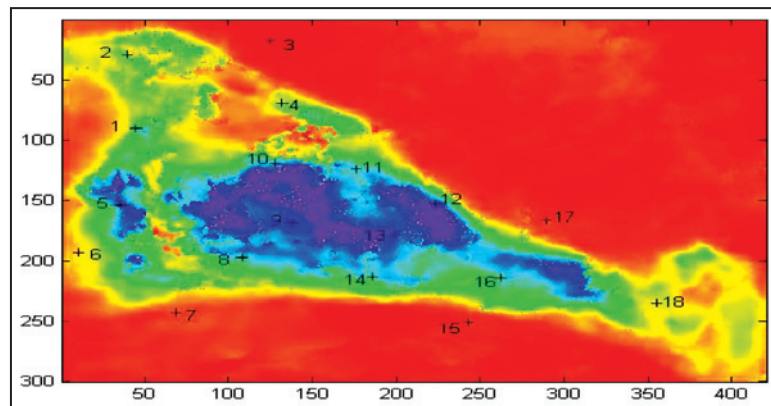
شکل ۶- میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۰۸/۱۵ (برحسب متر)



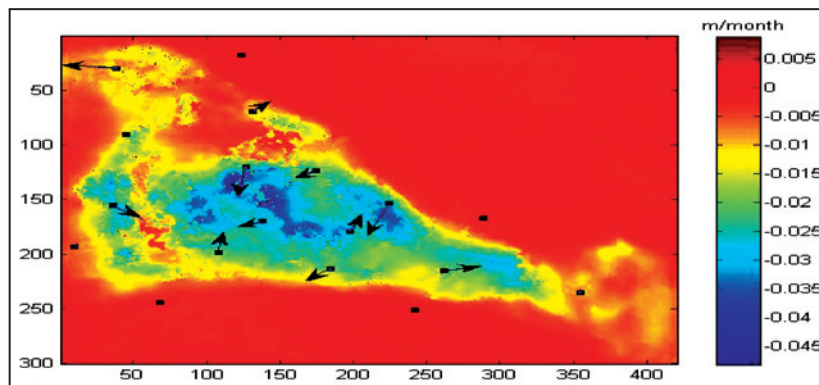
شکل ۹- میانگین فرونشست دشت هشتگرد در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۱۰/۲۴ (برحسب متر بر ماه)



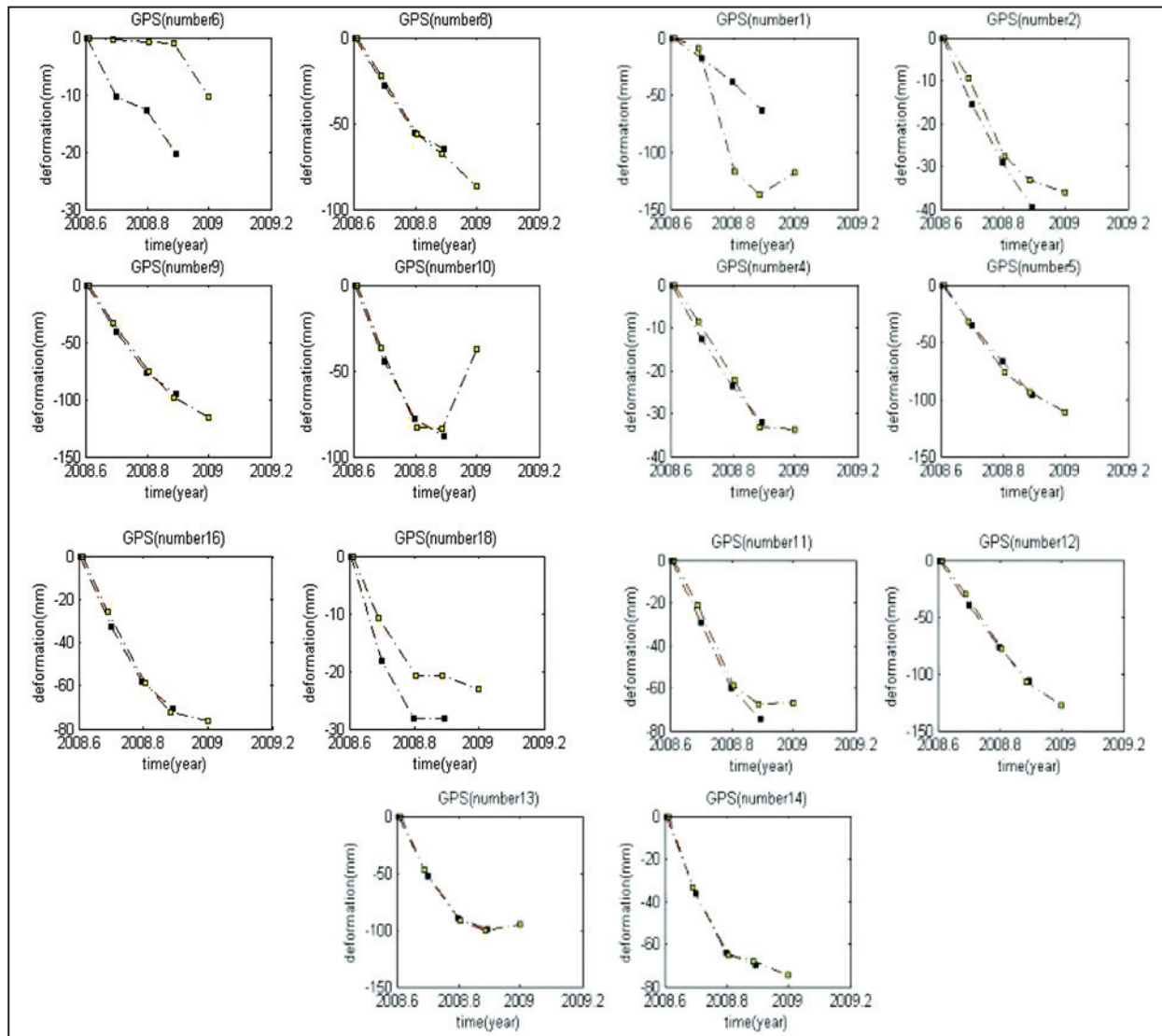
شکل ۸- میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۱۰/۲۴ (برحسب متر)



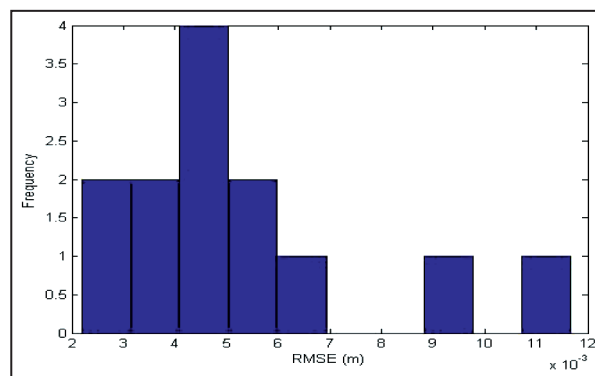
شکل ۱۰- موقعیت ایستگاه‌های GPS بر روی تداخل نگاشت میانگین دشت هشتگرد در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۱۰/۲۴. اعداد، شماره ایستگاه‌ها را بیان می‌کند.



شکل ۱۱- میانگین جابه‌جایی افقی نقاط GPS در بازه زمانی بین برداشت اول تا چهارم بر روی تداخل نگاشت میانگین دشت هشتگرد در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۷/۱۱ تا ۲۰۰۸/۱۰/۲۴. آهنگ جابه‌جایی افقی ایستگاه‌ها بر حسب میلی‌متر بر ماه است که با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نشان داده شده است.



شکل ۱۲- مقایسه بین سری زمانی حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری و GPS. نقاط نشان داده شده با مربع خالی بیانگر نتایج به‌دست آمده از مشاهدات GPS و نقاط نمایش داده شده با مربع پر متناظر با نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری، است. در بالای هر نمودار شماره ایستگاه GPS مربوطه آمده است.



شکل ۱۳- هیستوگرام RMSE میان نتایج سری زمانی ایستگاه‌ها به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری و مشاهدات GPS. محور افقی مقدار خطای RMSE و محور قائم میزان فراوانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تداخل‌نگاشت‌های پردازش شده در دشت هشتگرد

شماره تداخل‌نگاشت	تصویر اصلی	تصویر فرعی	خط مبنای مکانی (متر)	خط مبنای زمانی (روز)
۱	۲۰۰۸/۰۷/۱۱	۲۰۰۸/۰۸/۱۵	۳۲	۳۵
۲	۲۰۰۸/۰۷/۱۱	۲۰۰۸/۰۹/۱۹	۲۷	۷۰
۳	۲۰۰۸/۰۷/۱۱	۲۰۰۸/۱۰/۲۴	۳۹۰	۱۰۵
۴	۲۰۰۸/۰۸/۱۵	۲۰۰۸/۰۹/۱۹	۹۵	۳۵
۵	۲۰۰۸/۰۸/۱۵	۲۰۰۸/۱۰/۲۴	۴۴۹	۷۰
۶	۲۰۰۸/۰۹/۱۹	۲۰۰۸/۱۰/۲۴	۲۹۴	۳۵

جدول ۲- تاریخ و دوره‌های برداشت شبکه GPS دشت هشتگرد

تاریخ برداشت	دوره برداشت
۲۰۰۸/۰۷/۱۳	اول
۲۰۰۸/۰۸/۱۲	دوم
۲۰۰۸/۰۹/۲۴	سوم
۲۰۰۸/۱۰/۲۳	چهارم
۲۰۰۸/۱۲/۰۵	پنجم

References

- Abidin, H. Z., Djaja, R., Darmawan, D., Hadi, S., Akbar, A., Rajiyowiryono, H., Sudibyo, Y., Meilano, L., Kusuma, M. A., Kahar, J. & Subarya, C., 2001- Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system, *Nat. Hazards*, 23: 365-387.
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A. & Lacziak, R. J., 1999- Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer system deformation, *Geology*, 27(6): 483-486.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E., 2002- A New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40: 2375-2383.
- Carbognin, L., Teatini, P. & Tosi, L., 2004- Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium, *J. Mar. Syst.*, 51: 345-353.
- Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kue, C. H. & Chen, K. S., 2004- Land surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan, *Math. Comput. Sim.*, 67: 351-359.
- Crosetto, M., Tscherning, C. C., Crippa, B. & Castillo, M., 2002- Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering, *Geophysical Research Letters*, 29(9): 26.1-26.4.
- Daniel, R. C., Maisons, C., Carnec, S., Mouelic, L., King, C. & Hosford, S., 2003- Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement, *Remote Sensing of Environment*, 88: 468-478.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Bolourchi, M. J., Shemshaki, A. & Saatchi, S., 2008- Monitoring of Hashtgerd land subsidence induced by overexploitation of groundwater using SAR interferometry, *Journal of Geosciences*, 17(1): 23-32.
- Fruneau, B. & Sarti, F., 2000- Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric artefacts using correlation, *Geophysical Research Letters*, 27(24): 3981-3984.
- Fanning, G. J., Parsons, B., Wright, T. J. & Jackson, J. A., 2005- Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat and vanced synthetic aperture radar imagery, *J. geophys. Res.*, 110, B09406, doi: 10.1029/2004JB003338.

- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Philis, S. P., Peltzer, G., Rogez, F. & Rosen, P. A., 1998- Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope valley, Mojave Desert, California, *Water Resour. Res.*, 34: 2573-2585.
- Hanssen, R. F., 2001- *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- Heywood, C. E., 1997- Piezometric-extensometric estimations of specific storage in the Albuquerque Basin, New Mexico, in U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference: Proceedings of the technical meeting, U.S. Geological Survey Open-File Report 97-47, pp. 21-26.
- Hoffman, J., Galloway, D. L., Zebker, H. A. & Amelung, F., 2001- Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry, *Water Resour. Res.*, 37(6): 1551-1566.
- Hoffman, J., Leake, S. A., Galloway, D. L. & Wilson, A. M., 2003- MODFLOW-2000 ground-water model- user guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package, U.S. Geological Survey Open-File Report 03-233.
- Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M. & Casu, F., 2004- Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2004GL021294.
- Longfield, T. E., 1932- The subsidence of London, Ordnance Survey Professional Papers, no. 14, HMSO, London.
- Lundgren, P., Usai, S., Sansosti, E., Lanari, R., Tesauro, M., Fornaro, G. & Berardino, P., 2001- Modeling surface deformation observed with SAR interferometry at Campi Flegrei Caldera, *J. geophys. Res.*, 106, 19 355- 19 367.
- Massonnet, D. & Feigl, K. L., 1998- Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36: 441-500.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzell, H. U., Zschau, J. & Arabi, S., 2006- Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, leveling and GPS, *Geophys. J. Int.*, 168, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x.
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F. & Hudnut, K., 1998- Poro-elastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture, *J. geophys. Res.*, 103, 30 131-30 145.
- Poland, J. F. & Davis, G. H., 1969- Land subsidence due to withdrawal of fluids, *Rev. Eng. Geol.*, 2: 187-269.
- Poland, J. F. & Ireland, R. L., 1998- Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982, U.S. Geological Survey Professional Paper, No.497-f, 61 p.
- Riley, F. S., 1969- Analysis of Borehole Extensometer Data from Central California, International Association of Scientific Hydrology Publication, vol.89, pp. 423-431, International Association of Scientific Hydrology.
- Schmidt, D. A. & Burgman, R., 2003- Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar dataset, *Journal of Geophysical Research*, 108(B9), 2416, doi: 10.1029/2002JB002267.
- Terzaghi, K., 1925- Principles of soil mechanics, IV: settlement and consolidation of clay, *Eng. News Rec.*, 95(3), 874-878.
- Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansoti, E., Fornaro, G. & Franceschetti, G., 2000- Urban subsidence inside the City of Napoli (Italy) observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera, *J. Geophys. Res.*, 27, 1961-1964.
- Tolman, C. F. & Poland, J. F., 1940- Ground-water, salt-water infiltration and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California, *Am. Geophys. Un. Trans.*, 21: 23-34.
- Wegmuller, U., Werner, C. H., Strozzi, T., Wiesmann, A. & Santoro, M., 1995- GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG, Worbstrasse 255, CH-3073 Gumligen, Switzerland, available at <http://www.gamma-rs.ch>