

## ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آبهای زیرزمینی

مریم دهقانی\*

استادیار بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۲/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۰۳/۲۴

### چکیده

استخراج بی رویه از آبهای زیرزمینی منجر به رخداد فرونشست زمین در منطقه ای غیر شهری در زیرحوضه مشهد واقع در شمال شرق ایران شده است. تحلیل سری زمانی به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری (*InsAR*) توانایی خود را در پایش تغییرات زمانی فرونشست نشان داده است. در این مقاله، تحلیل سری زمانی بر مبنای طول خط مبنای مکانی کوتاه (*SBAS*) برای مطالعه جابجایی ناشی از فرونشست دشت مشهد مورد استفاده قرار گرفته است. ۱۸ اینترفروگرام به کمک ۱۲ تصویر *ENVISAT ASAR* در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ مورد پردازش قرار گرفت. به منظور کاهش اثر عدم همبستگی زمانی ناشی از زمینهای کشاورزی، تنها اینترفروگرامهای با طول خط مبنای زمانی کوتاه در تحلیل سری زمانی ایجاد شد. لیکن به منظور کاهش اثر کمیود رتبه ماتریس ضرایب در حل کمترین مربعات، در این منطقه برخلاف روش معمول *SBAS* اینترفروگرامهایی با طول خط مبنای مکانی بلند نیز مورد پردازش قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در منطقه مورد مطالعه اثر عدم همبستگی مکانی قابل توجه نمی باشد. از آنجا که اثر باقیمانده توپوگرافی در اینترفروگرامهای با طول خط مبنای مکانی بلند قابل توجه می باشد. لذا این اینترفروگرامها قبل از ورود به تحلیل سری زمانی نسبت به این اثر تصحیح شدند. همچنین با ورود شرط نرم کنندگی در حل کمترین مربعات اثر اتمسفر در سری زمانی جابجایی کاهش یافت. بیشترین مقدار نرخ فرونشست ۲۳ سانتیمتر در سال برآورد شد. همچنین رابطه تنش - کرنش در سفره آب زیرزمینی با ترکیب اطلاعات سطح آب چاههای پیژومتری و نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

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

\* نویسنده مکاتبه کننده: مریم دهقانی، شیراز، بلوار کریمخان زند، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شماره ۱، بخش راه، ساختمان و محیط زیست، شماره تلفن:

۰۷۱۳۴۱۳۳۱۶۲

## ۱- مقدمه

این افت در زیرحوضه مشهد در حدود ۱۲.۳ متر در ۱۶ سال می‌باشد [۸].

نرخ فرونشست در زیرحوضه مشهد در ابتدا به وسیله مشاهدات ترازیابی دقیق بین سالهای ۱۳۷۴ و ۱۳۸۴ مشخص شد. به منظور پایش رفتار زمانی فرونشست در زیرحوضه مشهد، یک ایستگاه دائم GPS توسط سازمان نقشه برداری کشور در منطقه در سال ۱۳۸۴ برای اندازه گیری های جابجایی سطح زمین راه اندازی شد. لیکن مشاهدات ترازیابی و GPS تنها قادر به اندازه گیری جابجایی در محل ایستگاهها هستند و لذا با استفاده از این روشها نمی‌توان پهنه و گستره منطقه تحت تأثیر فرونشست را مشخص نمود. از میان تمام روشهای زمینی و ماهواره‌ای، تنها روش تداخل سنجی راداری (*InSAR*) قادر به اندازه گیری جابجایی در یک پهنه بزرگ و با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌باشد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]. تحلیل سری زمانی به کمک تعداد قابل توجهی از اینترفروگرامها منجر به پایش رفتار زمانی فرونشست می‌گردد [۱۵ و ۱۶].

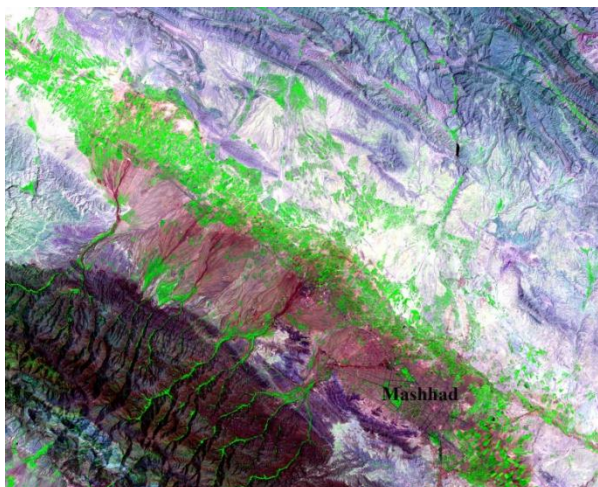
در این مطالعه تحلیل سری زمانی به کمک ۱۲ تصویر *ENVISAT ASAR* در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ برای مطالعه رفتار زمانی فرونشست در دشت مشهد مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل ساده سری زمانی بدون در نظر گرفتن منابع خطا قبلا در این منطقه در تحقیقات قبل به کار گرفته شده است [۱۷]. لیکن برخی از اینترفروگرامها به دلیل طول بلند خط مبنای مکانی تحت تأثیر اثر توپوگرافی قرار دارند. همچنین منابع دیگر خطا نظیر اثرات اتمسفری منجر به کاهش دقت نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی می‌گردد.

هدف اصلی این مقاله اندازه گیری مقدار جابجایی ناشی از فرونشست با رویکرد کاهش انواع خطاها می‌باشد. همچنین مکانیزم فرونشست در مقابل کاهش سطح آب زیرزمینی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رابطه تنش -

تغییر اقلیم منجر به افزایش دما و بعضا کاهش متوسط بارندگی در سطح جهانی شده که خشکسالی را به همراه داشته است. کاهش بارندگی و پدیده خشکسالی منجر به افزایش استفاده از منابع آبهای زیرزمینی شده است. بیشترین مقدار آب های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا برای آب می‌گردد. برداشت بی‌رویه از آبهای زیرزمینی منجر به افزایش فشار مؤثر بین ذره‌ای در رسوبات درون سفره آب زیرزمینی می‌شود [۱]. سفره آب زیرزمینی معمولا از تعدادی میان لایه‌های ریزدانه که قابلیت تراکم بالایی دارند، تشکیل شده است. پایه نظری تراکم میان لایه‌ها براساس اصل ترزاقی در مورد فشار مؤثر می‌باشد. این اصل بیان می‌دارد هنگامی که آب از سفره خارج شود، این میان لایه‌ها که اغلب از رس و سیلت تشکیل شده‌اند متراکم می‌گردند [۲]. بنابراین سفره به دلیل تغییر در میزان فشار دچار تغییر شکل یا جابجایی می‌شود.

فرونشست ناشی از استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی به همراه پیامدهای زیست محیطی آن در اکثر دشتهای دنیا به چشم می‌خورد [۳، ۴ و ۷]. این پیامدها عمدتا شامل آسیب‌های جبران ناپذیر به ساختارهای مهندسی مانند ساختمانها، راهها، خطوط انتقال نیرو و چاهها و نیز ایجاد شکافهای عمیق و کاهش نفوذ پذیری خاک منطقه می‌گردد.

یکی از مناطق موجود در ایران که تحت تأثیر فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی قرار دارد، دشت مشهد است. شهر مشهد در شمال شرق ایران قرار دارد که از نقطه نظر جمعیت دومین شهر بزرگ ایران محسوب می‌شود. بخش اعظم منطقه مورد نظر پوشیده از زمینهای کشاورزی است. بنابراین، استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی از چاهها منجر به افت سطح آب شده است. مقدار متوسط



شکل ۱- تصویر ماهواره Landsat ETM+ مناطق سبز رنگ پوشش گیاهی را نشان می دهد.

### ۳- داده‌های موجود

کلید داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به ۳ بخش عمده داده‌های راداری، داده‌های ارزیابی و داده‌های چاههای پیژومتری تقسیم می‌شوند که در زیر در مورد هر یک توضیح داده شده است.

- داده‌های راداری : در منطقه مورد مطالعه ۱۲ تصویر *ENVISAT ASAR* سطح صفر که از مسیر شماره ۳۹۲ اخذ شده‌اند وجود داشت که تاریخ اخذ این تصاویر در جدول (۱) نشان داده شده است. داده‌ها در باند C با طول موج ۵.۶ سانتیمتر و در مُد تصویربرداری نزولی<sup>۱</sup> با زاویه دید ۲۳ درجه اخذ شده‌اند.

شکل (۲) در منطقه بزرگنمایی شده بخشی از شهر مشهد را نشان می‌دهد. همانطور که در بخش بعد بیان خواهد شد، ۱۸ اینترفروگرام به کمک این تصاویر مورد پردازش قرار گرفت که سعی شده است تا طول خط مبنای زمانی آنها کوتاه و طول خط مبنای مکانی آنها به منظور گسسته نشدن شبکه اینترفروگرامها (شکل ۴) بلند انتخاب شود.

کرنش با استفاده از اندازه گیریهای تداخل سنجی و اطلاعات سطح آب زیرزمینی در محل چاههای پیژومتری به منظور بررسی مکانیزم نشست در اثر افت سطح آب زیرزمینی استخراج شد. تلفیق کمی نتایج حاصل از تداخل سنجی و مشاهدات سطح آب زیرزمینی اطلاعاتی را در خصوص ضریب ذخیره سفره در اختیار قرار می‌دهد.

ساختار مقاله حاضر به این صورت می‌باشد: بخش ۲ منطقه مورد مطالعه را معرفی می‌کند. در بخش ۳ داده‌های مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مقاله معرفی می‌گردند. فرآیند تحلیل سری زمانی به طور کامل در بخش ۴ بیان می‌شود. نتایج در بخش ۵ ارائه می‌شود. مقایسه جابجاییهای استخراج شده از تکنیک تداخل سنجی راداری و اطلاعات سطح آب زیرزمینی در این بخش ارائه می‌گردد. در نهایت بخش ۶ نتایج کلی را بیان می‌کند.

### ۲- منطقه مورد مطالعه

مشهد در شمال شرق ایران بین رشته کوههای بینالود و هزارمسجد با روند شمال غرب-جنوب شرق قرار دارد. زیرحوضه مشهد بخشی از حوضه آبریز قره قوم با مساحتی در حدود ۴۴۱۶۵ مترمربع می باشد. بخش اعظمی از دشت مشهد پوشیده از زمینهای کشاورزی است (شکل (۱)). متوسط درجه دما در زیرحوضه مشهد در حدود ۱۲.۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به داده های بارندگی در بازه زمانی ۳۰ سال، متوسط بارندگی در مناطق کوهستانی ۳۱۵ و در دشت ۲۵۸ میلیمتر است. مقدار عمده بارش در منطقه در فصول بهار و زمستان اتفاق می افتد. لیکن سفره آب زیرزمینی در فصول بارندگی به قدر کافی تغذیه نمی‌شود که این امر منجر به کاهش سطح آب زیرزمینی به طور پیوسته می گردد. بنابراین فرونشست به دلیل افت سطح آب زیرزمینی رخ می‌دهد.

1 Descending

جدول ۱- لیست تصاویر ENVISAT ASAR

مورد استفاده

تاریخ اخذ	تاریخ اخذ	تاریخ اخذ
۲۰۰۳/۰۶/۳۰	۲۰۰۴/۰۷/۱۹	۲۰۰۵/۰۸/۰۸
۲۰۰۳/۰۹/۰۸	۲۰۰۴/۱۱/۰۱	۲۰۰۵/۰۹/۱۲
۲۰۰۳/۱۲/۲۲	۲۰۰۴/۱۲/۰۶	۲۰۰۵/۱۰/۱۷
۲۰۰۴/۰۶/۱۴	۲۰۰۵/۰۵/۳۰	۲۰۰۵/۱۱/۲۱

• داده‌های ارزیابی: این داده‌ها برای ارزیابی

نتایج حاصل از روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند. این داده‌ها همان داده‌های ترازیبی مربوط به ۲۴ ایستگاه می‌باشند که در سالهای ۱۳۷۴ و ۱۳۸۴ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور جمع‌آوری شده است. مسیر ترازیبی داده‌ها در شکل (۶) با خط سیاه ممتد نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویر دامنه چند منظره مربوط به تاریخ ۲۰۰۵/۰۵/۳۰. تصویر بزرگنمایی شده مربوط به بخشی از شهر مشهد می‌باشد.

متوسط نشست در بازه ۱۰ سال می‌باشد. بیشترین نرخ فرونشست برآورد شده به کمک

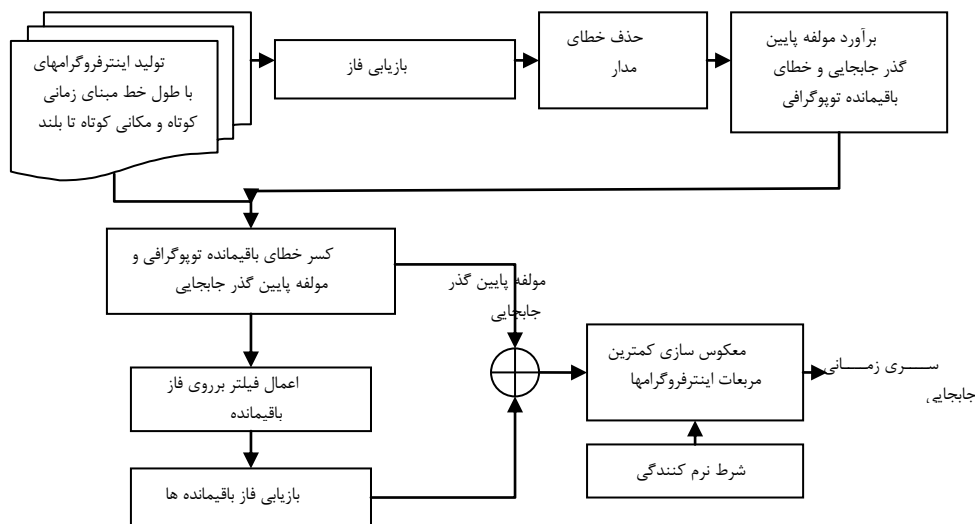
مقدار فرونشست زمین به کمک مشاهدات این بازه اندازه‌گیری شده است که در واقع همان نرخ

خارج از منطقه فرونشست (مانند چاههای شماره ۱۱، ۱۵ و ۷) قرار گرفته اند. اطلاعات سطح آب زیرزمینی چاهها با نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری در آن نقاط مقایسه شدند و ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و افت سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های مذکور در قسمتهای مختلف تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

#### ۴- تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری برای ایجاد سری زمانی جابجایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معکوس سازی کمترین مربعات برای محاسبه سری زمانی جابجایی به شرط اینکه تعداد اینترفروگرامها کافی و زنجیره اینترفروگرامها گسسته نباشد به کار می‌رود. در تحلیل سری زمانی، مقادیر جابجایی برای هر تاریخ اخذ تصویر با در نظر گرفتن تاریخ اول به صورت معلوم برآورد می‌شوند. فاز تداخل سنجی راداری که از اختلاف فاز دو تصویر پایه و پیرو حاصل می‌شود برابر است با:

$$\psi_{x,i} = W\{\phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi_{topo,x,i} + \phi_{N,x,i}\} \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۳- نمودار روش تحلیل سری زمانی جابجایی

داده‌های ترازیبی در حدود ۱۷ سانتیمتر می‌باشد. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که مسیر ترازیبی از حاشیه منطقه نشست عبور می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود نرخ فرونشست در کل منطقه از این مقدار بیشتر باشد. این مطلب در نتایج به وضوح مشخص خواهد شد.

• داده‌های چاههای پیژومتری: در منطقه مورد مطالعه در حدود ۳۰ چاه پیژومتری وجود دارد که سطح آب سفره زیر زمینی در آنها در بازه زمانی ۱۰ سال (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵) اندازه گیری شده است. محل چاههای پیژومتری در شکل (۶) به صورت نقاط آبی رنگ مشخص شده است. در بیشتر چاهها سطح آب زیرزمینی با گذشت زمان افت نموده است. نمودار مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در برخی از چاهها در شکل (۸) نشان داده شده است. چاهها به طور نسبتاً منظم در سطح منطقه پخش شده اند. با توجه به شکل (۶)، برخی در داخل منطقه فرونشست (مانند چاههای شماره ۶، ۱۳ و ۲۸)، برخی بر روی حاشیه (مانند چاههای شماره ۲۹، ۳۱، ۴ و ۲) و برخی در

می‌باشد:  
رابطه (۲)

$$\phi(t_i) = \bar{v} \cdot (t_i - t_0) + \frac{1}{2} \bar{a} \cdot (t_i - t_0)^2 + \frac{1}{6} \Delta \bar{a} \cdot (t_i - t_0)^3$$

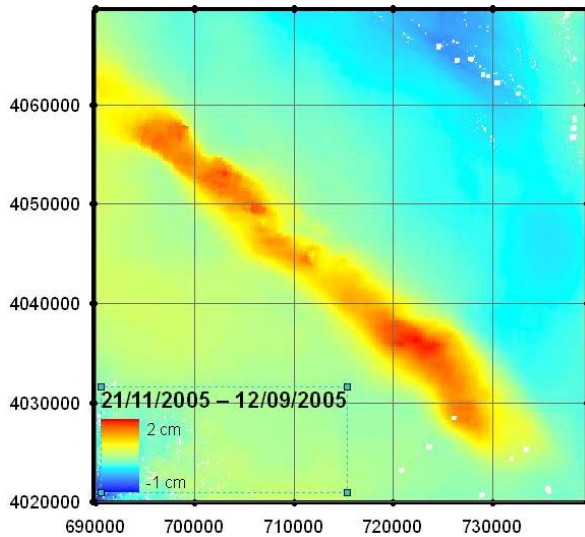
مؤلفه پایین گذر جابجایی می‌باشد. منظور از مؤلفه پایین گذر، مؤلفه ای از جابجایی است که در زمان دارای تغییرات آهسته است و به راحتی آن را بتوان مدل نمود، مثل مؤلفه خطی، درجه ۲ یا ۳. پارامترهای مؤلفه جابجایی شامل سرعت، شتاب و تغییرات شتاب به همراه خطای توپوگرافی ناشی از عدم دقت مدل ارتفاعی برآورد می‌گردد. مؤلفه پایین گذر برآورد شده به همراه اثر توپوگرافی به صورت فاز بازیابی نشده از هر اینترفروگرام کسر می‌گردد. این عمل منجر به کاهش نرخ فرینج در اینترفروگرامها می‌شود. در نتیجه به راحتی می‌توان با بکار گرفتن یک فیلتر تطبیقی نیز هر اینترفروگرام را بدون نگرانی از تخریب فرینجها کاهش داد. کاهش نویز منجر به افزایش دقت بازیابی فاز می‌گردد. فاز بازیابی شده نهایی اصلاح شده با برگرداندن مؤلفه پایین گذر به اینترفروگرامها حاصل می‌شود. در این مرحله اینترفروگرامها از طریق حل کمترین مربعات به مقادیر جابجایی در هر تاریخ تبدیل می‌شوند. به‌منظور کاهش اثرات اتمسفر و خطای بازیابی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی به مسأله معکوس سازی حل کمترین مربعات اضافه می‌شود. این شرط نرم‌کنندگی برمبنای تقریب تفاضل محدود<sup>۱</sup> برای مشتق درجه دوم سری زمانی با استفاده از مفهوم خم کمینه یعنی سرعت ثابت می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. پس از حل کمترین مربعات، مقدار جابجایی در هر تاریخ بدست می‌آید.

که در آن  $\phi_{D,x,i}$  مؤلفه فاز مربوط به جابجایی سطح،  $\phi_{A,x,i}$  مؤلفه مربوط به اثر اتمسفر،  $\Delta \phi_{S,x,i}$  فاز مربوط به اثر خطاهای مداری،  $\Delta \phi_{topo,x,i}$  فاز مربوط به اثر توپوگرافی باقیمانده ناشی از عدم دقت مدل ارتفاعی (DEM) استفاده شده و  $\phi_{N,x,i}$  فاز نویز ناشی از عدم همبستگی می‌باشد. از میان مؤلفه‌های بالا اثر مربوط به توپوگرافی و اثر اتمسفر منجر به کاهش دقت نتایج حاصل از سری زمانی می‌شود. در این مقاله سعی در کاهش این دو اثر در بهبود نتایج تحلیل سری زمانی داریم. شایان ذکر است، مؤلفه‌های ناشی از خطای مدار و عدم همبستگی نیز در الگوریتم پیشنهادی کاهش می‌یابند. مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

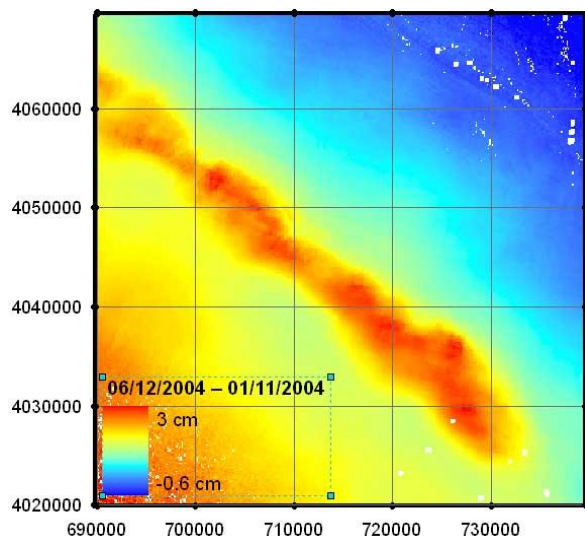
اصول این الگوریتم توسط براردینو و همکاران قبلا ارائه شده است [۱۵]. لیکن نوآوری این مقاله در این موضوع است که در اینجا سعی در پردازش اینترفروگرامهای با طول خط مبنای زمانی کوتاه شده است. همچنین برای جلوگیری از کمبود رتبه در ماتریس ضرایب حل کمترین مربعات اینترفروگرامهای با طول مبنای مکانی بلند نیز پردازش شده است. با افزایش طول خط مبنای مکانی خطای باقیمانده توپوگرافی نیز در اینترفروگرام افزایش می‌یابد. در نتیجه اینترفروگرامها باید قبل از ورود به تحلیل سری زمانی اصلاح شوند. پس از مرحله بازیابی فاز، خطای مداری با برآزش یک صفحه در خارج از منطقه جابجایی و کم نمودن آن صفحه از اینترفروگرامها حذف گردید. در مرحله بعد روشی برای کاهش اثر توپوگرافی باقیمانده مورد استفاده قرار گرفت. همانگونه که در معادله (۱) بیان شده است، در این روش فرض می‌شود که فاز تابعی از سرعت جابجایی، شتاب جابجایی،  $\bar{a}$  و تغییرات شتاب،  $\Delta \bar{a}$ ،

1 Finite difference approximation

که در گوشه‌های تصویر شکل (۵) (الف) مشاهده می‌شود مربوط به خطای مداری است که در حین انجام تحلیل سری زمانی حذف می‌گردد.



الف

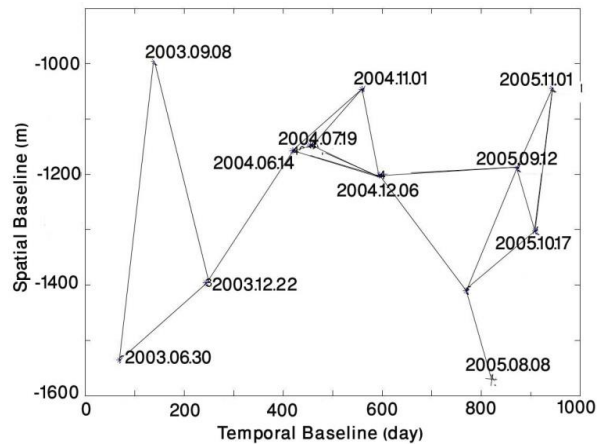


ب

شکل ۵- اینترفروگرامهای پردازش شده: (الف) ۲۰۰۴/۱۲/۰۶ - ۲۰۰۴/۱۱/۰۱ و (ب) ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ - ۲۰۰۵/۰۹/۱۲

### ۵- نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی InSAR

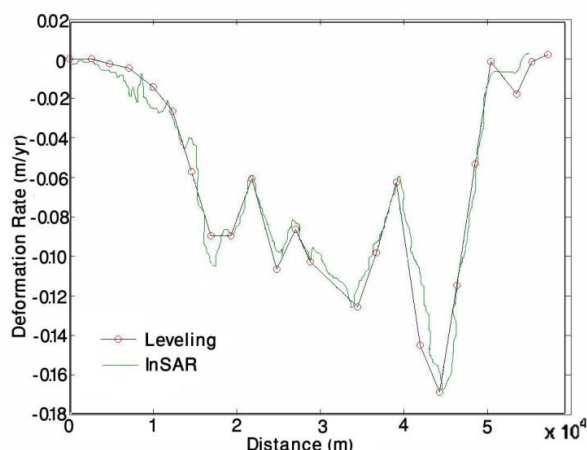
در تکنیک تداخل سنجی متداول می‌بایست اینترفروگرامهای همبسته را پردازش کنیم. اینترفروگرامهای با طول خط مبنای کوتاه همبسته می‌باشند و به راحتی فاز آنها قابل بازیابی می‌باشد. در این مطالعه، ۱۸ اینترفروگرام به کمک تصاویر در ایندکس *ENVISAT ASAR* که مشخصات آنها در بخش قبل بیان گردید، با استفاده از نرم افزار گاما مورد پردازش قرار گرفته اند. هندسه اخذ این تصاویر و اینترفروگرامهای پردازش شده به صورت خطوط ممتد در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اینترفروگرامها بیشتر دارای طول خط مبنای زمانی کوتاه هستند. به منظور حذف اثر توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی *SRTM* با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شد.



شکل ۴- هندسه اخذ تصاویر راداری در منطقه مورد مطالعه: محور X خط مبنای زمانی و محور Y خط مبنای مکانی را نشان می‌دهد.

دو اینترفروگرام پردازش شده مربوط به تاریخهای ۲۰۰۴/۱۲/۰۶ - ۲۰۰۴/۱۱/۰۱ و ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ - ۲۰۰۵/۰۹/۱۲ در شکل (۵) نشان داده شده است. سیگنال مربوط به جابجایی به وضوح در مرکز شکل به رنگ قرمز مشاهده می‌شود. سیگنالهای آبی و قرمزی

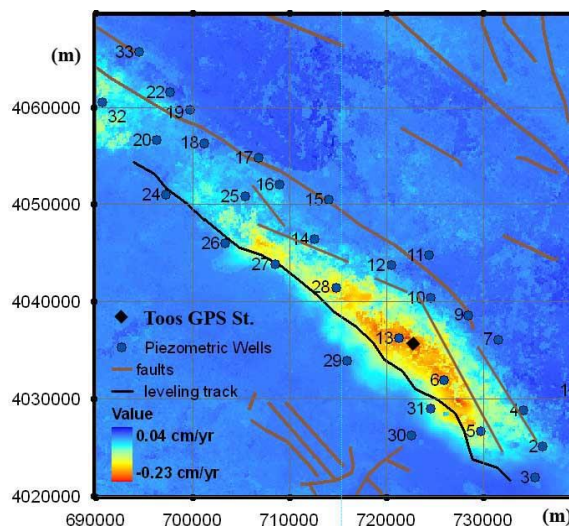
جمع‌آوری شده است. مسیر ترازیبی در شکل (۶) به صورت خط سیاه مشخص شده است که از حاشیه سیگنال فرونشست عبور می‌کند. به طور کلی ۲۴ ایستگاه ترازیبی دقیق در منطقه وجود دارد. نرخ جابجایی بدست آمده از تداخل سنجی راداری در محل ایستگاهها با نرخ حاصل از ترازیبی مورد مقایسه قرار گرفت و خطای  $RMSE$  بین نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری و ترازیبی به مقدار ۰.۹ سانتیمتر در سال برآورد شد که نشان دهنده دقت بالای روش پیشنهادی می‌بود. گرچه بازه زمانی داده‌های راداری و مشاهدات ترازیبی با هم متفاوت بود، لیکن نتایج هر دو روش تطابق خوبی با هم داشتند. شکل (۷) انطباق نتایج حاصل از هر دو روش را نشان می‌دهد.



شکل ۷ - مقایسه نرخ جابجایی حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری و ترازیبی

به منظور مطالعه علت رخداد فرونشست اطلاعات حاصل از تحلیل سری زمانی را با اطلاعات سطح آب زیرزمینی مقایسه کردیم. در حدود ۳۰ چاه پیزومتری در منطقه فرونشست وجود دارد که اطلاعات سطح آب زیرزمینی در آنها از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ اندازه‌گیری شده‌اند. در بیشتر چاهها افت سطح آب زیرزمینی به وضوح مشاهده می‌گردد. نوسانات سطح آب در برخی از چاههایی که در منطقه نشست و اطراف آن قرار دارند، در شکل (۸) نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) مشخص می‌شود که در چاههای شماره ۱۵،

سپس روش پیشنهادی بر روی اینترفروگرامهای پردازش شده اعمال گردید. برای مشخص کردن عوارض شاخص فرونشست در سطح زمین و بررسی رفتار بلند مدت فرونشست، نقشه نرخ متوسط فرونشست به کمک نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی استخراج شد (شکل (۶)). بیشینه مقدار نرخ فرونشست ۲۳ سانتیمتر در سال برآورد شد. روند مکانی فرونشست در جهت شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد که شبیه روند ارتفاعات در منطقه است. بنابراین الگوی مکانی فرونشست احتمالاً با ساختارهای خطی منطقه مانند گسلها کنترل می‌گردد (شکل (۶) را ببینید).



شکل ۶ - نقشه نرخ متوسط فرونشست. چاههای پیزومتری با دایر آبی رنگ نشان داده شده است. خطوط در تصویر، گسلها و خطواره ها می‌باشند.

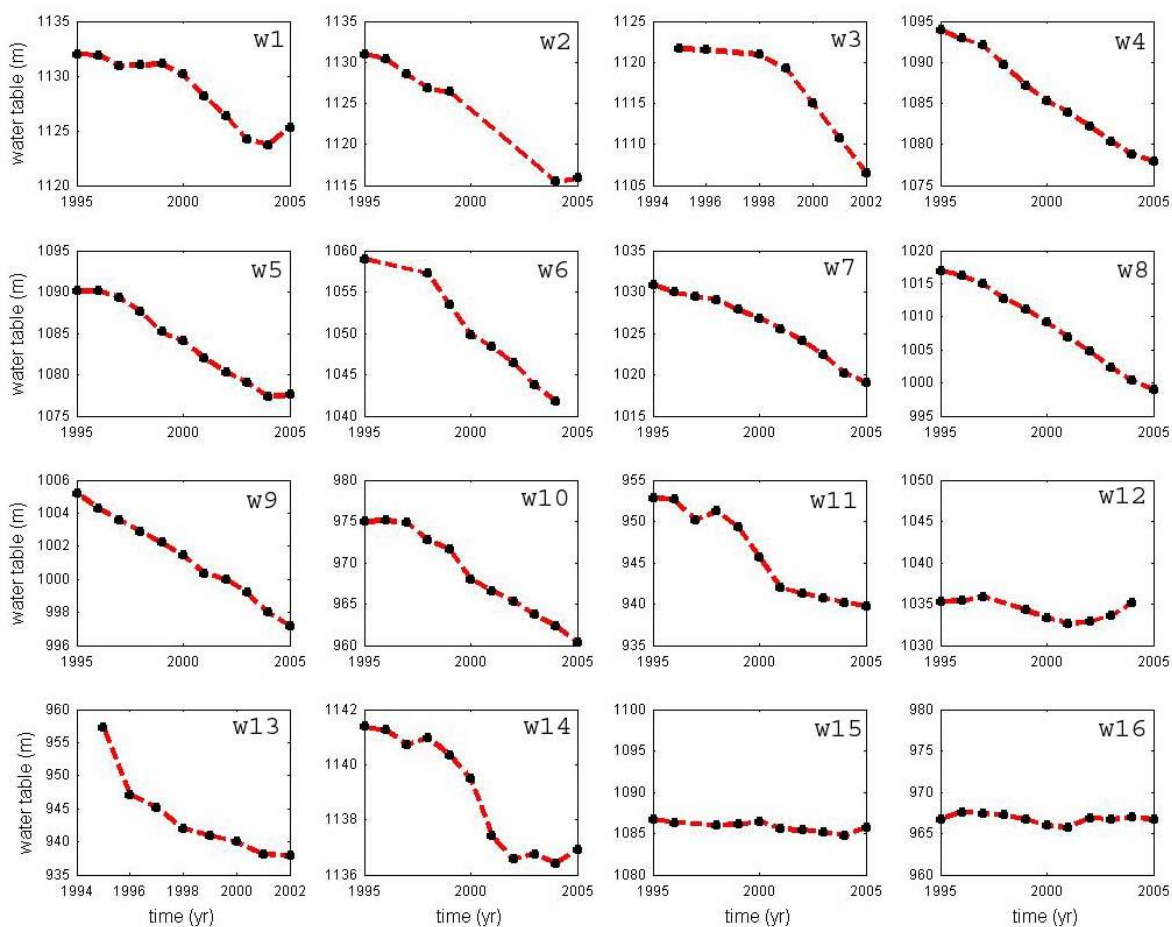
گسلها و خطواره ها در شکل (۶) توسط نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و همچنین تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده است. این گسلها و خطواره‌ها مانند یک سد در سفره آب زیرزمینی عمل می‌کنند که جریان آبهای زیرزمینی را کنترل می‌کنند. برای ارزیابی نتایج، نرخ متوسط حاصل از تحلیل سری زمانی جابجایی را با نرخ متوسط حاصل از مشاهدات ترازیبی مقایسه نمودیم. مشاهدات ترازیبی در سالهای ۱۳۷۴ الی ۱۳۸۴ توسط سازمان نقشه‌برداری



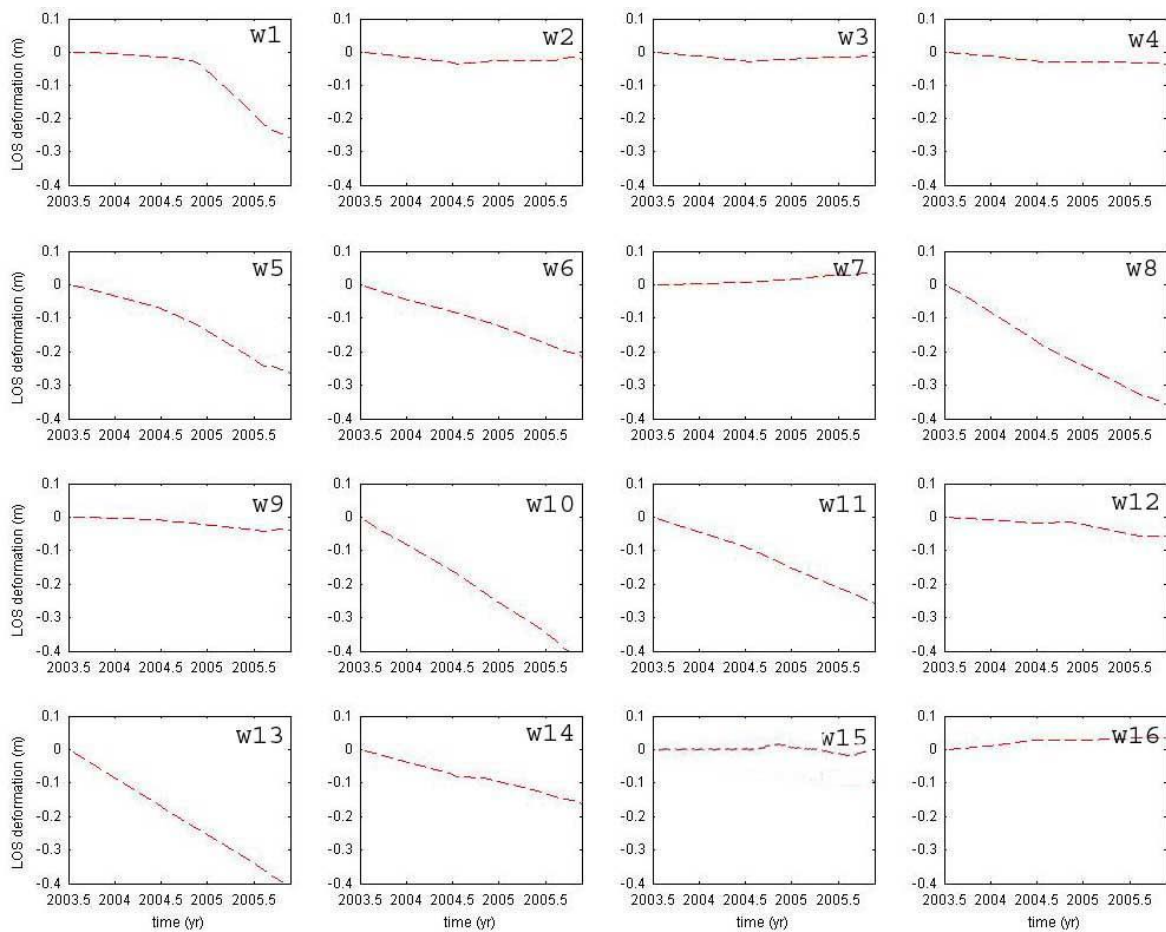
دلیل خروج آب از بین آنها، به میزان قابل توجهی متراکم نمی‌شوند.

به منظور مقایسه نوسانات سطح آب زیرزمینی و سطح زمین، سری زمانی جابجایی سطح زمین در همان چاههای پیژومتری در شکل (۹) نشان داده شده است.

۱۶ و ۱۲ که در خارج از منطقه فرونشست قرار دارند، افت سطح آب نیز ناچیز است. از طرفی دیگر، در برخی از چاهها مانند چاه شماره ۱، ۱۱ و ۷ علی‌رغم افت شدید سطح آب، فرونشست مشاهده نمی‌گردد. این مسأله می‌تواند به دلیل جنس آبخوان در آن مناطق باشد. به طور کلی رسوبات درشت دانه درجه تراکم پذیری پایینی دارند و لذا با افزایش تنش بین ذره‌ای به



شکل ۸. نوسانات سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵.



شکل ۹. سری زمانی جابجایی سطح زمین استخراج شده از تحلیل سری زمانی در چاههای پیژومتری که افت سطح آب در آنها در شکل (۸) نشان داده شده است.

تداخل سنجی راداری که نشان دهنده میزان تراکم سفره می باشد بر روی محور  $x$  رسم می گردد. یک برآورد تقریبی از میزان ضریب ذخیره کلی سفره برابر با معکوس شیب بهترین خط برازش داده شده بر این نمودار می گردد [۳].

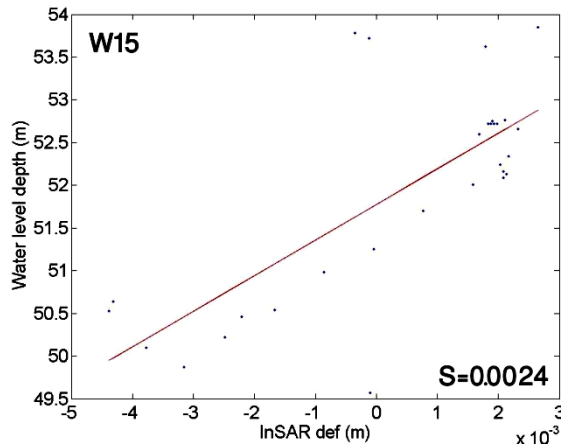
به طور کلی میزان ضریب ذخیره سفره که شامل پاسخ سفره و میان لایه های ریزدانه به تغییرات سطح هیدرولیکی آب است به کمک آزمایش پمپاژ تعیین می گردد. لیکن ضریب ذخیره تعیین شده در این آزمایش تنها نماینده نفوذ پذیرترین بخش سفره آب زیرزمینی است. ضریب ذخیره برآورد شده به کمک اطلاعات تداخل سنجی راداری و

به منظور مطالعه تغییرات تنش - کرنش<sup>۱</sup> در زیر حوضه مشهد، اطلاعات سطح آب زیرزمینی در چاههای پیژومتری مورد تحلیل قرار گرفت. مکانیزم تراکم و رابطه تنش - کرنش در سفره آب زیرزمینی از اطلاعات تداخل سنجی راداری و مشاهدات همزمان سطح آب زیرزمینی استخراج شدند. یکی از روشهای بررسی ارتباط بین نوسان سطح آب زیرزمینی و جابجایی سطح زمین این است که هر دو پارامتر در یک نمودار نشان داده شوند. تغییرات سطح آب زیرزمینی بر روی محور  $y$  و میزان جابجایی حاصله از تکنیک

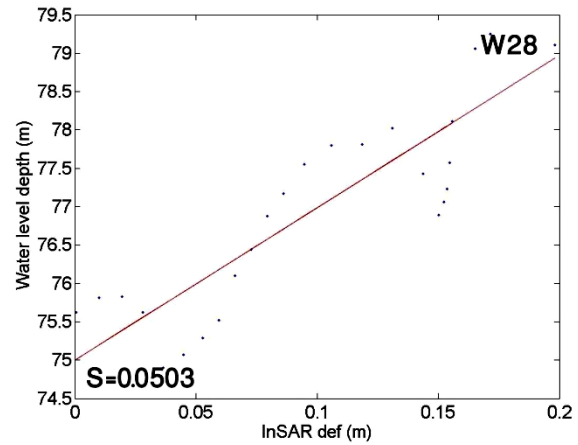
1 Stress-strain

می تواند منجر به پیش بینی مقدار فرونشست به ازای افت مشخصی از سطح آب گردد.

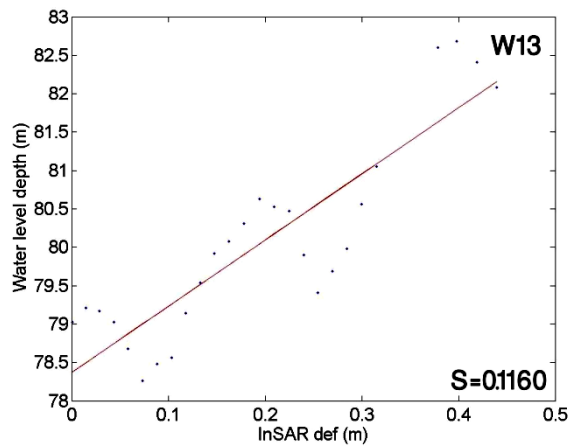
اندازه گیریهای سطح آب زیرزمینی برآوردی را در محل چاههای پیزومتری نشان می دهد که با مکان متغیر است. همچنین مقدار شیب خط برازش شده



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰- ضرایب ذخیره محاسبه شده از تحلیل سری زمانی جابجایی و اطلاعات سطح آب زیرزمینی چاههای W15 (خارج از منطقه فرونشست)، W28 (در حاشیه منطقه فرونشست) و W13 (در داخل منطقه فرونشست). S در تصویر نشان دهنده ضریب ذخیره کلی سفره در آن نقطه می باشد

نشان داده شده است. خط برازش داده شده می تواند در پیش بینی مقدار فرونشست در کوتاه مدت به ازای افت مشخصی از سطح آب زیرزمینی کمک کند. در شکل (۱۰) (الف) و (ج) مشاهده می گردد که نمودار تنش- کرنش دارای یک رفتار نوسانی سینوسی می باشد که به دلیل تخلیه و تغذیه آبخوان در فصول تابستان و زمستان ایجاد شده است. بنابراین اگر بتوان

تغییرات سطح آب که با جابجایی سطح زمین در یک نمودار ترسیم شده برای ۳ چاه پیزومتری واقع در وسط، حاشیه و خارج منطقه فرونشست، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. خط قرمز رنگ در نمودارها نشان دهنده بهترین خط برازش داده شده می باشد که معکوس شیب آن برابر با ضریب ذخیره کلی سفره است. این عدد در کنار هر نمودار با حرف S

به این سریهای نوسانی تابع برآزش داد، می توان با دقت بالاتری پیش بینی نشست سطح زمین را انجام داد. اشاره به این نکته ضروریست که در بسیاری از اوقات به دلیل قابلیت هدایت هیدرولیکی یک تأخیر زمانی بین افت سطح آب و نشست سطح زمین وجود دارد. بنابراین مقادیر برآورد شده ضریب ذخیره دقیقاً تراکم پذیری سفره را به دلیل این تأخیر زمانی نشان نمی دهد. به منظور برآورد دقیق تر ضریب ذخیره سفره، اطلاعات دیگری از جمله ضخامت میان لایه ها و توزیع آنها درون سفره مورد نیاز است [۲].

## ۶- نتیجه گیری

کامبود بارش به دلیل تغییر اقلیم منجر به افزایش برداشت از سفره های آب زیرزمینی و رخداد پدیده فرونشست می گردد. فرونشست در اثر خشکسالی از جمله پرهزینه ترین بلایایی طبیعی است. اولین اقدام برای پایش فرونشست بررسی رفتار سطح زمین و اندازه گیری نرخ جابجایی باشد. در این مقاله رفتار زمانی فرونشست در زیرحوضه مشهد با استفاده از تحلیل سری زمانی چند مرحله ای بر مبنای مشاهدات تداخل سنجی راداری مورد مطالعه قرار گرفت. اینترفروگرامهای پردازش شده تنها دارای خط مبنای زمانی کوتاه به منظور کاهش عدم همبستگی زمانی می باشند و خط مبنای مکانی آنها بلندتر از حد معمول است، زیرا هدف پردازش تعداد زیادی اینترفروگرام بوده به نحوی که زنجیره اینترفروگرامها گسسته نباشد. لیکن اینترفروگرامهای با طول خط مبنای مکانی بلند تحت تأثیر خطای توپوگرافی قرار دارند. لذا قبل از آنکه اینترفروگرامها وارد تحلیل

## مراجع

سری زمانی شوند، می بایست پالایش شوند. همچنین به منظور کاهش اثر اتمسفری در حین انجام تحلیل سری زمانی، یک شرط نرم کنندگی به حل کمترین مربعات اضافه می گردد.

بیشینه مقدار نرخ متوسط فرونشست در منطقه ۲۳ سانتیمتر در سال برآورد شد. سری زمانی جابجایی که از تداخل سنجی راداری بدست آمده است با سری زمانی سطح آب زیرزمینی به طور کمی با هم مقایسه شدند. در بسیاری از جاهای پیژومتری افت سطح آب با نشست سطح زمین همبستگی بالایی نشان دادند. از طرفی در برخی از جاهای علی رغم افت سطح آب زیرزمینی سیگنال فرونشست وجود نداشت. دلیل این مسأله را بیشتر می توان در جنس خاک منطقه جستجو کرد. این مسأله با مطالعه لوگ چاههای پیژومتری مشخص می گردد.

رابطه تنش - کرنش بدست آمد. تلفیق کمی این داده ها، اطلاعاتی راجع به تراکم پذیری سفره آب زیرزمینی ارائه می دهد. این اطلاعات را می توان برای مدلسازی سفره آب زیرزمینی مورد استفاده قرار داد که به عنوان موضوع تحقیقاتی آتی می تواند در نظر گرفته شود.

## سیاسگذاری

بر خود لازم می دانیم از آژانس فضایی اروپا (ESA) به خاطر در اختیار قرار دادن داده های ENVISAT ASAR تشکر کنیم. همچنین از سازمان زمین شناسی و اکتشافات کشور به خاطر استفاده از نرم افزار گاما و اطلاعات چاههای پیژومتری کمال تشکر را داریم.

[1] K. Terzaghi, "Principles of soil mechanics, IV, settlement and consolidation of clay," Eng. News Rec., vol. 95, pp. 874-878, 1925.

[2] J. Hoffmann, S.A. Leake, D. L. Galloway, and A.M. Wilson, "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, 2003.

[3] J. Hoffmann, D.L. Galloway, H.A. Zebker, and F. Amelung, "Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry," Water Resour. Res., vol.

- 37(6), pp. 1551–1566, 2001.
- [4] C.F. Tolman, and J.F. Poland, “Ground-water, salt-water infiltration, and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California,” *Am. geophys. Un. Trans.*, vol. 21, pp. 23–34, 1940.
- [5] J.F. Poland, and G.H. Davis, “Land subsidence due to withdrawal of fluids,” *Rev. Eng. Geol.*, vol. 2, pp. 187–269, 1969.
- [6] D.L. Galloway, K.W. Hudnut, S.E. Ingebritsen, S.P. Phillips, G. Peltzer, F. Rogez, and P.A. Rosen, “Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope valley, Mojave Desert, California,” *Water Resour. Res.*, vol. 34, pp. 2573–2585, 1998.
- [7] D.L. Galloway, D.R. Jones, and S.E. Ingebritsen, “Land subsidence in the United States,” *US Geological Survey Circular*, No. 1182, p. 175, 1999.
- [8] A. Alizadeh, “Mathematical models of Mashhad study area. Preliminary reports of the ministry of power,” *Regional water co. of Khorasan, Applied researches committee*, 2004.
- [9] F. Amelung, D.L. Galloway, J.W. Bell, H.A. Zebker, and R.J. Laczniak, “Sensing the ups and downs of Las Vegas—InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation,” *Geology*, vol. 27, pp. 483–486, 1999.
- [10] G. Peltzer, P. Rosen, F. Rogez, and K. Hudnut, “Poro-elastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture,” *J. geophys. Res.*, vol. 103, pp. 30 131–30 145, 1998.
- [11] B. Fruneau, and F. Sarti, “Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation from atmospheric artifacts using correlation,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 27(24), pp. 3981–3984, 2000.
- [12] M. Tesauro, P. Berardino, R. Lanari, E. Sansosti, G. Fornaro, and G. Franceschetti, “Urban subsidence inside the City of Napoli (Italy) observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera,” *J. geophys. Res.*, vol. 27, pp. 1961–1964, 2000.
- [13] M. Crosetto, C.C. Tscherning, B. Crippa, and M. Castillo, “Subsidence monitoring using SAR interferometry: reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29(9), pp. 26.1–26.4, 2002.
- [14] M. Motagh, Y. Djamour, T.R. Walter, H.U. Wetzell, J. Zschau, and S. Arabi, “Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS,” *Geophys. J. Int.*, 168, 2006.
- [15] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, “A New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, pp. 2375–2383, 2002.
- [16] M. Dehghani, “Estimation of Deformation Rate and Modeling of Land Subsidence Induced by Groundwater Exploitation using Interferometry”, Ph.D. Thesis. K. N. Toosi University of Technology, 2009
- [17] M. Dehghani, M. J. Valadan Zouj, J. Biggs, A. Mansourian, B. Parsons, and T. Wright, “RADAR Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence,” *Journal of International Society of Remote Sensing (ISRS)*, vol. 37(1), pp. 147–156, 2009.
- [18] D. A. Schmidt, and R. Burgmann, “Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set” , *J. geophys. Res.*, vol. 108(B9), pp. 2416, 2003.
- [19] P. Lundgren, S. Usai, E. Sansosti, R. Lanari, M. Tesauro, G. Fornaro, and P. Berardino, “Modeling surface deformation observed with SAR interferometry at Campi Flegrei Caldera,” *J. geophys. Res.*, vol. 106, pp. 19 355–19 367, 2001.





## **An Enhanced Algorithm based on Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence Caused by Over-Exploitation of Groundwater**

Maryam Dehghani<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor of Dept. Of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University

### **Abstract**

Over-exploitation of groundwater has caused land subsidence in large rural areas located in Mashhad sub-basin, northeast of Iran. Time series analysis using Interferometric SAR (InSAR) data has shown its ability to monitor the temporal evolution of land subsidence. In this paper, time series analysis based on Small Baseline Subset (SBAS) algorithm is applied to study the Mashhad sub-basin subsidence. 18 interferograms were generated using 12 ENVISAT ASAR images spanning between 2003 and 2005. In order to decrease the temporal decorrelation effect caused by the agricultural fields, only interferograms with small temporal baselines are used in the time series analysis. However, to prevent the solution from the rank deficiency, it is tried to generate as many interferograms as possible. Because the interferograms with large spatial baselines are influenced by the topographic artifacts, they are refined before using in the time series analysis. Moreover, the atmospheric-error free deformation corresponding to every acquisition time is retrieved by applying the smoothing constraint into the least squares solution. The maximum deformation rate in the study area is estimated as ~23 cm/yr. The compressibility of the aquifer system is finally investigated by the quantitative integration of the InSAR displacement measurements with observations of the hydraulic head fluctuations at few piezometric wells.

**Key words:** Radar Interferometry, Time Series Analysis, Subsidence