

## پایش فرورفتگی زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار<sup>۱</sup>

امیر صفاری\* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی  
فرهاد جعفری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی  
سید محمد توکلی صبور - استادیار دانشگاه خوارزمی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۶/۱۲

### چکیده

قسمت عمده آب‌های شیرین به صورت آب زیرزمینی ذخیره شده است. برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی به واسطه افزایش جمعیت و استخراج آن جهت اهداف کشاورزی، صنعتی و مصارف خانگی از جمله مسائلی است که در سال‌های اخیر دشت‌های کشور را در معرض خطر فرورفتگی قرار داده است. پایش میزان دقیق فرورفتگی و نیز پرداختن به علت یا علل موجد آن جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. این مقاله با استفاده از روش تداخل سنجی راداری با دهانه ترکیبی یا *Insar* به ارزیابی میزان فرورفتگی زمین در دشت کرج - شهریار پرداخته است. جهت پردازش تصاویر راداری اخذ شده از ماهواره ان.وی.ست، از روش دانشگاه استنفورد برای پراکنده سازی دائمی استفاده گردید. با توجه به اینکه گستره منطقه مورد مطالعه در بردارنده مراکز سکونتگاهی شهری و روستایی متعددی است و همچنین پوشش گیاهی (باغات و مزارع) در دشت مورد مطالعه وسعت زیادی را به خود اختصاص داده است، استفاده از روش سنتی نظیر تداخل سنجی تفریقی موجب عدم همبستگی بین تصاویر، عدم دقت در پردازش‌ها و نادرستی محاسبه میزان دقیق فرورفتگی می‌گردد. براین اساس و جهت جلوگیری از این خطا، از روش تداخل سنجی با طول خط مبنای کوچک استفاده گردید و اینترفروگرامهایی با طول خط مبنای زمانی و مکانی کوتاه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ تولید شدند. به کمک سری زمانی خط مبنای کوتاه، در محیط نرم‌افزاری دوریس نرخ متوسط سالانه فرورفتگی با بیشینه مقدار ۱۳۶ میلی‌متر در سال به دست آمد. با توجه به اینکه علت اصلی فرورفتگی در این مقاله استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی و افت سطح این آب‌ها فرض گردیده است از طریق دو مدل این افت آب اثبات گردید. پردازش داده‌های ماهواره گریس و نیز داده‌های هیدروژئولوژی مربوط به چاه‌ها نشان از افت سطح آب دارد. روند تغییرات طی سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۱۲ از طریق داده‌های گریس بین ۵+ (در سال ۲۰۰۲) تا ۱۵- (سال ۲۰۱۲) سانتی‌متر مکعب را نشان می‌دهد. این روند نزولی از طریق پردازش داده‌های مربوط به چاه‌های پیژومتری و ترسیم هیدروگراف واحد نیز به اثبات می‌رسد. روند نمودار در هیدروگراف واحد، افت میزان ۲۲ متر طی ۱۲ سال (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳)، را نشان می‌دهد. اگر روند افت سطح آب را طی این سال‌ها برابر بگیریم، به‌طور متوسط سالانه ۱/۸۵- متر افت سطح آب در آبخوان زیرزمینی حادث شده است. محاسبات انجام شده بر روی تعداد ده هزار چاه در سطح دشت مخروطی نیز نشان می‌دهد که سالانه میزان ۶۰۵ میلیون متر مکعب آب برداشت می‌گردد.

واژگان کلیدی: فرورفتگی، آب زیرزمینی، کرج، شهریار

## مقدمه

فرونشست زمین مسئله‌ای جهانی و پدیده‌ای مورفولوژیکی است. این پدیده متأثر از فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی است که ممکن است مبدل به مخاطره و تهدیدی برای انسان و دستاوردهای انسانی شود.

فرونشست اگرچه در تمامی شرایط اقلیمی دیده می‌شود اما در مناطق خشک و نیمه خشک دارای بیشترین پراکندگی را داراست. پارامترهای اقلیمی از عوامل مهم تأثیرگذار در این پدیده می‌باشند. بارش ناچیز، دمای بالا و نیاز آبی دشت‌ها و شهرها، منجر به استخراج بیش از حد آب زیرزمینی می‌گردد. بنابراین وقوع مخاطره فرونشست در این مناطق به مقدار زیاد مرتبط با استخراج بی‌رویه و درازمدت از آب‌های زیرزمینی است (چیه هونگ چان<sup>۱</sup> و دیگران، ۲۰۱۰: ۱۲۴). یکی از مشکلات مهم در ارتباط با برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی افت سطح آب و متراکم شدن لایه‌ها و رسوبات است. افزایش روزافزون بهره‌برداری از این نوع آب‌ها به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی انباشته شده‌اند به نشست منجر شود (شریفی کیا، ۱۳۹۱: ۵۵). نشست سطح زمین در سفره‌های ماسه‌ای ناگهانی و در سفره‌های رسی تدریجی و بطئی است. این امر به صورت بالقوه می‌تواند باعث مشکلاتی مانند ایجاد درز و شکاف در سطح زمین، تخریب ابنیه و لوله زایی (بالا آمده لوله‌های آب از سطح زمین)، تغییر شیب رودخانه‌ها و جاده‌ها، فرورفتن تدریجی دکل‌ها و سازه (بوربی. تی جی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱: ۲۵۷؛ چایه<sup>۳</sup> و دیگران، ۲۰۱۰: ۱۲۳) ریزش جداره چاه‌ها، تغییر شیب زمین و افزایش سیل خیزی منطقه گردد (آیالا<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲: ۴۷).

پدیده نشست معمولاً بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد بلکه در زمان طولانی‌تری بعد از برداشت اتفاق می‌افتد. مقدار نشست زمین برای هر ده متر افت سطح آب بین ۱ تا ۵۰ سانتی‌متر (ال خمیس، ۱۳۸۶: ۷۸؛ اسکات<sup>۵</sup>، ۱۹۷۹) متغیر است که دامنه این تغییرات بسته به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع آن متغیر است.

این پدیده به دلیل عوامل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فعالیت گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ‌ها، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی، و یا ناشی از فعالیت‌های انسانی (ژی یوان، ۲۰۱۶: ۱) شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز (اچ. گو<sup>۶</sup> و دیگران، ۲۰۱۵: ۱۸)، معدن کاری مثل استخراج زغال‌سنگ و طلا، گوگرد و مواد جامد دیگر، همچنین ساخت‌وسازهای زیرزمینی و افزایش بار بر اثر ساخت‌وساز زیاد را می‌توان نام برد. بر اساس برآورد کارشناسان بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه‌یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده‌اند. (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۲۵، یمانی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۳).

در ایران مطالعه پدیده فرونشست به سبب فراگیری فضایی آن مورد توجه طیف وسیعی از محققان قرار گرفته و در سال‌های اخیر از تکنیک‌های رایج از جمله تداخل سنجی راداری برای تخمین میزان فرونشست و بررسی علل این پدیده استفاده شده است. این تکنیک در تحلیل پدیده نشست زمین به‌واسطه اینکه متکی بر تصاویر راداری چند زمانه است مؤثر و ارزشمند می‌باشد (فراتی و دیگران، ۲۰۱۵: ۱۰ و ژی یوان، ۲۰۱۶: ۳). نخستین بررسی‌های علمی در ایران جهت تعیین نرخ فرونشست از حدود دو دهه قبل در دشت رفسنجان که واجد بالاترین سابقه و نرخ نشست بود، آغاز گردید (شفیعی ثابت، ۱۳۷۳: ۱۳). به نظر می‌رسد از مجموع ۶۰۰ دشت کشور، بیش از نیمی از آن‌ها در معرض نشست

<sup>1</sup> - Chieh hung chang

<sup>2</sup> - Burbey, T.J

<sup>3</sup> - chieh

<sup>4</sup> - Ayala

<sup>5</sup> - Scott

<sup>6</sup> - H. guo

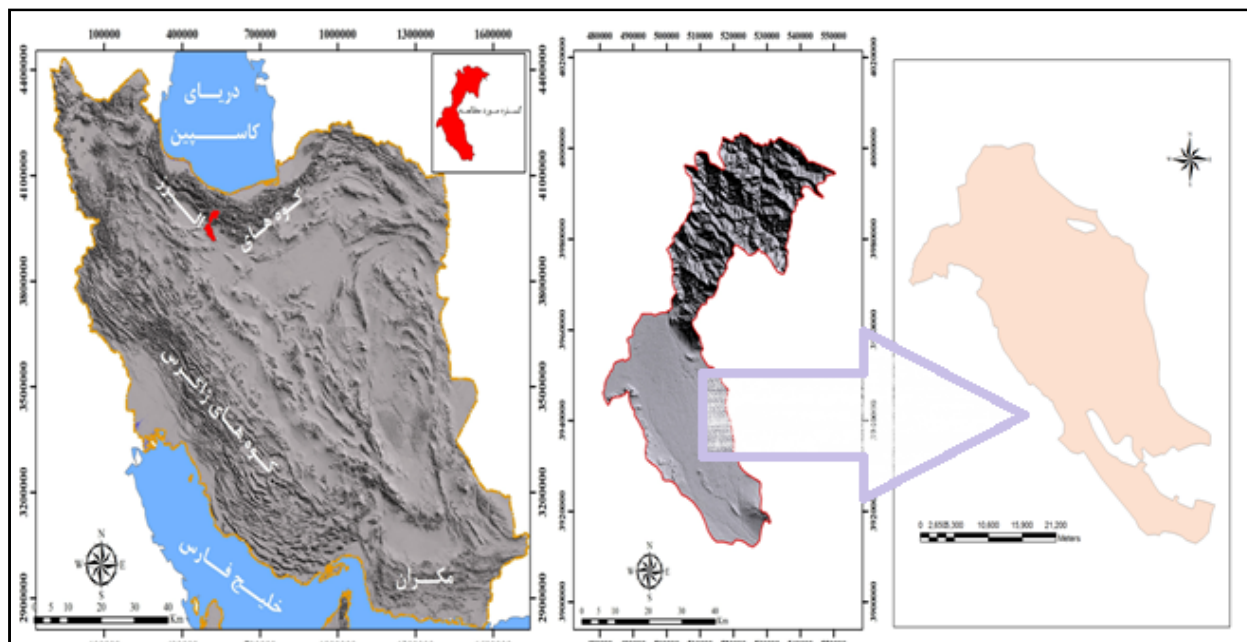
باشند. این پدیده در دشت‌ها و شهرهایی نظیر مشهد، تهران، کاشمر، کاشان، کرمان، رفسنجان و... روی داده است (شریفی-کیا ۱۳۹۰: ۵۸). آمیغ‌بی (۱۳۸۸)، لشگری‌پور (۱۳۸۶ و ۱۳۸۷)، شمشکی (۸۴)، توفیق و طباطبایی (۱۳۸۸)، معتق (۱۳۸۸)، نامقی (۱۳۹۲)، تندیس (۱۳۹۲) و روستایی (۱۳۹۳) از محققین داخلی و تایی (۲۰۰۹)، جان (۲۰۱۰) چاهود (۲۰۱۰)، عثمان اغلو (۲۰۱۱)، چائوسارد و همکاران (۲۰۱۴)، راسپینی و همکاران (۲۰۱۴) از جمله محققین خارجی هستند که در این زمینه دارای مطالعات و مقاله هستند.

این مقاله نیز باهدف پایش و تعیین میزان فرونشست دشت کرج - شهریار تدوین گردیده است. همچنین سعی دارد از بین علل مختلفی که باعث این پدیده می‌شود؛ به‌عنوان علت اصلی؛ به بررسی و ارزیابی افت سطح آب و محاسبه استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی این دشت بپردازد.

### معرفی محدوده مورد مطالعه

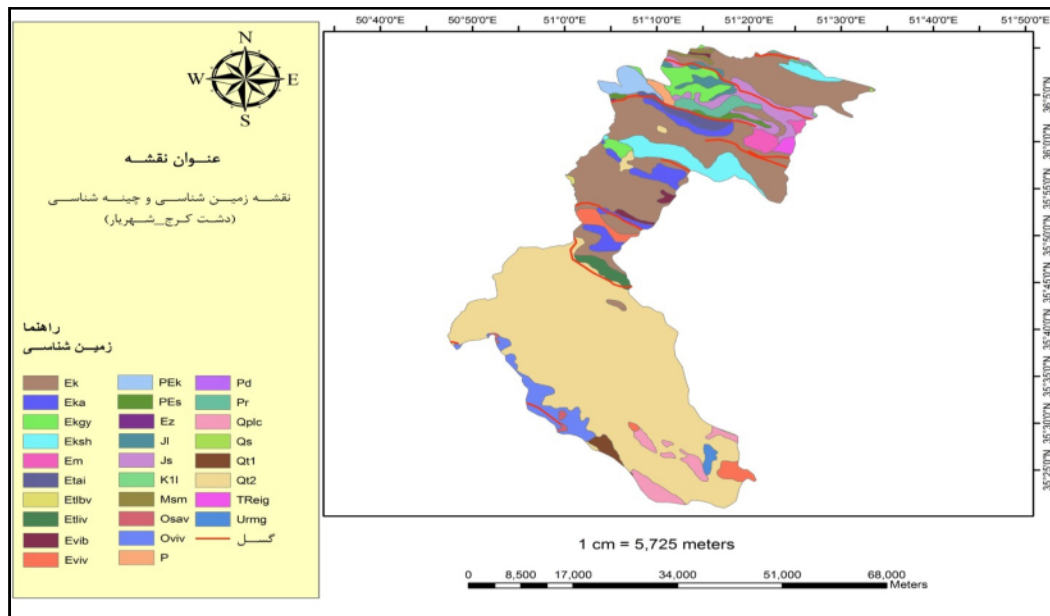
#### موقعیت جغرافیایی

محدوده مورد مطالعه قسمتی از دشت تهران - کرج می‌باشد که به لحاظ سیاسی در استان‌های تهران و البرز قرار گرفته و به لحاظ تقسیمات طبیعی در حوضه کرج و دقیقاً منطبق بر بخش مخروط‌افکنه ای کرج واقع شده است (شکل ۱). حوضه طبیعی کرج از نظر تقسیمات سیاسی عمدتاً منطبق بر بخش آسارا است. سد کرج در حوضه آبریز آن قرار دارد و رود کرج مهم‌ترین رود و تأمین‌کننده اصلی رسوبات مخروط‌افکنه آن می‌باشد. گستره حوضه آبخیز از نظر مختصات جغرافیایی در محدوده بین  $47^{\circ} 50'$  تا  $34^{\circ} 51'$  طول شرقی و  $21^{\circ} 35'$  تا  $11^{\circ} 36'$  عرض شمالی قرار دارد. وسعت حوضه آبریز آن در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع و مساحت مخروط‌افکنه آن که منطبق بر دشت محدوده مورد مطالعه است در حدود ۹۰۰ کیلومتر مربع است. محدوده مورد مطالعه که تحت عنوان دشت (مخروط‌افکنه ای) کرج شهریار از حوضه آبخیز تفکیک شده است دقیقاً منطبق با آبخوان است. این دشت نیز دارای مختصات  $47^{\circ} 50'$  و  $20^{\circ} 51'$  طول جغرافیایی و  $21^{\circ} 35'$  و  $48^{\circ} 35'$  عرض جغرافیایی قرار دارد. به لحاظ فیزیوگرافی محیط دشت ۱۶۵ کیلومتر است. شهر کرج تقریباً در رأس این دشت مخروط قرار گرفته است. از رأس به سمت قاعده این مخروط به دلیل شرایط مناسب آب و هوایی و منابع آن شهرهای متعدد و نسبتاً بزرگی به وجود آمده‌اند. از مهم‌ترین شهرهای موجود بر سطح این مخروط می‌توان به کرج، محمدشهر، ملارد، شهریار، صباشهر و رباط‌کریم، اشاره داشت.



### شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه در گستره جغرافیایی ایران

از لحاظ لیتولوژی و چینه‌شناسی (نقشه شماره ۲) دشت مورد مطالعه و حوضه آبخیز آن به دو بخش تقسیم می‌شود: (۱) سنگ‌های آتشفشانی و توفی: این تشکیلات قسمت بالادست دشت مخروطی (حوضه آبخیز کرج) را در بر دارد. این سنگ‌های توفیک و آتشفشانی دوره ائوسن (شامل شیل زیرین، توف میانی، شیل‌های آسارا، توف بالایی و شیل‌های کندوان) با عنوان سازند کرج نام‌گذاری شده‌اند. (۲) تشکیلات رسوبی: به دلیل اینکه در حوضه آبریز بیشتر سازندها از نوع توف‌های سبز و سنگ‌های آتشفشانی سازند ائوسن کرج هستند، مواد تشکیل‌دهنده دشت مخروطی به‌ویژه در شمال محدوده مورد مطالعه بیشتر دانه‌درشت است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه کرج و همچنین رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی هستند. مطالعه تعدادی از ترانسه‌ها نشان می‌دهد سراسر دشت از تشکیلات مخروط‌افکنه‌ای پوشیده شده است. این تشکیلات در قسمت‌های جنوبی‌تر با میان‌لایه‌های ماسه‌ای وسیلتی-رسی همراه است.



شکل ۲: وضعیت زمین‌شناسی - چینه‌شناسی حوضه و دشت کرج - شهریار

در برداشت‌هایی که توسط نگارنده نیز انجام شده است به‌خوبی این شرایط مشاهده می‌گردد. لذا عناصر تشکیل‌دهنده آبخوان نیز به نسبت‌های متفاوت از قلوه‌سنگ، شن و ماسه، سیلت و رس تشکیل یافته و از حاشیه شمالی به سمت بخش‌های میانی و خروجی دشت، قطر ذرات به تدریج کاهش می‌یابد.

### روش‌شناسی

این پژوهش متکی بر روش کتابخانه‌ای - آزمایشگاهی است. ابتدا به روش کتابخانه‌ای منابع موجود شامل تصاویر راداری، هیدرولوژی و ... اخذ گردید. سپس به‌منظور پردازش داده‌های مرتبط با آب زیرزمینی و نیز تصاویر ماهواره‌ای (راداری) از شیوه آزمایشگاهی استفاده گردیده است.

برای سنجش و اندازه‌گیری فرونشست زمین، روش تداخل سنجی راداری در سال‌های اخیر به‌عنوان 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 به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک

مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (فرتی<sup>۱</sup> و دیگران، ۲۰۰۱: ۸). در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود (فراتی و دیگران، ۲۰۰۷: ۱۱۴۵). از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی حاصل می‌شود که تداخل سنج<sup>۲</sup> نام دارد. تشکیل تداخل سنج یا اینترفروگرام اساس پردازش‌های راداری است (ا. هوپر، ۲۰۱۲: ۳). از عوامل محدودکننده روش تداخل سنجی راداری سنتی تفریقی<sup>۳</sup>، نبود همبستگی زمانی و مکانی<sup>۴</sup> است. نبود همبستگی زمانی مربوط به تغییر سری در شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین در بازه زمانی میان تصویر پایه<sup>۵</sup> و تصویر پیرو<sup>۶</sup> و نبود همبستگی هندسی ناشی از بلند بودن طول مبنای مکانی (فاصله دو ایستگاه تصویربرداری) میان دو تصویر پایه و پیرو است. این مقاله جهت کاهش اثر عدم همبستگی‌ها از جمله نویز و بخار اتمسفری و نیز آشکارسازی تغییرات درست و دقیق از جابجایی‌ها، تنها از اینترفروگرام‌های با طول خط زمانی کوتاه استفاده نموده است. بدین منظور از میان الگوریتم‌های متعدد به جهت دقت بالا از روش موسوم به "استمپس"<sup>۷</sup> (برای آنالیز فاز تصویر در کنار پردازش دامنه تصویر) و تحلیل سری زمانی به شیوه خط مبنای کوتاه<sup>۸</sup> بهره‌برداری شده است (ام. ال. گائو<sup>۹</sup> و دیگران، ۲۰۱۵: ۳۴۹). روش خط مبنای کوتاه کوتاه متکی بر ترکیبی از اینترفروگرام‌هایی است که به منظور به حداقل رساندن خط مبنای زمانی - مکانی و بالتبع کاهش عدم همبستگی فاز بین تصاویر مختلف محاسبه شده‌اند (راسپینی و دیگران، ۲۰۱۳: ۲۴۲۹). بنابراین با استفاده از نرم‌افزار دوریس به پردازش تصاویر دو زمانه راداری مربوط به سنجنده اروپایی ان. وی. ست<sup>۱۰</sup> با روش فوق اقدام گردید و حاصل این فرایند با بهره‌گیری از محیط نرم‌افزاری جی. ای. اس<sup>۱۱</sup> علاوه بر استخراج نرخ و دامنه فرونشست، ایجاد پایگاه داده‌های مکانی و پهنه‌بندی این پدیده در گستره مورد مطالعه است.

همچنین جهت مطالعه و تأیید افت آب زیرزمینی از پردازش داده‌های ماهواره گریس<sup>۱۲</sup> که ماهواره‌ای با مأموریت بازیابی گرانس زمین و اقلیم<sup>۱۳</sup> می‌باشد، استفاده گردیده است. برآورد میزان تخلیه آب از چاه‌های مشاهده‌ای و پیژومتریک و تحلیل هیدروگراف واحد آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه به روش‌های آزمایشگاهی و از طریق تحلیل آماری صورت می‌گیرد.

## داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ترکیبی از داده‌های اصلی و فرعی است. تصاویر ماهواره‌ای راداری و گریس و نیز داده‌های مربوط به چاه‌های بهره‌برداری، مشاهده‌ای و پیژومتریکی داده‌های اصلی و داده‌هایی مانند تصاویر سنجش از دور اپتیکی گوگل ارث، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی داده‌های فرعی محسوب می‌شوند.

داده‌های راداری با روزه مجازی "سار" در مسیر و عبور<sup>۱۴</sup> ۱۴۹ می‌باشد. تصاویر راداری مورد نظر از سنجنده ASAR ماهواره Envisat سازمان فضائی اروپا با فرمت SLC<sup>۱۵</sup> (تک منظر) از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV اخذ شده

<sup>1</sup> - Ferretti

<sup>2</sup> - Interferogram

<sup>3</sup> - Differential interferometry

<sup>4</sup> - Temporal and Geometrical decorrelation

<sup>5</sup> - Master

<sup>6</sup> - Slave

<sup>7</sup> - Stanford Method For Permanent Scattering

<sup>8</sup> - SBAS

<sup>9</sup> - M.L.Gaio

<sup>10</sup> - Envisat

<sup>11</sup> - G.I.S

<sup>12</sup> - Grace

<sup>13</sup> - Gravity Recovery and Climate Experiment

<sup>14</sup> - Track

<sup>15</sup> - Single looking complex

است. این نوع داده‌ها، داده‌های خامی هستند که تنها پردازش‌های اولیه بر روی آن‌ها انجام گرفته و به تصاویر تک منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آن‌ها به هیچ‌عنوان مخدوش نگردیده است. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی<sup>۱</sup> نیز جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین یا به دست آوردن جایجایی‌ها در جهات مختلف با استفاده از اینترفرومتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با عنایت به اینکه در این پژوهش هدف پایش میزان فرونشست است، تنها از داده‌های نزولی بهره‌برداری شده‌اند. براین اساس از تعداد ۲۴ تصویر مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).

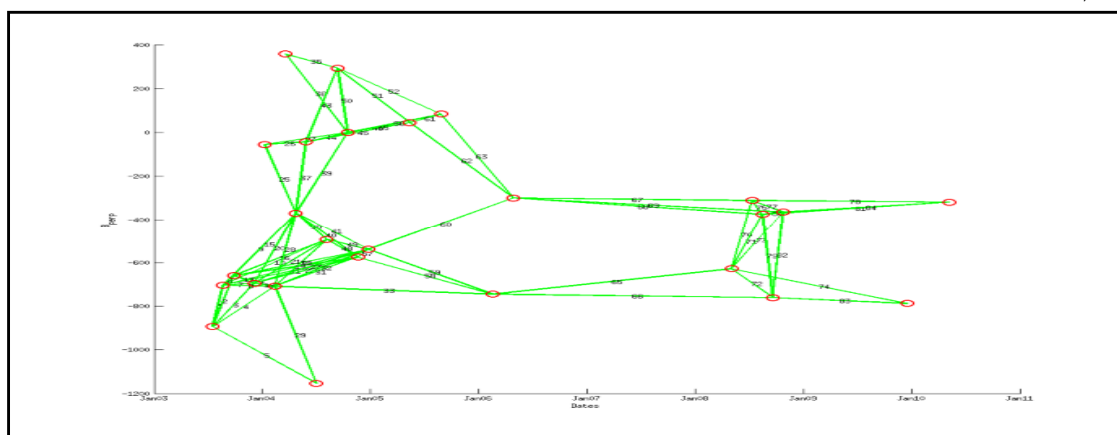
جدول ۱: دوره زمانی تصاویر استفاده شده و ویژگی آن‌ها

زاویه تصویربرداری	قدرت تفکیک مکانی عمود بر پرواز	قدرت تفکیک مکانی در امتداد پرواز (متر)	حالت مداری	تاریخ	
				شمسی	میلادی
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۴/۲۷	۲۰۰۳/۰۷/۱۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۰۵/۳۱	۲۰۰۳/۰۸/۲۲
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۰۷/۰۴	۲۰۰۳/۰۹/۲۶
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۰۹/۱۴	۲۰۰۳/۱۲/۰۵
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۱۰/۱۹	۲۰۰۴/۰۱/۰۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۱۱/۲۴	۲۰۰۴/۰۲/۱۳
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۱۲/۲۹	۲۰۰۴/۰۳/۱۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۴/۰۴/۲۳
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۳/۰۸	۲۰۰۴/۰۵/۲۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۴/۰۸/۰۶
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۶/۲۰	۲۰۰۴/۰۹/۱۰
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۱۰/۱۵
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۴/۱۱/۱۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۱۲/۲۴
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۴/۰۲/۲۳	۲۰۰۵/۰۵/۱۳
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۴	۲۰۰۵/۸/۲۶
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۴/۱۱/۱۷	۲۰۰۶/۰۲/۱۷

<sup>2</sup>- Ascending and Descending

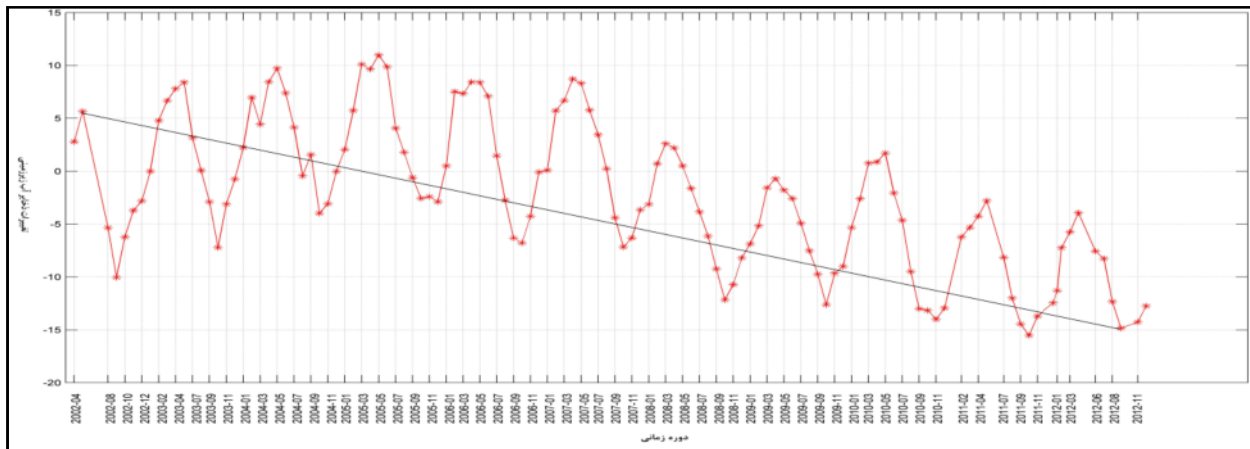
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۵/۰۲/۰۸	۲۰۰۶/۰۴/۲۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۲/۱۳	۲۰۰۸/۰۵/۰۲
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۴/۲۱	۲۰۰۸/۰۷/۱۱
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۶/۲۲۹	۲۰۰۸/۰۹/۱۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۷/۳	۲۰۰۸/۱۰/۲۴
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۸/۹/۲۷	۲۰۰۹/۱۲/۱۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۹/۲/۱۷	۲۰۱۰/۰۵/۷

با توجه به شیوه سری زمانی به روش اس.باس که این مقاله از آن سود می‌برد از میان تصاویر و اینترفروگرامهای متعدد، تعداد ۸۲ داخل‌سنج که خط مبنای (زمانی و مکانی) مناسبی داشته‌اند به شیوه کمترین خط مبنا (بو، هو، ۲۰۱۴: ۳۶۴۹) انتخاب (شکل ۲) و در فرآیند تداخل سنجی مورد پردازش قرار گرفته‌اند. پردازش این تصاویر نیز با نرم‌افزار Doris انجام شده است.



شکل ۲: انتخاب تصاویر بر مبنای کمترین خط مبنای زمانی (روز) و مکانی (متر)

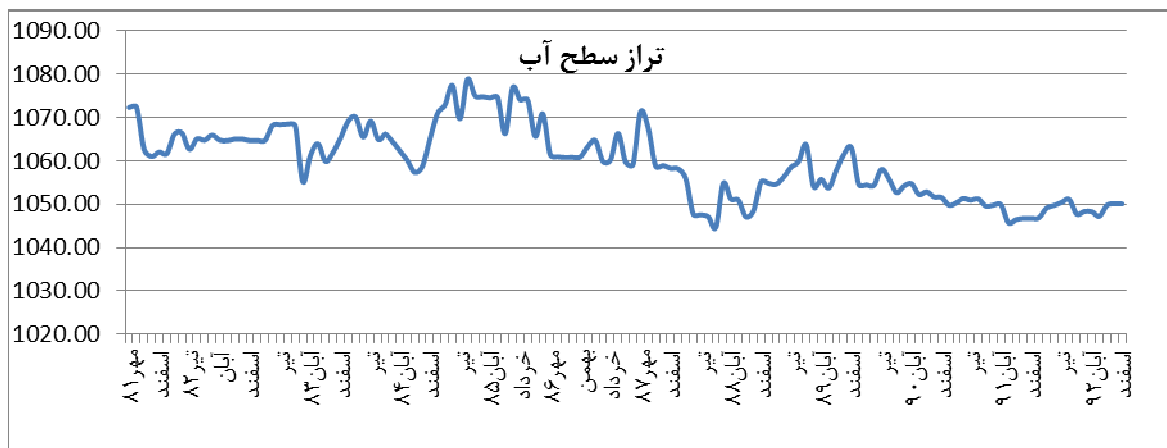
جهت بررسی روند افت آب‌های زیرزمینی اولاً داده‌های سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ ماهواره گریس اخذ و میزان افت آب محاسبه و روند تغییرات ترسیم گردید (شکل ۳) ثانیاً بر اساس آمار اخذ شده از مدیریت منابع آب ایران، حجم آب استخراجی به صورت میانگین در هر سال و تغییرات تراز آب از طریق چاه‌های بهره‌برداری - مشاهده‌ای و پیزومتریک موجود و قابل استناد؛ طی سال‌های ۸۲ تا ۹۲؛ تنظیم شد (جدول شماره ۲). جهت مقایسه روند افت آب، نمودار این تغییرات تراز (هیدروگراف) نیز ترسیم گردید (شکل ۴).



شکل ۳: روند میزان افت آب طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲

جدول شماره ۲: متوسط تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان ابرفتی محدوده مورد مطالعه

mah / sal	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392
فروردین		1061.68	1064.7	1069.15	1070.9	1066.29	1064.69	1058.19	1054.85	1054.6	1049.76	1046.86
اردیبهشت		1066.14	1064.77	1070.11	1072.91	1076.89	1059.84	1055.97	1054.64	1054.49	1050.41	1049.09
خرداد		1066.45	1068.2	1065.52	1077.43	1074.11	1060.22	1047.76	1056.26	1054.39	1051.36	1049.72
تیر		1062.69	1068.38	1069.19	1069.74	1074.03	1066.36	1047.57	1058.56	1058.06	1050.95	1050.42
مرداد		1065.1	1068.5	1064.93	1078.84	1065.65	1059.71	1047.1	1059.88	1055.84	1051.25	1051.13
شهریور		1064.77	1068.1	1066.22	1075.04	1070.86	1059.21	1044.64	1063.75	1052.7	1049.57	1047.74
مهر	1072.34	1065.97	1055.21	1064.54	1074.84	1061.48	1071.34	1054.83	1054.08	1054.21	1049.8	1048.37
آبان	1072.38	1064.8	1061.21	1062.37	1074.55	1060.96	1085.22	1051.24	1055.76	1054.76	1049.89	1048.3
آذر	1062.64	1064.66	1063.96	1060.13	1074.62	1060.81	1067.66	1050.95	1053.76	1052.25	1045.74	1047.24
دی	1026.73	1065.06	1059.89	1057.34	1027.08	1060.81	1058.81	1047.07	1057.83	1052.91	1046.46	1049.78
بهمن	1061.02	1065.07	1061.99	1058.69	1021.68	1060.94	1058.94	1048.48	1061.48	1051.71	1046.74	1050.11
اسفند	1062.07	1064.69	1065.3	1064.9	1051.68	1063.34	1058.27	1055.16	1063.12	1051.58	1046.76	1050.09

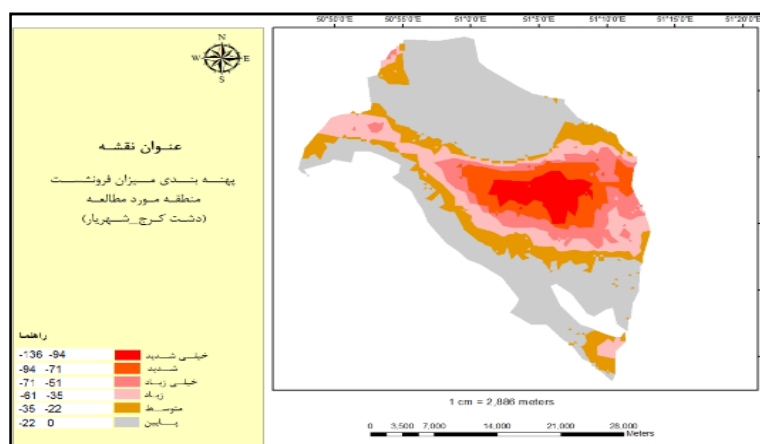


شکل ۴: هیدروگراف (تراز) آب زیرزمینی



### بحث و نتیجه

در این مقاله از میان الگوریتم‌های متعدد به جهت دقت بالا از روش موسوم به "استمپس" ( برای آنالیز فاز تصویر در کنار پردازش دامنه تصویر) و تحلیل سری زمانی به شیوه خط مبنای کوتاه بهره‌برداری شده است. لذا از میان تصاویر و اینترفروگرام‌های متعدد، تعداد ۳۴ تصویر راداری از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ انتخاب و ۸۲ تداخل‌سنج که خط مبنای مناسبی داشته‌اند به شیوه کمترین خط مبنای انتخاب و در فرایند تداخل سنجی مورد پردازش قرار گرفته‌اند. جهت پردازش این تصاویر از نرم‌افزار دوریس استفاده گردیده است. بر اساس این پردازش‌ها، میزان فرونشست در دشت کرج - شهریار متوسط سالانه ۱۳۶ میلی‌متر برآورد شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار مطلب<sup>۱</sup> و جی.آی.اس، دشت کرج - شهریار به لحاظ میزان فرونشست و خطر، پهنه‌بندی گردید (شکل ۵). همان‌گونه که از نقشه استنباط می‌گردد حداکثر فرونشست در مرکز نقشه و در محدوده‌های مسکونی شهریار؛ باغات و زمین‌های کشاورزی تکوین یافته است. از طریق قرار دادن لایه اطلاعاتی فرونشست بر روی عکس ماهواره‌ای گوگل ارث مشخص گردید مراکز مسکونی رزکان، شهریار و فردوسیه و همچنین مزارع و باغات این محدوده و تمام سازه‌های مجاور با این مراکز در حداکثر خطر فرونشست قرار دارند.



شکل ۵: پهنه‌بندی خطر و میزان فرونشست دشت مورد مطالعه

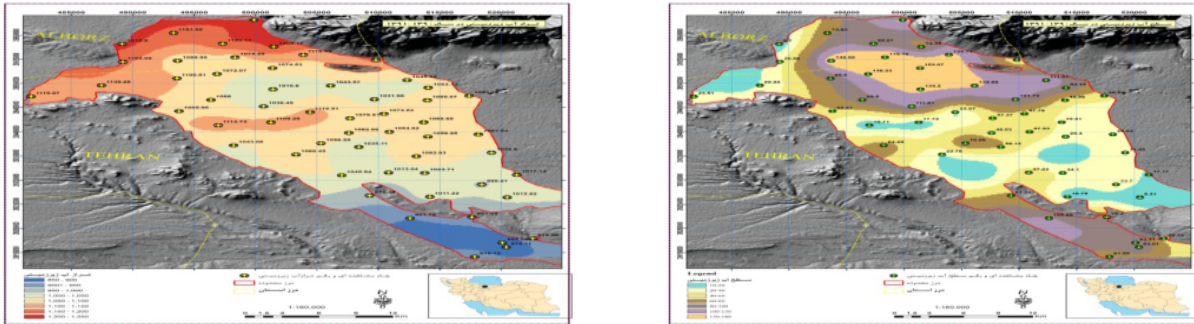
با توجه به اینکه استخراج بی‌رویه آب از آبخوان دشت به‌عنوان علت اصلی این پدیده فرض شده است، به محاسبه حجم آب استخراجی (جدول شماره ۳) پرداخته شد.

جدول شماره ۳: میزان تخلیه سالانه آب زیرزمینی از سطح دشت

نوع چاه	تعداد چاه	حداکثر عمق	تخلیه سالانه (میلیون مترمکعب)
عمق نامشخص	۱۸	-	۰
عمیق	۵۹۰۱	۲۸۰	۵۸۲/۰۹
نیمه عمیق	۳۹۷۰	۴۹	۲۲/۸
مجموع	۹۸۸۹	۲۵۰	۶۰۴/۸۹

<sup>۱</sup> - Matlab

بیان آب به طور طبیعی در سفره‌هایی روی می‌دهد که میزان تخلیه و ورود آب برابر باشد. برداشت میزان ۶۰۵ میلیون مترمکعب در سال توسط چاه‌های متعدد در سطح دشت به میزانی است که ورودی‌های رودخانه کرج و نیز بارش اندک (با توجه به حاکمیت اقلیم خشک و نیمه‌خشک) نتواند این میزان برداشت را جبران کند. تغییرات سطح آب و میزان افت آن نیز از طریق پردازش آمار چاه‌ها مورد ارزیابی، پردازش و پهنه‌بندی قرار گرفت (شکل ۶).



شکل ۶: پهنه‌بندی سطح و تراز آب زیرزمینی

این نقشه نشان می‌دهد تغییرات آب زیرزمینی در قسمت شرقی یعنی به سمت خروجی دشت، پایین‌ترین و به سمت قسمت‌های مرکزی و شمال غربی؛ جایی که مراکز شهری - روستایی و نیز مزارع و باغات گسترش یافته است؛ بالاترین مقدار را دارد. همچنین سطح آب زیرزمینی نیز در قسمت‌های مرکزی دشت در عمق بیشتری (حتی بیش از ۲۰۰ متر) قرار دارد. خط هم عمق ۲۵۰ متر در بخشی از حداکثر فرونشست قرار گرفته است. در واقع این عمق در مناطقی قرار دارد که بیشترین میزان استخراج آب زیرزمینی را به خود اختصاص داده است. هیدروگراف واحد منطقه نیز که با استفاده از داده‌های مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومتریک طی دوره‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳ ترسیم شده است، اگرچه چندین بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی را (از جمله در مرداد سال ۱۳۸۵ و شهریور ۱۳۸۹) نشان می‌دهد اما روند سینوسی نمودار حکایت از کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی است. تفاضل ارتفاع متوسط مطلق سطح آب زیرزمینی طی ۱۲ سال برابر ۲۲/۲۵- متر است. اگر روند افت سطح آب را طی این سال‌ها برابر بگیریم، به طور متوسط سالانه ۱/۸۵- متر افت سطح آب در آبخوان زیرزمینی حادث شده است.

استخراج آب زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیر زمینی به میزان فوق سبب کاهش فشار هیدرواستاتیک و خروج آب از خاک‌های سطح مخروطی دشت که مشتمل بر لایه‌های ریزودرشت است منجر به تحکیم و کاهش حجم خاک و در نهایت رویداد نشست تدریجی زمین است (عکس‌های شماره ۲ و ۱). بنابراین علیرغم وجود علت‌های مختلف قابل مطالعه در ایجاد نشست؛ در تحلیل نمودار و نیز با تعیین افت سطح آب می‌توان صحت فرض فوق را در دشت کرج-شهریار تأیید نمود.



شکل ۷: پدیده لوله زایی در دشت مورد مطالعه      شکل ۸: خندقی شدن مزارع در اثر فرونشست منطقه (ده مویز)

## مراجع

- آل خمیس رضا و دیگران. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر نشست حاصل از تخلیه آب زیرزمینی، نشریه آب و فاضلاب شماره ۶۰، ص ۷۸.
- شریفی کیا، محمد و نیکتا، میثم. ۱۳۹۰. سنجش و استخراج مخاطرات حاصل از پدیده نشست در اراضی مسکون تهران بزرگ، اولین سمینار تحلیل فضائی مخاطرات محیطی کلان شهر تهران، دانشگاه تربیت معلم.
- شفیع، محمدحسین و هاتف، نادر. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر توأم متروی شیراز و پایین انداختن تراز آب زیرزمین بر نشست سطح زمین، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- یمانی، مجتبی؛ نجفی، اسماعیل و عابدینی، محمدحسین. ۱۳۸۸. ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیر زمینی در دشت قره‌بلاغ استان فارس، فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا دوره ۱، صص ۲۷-۹.
- Hooper, Bekaert, D., Spaans, K., Arikani, M., (2012), *Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation*, *Tectonophysics* pp. 514- 517.
- Ayala.Irasema, (2002), *Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries*, *Geomorphology* 47: 107-124
- Blom, R., Crippen, R.E., and Elachi, C., (1984), *Detection of subsurface features in Seasat radar images of Means Valley, Mojave Desert, California*, *Geology*, 12, 346-349.
- Bo Hu and et al (2014), *Long-Term Land Subsidence Monitoring of Beijing (China), Remote Sens.*, 6, 3648-3661; doi:10.3390/rs6053648 Using the Small Baseline Subset (SBAS) Technique
- Chen.C., Wang.C., Chen Kuo.L.(2010), *Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan. Taiwan*. *Engineering Geology* 115 :122-131
- D. Massonnet, and K. L. Feigl,(1998), *Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface*. *Rev.Geophysic*,
- Dedual, E., (1967). *Zur geologie des mittleren und unteren Karaj – Tales, Zentral – Elburze (Iran)*, Univ. Zurich, 123p.
- F. Raspini and et al (2013), *Advanced interpretation of land subsidence by validating multi-interferometric SAR data: the case study of the Anthemountas basin (Northern Greece)*, *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Ferretti, D. Colombo, A. Fumagalli, F. Novali, and A. Rucci(2015), *InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big-proc-iahs.net*.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F.,(2001), *Permanent scatterers in SAR interferometry*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, PP. 8-20.

- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C. and Rocca, F., (2007), *Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation*, "Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 45, pp. 1142-1153
- H. Guo, (2015), *Groundwater-abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain*, *PIAHS*-372
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., (2011), *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*, *Hydrogeology Journal*, 19: 1459-1486.
- Grace - Earth Missions - NASA Jet Propulsion Laboratory - NASA Jet Propulsion Laboratory (2013) Accessed October 4 .  
<http://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5882> .
- Grace - Gravity Recovery and Climate Experiment. (2013), Accessed September 6 .  
[http://www.csr.utexas.edu/grace/gallery/gravity/03\\_07\\_GRACE.html](http://www.csr.utexas.edu/grace/gallery/gravity/03_07_GRACE.html)
- GRACE Tellus: GRACE MONTHLY MASS. GRIDS LAND. (2013). Accessed September 11. <http://grace.jpl.nasa.gov/data/gracemonthlymassgridsland>
- Lofgren, B.E. (1969) *Field measurement of aquifer system compaction*. San Joaquin Valley, California, U.S.A. *Proc. Tokyo Sump. on Land Subsidence, IASH-UNESCO*, PP. 272-284.
- Osmanoglu, Batuhan and et al (2016), *Time series analysis of InSAR data: Methods and trends*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115 (2016) 90-102
- M. L. Gao and et al, (2015), *Mapping and characterization of land subsidence in Beijing Plain caused by groundwater pumping using the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR technique*, doi:10.5194/piahs-372-347.
- M. Simons, P.A. Rosen, (2007), *Interferometric synthetic aperture radar geodesy.* In: Schubert, G. (Ed.), *Treatise on Geophysics*, Vol. 3, Elsevier Press, Vol. 31, No. 23, pp. 391-446.
- Scott, R.F. (1979), *Subsidence- revaluation and prediction of subsidence*, Ed. By Saxema, S.K, *Proc. Conf. ASCE*, Gainesville, PP 1-25.
- Sharifikia, Mohammad, (1390), *Assessing and extraction of subsidence dangerous in Tehran settled land, environmental disaster of Tehran*, TM university.
- Schmidt, R., F. Flechtner, U. Meyer, K.H. Neumayer, Ch. Dahle, R. König, and J. Kusche (2008), *Hydrological Signals Observed by the Grace Satellites.*, *Surveys in Geophysics* 29(4-5): 319-34.
- Zheyuan Du, Linlin Ge \*, Xiaojing Li and Alex Hay-Man Ng, (2016), *Subsidence Monitoring over the Southern Coalfield, Australia Using both L-Band and C-Band SAR Time Series Analysis*, *Remote sensing magazine*