

## تحلیل فضایی فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی با استفاده از مدل GWR (مطالعه موردی: آبخوان نورآباد ممسنی)

نجمه شفیعی<sup>۱</sup>

لیلا گلی مختاری<sup>۲</sup>

ابوالقاسم امیراحمدی<sup>۳</sup>

رحمان زندی<sup>۴</sup>

### چکیده

فرونشست زمین در طی سال‌های گذشته به دلایل مختلف از جمله رشد بی‌رویه جمعیت، برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی، عوامل تکنیکی به همراه عوامل دیگر سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و ... شده است. این پدیده در چند سال گذشته آسیب‌های فراوان به دشت‌های استان فارس به خصوص ساختمان‌های مسکونی و زمین‌های کشاورزی وارد نموده است. پایش میزان نرخ فرونشست و نیز پرداختن به علت یا علل تاثیر گذار آن جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت فراوان است. در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت فرونشست در آبخوان دشت نورآباد ممسنی از داده‌های سنتینل 1A در بازه زمانی (۱۳۹۴-۱۳۹۸) و روش تداخل سنجی راداری که با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه می باشد در محیط نرم افزار (SNAP)<sup>۵</sup> انجام گرفت. جهت تهیه نقشه‌های افت و سطح آب زیرزمینی در سال‌های حداقل ۱۳۸۲ و حداکثر ۱۳۹۴ از روش درون‌یابی IDW استفاده شد و سپس میان دو پارامتر افت آب زیرزمینی و فرونشست سطح دشت با استفاده از مدل GWR<sup>۶</sup> تحلیل فضایی صورت پذیرفت و خروجی حاصل از این تحلیل نشان داد که حداکثر میزان R2 در بخش‌های مرکزی آبخوان ۰/۷۹ می باشد و در بخش‌های جنوبی این مقدار کاهش می یابد. همچنین میزان مقادیر برآورد شده با پیش بینی شده نشان می‌دهد که وضعیت خطا در بخش مرکزی بین ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۰۶ می باشد. نشان از اعتبار سنجی بالای مدل و میزان دقت بالای بین خروجی‌های حاصل از دو پارامتر می باشد.

**واژگان کلیدی:** فرونشست زمین، افت آب زیرزمینی، تداخل سنجی، GWR آبخوان نورآباد ممسنی.

### مقدمه

امروزه پدیده فرونشست زمین یکی از مهمترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در مقیاس جهانی است که خسارت‌های هنگفتی بر ساخت‌وسازهای شهری و روستایی، تأسیسات عمران و آبادی وارد می‌کند. بیشترین گزارشات از سراسر جهان در ارتباط با پدیده فرونشست زمین مربوط به مناطق خشک و کم باران بوده است. طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده آمریکا، پدیده فرونشست

<sup>۱</sup> . دانشجو دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری

<sup>۲</sup> . استادیار دانشگاه حکیم سبزواری (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> . استاد دانشگاه حکیم سبزواری

<sup>۴</sup> . استادیار دانشگاه حکیم سبزواری

<sup>۵</sup> - Sentinels Application Plat form

<sup>۶</sup> - Geographie Wiegthed Regrassion

زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی اندکی باشد (باتسوجکسون، ۱۹۸۰). این پدیده به علل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی، یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب و نفت و گاز روی می‌دهد (هیلم، ۲۰۰۰). در چند دهه اخیر این پدیده با عملکرد نامناسب بشر، مخصوصاً برداشتهای ناصحیح از منابع سیالی و غیر سیالی زیر سطحی همچون آبهای زیرزمینی؛ منابع معدنی (عطایی، ۱۳۹۰) منابع نفت و گاز و متروک ماندن و فرو ریزش تأسیسات زیر زمینی همچون قنات (حافظی مقدس، ۱۳۸۹) روند رو به رشدی به خود گرفته است. عموماً محققان پدیده فرونشست را در ابعاد مختلفی بررسی کرده اند از آن جمله: (سان و همکاران<sup>۱</sup> ۱۹۹۹)، (لارسون و همکاران<sup>۲</sup> ۲۰۰۱)، (پوترا<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱)، (گالوی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳)، (راسپینی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۴)، (فونت و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۵)، (لین و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۶)، (اسمیت و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۷)، (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹)، (رکنی و همکاران، ۱۳۹۵)، (شایان و همکاران، ۱۳۹۵)، (قضاوی و همکاران، ۱۳۹۶)، (شفیعی و همکاران ۱۳۹۸) انجام گرفت. از جمله نوآوری‌های این پژوهش برای نخستین بار از تکنیک تداخل سنجی راداری جهت بررسی مخاطره فرونشست آبخوان دشت نورآباد استفاده شد. از جمله اهداف این پژوهش، شناخت تحلیل فضایی میزان فرونشست آبخوان دشت نورآباد، بررسی میزان فرونشست سالانه در سطح دشت، میزان افت آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در محدوده آبخوان می‌باشد.

#### محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه آبخوان حوضه آبریز نورآباد ممسنی در محدوده جغرافیایی شمال غرب استان فارس، در دامنه‌های جنوب‌غربی سلسله جبال زاگرس چین‌خورده و جنوب کشور قرار دارد. محدوده نورآباد از شمال با شهرستان مصیری (محدوده رستم) و از جنوب با دشت قائمیه و از غرب با دشت ماهور میلانی و از سمت شرق با دشت فهلیان در ارتباط است. در محدوده جغرافیایی  $30^{\circ}15'$  تا  $51^{\circ}$  تا  $20^{\circ}46'$  طول شرقی و  $10^{\circ}55'$  تا  $17^{\circ}15'$ ،  $30^{\circ}$  عرض شمالی واقع است. تنها شهری که در این محدوده وجود دارد شهر نورآباد می‌باشد، که در ارتفاع ۹۳۵ متری از سطح دریا قرار دارد و در ۱۵۰ کیلومتری شیراز مرکز استان فارس قرار دارد. حدود ۲۲۱ کیلومتر مربع از مساحت حوضه را دشت و ۵۳۴ کیلومتر مربع از مساحت حوضه را ارتفاعات در بر می‌گیرد. حداکثر ارتفاع ۲۶۸۴ متر در کوه خانی در جنوب‌شرقی محدوده و حداقل ارتفاع ۶۹۸ متر در مصب رودخانه فهلیان در حوالی روستای باتون شمال غربی دشت می‌باشد. آبخوان در بخش مرکزی دشت واقع شده و حدود ۱۸۶ کیلومتر مربع مساحت دارد و دارای ۱۸ حلقه چاه پیژومتر می‌باشد (شکل ۱).

<sup>1</sup> Sun et al

<sup>2</sup> Larson et al

<sup>3</sup> Poutra

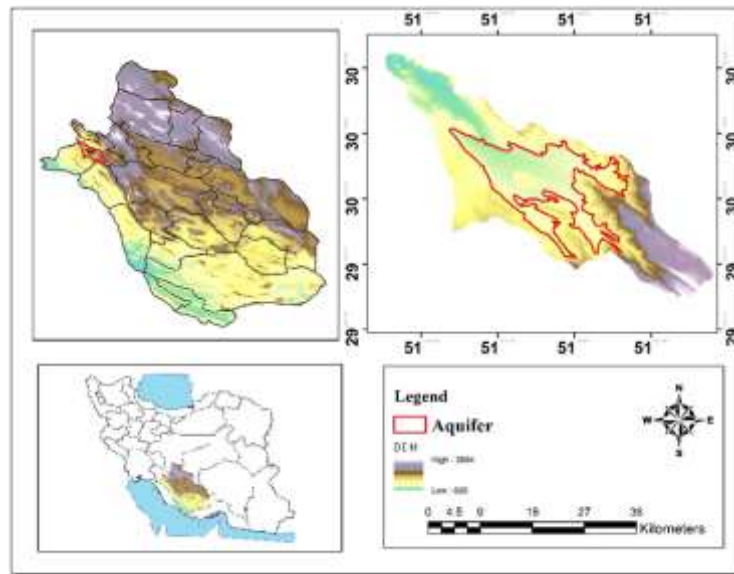
<sup>4</sup> Gallowey et al

<sup>5</sup> Raspinia et al

<sup>6</sup> Faunt et al

<sup>7</sup> Lin et al

<sup>8</sup> Smith et al



شکل (۱): موقعیت محدوده آبخوان نورآباد

## داده ها و روش ها

روش به کار برده در این پژوهش تحلیلی کاربردی می باشد. از داده های آب زیرزمینی شامل چاه های پیژومتر و بهره برداری جهت بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی و از تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه تداخل سنجی راداری استفاده گردید. از مدل GWR جهت بررسی ارتباط بین دو پارامتر افت آب زیرزمینی و فرونشست و همچنین اعتبار سنجی آنها استفاده گردید. در این تحقیق به منظور محاسبه فرونشست از تصاویر ماهواره سنتینل با فرمت (slc) (تک منظر) با پلاریزاسیون vv جهت محاسبه میران نرخ جابه جایی (Displacement) استفاده می شوند. تداخل سنجی راداری روشی برای ترکیب تصاویر SAR، گرفته شده از سنجنده های راداری نصب شده در ماهواره به منظور تهیه نقشه های ارتفاعی، جابه جایی و تغییرات سطح زمین و نیز تعیین سرعت حرکت هدف است. دو تصویر SAR پیش و پس از ایجاد جا به جایی از سطح زمین گرفته می شود. هرگونه جابه جایی در سطح زمین گرفته می شود سبب تغییر در فاصله سنجنده می شود. مطالعات تداخل سنجی راداری به کمک نرم افزار SNAP انجام گرفته است. جدول (۱) مشخصات اینترفروگرام های پردازش شده در منطقه مورد مطالعه را با توجه به خط مبنا نشان می دهد. به منظور کاهش نویز و افزایش همبستگی زمانی اینترفروگرام ها حتی الامکان سعی شد، از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی کوتاه (حدود ۴۵ روز) استفاده شود. ترکیب داده های راداری از مدارهای صعودی و نزولی نیز جهت بهبود مدل های رقومی زمین با به دست آوردن جابجایی در جهات مختلف با استفاده از اینترفرومتری می تواند مورد استفاده قرار گیرد. با عنایت به اینکه در این پژوهش هدف پایش میزان فرونشست است، تنها از داده های صعودی بهره برداری شده است. براین اساس از تعداد ۸ تصویر مربوط به دوره زمانی سال های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ مورد استفاده قرار گرفت در مرحله بعد با استفاده از روش تحلیل فضایی به بررسی ارتباط بین فرونشست و افت آب زیرزمینی پرداخته شد.

## روش تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی تفاضلی راداری تصاویر راداری حاصل از رادارهای با روزه مجازی (SAR) با دارا بودن قابلیت اندازه گیری طول بردار از سنجنده تا سطح زمین، در اندازه گیری های مربوط به تهیه نقشه رقومی ارتفاعی به طور گسترده به کار می روند (گابریل و گلدشتاین، ۱۹۸۸).

تکنیک مورد استفاده در این روش به تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) ملقب است. در تداخل سنجی راداری، فاز حاصل از دو تصویر گرفته شده از یک منطقه معین جهت تولید داخل نگار تداخل داده می شود. در واقع، تداخل نگار حاصل ضرب مختلط دو تصویر

راداری است. این دو تصویر ممکن است توسط یک سکوی هوایی با فضایی که دارای دو آنتن با فاصله معین (خط مبنا) باشد اخذ شده باشند (تداخل سنجی با عبور منفرد) و یا دو تصویر با فواصل زمانی مختلف و از یک سکوی مشابه گرفته شوند (روش تداخل سنجی با عبور مکرر). اختلاف فاز موجود در دو تصویر به صورت لبه یا حاشیه در تداخل نگار نمایش داده شده که هر حاشیه یا لبه مشاهده شده به اختلاف فازی به میزان  $2\pi$  مربوط است. تداخل نگار فراهم شده به روش InSAR قابلیت نمایش تغییرات ارتفاعی و ناهمواری ها را دارد. دقت تغییرات مقادیر ارتفاعی (dz) قابل محاسبه از هر حاشیه تابع ویژگی‌های ماهواره مانند طول خط مبنا ( $B_n$ )، طول موج یا باند مورد استفاده ( $\lambda$ )، زاویه برخورد ( $\theta$ ) و طول بردار مایل ارتفاع ماهواره تا زمین (p) است.

$$dz = (\lambda p \sin \theta) / 2B_n$$
 بر مبنای تحقیقات و مشاهدات، فاز ثبت شده ( $\Delta\phi$ ) موج حاوی اطلاعات و خصوصیات بهتری نسبت به دامنه موج ( $A_p$ ) در تصاویر راداری است (گیگلیا و پریت ۱۹۹۸) بر اساس این، محاسبه ارتفاع یک نقطه حاصل از اختلاف دامنه آن  $\Delta r = p - p^2$  از طریق محاسبه اختلاف فاز بیان شده ( $\Delta\phi$ ) در تداخل نگار و به کمک رابطه زیر امکان پذیر است:

$$Z(x,y) = H - B^2 = (\Delta\phi\lambda) - 2(\Delta\phi\lambda - B\sin(a-\theta)) * \cos\theta \quad \text{رابطه (۱)}$$

روش تداخل سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل‌های رقومی ناهمواری‌های زمین را فراهم می آورد که دقت ارتفاعی بهینه آن برای داده C باند با طول موج ۵/۶ سانتی حدود ۵ متر است. روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) را اولین بار زبکر و گلد اشتاین (۱۹۸۹) ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه گیری پاره‌ای پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابه جایی سطحی زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزه مجازی (SAR) اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. این روش قادر است با استفاده از حداقل سه (دو تصویر + DEM) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت‌های میلیمتری آشکارسازی کند. در عین حال، این دقت تابع طول موج داده مورد استفاده و معادل نصف آن ( $1/2\pi$ ) خواهد بود. روش تداخل سنجی راداری در زمینه اندازه گیری تغییرات سطحی پوسته زمین کارایی در خور تحسینی دارد. اصول بنیادین نحوه اندازه گیری این تغییرات در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است. در این شکل P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست این فضا را در زمان  $t_0$  ثبت و مقدار فاز آن را اندازه گیری می کند. ( $\Phi_m$ ) مقدار نشست فاصله P تا  $P_1$  است که طی زمان مشخصی صورت گرفته است. ( $D_t$ ) برای اندازه گیری این مقدار، سنجنده تصویری دومی در زمان t با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز را بر روی آن اندازه گیری می کند ( $\Phi_s$ ). روش تداخل سنجش تفاضلی، تفاضل فاز  $\Phi_s$  و  $\Phi_m$  را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می دهد ( $\Delta\Phi_{int}$ ). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر (SP-MP) ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده است و مقدار آن به کمک رابطه زیر به دست می آید

$$\Delta\phi = 4\pi SP - MP / \lambda \quad \text{رابطه (۲)}$$

در اندازه گیری مقدار فرونشست به کمک این روش، سطح ناپایدار تصور شده؛ به طوری که سطح از P به  $P_1$  تنزل یافته است. تعیین مقدار نشست در فاصله زمانی دو تصویر (D) تابع اختلاف فاز دو تصویر ( $\Delta\Phi_{int}$ )، به همراه فاز ناشی از اثر توپوگرافی ( $\Phi_{top}$ ) و فاز ناشی از جابه جایی سطح ( $\Phi_{mov}$ ) و همچنین فاز ناشی از اثر اتمفسر ( $\Phi_{atm}$ ) خواهد بود (زیبکر و همکاران، ۱۹۹۴).

$$\Delta\phi = 4\pi PS - PM / \lambda = \Phi_{TOP} + \Phi_{ATM} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این روش، در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم، به کمک مدل رقومی زمین (DEM) تبدیل ارتفاع به فاز، یک تداخل نگار مصنوعی تولید می شود و از این راه به کمک معکوس اطلاعات (DEM)، اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می شود. اختلاف فاز باقی مانده به اثر جابه جایی سطح و اتمفسر تعلق دارد. در نهایت، با نادیده انگاشتن اثر اتمفسر در جابه جایی‌های به میزان بالا (چند سانتی متر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل نگار یعنی تداخل نگار مصنوعی و اصلی فقط بیان کننده مقادیر جابه جایی سطح (نشست) خواهد بود.

جدول (۱): مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری	خط مبنا (متر)
۱	۲۰۱۵/۰۸/۰۵	Slc	IW	صعودی	۲۷۳- تا ۷
۲	۲۰۱۵/۰۹/۲۰	Slc	IW	صعودی	۱۸۱- تا ۱۰۳
۳	۲۰۱۶/۰۸/۵	Slc	IW	صعودی	۹۷- تا ۱۸۱
۴	۲۰۱۶/۰۹/۲۲	Slc	IW	صعودی	۵۳- تا ۲۰۳
۵	۲۰۱۷/۷/۱۹	Slc	IW	صعودی	۱۳۸- تا ۱۴۹
۶	۲۰۱۷/۰۹/۵	Slc	IW	صعودی	۲۰۶- تا ۶۳
۷	۲۰۱۸/۰۸/۷	Slc	IW	صعودی	۶۱- تا ۱۹۸
۸	۲۰۱۸/۱۰/۱۸	Slc	IW	صعودی	۱۴۵- تا ۱۱۴

### مدل رگرسیونی وزنی جغرافیایی (GWR)

در مدل‌های رگرسیون وزنی جغرافیایی، پنجره جستجو با کرنل وقتی ثابت فرض می‌شود که توزیع مشاهدات حول نقاط مرجع در گستره جغرافیایی مورد مطالعه یکسان نباشد در این صورت اگر تابعی یکسان برای وزن دار کردن مشاهدات اطراف نقاط مرجع به کار گرفته شود، این احتمال وجود دارد که برای برخی نقاط در سطح حوزه، از اطلاعاتی کمتر استفاده شده و در نهایت یک مدلی غیر دقیق بدست آید. حتی ممکن است برای برخی نقاط که تجمع مشاهدات حول آن بیشتر است از اطلاعات زیاد و نامرتب استفاده شود و باز از دقت مدل کاسته شود. برای مقابله با این احتمال در روش رگرسیون وزنی جغرافیایی، پهنای باند برای محاسبه تابع وزن دهی (Wu) با پراکندگی مشاهدات حول نقطه مرجع تطبیق داده می‌شود. به عبارت دیگر چنانچه مشاهدات پراکنده باشند، پهنای باند بیشتری در نظر گرفته می‌شود و اگر مشاهدات حول نقطه مرجع متمرکز باشند، پهنای باند کمتری انتخاب می‌شود. در واقع روش رگرسیون وزنی جغرافیایی همان روش حداقل مربعات معمولی است با این تفاوت که به مشاهدات بر اساس مکان یا مختصات مکانی آنها نسبت به نقاط مرجع وزن داده می‌شود. هر پارامتر یا ضریب مدل GWR دارای یک علامت و مقدار می‌باشد. اگر علامت یک ضریب، مثبت باشد پس افزایش مقدار متغیر مستقل باعث افزایش متغیر وابسته خواهد شد. اگر علامت آن منفی باشد، آن متغیر دارای اثر کاهش روی متغیر وابسته می‌باشد. مدل رگرسیون چند متغیره خطی GWR به صورت زیر می‌باشد

$$Y_u = \beta_0 i(u) + \beta_1 i(u) x_{1i} + \beta_2 i(u) x_{2i} + \beta_m i(u) m_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

در صورتیکه مؤلفه وزن مشاهدات در معادله رگرسیون وارد شود، رابطه بردار پارامترها با ضرایب بتا، به یک رابطه رگرسیون وزنی جغرافیایی تبدیل می‌شود و مشاهدات نزدیک نسبت به مشاهدات دورتر وزن بیشتری دارند (توبلر ۱۹۷۰) ضرایب یا پارامترهای مدل با رابطه زیر تخمین زده می‌شوند (توبلر ۱۹۷۰).

$$B(u) = (X^T W(u) X)^{-1} X^T W(u) \quad \text{رابطه (۵)}$$

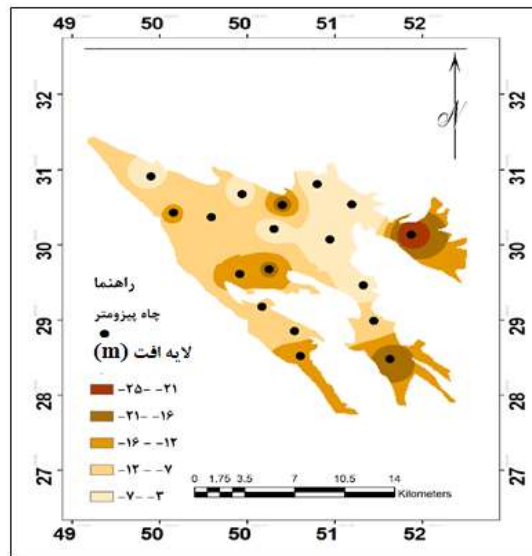
که  $W(u)$  ماتریس وزن (ماتریس مربع) در موقعیت  $(u)$  مختصات متریک  $X^T$  ترانهاده ماتریس متغیرهای مستقل  $(X)$  می‌باشد. ماتریس وزن تابع مختصات متریک با استفاده از رابطه نمایی زیر قابل تخمین می‌باشد:

$$W(u) = e^{-0.5(d(u)/h)^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که  $W(u)$  وزن جغرافیایی مشاهدات: در موقعیت مکانی  $d(u)$ ، اندازه فاصله مکانی بین مشاهدات  $i$  و  $h$  پهنای باند انتخابی بر حسب متر می‌باشد.

## تجزیه و تحلیل

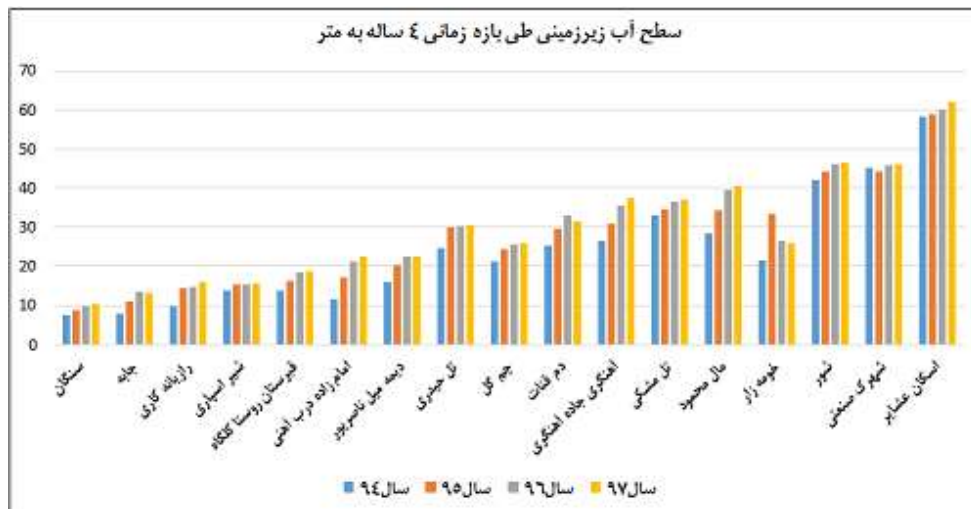
با بررسی وضعیت سطح آب چاه‌های پیزومتر در طی سال‌های حداقل ۱۳۸۲ و حداکثر ۱۳۹۴ در بازه زمانی ۱۲ ساله از تفاضل دو سال مذکور نقشه افت آب زیرزمینی به دست آمد شکل (۲) و نتایج نشان داد که میزان افت به مراتب افزایش یافته است. در بخش جنوب شرقی، مرکزی و جنوبی آبخوان واقع در چاه‌های اسکان عشایر و خومه زار، شور و شهرک صنعتی تل مشکی بیشترین میزان افت را داشته است که مقدار افت آن برابر ۲۲- متر طی این بازه زمانی بوده است. افزایش افت سطح آب در این منطقه باعث شده که تعدادی از چاه‌ها که مصارف شرب داشته خشک و با چند متر فاصله به حفاری چاه‌های جدیدتری در این منطقه شده است. فعالیت‌های کشاورزی هم در این منطقه نقش بسیار زیادی در افزایش عمق چاه‌ها و حفارچاه‌های غیر مجاز در سطح دشت دارد.



شکل (۲): نقشه افت آب زیرزمینی آبخوان نورآباد

## بررسی سطح آب زیرزمینی دشت نورآباد

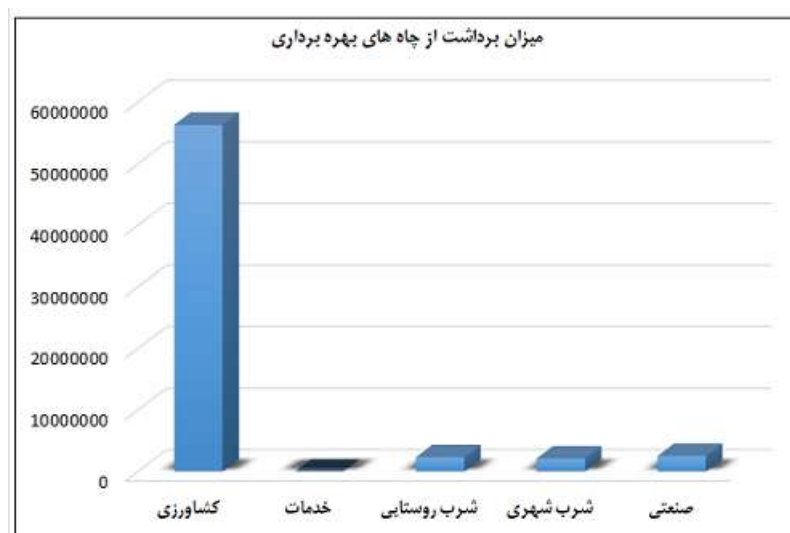
تغییرات سطح آب زیرزمینی به موقعیت محل نسبت به مناطق تغذیه و تخلیه و هم چنین مقادیر تغذیه و تخلیه ی این محل‌ها بستگی دارد و به همین دلیل روند تغییرات سطح آب بخش‌های مختلف آبخوان با یکدیگر متفاوت است. نتایج حاصل از نقشه‌ها و نمودارهای روند تغییرات سطح آب چاه‌های پیزومتری در آبخوان نورآباد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود. با توجه به اینکه بررسی سال به سال روند تغییرات با توجه به بارش و منابع تغذیه و ورودی و خروجی آبخوان متفاوت است در اینجا به یک نتیجه گیری کلی از دوره آماری ۱۳۹۸-۱۳۸۲ پرداخته می‌شود. شکل (۳) وضعیت سطح آب چاه‌های پیزومتر در سطح دشت را در چهار سال ۱۳۹۴-۱۳۹۸ نشان می‌دهد که در این سال‌ها میزان برداشت در سطح آب به مرور افزایش یافته است. به گونه‌ای که چاه اسکان عشایر، واقع در شرق آبخوان در سال-های اخیر به علت برداشت بیش از حد خشک شده اند ۱۰۰ متر یا حدود ۲۰۰ متر دورتر اقدام به حفر چاهی دیگر نموده اند.



شکل (۳): نمودار سطح آب زیرزمینی در بازه ۴ ساله

### بررسی میزان تخلیه و آبدهی در محدوده آبخوان

در منطقه آبخوان نورآباد حدود ۱۱۴۰ حلقه چاه بهره برداری وجود دارد که از این تعداد حدود ۶۰۰ حلقه آن مربوط به فعالیت‌های کشاورزی می‌باشد در سطح منطقه بیشترین میزان کشت مربوط به گندم، برنج و صیفی جات می‌باشد که نقش بسیار موثری در تخلیه آبخوان دارد شکل (۴) نمودار میزان آب مصرفی در سطح آبخوان را نشان میدهد که میزان برداشت فعالیت کشاورزی حدود میلیون ۵۶۳۱۶۱۸۹ متر مکعب در سال رو به خود اختصاص داده است. و کمترین آن مربوط به مصارف خدماتی می‌باشد (سازمان آب منطقه اب استان فارس، ۱۳۹۸).

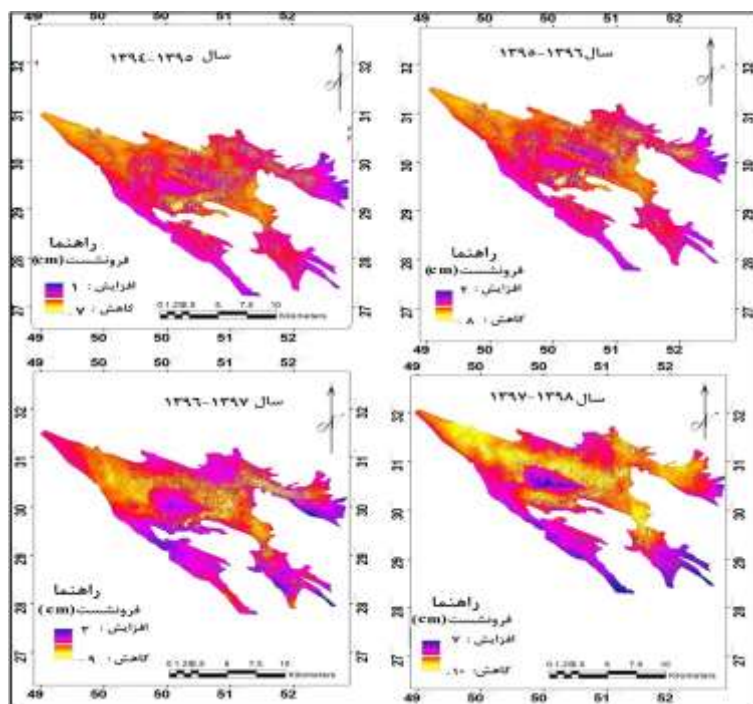


شکل (۴): نمودار میزان برداشت از چاه‌های بهره برداری

### محاسبه نرخ فرونشست با استفاده از تداخل سنجی راداری

در این تحقیق، با روش تداخل سنجی تفاضلی داده‌های راداری، میزان و دامنه فرونشست در آبخوان دشت نورآباد تبیین شده است. به منظور تولید نقشه‌های معرف الگوی فضایی میزان و دامنه نشست از زوج تصویر سنجنده‌های راداری به کار رفته در بازه زمانی متفاوت

جهت انجام عملیات تداخل سنجی استفاده شد. با توجه به تغییرپذیری میزان و دامنه نشست، ناشی از برداشت آب به عنوان عامل ایجابی و بارش به عنوان عامل تعدیل کننده، تصاویر در دوره‌های زمانی منطبق بر تقویم زراعی و فصل‌های بارانی مورد پردازش قرار گرفت. رخداد چنین پدیده‌ای با توجه به ساختارهای زراعی در سایر نقاط ایران، تا حدود زیادی در خور تأمل است؛ زیرا اصولاً در ایران به سبب حاکم بودن تقویم زراعی خاص آبیاری در بهار و تابستان و همچنین وجود بارش در زمستان و اوایل بهار، امکان شارژ نسبی سفره و تأثیر گذاری آن در میزان نشست برای دوره‌های بعدی امری پذیرفته و به نسبت فراگیر است. یافته‌ها مؤید رخداد فرونشست به طور میانگین سالانه ۴ سانتیمتر در عرصه‌ای به مساحت ۱۸۶ کیلومتر مربع است. با توجه به شکل (۵). با تهیه خروجی تصاویر راداری طی ۴ سال آماری نتایج نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۴ حداکثر میزان نشست ۷ سانتیمتر بوده است و در سال ۱۳۹۵ به ۸ سانتیمتر افزایش یافته و در سال ۱۳۹۶ برابر با ۹ سانتیمتر و در سال ۱۳۹۷ برابر با ۱۰ سانتیمتر می‌باشد. در پایان با محاسبه میانگین این چهار سال میزان نشست در سطح آبخوان به مراتب افزایش می‌یابد که مناطق در بخش‌های مرکزی و شرقی آبخوان بیشترین میزان نشست را در سطح آبخوان دارد که در مناطق مسکونی و کشاورزی منطقه توسعه یافته است به گونه‌ای که آثار و شواهد این نشست‌ها در منازل مسکونی و زمین‌های کشاورزی نمایان است با توجه به جدول (۲) در بخش تحلیل به بررسی وضعیت نرخ فرونشست در محدوده مورد مطالعه با استفاده از تصاویر رادار در طی سال‌های مذکور پرداخته شد و نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۴ برابر با ۸ کیلومتر مربع می‌باشد که نسبت به سال ۲۰۱۴ می‌باشد در سال ۱۳۹۵ برابر ۳۴ کیلومتر مربع و در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ برابر ۴۰ و ۸۶ کیلومتر مربع می‌باشد. باتوجه به نقشه‌ها می‌بینیم در این ۴ سال متوالی مشاهده می‌کنیم که هر ساله بر میزان نشست در سطح دشت افزوده شده و به این ترتیب نشست در سطح دشت به نوعی خطر آفرین تبدیل شده است.



شکل (۵): نقشه فرونشست آبخوان نورآباد سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸

اعتبار سنجی یافته‌های تکنیک‌های سنجش از دوری فرآیندی ضروری است که می‌بایست از طریق پیمایش میدانی صورت پذیرد. در این تحقیق به منظور تعیین اعتبار یافته‌های تکنیک مورد استفاده و هم چنین جمع‌آوری شواهد مکانی از حدوث پدیده نشست عملیات پیمایشی به انجام رسید. بدین منظور از مناطق واقع در معرض نشست مستخرج از پردازش داده‌های SAR در منطقه مشاهده میدانی انجام پذیرفت. بررسی‌های زمینی موید وجود ترک‌های ناشی از نشست زمین در مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی می‌باشد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در سطح دشت وجود ترک‌ها در منطقه نمادی از توسعه فرونشست در دشت می‌باشد به گونه‌ای که در



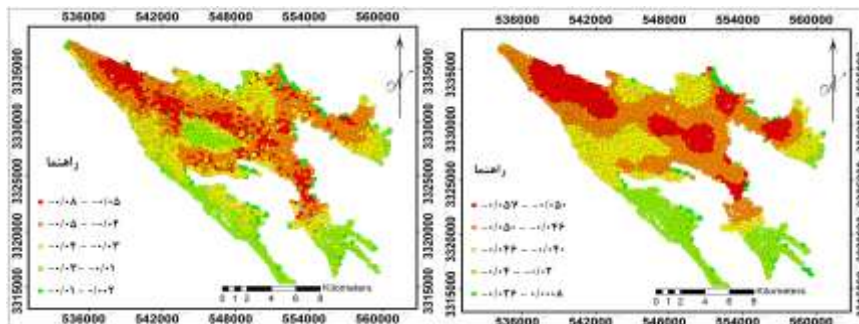
سال‌های اخیر این آثار فرونشست در سطح دشت خسارت‌های بسیاری در پی داشته است این ترک‌ها و درز و شکاف‌ها سبب بروز فرسایش، سیلاب‌های فروان در سطح منطقه می‌شود به دلیل اینکه راهی برای نفوذ آب به درون زمین نیست و فضای خالی بین ذرات به علت برداشت‌های فروان از بین رفته است. تحلیل و از بین رفتن زمین‌های کشاورزی می‌شود. (۶).



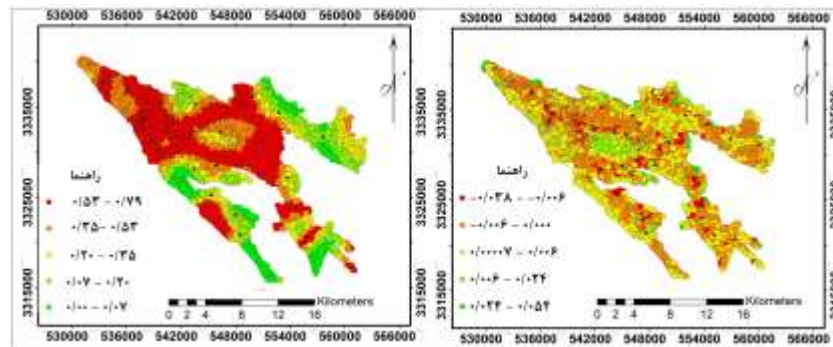
شکل (۶): نمایی از آثار فرونشست در آبخوان

#### تحلیل فضایی افت آب زیرزمینی و فرونشست آبخوان نورآباد

در شکل (۷) نقشه پیش بینی نشست نشان داده شده است براساس پیشگویی فضایی حاصل از GWR در مناطق مرکزی آبخوان مقادیر فرونشست بالا می‌باشد و مناطق جنوبی میزان فرونشست کاهش یافته است؛ به عبارتی افت آب زیرزمینی به خوبی توانسته است نشست زمین را تبیین نماید و نقش این عامل را در مدل رگرسیون موزون جغرافیایی نشان دهد. میزان مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیشی بینی شده دلالت بر نوع ارتباط قوی دارد با این تفاسیر از جمله دستاوردهای جالب روش‌های (آمار فضایی) در مدل GWR این است که می‌توان برای هر نقطه‌ی ضریب تعیین و نقشه‌های تخمین اصلی از مدل را تهیه نمود. چنانچه در شکل (۸) مشاهده می‌شود مقادیر بالای R2 در قسمت‌های مرکزی آبخوان که حدود  $0/79 - 0/53$  مدل حادث شده است همچنین مقادیر کم R2 در قسمت‌های جنوبی آبخوان که حدود  $0/006 - 0/007$  می‌باشد که نشان از تخمین خوب مدل در برآورد متغیر وابسته و متغیر توضیحی پیش بینی کننده است. توزیع فضای باقیمانده خط‌های مدل GWR دونکته را نشان میدهد خروجی‌های مدل به مقادیر واقعی نزدیکتر هستند. دوم اینکه نقشه حاصل نشان دهنده مقادیر پایین خطا در محدوده می‌باشد.



شکل (۷): (الف): لایه مشاهده شده فرونشست و افت ب): لایه پیش بینی شده فرونشست و افت



شکل (۸): (الف): RMSE جذر میانگین مربع خطا (ب): local R2 آبخوان نورآباد

## بحث

جهت درک بهتر علت فرونشست زمین در آبخوان نورآباد تغییرات سطح آبهای زیرزمینی در ۱۸ حلقه چاه پیزومتریک و میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۴ ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۸) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که عامل اصلی فرونشست زمین در آبخوان نورآباد، استفاده بیش از حد از سفره آب زیرزمینی می باشد. افت سطح آب زیرزمینی می تواند بر اثر عوامل مختلفی صورت بگیرد. یکی از موثرترین عوامل افت سطح آب زیرزمینی، برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی است که باعث کاهش فشار در لایه‌های زیرین می شود و همچنین فشار ناشی از وزن لایه‌های بالایی موجب کاهش حجم در لایه‌های پایینی می شود و در نتیجه نشست وسیع در زمین صورت می گیرد. از طرف دیگر کاهش بلند مدت سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت بی رویه در آبخوان‌های دارای لایه‌های سیلت و رس باعث تحکیم لایه‌ها می شود. بنابراین هرچه رسوبات ریزدانه تر باشد خطر فرونشست بیشتر می شود. دربخش مرکزی آبخوان نورآباد به علت وجود رسوبات رسی و حفر چاه‌های غیر مجاز بهره برداری افزایش یافته است. و چون پمپاژ و تخلیه بیش از حد از چاه‌ها بخصوص در زمین‌های کشاورزی (از جمله کشت‌های دارای نیاز آبی زیاد شامل: برنج، ذرت و صیفی جات) اتفاق می افتد، در نتیجه باعث می شود که خطر فرونشست در این زمین‌ها به مراتب افزایش یابد. با این تفاسیر هرساله میزان فرونشست در مناطق پر خطر آبخوان رو به افزایش است. این افزایش به طور میانگین هرساله ۴ سانتیمتر می باشد. به منظور درک بهتر این موضوع با اعمال تحلیل فضایی به روش GWR نتایج بررسی بین دو پارامتر فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی نشان می دهد که با افت میزان سطح آب زیرزمینی میزان فرونشست افزایش می یابد و همبستگی مستقیم و صعودی بین این دو فاکتور وجود دارد. اکثر دشت‌های ایران هم مانند سایر حوضه‌های شناخته شده جهان از جمله لاس وگاس، مکزیکوسیتی، مکزیک (دیویس، ۲۰۰۹) و نیواورلئان و ایالات متحده (دیکسون، ۲۰۰۶) با مخاطره فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی رو به رو می باشند. از این رو استخراج غیرقانونی و کنترل نشده آب زیرزمینی حتی مناطق غیرکشاورزی را نیز تهدید می کند و در نتیجه می تواند آسیب بسیار جدی به سطوح زیرساختی به دلیل تغییر سطح زمین ایجاد شود. خسارت‌های ایجاد شده در بخش مسکونی و کشاورزی به صورت درز و شکاف‌هایی وسیع قابل رویت می باشد. اجرای مدیریت بهینه از منابع آب می تواند باعث کاهش خطرات احتمالی ناشی از فرونشست سطح زمین شود. (ایرلند و همکاران، ۱۹۸۴). دشت نورآباد در سال‌های اخیر به علت برداشت‌های بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، جز دشت‌های ممنوعه از لحاظ برداشت آب زیرزمینی محسوب می شود و پیشبینی می شود این محدودیت تا سال ۲۰۲۲ ادامه داشته باشد.

## نتیجه گیری

نشست زمین پدیده‌ای فراگیر در سطح جهان است که عمدتاً در اثر بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی و شدت یافتن افت سطح آن، نمود کمی و کیفی قابل توجهی در چند دهه اخیر داشته است. نتایج مطالعه ی فرونشست زمین نشان داد که عوامل متعددی در بروز پدیده فرونشست زمین موثرند براین اساس، بیشترین تاثیر بر فرونشست زمین مربوط به آبرفت‌هایی است که نفوذپذیری به

نسبت خوبی دارند و دارای مقداری ذرات ریزدانه می باشند. سازند ریزدانه و در عین حال نفوذپذیر، در بین طبقات مختلف تمامی پارامتر ها، زمینه سازترین عامل فرونشست زمین در منطقه ی مورد مطالعه می باشد نرخ فرونشست به صورت میانگین حدود ۴ سانتی متر در سال می باشد و میانگین ۴ ساله ۱۶ سانتی متر می باشد میانگین مساحت آبخوان که فرونشست صورت گرفته است در طی ۴ سال حدود ۳۶ کیلومتر مربع حدود ۵ درصد از مساحت آن را شامل می شود مناطق با تمرکز بالای چاه ها و بیشترین میزان افت و برداشت آب زیرزمینی و تمرکز شهرها و روستاهای موجود است. در این مناطق به سبب تامین نیازهای آبی جامعه سکونتگاهی شامل شهر نورآباد و مناطق اطراف و همچنین تامین نیازهای آبی بخش صنعت از جمله کارخانه ها و فعالیت های کشاورزی، دست اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب های زیرزمینی بسیار بالاست به همین دلیل میزان افت بالا بوده است که این عوامل با دخالت اقلیم خشک این منطقه باعث استعداد بالای این مناطق در بحث فرونشست شده است و جزو مناطق بحرانی شهرستان در نقشه فرونشست شناسایی شده است. نتایج تداخل سنجی راداری نشان میدهد نشان می دهد که برداشت بی رویه از سطح ذخایر زیرزمینی موجب فرونشینی بخش مرکزی آبخوان شده و همچنین وجود قنوات متعدد در سطح آبخوان خسارت هایی را به مراکز مسکونی وارد کرده است. یکی از مناطقی که بیشترین میزان خطر فرونشست را در دشت دارد، در بخش شرقی، مرکزی و جنوبی میزان افت آب زیرزمینی در محدوده آبخوان طی ۱۴ سال آماری حدود ۲۲ متر در همان چاه مذکور می باشد و نتایج حاصل روش GWR نشان می دهد میزان local R2 در بخش های مرکزی آبخوان که حدود حداکثر ۷۹٪ می باشد و گویا ارتباط بالای بین فرونشست و افت آب زیرزمینی میزان Residual به دست آمده در بخش مرکزی برابر با ۰/۰۰۰۷-۰/۰۰۰۶ که گویا ضریب معنا داری بالا در این بخش از محدوده آبخوان می باشد. از جمله راهکارها و پیشنهادات موثر در جهت کاهش خطر فرونشست در این دشت، جلوگیری از حفر چاه های غیر مجاز، احیا قنات های متروکه، ایجاد آبیاری قطره ای، و همچنین اختصاص گونه های دارای نیاز آبی کم می باشد.

## منابع

- حافظی، مقدس ناصر، غفوری، محمد، قزی، اعظم، (۱۳۸۹). مشکلات قنات‌های قدیمی در شهر مشهد، همایش زمین‌شناسی مهندسی ساخت‌گاه‌ها و ابنیه‌های فنی و تاریخی، صص ۵۳۶-۵۳۱.
- رکنی، جعفر، حسین زاده، رضا، لشکری پور غلامرضا، ولایتی سعد الله، (۱۳۹۵). بررسی فرو نشست زمین، چشم اندازه‌ها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های ترا کمی مطالعه موردی: دشت نیشابور، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۶(۲۴) ۳۸-۲۱.
- زندى، رحمان، فرزين کيا ربابه، شفيعى، نجمه، (۱۳۹۸). فرونشست و تداخل سنجى رادارى، انتشارات ماهواره.
- سازمان آب منطقه‌ای استان فارس، گزارش بهنگام سازی اطلس منابع آب حوضه آبریز رودخانه‌های هنديجان و جراحی، (۱۳۹۸)، جلد ۴، صص ۲۱۶-۱.
- شاپان، سیاوش، یمانی، مجتبی، یادگاری، منیژه (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۹، صص ۱۵۸-۱۳۹.
- شريفی کيا، محمد، (۱۳۹۱)، تعيين ميزان و دامنه فرونشست به کمک تداخل سنجى رادارى در دشت نوق - بهرمان، مجله برنامه ريزى و آمايش فضا، دوره شانزدهم، شماره ۳.
- شفيعى، نجمه، گلى مختارى، ليلا، اميراحمدى، ابوالقاسم، زندى، رحمان، (۱۳۹۸)، بررسى فرونشست آبخوان نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجى رادارى، نشریه پژوهش‌های کمی ژئومورفولوژی،
- عطايی، محمد، (۱۳۹۰)، معدن‌کاری زیرزمینی، جلد ۳، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قضاوى، رضا، رضانى سربندى، مجيد (۱۳۹۶)، بررسى تأثیر تغييرات ميزان بارش و برداشت از آب‌های زیرزمینی بر تغييرات کمی و کیفی آب آبخوان (مطالعه‌ی موردی: دشت رفسنجان)، فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۲ صص ۱۱۱-۱۲۹.
- Bates, R. L., and Jackson, J. A., 1980, "Glossary of Geology." American Geological Institute. Second edition, Falls Church, Virginia, 749 p.
- Gallowey, D.L., Burbey; T.J., 2011, Regional land subsidence accompanying groundwater extraction, Hydrogeol, J., Vol. 19, pp1459-1486.
- Gabriel, A.K., R.M. Goldstein and H.A. Zebker, 1989. Mapping small elevation changes over large areas - Differential radar interferometry. J. Geophys. Res., 94(B7), pp. 9183-9191.
- Helm, D.C., Looney, B.B. and Falta, R.W., 2000, Fissures in Yucca Flat dry lake bed, Nevada test site. Vadose Zone, Science and Technology Solutions. Battelle Press, Columbus, OH [CD-ROM].
- Faunt, C., Sneed, M., Traum, J., Brandt, R., 2015, Water availability and Land Subsidence in the Central Valley, California USA, Hydrogeol journal, spring 15(3), pp.452-470.
- Khorrami M, Alizadeh B, Ghasemi Tousi E, Shakerian M, Maghsoudi M, Rahgozar P. 2019. How Groundwater Level Fluctuations and Geotechnical Properties Lead to Asymmetric Subsidence: A PSInSAR Analysis of Land Deformation over a Transit Corridor in the Los Angeles Metropolitan Area. Remote Sensing journal, 11(4):257-270.
- Larson, K.J., Basaglu, H., Marino, M.A., 2001, Predication of optimal safe ground water yield and Land subsidence in Los Banos Kettleman city area, using a calibrated numerical simulation model, journal Hydrology, Vol 242, pp79-102

- Lin, B., Liming, J., Hansheng, W., Qishi, S. 2016, Spatiotemporal Characterization of Land Subsidence and Uplift (2009–2010) over Wuhan in Central China Revealed by TerraSAR-X InSAR Analysis.
- Putra, D.P.E. Setianto, A. Keokhampui, K. and Fukuoka, H, 2011, Land Subsidence Risk Assessment Case Study: Rongkop, Gunung Kidul, Yogyakarta-Indonesia. The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference on Geo-Disaster Mitigation in ASEAN “Past tragedies are the lessons for future mitigation”. The Royal Paradise Hotel & Spa, Phuket, Thailand.
- Raspinia, F, Loupasakis., Constantinos; Rozosb, Dimitrios; Adamc, Nico; Moretti, Sandro, 2014, Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry, ELSEVIER International Journal, vol28, pp78-89.
- Smith R G, Knight R , Chen J. Reeves J A , Zebker H A , Farr T , Liu Z. 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California, Water Resources Research journal, 53(2): 147-163.
- Sun.H, Grandstaff.D, Shagam.R, (1999). Land subsidence due to groundwater Withdrawal: potential damage of subsidence and sea level ruse in southern New Jersey, USA, Environmental Geology 37(4) April 1999 7 Q Springer-Verlag. pp 290-296.
- Tobler, W.R, 1970, A Computer movie simulating urban growth in the Detroit region, Economic Geography, 46(2): 234-24.
- Zebker, H. A., (2000). “Studying the earth with interferometric radar.” Computing in Science and Engineering, Vol. 2(3), pp. 52-60.