مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۸۹، جلد سوم، شماره ۳ و۴، صفحه ۴۳ تا ۵۸

بررسی پی‌آمدهای ناشی از پدیده فرونشست در اراضی و دشت‌های مسکونی ایران

محمد شریفی‌کیا*[۱]

دریافت مقاله: ۹۰/۷/۶ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۵

چکیده

فرونشست ناشی از ازدیاد بهره برداری از منابع آب زیرزمینی نسبت به توان ترمیمی آن در برخی نواحی داخلی ایران، سابقه طولانی دارد. تشدید این شرایط ناشی از خشکسالی‌های مکرر در سال‌های اخیر، علاوه بر نواحی خشک ایران مرکزی، نواحی نیمه خشک یا نسبتاً مرطوب شمال‌غربی کشور را با این پدیده درگیر ساخته است. فراگیری فرونشست در اغلب نواحی مسکون و پرجمعیت کشور و در پی داشتن خسارات فراگیر، این پدیده را در فرم یک مخاطره زمینی برای کشور مطرح ساخته است. با توجه به فراهم بودن زیرساخت مخاطره آمیز لرزه‌ای برای اغلب نواحی کشور، همزادی و همزمانی رخداد زمین لرزه در اراضی که فرونشست در آن حادث شده، امکان تشدید خسارات و ایجاد تلفات وسیع برای زایش یک فاجعه را فراهم آورده است. این تحقیق با هدف بررسی وضعیت فراگیری پدیده فرونشست در ایران و هم‌نهادسازی آن با الگوی توزیعی سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌ها، به تبیین روند تبدیل پدیده به مخاطره پرداخته، سپس با سنجش شرایط مخاطره آمیز ناشی از همزادی آن با سایر مخاطرات، قابلیت پذیری رویداد فاجعه احتمالی را در برخی بسترهای نا امن معرفی نموده است. بدین منظور و با استفاده از مطالعات مقدم اطلاعات مربوط به نرخ و دامنه فضایی فرونشست برای ۱۸ دشت کشور استخراج و برای ۱۵ دشت دیگر نیز این مساله به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری تبیین گردید. یافته نهایی نشان داد که فرونشست علاوه بر تهدیدات و توان خسارت‌زایی و فاجعه آفرینی فراگیر آن در نواحی مسکون، قادر به زایش مخاطره سیل و فاجعه‌سازی در رویداد زمین لرزه‌های کم شدت و عموماً غیر مخرب است. این تحقیق روشن ساخت رویداد فرونشست در دشت‌های کم شیب کشور، قادر است از طریق تغییر در تراز ایستایی سطح آب زیرزمینی، مخاطره سیل را ایجاد و یا تشدید نماید. به نحوی که بسیاری از نواحی مسکون کشور با زایش دو مخاطره نوین (سیل و فرونشست) مواجه می‌باشند.

کلید واژه‌ها: *فرونشست، زمین‌لرزه، مخاطره، فاجعه، تداخل سنجی راداری، سیل*

۱. استادیار گروه سنجش از راه دور، دانشگاه تربیت مدرس
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

فرونشست زمین (Land subsidence) برابر تعریف ارائه شده توسط یونسکو عبارت است از فرو ریزش یا نشست سطح زمین که به دلایل متفاوتی در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد. به طور معمول این اصطلاح به حرکات قائم و رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار افقی نیز همراه باشد، گفته می‌شود. پدیده یاد شده، زمین لغزش(landslide) را به دلیل اینکه حرکت آن‌ها دارای بردار افقی قابل توجهی می‌باشد و همچنین نشست (settlement) در خاک‌های دستی را شامل نمی‌شود (Allen,1984). به لحاظ روند شکل‌گیری فرونشست حرکت کند و بطئی نشست زمین و یا فروریزش ناگهانی آن را شامل شده و رویداد آن در اغلب موارد متأثر از سه زمینه متفاوت و متمایز (قوام و پیوستگی لایه‌های رسی و سیلتی متشکله لایه آبدار، زهکشی و اکسیداسیون ساختمان خاک، تجزیه و متلاشی شدن سنگ‌های مستعد) مرتبط با عامل آب است.(Allan, 2005). رخداد پدیده مورفولوژیکی فرونشست می‌تواند متأثر از عوامل طبیعی (آتشفشان، ریزش زمین در محل سنگ‌های انحلال‌پذیر، گسل، رانش قاره‌ای، چین‌خوردگی، آتش‌سوزی زیرزمینی) و عوامل انسانی (استخراج معادن، استخراج آب زیرزمینی و نفت‌وگاز، ساخت و ساز) باشد. هرچند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (Roy .*et.al*, 2005; Tony .*et,al,* 2005; Margarita, *et.al,*2005).

امروزه فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی به عنوان یک معضل و مخاطره، جوامع ساکن بر آن را در دنیا تهدید می‌کند. طبق برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه یافته تا در حال توسعه؛ در معرض این پدیده قرار دارند(Huanyin, *et.al*, 2005; Hua *et al*., 2004) از جمله مشهورترین این مناطق می‌توان از دره‌ی پو (ایتالیا)، مکزیکوسیتی(مکزیک)، آنتلوپ و سانتاکلارا (ایالات متحده)، بانکوک (تایلند) شانگهای(چین) جاکارتا (اندونزی) کلکته (هندوستان) پاریس و برلین(اروپا) نام برد.(Ding *et,al.* 2004; Whittow, 1980; Donald, 2005; Duong, 2005; Phien *et al*, 2006; Wang *et.al*,2009; Shelley *et.al*, 2007;Thomas *et.al*, 2009; Goudie, 2010). فراگیر بودن مساله فرونشست زمین و مخاطرات ناشی از آن پژوهشگران زیادی را متوجه این مساله نمود و تحقیقات مختلفی پیرامون پدیده فرونشست وعوامل ایجابی آن شکل گرفته است. بررسی یافته‌های محققین متأخر، روشن ساخت عمده‌ترین عامل ایجابی پدیده فرونشست مساله برداشت غیر اصولی از منابع آب زیرزمینی بوده است. تحقیقات مؤید رخداد پدیده فرونشست زمین، متأثر از این عامل در اغلب کشورهای دنیاست. به طوری‌که از کشورهای استوایی و حاره‌ای مانند مالزی و اندونزی تا کشورهای نسبتاً مرطوب عرض میانی مانند تایلند، هند، ژاپن، اروپا، امریکا و نهایتاً نواحی خشک و نیمه‌خشک مانند کشورهای خاورمیانه، شمال آفریقا، آسیای میانه و بخش‌هایی از امریکا با این مساله دست به گریبان هستند (Pulawski & Obro 1976; Galloway *et.al.*,1998; Fruneau *et.al.*, 2000; Hiroshi *et.al*., 2003; Psimoulis, *et.al*.2007; Tung *et.al.* 2007). مبتنی بر تحقیقات انجام شده، رخداد فرونشست علاوه بر برداشت منابع آب زیرزمینی، متأثر از عواملی چون آتش‌سوزی زیرزمینی(Chatterjee *et.al.* 2006) برداشت منابع نفت وگاز (Bernard *et.al*.,1991) استخراج معادن (علی‌عسکری، ۱۳۷۴؛ Gollaway *et.al*. 1999) و کارست و انحلال سنگ(Duong *et.al*., 2010) نیز گزارش شده است.

در ایران فرونشست زمین بیش از ۳ دهه سابقه دارد. حاکمیت شرایط اقلیمی خشک دراغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های رو به افزایش کشاورزی، مصارف آب شرب و صنعتی از منابع آب زیرزمینی، زیرساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. از حدود سه دهه قبل توسعه کشاورزی‌های تجاری و معادن، حفر بی‌رویه چاه‌های آب و برداشت بیش از ظرفیت قابل ترمیم دشت‌ها، روند فرونشست زمین در اراضی زراعی دشت‌های مرکزی ایران را شکل داد. متأسفانه تداوم خشک‌سالی و توأمان افزایش میزان وابستگی به منابع آب زیرزمینی در دهه گذشته، دامنه نواحی واقع در معرض فرونشست را به نواحی نسبتاً مرطوب‌تر غرب

و شمال‌غربی ایران گسترش داد. علاوه بر رخداد پدید فرونشست متأثر از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، بهره‌برداری غیر صیانتی از منابع نفت و گاز در جنوب غربی کشور، عامل دیگر ظهور و رویداد پدیده فرونشست شده است.

میزان فرونشست در دهه نخست به دلیل عدم اندازه‌گیری نرخ و دامنه آن، عمدتاً براساس مشاهدات محلی و از روی مقادیر بریده شده لوله‌های جدار(casings) چاه‌های کشاورزی تخمین زده می‌شد (دهقانی،۱۳۸۷). نخستین بررسی‌های علمی در جهت تعیین نرخ فرونشست از حدود دو دهه قبل در دشت رفسنجان که دارای بالاترین سابقه و نرخ فرونشست بود، آغاز گردید. (شفیعی ثابت، ۱۳۷۳ & Toufigh ;Shafeisabet,1995). در سال‌های بعد با فراگیر شدن مساله، مطالعات گسترده‌ای با تکنیک‌های تقریباً متنوع در سایر نواحی ایران نیزصورت گرفت. رخ داد پدیده فرونشست هر چند از فرکانس و توالی نسبتاً زیادی برخوردار است، لیکن به واسطه حرکت بسیار کند و بطئی زمین، در اغلب مواقع درک و اندازه‌گیری آن به درستی میسر نیست. بدین سبب در ابتدا، رویداد این پدیده در اغلب نواحی تنها زمانی مورد شناسایی قرار می‌گرفت که در مورفولوژی سطحی و بخصوص در تأسیسات و تجهیزات اثرگذار گردیده و تخریب و خساراتی به‌بار می‌آورد. هرچند چنین روندی هنوز در برخی از کشورها از جمله ایران مشاهد می‌شود؛ لیکن در برخی کشورها، نواحی که در معرض این پدیده قرار دارند، با ابزارهای ویژه‌ای مورد مطالعه و پایش قرارگرفته؛ ظهور پدیده فرونشست و نرخ و دامنه آن با دقت نسبتاً زیاد شناسایی شده و به منظور تعدیل خسارات اقدامات پیشگیرانه و تعدیل کننده به اجرا در می‌آید (Abidin *et.al*.,2006; Halim & Rusli, 2006; Anna *et.al*. 2003) تکنیک‌هائی مانند پایش سنجش از دور & D-InSAR) (GPS، پایش هیدرولوژیکی و متدهای ژئوتکنیکی از جمله اصلی‌ترین ابزاری اندازه‌گیری، مشاهده و پیش‌بینی نرخ و دامنه پدیده فرونشست به شمار می‌روند.

پدیده طبیعی فرونشست در پاره‌ای مواقع به سبب تشدید و تحریک عوامل ایجاد کننده آن مانند افزایش فشار در بهره‌برداری و یا بهره‌برداری خارج از ظرفیت قابل ترمیم منابع زیرزمینی (بهره‌برداری بی‌رویه)، روند و دامنه گسترده‌ای به خود گرفته؛ علاوه بر ایجاد رخنمون‌های فراوان مرفولوژیکی در سطح زمین، مبدل به مخاطره (Hazard) و تهدید برای انسان و دستاوردهای انسانی می‌شود. به بیان دیگر حدوث پدیده‌ی مورفولوژیکی فرونشست و فراگیری گستره فضایی آن؛ پدیده را تبدیل به مساله و معضل نموده که توسعه و بسط آن به سکونتگاه‌ها مخاطره‌آمیز و خسارت‌بار است. ایجاد فروچاله (Sinkhole)، جابه‌جایی پی(Foundation) و شکست و ترک در مستحدثات، کج‌شدگی تأسیسات مرتفع، آسیب‌دیدگی تأسیسات کشاورزی (تأسیسات منصوب در چاه‌های بهره‌برداری، شبکه آبیاری و..)؛ انهدام و شکستگی پل‌ها، بزرگراه‌ها و شبکه معابر شهری و... از جمله عمومی‌ترین خسارات و تهدیدات حاصل از تشدید پدیده فرونشست است (Hays, 1981; Bolt, *et.al*, 1975). چنین شرایطی از تهدید و مخاطره هرچند بسیار خسارت‌بار است، لیکن در پاره‌ای از مواقع به واسطه شرایط خاص مکان و مجاورت و برخورداری آن از زیرساخت مخاطره‌آمیز ناشی از سایر مخاطرات طبیعی مانند زمین‌لرزه، قادر است شرایط مخاطره‌آمیز فوق‌الذکر را فاجعه‌بار نماید. به بیان دیگر همزادی پدیده فرونشست در نواحی واجد مخاطره لرزه‌ای می‌تواند رویداد زمین‌لرزه نه چندان مخرب را تبدیل به یک فاجعه بسیار بزرگ نماید (شریفی‌کیا،۱۳۹۰). همچنین فرونشست به سبب تغییر در تراز ایستایی سطح آب زیرزمینی و تغییر در زاویه و شیب بستر مسیل‌ها می‌تواند موجب ایجاد و یا تشدید خطر سیل در نواحی کم شیب و هموار شود.

پژوهش حاضر در نظر دارد با بررسی وضعیت فراگیر پدیده فرونشست در ایران و هم‌نهادسازی آن با الگوی توزیع سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌ها، روند تبدیل پدیده به مخاطره را تبیین نموده، با سنجش شرایط مخاطره‌آمیز ناشی از همزادی آن با سایر مخاطرات، قابلیت رویداد احتمالی فاجعه را در برخی بسترهای ناامن معرفی نموده، لزوم بررسی و پژوهش در این پدیده را در شکل یک مخاطره فاجعه‌ساز بیان نمایید.

۲. روش تحقیق

این پژوهش به سبب چند سطحی بودن مطالعات؛ متکی برالگوی ترکیبی در روش تحقیق است. فراگیری فضایی موضوع، انجام مطالعات در سطوح مختلف فضایی، با درجات مختلف از تعمیق و تحلیل را ایجاد کرده است. برای این کار به کارگیری تکنیک و روش مناسب برای هرسطح ضروری است. بر این اساس در تحقیق حاضر از روش‌های آزمایشگاهی- پیمایشی و استقرایی به همراه تجزیه و تحلیل اسنادی استفاده شده است. بدین منظور و با هدف تبیین حاکمیت الگوی توزیع فضایی پدیده فرونشست، کلیه مطالعات و مدارک و شواهد مبتنی بر فرونشست زمین در سطح کلان مورد بررسی قرارگرفته تکنیک به کار گرفته شده و نتایج یافته‌ها در تعیین نرخ و دامنه فضایی استخراج گردید. یافته‌های این مرحله به صورت نقشه موضوعی پراکندگی پدیده فرونشست، ارائه شد. سپس به منظور دسترسی به الگوی مناسبی و جامع از توزیع فضایی پدیده فرونشست، با به‌کارگیری سری زمانی از تصاویر سنجش از دور، مبتنی بر تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (Differential Interfrometric Synthetic Aperture Radar- D-InSAR) اقدام به پایش و تعیین نرخ و دامنه فرونشست در سایر نواحی احتمالی گردید. در مرحله بعد با تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به گسل‌های فعال، شناسائی شد و همراه با زمین‌لرزه‌های ثبت شده، اقدام به تهیه نقشه الگوی فضایی مخاطره زمین‌لرزه و چگالی (تراکم) رویداد زمین‌لرزه‌های تاریخی گردید. هم‌نهادسازی این نقشه با نقشه تولیدی از الگوی توزیع فضایی فرونشست، امکان استخراج عرصه‌های پر مخاطره زمین‌لرزه و برخوردار از معضل فرونشست و تحلیل مخاطره ناشی از آن را فراهم آورد. در آخرین مرحله به منظور تبیین شرایط زایشی فاجعه دراین کانون‌ها، اقدام به استخراج سکونتگاه‌های پرجمعیت و هم‌نهادسازی (Superimposing) الگوی توزیع آن با نقشه ترکیبی فرونشست و مخاطره لرزه‌ای گردید (شکل ۱).

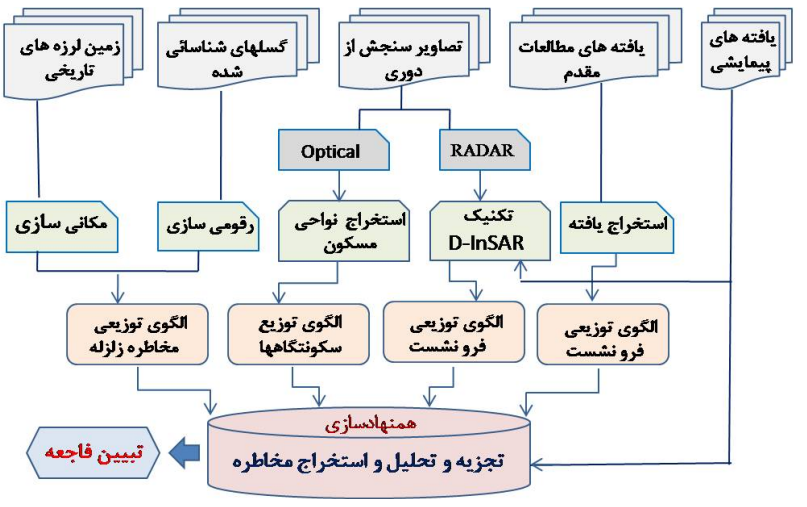
۳. داده‌های مورد استفاده

الف) سری زمانی تصاویر سنجش از دور راداری متعلق به دو ماهواره ALOS سنجنده PALSAR از کشور ژاپن و ماهواره ENVISAT سنجنده ASAR متعلق به سازمان فضایی اروپا (مقطع زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱)

ب) تصاویر سنجش از دور مرئی متعلق دو ماهواره لندست، سنجنده‌های+ETM و TMوماهواره TERR سنجنده ASTER

پ) داده‌های زمین لرزه‌های ثبت شده در۱۰۰ ساله اخیر مستخرج از پایگاه داده‌های سازمان زمین‌شناسی امریکا (USGS)

ت) یافته‌های مستخرج از مطالعات پیشین و حاصل از مقالات و گزارش‌های علمی



شکل ۱. نمودار مفهومی مراحل انجام تحقیق

۴. تبیین الگوی فضایی پدیده فرونشست در ایران

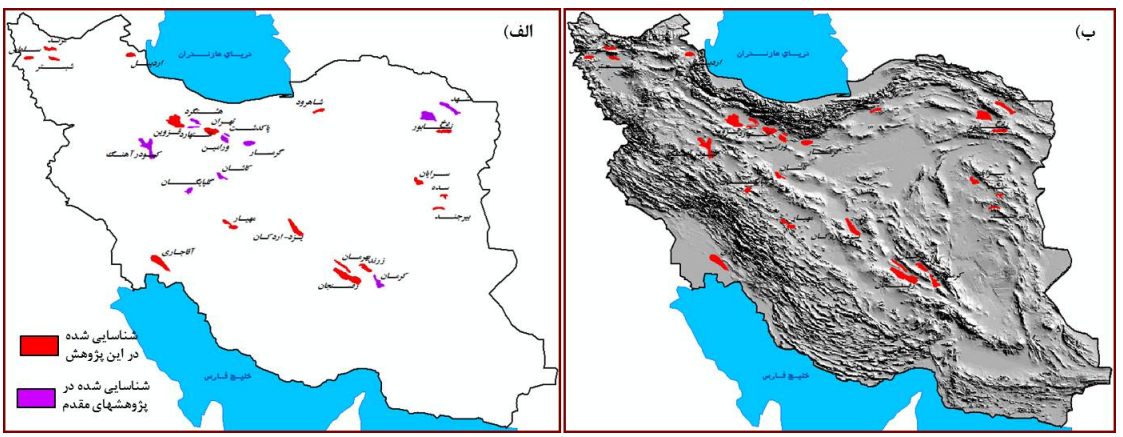
در ایران پدیده فرونشست ناشی از ازدیاد برداشت از منابع آب زیرزمینی، به سبب توسعه روز افزون مصرف آب در مناطق شهری و بالا بودن این مصارف در اراضی کشاورزی (راندمان اندک)، از سابقه نسبتاً طولانی برخوردار است. شرایط خاص هیدرولوژیکی و بخصوص حاکمیت اقلیم خشک و محدودیت منابع آب سطحی در دسترس، در کنار تمرکز مصارف پرحجم در فضاهای محدود و پر تراکم شهری (در تهران ۳/۱ میلیون مترمکعب در روز- مرداد ۱۳۹۰) موضوع تامین آب را مبدل به مساله و در بسیاری از موارد معضل نموده، بخش‌های وسیعی از کشور را مستعد ظهور این پدیده ساخته است. تشدید این شرایط ناشی از خشکسالی مکرر و فراگیری فضایی آن، علاوه بر نواحی خشک ایران مرکزی، نواحی نیمه‌خشک یا نسبتاً مرطوب شمال‌غربی کشور (دشت‌های اردبیل، سلماس، مرند و...) را با این پدیده درگیر ساخته است. به طوری‌که برخی کارشناسان و مدیران سازمان زمین‌شناسی کشور، نواحی در معرض فرونشست را حدود ۳۰۰ دشت از ۶۰۰ دشت کشور اعلام می‌دارند. لیکن آنچه مسلم است اطلاع دقیق از حدوث و نرخ و دامنه فرونشست در پهنه ملی مستلزم انجام مطالعات و تحقیقات مناسب برای شناخت و در نهایت گزارش رویداد آن است. چنین تحقیقاتی در کشور ما به سبب نوظهور بودن موضوع و ابزارهای آن، تاحدودی کم دامنه و محدود است. آغاز تحقیقات در این زمینه درحدود سال‌های آغازین دهه۷۰ بوده است. طی دو دهه تحقیقات مختلفی برای تبیین و شناسایی نواحی در معرض فرونشست انجام شده و تکنیک‌های مختلفی به کار گرفته شده است. این تحقیقات در ابتدا متکی بر تکنیک‌های هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی بود که در نتیجه آن اولین گزارش‌های علمی از پدید فرونشست در دشت رفسنجان انتشار یافت (شفیعی ثابت،۱۳۷۳ Toufigh *&* *Shafeisabet,* 1995;) با به‌کارگیری ابزارهای سنجش از دور، تحولی نسبی در تعیین نرخ فرونشست و پایش آن در ایران فراهم آمد و برخی از مناطق مانند دشت رفسنجان، اسلام شهر- تهران و دشت مشهد از طریق GPS مورد پایش قرارگرفت (قماشی، ۱۳۷۶؛ موسوی، ۱۳۷۸؛ حسینی،۱۳۸۶؛ اکبری، ۱۳۸۷؛ Amighpey *et.al*., 2006; Motagh *et.al.*, 2006; Hosseini, *et.al*., 2007; Mousavi, 2001;). محدودیت این ابزار در تعیین دامنه فرونشست و هزینه اجرایی نسبتاً زیاد آن، ابزارهای سنجش دور راداری را مورد توجه قرارداده و تعداد زیادی از دشت‌های کشور به کمک این ابزار مورد شناسایی و تعیین نرخ و دامنه پدیده فرونشست قرارگرفت. دشت رفسنجان (Motagh, *et.al.*, 2008; Sharifikia, 2009;)، دشت‌های کرمان- زنگی‌آباد و زرند (Esmaile & Motagh., 2009) دشت‌های اردکان-میبد و یزد (آمیغ‌پی، ۱۳۸۸: کمک‌پناه،۱۳۸۶: عالمی،۱۳۸۱)، دشت کاشمر-بردسکن (لشکری‌پور،۱۳۸۷: لشکری‌پور و دیگران، ۱۳۸۵: Motagh, et.al., 2008 : Anderssohn *et.al.*,2008) دشت مشهد ((Motagh *et.al*.,2007-2008; Dehghani, *et.al*., 2008) دشت نیشابور (Dehghani, *et.al*., 2009) دشت‌های ورامین - قرچک، تهران و اسلام‌شهر- شهریار(شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴؛ فتوت اسکندری، ۱۳۸۷؛ Dehghani *et.al.*, 2010; Motagh, *et.al.*, 2008;) دشت گرمسار(Baikpour *et.al*., 2010) دشت سلماس (Molaienea, 2009) دشت مرند (دهقان سورکی،۱۳۹۰) دشت گلپایگان (جنت، ۱۳۸۸) دشت کاشان (مصلحی و قاضی‌فرد، ۱۳۸۹) و دشت هشتگرد (Ashrafianfar *et.al*., 2010) از جمله نواحی به شمار می‌روند که رخداد پدیده فرونشست در آن‌ها به کمک روش تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار گرفته است. این مجموعه عمدتاً ۱۸ دشت از مجموع دشت‌های در معرض پدیده فرونشست را شامل شده و در خصوص مابقی به سبب عدم انجام مطالعات و یا عدم انتشار آن، اطلاعی در دست نیست (شکل۲-الف). در این پژوهش نیز با به کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی راداری تعداد ۱۵دشت در معرض فرونشست مورد بررسی قرارگرفته است. این نواحی عبارتنداز دشت‌های بیرجند، سرایان و سده (استان خراسان‌جنوبی)، دشت رخ (استان خراسان‌رضوی)؛ دشت‌های زرند؛ کرمان- زنگی‌آباد؛ رفسنجان و نوق-بهرمان(استان کرمان)؛ دشت یزد-

اردکان(استان یزد)؛ دشت شاهرود(استان سمنان)؛ دشت تهران–اسلام‌شهر(استان تهران)؛ دشت قزوین(استان قزوین) دشت‌اردبیل(استان‌اردبیل) دشت‌شبستر(استان آذربایجان‌شرقی) مهیار(استان اصفهان). علاوه بر دشت‌های در معرض فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی، مطالعاتی برای سنجش نرخ و دامنه فرونشست در نواحی نفت‌خیز آقاجاری و درود صورت گرفت است (فولادی‌مقدم، ۱۳۸۸؛ محمدی، ۱۳۸۹؛ حقیقت‌مهر، ۱۳۸۹). فرونشست ناشی از کارستی شدن و انحلال نیز برای دشت کبودرآهنگ- فامنین در استان همدان گزارش شده است (امیری، ۱۳۸۴؛ هاشمی، ۱۳۸۱).

یافته حاصل از این پژوهش به همراه یافته‌های مستخرج از مطالعات مقدم، امکان ارائه الگوی توزیع فضایی نواحی در معرض فرونشست به صورت نقشه موضوعی فرونشست‌های شناسائی شده در پهنه ملی را فراهم ساخت (شکل۲- الف). آنچه مسلم است گستره فضایی پدیده فرونشست بسیار وسیع‌تر ازیافته‌های امروزی است. نواحی مانند استان سیستان و بلوچستان و یا دشت‌های غربی کشور به طور حتم در معرض فرونشست قراردارند که متأسفانه تاکنون گزارش‌های مستند و مکتوبی از نرخ و دامنه آن منتشر نشده است.

۵. تبیین مخاطره فرونشست

فرونشست پدیده‌ای زمین‌شناختی است که عوارض ژئومورفولوژیکی جدیدی ایجاد می‌کند. رویداد آن در بسیاری از نواحی برخوردار از زیرساخت‌های ایجابی طبیعی و یا بشر آفرین امگان‌پذیر است. در مواقعی این پدیده به سبب تأثیرات و تهدیدات آن برای سکونتگاه‌ها و تأسیسات به عنوان یک مخاطره‌ی زمینی مطرح است(Goudie,2010; Hunt, 2005). در کشور ایران این پدیده با توجه به قابلیت‌ها و زیرساخت‌های ایجابی آن عمدتاً در نواحی دارای رسوبات و یا دشت‌های آبرفتی روی می‌دهد. یافته‌های حاصل از این تحقیق نیز مؤید وقوع فرونشست در پهنه‌های دشتی کشور است (شکل۲– ب). این پهنه‌ها به سبب فراهم‌آوری زیرساخت مناسب سکونتی (مساله تأمین آب)، عرصه‌های پرجمعیت را به خود اختصاص داده و عمده نواحی جمعیتی کشور و به خصوص جمعیت‌های متراکم شهری در آن قرار دارند. این کانون‌های جمعیتی در شرایط موجود هیدرولوژیکی کشور (فقدان منابع آب سطحی کافی) وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی دارند، که نیاز روز افرون آن‌ها به تأمین آب، موجب تغییر بیلان هیدرولوژیکی شده است. به‌طوری‌که در برخی از دشت‌ها مانند دشت رفسنجان افت سطح آب، سطح دسترسی به آب‌های زیرزمینی را به عمق ۴۸۰ متر رسانیده است (Sharifikia, 2009). پدیده فرونشست اصلی‌ترین پیامد چنین الگوئی از بهره‌برداری از منابع زیرزمینی است.



شکل ۲. الف) نواحی شناسائی شده فرونشست در کشور ب) الگوی توزیعی نواحی فرونشست در دشت‌های ایران

رویداد این پدیده در دشت‌هایی که عمدتاً توسط خانه‌ها و تأسیسات (کارخانجات، پل‌ها، جاده‌ها؛ فرودگاه‌ها؛ وسایر تأسیسات عمومی) اشغال شده‌اند، به سبب تأثیرات ناشی از آن مانند ایجاد فروچاله، ترک و گسست در سازه‌ها، کج‌شدگی عمودی و جابه‌جایی افقی، تخریب و شکستگی تأسیسات زیرزمینی مانند تونل‌های شهری، شبکه‌های آب، گاز و سوخت مایع، و... مساله‌ساز و مخاطره آفرین است (Wu & Xi, 2010; Deng & Ju ,1994). رخداد این پدیده برای نواحی دارای جمعیت و تأسیسات، می‌تواند خساراتی در مقیاس رویداد زمین‌لرزه‌های ویرانگر را فراهم آورد، به‌طوری‌که ایجاد فرونشست در این نواحی را می‌توان زلزله خاموش نامید.

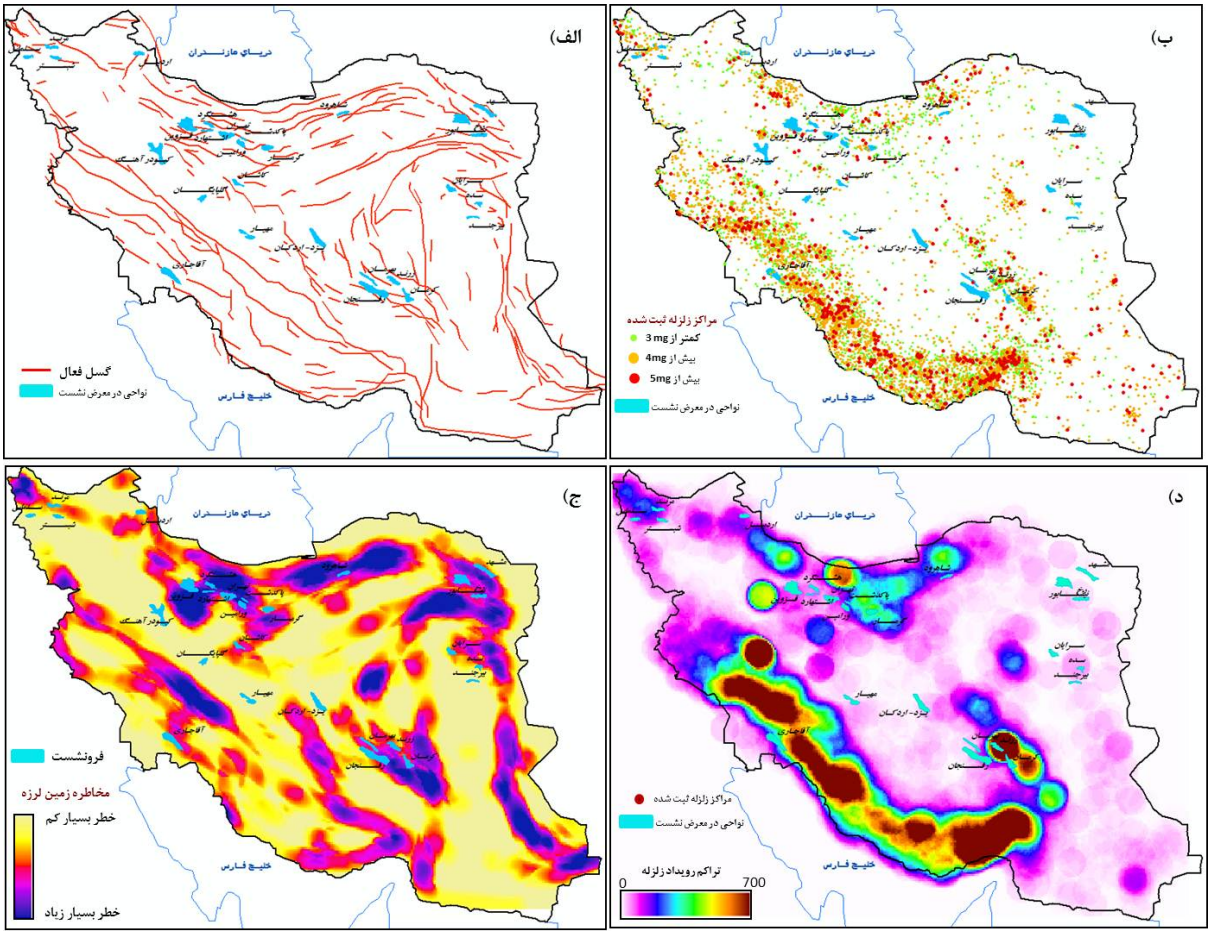
۶. هم‌نهادسازی الگوی فضایی مخاطره فرونشست با کانون‌های پرمخاطره زمین‌لرزه

هم‌نهادسازی گستره فضایی فرونشست و نواحی پر خطر زمین‌لرزه مستلزم فراهم بودن نقشه‌های بزرگ مقیاس، دقیق و واجد منطقه‌بندی خطر ناشی از رویداد زمین‌لرزه است. متأسفانه تاکنون چنین نقشه‌ای برای پهنه ملی و در مقیاس بزرگ تولید نشده است. نقشه‌های تولیدی از مناطق خاص نیز کارایی لازم در فراهم‌آوری پوشش مناسب از مناطق در معرض فرونشست را ندارد. در این تحقیق به منظور اطلاع از الگوی توزیعی مخاطره زمین‌لرزه از دو زیر ساخت داده‌ای استفاده گردید. نخست براساس نقشه‌های کوچک مقیاس انتشار یافته؛ (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲ & Tavakoli Ghafory-Aashteyany, 1991) نقشه الگوی توزیعی گسل‌های فعال ایران تهیه شد(شکل۲-الف)، سپس براساس داده‌های زمین لرزه‌های ثبت شده در ۱۰۰ ساله اخیر (۱۹۰۰ تا ۲۰۱۱) مستخرج از پایگاه داده‌های سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) و مکانی‌سازی آن‌ها، نقشه الگوی توزیعی مراکز این زمین‌لرزه‌ها تهیه گردید(شکل۲- ب). به منظور تبیین سطوح در معرض خطر زمین‌لرزه، این دو نقشه (نقطه‌ای و برداری) به کمک آنالیز چگالی تبدیل به سطح شدند. این سطوح قابلیت طبقه‌بندی داشته و امکان منطقه‌بندی اولیه این مخاطره را فراهم آورد (شکل۲-جو د).

هم‌نهادسازی نواحی شناسایی شده به عنوان دشت‌های در معرض فرونشست با نقشه مخاطرات لرزه‌ای کشور روشن ساخت که تقریباً تمامی این نواحی در کانون‌های با خطر بالای زمین‌لرزه استقرار دارند. در این میان نواحی در معرض فرونشست واقع در استان کرمان، تهران، آذربایجان‌شرقی و خراسان جنوبی و رضوی علاوه بر برخورداری از نرخ فرونشست بالا واحد بستر نا امن و آسیب‌پذیر از مخاطره زمین‌لرزه با درجه پر خطر می‌باشند. بر پایه یافته‌های این تحقیق نرخ فرونشست در این نواحی در برخی ایام سال به روزی یک میلی‌متر نیز می‌رسد. به عنوان مثال نرخ فرونشست در نواحی جنوب تهران در دوره ۱۲۰ روزه بهار و تابستان سال ۸۹ حدود ۱۱۰ میلی‌متر به دست آمده است (شریفی‌کیا، ۱۳۹۰).

۷. فرونشست و قابلیت آن در زایش فاجعه

رویداد مخاطره فرونشست در سکونتگاه‌ها علاوه بر ایجاد خسارات فراوان به ابنیه و تأسیسات، جمعیت‌های انسانی ساکن را تهدید می‌کند. به نحوی که رویداد آن می‌تواند با ایجاد تلفات انسانی از طریق تخریب ابنیه‌ها به فاجعه شود. فروریزش ناگهانی زمین و تخریب و ریزش سازه‌های آسیب‌پذیر از سوانح محتمل ناشی از عوارض فرونشست است که در نواحی شهری با تلفات انسانی همراه خواهد بود. این سوانح در مواردی خاص به سبب تراکم زیاد جمعیت (نواحی جنوب تهران) و یا گسترش شعاعی اراضی فروریخته، می‌تواند با ایجاد تلفات انسانی زیاد، فاجعه‌آفرین باشد. فاجعه‌بارترین وضعیت محتمل برای نواحی در معرض فرونشست، هم‌زمانی سانحه فرونشست با زمین‌لرزه است (رخداد زمین‌لرزه در اراضی که فرونشست در آن حادث شده است).

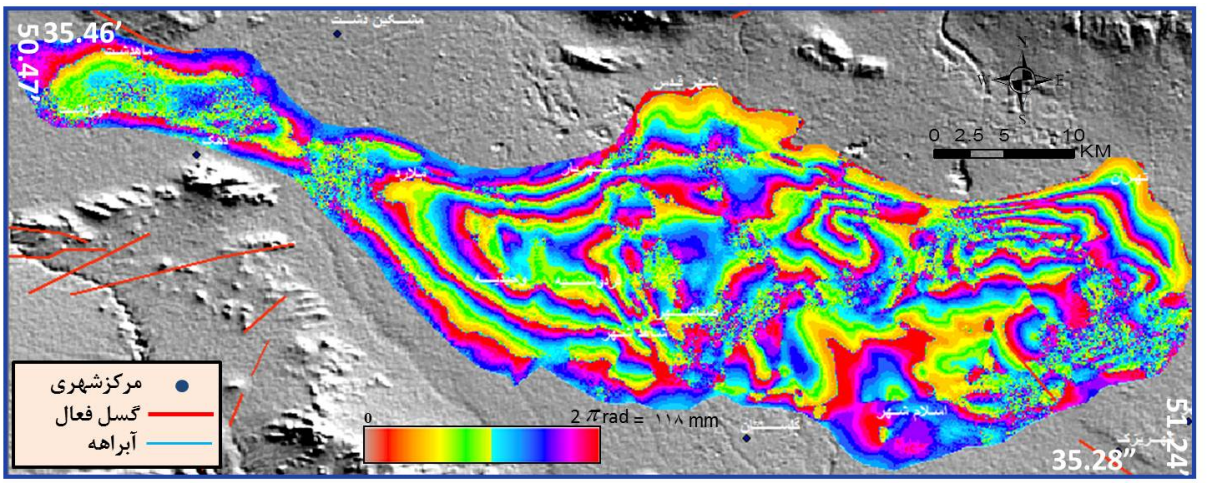


شکل ۳. هم‌نهادسازی الگوی توزیع فضایی فرونشست با مخاطره زمین لرزه الف) الگوی توزیعی گسل‌های فعال ب) الگوی توزیعی زمین‌لرزه‌های ثبت شده ج) تراکم گسل‌های فعال ومنطقه‌بندی خطر د) تراکم زمین لرزه‌های ثبت شده

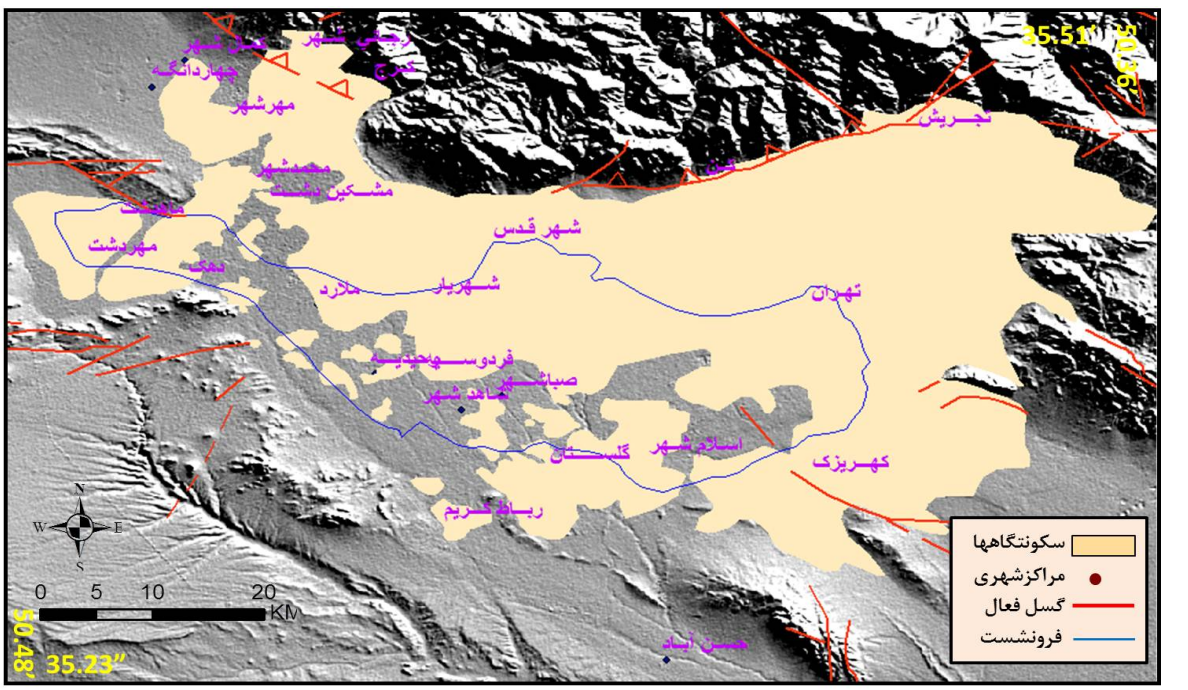
زمین‌لرزه از یک سو عامل ماشه‌ای برای رویداد سانحه فروریزش (collapsing) در اراضی که به سبب برخورداری از پدیده فرونشست چنین قابلیتی را دارند، به‌شمار میرود. از سوی دیگر پیامدهای رویداد پدیده فرونشست مانند کاهش رطوبت و ذخائر آبی لایه‌های زیرین قادر است موج ناشی از رخداد زمین‌لرزه را مخرب‌تر ساخته و فاجعه را ایجاد کند. واقعیت علمی آنکه تخلیه لایه‌های زیرین از آب موجب تعدیل اثرات فیزیکی خاصیت دی-الکتریک در شتاب موج زمین‌لرزه شده؛ اثرات و توان خسارت‌زایی آن در سطح را شدت می‌بخشد. از سوی دیگر ایجاد گسیختگی در لایه‌های زیرین و ناپایداری در مقاومت خاک بستر سکونتگاه‌ها و تأسیسات، پایداری بسیاری از سازه‌ها را کاهش داده و در معرض تخریب قرار می‌دهد. بدین سبب هم زمانی رویداد سانحه زمین‌لرزه در اراضی در معرض فرونشست می‌تواند نتایج ناشی از رویداد یک زمین‌لرزه غیرمخرب و یا نسبتاً مخرب را به یک زلزله خسارت‌بار و پرتلفات تغییر داده، فاجعه انسانی را به دنبال داشته باشد. چنین فاجعه‌ای بسیاری از کانون‌های جمعیتی کشور را به سبب وقوع آن در اراضی در معرض فرونشست و استقرار در نقاط پرخطر زمین لرزه تهدید می‌نماید.

دشت‌های زرند، رفسنجان، بهرمان و تهران نمونه‌هایی از دشت‌های در معرض فرونشست و واقع در کانون‌های پرخطر زمین لرزه هستند. بر اساس یافته‌های موجود، این دشت‌ها از نرخ فرونشست بالایی برخوردارند و در مواردی بالاترین نرخ فرونشست شناسایی شده کشور را به خود اختصاص داده‌اند. جدیدترین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در این تحقیق نشان دهنده نرخ فرونشست حداکثری روزانه حدود یک میلی‌متر در مقطع زمانی بهار و تابستان سال ۱۳۸۹ برای دشت

تهران و اسلام‌شهر است. همچنین حداکثر نرخ فرونشست استخراج شده برای این ناحیه در مقطع زمانی ۳ ساله (۲۰۱۰ – ۲۰۰۷) حدود ۵۹ سانتی‌متر است (شکل۴). متأسفانه بیشتر این دشت را مناطق مسکونی و استقرارگاه‌های صنعتی اشغال نموده، به طوری‌که بخش وسیعی از نواحی شهری جنوب و جنوب غربی تهران به همراه شهرهای اسلام‌شهر، شهریار و تعدادی از شهرک‌های پرجمعیت غرب تهران (قدس، پردیس، ماهدشت، مهرشهر؛ ملارد، و...) برروی عرصه‌های در حال فرونشست قرار دارند (شکل۵). همچنین این عرصه به واسطه در برداشتن تعداد کثیری از گسل‌های محلی و منطقه‌ای در زمره نواحی پر مخاطره زمین‌لرزه قرار دارد. هم‌زمانی رویداد زمین‌لرزه در این ناحیه می‌تواند به مثابه چکاندن ماشه برای فرونشست ناگهانی زمین عمل نماید.



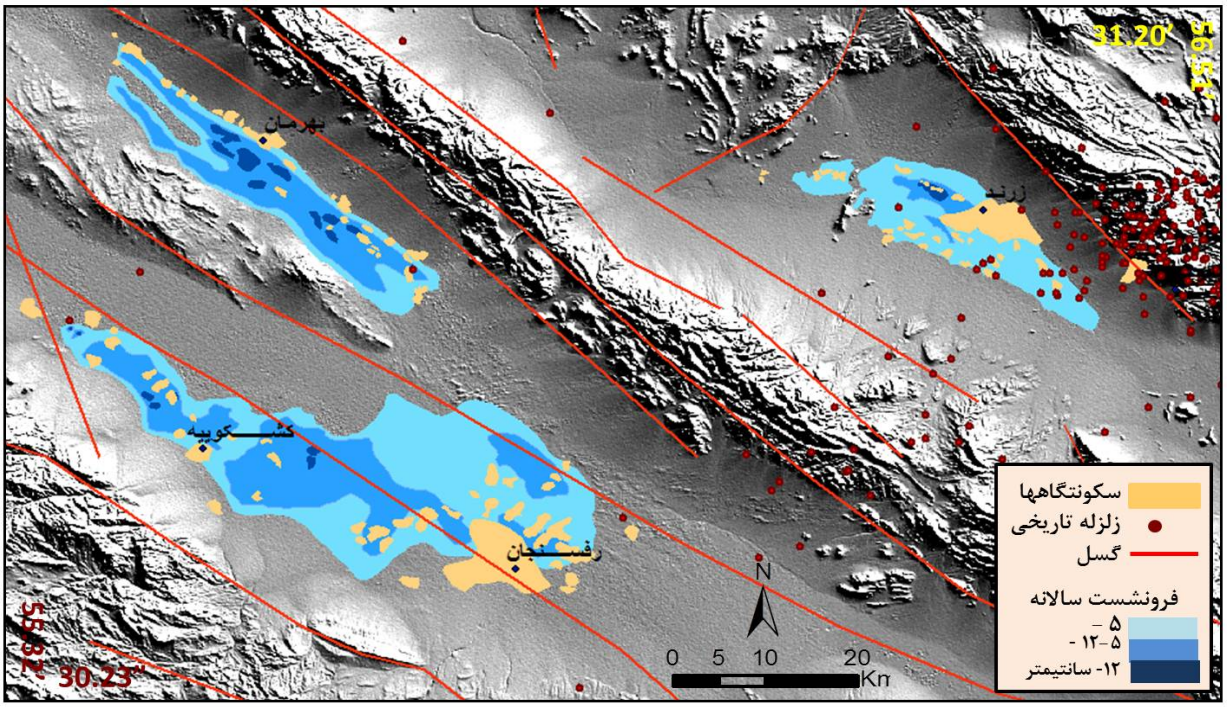
شکل ۴. تداخل نگار مستخرج از تکنیک D-InSAR برای داده های سنجنده راداری Palsar در باند L و در دوره زمانی ۱۰ ژانویه۲۰۰۷ تا ۱۷ ژانویه ۲۰۰۷ (هرحلقه رنگی -Fringe- موید فرونشست به میزان ۱۱/۸ سانتی متر است)



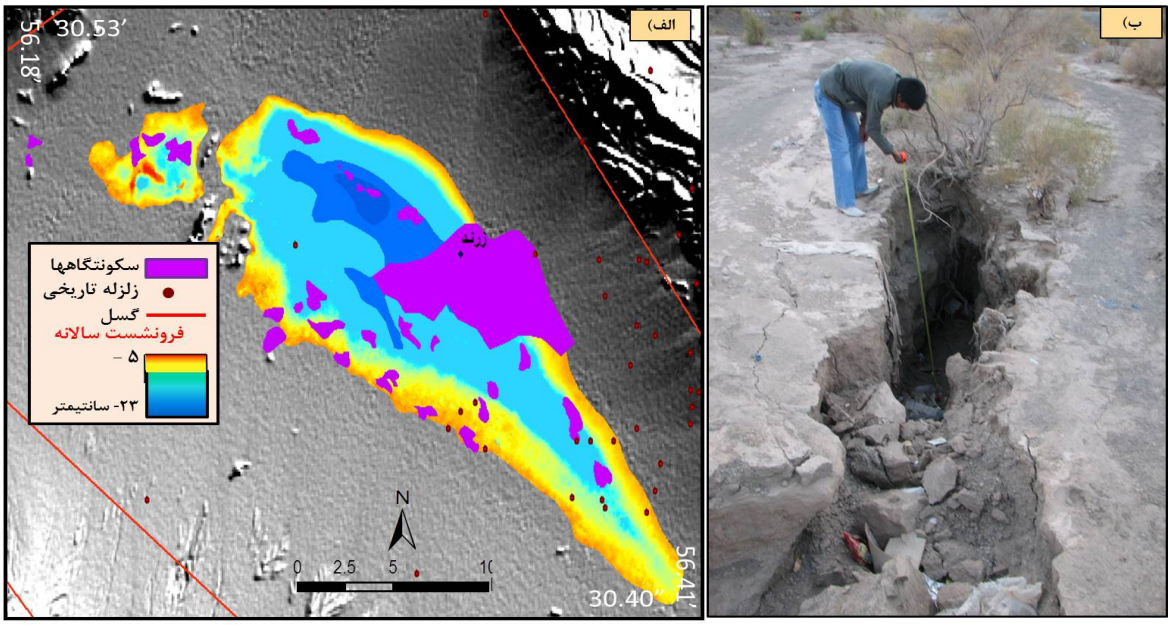
شکل ۵. منطبق سازی عرصه فضایی سکونتگاه‌ها و تأسیسات کلان‌شهر تهران با نواحی در معرض فرونشست

رویدادی که وقوع آن در شرایط خاص سازه‌ای ناحیه (ساخت سازه‌های غیرمقاوم تا کم مقاوم) می‌تواند با تخریب حجم وسیعی از ساختمان‌ها و تأسیسات، منجر به واردسازی خسارات فراوان و پدید آوردن یک فاجعه گسترده شود. در چنین فاجعه محتملی به سبب آسیب‌دیدگی تأسیسات و زیرساخت‌های شهری از جمله پل‌ها، تونل‌های شهری و بزرگراه‌های واقع در عرصه‌های در معرض فرونشست، امدادرسانی و مدیریت بعد از فاجعه ممکن است با موانع جدی همراه بوده و منجر به تشدید فاجعه شد.

منطبق‌سازی نقشه الگوی توزیعی سکونتگاه‌ها با نقشه محدوده‌های در معرض فرونشست در سه دشت رفسنجان، زرند و بهرمان نیز بیان کننده چنین وضعیتی از مخاطره و پی‌آمد آن، فاجعه است. در این سه دشت اکثریت نقاط مسکونی از جمله شهرهای زرند و رفسنجان به همراه اغلب سکونتگاه‌های روستایی و تأسیسات و تجهیزات مستقر در آن بر روی عرصه‌های در معرض فرونشست قرار دارند (شکل۶). یافته‌های پیمایشی نیز مؤید فراهم شدن زیرساخت خسارت‌بار در این نواحی است. به نحوی که در اغلب سازه‌ها ترک خوردگی و بازشدگی (بعضاً بزرگ‌تر از ۵ سانتی‌متر) مشاهد شد. این مساله در مورد دشت زرند پیچیده‌تر است. یافته‌ها نشان می‌دهد که نرخ فرونشست دشت زرند در سال‌های ۸۸ و ۸۹ سالانه حدود ۱۸ سانتی‌متر بوده است. این در حالی است که این دشت اولاً در منطقه با خطر بسیار زیاد زمین‌لرزه قراردارد، ثانیاً تمامی سکونتگاه‌ها و تأسیسات آن بر روی اراضی در حال فرونشست استقرار دارند (شکل۷-الف). یافته‌های پیمایشی نیز امکان شناسایی مرز ناحیه در حال فرونشست با بازشدگی بزرگ‌تر از ۸۰ سانتی‌متر و عمق اولیه بیش از ۲/۵ متر را میسر ساخت (شکل۷ -ب). متأسفانه چنین شرایطی برای اغلب نواحی و دشت‌های مسکونی کشور قابل تسری می باشد و رویداد فاجعه در آن‌ها امری محتمل است.



شکل ۶. انطباق عرصه سکونتگاه‌ها و تأسیسات با نواحی در معرض فرونشست در دشت‌های رفسنجان، زرند و بهرمان



شکل ۷. الف) نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده و انطباق عرصه سکونتگاه‌ها و تأسیسات در دشت زرند
ب) تصویری از پیمایش بازشدگی و شکاف واقع در لبه محدوده درحال فرونشست دشت زرند

رویداد فرونشست در پهنه ایران علاوه بر ناپایدار ساختن بستر و فراهم آوردن زیرساخت فاجعه‌آفرین زمین‌لرزه، مخاطره سیل را نیز تشدید و در مواردی پدید می‌آورد. فرونشست زمین سبب تغییر در تراز ایستایی سطح و تغییر در مورفولوژی سطحی می‌شود. این مساله بستر رودخانه‌ها و مسیل‌های کم شیب موجود در دشت‌ها را دگرگون می‌سازد و با تغییر در شیب بستر و در مواردی ایجاد شیب معکوس، امکان سیل‌گیری نواحی مسکونی را فراهم می‌سازد. چنین مخاطره‌ای برای برخی ساکنین پدیده‌ای کاملاً نوظهور خواهد بود. به طوری‌که نواحی و عرصه‌هائی که هرگز در معرض سیل و یا آب گرفتگی تاریخی قرار نداشته‌اند؛ مورد تهدید این مخاطره خواهند بود. در چنین بستر مخاطره‌آمیزی به سبب عدم اطلاع‌رسانی مناسب از رویداد فرونشست و شرایط جدید حادث شده در بستر و حریم رودخانه؛ ساخت و سازها همچنان بر پایه ضوابط متداول تعیین حریم و بستر صورت خواهد پذیرفت. این در حالی است که حریم قبلی رودخانه‌ها به سبب تغییر در بستر دگرگون شده است و تعیین حریم جدید مستلزم اطلاع از میزان و دامنه فرونشست است. پیامد این مساله استمرار سکونت در عرصه‌های پرخطر سیل و تحمل خسارت ناشی از رویداد آن است. این معضل برای نواحی واجد سابقه سیل‌گیری به طور فزاینده‌ای تشدید شده و رخداد آن می‌تواند با تلفات انسانی همراه و در مواردی فاجعه بار گردد.

۸. نتیجه‌گیری

یافته‌های تحقیق پدیده فرونشست با نرخ سالانه بیش از ۱۰ سانتی‌متر در بیش از ۳۰ دشت کشور را شناسائی و معرفی نمود. در سایر دشت‌ها نیز به سبب همبستگی و مشابهت اغلب زیرساخت‌های ایجابی به احتمال زیاد رویداد فرونشست حادث شده است، لیکن به سبب عدم مطالعه و گزارش اطلاع دقیقی در دست نیست. ظهور پدیده فرونشست با این گستردگی، ابعادی فراتر از یک رخداد مورفولوژیکی داشته و در حال تبدیل شدن به یک معضل ملی است. معضلی که حال و آینده بهره‌برداران و مصرف کنندگان آب را به چالش کشیده، با مشکلات لاینحلی مواجه می‌سازد. مزید بر این موضوع یافته‌های تحقیق نشان داد که پدیده فرونشست

در اغلب دشت‌های ایران به سبب استقرار سکونتگاه‌ها و تأسیسات، مخاطره آفرین بوده و تهدیدات جدیدی را متوجه سکونتگاه‌ها بخصوص سکونتگاه‌های پرتراکم شهری می‌نماید. این مساله نا امنی دیگری به شرایط بستر اغلب کانون‌های جمعیتی اضافه نموده است. پدیده فرونشست به تنهایی قادر به ایجاد گروهی از خسارات برای تأسیسات و سازه‌های مستقر در این بسترها است. خساراتی که در نواحی پر تراکم جمعیتی و یا واجد زیرساخت‌های حساس(پل‌ها، تونل‌های مترو و فرودگاه‌ها) می‌تواند با در بر داشتن تلفات انسانی فاجعه‌آفرین باشد. بر پایه‌ی یافته‌های تحقیق به سبب استقرار اغلب نواحی پرجمعیت کشور در کانون‌های پرخطر زمین‌لرزه، همزادی و همزمانی پدیده فرونشست با این سانحه، بستر لازم برای رویداد یک فاجعه بزرگ و پر خسارت را فراهم آورده است. به‌نحوی که زمین لرزه‌های کم شدت و غیر مخرب قادر خواهند بود ماشه فروریزش ناگهانی و یکباره بستر در اراضی که به سبب حدوث فرونشست، واجد چنین قابلیتی هستند، را فعال نموده و منجر به وارد ساختن خسارت و تلفات جانی گردد. این تحقیق روشن ساخت پیامدهای فرونشست مساله سیل و مخاطره ناشی آن را هم تحت تأثیر قرار خواهد داد. فرونشست با تغییر در تراز ایستایی آب و مورفولوژی سطحی و در نتیجه تغییر در زاویه شیب بستر رودخانه منجر به زایش و یا تشدید این مخاطره در اراضی کم شیب و هموار می‌گردد. در چنین شرایطی نواحی ایمن در برابر سیل، تبدیل به عرصه‌های سیل‌گیر و پر خطر می‌شود.

ایجاد چنین شرایط و وضعیتی از رویداد پدیده فرونشست و پیامدهای مخاطره‌آمیز و فاجعه بار آن برای کشور، قبل از هرچیز عزم ملی برای پذیرش و مقابله با این پدیده به عنوان یک معضل و مخاطره منتهی به فاجعه را طلب می‌نماید. موضوعی که درک آن از یک سوی مستلزم بسط مطالعات برای شناسائی کامل نواحی مستعد به صورت یک طرح ملی است؛ از سوی دیگر لازم است زیرساخت لازم برای آگاهی رسانی و همگانی نمودن اطلاع از تهدیدات و معضلات ناشی از این مساله برای مردم در جهت جلب مشارکت آن‌ها در تعدیل زیرساخت‌های ایجابی فراهم گردد. نهایتاً اینکه برای پیشگیری و تعدیل حجم و دامنه فاجعه محتمل از این مخاطره فراگیر، دستگاه‌های ذیربط تمامی مقررات و استانداردهای ساخت و ساز و ایمنی در برابر زمین لرزه و سیل را برای نواحی در معرض فرونشست، مورد بازنگری قرار داده و بر پایه شرایط نوین باز تعریف نمایند.

منابع

آمیغ پی، م.، عربی، س، طالبی، ع.، جمور، ی.، ۱۳۸۸. کاربرد تکنیک تداخل‌سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست. ژئوماتیک ۸۸، سازمان نقشه برداری کل کشور.

اکبری، و.، ۱۳۸۷. نظارت برفرونشست زمین ناشی از استخراج بی رویه آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد با استفاده ازسری زمانی تکنیک تداخل‌سنجی راداری و مقایسه با مشاهدات ژئودتیک. پایان نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی مهدی متعق، دانشگاه تهران، دانشکده فنی.

امیری، م.، ۱۳۸۴. ارتباط بین فروچاله‌های دشت فامنین کبودرآهنگ – قهاوند با سنگ کف منطقه. فصلنامه علمی و پژوهشی علوم زمین، شماره ۵۸ ، ص. ۱۳۴-۱۴۷.

جنت، ک، قاضی فرد، ا.، ۱۳۸۸. بررسی ویژگی‌ها و علل فرونشست در دشت گلپایگان با استفاده از تداخل‌سنجی رادار وGIS. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس سراسری آب‌های زیرزمینی، ص. ۱-۹.

حسامی، خ.،جمالی، ف. طبسی، ه.، ۱۳۸۲. نقشه گسل‌های فعال ایران، پژوهشکده بین المللی زلزله شناسی و مهنسی زلزله.

حسینی، م.،۱۳۸۶. تلفیق داده‌هایInSAR وGPS درتعیین جابه‌جایی ناشی از فرونشست؛ پایانامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

حقیقت‌مهر، پ.، ۱۳۸۹. مطالعه فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی و چاه‌های نفتی به کمک تداخل‌سنجی راداری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

دهقانی، م.، ۱۳۸۷. فرونشست. گزارش تحقیقاتی انتشار داخلی سازمان زمین‌شناسی کشور.

دهقان سورکی، ی.، ۱۳۹۰. به کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری D-InSAR در تعیین نرخ و دامنه فرونشست زمین در دشت مرند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد (سنجش از دور وGIS)، به راهنمایی محمد شریفی کیا، دانشگاه تربیت مدرس.

شریفی کیا، م.، ۱۳۹۰. سنجش و استخراج مخاطرات حاصل از پدیده نشست در اراضی مسکون تهران بزرگ. همایش مخاطرات محیطی شهر تهران، دانشگاه تربیت معلم.

شفیعی ثابت، ب.، ۱۳۷۳. مدل کردن نشست منطقه‌ای زمین در اثر پائین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی. پایانامه کارشناسی ارشد؛ به راهنمائی : محمدمحسن توفیق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی.

شمشکی، ا.، بلورچی، م.ج.، انصاری، ف.، ۱۳۸۴. بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار. مدیریت زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی، سازمان زمین شناسی کشور، نشریه داخلی.

فتوت اسکندری،آ.، ۱۳۸۷. مدل‌سازی ریاضی فرونشست دشت شهریار. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، مهندسی‌معدن، نفت و ژئوفیزیک.

فولادی مقدم، ن.، ۱۳۸۸. پایش میزان فرونشست زمین در میدان نفتی آغاجاری بر پایه تداخل سنجی تفاضلی رادار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی اکبر متکان، دانشگاه شهید بهشتی.

قماشی، ع.، ۱۳۷۶. پیش‌بینی نشست منطقه‌ای زمین در اثر استخراج آب و پائین انداختن ایستایی آب زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی ابوالفضل شمسایی؛ دانشگاه صنعتی شریف.

عالمی، ا.، ۱۳۸۱. بررسی علل نشست در دشت یزد –اردکان. مجموعه مقالات سومین همایش بین المللی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، ص. ۴۳۴-۴۲۹ .

علی‌عسکری، م.، ۱۳۷۴. بررسی و اندازه‌گیری نشست حاصل از استخراج لایه‌های زغال سنگ منطقه طزره - شاهرود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی هرمز ناصرنیا، دانشگاه تهران.

کمک‌پناه، ع.، ۱۳۸۶. مطالعه علل گسیختگی زمین در دشت یزد – اردکان. پژوهش‌نامه حمل و نقل، سال چهارم ، شماره دوم، ص۱۸۱-۱۹۴.

لشکری پور، غ.، رستمی بارانی، ح.، کهندل، ا.، ترشیزی، ح.، ۱۳۸۵. افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین دردشت کاشمر. دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران ، دانشگاه تربیت مدرس، ص. ۲۴۲۸-۲۴۳۸.

لشکری پور، غ.، ۱۳۸۷. بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین درغرب دشت کاشمر. مجله مطالعات زمین‌شناسی، جلد۱، شماره۱، ص. ۹۵-۱۱۱.

محمدی، آ.، ۱۳۸۹. ارزیابی تراکم مخزن و فرو نشست سطح میادین هیدروکربوری با استفاده از روش تداخل سنجی تقاضی رادار و مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی: مطالعه موردی میدان نفتی درود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.

مصلحی، ع.، قاضی‌فرد، ا.، ۱۳۸۹. بررسی فرونشست زمین و پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت کاشان. مجموعه مقالات همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، استهبان - دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ص. ۱-۸.

موسوی، م.، ۱۳۷۸. آنالیز تاثیرات متقابل پارامترهای هیدرولیکی و فرونشست زمین در اثر استخراج آب‌های زیرزمینی (دشت رفسنجان). رساله دکترا (مهندسی آب) – دانشگاه صنعتی شریف.

هاشمی، ع.، ۱۳۸۱. بررسی علل فرونشست عمومی زمین وتشکیل فروچاله‌ها در دشت فامنین و راه‌های مقابله با آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده صنعت آب و برق.

Abidin H.Z., Andreas, H., Gamal, M., Djaja, R., Murdohardono, D., Rajiyowiryono, H., Hendrasto, M., 2006. Studying landsubsidence of Bandung basin (Indonesia) using GPS survey method. Survey Review, 38(299): 397-405.

Allen, A.S., 1984. Types of land subsidence. In: F. Poland (Ed.), Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground Water Withdrawal, UNESCO, pp. 133-142.

Amighpey, M., Arabi, S., Talebi, A., Djamour, Y., 2006. Elevation Changes of the Precise Leveling Tracks in the Iran Leveling Network. Scientific Report, National Cartographic Center (NCC) of Iran, Tehran, Iran.

Anna F., Mario P., Pietro T., 2003. Monitoring of hydrological parameters related to peat oxidation in a subsiding coastal basin south of Venice. Italy, Proceedings of International Symposium on Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, Montpellier, IAHS Publ. no. 278, pp. 458-462.

Anderssohn, J., Wetzel, H.L., Walter, T.R., Motagh, M., Djamour, Y., Kaufmann., H., 2008. Land subsidence pattern controlled by old alpinebasement faults in the Kashmar valley, northeast Iran: Results from InSARandlevelling. Geophysical Journal International, 174: 287– 294.

Fulton, A., 2005. Land Subsidence: What Is and Why Is It an Important Aspect of Ground Water Management?. California Department of Water Resources, series 4, No 3.

Ashrafianfar, N., Busch W., Dehghani, M., Haghighatmehr P., 2010. Differential SAR interferometric technique for land subsidence monitoring due to ground water exploitation in the Hasthgerd, Proceeding of Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, ESA SP-677.

Baikpour S., Zulauf G., Dehghani M. and Bahroudi A., 2010. InSAR maps and time series observations of surface displacements of rock salt extruded near Garmsar, Iran, Journal of the Geological Society, 167: 171-181.

Bernard, E., George, V. Chilingarianband, T.F Yen 1991. Environmental hazards of urban oilfield operations. Petroleum Science and Engineering, 6: 95- 106.

Bolt, B.A., Horn, W.L., MacDonald, G.A., Scott, R.F., 1975. Geological Hazards. Springer-Verlag, Berlin.

Chatterjee, R.S., Fruneau, B., Rudant J.P., Roy P.S., Frison, P., Lakhera, R.C., Dadhwal, V.K., Saha, R., 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) city, India during the 1990s as observedfrom space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique. Remote Sensing of Environment, 102: 176–185.

Coates, D.R., 1985. Geology and Society. Chapman and Hall, NewYork.

Dehghani, M., Valadan Zoej, M.J, Entezam, I., Mansourian, A., Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophysical Journal International, 178(6): 47-56.

Dehghani, M., Valadan Zouj, M.J., Saatchi, S., Biggs, J., Parsons, B., Wright, T., 2008. Radar interferometry time series analysis of Mashhad subsidence, Journal of Indian Society of Remote Sensing (JISRS), 37: 191-200.

Dehghani, M., ValadanZoej, M.J., Entezam, I., Saatchi, S., Shemshaki, A., 2010. Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. Journal of Applied Remote Sensing, 4(041864): 1-15.

Deng, A., Ju, J., 1994. Land subsidence, sinkhole collapse and earth fissure occurrence and control in China. Hydrological Sciences Journal, 39(3): 245-256.

Ding, X.L., Liu, G.X., Li, Z.L., Chen, Y.Q., 2004. Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(10): 1151-1156.

Duong, T.T., 2005. Initial Study on Hanoi Land Subsidence. Master thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand

Duong, T.T., Vu, C.M., Doan, V.T., 2010. Land Subsidence Hazard due to Karts in Vietnam and Mitigation Measures. Proceeding of International Symposium Hanoi Geo-Engineering, Hanoi, Vietnam, pp. 267-273.

Donald A.W., 2005. Drought and Water Crises.Taylor & Francis Group, p328.

Esmaili, M., Motagh, M., 2009. Remote sensing measurements of land subsidence in Kerman Valley, Iran, 2003-2009. American Geophysical Union, abstract ,NH43C-1348.

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 Letter, 27: 3981–3984.

Halim, S., Rusli, O., 2006. Monitoring of offshore platform subsidence using permanent GPS stations. Journal of Global Positioning Systems, 5(1-2): 17-21.

Hays, W.W., 1981. Facing geologic and hydrologic hazards: earth-science considerations. United States Geological Survey, Professional Paper 1240-B: 54–85.

Hiroshi, P. S., Kaoru, A., Osamu, O., 2003. GPS-measured land subsidence in Ojiya city, Niigata prefecture, Japan. Engineering Geology, 67: 379–390.

Hosseini, M., ValadanZouj, Mobasheri, M.R., Dehghani, M., 2007. Land Subsidence Monitoring Using InSARand GPS. Proceedings of Map Asia Conference, Malaysia, pp. 1-15.

Huanyin, Y., Hanssen, R., Leijen, F., Marinkovicand, P., 2005. Land Subsidence Monitoring in city area by Time Series Interferometric SAR Data. National Natural Science Foundation of China(40301032), KGW project report

Hua, R.L., Yueb, Z.Q., Wanga, L.C., Wang, S.J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. Engineering Geology, 76: 65–77.

Hunt, R.E., 2005. Geologic Hazards-A Field Guide for Geotechnical Engineers. Taylor & Francis Group, London.

Margarita, M., Georgi, F., Ilia, Y., Plamen, I., 2005. UNESCO- bas project of land subsidence research in the region of the Sofia, Skopje and Tirana cities. Geoindicators, pp. 31-33.

Molaienea, M.R., 2009. Modeling Land Subsidence due to Ground Water Abstraction. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, IIT Delhi – India.

Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M.A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., Zschau, J., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir over exploitation.Geophysical Research Letters, 35: 1-5.

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.U., Zschau, J., Arabi, S., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran; results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, 168(2): 518–526.

Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T., Moosavi, Z.,Arabi, S., Zschau, J., 2006. Mapping the spatial and temporal pattern of land subsidence in the city of Toos, northeast Iran, using the integration of InSAR, continuous GPS and preciseleveling. Geophysical Research Abstracts, 8: 07881

Mousavi, S.M., Shamsai, A., Naggar, M.H.E., Khamehchiyan, M. 2001. A GPS-based monitoring program of land subsidence due to ground water withdrawal in Iran. Cannadian Journal of Civil Engineering, 28(3); 452– 464.

Galloway, D., Hudnut, K., Ingebritsen, S., Phillips, S., Peltzer, G.F., Rosen, P., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. Water Resource Research, 34(10): 2573−2583.

Galloway, D., Jones, D., Ingebritsen, S., 1999. Land Subsidence in the United States. U.S. Geological Survey, Circular 1182, 175 p.

Goudie, A.S., 2010. Geomorphological Hazards and Disaster Prevention., Cambridge University Press, New Yurok.

Phien-wej, N., Giao, P.H., Nutalaya, p., 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand. Engineering Geology, 82: 187– 201.

Psimoulis, P., Ghilardi, M., Fouache, E., Stiros, S. 2007. Subsidence and evolution of the Thessaloniki plain, Greece, based on historical leveling and GPS data. Engineering Geology, 90: 55–70.

Pulawski, B., Obro, H., 1976. Groundwater study of a volcanic area near Bandung, Java, Indonesia. Journal of Hydrology, Amsterdam, 28: 53-72.

Shaarifikia, M., 2009. D-InSAR Data Processing and Analysis for Mapping Land Subsidence Phenomenon in Rafsanjan Area, Iran. M.Tech thesis, Andra University – India.

Shelley, E.O., Ossa, A., Romo, M.P., 2007. The sinking of Mexicocity: its effects on soil properties and seismic response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27: 333–343.

Tavakoli, B., Ghafory-Aashteyany, M., 1991. Seismic hazard assessment of Iran, Journal of Annali Di Geofisica, 42(6): 1013- 1021.

Thomas, R., Marquez, Y., Lopez-Sanchez, M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorqui, S., Monica, M., Gerardo, H., Joaquin, M., 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced

differential SAR interferometry: Vega Media of Segura River (SE Spain) case study. Remote Sensing of Environment, 98: 269-283.

Tony, W., Martin, G.C., Fred, G.B., 2005. Sinkhole and Subsidence. Springer and Praxis Publishing Ltd. UK –Germany.

Toufigh, M.M., Shafeisabet, B., 1995. Prediction of future land subsidence in Kerman, Iran, due to groundwater withdrawal. Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, IAHS Publ. No. 234, pp. 363-367.

Tung Chen, C., Ching Hu, J., Yu Lu, C., Cheng Lee, J., Chang Chan, Y., 2007. Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. Engineering Geology, 95: 30–47.

Wang, G.Y., You, G., Shi, B., Yu, J., Tuck, M., 2009. Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China. Engineering Geology, 104: 109–118.

Whittow, J., 1980. Disasters: The Anatomy of Environmental Hazards. London, Allen lane, P412.

Wu, J., Xi, W., 2010. Geologic hazards research and their inducing factors in Xianyang urban area, Northwest China. International Journal of Geomantic and Geoscience, 1(3): 426-435..