ارزیابی فرونشست زمین بهکمک تلفیق روش تداخلسنجی راداری و اندازهگیریهای میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد

فهیمه صالحی متعهد، ناصر حافظی مقدس، غلامرضا لشکری پور؛ دانشگاه فردوسی، دانشکدهٔ علوم، گروه زمینشناسی، مریم دهقانی؛ دانشگاه شیراز، دانشکدهٔ مهندسی، گروه عمران و محیطزیست تاریخ: دریافت ۹۲/۱۱/۰۸ یذیرش ۹۷/۷/۷۸

*چکید*ہ

مشهد دومین کلان شهر ایران است. بهدلیل برداشت بیش از حد از منابع آبهای زیرزمینی، عوارض فرونشست بهصورت شکاف زمین و ترک در دیوار سازههای مسکونی در حريم شمالي شهر مشهد مشاهده شده است. هدف از اين پژوهش پايش دقيق نرخ فرونشست سالانه بهكمك تمامي دادههاي موجود و علتيابي اين يديده با توجه بهویژگیهای زمینشناختی و هیدروژئولوژیکی منطقه است. ابتدا بهکمک روش ترازیابی دقیق که قدیمی ترین داده ها را از فرونشست زمین در اختیار قرار می دهد، سابقه فرونشست بررسی شده است. سپس پردازش تداخل سنجی راداری برای کل دشت مشهد بهکمک ۲۳ تصویر ماهواره ENVISAT انجام گرفته است. نتایج نشان میدهد که دو کاسه فرونشستی یکی از شمالغرب و دیگری از جنوبشرق وارد حریم شهر مشهد شده است و در دشت مشهد در سال ۲۰۱۰ محدودهای بهوسعت ۱۳/۷ km² با میزان بیش از ۲۰cm/year در حال فرونشست بوده است. بررسی مقاطع زمینشناسی که بهصورت طولی و عرضی دشت را قطع کردهاند، نشان میدهد، بیشترین میزان فرونشست در مناطق با افت شدید سطح آب زیرزمینی، بافت خاک تناوب ریزدانه و درشتدانه و ضخامت زیاد آبرفت ایجاد شده است. هسته مرکزی شهر مشهد نیز از نظر زمینشناسی بسیار مستعد فرونشست است و پیشبینی می شود در صورت کاهش ورودی پساب به آبخوان شهری در آینده فرونشست چشمگیری در این مناطق ایجاد شود.

*نویسنده مسئول nhafezi@um.ac.ir

200

واژههای کلیدی: فرونشست زمین، تداخلسنجی راداری، ترازیابی دقیق، آب زیرزمینی، شهر مشهد مق**دمه**

دشت مشهد غرب حوضهٔ آبریز قرهقوم واقع شده است، وسعت آن ۹۹۵۷/٤۵ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱٤۹۷ متر از سطح دریا دارد. مهمترین زهکش دشت رودخانه کشفرود است. میانگین بارندگی سالانه در دشت برابر ۲۳٦ میلیمتر به دست آمده است و پرباران ترین ماه سال با ٤٣ میلیمتر در فروردین ماه است و کم باران ترین ماه با ۱/۸ میلیمتر در مرداد ماه است [1]. دشت مشهد به لحاظ جایگاه زمین شناسی در حد فاصل دو زون زمین شناسی کپه داغ و بینالود واقع شده است [۲]. رخساره های زون کپه داغ تماما از سنگهای رسوبی تشکیل شده که به صورت هم شیب از ژوراسیک زیرین تا الیگوسن روی هم قرار گرفته است. زون بینالود با روند شمال غرب جنوب شرق، ادامه زون ساختاری البرز است (شکل ۱). در این زون علاوه بر رخساره های رسوبی، بر خلاف زون کپه داغ سنگهای دگر گونی و سنگهای آذرین متعلق به دوره های مختلف زمین شناسی رخنمون دارند [۳].

مشهد دومین کلانشهر ایران، با ۳۲۸ کیلومترمربع مساحت در جنوب شرق این دشت واقع شده است. در محدودهٔ دشت مشهد برداشت بی رویه از سفرهٔ آب زیرزمینی باعث افت ۲۲/۵ متری طی دورهٔ سی ساله از سال آبی ۱۳٦۲–۱۳٦٤ تا سال آبی ۱۳۹۳–۱۳۹۶ شده است [٥]. اثرات افت آب در آبخوان غیر متراکم به صورت افزایش فشار آب حفره ای و در نتیجه از بین رفتن خاصیت شناوری ذرات جامد خاک در بخشی از سفره که سطح آب در آن پائین افتاده است [٦]. این امر سبب تراکم لایه های خاک شده و باعث ایجاد فرونشست و ترکه ای سطحی در روی زمین می شود [۷]. در ۸۰٪ موارد علت اصلی فرونشست زمین استخراج بیش از حد آب از سفره های آب زیرزمینی است [۸]. فرونشست سطح زمین بر اثر افت آب های زیرزمینی غالباً وسعت زیادی دارد و با تأخیر زمانی از شروع افت سطح آب ایجاد می شود. در صورت افت ممتد سطح آب، فرونشست به صورت برگشت ناپذیر است. در اثر افت ناموزون سطح آب زیرزمینی و توپوگرافی سنگ بستر و تفاوت در ضخامت و تراکم پذیری لایه ها، فرونشست ناموزون رخ می دهد. فرونشست ناموزون سطح زمین می تواند باعث ایجاد شکاف در سطح زمین و آسیب به زیرساختهای شهری و سازهها شود. تاکنون ترکهای ناشی از فرونشست زمین در دشت مشهد مشاهده شده است [۹].



همچنین در شمال مشهد در منطقهٔ خین عرب که جزو حریم شهری مشهد محسوب میشود، نشانههایی از فرونشست زمین و ایجاد شکاف در زمین و ترک در دیوار مناطق مسکونی گزارش شده است [۱۰].

تا کنون پژوهشهای زیادی برای بررسی فرونشست زمین در ایران و جهان انجام شده است، اولین بار ترزاقی در سال ۱۹۲۵ در مورد تئوری تنش مؤثر صحبت کرد. او بیان کرد اگر در بافت آبخوان لایههای از رسوبات ریزدانه تحکیم نشده وجود داشته باشد، همزمان با افت سطح هیدرولیکی تنش مؤثر افزایش یافته و پدیدهٔ تحکیم رخ میدهد که نتیجه آن بهصورت نشست در سطح زمین نمایان میشود [۷]. بعد از آن در سال ۱۹۲۲ تحقیقاتی بهوسیلهٔ پرت^۱ و جونز^۲ در مورد تراکم رس تحت تأثیر برداشت گاز و نفت انجام شد [۱۱]. سپس پژوهشهایی در این زمینه، در قرن بیستم انجام شده که خروج آب از آبخوان و تحکیم خاک در آنها مدل شده است. میتوان به پژوهش مینزر^۳ (۱۹۲۸) و تولمن^٤ و پولند[°] (۱۹٤۰)

- 1. Pratt
- 2. Johnson
- Meinzer
 Tolman
- 4. Tolman 5. Poland
- 5. Poland
- 6. Riley

نشست دشت مشهد را به کمک اطلاعات ترازیابی دقیق، ایستگاه دائم GPS و تداخل سنجی راداری تصاویر ماهواره ENVISAT در بازهٔ زمانی ۲۰۰۵–۲۰۰۳ بررسی کردهاند [۹]. دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) به کمک تداخل سنجی راداری و ترازیابی دقیق، فرونشست دشت تهران را بررسی کردهاند [۱۵]. نامقی(۱۳۹۲) انطباق خوبی بین - نقشهٔ توزیع ضخامت ریزدانه ها با نقشهٔ میانگین نشست سالانه دشت نیشابور به دست آورده است [۱۳]. کاستلازیا^۱ و همکاران (۲۰۱۳) برای بررسی فرونشست و خسارات ناشی از آن در پنج شهر مهم مکزیک از روش تداخل سنجی راداری استفاده کرده اند [۱۷]. آمیغ پی و همکاران (۲۰۱۳) به همراه ابزار تداخل سنجی راداری استفاده کرده اند [۱۷]. آمیغ پی و همکاران (۲۰۱۳) دشت یزد-اردکان استفاده کرده اند [۱۸]. سان و همکاران (۲۰۱۷) نیز به کمک تداخل سنجی راداری به ارزیابی فرونشست زمین در دشت لیهو^۲ در چین پرداخته اند [۱۹]. هم چنین معتق و همکاران (۲۰۱۷) به وسیلهٔ ابزار تداخل سنجی راداری فرونشست زمین در راداری به ارزیابی فرونشست زمین در دشت لیهو^۲ در چین پرداخته اند [۱۹]. هم چنین معتق و همکاران (۲۰۱۷) به وسیلهٔ ابزار تداخل سنجی راداری فرونشست زمین در

در این پژوهش از آخرین تصاویر Envisat موجود در آرشیو آژانس فضایی ESA برای دشت مشهد استفاده شد و تمامی دادههای ترازیابی و GPS موجود در دشت مشهد در بازههای زمانی مختلف، با نتایج تداخل سنجی راداری تلفیق و نرخ فرونشست سالانه با دقت زیاد بهدست آمد. همچنین برای اولین بار در این پژوهش به ارزیابی علل زمین شناختی پدیده فرونشست در محدودهٔ شهر مشهد و حریم اطراف آن پرداخته شده است.

مواد و روشها

برای ارزیابی سابقه فرونشست در محدودهٔ دشت مشهد و بررسی اثرات آن بر شهر مشهد، از سه روش تداخلسنجی راداری^۳، ترازیابی دقیق^۴ و ایستگاههای دائم ژئودینامیک (GPS) استفاده شده است. مزیتها و معایت هر یک از این سه روش در جدول ۱ آمده است.

- 1. Castellazzia
- 2. Liaohe
- 3. InSAR
- 4. leveling

در روش ترازیابی، به کمک ابزار نقشه برداری و با داشتن حداقل دو بازهٔ مشاهداتی امکان بررسی تغییرات سطح زمین و فرونشست زمین در مسیر ترازیابی وجود دارد [۲۱]. سیستم موقعیت یاب جهانی GPS^۱ سیستمی راهبری و مسیریابی ماهواره ای است که از شبکه ای با ۲۵ ماهواره تشکیل شده است. ماهواره های این سیستم روزی دوبار در مداراتی دقیق به دور زمین می گردند و اطلاعاتی را به زمین مخابره می کنند. گیرنده های GPS این اطلاعات را دریافت و با انجام محاسبات هندسی فاصله گیرنده با ماهواره تعیین می شود و در پایش فرونشست سطح زمین استفاده می شود [۲۲]. روش تداخل سنجی راداری، قادر است جابه جایی های سطح زمین را با قدرت تفکیک زیاد و با پوشش وسیع اندازه گیری کند. این روش در سال های اخیر به عنوان یکی از کارآمدترین روش ها برای اندازه گیری تغییرات سطح زمین مورد توجه قرار گرفته است [۳۳]. مهم ترین مزیت این روش این است که تغییر شکل در زمان و مکان قابل اندازه گیری است. اما به دلیل خطاهای زیادی که در حین پردازش تصاویر رادار وجود دارد دقت این روش از دو روش قبلی کم تر است و دقتی در حدود می در مداور رادار وحود دارد دقت این روش از دو روش قبلی کم تر است و در منه برای

	Leveling	Continuous GPS	InSAR
Spatial resolution	1.5—2 Km	10—15 km	25m
Measurement frequency	1 year	1 day	35 day
Measurement (vertical) accuracy	0.5—1 cm	0.5—1 cm	2 cm

جدول ۱. مقایسه سه روش ترازیابی، تداخلسنجی و GPS [۲٤]

ارزیابی فرونشست زمین در دشت مشهد به کمک روش های ذکر شده در سه بازهٔ زمانی انجام شده است. قدیمی ترین اطلاعاتی است که از فرونشست زمین در منطقه موجود است، مربوط به روش ترازیابی دقیق است که به وسیلهٔ سازمان نقشه برداری کشور در دو بازهٔ زمانی ۲۰۰۳–۱۹۹٤ انجام شده است. برای بررسی وسعت و الگوی فرونشست به کمک تداخل سنجی راداری، تصاویر ماهواره Envisat برای بازهٔ زمانی ۲۰۱۰–۲۰۰۳ پردازش شده و میزان فرونشست محاسبه شده است. سه ایستگاه دائم GPS، نیز تغییرات سطحی زمین را در

^{1.} Global Positioning System

بازهٔ زمانی ۲۰۱۵–۲۰۰۵ ثبت کردهاند که جدیدترین دادههایی است که برای بررسی فرونشست و همچنین صحتسنجی نتایج تداخلسنجی راداری استفاده میشود.

در آخرین بخش بهمنظور بررسی علل رخداد پدیده فرونشست در محدودهٔ بررسی شده، شرایط زمین شناسی و هیدرو ژئولوژی دشت از جمله افت آب زیرزمینی و موقعیت گسل ها و مخروطه افکنه ها بررسی شده است. هم چنین شرایط زیر سطحی، به وسیلهٔ مقاطعی طولی و عرضی از بافت خاک تا عمق بیش از ۲۰۰ متری بررسی شده است. در نهایت با توجه به تغییرات تراز آب در آینده، نرخ فرونشست و جهت توسعه فرونشست در محدودهٔ شهر مشهد تخمین زده شده است.

ارزیابی فرونشست زمین در دشت مشهد

مطالعه فرونشست زمین به کمک روش ترازیابی در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳– ۱۹۹٤

مسیرهای ترازیابی اغلب به موازات جادهها انجام می شود. برای دشت مشهد سه خط ترازیابی در سه مسیر مشهد-قوچان(BCBD)، مشهد-کلات (BDBE) و مشهد-سرخس (BEBN) به وسیلهٔ سازمان نقشه برداری کشور انجام شده است. اولین برداشت در این سه مسیر در سال ۱۹۹٤ انجام شده و دومین برداشت مربوط به سال ۲۰۰۳ است. در شکل ۲ این سه مسیر ترازیابی که به موازات جاده مشهد به سمت قوچان، کلات و سرخس است آورده شده است. هر چه رنگ دایره ها که بیانگر موقعیت ایستگاه های ترازیابی است، تیره تر باشد، میزان نشست سالانه بیش تر است. مسیر مشهد-قوچان و مشهد-سرخس دشت را به صورت طولی و مسیر مشهد-کلات دشت را به صورت عرضی قطع می کنند. کم ترین نرخ نشست سالانه در مسیر مشهد-کلات که دشت را به صورت عرضی قطع می کند، دیده شده است.



شکل۲. میانگین نرخ نشست در سه مسیر ترازیابی مشهد-قوچان، مشهد-کلات و مشهد-سرخس در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳–۱۹۹٤

شکل ۳ میانگین نرخ نشست سالانه در مسیر مشهد-قوچان از بنچ مارک شمارهٔ ۳۸ تا ۲۰ را نشان می دهد. بعضی از ایستگاههای ترازیابی در طول این سالها تخریب شدهاند که به صورت علامت + در شکل مشخص شدهاند. به طور متوسط فاصلهٔ بنچ مارکهای ترازیابی حدود km ۲ است. بیش ترین نرخ نشست در این مسیر در بازهٔ زمانی ۹ ساله (۲۰۰۳–۱۹۹٤) در بنچ مارک شمارهٔ ۵۱ به میزان cm/year ۷ رخ داده است. در مسیر مشهد-کلات بیش ترین نرخ نشست در بنچ مارک شمارهٔ ۷۱ و به میزان ۳۰۷ و ماست. (شکل ٤). هم چنین بنچ مارک شمارهٔ ۸ در مسیر مشهد-سرخس بیش ترین نرخ نشست را به میزان هم چنین بنچ مارک شمارهٔ ۸ در مسیر مشهد-سرخس بیش ترین نرخ نشست را به میزان نشست بیش تری مشاهده می شود. با توجه به شکل ۲ و نتایج داده های ترازیابی می توان بیان نشست بیش تری مشاهده می شود. با توجه به شکل ۲ و نتایج داده های ترازیابی می توان بیان قبل از سال ۱۹۹۶ هیچ داده ای از فرونشست در دست نیست نمی توان در مورد سال ۱۹۹۶ به قبل از سال ۱۹۹۶ هیچ داده ای از فرونشست در دست نیست نمی توان در مورد سال ۱۹۹۶ به قبل اظهار نظر کرد. اما هیدروگراف واحد دشت نشان می دهد که به دلیل برداشت بی رویه آب زیرزمینی از سال ۱۹۸۶ تا کنون افت پیوستهٔ تراز آب زیرزمینی اتفاق افتاده است.



شكل ۳. نمودار ميانگين سالانه فرونشست در مسير ترازيابي مشهد-قوچان BCBD (۱۹۹٤-۱۹۹۶)



شکل٤. نمودار میانگین سالانه فرونشست در مسیر ترازیابی مشهد-کلات BDBE (۱۹۹٤-۲۰۰۳)



شکل ۵. نمودار میانگین سالانه فرونشست در مسیر ترازیابی مشهد–سرخس BEBN (۱۹۹۶–۱۹۹۶)

بررسى فرونشست بهكمك تكنيك تداخلسنجى رادارى

تداخلسنجی راداری 'InSAR یکی از روشهایی است که در این پژوهش و بسیاری از پژوهشهای اخیر استفاده میشود. در این روش با استفاده از تصاویر راداری برداشت شده از یک منطقه در زمانهای مختلف، جابهجایی سطح زمین در آن منطقه محاسبه میشود. تداخلسنجی از ضرب یک تصویر SAR مختلط در مزدوج مختلط تصویر دوم تولید

^{1.} Synthetic Aperture Radar Interferometry

می شود و باعث ایجاد تداخل نگاشت ^۱ می شود. تداخل نگاشت تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر به دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به طور دقیق روی هم منطبق شده اند، حاصل می شود [۲۵]. اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر گویای اختلاف فاصلهٔ عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویر برداری است. به کمک مقدار اختلاف فاز می توان متغییرهای مختلف از جمله میزان جابه جایی سطح زمین تا کسری از سانتی متر را استخراج کرد.

قدیمی ترین تصاویر راداری که برای بررسی فرونشست دشت مشهد استفاده شده است، دادههای راداری مربوط به ماهواره ERS2 برای گذر پایین در بازهای ۹ ماهه از ۱۹۹۸/۰۹/۱٤ تا ۱۹۹۹/۰٦/۲۱ است [۲٦]. در این بازهٔ زمانی، پردازش تداخل سنجی راداری بهروش Stacking و به کمک نرمافزار Doris با ٤ تداخل نگاشت انجام شده است و مشاهدات تداخل سنجی برای این بازه حاکی از رخداد فرونشست است. شکل ٦ نقشه متوسط نرخ فرونشست را برای دشت مشهد نشان می دهد. بیش ترین نرخ فرونشست ۲۲۲۲/ بهدست آمده است [٢٦]. در جدول ۲ لیست بررسی های فرونشست با استفاده از دادههای راداری در دشت مشهد ارایه شده است.



شکل ۲. متوسط نرخ فرونشست برای دادههای ERS2 در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۱۹۹۹ [۲۲]

^{1.} Interferogram

بيش ترين نرخ فرونشست سالانه (cm/year)	نرمافزار	بازهٔ زمانی	منبع
۲۲	Doris	1998-1999	اکبری ۱۳۸۷
٢٤	GAMMA	۲··۳_۲··٥	حسینی ۱۳۸۶
۲۸-۳۰	Doris	۲۰۰۳–۲۰۰۵	معتق و همکاران ۲۰۰۷
٢٤	GAMMA	٢٠٠٣_٢٠٠٦	دهقانی و همکاران ۲۰۰۹
۲٥	Doris	۲ ۰۰ ٤-۲۰ ۰ ۷	اکبری و معتق ۲۰۱۱
79	SARscape	۲۰۰۳_۲۰۰۵	پژوهش حاضر
٣٢	SARscape	۲۰۰۹–۲۰۱۰	پژوهش حاضر

جدول ۲. مشاهدات تداخل سنجی راداری و بیش ترین نرخ فرونشست سالانه بهدست آمده در محدودهٔ دشت مشهد

بررسی فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰ – ۲۰۰۳

در این پژوهش، ۲۳ تصویر راداری ماهواره ENVISAT ASAR, C-band در سطح 'SLC پردازش شدهاند. این تصاویر مربوط به گذر ۳۹۲ در بازهٔ زمانی ۲ ژوئن ۲۰۰۳ تا ۲۶ می ۲۰۱۰ و از نوع تصاویر گذر پایین آهستند. لازم به یاداوری است که این تصاویر، تا ۲۶ می ۲۰۱۰ و از نوع تصاویر گذر پایین آهستند. لازم به یاداوری است که این تصاویر، پس از ارسال پیشنهاد به آژانس فضایی اروپا "ESA و بررسی و پذیرش آن به وسیلهٔ آژانس در اختیار قرار گرفت و برای پردازش استفاده شد. تحلیل سری زمانی بر مبنای طول خط مبنای مکانی کوتاه انجام شده است. در این روش نقشه سرعت متوسط جابه جایی و سری زمانی جابه جایی برای نقاط مد نظر به دست می آید. خط مبنای مکانی کمتر از ۲۰۰ متر و خط مبنای زمانی زمانی باید تا حد ممکن کوتاه انجام شده است. در این روش نقشه سرعت متوسط جابه جایی و سری زمانی جابه جایی برای نقاط مد نظر به دست می آید. خط مبنای مکانی کمتر از ۲۰۰ می و خط مبنای زمانی نیز کمتر از ۲ ماه در نظر گرفته شده است. خط مبنای زمانی باید تا حد ممکن کوتاه باشد تا اثرات عدم همبستگی زمانی به کمترین مقدار خود برسد. با در نظر گرفتن این موره، ۳۰ کمتر این مکانی کمتر از ۳۸ کمکن نرمانوزار ۲۰۹ که که ترا خال می که ترا زر ۲۰۰ که ترازش این این این ممکانی کمتر از ۲۰۰ کمکن نرمانی به کمترین مقدار خود برسد. با در نظر گرفتن این شروط، ۳۸ تداخل نگاشت به کمکن نرمانوزار ۲۰۹ که که ترون که کانی کمتر از ۲۰۰ که ترون این شروط، ۳۰ که تراخل نگاشت به کمکن نرمانوزار ۲۰۹ که که ترون مقدار خود برسد. با در نظر گرفتن این شروط، ۳۰ تراز ۲۰۰ که نرمانوزار ۲۰۹ که که ترون مقدار خود برسد. با در نظر گرفتن این شروط، ۳۰ تداخل نگاشت به کمکن نرمانوزار ۲۰۹ که که ترونانی به کمترین مقدار خود برسد. با در نظر موند زمانی باید تا ی

^{1.} Single Look Complex

^{2.} Descending

^{3.} European Space Agency

شدند. هندسه اخذ تصاویر راداری و تداخل نگاشتهای پردازش شده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. هندسه اخذ تصاویر راداری در منطقهٔ بررسی شده در شکل ۸ دو نمونه تداخل نگاشت قبل از حذف خطای باقیمانده مداری و کالیبره شدن با نقطه مرجع آورده شده است.

یکی از این تداخل نگاشتها طول خط مبنای زمانی ۱۹۲ روزه و دیگری ۳٤ روزه دارد. سیگنال مربوط به جابهجایی حتی در شکل ۸ ب که خط مبنای زمانی کوتاه دارد، بهوضوح در مرکز شکل بهرنگ قرمز مشاهده میشود. اعداد لژاندار واحد رادیان دارند.



نشریهٔ زمینشناسی مهندسی، جلد سیزدهم، شمارهٔ ۳ پاییز ۱۳۹۸

شکل ۸. الف) تداخل نگاشت پردازش شده به شکل ۸ ب) تداخل نگاشت پردازش شده به تاریخ ۲۰۰۹/۱۰/۲۲–۲۰۰۹/۱۰/۳۰ تاریخ ۲۰۰۹/۱۱/۳۰

مرحلهٔ بعدی ایجاد سری زمانی تغییر شکل با استفاده از تداخل نگاشتها است. فاز تداخل نگاشت دارای اثر توپوگرافی، خطای مداری، جابهجایی هدف و تأثیرات اتمسفر است. برای حذف اثر توپوگرافی، از مدل ارتفاعی رقومی 'SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است. همچنین بهمنظور کاهش اثرات اتمسفر و خطای بازیابی فاز، یک شرط نرمکنندگی به مسئلهٔ معکوسسازی حل کمترین مربعات اضافه شده است. مراحل مختلف الگوریتم مورد استفاده در شکل ۹ آورده شده است. اصول این الگوریتم بهوسیلهٔ براردینو (۲۰۰۲) ^۲ارائه شده است [۳۰].



شکل ۹. نمودار روش تحلیل سری زمانی جابهجایی

چنانکه در شکل ۷ مشاهده میکنید، تصاویر از لحاظ زمانی پیوستگی ندارند، بههمین دلیل تحلیل سری زمانی در دو بازهٔ زمانی ۲۰۰۳/۲/۳۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ و ۲۰۰۹/۸/۱۷ تا ۲۰۱۰/٥/۲٤ بهطور مجزا انجام شد. برای مشخص کردن عوارض شاخص فرونشست در سطح زمین و بررسی رفتار بلند مدت فرونشست، نقشه نرخ متوسط فرونشست بهکمک نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی استخراج شد.

بازهٔ زمانی اول، بازهای دوسال و ۵ ماهه است. بازهٔ زمانی دوم بازهای نه ماهه مربوط به ماه آگوست میلادی معادل شهریور تا ماه می میلادی معادل خرداد است که فصلهای پاییز و زمستان و بهار را در بر میگیرد. بیشترین نرخ فرونشست در اولین بازهٔ زمانی بهمیزان ۲۹ cm/year و در دومین بازهٔ زمانی ۳۲ cm/year است. در جدول ۲ بیشترین نرخ فرونشست سالانه بهدست آمده از پژوهش حاضر با پژوهشهای قبلی انجام یافته در دشت

- 1. Shuttle Radar Topography Mission
- 2. Berardino

مشهد، با توجه به بازهٔ زمانی و نوع نرمافزار استفاده شده مقایسه شده است. شکل ۱۰ نقشهٔ نرخ متوسط فرونشست از تاریخ ۲۰۰۳/٦/۳۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ را نشان میدهد.

شکل ۱۰. نقشهٔ نرخ متوسط فرونشست ۲۰۰۳/۵/۳۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ و موقعیت ایستگاههای دائم GPS

در این تصویر دو کاسه فرونشستی یکی واقع در شمال غرب و دیگری مربوط به جنوب شرق شهر مشهد مشخص است. بدین معنی که از دو جهت فرونشست وارد حریم شهر مشهد می شود. منطقه در حال فرونشست جنوب شرق مشهد با بیضوی کوچک مشخص شده و در جنوب روستای قلعه خیابان از توابع بخش رضویه شهرستان مشهد واقع شده است. از سازه های مهمی که در این منطقه واقع شده است می توان به فرودگاه بینالمللی شهید هاشمی نژاد که روزانه بیش از ۲۰۰ پرواز در آن انجام می گردد اشاره کرد. منطقه در حال فرونشست شمال غرب مشهد با بیضوی بزرگتر مشخص شده و جاده مشهد – قوچان در حاشیهٔ جنوب غربی این بیضوی واقع شده است و روستاهای زیادی از جمله عبدل آباد، جلالی، قره جنگل، عباس آباد، بازمرگان و کلاته برفی و همچنین، منطقهٔ توس که آرامگاه فردوسی در آن واقع شده در این بیضوی قرار دارد.

بررسی فرونشست زمین به کمک ایستگاههای دائم GPS در بازهٔ زمانی ۲۰۱۶ – ۲۰۱۵ شش ایستگاه دائم GPS به وسیلهٔ سازمان نقشه برداری کشور برای اندازه گیری جابه جایی های سطح زمین در محدودهٔ دشت مشهد نصب شده است. از این میان سه ایستگاه جابه جایی های سطح زمین در محدودهٔ دشت مشهد نصب شده است. از این میان سه ایستگاه دیگر فرونشستی را به ثبت نرسانده اند. سری زمانی فرونشست زمین در این سه ایستگاه برای بررسی دقت روش تداخل سنجی راداری و مقایسهٔ تغییرات ارتفاعی زمین حاصل از اندازه گیری دو روش، در شکل ۱۱ الف، ب و ج آورده شده است. در جدول ٤ مشخصات آین ایستگاهها آورده شده است. در شکل ۱۰ این موقعیت ایستگاهها نسبت به شهر مشهد آین ایستگاهها آورده شده است. در شکل ۱۰ نیز موقعیت ایستگاهها نسبت به شهر مشهد آورده شده است. از بین این سه ایستگاه، بیشترین نرخ نشست سالانه را ایستگاه درمیزان TOUS نیز SOLM نیز موقعیت ایستگاهها نسبت به شهر مشهد بهمیزان تعیار است. از بین این سه ایستگاه، بیشترین نرخ نشست سالانه را ایستگاه درمیزان CM/ و ایستگاه MFRD نیز موقعیت ایستگاهها نسبت به شهر مشهد تعیار نوین تغییرات فصلی مهمی را نشان نمی دهد، بدین معنی که در طول پائیز و زمستان آبخوان تغذیه نمی شود در نتیجه رفتار فرونشست یک رفتار خطی است و رفتار سینوسی ناشی از تعذیه و تخلیه مشاهده نمی شود.

میانگین نشست سالانه (cm/year)	کل نشست تجمعی برداشت شده (cm)	بازهٔ زمانی برداشت ایستگاه		نام ایستگاه GPS
۲۱	128	70/.1/.1	7.11/1.//	TOUS
V/A	٣٤	7	7.17/.0/.1	NFRD
1/1	٩/٩	۲۰۰۰/۱۱/۳۰	2.15/17/29	GOLM

جدول ۳. مشخصات ایستگاههای دائم GPS واقع در دشت مشهد که فرونشست ثبت کردهاند.

کمیت آماری مجذور میانگین مربعات خطا 'RMSE که در رابطهٔ ۱ آمده است، خطای پردازش تداخلسنجی راداری را بهکمک نتایج بهدست آمده از ایستگاههای دائم GPS بهدست میآورد. در این فرمول \widehat{x}_i , \widehat{x}_i میزان فرونشست محاسبه شده از دو روش تداخلسنجی و GPS است.

RMSE=
$$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \hat{x}_i)^2}$$
 (1)

^{1.} Root Mean Squared Error

مقدار خطای محاسبه شده برای ایستگاه ۸۹۲۵ م ۹۰ و برای ایستگاه NFRD، مقدار خطای محاسبه شده برای ایستگاه ۹۲۵۲ مست. با نگاهی به کمیتهای محاسبه شده می توان فهمید که نتایج تداخل سنجی راداری تطابق بسیار خوبی با داده های GPS داشته و اختلاف میزان فرونشست محاسبه شده در دو روش مذکور کمتر از ۲۵ ۱ است. این امر مؤید این موضوع است که خطاهای موجود در روش تداخل سنجی راداری از جمله خطای اتمسفر و خطای بازیابی فاز تا حد زیادی تعدیل شده است.

تداخل سنجی راداری تغییرات تراز زمین را تا سال ۲۰۱۰ بررسی کرده است. اما ایستگاههای GPS اطلاعات جدیدتری را که برای ایستگاه گلمکان تا اواخر سال ۲۰۱٤ است در اختیار قرار میدهد. بررسی سری زمانی فرونشست تصاویر ۱۱ الف، ب و ج نشان میدهد که سطح زمین با همان نرخی که در بازه ۲۰۱۰–۲۰۰۳ در حال فرونشست بوده است از سال ۲۰۱۰ به بعد نیز فرونشست کرده است. با توجه به اینکه فرونشست زمین در محدودهٔ بررسی شده یک رفتار خطی نشان میدهد و اینکه افت سطح آب زیرزمینی در حال افزایش است، میتوان بیان کرد که تا زمانی که خاک به مرحلهٔ تحکیم ثانویه برسد، با همین نرخ فرونشست ادامه خواهد داشت.

شکل ۱۱. الف) مقایسهٔ مشاهدات پیوسته ایستگاه دائم ژئودینامیک TOUS با نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری

-InSAR 2003-2005 · GOL GPS 0 -0.02 -0.04 Deformation (mm) 80.0-1.0-21.0--0.14 -0.16 -0.18 2003 2005 2007 2009 2011 2013 2015 Year

شکل ۱۱. ج) مقایسهٔ مشاهدات پیوسته ایستگاه دائم ژئودینامیک GOL با نتایج حاصل از تداخلسنجی راداری

ىحث

زونبندى فرونشست

برای بررسی دقیق تر پدیده فرونشست و همچنین مقایسهٔ رفتاربلند مدت فرونشست، نقشههای نرخ متوسط فرونشست بهدست آمده از روش تداخل سنجی راداری زونبندی شده است. فاصله طبقات در نقشهٔ زونبندی نشست cm/year ٥ است که بر این اساس ٦ زون تعریف شده است. شکل ١٢ نقشهٔ زونبندی فرونشت مربوط به دو بازهٔ زمانی ۲۰۰۵–۲۰۰۳ و ۲۰۱۰–۲۰۰۹ برای کل دشت مشهد را نشان می دهد. در جدول ٤، مساحت هر یک از زونهای هفت گانه آورده شده است.

با مقایسهٔ شکل ۱۲ الف و ب و همچنین به کمک جدول ٤، افزایش نرخ فرونشست و افزایش مساحت مناطق با نرخ بالای فرونشست در طول زمان قابل مشاهده است. چنانچه در صد پوشش مساحتی زونهای شمارهٔ ٥ و ٦ که نرخ فرونشستی بیش از ۲۰ cm/year را دارند، از سال ۲۰۰۵–۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۰–۲۰۰۹ روند افزایشی نشان می دهد و در صد پوشش مساحتی این مناطق از ۲۰/۳٪ به ۸/۸۷٪ رسیده است.

دقت پژوهشها و عدم قطعیت

به منظور بررسی دقت بررسی ها و داده های استفاده شده، مختصری به عدم قطعیت ها در داده ها و روش های استفاده شده می پردازیم. در روش ترازیابی، به کمک ابزار نقشه برداری و با داشتن دو ایک مشاهداتی فرونشست اندازه گیری می شود. سری اول مشاهدات در سال ۱۹۹٤ جدول ٤. زونبندی مساحتی دشت مشهد براساس نرخ فرونشست سالانه

شمارهٔ			در صد پوشش
زون	نرخ نشست سالانه	در صد پوشش مساحتی بازهٔ زمانی	مساحتى بازة زماني
	(cm/year)	********	****
١	≤٥	·/••	·/.vo/o
۲	0-1.	·/. \ 0	1.12/2
٣	1 • - 1 0	·/.٨/٨	·/.٦

1.2/0V

1../٦

1../.٣

۲۰۰۳/٦/۳۰ ت ۲۰۰۰/۱۱/۲۱

زمانی ۲۰۱۰/۵/۲٤ تا ۲۰۰۹/۸/۱۷

10-1.

1--10

۲٥≤

با دستگاه N3 WILD با دقت ۱/۲ میلیمتر در یک کیلومتر و سری دوم مشاهدات در سال ۲۰۰۳ با دستگاه DINI12 ZEISS با دقت ۳ میلیمتر در یک کیلومتر به صورت ترازیابی رفت و برگشت انجام شده است [۲۱]. تغییرات ارتفاعی زمین بهدست آمده از این روش دقت زیادی دارد. اما برداشتها بهصورت نقاطی در طول یک مسیر خطی و با دوبار تکرار زمانی انجام شده است. روش دیگر استفاده از نتایج تغییرات ارتفاعی زمین بهدست آمده از ایستگاههای دائم GPS است که در این روش نیز خطاهایی همانند خطاهای ایجاد شده تحت تأثیر اتمسفر مؤثر بر انتشار امواج فرستنده از ماهواره و یا تغییرات سازهای و نشستهای سازهای ایستگاه GPS وجود دارد بهطورکلی دقت این روش از روش ترازیابی کمتر است و دقتی در حدود ۱ cm دارد. اما مزیت این روش این است که دادهها به صورت روزانه و پیوسته در زمان برداشت می شوند. در روش تداخل سنجی راداری خطاهای اتمسفری، خطاهای باقی مانده تو پوگرافی ناشی از DEM، خطای ناشی از عدم همبستگی زمانی و مکانی،

1.7/77

1. · /VE

1../18

خطا در مرحلهٔ تحلیل سری زمانی، خطاهای مداری و خطا در مرحلهٔ بازیابی فاز وجود دارد که تا حد امکان در این پژوهش تعدیل شدهاند. به گونهای که در مقایسهٔ نرخ فرونشست بهدست آمده از تداخل سنجی راداری و GPS به کمک روش میانگین مجذور کم ترین مربعات خطا، خطایی کم تر از ۲ m ۱ بین دو روش وجود داشته است. مهم ترین مزیت این روش این است که تغییر شکل در زمان و مکان قابل اندازه گیری است.

بررسى علل فرونشست

برای بررسی تأثیر پارامترهای زمین شناختی بر فرون شست، دو مقطع طولی و عرضی از دشت ترسیم شده است. در این مقاطع بافت خاک در گمانه های عمیق بهره برداری آب و پیزومتری بررسی شده است. همچنین افت آب زیرزمینی در بازهٔ ۲۰۱۰–۱۹۸۷ و نرخ فرون شست سالانه زمین در بازهٔ ۲۰۱۰–۲۰۰۳ که از نتایج داده های راداری به دست آمده و عمق سنگ کف که از نتایج ژئوفیزیک استخراج شده است نیز محاسبه و ترسیم شده است. به دلیل وجود تأخیر زمانی میان افت آب و فرون شست، بازهٔ زمانی طولانی تری برای تغییرات تراز آب انتخاب شده و از قدیمی ترین داده های موجود استفاده شده است.

جنوب شرق، اولین بخش نرخ فرونشست متوسط دارد. در ابتدای مقطع در محدوده گمانه شمارهٔ ۲۱ بافت خاک عمدتاً درشتدانه با کمی ریزدانه و افت آب متوسط و ضخامت آبرفت در حدود ۲۰۰ متر است. بنابراین نرخ فرونشست کمتر از ۱۰cm/yr ایجاد شده است. بخش دوم از محدوده گمانهٔ شمارهٔ ٤ تا گمانه شمارهٔ ۷ است. در این بخش بافت خاک تناوبی از ریزدانه و درشتدانه است و افت آب به بیش از ۳۵ متر با نرخ افت آب سالانه بیش از ۱/۵ متر می رسد و ضخامت آبرفت در حدود ۲۰۰ متر است و بیش ترین نرخ فرونشست تا بیش از ۲۰۲ cm/yr ۲۰ در این بخش ایجاد شده است.

بخش سوم در محدودهٔ شهر مشهد است که از گمانهٔ شمارهٔ ۱۹ شروع می شود. در این بخش بافت خاک ریزدانه و رسی است. تحت تأثیر تغذیه آبخوان از پساب شهری، افت آب کاهش می یابد و به همان نسبت نیز نرخ فرونشست کاسته می شود. بخش چهارم از گمانهٔ شمارهٔ ۱۵ تا انتهای جنوب شرقی مقطع است. که مجدداً تراز آب افت کرده اما نرخ فرونشست به طور میانگین در حدود Cm/yr ۵ است که به دلیل بافت در شت دانه خاک و ضخامت کم تر آبرفت با وجود افت تراز آب، نرخ فرونشست کمی ایجاد شده است.

ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن ... ٤٥٥

شکل ۱۳. موقعیت مقاطع طولی و عرضی نسبت به محدودهٔ فرونشست به همراه موقعیت گسل ها و رودخانه

شکل ۱٤. مقطع طولی **B-B'** از بافت خاک بههمراه نرخ سالانه فرونشست (۲۰۱۰–۲۰۰۳) و افت تراز آب زیرزمینی (۲۰۱۰–۱۹۸۷) و ضخامت آبرفت

در مقطع عرضی شکل ۱۵ با حرکت از جنوب غرب به سمت شمال شرق، از ارتفاعات فاصله گرفته و به کشف رود نزدیک تر شده و خاک ریزدانه تر می گردد. در محدودهٔ قبل از گسل F2 با وجود افت آب متوسط ۲۰ متری، به دلیل در شت دانه بودن خاک و واقع شدن در پای ارتفاعات، نرخ فرونشست کم است. بیش ترین نرخ فرونشست بین گسل F2 و رودخانه کشف رود است این امر به دلیل فراوانی بیش تر خاک ریزدانه و افزایش ضخامت آبرفت و افت آب زیرزمینی است. بعد از گمانهٔ شمارهٔ ۳ تا انتهای شمال شرقی مقطع، افت آب و فرونشست مشاهده نمی شود و ضخامت آبرفت نیز به کم تر از ۱۰۰ متر کاهش می یابد.

شکل ۱۵. مقطع عرضی D-D' از بافت خاک بههمراه نرخ سالانه فرونشست (۲۰۱۰–۲۰۰۳) و افت تراز آب زیرزمینی (۲۰۱۰–۱۹۸۷) و ضخامت آبرفت

پیش بینی نشست در شهر مشهد در آینده با توجه به تکمیل شبکه فاضلاب فرونشست زمین از محدودهٔ دشت مشهد وارد حریم شمالی شهر مشهد شده است و با توجه به افت فزاینده سطح آب زیرزمینی در منطقه، پیش بینی فرونشست در محدودهٔ شهر مشهد امری ضروری است.

از سال ۲۰۰٦ سیستم جمع آوری فاضلاب شهری مشهد، راهاندازی شده است [۳۲]. بدین معنی که پس از راهاندازی آن، فاضلابی که قبلا به صورت چاه های جذبی وارد آبخوان محدوده مشهد می شد، به مرور از آبخوان حذف شده است. در سال ۲۰۱۲، ۲۳٪ از جمعیت شهر زیر پوشش شبکه فاضلاب بوده است و تا سال ۲۰۳۱ باید کل شهر تحت پوشش شبکه جمع آوری فاضلاب قرار گیرد [۳۲]. بدین معنی که در سال ۲۰۳۱، ۳۷٪ از فاضلابی که آبخوان را تغذیه می کرده است، که حجمی در حدود ۲۲ میلیون متر مکعب دارد، از آبخوان محدودهٔ شهر مشهد حذف می شود. اشجاری ۱۳۹٤، اثر سیستم جمع آوری فاضلاب شهری مشهد بر آبخوان را مدل کرده است و به این نتیجه رسیده است که پس از تکمیل سیستم جمع آوری فاضلاب شهری، در بعضی از بخش های آبخوان تا بیش از ۲۰ متر افت تراز آب زیرزمینی ایجاد می شود. در نتیجه بالاآمدگی موضعی آب در محدودهٔ شهر مشهد از بین رفته و تبدیل به افت تراز آب می شود [۳۲]. در سال های اخیر حجم آب انتقالی از سد دوستی کاهش یافته است و به مرور چاه های بهره برداری آب درون شهر فعال شده است که خود

ارزیابی زمین شناختی پدیدهٔ فرونشست نشان می دهد که بخشهایی از شهر مشهد که در جنوب گسل F2 واقع شده اند، به دلیل کاهش ضخامت آبرفت و بافت درشت دانه خاک مستعد فرونشست نیست. اما در بخشهای شمالی و شمال شرقی شهر که در بین دو گسل F2 و گسل کشف رود واقع شده اند احتمال رخداد فرونشست در اثر افت تراز آب وجود دارد. بنابر این نرخ افت سالانه سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست سالانه، در سه پیزومتر عسگریه، کلاته برفی و تخم مرز که در مرکز کاسه فرونشستی و در حد فاصل بین گسل F2 و گسل کشف رود واقع شده اند و از نظر زمین شناختی با محدودهٔ شمال شرقی شهر مشهد مشابهت دارند، بررسی شده اند. موقعیت این سه پیزومتر در شکل ۱۲ (۱ و ٤ و ۷) مشخص است. هیدرو گراف سه پیزومتر مذکور به همراه سری زمانی فرونشست زمین در محل این سه آورده شده است.

میانگین سالانه افت سطح آب زیرزمینی در این سه پیزومتر m/year و متوسط نرخ سالانه فرونشست در محل این سه پیزومتر ۱۸ cm/year است. بهعبارت دیگر بهازای هر یک متر افت سطح آب زیرزمینی بهطور میانگین ۱۶ cm وونشست رخ داده است.

مشابه فرونشستی که در این سه پیزومتر در اثر افت آب ایجاد شده است، احتمالاً در بخشهای شمالشرقی شهر مشهد نیز در اثر حذف پساب شهری از آبخوان و افت تراز آب ایجاد شده و فرونشست چشمگیری ایجاد خواهد شد. بهعبارت دیگر بیضوی فرونشست شمالغربی و جنوبشرقی که در شکل ۱۰ مشخص است به یکدیگر متصل می شود. این میزان فرونشست می تواند مشکلات زیادی را برای سازهها و زیرساختهای شهری ایجاد کند.

نتيجه گيرى

با ارزیابی طولانی مدت فرونشست به کمک ابزارهای ترازیابی، تداخل سنجی و ایستگاههای ژئودینامیک می توان نتیجه گرفت که فرونشست زمین در دشت مشهد روندی فزاينده دارد. قديمي ترين دادههايي كه از فرونشست زمين در اختيار است مربوط به ترازيابي دقیق است که بیشترین نرخ فرونشست دشت را در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳–۱۹۹٤ بهمیزان cm/year ، نشان میدهد. پردازش تداخلسنجی راداری بیشترین نرخ فرونشست سالانه دشت مشهد را در سال ۱۹۹۹–۱۹۹۸، ۲۲ cm/year و در سال ۲۰۰۵–۲۰۰۳، ۲۹ Cm/year د و در سال ۲۰۱۰–۲۰۰۹، ۳۲ cm/year محاسبه کرده است. سری زمانی ایستگاههای دائم GPS نیز ادامهی روند خطی فرونشست را بعد از سال ۲۰۱۰ تأیید میکنند. روند توسعه فرونشست تابع شرایط زمینشناسی است. با فاصله گرفتن از ارتفاعات و نزدیک شدن به کشفرود، توالی رسوبات ریزشونده است. بهطورکلی در دشت مشهد مستعدترین مناطق برای فرونشست محدوده بین گسل کشفرود و گسل F2 است که عمق سنگ کف زیاد و تناوب نهشتههای ریزدانه و درشتدانه داشته و سطح آب زیرزمینی افت شدیدی نشان میدهد. بهاستثنا محدودهٔ شهر مشهد که بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی دارند، در دیگر بخشهای دشت بیشترین نرخ فرونشست در همین نواحی دیده شده است. مدلهای آب زیرزمینی که تغییرات تراز آب زیرزمینی در شهر مشهد را پیش بینی کردهاند نشان میدهند که در صورت تکمیل شبکه فاضلاب شهری و حذف فاضلاب از آبخوان شهر مشهد، افت شدید تراز آب در محدودهٔ شهر مشهد رخ میدهد. که این افت آب میتواند سبب رخداد فرونشست در بخش های شمال شرقی شهر مشهد شود بهعبارت دیگر. فرونشست از نشریهٔ زمینشناسی مهندسی، جلد سیزدهم، شمارهٔ ۳ پاییز ۱۳۹۸

شمالغرب و جنوبشرق به شهر مشهد سرایت میکند که میتواند مشکلاتی برای این مناطق بهوجود آورد.

قدردانى

بدینوسیله از همکاری آژانس فضایی اروپا (ESA) برای ارسال تصاویر راداری تشکر کرده و همچنین از مرکز پژوهشهای شورای اسلامی شهر مشهد بهدلیل حمایت مالی قدردانی میکنیم.

منابع

- "شرکت مدیریت منابع آب ایران"، شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی (۱۳۹٤)
- ۲. آقانباتی س. ع.، "زمین شناسی ایران"، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ دوم (۱۳۸۵).
- ۳. شرکت آب منطقهای خراسان رضوی، مهندسین مشاور طوس آب، "گزارش آبهای زیرزمینی مدیریت بهم پیوسته منابع آب حوضه آبریز کشفرود" (۱۳۸۷).
- ۶. "آلبوم نقشهها آبهای زیرزمینی مدیریت بهم پیوسته منابع آب حوضه آبریز کشفرود"، شرکت مهندسی مشاور طوس آب (۱۳۸۷)

 ۵. شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی، "آمار و اطلاعات پایه منابع آب"، (۱۳۹۵)
 ۲. هرمن ب، رحمانیان د، "نشست زمین و ایجاد شکاف بر اثر تخلیه آبهای زیرزمینی"، مجلهٔ آب، شمارهٔ (۱۳٦٤) ۵ ۲۵–۳۵.

- Terzaghi K., "Principles of soil mechanics: IV- settlement and consolidation of clay", Engineering News-Record., Vol. 95, No. 19, (1925) 874-878.
- Gambolati G., Teatini P., Ferronato M., "Anthropogenic Land Subsidence", Encyclopaedia of Hydrological Sciences, M.G. Anderson (ed), J. Wiley, Chapter 158, IV (2005) 2444-2459.
- Motagh M., Djamour Y., Walter T. R., Wetzel H.-U., Zschau J., Arabi S., "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from

InSAR, levelling and GPS", Geophysical Journal International, Vol. 168, No. 2, (2007) 518-526.

۱۰. سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقهٔ شمالشرق، "گزارش بازدید انجام شده از پدیدهٔ نشست زمین و شکاف ایجاد شده در روستای فریزی (منطقه خین عرب) شمال مشهد"، توسط جعفر رکنی (۱۳۸۹).

- Pratt W. E., Johnson D. W., "Local subsidence of the Goose Creek oil field. Journal of Geology", Vol. 34, No. 7, (1956) 577-590.
- Meinzer O. E., "Compressibility and elasticity of artesian aquifers", Economic Geology, Vol. 23, No. 3, (1928) 263-291.
- Tolman C. F., Poland J. F., "Ground-water infiltration and groundsurface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County", California, Transactions American Geophysical Union, Vol. 21, (1940) 23-34.
- Riley F.S., "Analysis of borehole extensometer data from central California, In Land Subsidence", International Association of Scientific Hydrology, Publication Vol. 89 (1969) 423-431.
- 15. Dehghani M., "Valadan Zoej M. J., Hooper A., Hanssen R., Entezam I., Saatchi S., "Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin", Iran, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.79, (2013) 157-170.

۱۲. نامقی ه.، "بهینهسازی چندهدفه در بهرهبرداری از منابع آب زیرزمینی با رویکرد کاهش نشست"، پایاننامه دکتری، گروه عمران–هیدرولیک، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۲).

17. Castellazzia P., Arroyo-Domínguezb N., Martela R., Calderheada A., Normandc J., Gárfiasb J., Rivera A., "Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 47, (2016) 102-111.

ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن ... ٤٦١

- Amighpey M., Arabi S., "Studying landsubsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and leveling measurements", Remote Sensing Applications, Society and Environment, Vol. 4, (2016) 1-8.
- Sun H., Zhang Q., Zhao C., Yang C., Sun Q., Chena W., "Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique", Remote Sensing of Environment, Vol. 188, (2017) 73-84.
- 20. Motagh M., Shamshiri R., Haghshenas Haghighi M., Wetzel H., Akbari B., Nahavandchi H., Roessner S., Arabi S., "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements", Engineering Geology, Vol. 218, (2017) 134-151.
- ۲۱. آمیغ پی م.، عربی س.، طالبی ع.، جمور ی.، "بررسی مناطق فرونشست در ایران با استفاده از روش ترازیابی دقیق"، نشریه نقشهبرداری، سال بیستم، شمارهٔ ۱۰٤ (۱۳۸۸).
- Buckley S. J., Mills J. P., Clarke P. J., Edwards S. J., Pethick J. S., Mitchell H. L., "Synergy of GPS, digital photogrammetry and InSAR in coastal environments", Miami. Florida. USA (2002).
- Fruneau B., Sarti F., "Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric", Geophysical Research Letters, Vol. 27, No. 24, (2000) 3981-3984.
- 24. Hung W. C., Hwang C., Chang C. P., Yen J. Y., Liu C. H., Yan W. H., "Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan", Environmental Earth Sciences, Vol. 59, (2010) 1535-1548.
- 25. Daniel R. C., Maisons C., Carnec S., Mouelic L., King C., Hosford S., "Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry

ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن ... ٤٦٣

on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement", Remote Sensing of Environment, Vol. 88, (2003) 468-478.

- ۲۳. اکبری و.، "نظارت بر فرونشست زمین ناشی از استخراج بیرویه آبهای زیرزمینی در دشت مشهد با استفاده از سری زمانی تکنیک تداخلسنجی راداری و مقایسه با مشاهدات ژئودتیک"، دانشگاه تهران، گروه مهندسی نقشهبرداری و ژئوماتیک (۱۳۸۷).
- ۲۷. حسینی م.، "تلفیق دادههای InSAR و GPS در تعیین جابهجایی ناشی از فرونشست"، پایاننامه کارشناسی ارشد، گروه ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (۱۳۸٦).
- Dehghani M., Valadan Zouj M. J., Saatchi S., Biggs J., Parsons B., Wright T., "Radar Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence", Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 37, (2009) 191-200.
- Akbari V., Motagh M., "Improved Ground Subsidence Monitoring Using Small Baseline SAR Interferograms and a Weighted Least Squares Inversion Algorithm", IEEE geoscience and remote sensing, Vol. 9, No. 3, (2011) 437-441.
- 30. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., "A New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, (2002) 2375-2383.
- Hafezi Moghaddas, N., Leo, C., Rahimi, B., Azadi, A., "Morphotectonics and geoelectric method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain", Northeast of Iran, Geopersia, Vol. 8, No. 1 (2018) 13-26. doi: 10.22059/GEOPE.2017.230489.648312

۳۲. اشجاری ج.، "اثر سیستم جمع آوری فاضلاب شهری مشهد بر آبخوان با استفاده از مدل ریاضی"، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بینالمللی تخصصی علومزمین، ایران-تهران (۱۳۹٤).