

ارزیابی ژئومورفودینامیسم فعال در پهنه سرزمینی ایران با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای

محمد صادق پاکدامن¹، زهرا عزیزی^{2*}، سید علی المدرسی³، مه‌آسا روستایی⁴، پاسکال کستلازی⁵

¹ دانشجوی دکتری گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات،

دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Pakdaman.rs@gmail.com

² استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه

آزاد اسلامی، تهران، ایران

Zazizi@srbiau.ac.ir

³ استاد گروه سنجش‌ازدور و سیستم های اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد واحد یزد، یزد، ایران

Almodaresi@iauyazd.ac.ir

⁴ گروه دورسنجی، مدیریت ژئوماتیکس، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

Roostaei_mahasa@yahoo.com

⁵ سازمان تحقیقات علمی و صنعتی کشورهای مشترک المنافع (CSIRO) استرالیا

Mspyhm2001@gmail.com

(تاریخ دریافت: خرداد 1401، تاریخ تصویب: آذر 1401)

چکیده

گسترده‌ی جغرافیایی، تشدید روزافزون و روند اضافه‌شدن مناطق جدید از چالش‌های محققان و مدیران در مواجهه با بحران فرونشست در اثر برداشت منابع آبی زیر زمینی در ایران می‌باشد. در این راستا، اهمیت پایش مستمر و دقیق در مرحله نخست و سپس، پهنه‌بندی مناطق بحرانی اولین قدم در ایجاد یک نقشه راه جهت آمایش سرزمین و کنترل و مقابله با بحران فرونشست می‌باشد. در این پژوهش، وضعیت فرونشست تمام وسعت کشوری ایران مابین سالهای 2015 الی 2017، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای راداری سنتینل-1 C-Band مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد وسعتی بالغ بر 28.000 کیلومتر مربع از دشت‌های ایران دارای فرونشست می‌باشند. حدود 7% از این دشت‌ها، سالانه حداقل دچار 12 سانتی متر فرونشست می‌شوند. از طرف دیگر حدود 22% دشت‌ها نرخ مابین 6 تا 12 سانتی متر فرونشست را در سال تجربه می‌کنند. نتایج همچنین نشان می‌دهد 14 مرکز استان و 110 شهر در حال حاضر یا دارای فرونشست می‌باشند و یا در معرض آن قرار دارند. در انتها پیشنهاد گردید با استفاده از راهکارهایی از قبیل (1) پایش مستمر میدانی و ماهواره‌ای (2) اندازه‌گیری دقیق جابجایی سطح زمین با احداث ایستگاه‌های GNSS (3) پایش مستمر در دشتهای دارای فرونشست و همچنین (4) برچیدن چاه‌های غیرمجاز و (5) نظارت بر برداشت از چاه‌های مجاز، (6) تغییر الگوی کشاورزی و آبیاری و (7) متوقف کردن کشت برخی محصولات که سرانه مصرف آب بالایی دارند از تقویم زراعی، می‌تواند در کوتاه مدت و دراز مدت به تشدید نشدن روند کنونی این بحران بیانجامد.

واژگان کلیدی: فرونشست ایران، تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای، منابع آب زیرزمینی

1- مقدمه

اصلی‌ترین فرآیند چرخه آب کره، بارش می‌باشد. تغییر الگوی بارش در اثر تغییرات اقلیمی در نواحی مختلف زمین یکی از چالش برانگیزترین نتایج گرمایش جهانی می‌باشد. بطوری که افزایش بارندگی در مناطق پربارش، سالانه باعث به وقوع پیوستن سیلاب‌های متعدد و مخرب گردیده، در حالی که در مناطق خشک و کم‌بارش دور از مناطق پربارش، کاهش بارندگی باعث ایجاد تنش آبی و تسریع روند خشکسالی در آن مناطق شده‌است، بطوری که این تغییرات در نیمکره شمالی محسوس‌تر می‌باشد. در کنار این تغییرات الگوی بارش در نیمکره شمالی، مشاهدات ماهواره‌ای نیز نشان از کاهش سطح پوشیده از برف در نیمکره شمالی و همچنین تسریع روند ذوب آن‌ها در نیم قرن گذشته دارد [1]. با در نظر گرفتن تمامی جهات مذکور میتوان اظهار داشت که مناطق مستقر بر روی کمربند خشک نیمکره شمالی زمین با شدت بیشتری تحت تاثیر تغییرات اقلیمی منتج از گرمایش جهانی شده‌اند که موضوع کاملاً چالش برانگیزی می‌باشد. بر طبق گزارش FAO در بیش از 80% مدل‌های تخمین تغییرات اقلیمی، در مناطق دارای بارندگی بالای 40 میلی‌متر بر سال، کاهش بارش گزارش شده‌است [2]، خاورمیانه و ایران با قرارگیری بر روی این کمربند خشک، کاملاً تحت تاثیر این فرآیند قرار دارند [3].

علاوه بر مسایل اقلیمی، دلایلی از جمله افزایش جمعیت، تغییر سبک زندگی، توسعه کشاورزی و صنعت و البته ناکارآمدی دولت‌ها را می‌توان از اصلی‌ترین عوامل افزایش مصرف آب در ایران دانست. بخش کشاورزی با 92 درصد بزرگترین و مهمترین مصرف‌کننده آب در کشور به شمار می‌رود، این در حالیست که متوسط حجم کل آب سالانه کشور رقمی ثابت است. در دهه‌های اخیر تقاضا برای آب به علل مذکور، متوسط سرانه آب تجدیدپذیر کشور را تقلیل داده‌است، به طوری که این رقم از حدود 5500 مترمکعب در سال 1340، به حدود 3400 مترمکعب در سال 1357، و حدود 2500 مترمکعب در سال 1367 و 2100 متر مکعب در سال 1376 کاهش یافته‌است. این میزان با توجه به روند افزایش جمعیت کشور با نرخ فعلی رشد در سال 1385 به حدود 1750 مترمکعب و در افق سال 1405 به حدود 1300 مترمکعب تنزل خواهد یافت.

با توجه به این افزایش تقاضا برای آب، مشکل کاهش منابع آب در خاورمیانه و به خصوص ایران در آینده‌ای نزدیک منجر به

خطر افتادن امنیت آبی منطقه خواهد شد. میزان بارش در ایران نسبت به نیم قرن گذشته حدوداً 1 میلی‌متر بر سال کاهش یافته، در حالی که میزان نیاز آبی 5 میلی‌متر بر سال افزایش پیدا کرده‌است. این در حالیست که در 5 سال گذشته میزان ذخایر آب قابل بازگشت ایران 15% کاهش پیدا کرده‌است. نتیجه این تغییرات اقلیمی و اجتماعی افزایش ناگهانی تقاضا برای آب بوده‌است. این در حالی بوده که به دلیل سوء مدیریت و اهمال دولت‌ها در تهیه منابع تجدیدپذیر آب، متقاضیان ناچار به روی آوردن به منابع زیرزمینی شده‌اند و نتیجه آن نیز مشخصاً افزایش تعداد و عمق چاه‌های بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و در ادامه کاهش جدی سطح آب‌های زیرزمینی در ایران بوده‌است.

میزان برداشت از منابع زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی و شرب در دهه‌های گذشته، سال به سال افزایش یافته و متأسفانه این برداشت‌ها شکل بی‌رویه و غیرقانونی نیز به خود گرفته‌است. از جهت دیگر، این برداشت‌های بی‌رویه علاوه بر کاهش منابع آبی، باعث جابجایی سطحی زمین و فرونشست در اکثر آن مناطق شده‌است. بطوری که در بعضی مناطق زندگی و اقتصاد اهالی آن نواحی را دچار مشکل کرده‌است. فرونشست‌های ناحیه‌ای، آرام و پیشرونده اتفاق می‌افتد و با توجه به این که عوارض آن‌ها بسادگی قابل تشخیص نیست، به مرور تمام زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی را در بر گرفته و اغلب زمانی به وجود آن پی می‌بریم که ممکن است دیگر دیر شده باشد.

فرونشست می‌تواند با تحت تاثیر قرار دادن ارتفاع و شیب زمین و همچنین ایجاد ترک‌هایی در ابعاد مختلف بر روی سطح زمین، اثرات مخرب و ناخوشایندی از خود بر جای بگذارد. اطلاع از نحوه پراکندگی، شدت، و روند تغییرات در مناطقی که دچار فرونشست شده و یا شناسایی مناطق جدیدی که به تازگی دچار این پدیده شده‌اند، نیازمند یک پایش مستمر و پهنه‌بندی سراسری و کشوری در این حوزه می‌باشد که نتیجه این بررسی و مطالعات به عنوان یک عنصر از اجزا فرایند آمایش سرزمین، کمک شایانی به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران در حوزه‌های کلان مدیریتی و دولتی خواهد نمود. از این رو، با توجه به شدت، تاریخچه، مداومت و پراکندگی این پدیده در ایران، ضرورت بررسی و مطالعه‌ای در سطح کشوری بر نگارندگان این مقاله مسلج گردید.

وسعت و پراکندگی پدیده فرونشست در سطح کشور، موضوع اندازه‌گیری و پایش جابجایی سطح زمین را به مسئله‌ای چالش برانگیز برای کارشناسان تبدیل کرده‌است.

بر روی زیرساخت‌های ارتباطی مانند ریل‌های راه‌آهن مورد بررسی قرار دادند.

وی همچنین در مطالعه‌ای دیگر [7] پتانسیل داده‌های سنتینل-1 و روش تداخل‌سنجی راداری را برای بررسی فرونشست در تمام وسعت کشور آلمان مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق که مابین سال‌های 2014 و 2017 صورت پذیرفت، با استفاده از روش‌های تحلیل سری زمانی SBAS² و PS³، فرونشست‌ها و بالاآمدگی‌ها⁴ با نرخ‌های ضعیف و شدید در مخازن زیرزمینی گاز در برلین و همچنین فرونشست در محدوده معدن روباز ذغال‌سنگ در جنوب لایپزیگ شناسایی و مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

1-1- منطقه مورد مطالعه

کشور ایران با وسعت 1648.195 کیلومتر مربع اصلی‌ترین و بزرگترین بخش از فلات ایران می‌باشد که بر روی کمربند خشک نیمکره شمالی واقع شده‌است (شکل-1). منابع مختلف آب شرب و کشاورزی ایران بسیار محدود می‌باشند. بر اساس آمار و ارقام موجود میانگین سالانه حجم بارندگی ایران حدود 400 میلیارد متر مکعب برآورد می‌شود که از این مقدار، 310 میلیارد متر مکعب در مناطق کوهستانی با مساحتی حدود 870 هزار کیلومتر مربع و 90 میلیارد متر مکعب دیگر در مناطق دشتی به وسعت 778 کیلومتر مربع می‌بارد. از مقدار فوق حدود 294 میلیارد متر مکعب به صورت تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود و از 116 میلیارد متر مکعب باقیمانده حدود 93 میلیارد متر مکعب از طریق منابع سطحی و زیرزمینی بهره‌برداری می‌شود و بقیه صرف تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. از این مقدار حدود 86 میلیارد متر مکعب جهت مصارف کشاورزی و نزدیک به 7 میلیارد متر مکعب آن به مصارف شرب و صنعت اختصاص می‌یابد.

نگاهی اجمالی به سرانه تولید ناخالص ملی، روند توسعه و رشد صنعت و شهرنشینی، افزایش سرانه مصرف آب در بخش کشاورزی و سیاست‌گذاری‌های اشتباه در حوزه مدیریت منابع آب، این مهم را بر ما نمایان می‌سازد که پیامدهای تنش آبی ایران در سال‌های جاری و به خصوص سال‌های آینده، بیش از پیش باعث بحران‌های زیست محیطی، اجتماعی، امنیتی و بهداشتی خواهد شد. این

به طور کلی، روش‌های اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین را می‌توان به روش‌های کلاسیک (اندازه‌گیری میدانی) و نوین (اندازه‌گیری هوایی/فضایی) تقسیم‌بندی نمود [4] و [5]: (1) از روش‌های اندازه‌گیری میدانی می‌توان به نقشه‌برداری زمینی، ترازبایی و یا نصب ایستگاه‌های دائمی یا موقتی GPS اشاره نمود. مقادیر بدست‌آمده از این روش‌ها بسیار دقیق و قابل اعتماد بوده و پردازش داده‌های آن‌ها برای متخصصین آسان می‌باشد، اما در محدوده‌های بسیار بزرگ به دلیل هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن و همچنین گسسته بودن شبکه برداشت، چالش‌هایی را به همراه دارند. (2) اما امروزه روش‌های اندازه‌گیری فضایی/هوایی که معمولاً با نصب سنجنده‌های مایکروویو در محدوده راداری و استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی امواج راداری صورت می‌پذیرد، به دلیل سریع و ارزان بودن داده‌ها، پیوستگی در شبکه برداشت اطلاعات، پوشش منطقه‌ای بالا (از چند ده متر مربع تا چند صد کیلومتر مربع)، دسترسی عمومی و آسان به داده‌های مورد نیاز و همچنین قابلیت پایش تاریخی وضعیت تغییرات جابجایی سطح زمین به صورت چشمگیری مورد توجه و استفاده متخصصین و کاربران قرار دارد. اما از جهتی دیگر پردازش این نوع داده‌ها نیاز به تخصص بالایی داشته و نتایج آن نیز نسبت به نتایج حاصل از روش‌های اندازه‌گیری میدانی، دارای دقت کمتری می‌باشد.

در این پژوهش، با توجه به آن که پهنه‌بندی فرونشست در مقیاس کشوری است، با توجه به مزایا و معایب ذکرشده در خصوص روش‌های پایش سطح زمین، استفاده از روش‌های سریع و نیمه‌دقیق ماهواره‌ای را برای ما اجتناب‌ناپذیر کرد. بدین منظور، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و از طریق روش تداخل‌سنجی راداری روزه ترکیبی¹، در بازه‌ی زمانی سال‌های 2015 تا 2017 سطحی بالغ بر 2.297.370 کیلومتر مربع مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت که در ادامه به تشریح بیشتر در این خصوص خواهیم پرداخت.

در آخرین تحقیق مشابه، حق‌شناس و همکاران [6] با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده سنتینل-1 و روش تداخل‌سنجی راداری، تمام وسعت کشوری ایران را در بازه‌ی زمانی سال‌های 2014 تا 2017 مورد بررسی قرار دادند و اثر فرونشست‌های اتفاقی‌افتاده در 2 کلان شهر تهران و مشهد را

3 Persistent Scatterer

4 Uplift

1 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

2 Small Baseline Subset

جدول 1- مشخصات داده‌های مورد استفاده

Sentinel-1A&1B	سکو/ماهواره
698-726 km	ارتفاع سکو
5.54 cm	طول موج
IW ¹	حالت تصویربرداری
2015-2017	بازه ی زمانی
VV	قطبیدگی داده ها
15m	پیکسل سائز
پایین گذر ²	جهت گذر سکو

2-1- تداخل سنجی رادار روزنه ترکیبی (InSAR)

تکنیک تداخل سنجی راداری روشی است برای استفاده از اطلاعات فاز دو یا چند تصویر SAR³ که در زمان‌های مختلف از یک منطقه مشابه برداشت شده‌اند، به منظور تولید مدل ارتفاعی رقومی و یا اندازه‌گیری میزان جابجایی زمین در فاصله زمانی بین داده‌های برداشتی. تاریخچه اولین استفاده از این روش به دهه 80 میلادی بر می‌گردد که برای اولین بار از این روش برای تولید DEM⁴ استفاده گردید و پس از آن در دهه 90 میلادی برای کاربردهای نظیر اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین در اثر زلزله مورد استفاده قرار گرفت [8]. اما اوج استفاده از این روش را می‌توان به پرتاب ماهواره ENVISAT و سنجنده ASAR در سال 2003 و پس از آن اشاره کرد.

سناریوی مدل‌سازی فاز تداخل‌سنجی برای محاسبه جابجایی سطح زمین:

در سناریوی پیش رو که هدف محاسبه جابجایی سطح زمین می‌باشد، استفاده از تصاویر چندزمانه راداری که در گذرهای مختلف ماهواره بدست آمده‌است، بسیار متداول می‌باشد. این نوع از تحلیل، تداخل‌سنجی با گذرهای تکرارشونده⁵ نامیده می‌شود. اگر فرض کنیم که موقعیت خط مبنای مکانی سنجنده⁶ در دو زمان تصویربرداری برای تصاویر پایه و پیرو از یک منطقه ثابت صفر باشد ($B=0$)، ما می‌توانیم تغییرات فاز برای همه پیکسل‌های برداشت‌شده را اندازه‌گیری کنیم (شکل 2). اما باید توجه داشت مقدار فاز موجود در تداخل‌نگار ($\Delta\Phi_{int}$) علاوه بر مقدار فاز جابجایی سطح زمین

بحران در گستره‌ای به بزرگی کشور ایران که از شمال تا جنوب و از شرق تا غرب دچار پدیده فرونشست شده است، قطعاً نیاز به پایش و آمایشی مستمر و دقیق از سرزمین و در ادامه سیاست‌گذاری‌های صحیح در این حوزه می‌باشد.

2- مواد و روش کار

تصاویر راداری مورد استفاده جهت پایش فرونشست سطح زمین معمولاً از محدوده طول موج 2 سانتی‌متری (X باند) تا 24 سانتی‌متری (L باند) می‌باشند که ماهواره‌ای عملیاتی راداری در هر یک از این طول موج‌ها کار می‌کند. سه طول موج رایج مورد استفاده X، C و L می‌باشند که به ترتیب دارای طول موج تقریبی 2.5، 5.6 و 24 سانتی‌متری می‌باشند. از نظر پیشینه تاریخی برداشت داده‌های راداری می‌توان گفت که از سال 2003 تاکنون به طور پیوسته در طول موج‌های مختلف امکان دسترسی به این داده‌ها می‌باشد.



شکل 1- منطقه‌ی مورد مطالعه و پوشش داده‌های سنتینل-1 استفاده‌شده

به منظور انجام این پژوهش و پایش میزان جابجایی سطح زمین در اثر فرونشست ناشی از برداشت منابع زیرزمینی از 66 جفت داده سنتینل-1 و در مجموع 132 داده، هر یک با عرض برداشت 250 کیلومتر استفاده گردید. به توجه به در نظر گرفتن همپوشانی هر فریم از داده‌ها با فریم‌های کناری در مجموع محدوده‌ای به وسعت 2,297,370 کیلومتر مربع پردازش گردید که شامل برخی کشورهای همسایه ایران نیز می‌باشد (شکل 1). مشخصات کلی داده‌های مورد استفاده در جدول 1 آمده‌است.

4 Digital Elevation Model

5 Repeat-Pass Interferometry

6 Normal Spatial Baseline

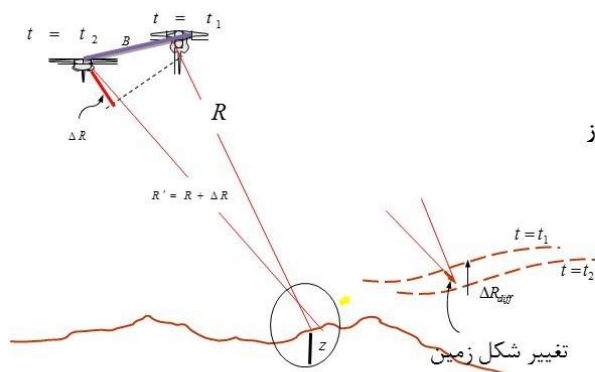
1 Interferometric wide swath

2 Descending

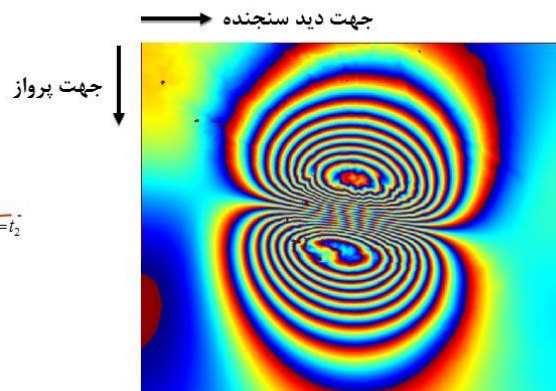
3 Synthetic Aperture Radar

باقیمانده ($\Delta\Phi_{noise}$) می‌باشد (رابطه 1) [8]:

$$\Delta\Phi_{int} = \Delta\Phi_{def} + \Delta\Phi_{topo} + \Delta\Phi_{atm} + \Delta\Phi_{noise} \quad (1)$$



($\Delta\Phi_{def}$)، شامل اختلاف فاز توپوگرافی ($\Delta\Phi_{topo}$)، اختلاف فاز در اثر شرایط اتمسفری ($\Delta\Phi_{atm}$) و اختلاف فاز بر اثر نویزهای



شکل 2- تداخل‌نما از فاز اینترفرومتریک، اگر خط مبنای مکانی صفر باشد ($B=0$) و سطح زمین دچار تغییر شکل شده باشد، تداخل‌نما مقادیر فاز غیر صفر را در ناحیه دچار تغییر شکل با سیکلی از تغییر رنگ‌ها¹ نشان می‌دهد.

نویزهای باقیمانده معمولاً با اطلاعات مداری جانبی و یا فیلترگذاری‌های محدود و مشخص قابل اصلاح می‌باشند. پس از حذف اختلاف فازهای مذکور می‌توان اختلاف فاز باقیمانده را به جابجایی سطح زمین در اینترفروگرام نسبت داد. به این صورت که هر سیکل تغییرات رنگی (شکل-2) در اینترفروگرام معادل جابجایی در سطح زمین به میزان نصف طول موج ($\lambda/2$) در راستای دید سنجنده³ می‌باشد [10]. محدوده‌ای که دچار تغییر شکل شده‌است، از لحاظ مکانی با یک الگوی مشخصی از فرینج‌ها که شبیه خطوط منحنی می‌باشند، مشخص می‌شود [10]. این تغییرات نمایانگر فرونشست یا بال‌آمدگی در ناحیه مورد نظر می‌باشد. پس از تحلیل اینترفرومتری راداری، مقادیر جابجایی در جهت دید سنجنده به مقادیر جابجایی در جهت قائم برای هر یک از فریم‌ها محاسبه و تبدیل گردید. تمام مقادیر بدست‌آمده بصورت نقطه‌ای و برداری و به صورت شبکه‌ای به فواصل 15×15 متر محاسبه گردید. این فواصل بر اساس توان تفکیک مکانی اصلی داده‌های مورد استفاده تعیین گردید. پس از محاسبه به دلیل وسعت زیاد محدوده و حجم زیاد نقاط خروجی، به جهت مصورسازی و گویاسازی نقشه‌های خروجی، این شبکه برداری به صورت رستری و در رزولوشن 0.01 درجه Down-Scale گردیدند. همچنین، در ادامه به

در اینجا چون هدف بازیابی اختلاف فاز جابجایی زمین ($\Delta\Phi_{def}$) می‌باشد می‌بایست سایر عوامل را به نحوی اصلاح و یا حذف نمود تا در انتها صرفاً اختلاف فاز جابجایی زمین محاسبه گردد. بدین منظور، برای اصلاح فاز توپوگرافی ($\Delta\Phi_{topo}$) سطح زمین از یک مدل ارتفاعی رقومی دقیق استفاده می‌گردد. در مورد اختلاف فاز در اثر شرایط اتمسفری ($\Delta\Phi_{atm}$) می‌بایست این نکته را مدنظر قرارداد که در صورت امکان باید از محصولات بخار آب سایر سنجنده‌ها که حتی الامکان در زمان تصویربرداری SAR در دو تصویر پایه و پیرو وجود دارند، استفاده کرد و اقدام به محاسبه فاز اتمسفری² نمود [9]. اما در عمل دستیابی به محصولات بخار آب هم‌زمان با تصاویر SAR بسیار مشکل می‌باشد. برای حل این مشکل می‌بایست با در نظر گرفتن طول موج راداری مورد استفاده، تصاویر پایه و پیرو را در زمان‌هایی سفارش داد که از وضعیت فصلی مشابه و شرایط اتمسفری (ابری و بارانی بودن) مناسبی برخوردار باشند. در پژوهش جاری به دلیل خشک و کویری بودن عمومی منطقه فلات ایران، پایین بودن پوشش گیاهی و رطوبت خاک و همچنین انتخاب تصاویر فاقد ابر، به طور کلی می‌توان انتظار همدوسی بالا بین فازها را داشت و از اختلاف فاز ایجاد شده در اثر اتمسفر چشم‌پوشی کرد. اختلاف فاز در اثر سایر

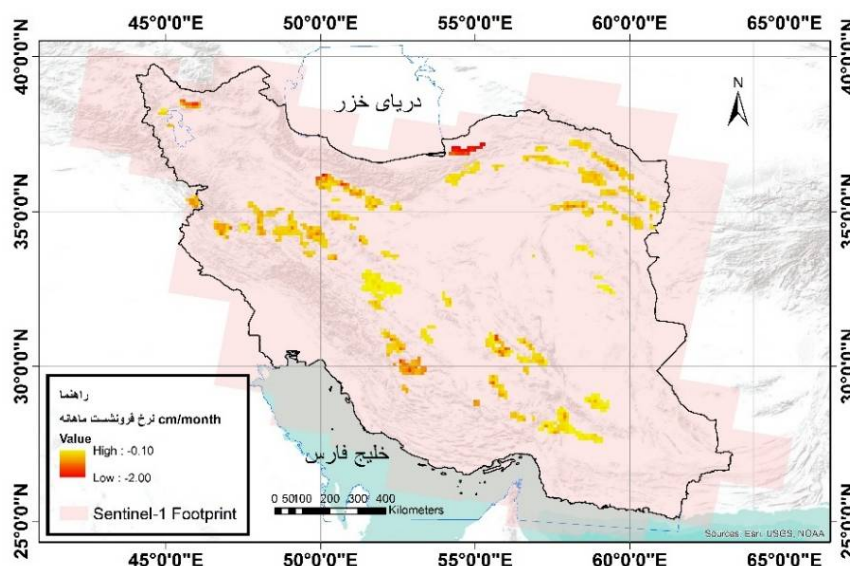
3 Line of Sight

1 Fringe

2 Atmospheric Phase Screen

دلیل تفاوت در فواصل زمانی برداشت جفت داده‌ها¹ در هر منطقه، به جهت هم‌مقیاس‌سازی، تمامی مقادیر فرونشست

بدست‌آمده به نرخ سانتی‌متر بر ماه تبدیل گردید (شکل-3).



شکل-3- نقشه‌ی نرخ فرونشست در ایران بین سال‌های 2015 الی 2017 (سانتی‌متر بر ماه)

3- پهنه‌بندی مناطق

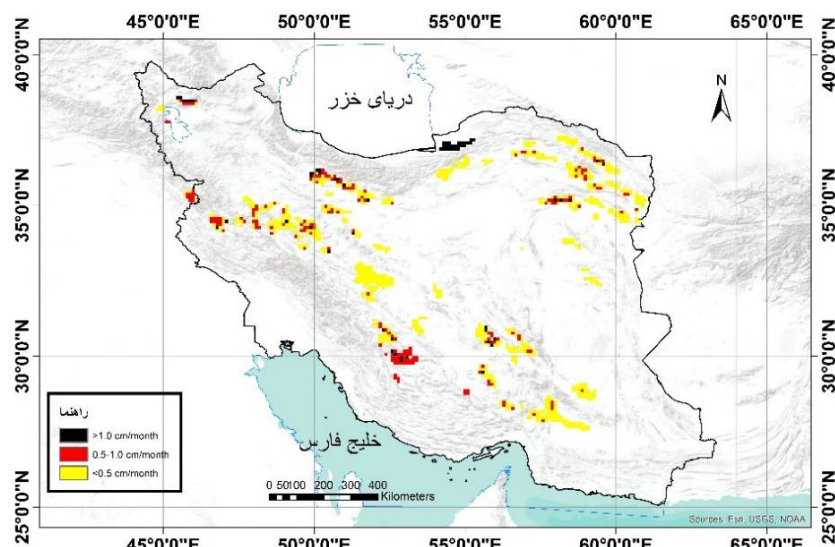
فرونشست، جابجایی عمودی سطح زمین می‌باشد که عموماً به دلیل عدم استحکام سازندهای زیرین، فشار بر روی لایه‌های رویی و یا ترکیبی ازین دو اتفاق می‌افتد، که می‌تواند به دلایل طبیعی و یا انسانی به وقوع بپیوندد [11]. در اینجا منظور از فرونشست، جابجایی‌های قائم سطح زمین در مقیاس هکتاری در مناطق پست می‌باشد که در اثر سست شدن لایه‌های زیرین به دلیل برداشت منابع آب زیرزمینی به وقوع پیوسته‌است. به این صورت که با برداشت سفره‌های زیرزمینی، فضای بین ذرات که با آب پر شده‌است، خالی شده و این فضا با وزن طبقات بالاتر بسته خواهد شد. به زبان ساده، این بسته‌شدن فضاهای مابین ذرات در طبقات زیرین، به معنی نشست زمین در سطح زمین می‌باشد.

با این مقدمه و به منظور پهنه‌بندی مناطق، سه کلاس (1) فرونشست تا نرخ 0.5 سانتی‌متر بر ماه، (2) فرونشست از نرخ 0.5 تا 1 سانتی‌متر بر ماه و (3) فرونشست با نرخ بیش از 1 سانتی‌متر بر ماه معرفی گردید (شکل 4). به جهت اعتبارسنجی تمام مناطقی که در آن‌ها شواهد

فرونشست مشاهده گردید، وضعیت مورفولوژی و کاربری آن‌ها نیز مورد بررسی مجدد قرار گرفت تا صحت فرونشست اتفاق افتاده بر اثر برداشت منابع آبی زیرزمینی مسجل گردد.

بر اساس مطالعه صورت گرفته وسعتی بالغ بر 28.000 کیلومتر مربع از دشت‌های ایران دارای فرونشست می‌باشند که در این دشت‌ها شواهد قطعی این جابجایی مسجل گردیده‌است. حدود 7% از این دشت‌ها با وسعتی بالغ بر 1.900 کیلومتر مربع، سالانه حداقل دچار 12 سانتی‌متر فرونشست می‌شوند و می‌توان دارای شرایطی فاجعه‌آمیز می‌باشند. از طرف دیگر، حدود 22% دشت‌ها با وسعتی در حدود 6.100 کیلومتر مربع نرخ مابین 6 تا 12 سانتی‌متر فرونشست را در سال تجربه می‌کنند که آن‌ها را در وضعیتی خطرناک قرار داده‌است. اما بیشترین وسعت این فرونشست‌ها در محدوده‌ای به وسعت 20.000 کیلومتر مربع رخ داده‌است که 71% از کل وسعت این دشت‌ها را شامل می‌شود. کمینه نرخ فرونشست در این محدوده‌ها 6 سانتی‌متر در سال می‌باشد که با توجه به وسعت، دامنه و شدت آن وضعیتی نگران‌کننده را گزارش می‌دهد (جدول 2).

1 Temporal Baseline



شکل 4- نقشه پهنه‌بندی فرونشست ایران بین سال‌های 2015 الی 2017 (سانتی‌متر بر ماه)

جدول 2- طبقه‌بندی فرونشست دشت‌های ایران از سال‌های 2015 الی 2017

ردیف	نرخ فرونشست	وسعت (km ²)	کلاس
1	>1.0 cm/month	1.900	فاجعه‌آمیز
2	0.5-1.0 cm/month	6.100	خطرناک
3	<0.5 cm/month	20.000	نگران‌کننده

4- بحث و نتیجه‌گیری

بیشترین نرخ فرونشست مشاهده‌شده به میزان 20 میلی‌متر در ماه و کمینه آن 4 میلی‌متر در ماه می‌باشد. مراکز استانی از قبیل تهران، مشهد، اصفهان، شیراز، کرمان، اراک، ارومیه، گرگان، همدان، کرمانشاه، سمنان، قم، بیرجند و کرج از جمله شهرهایی هستند که شواهد فرونشست در آنها رویت شده‌است. اما فارغ از مراکز استان‌ها بیش از 110 شهر یا دچار فرونشست شده‌اند و یا در آستانه رخداد این بحران قرار دارند. دشت‌های ساوه، کاشان، مرودشت، رفسنجان، تربت جام، نیشابور، مرند، تاکستان، ملایر، اسدآباد، کبودرآهنگ، ورامین، گرمسار، دامغان، شاهرود، مینودشت، قوچان، فریمان، خواف، فردوس و سرایان، طبس، فهرج، عنبرآباد، کهنوج، فاریاب، ارزوئیه، ریزاب، سیرجان، رفسنجان، بهرمان، زرنده، کوار، ابرکوه، شاهین‌شهر، گلپایگان، شازند، نهاوند، صحنه و قروه و بسیاری از دشت‌ها و شهرهای مجاور آن‌ها همگی دارای علائم فرونشست در خروجی‌های تحلیل داده‌های ماهواره‌ای می‌باشند. نقشه پهنه‌بندی فرونشست برخی ازین شهرها در شکل 5 آمده‌است.

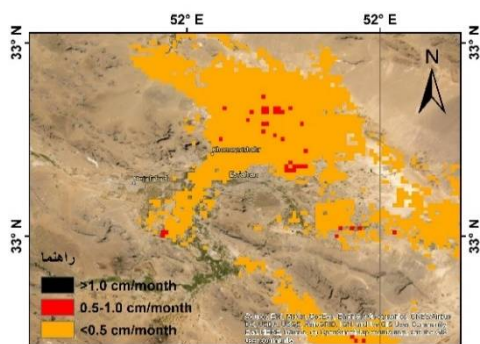
شواهد و مستندات فرونشست در بسیاری از دشت‌های ایران به صورت تک تک توسط محققان و پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته‌است که در این پژوهش همگی به صورت مجتمع مورد بررسی مجدد قرار گرفته‌است. ازین میان برخی از دشت‌هایی که سابقاً با استفاده از مطالعات ماهواره‌ای و روش تداخل‌سنجی راداری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، در این پژوهش نیز مورد تایید قرار گرفتند. ازین میان می‌توان به مطالعات فرونشست در دشت تهران [12]، [13]، [14]، [15]، دشت اصفهان [16]، [17]، دشت ساوه [18]، دشت سمنان [19]، دشت کاشان [20]، دشت قم [21]، دشت رفسنجان [22]، دشت یزد [23] و دشت گرگان [24] اشاره نمود.

از دیگر مناطق می‌توان به دشت کاشمر اشاره کرد با نرخ بیش از 2 سانتی‌متر در ماه دارای رکورد فرونشست در کشور می‌باشد. دشت‌های اکبرآباد در جنوب شیراز، دشت ریزاب در شرق استان فارس و دشت‌های شهرمیان و مهدی آباد در غرب استان فارس، دشت‌های بردسیر و علی‌آباد و همچنین تمام مناطق جنوبی جیرفت شامل دشت‌های فاریاب و کهنوج در استان کرمان، دشت گلپایگان در استان اصفهان که در اثر شدت فرونشست در این دشت فروچاله‌های به عرض 20 متر تشکیل شده و مناطقی دیگر را نام برد.

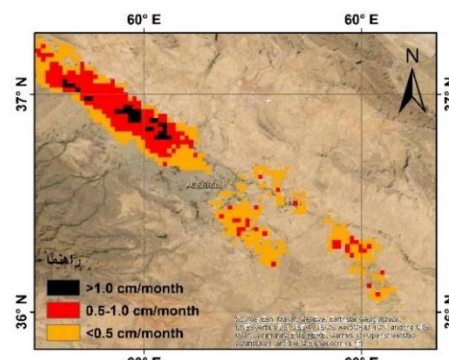
خواه یا ناخواه دشت‌هایی که هم‌اکنون دچار این بحران نشده‌اند، با ادامه روند فعلی در آینده جزو دشت‌های بحران‌زده محسوب خواهند شد. این موضوع با تشکیل مراکز بحرانی جدید در دشت‌های کوچک و بزرگ خود را نمایان ساخته‌است. بررسی روند مطالعات فرونشست در

ایران در دشت‌های مختلف در طول 15 سال گذشته نشان می‌دهد، حتی اگر روند و شدت فرونشست در مناطقی که

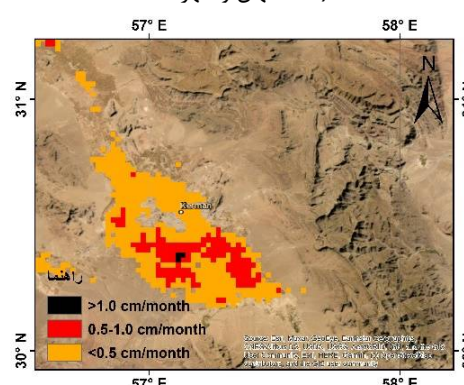
مسیبوق به سابقه هستند زیاد نشده‌باشد، کاهشی هم نداشته‌است.



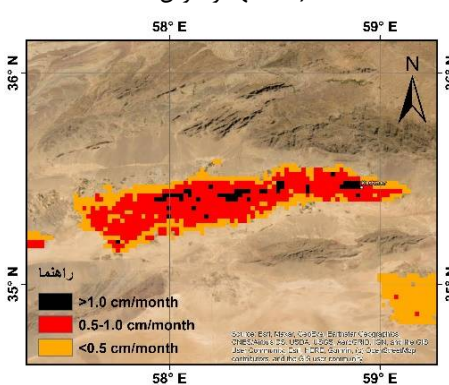
(2) اصفهان و شهرضا



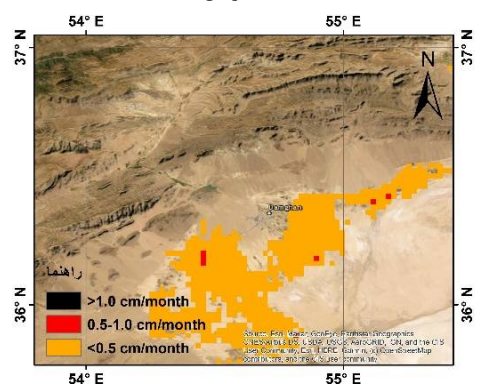
(1) مشهد و توس



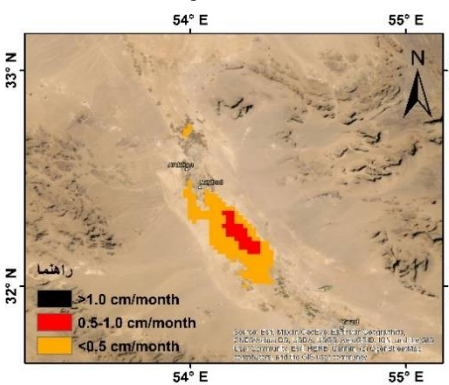
(4) کرمان



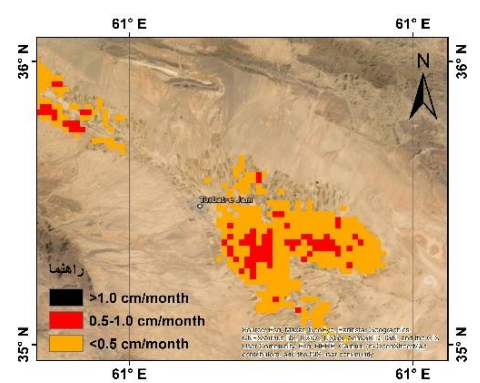
(3) کاشمر



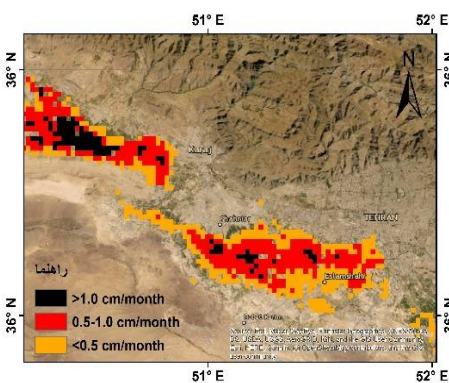
(6) سمنان



(5) یزد - اردکان



(8) تربت جام



(7) تهران و کرج

شکل 5- نقشه پهنه‌بندی فرونشست در برخی از شهرهای ایران

ترمیم می‌باشد، می‌بایست با ترسیم نقشه‌ی راهی از سوی سازمان برنامه و بودجه و نهادهای متولی زیر مجموعه آن در دوره‌های چند ده ساله آینده از شدت این بحران کاست. پایش مستمر میدانی و ماهواره‌ای، اندازه‌گیری دقیق با احداث ایستگاه‌های GNSS پایش مستمر در دشت‌های دارای فرونشست، برچیدن چاه‌های غیرمجاز و نظارت بر برداشت از چاه‌های مجاز، تغییر الگوی کشاورزی و آبیاری و متوقف کردن کشت برخی محصولات که سرانه مصرف آب بالایی دارند از تقویم زراعی، از راه‌هایی است که در کوتاه مدت و دراز مدت می‌تواند به تشدید نشدن روند افزایشی این بحران کمک کند.

سپاسگزاری

از سازمان فضایی اروپا به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 کمال سپاسگزاری را داریم.

بررسی‌ها نشان می‌دهد مناطقی که سرانه سالانه دریافت باران در آن‌ها کمتر از میانگین کشوری می‌باشد و در آنها آبیاری کشاورزی با روش‌های سنتی در حال انجام است، بیشتر در معرض فرونشست قرار دارند. دشت‌های استان‌های مرکزی، تهران، اصفهان، فارس، کرمان، خراسان جنوبی، رضوی و شمالی و همچنین سمنان در بطن این بحران قرار دارند. زنگ خطر برای استان‌های همدان، کرمانشاه، کردستان، آذربایجان شرقی، البرز، قزوین و گلستان نیز در حدود یک دهه است که به صدا در آمده و دیری نیست که این استان‌ها نیز وارد مرحله‌ای برگشت ناپذیر و بحرانی شوند.

5- پیشنهادات

پرواضح است که سوء مدیریت در برداشت از منابع آبی زیرزمینی دشت‌های ایران را دچار بحرانی برگشت‌ناپذیر کرده‌است. از آنجا که فرونشست زمین حتی در صورت افزایش منابع آبی زیرزمینی در آینده، یک پدیده غیر قابل

مراجع

- [1] Derksen, C. and R. Brown (2012). "Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections." *Geophysical Research Letters* 39(19).
- [2] WRI, et al. "World resources 1996-97 : a guide to the global environment - the urban environment."
- [3] Mulder, G. (2013). Observing groundwater depletion in Northern Iraq from space: A comparative study between catchment hydrology and the GRACE satellite mission. Civil Engineering and Geosciences. Netherland, TU Delft. Master.
- [4] Arjomandi, M., et al. (2018). "Predicting land subsidence rate due to groundwater exploitation in the district 19 of Tehran using MODFLOW and InSAR." *Journal of Geoscience* 27(106): 75-82.
- [5] Pakdaman, MS. et al. "Assessment of Atmospheric Column Water Vapor Effect on Displacement Estimations in DInSAR Method (ASAR Sensor)" *Journal of Geography and Environmental Planning*, 26(1): 129-146 Spring 2015, Isfahan, Iran. (In Persian).
- [6] Haghshenas Haghighi, M. and M. Motagh (2021). "LAND SUBSIDENCE HAZARD IN IRAN REVEALED BY COUNTRY-SCALE ANALYSIS OF SENTINEL-1 INSAR." *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLIII-B3-2021: 155-161.
- [7] Haghshenas Haghighi, M. and M. Motagh (2017). "Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping." *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 142: 245-256.
- [8] Pakdaman, M. S., et al. (2018). "Study of Satellite Side Look effect on efficient Source Parameter Identification in Zarand Feb-2005 Earthquake, Based on SAR Interferometry." *mdrsjms* 22(2): 23-46.
- [9] Bamler, R. (2015). "Satellite InSAR Data - Reservoir Monitoring from Space [Book Reviews]." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 3(1): 53-54.
- [10] Massonnet, D. and K. L. Feigl (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500.

- [11] Marker, B. R. (2013). Land Subsidence. Encyclopedia of Natural Hazards. P. T. Bobrowsky. Dordrecht, Springer Netherlands: 583-590.
- [12] Yousefi, R. and N. Talebbeydokhti (2021). "Subsidence monitoring by integration of time series analysis from different SAR images and impact assessment of stress and aquitard thickness on subsidence in Tehran, Iran." *Environmental Earth Sciences* 80(11): 418.
- [13] Maghsoudi, Y., et al. (2021). "A study of land subsidence in west of Tehran using Sentinel-1 data and permanent scatterer interferometric technique." *Arabian Journal of Geosciences* 14(1): 30.
- [14] Chatsimab, Z., et al. (2020). "Development of a Land Subsidence Forecasting Model Using Small Baseline Subset—Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry and Particle Swarm Optimization—Random Forest (Case Study: Tehran-Karaj-Shahriyar Aquifer, Iran)." *Doklady Earth Sciences* 494(1): 718-725.
- [15] Haghshenas Haghighi, M. and M. Motagh (2019). "Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis." *Remote Sensing of Environment* 221: 534-550.
- [16] Chitsazan, M., et al. (2020). "Investigation of subsidence phenomenon and impact of groundwater level drop on alluvial aquifer, case study: Damaneh-Daran plain in west of Isfahan province, Iran." *Modeling Earth Systems and Environment* 6(2): 1145-1161.
- [17] Sorkhabi, O. M., et al. (2022). "Evaluation of Isfahan City Subsidence Rate Using InSAR and Artificial Intelligence." *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- [18] Jafari, F., et al. (2016). "Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran." *Environmental Earth Sciences* 75(9): 833.
- [19] Koohbanani, H., et al. (2020). "Spatiotemporal relation of RADAR-derived land subsidence with groundwater and seismicity in Semnan—Iran." *Natural Hazards* 103(1): 785-798.
- [20] Ghazifard, A., et al. (2016). "Effects of groundwater withdrawal on land subsidence in Kashan Plain, Iran." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75(3): 1157-1168.
- [21] Edalat, A., et al. (2020). "Detecting Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal in Aliabad Plain, Iran, Using ESA Sentinel-1 Satellite Data." *Natural Resources Research* 29(3): 1935-1950.
- [22] Motagh, M., et al. (2017). "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements." *Engineering Geology* 218: 134-151.
- [23] Amighpey, M. and S. Arabi (2016). "Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements." *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 4: 1-8.
- [24] Rezaei, A. and Z. Mousavi (2019). "Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations." *Journal of Hydrology* 579: 124196.