

## مطالعه فرونشست زمین در دشت اصفهان- بر خوار با استفاده از تصاویر رادار، و تهیه نقشه آسیب پذیری فرونشست با استفاده از ترکیب روش های تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی و رگرسیون خطی چندگانه

محسن رفیعی<sup>۱\*</sup>، رسول اجل لوثیان<sup>۲</sup>، مریم دهقانی<sup>۳</sup>، مسعود محمودپور<sup>۴</sup>

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵

### چکیده

با توجه به نرخ رشد جمعیت و لزوم تامین اشتغال و غذا برای جمعیت رو به افزایش، در دهه های گذشته توجه ویژه ای به گسترش و توسعه کشاورزی و احداث مناطق صنعتی متعدد در مجاورت شهرهای بزرگ و پر جمعیت شده است. از سوی دیگر به دلیل کاهش بارش و نقصان در منابع آب سطحی، جهت تامین آب کشاورزی و صنعت، به برداشت از منابع آب زیرزمینی از طریق حفر چاه اقدام شده است. در محدوده دشت اصفهان- بر خوار از چهل سال گذشته تا کنون، تعداد زیادی چاه های عمیق و نیمه عمیق حفر شده که برداشت از آنها منجر به به افت سطح آب با میانگین سالانه حدود یک متر شده است. این افت مستمر آب در مناطق مستعد منجر به وقوع فرونشست خواهد شد. در این تحقیق سعی شده علاوه بر تعیین میزان فرونشست رخ داده در محدوده دشت اصفهان- بر خوار طی سالهای ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ با استفاده از تصاویر ماهواره ای، عوامل موثر بر فرونشست و میزان تاثیر هر یک بر میزان فرونشست بررسی گردد. همچنین با دو روش ترکیب تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با منطق فازی در محیط GIS و رگرسیون خطی چندگانه، با استفاده از داده های مربوط به پارامترهای موثر، نقشه مناطق مستعد فرونشست تهیه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از روش اینترفرومتری، فرونشست رخ داده در بازه زمانی مورد مطالعه حداکثر ۱۱ سانتیمتر در سال اندازه گیری شد. همچنین مقایسه نتایج بدست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی و روش رگرسیون خطی نشان دهنده کارایی بیشتر روش رگرسیون خطی در محاسبه پتانسیل فرونشست است.

**کلمات کلیدی:** فرونشست زمین، سری زمانی، رگرسیون خطی چندگانه، تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی گروه سنجش از دور دانشگاه شیراز

<sup>۴</sup> کارشناس سازمان زمین شناسی

\* مسئول مکاتبات

## مقدمه

در مقالات متعددی به آنها اشاره شده است ( Motagh, et al., 2008, deghhani, et al., 2013, motagh, et al., 2007, deghhani, et al., 2009, mosavi, et al., 2001 (امیری و دیگران، ۱۳۸۳، شمشکی و دیگران، ۱۳۸۴).

محدوده آبخوان اصفهان برخوردار که در برگرنده نقاط جمعیتی مهم، اراضی گسترده با کاربری کشاورزی، آثار تاریخی متعدد و زیرساخت‌های بزرگی همچون پالایشگاه، نیروگاه، شهرک‌های صنعتی و ... است. برآیند این تمرکز، استفاده روزافزون از منابع آب زیرزمینی جهت تامین آب شرب، صنعت و کشاورزی است که با توجه به کاهش بارش سالانه منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است. در بسیاری از مناطق این محدوده از جنوب شرق منطقه (فرودگاه اصفهان) و مناطق مرکزی (محل عاشق آباد)، آثار زمینی فرونشست زمین مانند ترک خوردن ساختمان‌ها قابل مشاهده است. همه این موارد اشاره شده نشان دهنده لزوم توجه به پدیده فرونشست زمین در این منطقه بوده و اهمیت مطالعه در زمینه فرونشست از جمله تعیین عوامل موثر و اندازه گیری میزان فرونشست رخ داده در سال‌های گذشته را آشکار می‌سازد. استفاده از روش تداخل سنجی راداری (InSAR) بعنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه گیری میزان فرونشست زمین شناخته می‌شود که بصورت گسترده در بسیاری از تحقیقات مرتبط با این پدیده استفاده می‌شود (Dehghani, et al., 2013-2, Dehghani, et al., 2013, Chaussard, et al., 2013, Raucoules, et al., 2013). گرچه روش‌های سنتی تداخل سنجی راداری توانایی تخمین نسبتاً دقیق میزان فرونشست در مناطق با وسعت زیاد در مقیاس زمانی بزرگ را دارند ولی امروزه استفاده از سری‌های زمانی (Time Series) بمنظور بررسی رفتار فرونشست در بازه‌های زمانی کوتاه مدت گسترش پیدا کرده‌اند (Dehghani et al., 2009).

واژه فرونشست زمین به ایجاد فرورفتگی تدریجی و یا فروریزش ناگهانی قسمتی از سطح زمین اطلاق می‌شود که جابجایی رخ داده در هنگام فرونشست بصورت عمودی است (Galloway & Burbey 2011). از دلایل ایجاد فرونشست زمین می‌توان انحلال زیرسطحی برخی مواد سازنده زمین (مثل نمک، کربنات‌ها و ...)، فرسایش مکانیکی زیرسطحی، جریان‌های جانبی، تراکم زمین (بر اثر بارگذاری، زهکشی و برداشت آب زیرزمینی) و حرکات تکتونیکی را نام برد (Poland, 1984).

استخراج آب زیرزمینی، به دلیل ایجاد تراکم در آبخوان، نقش مستقیمی در فرونشست زمین دارد. فرونشست زمین در اثر برداشت سیالات زیرزمینی از شناخته شده‌ترین دلایل ایجاد فرونشست‌ها است. فرونشست زمین می‌تواند باعث ایجاد خسارت در زیرساخت‌های موجود در یک منطقه مثل ساختمان‌ها، جاده‌ها، خطوط راه آهن و همچنین خسارت عمده به آبخوان‌ها شود (Galloway & Burbey 2011).

فرونشست زمین در بسیاری از مناطق، بخصوص در مناطق دارای تراکم جمعیتی بالا مشاهده می‌شود. بسیاری از مناطق احتمالاً از زمان جنگ جهانی دوم به دلیل برداشت بی رویه از منابع زیرزمینی آب، گاز و نفت از این مناطق دچار فرونشست شده‌اند. برپایه گزارش‌های ارائه شده در سال ۱۹۹۵ میلادی بیش از ۱۵۰ شهر بزرگ در دنیا در بسیاری از نقاط جهان مانند مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایران، ایتالیا، هلند، ونزوئلا، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، فلسطین اشغالی، لهستان و سوئد، در معرض خطر فرونشست قرار داشته‌اند (Hu et al., 2004).

با توجه به افزایش جمعیت، گسترش طرح‌های کشاورزی و پیرو آن برداشت بی رویه از منابع آبی زیرزمینی و همچنین در اثر کاهش نزولات جوی و خشکسالی، بسیاری از دشتهای کشور ایران دچار پدیده فرونشست شده‌اند که

سازندهای موجود متعلق به دوران تریاس بوده و جدیدترین سازندها مربوط به دوره کواترنر می‌باشد. از مهمترین واحدهای چینه‌شناسی موجود در منطقه می‌توان موارد زیر را نام برد:

- تریاس: شیل‌های سیاه رنگ دارای فسیل همزمان با سازند ناینند در غرب شاهین شهر

- ژوراسیک: شیل سیاه رنگ با میان لایه کنگلومرا دارای آمونیت همزمان با سازند شمشک که در بخش وسیعی از محدوده و جنوب شهر اصفهان رخنمون دارند.

- کرتاسه: رسوبات کنگلومرا، شیل و کربناته کرتاسه اصفهان از جمله واحدهای k2 - k7

- الیگومیوسن: آهک مرجانی با قاعده کنگلومرای همزمان با سازند قم در بخش محدودی از شمال منطق

- میوپلیوسن: شامل کنگلومرا، آهک ماسه‌ای، ماسه سنگ و مارن همراه ژپس همزمان با سازند بختیاری که بصورت محدود در قسمت شمالی دیده می‌شود. کواترنری: نهشته‌های این دوران از تخریب و رسوب‌گذاری مجدد منطقه پراکنده هستند. این رسوبات اکثرا بصورت منفصل بوده که در برخی نقاط بوسیله سیمان رسی بهم چسبیده‌اند.

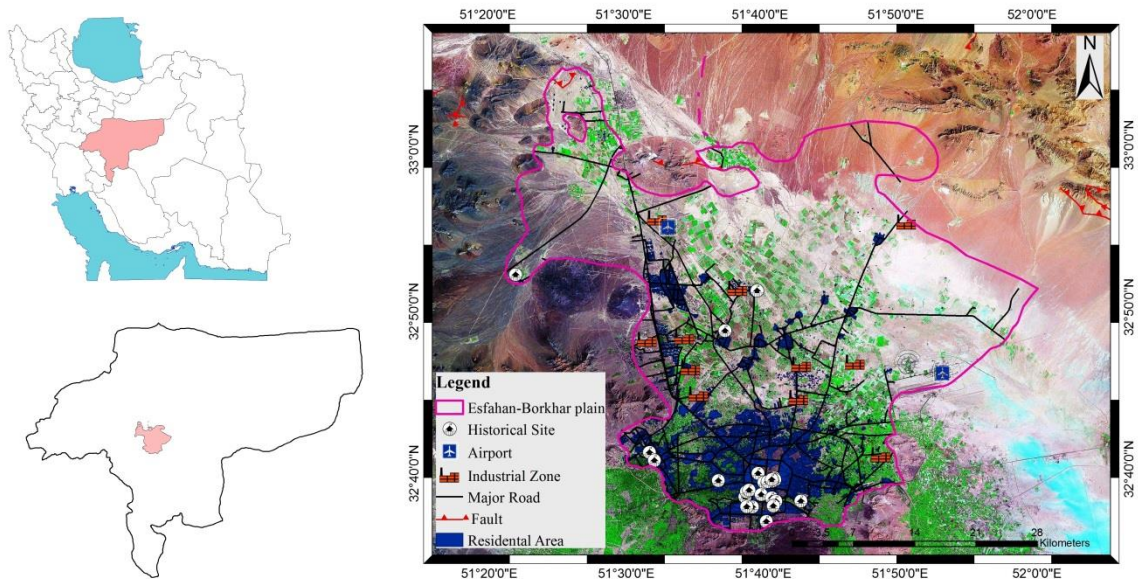
از جمله این رسوبات می‌توان به تراورتن‌ها، تراسهای قدیمی، آبرفتهای دشت و تراسهای آبرفتی جوان اشاره کرد (آقنابتی، ۱۳۹۲). جهت تعیین جنس و ضخامت آبرفتهای منطقه، اطلاعات ۳۷ گمانه حفر شده در این محدوده مورد استفاده قرار گرفته است. محل گمانه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین جهت تدقیق پارامترهای تعیین شده از گمانه‌های اکتشافی، از ۴ گمانه در حال حفاری نمونه‌برداری و در آزمایشگاه مکانیک خاک، برخی خصوصیات ژئوتکنیکی آنها تعیین شده است. در جدول شماره ۱ خصوصیات مربوط به گمانه شماره ۵۸ نمایش داده شده است.

در این تحقیق با استفاده از ۳۳ تصویر ماهواره Sentinel-1 موجود برای منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۷ اکتبر ۲۰۱۴ تا ۱۸ فوریه ۲۰۱۷، میزان فرونشست رخ داده تعیین و با استفاده از الگوریتم سری زمانی، نرخ فرونشست سالانه تعیین شده است. جهت تعیین نقاط دارای پتانسیل فرونشست منطقه از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و ترکیب آن با منطق فازی در محیط GIS و همچنین از روش رگرسیون خطی چندگانه، نقشه پتانسیل فرونشست تهیه شده است. در پایان نتایج بدست آمده از دو روش ترکیب روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی و رگرسیون خطی چندگانه با مقادیر فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر رادار مقایسه شده‌اند.

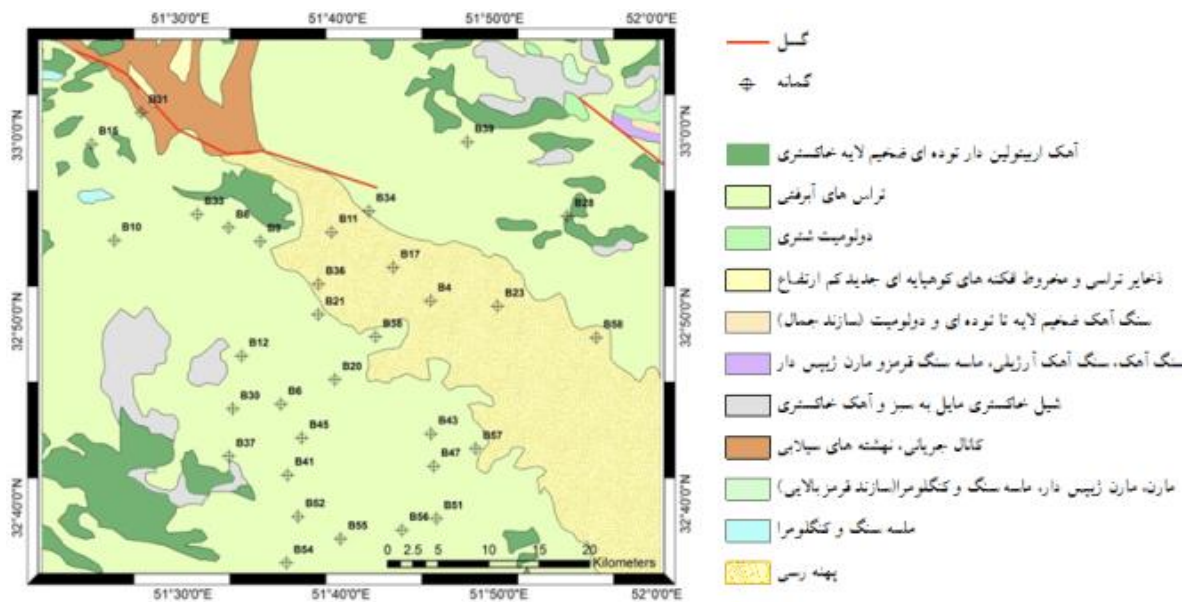
## ۲. منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این منطقه تقریباً در مرکز حوضه آبریز گاوخونی واقع است و مهمترین مناطق مسکونی واقع در محدوده مطالعاتی را شهرهای اصفهان، خمینی شهر، شاهین شهر و دولت آباد تشکیل می‌دهند. همچنین در این منطقه مناطق صنعتی و آثار باستانی فراوان و مهمی وجود دارد (شکل شماره ۱). محدوده مطالعاتی اصفهان برخورد دارای مساحت ۳۷۷۳ کیلومتر مربع است که ۲۴۰۶ کیلومتر مربع آن را دشت و مابقی را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. همچنین طبق مطالعات انجام گرفته مساحت آبخوان در محدوده مطالعاتی مورد نظر حدود ۱۶۴۲ کیلومتر مربع می‌باشد.

۱-۲ زمین‌شناسی (چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری) منطقه مورد نظر از دیدگاه زمین‌شناسی در پهنه سنندج - سیرجان واقع شده است. این پهنه در طی فرایند باز و بسته شدن اقیانوس تتیس جوان در دوران دوم و اوایل دوران سوم تکامل یافته و بخشی از کوهزاد زاگرس می‌باشد. پهنه سنندج-سیرجان شامل مجموعه‌ای از سنگهای دگرگونی، آذرین و رسوبی به سن پرکامبرین تا عهد حاضر می‌باشد ولی بطور عمده از سنگهای دگرگونی دوران دوم تشکیل شده است (آقنابتی، ۱۳۹۲) (شکل ۲). قدیمی‌ترین



شکل ۱. تصویر ماهواره ای منطقه، مناطق شهری، راههای دسترسی، مناطق صنعتی و آثار باستانی



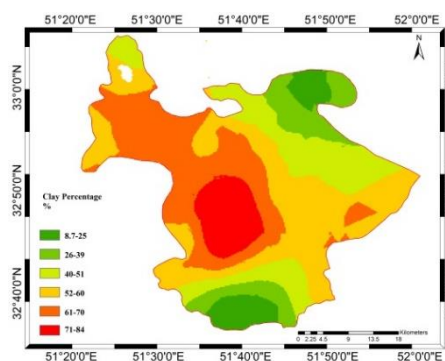
شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه به همراه محل گمانه ها

جدول ۱. برخی خصوصیات ژئوتکنیکی گمانه شماره ۵۸

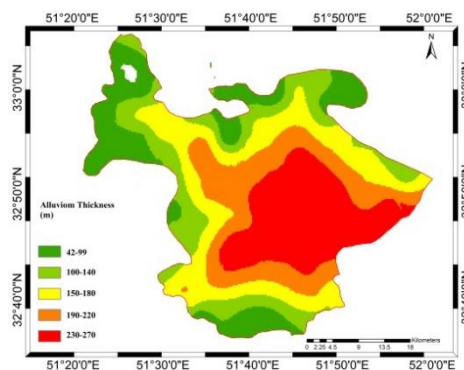
Depth	USGS	w%	$\gamma_{sat}$ (kn/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kn/m <sup>3</sup> )	Sc	K
10	CL	20.36	19/30	15/13	0/000002	0/0005
22	SM	19/60	19/39	15/50	0/1	0/0024
29	CL	45632	19/21	15/00	0/00000001	0/000004
38	ML	16/42	19/17	15/00	0/000025	0/0001
44	ML	14/24	19/17	15/00	0/0000036	0/00026
59	ML	15/67	19/17	15/00	0/000014	0/000045
71	SM	20790	21/13	18/32	0/001	0/001
81	SM	20/81	21/13	18/32	0/0045	0/0015
93	SM	14/19	21/13	18/32	0/0012	0/00025
100	SM	45501	21/13	18/32	0/16	0/054
111	CL	18568	18/55	13/91	0/000000065	0/000000014
119	CL	31594	19/85	15/98	0/000000084	0/000000018
135	SM	15615	18/73	14/43	0//26	0/45
140	CL	34182	18/58	13/92	0/0000017	0/000000035
152	ML	45530	19/67	15/80	0/00016	0/0054
160	SM	19845	21/41	18/76	0/16	0/085
1733	CH	30195	18/43	13/69	0/16	0/000018
185	CH	13/19	18/19	13/31	0/18	0/000021

بذکر است درصد رسوبات رسی هر گمانه تعیین و بر اساس آن درونیابی انجام و نقشه مربوطه تهیه شده است.

با استفاده از جنس رسوبات تعیین شده، بین گمانه‌ها درونیابی انجام، و لایه‌بندی کل منطقه تعیین گردیده است. در شکل ۳ الف ضخامت آبرفت منطقه و در شکل ۳ ب درصد رس نمایش داده شده است. لازم



ب

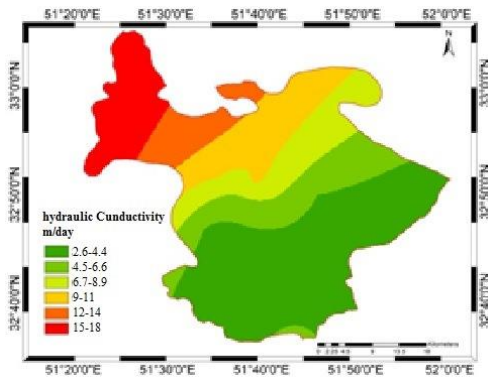


الف

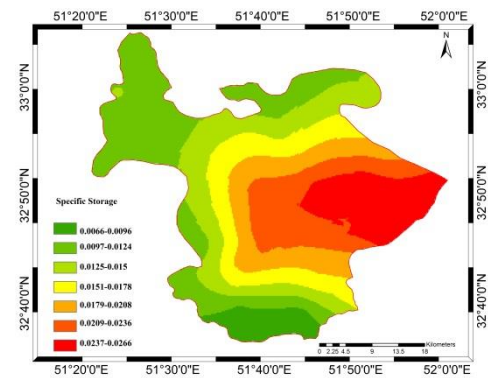
شکل ۳. الف) نقشه ضخامت آبرفت ب) نقشه درصد رس

ویژه (Specific Yield)، از پارامتر ضریب ذخیره استفاده شده است. پس از تعیین ضرایب برای هر یک از گمانه‌ها، با استفاده از روش درونیابی نقشه هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان تهیه و در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۴ الف نقشه هدایت هیدرولیکی و در شکل ۴ ب نقشه ضریب ذخیره محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) نقشه هدایت هیدرولیکی ب) نقشه ضریب

ذخیره

همانطور که در شکل ۳ الف مشاهده می‌شود، سنگ کف در قسمت‌های مرکزی و شرقی منطقه عمق بیشتری داشته و ضخامت آبرفت در این مناطق بیشتر است. همچنین شکل ۳ ب نشان دهنده درصد رس بیشتر در قسمت مرکزی، شرق و غرب منطقه بوده و قسمت‌های جنوبی و شمالی دارای درصد بیشتری از رسوبات درشت دانه هستند.

تحت تاثیر نیروهای تکتونیکی حاکم بر منطقه ساختارهای مختلفی از جمله گسل‌های تراستی و چین‌های بسته تا ایزوکلینال در واحدهای سنگی شکل گرفته است. راستای این ساختارها عمدتاً شمال غرب جنوب شرق بوده و از زمان کرتاسه به بعد شکل گرفته‌اند (آقاباتی، ۱۳۹۲). با توجه به فرارگیری محدوده مورد مطالعه در زون ستدیج سیرجان می‌توان گفت که منطقه از لحاظ تکتونیکی غیر فعال بوده لذا عوارض زمین‌شناسی ساختاری تاثیر عمده‌ای بر رخداد فرونشست زمین نخواهد داشت.

۲-۳. هیدروژئولوژی

۲-۳-۱. سیستم آبخوان منطقه

با استفاده از اطلاعات ۳۷ گمانه حفر شده در منطقه، و تعیین جنس و ضخامت رسوبات (شکل ۳) می‌توان آبخوان منطقه را مورد بررسی قرار داد. با توجه به تعداد و ضخامت متفاوت لایه‌های رسی، منطقه دارای یک آبخوان واحد نبوده و باعث تشکیل یک آبخوان سطحی آزاد و چند لایه محبوس در اعماق مختلف شده است.

۲-۳-۲. پارامترهای آب زمین‌شناسی

با استفاده از اطلاعات مربوط به تست پمپاژ انجام شده بر روی ۱۲ چاه منطقه ضرایب آب زمین‌شناسی آبخوان از جمله ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره (Storativity-Storage Coefficient) آبخوان تعیین شده است. لازم بذکر است با توجه به انجام آزمایش پمپاژ بر روی کلیه لایه‌های زمین و عدم تفکیک لایه‌های ریزدانه و درشت دانه در این آزمایش‌ها، بجای استفاده از ضرایبی همچون ذخیره ویژه (Specific Storage) و آبدهی

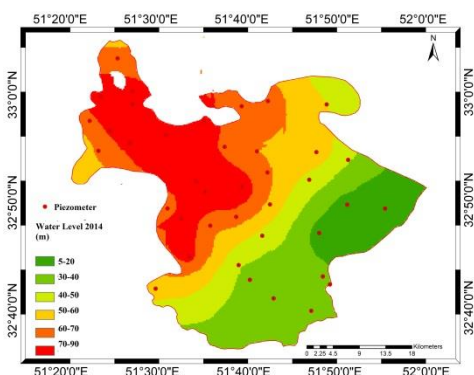
### ۳-۳-۲. بیلان آب زیرزمینی

اندازه‌گیری سطح آب منطقه با استفاده از ۳۷ حلقه چاه مشاهده‌ای از سال ۱۳۶۲ تا سال ۱۳۹۵، در این بازه زمانی، سالانه سطح آب زیرزمینی منطقه بطور میانگین سالانه ۱/۰۱ متر و بصورت تجمعی ۳۴ متر افت داشته است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷). در شکل ۶ الف سطح آب منطقه در سال ۱۳۹۳ و در شکل ۶ ب نقشه افت آب زیرزمینی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۵ نشان داده شده است. نقشه‌های نشان داده شده در شکل ۶ بر اساس درونیابی اطلاعات مربوط به پیزومترهای موجود در منطقه تهیه شده‌اند.

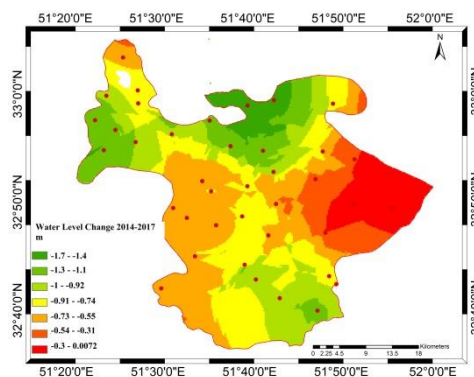
آبخوان اصفهان برخوردار از سمت شمال غرب، جنوب غرب و جنوب شرق، با آبخوان‌های مجاور ارتباط دارد (شکل ۱) که با توجه به سطح آب در مجاورت مرز آبخوان‌ها تبادل آب بین دو آبخوان شکل می‌گیرد. یکی از مهمترین منابع تغذیه آبخوان اصفهان-برخورار، رودخانه زاینده‌رود است. در شکل ۵ محل قرارگیری این رودخانه در محدوده آبخوان اصفهان-برخورار قابل مشاهده است. لازم بذکر است با توجه به خشکسالی‌های بیست سال اخیر در منطقه، آب چندانی در این رودخانه جریان نداشته است که این موضوع خود یکی از عوامل افت سطح آب زیرزمینی منطقه بحساب می‌آید.

همچنین بارندگی یکی از عوامل مهم تغذیه دشت است. میانگین بارش‌ها در محدوده زمانی مورد مطالعه ۱۰۰ میلیمتر در سال برآورد شده که مقدار قابل ملاحظه‌ای نبوده و تاثیر چندانی بر بیلان و سطح آب زیرزمینی محدوده آبخوان نداشته است.

عمده برداشت از منابع آب زیرزمینی منطقه از طریق ۶۰۰۰ چاه عمیق و نیمه عمیق موجود در منطقه صورت می‌گیرد. در شکل ۵ محل و تراکم چاه‌ها نشان داده شده است.



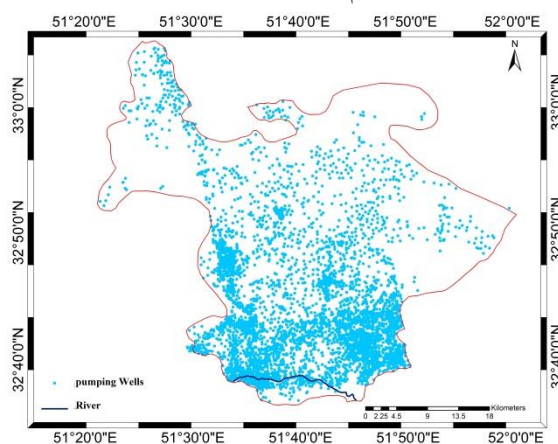
(الف)



(ب)

شکل ۶: الف) نقشه سطح آب منطقه در سال ۱۳۹۳

ب) نقشه افت سطح آب در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۳-



شکل ۵. محل چاه‌های بهره‌برداری و رودخانه

قسمت زیادی از این چاه‌ها در ۴۰ سال اخیر حفر شده‌اند که خود باعث افزایش بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و به تبع آن افت سطح آب زیرزمینی شده است. با توجه به

برگشتی تشکیل شده‌اند. تکنیک تداخل سنجی راداری از اختلاف فاز دو تصویر راداری SAR که در دو زمان مختلف از یک منطقه اخذ می‌گردد قادر به برآورد مقدار جابجایی قائم در آن بازه زمانی می‌باشد. اختلاف فاز دو تصویر راداری از مؤلفه‌های مختلف طبق رابطه (۱) تشکیل شده است (Zebker, et al., 1997):

$$\Delta\varphi_{\text{Int}} = \Delta\varphi_{\text{Def}} + \Delta\varphi_{\text{Topo}} + \Delta\varphi_{\text{Earth-curv}} + \Delta\varphi_{\text{Atm}} + \Delta\varphi_{\text{Noise}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\Delta\varphi_{\text{Int}}$  مقدار اختلاف فاز بین دو تصویر راداری است که از آن به اینترفروگرام خام یاد می‌شود،  $\Delta\varphi_{\text{Def}}$  فاز مربوط به سهم جابجایی سطح زمین (فرونشست)،  $\Delta\varphi_{\text{Topo}}$  فاز مربوط به اثر توپوگرافی سطح زمین،  $\Delta\varphi_{\text{Earth-curv}}$  فاز مربوط به اثر انحنای زمین،  $\Delta\varphi_{\text{Atm}}$  فاز مربوط به اثر اتمسفر و در نهایت  $\Delta\varphi_{\text{Noise}}$  فاز مربوط به نویز است که علت ایجاد آن اثر عدم همبستگی زمانی و مکانی دو تصویر به خاطر بزرگ بودن بازه زمانی بین دو تصویر راداری (خط مبنای زمانی) و فاصله دو ایستگاه تصویربرداری متناظر با دو تصویر (خط مبنای مکانی) است. جهت استخراج مؤلفه مربوط به فرونشست زمین بایستی بقیه مؤلفه‌ها برآورد و از فاز اینترفروگرام خام حذف شود. جهت حذف اثر توپوگرافی از یک مدل رقمی ارتفاعی (Digital Elevation Model (DEM)) موجود در منطقه استفاده می‌شود که بهترین مدل رقمی موجود مدل SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) است و در این تحقیق نیز از همین مدل رقمی استفاده شده است. به منظور حذف اثر انحنای زمین از مقدار خط مبنای مکانی و روابط مربوطه استفاده می‌شود. اثر نویز را می‌توان با اعمال فیلترهایی که دقیقاً جهت نیل به این

همانطور که در شکل ۶ مشخص است بیشترین افت سطح آب در این بازه زمانی مربوط به قسمت‌های شمال، شمال غرب، جنوب غرب و مرکز آبخوان است. همچنین سطح آب در قسمت شرقی تغییر چندانی نداشته است. علیرغم وجود تعداد فراوان چاه‌های بهره‌برداری در قسمت جنوب و جنوب شرق، افت سطح آب چندانی در این مناطق مشاهده نمی‌شود که دلایلی از جمله تغذیه آبخوان توسط رودخانه زاینده‌رود و همچنین برداشت محدودتر چاه‌های این منطقه نسبت به چاه‌های منطقه شمالی و مرکزی دارد.

به طور کلی رشد بی‌رویه چاه‌ها و به همراه آن افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه باعث رخداد پدیده فرونشست شده است. اولین گام جهت مطالعه این پدیده اندازه‌گیری آن است. همانطور که در بخش مقدمه بیان شد، امروزه کارترین روش جهت اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین روش تداخل سنجی راداری است که در این تحقیق از آن بهره گرفته شد. در بخش بعد روش تحقیق مورد استفاده جهت پایش و سپس مدل‌سازی فرونشست به کمک پارامترهای زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی ارائه می‌گردد.

### ۳- روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از روش اینترفرومتری میزان فرونشست منطقه طی سالهای ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ و در بازه‌های زمانی کوتاه تعیین شده است. همچنین جهت تعیین رفتار بلند مدت فرونشست از روش سری زمانی استفاده شد. در مرحله بعد جهت تعیین مناطق دارای پتانسیل فرونشست و با استفاده از پارامترهای موثر بر فرونشست از روش تحلیل سلسله مراتبی - فازی و همچنین روش رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد.

۱-۳. تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور تشکیل

اینترفروگرام‌های تفاضلی از تصاویر راداری Sentinel-1

تصاویر راداری SAR تصاویری هستند که در اثر ارسال امواج راداری به سطح زمین و ثبت مقدار دامنه و فاز موج

چنانچه بردار تغییرشکل در زمان برداشت هر تصویر را  $D$  [d1, d2, d3 ...] = بنامیم و بردار مقادیر مشاهده شده شامل تغییرشکل بدست آمده از اینترفروگرام‌ها را  $I = [i12, i23, \dots, i34]$  بنامیم، ارتباط این دو بردار را می‌توان با استفاده از رابطه شماره ۲ نشان داد (Dehghani, et al., 2009):

$$AD = I \quad (2)$$

که در این رابطه از ماتریس طراحی  $A$  استفاده شده است. در فرایند وارون سازی، میزان تغییرشکل اولین تاریخ صفر در نظر گرفته شده است ( $d1=0$ ). برای رفع اثر خطاهای اینترفروگرام‌ها از جمله اثر توپوگرافی، خطای مداری، جابجایی هدف و تاثیرات اتمسفر، یک شرط نرم‌کنندگی به رابطه اضافه شده است. نهایتاً رابطه سری زمانی به صورت رابطه شماره ۳ قابل بازنویسی است (Dehghani, et al., 2009):

$$\left( \gamma^2 \frac{\partial^2}{\partial^2} \right) D = \begin{pmatrix} I \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\gamma$  شرط نرم‌کنندگی است. نهایتاً خروجی الگوریتم سری زمانی، تصویر مربوط به نرخ متوسط فرونشست خواهد بود. علیرغم استفاده از الگوریتم سری زمانی و بدست آوردن مقادیر فرونشست در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و بلند مدت، با توجه به عدم همبستگی زمانی و مکانی اینترفروگرام‌ها، همچنان برخی پیکسل‌های تصویر خروجی نویزی بوده و مقادیر فرونشست برای آنها محاسبه نخواهد شد.

### ۳-۳. روش تحلیل سلسله مراتبی- فازی

بمنظور تعیین پتانسیل فرونشست با استفاده از پارامترهای موثر تحقیقات زیادی انجام شده است. بعنوان مثال (Bianchini et al., 2019) با استفاده از پارامترهای لیتولوژی، واحدهای آبخوان، فاصله از گسل، کاربری اراضی و ضخامت آبخوان، آسیب‌پذیری آبخوان در منطقه توسکانی ایتالیا را با روش منطبق فازی تعیین کرده‌اند.

هدف طراحی شده‌اند، کاهش داد. در این مقاله سعی بر آن شد که اثر اتمسفر را در فاز بعد حین انجام آنالیز سری زمانی کاهش داد. بدین ترتیب تنها مؤلفه باقیمانده، مربوط به فرونشست است که از آن به اینترفروگرام تفاضلی یا نقشه جابجایی یاد می‌شود. یکی از محدودیت‌های تکنیک تداخل سنجی راداری وجود دو اثر عدم همبستگی زمانی و مکانی است که باعث ایجاد نویز در اینترفروگرام می‌گردد. اثر عدم همبستگی زمانی مخصوصاً در مواقعی که منطقه مورد مطالعه از عوارضی که رفتار بازپراکنشی آن‌ها به سرعت در زمان تغییر می‌کند، مثل پوشش گیاهی، تشکیل شده باشد بسیار قابل توجه است. جهت به حداقل رساندن این اثر باید فاصله زمانی دو تصویر راداری تا حد امکان کم باشد. لذا در این تحقیق اینترفروگرام‌های با خط مبنای زمانی و نیز مکانی کوچک مورد پردازش قرار گرفت. لذا به منظور پایش پدیده فرونشست در یک بازه زمانی طولانی می‌بایست تعداد زیادی از اینترفروگرام‌های با خط مبنای زمانی کوتاه تهیه شده و سپس در یک فرآیند که از آن به آنالیز سری زمانی تعبیر می‌گردد، در یک سیستم معادلات با هم ترکیب شده و نقشه کلی نرخ سالانه فرونشست مربوط به آن بازه زمانی استخراج می‌گردد. این روش آنالیز سری زمانی با خط مبنای کوتاه (Small Baseline Subset (SBAS) Time Series Analysis) نام دارد که در فاز بعد این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم به طور مختصر در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۲. آنالیز سری زمانی فرونشست

مرحله بعد تشکیل سری زمانی فرونشست با استفاده از اینترفروگرام‌ها است. هدف اصلی در بررسی سری زمانی، وارون کردن اینترفروگرام‌ها برای بدست آوردن میزان تغییرشکل در زمان برداشت هر تصویر با استفاده از روش کمترین مربعات است. با استفاده از این روش می‌توان رفتار کوتاه مدت و بلند مدت فرونشست را بررسی کرد.

جهت ارزیابی معیارها، بایستی کلیه معیارها دارای مقیاس یکسانی باشند. در محیط GIS برای ساخت نقشه‌های معیار چند رویکرد اصلی شامل روش‌های قطعی، احتمالاتی و فازی وجود دارد که در این بررسی از روش فازی استفاده شده است. بدین منظور از گزینه Fuzzy Membership در نرم افزار Arc GIS 10.4 استفاده شده است. در این روش استاندارد سازی، تمامی مقادیر در محدوده بین صفر تا یک قرار می‌گیرند.

در مرحله بعد نقشه تمامی معیارها در ضرایب بدست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی ضرب شده‌اند. پس از آن جهت ترکیب نقشه معیارها از روش منطق فازی استفاده شده و توسط ابزار Fuzzy Overlay نقشه نهایی فرونشست تهیه گردیده است. جهت ترکیب نقشه‌ها عملگرهای متفاوتی قابل استفاده بوده (Malczewski, 1999) که در این تحقیق (با توجه به نتایج بهتر) از عملگر OR استفاده شده است.

در بخش بعد نتایج حاصل از مراحل مختلف روش تحقیق شده ارائه شده و سپس بر روی آن‌ها بحث و بررسی صورت می‌گیرد.

### ۳-۴- رگرسیون خطی چندگانه

مدل رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression) طبق رابطه زیر در واقع نشان دهنده ارتباط خطی یک متغیر وابسته با چند متغیر مستقل است.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + e \quad (\text{ع})$$

که در این رابطه  $y$  متغیر وابسته،  $a_0$  عرض از مبدا،  $a_1, a_2, \dots, a_n$  ضرایب رگرسیونی و  $e$  مقدار خطا می‌باشند.

همچنین (عالی پور و دیگران، ۱۳۹۶) با وزن دهی پارامترهایی نظیر افت سطح آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، شیب زمین، زمین شناسی و فاصله از گسل به روش AHP، پتانسیل فرونشست در منطقه اردبیل را تعیین کرده‌اند. نتایج تحقیقات (عالی پور و دیگران، ۱۳۹۶) نشان دهنده تاثیر بیشتر پارامترهای افت آب و زمین شناسی بر رخداد فرونشست است.

در این تحقیق بر اساس اطلاعات موجود و همچنین نتایج تحقیقات قبلی از جمله (Dehghani, et al., 2013) پارامترهای سطح آب، افت سطح آب، ضخامت آبرفت، ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و درصد رسوبات ریزدانه استفاده شده است.

در مرحله بعد بمنظور تهیه نقشه فرونشست منطقه با بکارگیری پارامترهای موثر در فرونشست از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی - فازی استفاده شده است.

در روش تحلیل سلسله مراتبی جهت مقایسه و ارزش- گذاری پارامترها از نظر کارشناسان مجرب استفاده می‌شود که در این روش ضمن تهیه پرسش‌نامه نظر ۱۰ نفر از کارشناسان موضوع مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

در مرحله بعد با استفاده نرم‌افزار Expert Choice 11 و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مقایسه بین پارامترها صورت گرفته و میزان تاثیر هر یک در فرونشست بررسی شده است.

در این نرم‌افزار معیارهای اصلی موثر بر هدف باید به صورت زیر شاخه هدف در نمودار درختی تکمیل گردد. پس از تعریف معیارها، وزن دهی صورت می‌گیرد. این کار را می‌توان به چند صورت نظیر مقایسه زوجی عددی، گرافیکی و محاوره‌ای و مقایسه کلی در نرم‌افزار انجام داد (Moreno-Jiménez, et al., 2005) در این تحقیق، از روش مقایسه‌ی زوجی عددی استفاده شده است. معیارها دو به دو (و با توجه به نتایج آنالیز حساسیت) با یکدیگر مقایسه شده و وزن هر معیار تعیین شده است.

عنوان مثال دو نمونه از اینترفروگرام‌های پردازش شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴-۲. نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی فرونشست اینترفروگرام‌های پردازش شده در مرحله قبل، در این مرحله وارد آنالیز سری زمانی می‌شوند. لیکن پیش از آن خطای باقیمانده مداری که بدلیل عدم دقت در محاسبه خط مبنای مکانی در اینترفروگرام‌ها وجود دارند، با برازش یک صفحه به نقاط خارج از منطقه فرونشست و حذف آن صفحه از اینترفروگرام‌ها حذف و سپس تمام اینترفروگرام‌ها نسبت به یک نقطه خارج از فرونشست به عنوان مرجع مکانی کالیبره می‌شوند. بعد از آن سیستم معادلات مشاهدات به همراه معادلات مربوط به شرط نرم‌کنندگی سری زمانی تشکیل و وارد فرآیند معکوس‌سازی جهت برآورد مقدار فرونشست در تاریخ‌های اخذ تصاویر راداری می‌شوند. نتایج حاصل از آنالیز سری زمانی شامل نقشه متوسط نرخ فرونشست که همان رفتار بلند مدت فرونشست می‌باشد. از این نقشه در هر پیکسل نرخ سالانه فرونشست قابل استخراج است. در شکل ۸ نقشه نرخ سالانه فرونشست استخراج شده از نتایج آنالیز سری زمانی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، بیشینه مقدار فرونشست در منطقه ۱۱ سانتیمتر در سال برآورد شده است. همانطور که از شکل مشخص است، برخی مناطق با رنگ سفید نشان داده شده است. این مناطق محدوده‌هایی هستند که به دلیل عدم همبستگی بالا، فاز آن‌ها قابل بازیابی نمی‌باشد. لازم بذکر است با توجه به عدم وجود شبکه ترازبندی و جی پی اس سطحی، امکان اعتبارسنجی مدل بر اساس اندازه‌گیری‌های زمینی وجود ندارد. ولی با توجه به مشاهده آثار فرونشست بخصوص در محدوده جنوب شرق منطقه (فرودگاه اصفهان) و مناطق مرکزی (محله عاشق آباد) نتایج بدست آمده از روش اینترفرومتری قابل توجهی هستند.

جهت تهیه نقشه پانتسپیل فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه، پانتسپیل فرونشست بعنوان متغیر وابسته ( $y$ ) و پارامترهای ضخامت آبرفت، درصد رس، ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، سطح آب و تغییرات سطح آب بعنوان متغیرهای مستقل ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ) در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق تهیه نقشه پانتسپیل فرونشست توسط روش رگرسیون خطی چندگانه طبق مراحل زیر انجام شده است: (۱) استخراج مقادیر پارامترهای استاندارد شده برای هر پیکسل. (۲) انتقال مقادیر به جدول و بررسی رابطه آماری هر پارامتر با فرونشست محاسبه شده توسط روش اینترفرومتری برای همان پیکسل (۳) استفاده از ابزار رگرسیون خطی چندگانه برای تعیین ضریب هر یک از پارامترها و استخراج رابطه متغیر وابسته (آسیب‌پذیری فرونشست) با کلیه پارامترهای مستقل برای هر پیکسل. (۴) انجام درونبایی در محیط GIS و تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست منطقه

#### ۴- نتایج، بحث و بررسی

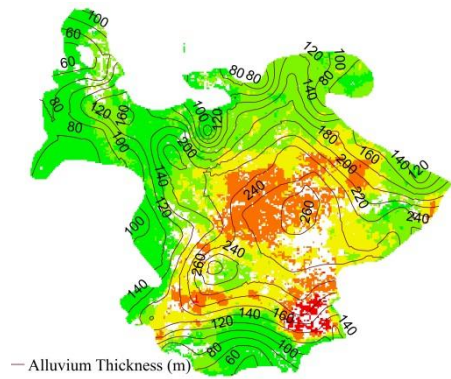
نتایج حاصل از هر یک از اجرای فازهای مختلف روش مورد استفاده در زیر ارائه شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری در پردازش اینترفروگرام‌های تفاضلی

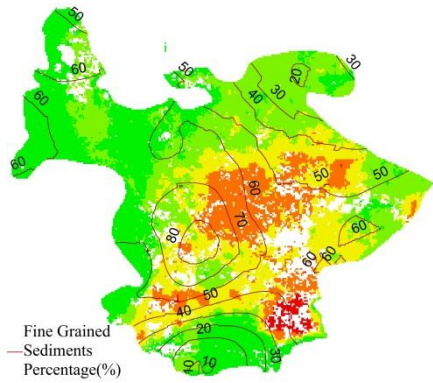
جهت مطالعه فرونشست در دشت اصفهان برخورد از ۳۳ تصویر ماهواره Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۷ اکتبر ۲۰۱۴ و ۱۸ فوریه ۲۰۱۷ استفاده شد. از این تصاویر به کمک نرم‌افزار GMTSAR، ۴۵ اینترفروگرام تفاضلی با بازه زمانی و مکانی کوتاه تهیه شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. همانطور که در جدول زیر مشاهدات می‌شود، خط مبنای زمانی و مکانی تمام اینترفروگرام‌ها جهت جلوگیری از ایجاد عدم همبستگی کوتاه هستند. به

جدول ۲. مشخصات تصاویر رادار استفاده شده

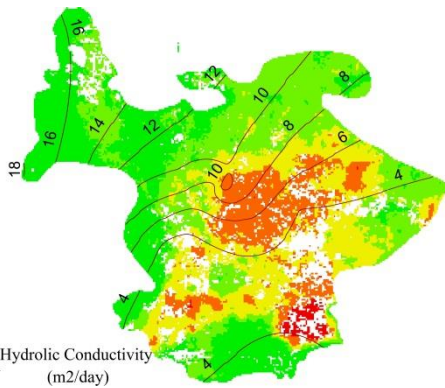
Spatial Baseline	Temporal Baseline	Slave	Master	Num.	Spatial Baseline	Temporal Baseline	Slave	Master	Num.
-113.305	24	2016/01/19	2015/12/26	24	-31.65	48	2014/12/14	2014/10/27	1
9.955	24	2016/02/12	2016/01/19	25	30.637	24	2015/01/07	2014/12/14	2
80.224	48	2016/03/07	2016/01/19	26	-31.75	48	2015/01/31	2014/12/14	3
77.363	24	2016/03/07	2016/02/12	27	-24.364	24	2015/01/31	2015/01/07	4
-95.466	24	2016/03/31	2016/03/07	28	-145.907	24	20150224	2015/01/31	5
-25.214	48	2016/04/24	2016/03/07	29	-6.382	48	2015/03/20	2015/01/31	6
76.283	24	2016/04/24	2016/03/31	30	143.064	24	2015/03/20	2015/02/24	7
-61.917	24	2016/05/18	2016/04/24	31	-33.664	48	2015/05/07	2015/03/20	8
-61.386	48	2016/06/11	2016/04/24	32	74.112	24	2015/05/31	2015/05/07	9
87.236	96	2016/07/29	2016/04/24	33	-26.858	48	2015/06/24	2015/05/07	10
6.719	24	2016/06/11	2016/05/18	34	100.275	24	2015/06/24	2015/05/31	11
-26.327	48	2016/07/29	2016/06/11	35	21.973	24	2015/07/18	2015/06/24	12
77.193	24	2016/08/22	2016/07/29	36	-25.209	48	2015/08/11	2015/06/24	13
51.035	48	2016/09/15	2016/07/29	37	-39.813	24	2015/08/11	2015/07/18	14
112.855	96	2016/11/02	2016/07/29	38	-26.013	24	2015/09/04	2015/08/11	15
-28.472	24	2016/09/15	2016/08/22	39	26.772	48	2015/09/28	2015/08/11	16
62.321	48	2016/11/02	2016/09/15	40	52.648	24	2015/09/28	2015/09/04	17
25.338	24	2016/10/09	2016/09/15	41	95.151	72	2015/09/12	2015/09/28	18
39.3	24	2016/11/02	2016/10/09	42	126.512	24	2015/10/26	2015/10/02	19
-22.037	24	2016/11/26	2016/11/02	43	60.285	24	2015/12/09	2015/11/15	20
-35.736	48	2016/12/20	2016/11/02	44	63.718	24	2015/12/26	2015/12/02	21
-113.483	108	2017/02/18	2016/11/02	45	-49.933	48	2016/01/19	2015/12/02	22
					25.23	144	2016/04/24	2015/12/02	23



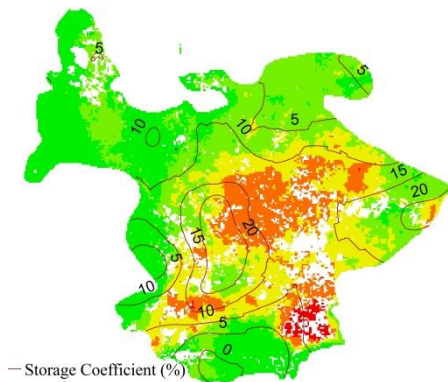
(الف)



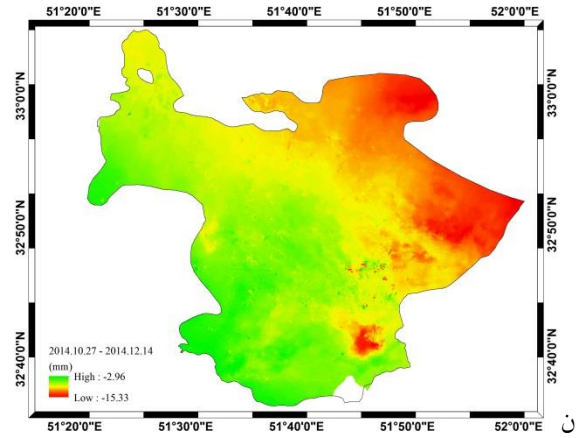
(ب)



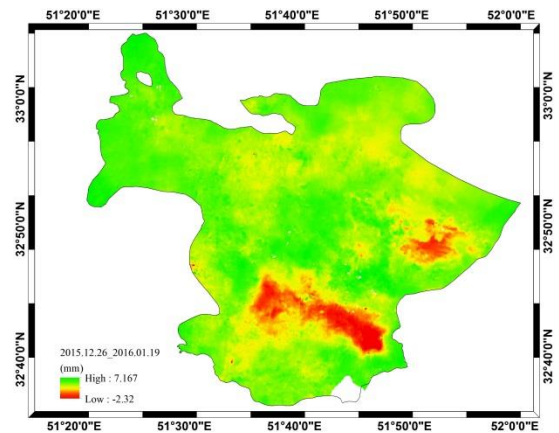
(ج)



(د)

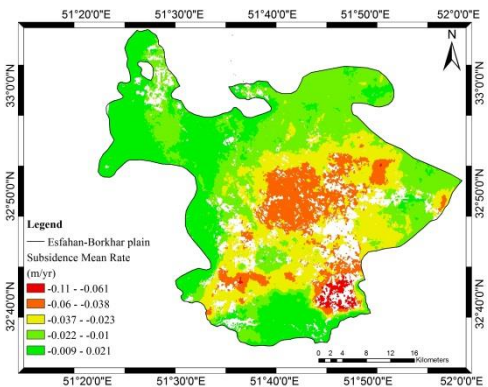


(الف)



(ب)

شکل ۲. دو نمونه از ایترفروگرام‌های پردازش شده: (الف) ایترفروگرام مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۲۷-۲۰۱۴/۱۲/۱۴، (ب) ایترفروگرام مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۵/۱۲-۲۰۱۶/۰۱/۱۹



شکل ۸. نقشه میانگین نرخ سالانه فرونشست در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵

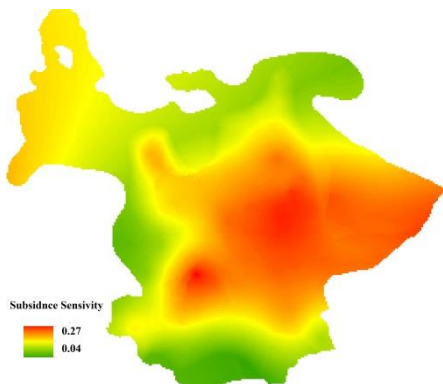
در این مرحله ضمن مقایسه دو به دو پارامترها و امتیازدهی به آنها با توجه به نظر کارشناسان، نمودار درختی تشکیل و ضریب تاثیر هر یک از معیارها مشخص گردید (شکل ۱۱).



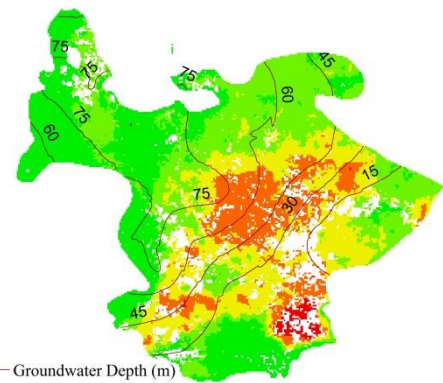
شکل ۱۱: نتایج تحلیل سلسله مراتبی و ضرایب تعیین شده برای هر پارامتر

همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است افت سطح آب زیرزمینی، درصد رس و ضخامت آبخوان دارای بزرگترین وزن هستند.

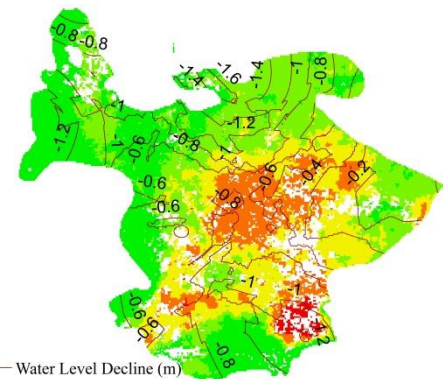
در مرحله بعد ضمن استانداردسازی معیارها و قرارگیری کلیه مقادیر بین صفر و یک، نقشه پارامترها در ضرایب بدست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی ضرب گردیده و در نهایت با استفاده از منطق فازی و ابزار Fuzzy Overlay و عملگر OR در نرم افزار GIS، معیارها با هم ترکیب و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست در منطقه بدست آمده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: پتانسیل فرونشست بدست آمده از ترکیب تحلیل سلسله مراتبی معیارها و منطق فازی



(و)



(ه)

شکل ۹. پارامترهای ورودی شبکه: (الف) ضخامت آبرفت، (ب) درصد رس، (ج) هدایت هیدرولیکی، (د) ضریب ذخیره، (ه) عمق سطح آب زیرزمینی، (و) تغییرات سطح آب در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵

۳-۴. نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی

فاکتورهای مؤثر مورد استفاده جهت تهیه نقشه آسیب پذیری فرونشست در شکل ۹ نشان داده شده اند.

همچنین در شکل ۱۰ نمودار شاخه درختی نشان دهنده ساختار تحلیل سلسله مراتبی شامل هدف (تعیین پتانسیل فرونشست) و عوامل مؤثر بر آن نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. نمودار شاخه درختی نشان دهنده ساختار تحلیل سلسله مراتبی

پارامتر وابسته (فروروش) با پارامترهای مستقل تعیین شده است. بدین منظور از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. نتایج در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

۳-۴- نتایج بدست آمده از روش رگرسیون خطی چندگانه به منظور تعیین میزان آسیب پذیری فروروش توسط روش رگرسیون خطی چندگانه مقادیر مربوط به تعداد ۵۰۰۰ پیکسل از تصاویر مربوط به شش پارامتر موثر در فروروش و تصویر فروروش اندازه‌گیری شده توسط روش اینترفرومتری استخراج گردید. رابطه آماری بین

جدول ۳. مقادیر همبستگی پیرسون بین متغیر وابسته (فروروش) اندازه‌گیری شده توسط تصاویر رادار) و متغیرهای مستقل (پارامترهای موثر در فروروش)

	Hydraulic conductivity	Storage coefficient	Water level	Water level decline	Fine grain sediment percentage	Alluvium Thickness	
Calculated Subsidence	r	0.0203*	0.0207*	- 0.021*	0.689**	0.0604**	-0.444**
	sig	0	0.012	0.046	0	0	0

\*\* معناداری در سطح ۰/۹۹

\* معناداری در سطح ۰/۹۵

همانطور که نتایج آزمون پیرسون نشان می‌دهد، داده‌های افت سطح آب، درصد رسوبات ریزدانه و ضخامت آبرفت بیشترین معنی داری و همبستگی را با مقادیر فروروش اندازه‌گیری شده توسط تصاویر رادار را دارا هستند.

همچنین نتایج نشان دهنده رابطه مستقیم پارامترهای افت سطح آب، درصد رسوبات ریزدانه، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره و رابطه غیر مستقیم متغیر عمق سطح آب زیرزمینی و ضخامت آبرفت با میزان فروروش است.

در مرحله بعد با در نظر گرفتن فروروش اندازه‌گیری شده توسط تصاویر رادار بعنوان متغیر وابسته و شش پارامتر موثر بعنوان متغیرهای مستقل، با استفاده از ابزار رگرسیون خطی چندگانه در نرم‌افزار SPSS ضرایب بین متغیر مستقل و متغیرهای وابسته تعیین شده که رابطه کلی بین پارامتر وابسته و پارامترهای مستقل را می‌توان بصورت رابطه شماره ۵ نشان داد:

رابطه شماره ۵:

$$S = 742 + 0.112WLC + 0.112FP - 0.059AD + 0.00000139HC + 0.00000108SC - 0.207WW$$

که در این رابطه:

S: فروروش

WLC: تغییرات سطح آب

FP: درصد رسوبات ریزدانه

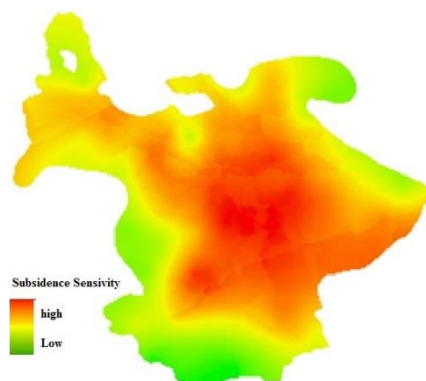
AD: ضخامت آبرفت

HC: هدایت هیدرولیکی

SC: ضریب ذخیره

WW: عمق سطح آب زیرزمینی

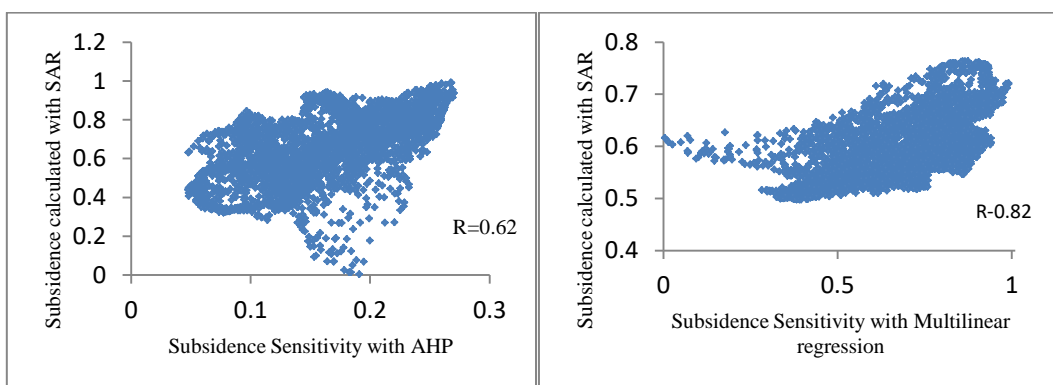
پس از تعیین ضریب هر متغیر، در محیط GIS نقشه هر یک از پارامترها در ضریب مربوط ضرب گردیده و پتانسیل بدست آمده است. نتیجه در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است



شکل ۱۳: پتانسیل فرونشست بدست آمده از روش رگرسیون خطی چندگانه

خطی چندگانه با مقادیر فرونشست بدست آمده از روش ایتترفرومتری مقایسه شده‌اند (شکل ۱۴ الف و ب).

در نهایت نتایج بدست آمده از روش‌های ترکیب تحلیل سلسله مراتبی معیارها با منطق فازی و روش رگرسیون



(ب)

(الف)

شکل ۱۴. مقایسه فرونشست اندازه‌گیری شده توسط تصاویر رادار با الف) میزان آسیب پذیری فرونشست بدست آمده از

ترکیب تحلیل سلسله مراتبی ، ب) میزان آسیب پذیری فرونشست بدست آمده از روش رگرسیون خطی چندگانه

مقادیر فرونشست محاسبه شده به روش ایتترفرومتری تعیین شده است. نتایج در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

بمنظور برآورد کارایی دو روش جهت تعیین میزان حساسیت فرونشست، خطای جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی نتایج بدست آمده از دو روش نسبت به

جدول ۴. خطای جذر میانگین مربعات، ضریب همبستگی و میانگین درصد خطای مطلق دو روش تعیین آسیب پذیری

فرونشست

	R	RMSE	MAPE
Subsidence Sensivity AHP	0.62	0.09	27
Subsidence Sensivity .Multilinear Reg	0.82	0.02	13

## ۵- نتیجه گیری

ترکیب آنها و همچنین مدل رگرسیون خطی چندگانه، نقشه آسیب‌پذیری فرونشست منطقه استخراج گردید. بر اساس هر دو روش میزان تاثیر متغیرهایی همچون میزان افت سطح آب زیرزمینی و درصد رسوبات ریزدانه تاثیر بیشتری نسبت به سایر متغیرها بر وقوع فرونشست خواهند داشت. همچنین با توجه به خطای جذر میانگین مربعات، ضریب همبستگی و میانگین درصد خطای مطلق تعیین شده، میزان آسیب‌پذیری فرونشست توسط روش رگرسیون خطی چندگانه در مقایسه با روش تحلیل سلسله مراتبی همخوانی بیشتری با میزان فرونشست اندازه‌گیری توسط تصاویر رادار نشان می‌دهد.

در این تحقیق فرونشست زمین در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۵ مورد بررسی قرار گرفت. ضمن تعیین میزان فرونشست رخ داده در این بازه زمانی با استفاده از تصاویر رادار و روش اینترفرومتری، با استفاده از آنالیز سری زمانی و اینترفروگرام‌های با خط مبنای زمانی کوتاه، نرخ فرونشست سالانه در منطقه محاسبه گردید. بیشترین نرخ فرونشست سالانه در محدوده دشت اصفهان-برخوار، ۱۱ سانتی متر در سال برآورد گردید. بیشترین میزان فرونشست در نواحی مرکزی، جنوب غرب و جنوب شرق آبخوان بوده است. با استفاده از معیارهای موثر در فرونشست و تلفیق روش AHP و منطق فازی و

## ۶- منابع

- ع، ۱۳۹۲. زمین شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- امیری، م.، نظری پویا، ه. و مظاهری، ح. ا.، ۱۳۸۳، علل و مکانیسم وقوع فروچاله‌ها در دشت فامنین - کبودرآهنگ. مجله تحقیقات کشاورزی، جلد ۷۳.
- شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷. گزارش تمدید و توسعه سطح ممنوعیت محدوده مطالعاتی اصفهان برخوار.
- شمشکی، ا.، بلورچی، م. ج. و انصاری، ف.، ۱۳۸۴. بررسی فرونشست زمین در دشت تهران - شهریار، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عالی پور، م.، ملک محمدی، ب. و جعفری، ح.، ۱۳۹۶. پهنه بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). نشریه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، جلد ۱۱.
- Bianchini, S., Lorenzo, S & Delsoldado, M., 2019. Ground Subsidence Susceptibility (GSS) Mapping in Grosseto Plain (Tuscany, Italy) Based on Satellite InSAR Data Using Frequency Remote Sensing, 11.
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. & Hong, S.-H., 2013. Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. Remote Sensing of Environment, 128 : 150-161.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M., Entezam, I., Mansourian, A., Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophys. J. Int., 178 : 47-56.
- Dehghani, M. Valadan Zouj, M., Saatchi, S., Biggs, J., Parsons, B., Wright, T., 2009. Radar Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence. J. Indian Soc. Remote Sens., 37 : 191-200.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M., Hooper, A., Hanssen, R. F., Entezam, I., Saatchi, S., 2013. Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79 : 157-170.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J. & Entezam, I., 2013. Neural Network Modelling of Tehran Land Subsidence Measured by Persistent Scatterer Interferometry. Photogrammetrie- Fernerkundung- Geoinformation, Issue 1, pp. 5-17.

- Galloway , D. L. & Burbey, . T. J., 2011. Review: Regional land subsidence accompanying. *Hydrogeology Journal*, 19 : 1459-1486.
- Motagh, M. et al., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 35.
- Raucoules, D., Cartannaz, C., Mathieu, F. & Midot, D., 2013. Combined use of space-borne SAR interferometric techniques and ground-based measurements on a 0.3 km<sup>2</sup> subsidence phenomenon. *Remote Sensing of Environment*, 139 : 331-339.
- Rumelhar, D. E., Hinton, G. E. & Williams , R. J., 1986. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323 : 533-536.
- Galloway, D. L. & Hoffmann, J., 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology.. *Hydrogeology Journal*, 15: 133-154.
- hashem, S., 1992. Sensitivity analysis for feedforward Artificial Neural Networks with differentiable activation functions.. s.l., s.n.
- haShem, S., 1992. Sensitivity analysis for feedforward Artificial Neural Networks with differentiable activation functions.. s.l., s.n.
- haykin, S. h. S. & V. V. b., 1995. *Neural Network: a Comprehensive Foundation*.. s.l.:s.n.
- Hu, R., Yue, Z., Wang, L. & Wang, S., 2004. Review on current status and challenging issues of. *Engineering Geology*, 74:65-77.
- Malczewski, J., 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. s.l.:John Wiley.
- Maryam Dehghani, M. J. V. Z. I. E. M. ., S. S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophys. J. Int.*, 178: 47-56.
- Moreno-Jiménez, J. M., Salvador, M. & Turón, A., 2005. Group preference structures in AHP-group decision making.
- Motagh, M., Djampur, Y., Walter, T. R. & Wetzel, H.-U., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2), : 518-526.
- Mousavi, M., Shamsai, A. & El Naggar, M. H., 2001. A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3): 452-464.
- Poland, J. F., 1984. *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. s.l.:the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Zebker, H. A., Rosen : A. & Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, 102: 7547-7563.