۱ مقدمه

از دیر باز سعی بر آن بوده تا علم و دانش بشری به عنوان ابزاری در جهت آسایش و امنیت وی به خدمت گرفته شود. یکی از مهمترین رویدادهایی که بیشتر در اثر فعالیتهای بشری رخ می دهد پدیده فرونشست[1] می باشد. رشد روز افزون جمعیت منجر به استفاده بی رویه از آب در مصارف صنعتی و کشاورزی شده و به تبع آن ایجاد اثرات نامطلوب کمی و کیفی در منابع آب بوده است. افزایش استفاده از آب هاي زیر زميني بویژه در حوضه هايي كه با نهشته هاي آبرفتي ، دريايي كم عمق يا درياچه اي تحكيم نيافته[2] انباشته گشته اند و شامل میان لایه های ریزدانه با تراکم پذیری بالا می باشند، باعث ایجاد فرونشست می شود (شمشکی و همکاران، ۱۳۸٤). در ایران نیز به دلیل برداشت و مصرف بی رویه آب در فعالیتهای کشاورزی و صنعتی، این پدیده به همراه پیامدهای زیست محیطی آن در بسیاری از دشتها به پدیده ای مشکل ساز تبدیل شده است. از بین رفتن

[1] Subsidence
[2] Unconsolidated

سفره های آب زیرزمینی، کاهش میزان تخلخل خاک در حفظ و نگهداری نزولات آسمانی، ایجاد اختلال در سازه های مختلف مانند ساختمانها، پلها و خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب از اثرات زیانبار این پدیده محسوب می شوند.

۱-۱- کلیات

طبق تعریف ارائه شده توسط یونسکو این پدیده عبارت است از فرو ریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ رخ می دهد. به طور معمول این اصطلاح به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می تواند با بردار افقی همراه باشد، گفته می شود (Poland, 1984). پدیده یاد شده، زمین لغزه ها [3] را بدلیل اینکه حرکت آنها دارای بردار افقی قابل توجهی می باشد و همچنین نشست[4] درخاکهای دستی را شامل نمی شود (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴). فرو نشست می تواند در اثر پدیده های طبیعی زمین شناختی مانند انحلال، آب شدگی یخها و تراکم نهشته ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیتهای انسانی نظیر معدنکاری، برداشت آبهای زیرزمینی و یا نفت ایجاد شود.رویداد فرونشست در اثر برداشت آب زیر زمینی بطور معمول در دو محیط و سازوکار مختلف امکان پذیر است:

الف) سنگهای انحلال پذیر (سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک) که توسط نهشته های تحکیم نیافته مدفون شده اند، یا فرو چاله های کهن پر شده با نهشته های تحکیم نیافته که فشار هیدرواستاتیکی رو به بالا ی آب زیر زمینی در نگهداری آنها مؤثر است.

ب) نهشته های جوان تحکیم نیافته و رسوبات آواری نیمه تحکیم یافته با تخلخل بالا که در زیر نهشته های آبرفتی، دریاچه ای و یا نهشته های دریایی کم عمق واقع شده اند. به طور معمول چنین محیطهایی شامل سفره های بسته یا نیمه بسته ماسه ای یا شنی (با تراوایی بالا و تراکم پذیری پایین) همراه با میان لایه های رسی (با تراوایی قایم کم و تراکم پذیری بالا) است که تحت تنشهای بکر[5] می باشند.

---

[3] Landslides
[4] Settlement
[5] Virgin stress

در اثربرداشت آب زیرزمینی فشار مربوط به سیال کم شده و در نتیجه فشار بین ذره ای که از آن به استرس یا تنش مؤثر یاد می شود افزایش می یابد. افزایش استرس مؤثر منجر به تراکم میان لایه های تراکم پذیری که درسفره آب زیرزمینی قرار دارند می گردند. این میان لایه ها عمدتا از جنس رسوبات ریزدانه ای مانند رس و سیلت می باشد. تراکم این رسوبات منجر به رخداد پدیده فرونشست در سطح زمین می گردد.

قديمي ترين فرونشست شناخته شده بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط يونسكو در آلاباماي ايالت متحده در سال ۱۹۰۰ ميلادي بوقوع پيوسته است. این پدیده به همراه ایجاد شکاف در سطح زمین همچنین در مناطقی از ایتالیا ، ژاپن ، انگلستان ، چین ، تایلند ، مکزیک و نقاط دیگری از جهان که با اضافه برداشت از مخازن آبهای زیرزمینی یا چاههای نفت مواجه اند مشاهده گردیده است. در کشور ایران هم به دلیل تحمل خشکسالیهای فراوان به ویژه در شرق و مرکزآن، استفاده های بی رویه از سفره های آبهای زیر زمینی افزایش یافته و پدیده فرونشست در بسیاری از دشتهای ایران قابل مشاهده می باشد. از آن جمله می توان به دشتهای رفسنجان، مشهد، کرمان، کبودر آهنگ، فامتین، ورامین، تهران و نیشابور اشاره کرد که در آنها فرونشست با نرخ بسیاربالایی در حال رویداد است.

۱-۲- طرح مسأله

به منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش فرونشست بیش از پیش در کشور احساس می شود. اولین گام در پایش فرونشست اندازه گیری مقدار جابجایی ناشی از آن در سطح زمین است. با علم به میزان نرخ فرونشست و همچنین پهنه و گستره مناطق تحت تأثیر، نه تنها قادر خواهیم بود میزان پیشرفت این پدیده را در یک منطقه شناسایی کنیم و از پیشرفت بیشتر آن جلوگیری نماییم، بلکه می توانیم اطلاعات با ارزشی از ویژگیهای زمین شناسی و آبزمین شناسی سفره آب زیرزمینی بدست آوریم. مسأله اصلی دراین پایان نامه اندازه گیری میزان جابجایی ناشی از فرونشست می باشد. در این راستا، استفاده از تکنیکهای سنجش از دور که توانایی

فراهم نمودن مشاهدات گسترده و منظم را از سطح زمین دارند، می تواند کمک شایانی در امر اندازه گیری جابجایی ناشی از پدیده فرونشست باشد.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

سفره های آب زیر زمینی به عنوان یکی از منابع طبیعی پر اهمیت درهر کشورمحسوب می شوند. استفاده بی رویه از این ذخیره طبیعی علاوه بر آنکه باعث کاهش این گنجینه گرانبها می شود، باعث ایجاد پدیده فرونشست و ایجاد خطرات زیانبار آن نیزمی گردد. این پدیده به بسیاری از سازه ها و زیر ساختارها در مناطق شهری و حومه آن مثل ساختمانها، خیابانها، بزرگراهها، پلها وخطوط انتقال نیرو آسیب های جبران ناپذیری می رساند و با کاهش تخلخل خاکهای حاصلخیز کشاورزی باعث تخریب آنها می شود. علاوه بر آن با رخداد این پدیده ناهنجاریهای بسیاری در محیط زیست ایجاد می گردد که از آن جمله می توان به تغییر درتوپوگرافی و خصوصیات هیدرولوژیکی یک منطقه، افزایش درجه سیل خیزی با کاهش درجه نفوذپذیری خاک و تغییر در وضعیت زمین شناختی از قبیل جهت و سرعت جریانهای آب زیرزمینی اشاره نمود.

عملیات ترازیابی به منظور اندازه گیری جابجاییهای سطح زمین در امتداد قائم از دیرباز توسط سازمان نقشه برداری کشور انجام می گرفته است (آمیغ پی و همکاران، ۲۰۰۶). در راستای این اندازه گیریها پدیده فرونشست در برخی از دشتهای ایران از جمله دشت تهران شناسایی و گزارش داده شدند. لیکن این اندازه گیریها به دلیل صرف وقت و هزینه بسیاربالا برای پایش فرونشست کافی به نظر نمی رسند. همچنین شبکه سیستم مکان یابی جهانی[6] با عنوان شبکه دائم ژئودینامیک که در سال ۲۰۰۴ در ایران دایر شد و تنها شامل ۱۲۰ ایستگاه در سراسر کشور می باشد، نیز نمی تواند پاسخگوی نیازها در مطالعه این پدیده باشد.

[6] Global Positioning System (GPS)

با ورود ماهواره های راداری از دهه ۱۹۹۰، تکنیک تداخل سنجی راداری ماهواره-ای[7] به عنوان ابزاری مفید در پایش جابجاییهای سطح زمین ناشی از پدیده های مختلف از جمله فرونشست شناخته شد. دقت مشاهدات و اندازه گیری ها نیز در این روش قابل مقایسه با دقت اندازه گیریهای سیستم مکان یابی جهانی و ترازیابی می باشد. همچنین این روش از نقطه نظر صرفه جویی در هزینه و زمان در مقایسه با روشهای دیگر از قابلیت بسیار بالایی برخورداراست. از طرفی فراوانی مکانی (هر ۲۰ متر یک مشاهده) در پهنه ای با ابعاد ۱۰۰× ۱۰۰ کیلومترو همچنین فراوانی نسبتا خوب زمانی (مثلا هر ۳۵ روز ۱ مشاهده) مشاهدات رادار در مقایسه با ترازیابی و سیستم مکان یابی جهانی در سالهای اخیر دیدگاهی گسترده را برای پایش تغییرات سطح زمین فراهم کرده است. نسل جدید ماهواره های راداری مانند Radarsat-2 و TerraSAR-X قادر به اخذ داده با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر نیزخواهند بود که امکان پایش تغییر شکلهای محلی کوچک حتی در مناطقی که همبستگی[8] بین تصاویر به سرعت از بین می رود را فراهم می کنند.

علاوه بر فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، استفاده از این روش باعث صرفه جویی در زمان و هزینه می گردد. امروزه استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری سنتی[9] به جای ترازیابی و سیستم مکان یابی جهانی در اندازه گیریهای سطح زمین بسیار متداول است. در ایران نیز از چند سال اخیر از این تکنیک در پایش تغییر شکلهای مختلف سطح زمین استفاده شده است. اندازه گیری مقدار فرونشست در بسیاری از دشتهای ایران از جمله دشت مشهد، رفسنجان، هشتگرد، ورامین و نیشابور به کمک این روش انجام پذیرفته است.

لیکن این روش به موازات تواناییهای بالا دارای محدودیتهایی است که استفاده از آن را در برخی موارد ناممکن می سازد. ویژگیهای خاص برخی مناطق از نقطه نظر مقدار نرخ جابجایی و نیز تغییر سریع سیمای ظاهری باعث می شود تا نتوان از تواناییهای این تکنیک در اندازه گیری مقدار جابجایی به طور کامل بهره برد. به عنوان مثال چنانچه منطقه ای که تحت تأثیر پدیده تغییر شکل قرار گرفته از گیاه پوشیده شده باشد، تغییرسریع در شکل

[7] SAR Interferometry (InSAR)
[8] Correlation
[9] Conventioanl InSAR

ظاهری و ویژگیهای پراکنشی سطح زمین، توانایی تکنیک تداخل سنجی راداری را محدود می سازد. در سالهای اخیر روشهای خاصی براساس تکنیک تداخل سنجی راداری ارائه شده اند که تنها از نقاطی که در طول زمان دارای ویژگیهای بازپراکنشی [10] نسبتا ثابتی هستند باعنوان پراکنش کننده های دائمی[11] برای پایش جابجایی استفاده می کنند (Crosetto *et. al.* , 2003 ؛Adam *et. al.* , 2003؛ Ferretti *et. al.* , 2000, 2001; Werner *et. al.* , 2003 ؛ Sandwell and Lyons, 2003 ؛Kampes, 2005 ؛Hooper *et. al.* , 2004). گرچه ارائه این روشها گامی مؤثر در کاهش محدودیتهای تکنیک تداخل سنجی راداری بوده اند، لیکن هر یک از روشهای پردازش پراکنش کننده های دائمی دارای معایبی است که استفاده بهینه از آنها را در شرایط مختلف با مشکل مواجه می سازد. یکی از شرایطی که استفاده از این روشها را محدود می کند وجود نرخ بالای جابجایی در مناطق غیر شهری که عاری از پراکنش کننده های دائمی با میزان بازپراکنش بسیارقوی به سمت رادار هستند می باشد. این شرایط در اکثر دشتهای ایران که به فعالیتهای کشاورزی اختصاص دارند، برقراراست. زیرا به دلیل برداشت بی رویه و بی وقفه آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی نرخ جابجایی در این دشتها بسیار بالاست. از طرفی این دشتها در مناطق حومه شهر و دور از سازه های ساخت بشر که به عنوان پراکنش کننده های دائمی هستند، واقع شده اند. لذا هیچیک از روشهای موجود به طور کامل پاسخگوی نیاز ما در پایش فرونشست در این مناطق نمی باشد. با در نظر گرفتن ضرورت بررسی و مطالعه فرونشست در دشتهای ایران با شرایط حاکم، ارائه روشی نوین در پایش فرونشست در قالب پایان نامه حاضرضروری به نظر می رسید.

۱-۴- اهداف تحقیق و روشهای پیشنهادی

به دلیل پیشرفتهای موجود در تکنیک تداخل سنجی راداری، امروزه کاربردهای این تکنیک به سمت مناطقی سوق داده شده است که ویژگیهای پراکنشی آنها در بازه زمانی کوتاهی دچار تغییرات قابل ملاحظه ای می گردد، به طوریکه دو تصویررادار برداشت شده

[10] Back-scatter
[11] Persistent scatterer (PS)

از یک منطقه دچار عدم همبستگی می شوند. نرخ بالای جابجایی (بیش از ۱۵ سانتیمتر در سال) و نیز تغییر سریع سیمای ظاهری سطح زمین که منجر به کاهش همبستگی بین تصاویررادراری می گردد، از خصوصیات بارزپدیده فرونشست در بیشتر مناطق ایران است. همچنین در بسیاری از موارد، مجموعه داده راداری مناسب با طول خطوط مبنای زمانی و مکانی کوتاه که از شروط لازم در پردازشهای تداخل سنجی راداری سنتی محسوب می گردند، در اختیار نمی باشد. بنابراین روش تداخل سنجی راداری سنتی در پایش فرونشست در مناطقی که دچار عدم همبستگی زمانی هستند و یا مجموعه مناسبی از داده های راداری در اختیار نباشد، روشی مناسب نیست. کاملترین مجموعه داده راداری در ایران متعلق به ماهواره ENVISAT با قدرت تفکیک زمانی ۳۵ روز می باشد. لیکن در بسیاری از مواقع به دلیل عدم تصویربرداری مرتب، فواصل زمانی داده های راداری از این مقدار بیشتر است. در بازه های زمانی بلند تنها شهرها در اینترفروگرامها دارای همبستگی بالا هستند و حومه شهرها که عمدتا از زمنیهای کشاورزی پوشیده شده اند دچار عدم همبستگی زمانی می شوند. روش پراکنش کننده های دائمی که اخیرا توسط محققین ارائه شده است می تواند در مناطقی که دچار عدم همبستگی زمانی هستند و نیز داده های راداری از نقطه نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی دارای توزیع نامناسبند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به کمک این روش می توان دقت اندازه گیری سیگنال جابجایی را به کمک برآورد مؤلفه های مختلف خطا از جمله خطای اتمسفری و توپوگرافی بهبود بخشید. لیکن در تمام روشهای موجود به منظورشناسایی پراکنش کننده های دائمی و بازیابی فاز مدلی را برای رفتار جابجایی در زمان در نظر می گیرند. همچنین روشهایی نیز که از چنین مدل فرضی در پردازشها استفاده نمی کنند قادر به انجام صحیح عمل بازیابی فاز در مواقعی که نرخ جابجایی بالاست، نخواهند بود. محدودیتهای اصلی در الگوریتهای موجود در تکنیک تداخل سنجی راداری همراه با ویژگیهای خاص پدیده فرونشست در بیشتر دشتهای ایران و نیز در بسیاری مواقع عدم وجود داده های راداری مناسب، سؤال زیررا که اهداف اصلی پایان نامه حاضر پیرامون آن شکل می گیرد، مطرح می کند:

" چگونه می توان به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری و مجموعه داده های راداری موجود، پدیده فرونشست را در یک منطقه مورد مطالعه قرار داد ؟"

مطالعه فرونشست از دو بخش شامل اندازه گیری مقدار فرونشست و نیز برقراری ارتباط آن با ویژگیهای سفره آب زیرزمینی تشکیل شده است. با توجه به دانش ما از پتانسیلها و محدودیتهای تکنیکهای تداخل سنجی راداری سنتی و الگوریتمهای موجود در پردازش پراکنش کننده های دائمی و همچنین شرایط پدیده فرونشست در بیشتر مناطق ایران، عبارت بالا را می توان به چندین سؤال به صورت زیر تجزیه کرد:

سؤال ۱- در تکنیک تداخل سنجی راداری سنتی چگونه می توان به بهترین برآورد از مقدار جابجایی سطح زمین ناشی از فرونشست دست یافت؟

سؤال ۲- در تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده های دائمی چگونه می توان به بهترین برآورد از مقدار جابجایی سطح زمین ناشی از فرونشست دست یافت؟

سؤال ۳- چگونه می توان از نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی به منظور شناسایی پدیده فرونشست و ارتباط آن با ویژگیهای سفره آب زیرزمینی استفاده کنیم؟

اهداف پایان نامه حاضر که سعی در پاسخگویی به مشکلات بالا را دارند به صورت زیر خلاصه می گردد:

- ارائه الگوریتمی به منظور بهبود نتایج حاصل از روش تداخل سنجی راداری سنتی Small BAseline Subset (SBAS)

روش SBAS از جمله روشهای مورد استفاده در تکنیک تداخل سنجی راداری سنتی است. دقت نتایج حاصله از این روش تحت تأثیر خطاهای مختلف از جمله خطای اتمسفری و نیز توپوگرافی قرار دارد. در این پایان نامه روشی ارائه شده است که با تشکیل اینترفروگرامهای مجازی سعی در بهبود نتایج حاصل از روش SBAS به کمک برآورد و حذف اثرات توپوگرافی و اتمسفری دارد. همچنین به کمک این روش مؤلفه خطی جابجایی که در ارتباط با رفتار فرونشست در بلند مدت می باشد (رژیم پایدار) و نیز مؤلفه غیر خطی که متعلق به اثرات فصلی است (رژیم ناپایدار) قابل تفکیک از هم می

باشند. بنابراین می توان عکس العمل سفره آب زیر زمینی را نسبت به تخلیه و تغذیه سفره مورد بررسی قرار داد. این روش در مطالعه فرونشست در دشت نیشابور مورد استفاده قرار گرفت.

- ارائه روشهای نوین بر مبنای پراکنش کننده های دائمی به منظور پایش پدیده فرونشست با نرخ بالا

اساسی ترین مشکل در استفاده از روش پراکنش کننده های دائمی نرخ بالای جابجایی ونیز نامعلوم بودن رفتار جابجایی در زمان است، در این مرحله سه روش متفاوت برای برآورد مقدار این سیگنال به صورت زیر ارائه شد:

- استراتژی پیشنهادی اول: کاهش نرخ جابجایی به کمک مدل جابجایی

هدف اصلی دراین روش ایجاد مدلی تقریبی از جابجایی به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری سنتی و مفهوم ماتریس همبستگی[12] است. به کمک مدل ایجاد شده نرخ ثابت جابجایی به منظور برقراری شرط نمونه برداری نایکوییست [13]از فاز پراکنش کننده های دائمی کسرشده وسپس عملیات بازیابی فاز انجام می پذیرد. صحت ودقت نتایج حاصله به همراه عملکرد روش پیشنهادی مذکور و حساسیت آن به سیگنال اتمسفر به عنوان مهمترین منبع ایجاد خطا در نتایج تداخل سنجی راداری مورد ارزیابی قرار گرفت. ازاین روش در اندازه گیری سیگنال فرونشست در دشت تهران به کمک دو مجموعه داده گذر بالاو پایین استفاده شد. در نهایت نتایج حاصل از دو مجموعه داده به منظور تجزیه مؤلفه جابجایی درراستای خط دید رادار به مؤلفه های افقی و قائم تلفیق شد.

- استراتژی پیشنهادی دوم- استفاده از مدل مؤلفه خطی در اصلاح تابع هزینه

در این روش با استفاده از مدل مؤلفه خطی جابجایی که به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری سنتی و ماتریس همبستگی ایجاد شده، تابع هزینه مورد استفاده در عملیات بازیابی فاز اصلاح گردید. از این روش نیز در اندازه گیری مقدار فرونشست در

[12] Coherence Matrix
[13] Nyquist sampling

دشت تهران مورد استفاده قرار گرفت. الگوی مکانی فرونشست بـه کمـک ایـن روش بـه درستی استخراج شد. لیکن به دلایل مشخصی که به آن اشاره خواهد شد (رجـوع شـود به فصل چهارم، استراتژی پیشنهادی دوم: استفاده از مدل مؤلفه خطی در اصـلاح تـابع هزینه)، مقدار نرخ برآورد شده فرونشست کمتـر از مقـدار قابـل انتظـار بـود. درنهایـت راهکارهایی به منظور بهبود این روش ارائه شد.

- استراتژی پیشنهادی سوم- برآورد نرخ جابجایی از داده های اولیه فاز

به کمک این روش نرخ جابجایی با استفاده از داده های اولیه فـاز مربـوط بـه هـر یک از پراکنش کننده های دائمی که بین مقادیر π و $-\pi$ می باشد، برآورد و در اصلاح تابع هزینه بکار رفت. این روش نیز همانند استراتژی پیشنهادی دوم موفق به اسـتخراج صحیح الگوی مکانی فرونشست شد، لـیکن نـرخ جابجـایی کمتـر از مقـدار قابـل انتظـار برآورد شد که دلایل آن ارائه شد (رجوع شود به فـصل چهـارم، اسـتراتژی پیـشنهادی سوم: برآورد نرخ جابجایی از داده های اولیه فاز).

از میان روشهای ارائه شده روش پیشنهادی اول نرخ فرونشست رابه طور کـاملا صحیح به همراه الگوی مکانی درست در تمام پراکنش کننده های دائمـی بـرآورد نمـود. لـیکن اسـتراتژی پیـشنهادی دوم و سـوم از آن جهـت کـه گـامی مـؤثر در بهبـود الگوریتمهای موجود در پردازش پراکنش کننده های دائمـی هـستند در ایـن پایـان نامـه ارائه شدند. لازم به ذکر است تحقیقـات بـرروی دو روش پیـشنهادی بـه منظـور بهبـود عملکرد آنها توسط دانشگاههای Stanfordو Delft همچنان ادامه دارد.

- روش پیشنهادی در مدلسازی فرونشست بر پایه شبکه های عصبی

در این مرحله روشی برای مدلسازی فرونشست برپایه شبکه هـای عـصبی ارائـه شد. در روش مذکور عوامل مؤثر در پدیده فرونشست به عنوان المانهـای ورودی مـدل و مقدار نرخ فرونشست به عنوان خروجی آن مدنظر قـرار گرفـت. از مدلـسازی بـا ایـن روش دو هدف عمده دنبال می شود:

- تعیین نرخ فرونشست در نقاط غیر از پراکنش کننده دائمی که قادر به انـدازه گیری نرخ جابجایی در آنها به کمک روش پراکنش کننده های دائمی نبودیم.

- انجام تحلیل حساسیت به کمک نتایج حاصل از مدلسازی به کمک شبکه عصبی برای تشخیص مهمترین فاکتورهایی که در ایجاد پدیده فرونشست مؤثر می باشند. بدین ترتیب قادر خواهیم بودیم ارتباط بین پدیده فرونشست و ویژگیهای سفره آب زیرزمینی را شناسایی کنیم.

روش مذکور در مدلسازی فرونشست دشت تهران مورد استفاده قرار گرفت.

۱-۵- ساختار پایان نامه

فصل اول به ارائه کلیاتی در مورد فرونشست، ضرورت انجام تحقیق و اهداف اصلی این پایان نامه به همراه روشهای پیشنهادی برای پاسخگویی به پرسشهای مطرح شده در این فصل اختصاص دارد.

در فصل دوم تحقیقات انجام گرفته در گذشته درباره مطالعه و بررسی جابجاییهای سطح زمین با تأکید بر پدیده فرونشست به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

فصل سوم این پایان نامه به معرفی روشهای پایش فرونشست به کمک تحلیل سری زمانی حاصل از تداخل سنجی راداری اختصاص دارد. در این فصل روش پراکنش کننده های دائمی معرفی می گردد. اطلاعات تکمیلی در مورد مباحث تئوری این بخش در پیوستهای ۱ و۲ ارائه شده است.

در فصل چهارم روشهای پیشنهادی به منظور پایش فرونشست به همراه مزایا و معایب هر یک معرفی می گردد.

در فصل پنجم ابتدا روشهای موجوددر مدلسازی فرونشست و مزایا و معایب هر یک به طور مختصربیان شده و سپس روش پیشنهادی در مدلسازی فرونشست برمبنای شبکه عصبی به همراه اهداف مورد نظر در این روش معرفی می شود.

نتایج حاصل از اعمال روش SBAS برروی داده های نیشابورو نیز الگوریتم پیشنهادی به منظور بهبود عملکرد آن در فصل ششم ارائه می گردد. همچنین دراین فصل نتایج حاصل از تلفیق نتایج تداخل سنجی راداری با اطلاعات آب در چاههای پیزومتری در

منطقه فرونشست ارائه گردید و پدیده فرونشست در نقاط مختلف با توجه به نتایج بدست آمده مورد تحلیل قرار می گیرد.

در فصل هفتم نتایج برگرفته از اعمال روشهای پیشنهادی برمبنای پراکنش کننده های دائمی برروی داده های راداری دشت تهران ارائه می گردد. در این فصل مدل ایجاد شده برای فرونشست با استفاده از روش پیشنهادی به همراه نتایج تحلیل حساسیت نیز معرفی می شود. سپس نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری با اطلاعات آب چاههای پیزومتری در منطقه مقایسه و پدیده فرونشست در هر چاه به کمک اطلاعات پروفیل خاک در آن چاه تفسیر می گردد.

فصل هشتم به جمع بندی نتایج و ارزیابی عملکرد روشهای پیشنهادی به اختصار می پردازد و راهکارهایی در بهبود عملکرد روش پراکنش کننده های دائمی به عنوان راهبردهای پیشنهادی آتی ارائه می گردند.

۲ مروری برتحقیقات انجام گرفته

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه مطالعه برروی پدیده فرونشست و نیزاستفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری در اندازه گیری جابجایی سطح زمین صورت پذیرفته است. دراین فصل تحقیقات انجام گرفته به همراه اهداف مورد نظرو روشهای به کار رفته در هر یک ارائه می شوند و مورد ارزیابی قرار می گیرند. این تحقیقات به دو گروه عمده زیر تقسیم می گردند:

- تاریخچه مطالعات فرونشست ناشی ازبرداشت آب زیرزمینی
- تاریخچه تکنیک تداخل سنجی راداری در اندازه گیری جابجایی سطح زمین

در ابتدا سابقه تحقیقات انجام گرفته در مطالعه فرونشست در ایران و جهان به طور خلاصه بیان می گردد. سپس به تاریخچه تکنیک تداخل سنجی راداری و کاربرد آن در اندازه گیری جابجایی سطح زمین به ویژه پدیده فرونشست پرداخته می شود. از آنجا که این تکنیک به منظور اندازه گیری جابجایی در عرصه عظیمی از کاربردها قابل استفاده است و معمولا روشها و الگوریتهای موجود مستقل از نوع پدیده مورد مطالعه می باشند، لذا در اینجا تنها به بررسی پدیده فرونشست اکتفا ننموده و کاربرد این تکنیک را در پدیده های دیگر از جمله زلزله، آتشفشان و حرکت یخچالها نیز مورد بررسی قرار دادیم.

در ارائه تحقیقات انجام گرفته سعی گردید سیر تکاملی تکنیک تداخل سنجی راداری مد نظر قرار گیرد. بدین ترتیب قادر خواهیم بود کارایی این تکنیک را به همراه محدودیتهای مورد نظر در هر بازه زمانی از سیر تکاملی آن و پیشرفتهای حاصله به منظور مقابله با محدودیتهای موجود مورد بررسی قرار دهیم.

۲-۱- تاریخچه مطالعات فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی

قديمي ترين فرونشست شناخته شده بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط يونسكو در ايالت آلاباما ي متحده در سال ۱۹۰۰ ميلادي بوقوع پيوسته است. اين موسسه اولين برنامه جهاني خود را براي شناخت چرخه هاي آبشناختي باعنوان "دهه جهاني آبشناسي" در سال

۱۹۶۵ آغاز نمود و در سالهاي بعد به دليل گستردگی رخداد فرونشست در جهان مطالعه برروی این پدیده به يكي از موضوعهاي اصلي آن تبديل گشت. این سازمان گروه کاری ویژه ای متشکل از تعدادی از برجسته ترین پژوهشگران سراسر جهان در این زمینه را تشکیل داد. گروه مذکور، نخستین کتاب راهنما در زمینه فرونشست را در سال ۱۹۸۴ منتشر کرد (Poland, 1984). گروه فرونشست در یونسکو مطالعات تفضيلي خود را بر روي ۴۲ فرونشست در ۱۵کشور جهان انجام دادند. همچنین از سوی یونسکو تاکنون چند سمپوزیوم بین المللی در ارتباط با فرونشست برپا شده که نخستین آنها در سال ۱۹۶۹ در ژاپن برگزار گردید. پدیده فرونشست و عوارض ناشی ازآن در سمپوزیومهای بین المللی دیگری نیز که در حیطه آبهای زیرزمینی ، ژئوتکنیک ، زمین شناسی و محیط زیست در دهه های اخیر در جهان برگزار شده همواره یکی از موضوعات تحقیقی پژوهشگران بوده است . مجموعه مقالات ارائه شده در سمپوزیومهای بین المللی « فرونشست زمین » حاکی از آن است که نخستین کارهای پژوهشی در ارتباط با فرونشست ، بیشتر به تشریح و توصیف پدیده و معرفی و شناخت آن اختصاص داشته و به تدریج ، عملیات آزمایشگاهی و صحرایی بخش مهمی از تحقیقات انجام شده در این زمینه را به خود اختصاص داده است. در کشورهای پیشرفته تاکنون مطالعات و تحقیقات گسترده ای در مورد پدیده فرونشست انجام پذیرفته است. به عنوان مثال درآمریکا، پدیده فرونشست و ترک خوردگی زمین در تمام نواحی مبتلا به آن، به طور کیفی و کمی مورد شناسایی قرار گرفته و ثبت شده است. همچنین اندازه گیری دقیق فرونشست در ایستگاههای مشخص تعبیه شده در نقاط مختلف نواحی تحت تأثیر فرونشست، طی سالهای متمادی به طور منظم صورت گرفته و مجموعه ای دقیق از اندازه گیریهای فرونشست فراهم شده است. از آن تاریخ تا به امروز بررسي هاي بيشتري در اين زمينه در كشور هاي پيشرفته به ويژه در ايالات متحده و ژاپن انجام شده كه نتيجه آن كنترل شديد مصرف آب و تغيير در الگوي مصرف و توقف فرونشست ها در بسياري از موارد بوده است. در اين بررسي ها از روشها وتكنيكهاي جديد مانند سيستمهاي مكان يابی جهانی ، ترازيابی و تداخل سنجی راداری براي مكان يابي فرونشستها به صورت گسترده اي استفاده شده است.

همچنین در ایران با توجه به مصرف بي رويه آب و داده هاي مربوط به پايين رفتن سطح آب زير زميني، تشخيص اينكه فرونشستها و پيامد هاي حاصل ازآن به پديده اي مشكل ساز تبديل گشته، كار دشواري نيست. بررسي هاي موردي در بخش هاي مختلف كشور نيز نمايانگر اين امر مي باشد. سازمان زمين شناسي كشور به عنوان مسئول در بررسي مخاطرات زمين شناختي كشور پيشگام در مطالعه اين پديده و خطرهاي وابسته به آن در كشور بوده است. از چند سال اخیر جابجاییهای سطح زمین ناشی از این پدیده در برخی از دشتهای ایران اندازه گیری شده است. از آن جمله می توان به دشت رفسنجان اشاره کرد که موسوی و همکارانش (۲۰۰۱) اقدام به ایجاد یک شبکه سیستم مکان یابی جهانی به منظور پایش فرونشست نمودند. همچنین نرخ فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی در دشت مشهد و هشتگرد نیز بااستفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری برآورد شد (Dehghani *et. al.* , 2009a, 2008). از آنجا که تکنیک تداخل سنجی راداری قابلیت خود رادر اندازه گیری میزان جابجایی سطح زمین به ویژه پدیده فرونشست به اثبات رسانده، در بخش بعد به تاریخچه استفاده از این تکنیک و کاربردهای مختلف آن اشاره می گردد.

۲-۲- تاریخچه کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری در اندازه گیری جابجایی سطح زمین

همانطور که پیشتر عنوان شد، با ورود ماهواره های راداری در دهه نود تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری مفید در اندازه گیری جابجایی سطح زمین با دقتی قابل مقایسه با دقت اندازه گیریهای ترازیابی دقیق و سیستم مکان یابی جهانی در اختیار محققین قرار گرفت. تداخل سنجی رادیویی پس از جنگ جهانی دوم پا به عرصه وجود گذاشت. در سالهای ۱۹۶۸ تا ۱۹۷۲ در تهیه نقشه ماه و دیگر سیارات از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد. (Evans and Hogfors, 1968; Rogers and Ingalls, 1969; Zisk, 1972; Shapiro *et. al.* , 1972). امروزه نیز این قبیل از کاربردها هنوزمتداول می باشد (Margot *et. al.* , 1999a, b). در سال ۱۹۷۱ نخستین آزمایشات در این زمینه به کمک

تکینک تداخل سنجی راداری هوایی به منظور تهیه نقشه توپوگرافی توسط سازمان نظامی آمریکا انجام گرفت و به کمک تصاویر اختلاف فاز اندازه گیری ارتفاع انجام پذیرفت (Graham, Graham اولین بار Henderson and Lewis, 1998).(Richman, 1982; 1974) با استفاده از دو آنتن و تداخل سنجی تجمعی کوهرنت [14]به همراه تکنیکهای پردازش نوری نتایج حاصل از این روش راارائه داد. تداخل سنجی راداری به کمک دو آنتن در دهه ۱۹۸۰ به همراه تکنیکهای پردازش رقومی و تداخل سنجی ضربی کوهرنت [15]تکامل یافت (Goldstein *et. al.* , 1985). اولین اینترفروگرام توسط Zebker و Goldstein تولید شد (Zebker and Goldstein, 1986) که در آن برای هر المانِ قدرت تفکیک دامنه های دوتصویررادراری در هم ضرب و فازها از یکدیگر کسر می شدند. اینترفروگرام حاصله ارائه دهندهٔ مدل ارتفاعی رقومی از یک منطقه با ابعاد ۱۰ در ۱۱ کیلومتر و با دقت ارتفاعی ۱۰ تا ۳۰ متر بود. در سال ۱۹۸۷، نشان داده شد که با نصب دو آنتن در امتداد جهت پرواز می توان حرکت یک پراکنش کننده را اندازه گیری کرد[16] (Goldstein and Zebker, 1987). کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری با داده های ماهواره ای با استفاده از روش تکرار مدار[17] که در آن ماهواره از یک منطقه در دو زمان مختلف تصویربرداری می کند، نخستین بار توسط Liو Goldstein در سال ۱۹۸۷ به کمک داده های Seasat and Li) Goldstein, 1987; Prati *et. al.* , 1990)، و نیز توسط Gabriel و Goldstein در سال ۱۹۸۸ و Goldstein و همکارانش در سال ۱۹۸۸ به کمک داده های شاتل SIR-B به تصویر کشیده شد. همچنین کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری با تکرارمدار با استفاده از داده های هوایی در سال ۱۹۹۳ (Gray and Farris-Manning, 1993) نشان داده شد.

برآورد توپوگرافی مهمترین مسأله در بدو ورود تکنیک تداخل سنجی راداری بود که منجر به تشکیل مدلهای ارتفاعی با دقت قابل مقایسه با روشهای نوری شد، با این تفاوت که به کمک سنجنده های راداری قابلیت تصویربرداری در تمام شرایط آب وهوایی وجود

[14] Coherent additive interferometry
[15] Coherent multiplicative interferometry
[16] Along-track interferometry
[17] Reapeat-Pass

داشت. به مرور کاربرد بسیار مهمتر این تکنیک در پایش تغییر شکل سطح زمین شکل گرفت. جابجایی نسبی پراکنش کننده ها درامتداد خط دید رادار[18] نسبت به یک نقطه مرجع در تصویر به صورت کسری از طول موج با دقتهای سانتیمتر تا میلیمتر برای طول موجهای L، C و X قابل اندازه گیری بود (Gabriel *et. al.* , 1989). لیکن از مشکلات عمده در کاربرد اندازه گیری جابجایی این بود که چنانچه طول خط مبنای مکانی بیشتر از صفر باشد، سیگنال مربوط به تغییر شکل با اطلاعات توپوگرافی آمیخته می گردد. راه حل مناسب برای این مشکل استفاده از تداخل سنجی تفاضلی [19]می باشد که در آن سیگنال توپوگرافی از یک اینترفروگرام توپوگرافی [20]و یا یک مدل ارتفاعی موجود گرفته شده و پس از کالیبره نمودن آن با اندازه های طول خط مبنای مکانی از اینترفروگرامی که حاوی اطلاعات جابجایی و توپوگرافی است کسر می گردد. بدین ترتیب اینترفروگرام تفاضلی که تنها شامل سیگنال جابجایی است حاصل می گردد (Gabriel *et. al.* , 1989). اولین بار تکنیک تداخل سنجی تفاضلی برای اندازه گیری میدان جابجایی ناشی از زلزله لندِرز [21]توسط Massonnet و همکارانش بکاررفت که در آن از یک مدل رقومی ارتفاعی موجود برای حذف اثر توپوگرافی استفاده شد (Massonnet *et. al.* , 1993). Zebker و همکارانش به منظور مطالعه همان پدیده از روش تداخل سنجی سه گذره استفاده کردند (Zebker *et. al.* , 1994). در این روش از دو تصویررادار با بازه زمانی کوتاه برای بازیابی سیگنال توپوگرافی استفاده شد. سپس اینترفروگرام دیگری به کمک دو تصویری که زلزله در فاصله زمانی اخذ آن دو رخ داده شده بود تولید گردید. این اینترفروگرام حاوی اطلاعات توپوگرافی و نیز سیگنال جابجایی بود. مقدار جابجایی با کسر اینترفروگرام اول از دوم حاصل شد. Massonnet و همکارانش در سال ۱۹۹۴نشان دادند که چنانچه یک منطقه خشک و عاری از پوشش گیاهی باشد، می توان از دو تصویررادار بابازه زمانی بلند

[18] Line-Of-Sight (LOS)
[19] Differential interferometry
[20] Topographic interferogram
[21] Landers

نیز برای تشکیل اینترفروگرام استفاده کرد، لیکن نشان دادند که نتایج می تواند تحت تأثیر سیگنالهای اتمسفرقرارگیرند.

با روی کارآمدن تکنیک تداخل سنجی تفاضلی و نیز پرتاب ماهواره های جدید (ERS-1، ERS-2، JERS-1، SIR-C/X-SAR، Radarsat-1، ENVISAT، ALOS، Radarsat-2 و TerraSAR-X) و در پی توجه جوامع علمی، این تکنیک در میان محققین جایگاه خاصی یافت. بدین ترتیب تحقیقات فراوانی در زمینه اندازه گیری میدانهای جابجایی ناشی از پدیده های مختلف در سطح زمین توسط محققین بسیاری انجام گرفت که در زیر به برخی از آنها با تأکید بر پدیده فرونشست اشاره می کنیم.

- اطلاعات تداخل سنجی راداری از سال ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۹ فرونشستی را در منطقه ای به وسعت بیش از ۵۰ کیلومتر مربع در کالیفرنیای غربی آشکار نمود که پیدایش آن همزمان با تاسیس نیروگاه ژئوترمال کوسو [۲۲]بود. در این پروژه از تکنیک تداخل سنجی راداری و داده های ماهواره های ERS1/2 جهت بررسی فرونشست استفاده شد. بیشینه نرخ فرونشست در منطقه به ۳,۵ سانتیمتر در سال و نرخ حجمی متوسط فرونشست به $۱۰^{۶}$ متر مکعب در سال می رسید. اینترفروگرام راداری الگوی پیچیده ای از تغییر شکل را با حداقل دو پیک نامنظم فرونشست در بخش شمالی و یک بالاآمدگی در قسمت جنوبی منطقه نشان می داد. هدف در این تحقیق مدلسازی فرونشستی بود که دراثر فعالیتهای نیروگاه ژئوترمال ایجادشده بود. به منظور مدلسازی فرونشت از منابع [۲۳]بیضوی گون کشیده واقع شده در عمق استفاده شد. برای مدلسازی و برآورد مشخصات منبع مورد نظر نیاز به مشاهدات جابجایی سطح زمین در اثر منبع تغییر شکل بود. در این تحقیق تکنیک تداخل سنجی راداری توانست به عنوان بهترین منبع ایجاد مشاهدات جابجایی با قدرت تفکیک مکانی بالا و دقت مطلوب مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه جهت انجام مدلسازی از نتایج تداخل سنجی راداری به عنوان مشاهده و توابع پایه مربوط به

[22] Coso
[23] Source

تغییر شکل ایجاد شده در اثر یک منبع بیضوی استفاده و به کمک الگوریتم غیر خطی کمینه کردن مربعات خطا پارامترهای مورد نیاز تخمین زده شد. آنالیز داد ه های پی در پی راداری آشکار نمود که گسترش و عمق منابع تغییر شکل با گذشت زمان افزایش می یابد. این افزایش، گسترش حجمی مخازن زیر سطحی را که تحت تاثیر بهره برداری ژئو ترمال قرار دارند منعکس می کرد (Failko *et. al.* , 2000). به دلیل افزایش پهنه فرونشست با گذشت زمان، در نظر گرفتن مدلی دینامیک به صورت تابعی از زمان الزامی به نظر می رسد. لیکن طبق اظهارات نویسنده مقاله با در نظر گرفتن برخی پارامترهای بیضوی ها به صورت تابعی از زمان مانند فشارمنجر به ایجاد اختلاف بیشتر بین اینترفروگرام واقعی و اینترفروگرام شبیه سازی شده در مدلسازی شد. دلیل این امر غیر یکسان بودن ذاتی عمل معکوس سازی و عدم اطمینان [24] در داده ها عنوان گردیده که مانع از تعیین تغییرات زمانی منابع به صورت دقیق می شود.

- به کمک نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری، Shamir و همکارانش به مدلسازی زلزله نویبا [25] که در سال ۱۹۹۵ و بزرگی ۷,۲ در مقیاس ریشتر رخ داد، اقدام نمودند (Shamir *et. al.* , 2003). داده های راداری مورد استفاده در این تحقیق متعلق به ماهواره های ERS-1/2 بود. از داده های ERS-1 و ERS-2 بابازه زمانی ۱ روز برای دستیابی به اندازه توپوگرافی و حذف آن از اینترفروگرام به منظور برآورد مقدار جابجایی ناشی از زلزله استفاده شد. سپس به کمک نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری و معکوس نمودن مدل الاستیک، پارامترهای گسل برآورد و سازو کار زلزله شناسایی شد. در این تحقیق از اینترفروگرام های تفاضلی که تحت تأثیر خطاهای اتمسفر و باقیمانده توپوگرافی می باشد، استفاده شد. وجود هر یک از این منابع خطا در عملیات مدلسازی می تواند در دقت نتایج حاصله تأثیر گذار باشد. در این گونه مطالعات که وجود خطا تأثیر قابل ملاحظه ای

[24] Uncertainty
[25] Nuweiba

بر نتیجه گیری نهایی دارد، برآورد و کاهش خطا از ضروری ترین مراحل کار به شمار می رود.

- بعد از رخداد زلزله های سال ۱۹۸۷ و ۱۹۹۴ در کالیفرنیا که گسلهای تراستی کور[۲۶] را آشکار نمودو تهدیدی بزرگ برای شهر لوس آنجلس به شمار می آمد، یک شبکه ثبت دائم اندازه گیریهای سیستم مکان یابی جهانی متشکل از ۲۵۰ ایستگاه جهت کنترل جابجایی های ناشی از گسلهای کوروسطحی ایجادشد. از روش تداخل سنجی راداری برای جداسازی حرکات تکتونیکی و تغییرشکل های غیرتکتونیکی در رابطه با استخراج آب زیرزمینی استفاده شد. در بررسی تغییرات فصلی، اینترفروگرامهای با فواصل زمانی ۷۰ روز، ۱۰۵ روز و ۱۷۵ روز استفاده شد. اینترفروگرامهای با فواصل زمانی ۷۰ و ۱۷۵ بالاآمدگی و دو اینترفروگرام دیگر با فاصله زمانی ۱۰۵ روز نماینگر رخداد فرونشست در منطقه بود. علت این بالاآمدگی و فرونشست، به ترتیب پر شدن ذخایر آب زیرزمینی در فصول بارندگی و نیزتغذیه آنها به طور مصنوعی وبهره برداری از این ذخایر در فصول کم بارش بود. مطالعات تغییرات سطح در بلند مدت نیز با استفاده از اینترفروگرامهای با فواصل زمانی ۲ و ۵ سال انجام گرفت که میزان نشست سطح زمین را در این بازه زمانی نشان داد. تغییرات بلند مدت سطح زمین ناشی از تغییر شکل غیر الاستیک لایه های زیر سطح می بود که با گذشت زمان قابل بازیابی نبوده اند. عقب نشینی سطح آب و عمل تزریق دوباره به زیر سطح نرخ بلندمدت فرونشست به مقدار ۱۲ میلیمتر در سال را به دنبال داشت. این تغییرات همراه با نوسانات فصلی به میزان ۵۵ میلیمتر در جهت قائم و ۷ میلیمتر در جهت افقی بود (Bawden *et. al.* , 2001). این نتایج با مشاهدات سیستم مکان یابی جهانی و نوسانات سطوح آب زیرزمینی مقایسه شدند. بیش از نیمی از ایستگاه های سیستم مکان یابی جهانی حرکات تکتونیکی و تغییرات غیرتکتونیکی در رابطه با استخراج آب زیرزمینی را نشان دادند. ایستگاههای سیستم مکان یابی جهانی واقع شده در حاشیه منطقه فرونشست

[26] Blind thrust faults