

# سنجش از دور ماهواره‌ای با اینترفرومتری راداری

تألیف

دکتر داود پوره

تقدیم به

پدر عزیزتر از جانم

و

روح مادر درگذشته‌ام



## فهرست مطالب

پیشگفتار.....	ذ
لغات و اصطلاحات.....	ط
<b>فصل اول - امواج الکترومغناطیسی.....</b>	<b>۱</b>
۱.۱ معادلات مکانی (غیرزمانی) ماکسول.....	۴
۲.۱ حرکت موج الکترومغناطیسی.....	۵
۳.۱ چگالی توان (Power density).....	۸
۴.۱ بردارهای پتانسیل.....	۱۰
۵.۱ حل معادله‌های پتانسیل.....	۱۲
۶.۱ تقریب مناطق دور.....	۱۲
۷.۱ پلاریزاسیون امواج الکترومغناطیسی.....	۱۳
۸.۱ بازتابنده‌های راداری (Radar Scatterers).....	۱۵
۱.۸.۱ معادلات بازتابنده امواج راداری.....	۱۵
۹.۱ رادار پالسی (Pulse radar).....	۱۷
۱۰.۱ فرکانس دوپلر (Doppler Frequency).....	۱۹
۱۱.۱ رزولوشن (Resolution).....	۲۰
۱۲.۱ معادله رادار (Radar equation).....	۲۱
۱۳.۱ طول موج‌های استفاده‌شده در دورسنجی.....	۲۵
۱۴.۱ قابلیت نفوذ رادار در محیط.....	۲۶
۱۵.۱ مرجع.....	۳۱
<b>فصل دوم - رادار با دهانه مصنوعی (Synthetic Aperture Radar (SAR).....</b>	<b>۳۳</b>
۱.۲ مقدمه.....	۳۳
۲.۲ چگونگی ایجاد دهانه مصنوعی در سیستم‌های راداری.....	۳۵
۳.۲ چگونگی کارکرد سیستم‌های راداری SAR.....	۳۷
۴.۲ تولید نقشه سطح زمین با روش‌های راداری SAR و RAR.....	۴۰

ح □ سنجش از دور ماهواره‌ای با اینترفرومتری راداری

۴۰	.....	۱.۴.۲	روش‌های راداری RAR (Real Aperture Radar)
۴۴	.....	۲.۴.۲	روش‌های ماهواره‌ای راداری SAR (Synthetic Aperture Radar)
۴۹	.....	۱.۲.۴.۲	رزولوشن در سیستم‌های راداری SAR
۵۲	.....	۲.۲.۴.۲	محاسبه کج‌بینی (squint angle) در روش راداری SAR
۵۵	.....	۳.۲.۴.۲	مثالی برای تصاویر راداری SAR و RAR
۵۶	.....	۵.۲	هندسه تصاویر راداری (Radar image geometry)
۵۶	.....	۱.۵.۲	Layover
۵۸	.....	۲.۵.۲	Foreshortening
۵۹	.....	۳.۵.۲	سایه (Shadow)
۵۹	.....	۶.۲	نویز Speckle
۶۲	.....	۷.۲	مرجع

۶۵ ..... **فصل سوم - تداخل‌سنجی Synthetic Aperture Radar (InSAR) Interferometric**

۶۵	.....	۱.۳	مقدمه
۶۵	.....	۲.۳	آزمایش دو شکاف یانگ (Young)
۶۸	.....	۳.۳	تداخل‌سنجی راداری (Radar Interferometry)
۷۳	.....	۴.۳	محاسبه تغییر شکل سطح زمین با روش تداخل‌سنجی راداری
۷۹	.....	۵.۳	روش‌های تصمیم‌گیری برای انجام پروژه InSAR
۸۰	.....	۶.۳	همدوسی (coherence) در مطالعات InSAR
۸۲	.....	۷.۳	Unwrapping فاز در تصاویر InSAR
۸۴	.....	۸.۳	چگونه خطاهای سیستم‌های راداری InSAR/SAR را کنترل کنیم؟
۸۵	.....	۱.	خطاهای اتمسفری و مداری
۸۵	.....	۲.	خطاهای تغییر ارتفاعی (Surface deformations)
۸۶	.....	۳.	خطاهای ارتفاعی (Topographic)
۸۶	.....	۴.	خطاهای نویز
۸۶	.....	۹.۳	مراحل تولید تداخل‌سنج در مطالعات راداری InSAR/SAR
۸۸	.....	۱۰.۳	مثال‌هایی از تولید تصاویر تداخل‌سنجی
۹۶	.....	۱۱.۳	مرجع

۹۷	فصل چهارم - روش سری‌های زمانی InSAR (InSAR time series)
۹۹	۱.۴ روش PSI در سری‌های زمانی InSAR
۱۰۲	۲.۴ روش انتخاب کاندیداهای بازتابنده دائم (Permanent Scatterer Candidates (PSCs))
۱۰۵	۳.۴ مدل‌های تابعی (functional models)
۱۰۷	۴.۴ حل معادلات به روش PSI
۱۰۸	۱.۴.۴ روش Functional ambiguity
۱۱۰	۲.۴.۴ روش Integer bootstrapping
۱۱۰	۳.۴.۴ روش Integer Least-Squares (ILS)
۱۱۲	۵.۴ مدل‌سازی ارتفاعی و تغییر شکل سطح زمین در روش PSI
۱۱۵	۶.۴ برنامه‌های کامپیوتری برای آنالیز InSAR و PSI
۱۱۸	۷.۴ محاسن و معایب روش PSI
۱۲۰	۸.۴ راستی‌آزمایی روش PSI (PSI validation)
۱۲۱	۹.۴ روش Small Baseline Subset (SBAS)
۱۲۵	۱۰.۴ مرجع
۱۲۷	فصل پنجم - مکزیکوسیتی، شهر فرورونده (Mexico City, a sinking city)
۱۲۹	۱.۵ مقدمه
۱۳۲	۲.۵ روش‌های استفاده‌شده (Methodologies)
۱۳۲	۱.۲.۵ ایستگاه‌های GPS
۱۳۶	۲.۲.۵ تداخل‌سنجی InSAR و PSI
۱۴۰	۳.۲.۵ طبقه‌بندی چگالی ساختمان‌ها (Building density classification)
۱۴۱	۳.۵ نتایج و بحث
۱۴۲	۱.۳.۵ GPS
۱۴۶	۲.۳.۵ InSAR و PSI
۱۵۰	۳.۳.۵ مقایسه دو روش ژئودتیکی GPS و InSAR
۱۵۱	۴.۳.۵ مقایسه دو روش ژئودتیکی GPS و مقادیر میانگین InSAR
۱۵۳	۴.۵ فرونشست منطقه مکزیکوسیتی و تخمین ریسک
۱۵۶	۵.۵ نتیجه‌گیری و خلاصه
۱۵۸	۶.۵ مرجع

۱۶۱	فصل ششم - مطالعه راداری سایت VLBI در Medicina
۱۶۱	۱.۶ مقدمه
۱۶۵	۲.۶ تداخل‌سنجی راداری و (Interferometric SAR and PSI) PSI
۱۶۸	۳.۶ ایستگاه‌های GPS نصب‌شده در منطقه
۱۷۲	۴.۶ نتایج داده‌های راداری در منطقه Medicina
۱۷۵	۱.۴.۶ سایت نجومی Medicina (MGO)
۱۸۰	۲.۴.۶ منطقه شهری Medicina
۱۸۴	۳.۴.۶ جنوب منطقه شهری Molonella
۱۸۶	۵.۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۸۹	۶.۶ قدردانی
۱۹۰	۷.۶ مراجع
۱۹۳	فصل هفتم - مانیتورینگ راه‌آهن و پل‌ها با داده‌های ماهواره‌ای راداری InSAR
۱۹۳	۱.۷ مقدمه
۱۹۴	۲.۷ منطقه مورد مطالعه
۱۹۵	۳.۷ داده‌های ماهواره‌های راداری CosmoSkyMed در منطقه مورد مطالعه
۱۹۶	۱.۳.۷ مدل‌سازی به روش اجزای محدود
۱۹۸	۲.۳.۷ آنالیز توزیع فضایی PS
۲۰۱	۳.۳.۷ مقایسه با آنالیز مدل‌سازی اجزای محدود
۲۰۳	۴.۷ نتیجه‌گیری
۲۰۴	۵.۷ مرجع
۲۰۵	فصل هشتم - نتیجه‌گیری

## پیشگفتار

### ۱. چرا سنجش از دور ماهواره‌ای؟

در دهه‌های گذشته، مانیتورینگ سطح زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز مثل راه‌ها، پل‌ها، راه‌آهن، ساختمان‌های شهری، برج‌ها، مترو و... توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده است. فکر مانیتورینگ سطح زمین از فاصله ۸۰۰ کیلومتری، بدون دستگاه‌های نصب‌شده در روی زمین و لمس سازه‌ها و سطح زمین، بسیار عجیب می‌نماید. این مانیتورینگ ممکن است هرگونه تغییر شکل در حدود میلی‌متر در روی زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز، مانیتورینگ گسل‌ها و مناطق شهری، تعیین کیفیت زمین و آب‌های سطحی و عمیق، مخاطرات زیست‌محیطی و... باشد. پیشرفت ممتد علم فیزیک، از حدود ۱۰۰ سال پیش و حتی زودتر، مانیتورینگ سطح زمین توسط ماهواره‌ها را ممکن ساخته است.

سیستم‌های راداری که به منظوره‌های متفاوتی مثل کاربردهای نظامی و غیرنظامی استفاده شده‌اند، تاریخچه‌ای طولانی دارند. از این سیستم‌ها برای مکان‌یابی (global positioning)، تصویربرداری (imaging)، سرعت‌سنج‌های پلیس، کارهای عمرانی، زمین‌شناسی، مخاطرات طبیعی و... استفاده می‌شود. مدل‌سازی‌های الکترومغناطیسی تداخل‌سنجی و پلاریزاسیون راداری همواره عامل بسیار کلیدی در سنجش از دور ماهواره‌ای، از زمان راه‌اندازی اولین ماهواره‌های تحقیقاتی بوده است.

در این کتاب، اصول اولیه ماهواره‌های راداری و کاربردهای آن را به‌طور جامع توضیح داده‌ایم. سیستم‌های ماهواره‌های راداری از روش‌های دورسنجی فعال (methods active remote sensing) هستند و در هر شرایط جوی، مستقل از حضور خورشید و در هر وقت از شبانه‌روز می‌توانند به جمع‌آوری تصاویر راداری بپردازند. همچنین این ماهواره‌ها از اتمسفر پیرامون زمین تأثیر چندانی نمی‌گیرند و پوشش ابری برای این نوع ماهواره‌ها مشکل زیادی تولید نخواهد کرد (مشکلی که در ماهواره‌های اپتیک یا passive معمولاً داریم؛ که با تکنیک‌های متنوعی به تصحیح داده‌ها پرداخته می‌شود).

یکی دیگر از توانایی‌های ماهواره‌های راداری استفاده از طول موج‌های بلندتر است که با این کار امواج الکترومغناطیسی در مناطق پر از گیاهان، برگ‌ها، مه، خاک و سنگ نفوذ خواهند کرد. همچنین در ماهواره‌های راداری می‌توان زوایای دید (look angle)، پلاریزاسیون سنسورها و مساحت مورد نیاز برای تصاویر راداری را از پیش تعیین یا طراحی کرد. ویژگی‌های کوتاه‌مدت و حتی روزانه ماهواره‌های راداری نیز این ماهواره‌ها را در ردیف بهترین سنسورهای موجود برای مطالعه سطح زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز قرار داده است. با ماهواره‌های راداری، توپوگرافی منطقه مدنظر با روش‌های اینترفرومتری

ر □ سنجش از دور ماهواره‌ای با اینترفرومتری راداری

(Radar interferometry) با صحت و دقت بسیار زیاد تعیین می‌شود. روش ماهواره‌های راداری در دو دهه اخیر، به‌خوبی نشان داده است که قابلیت مطالعه سطح زمین و به‌خصوص در مواردی مثل مانیتورینگ سطح دریا و یخ، کارهای معدنی، مانیتورینگ آلودگی‌های نفتی، مطالعات اقیانوس‌ها، مطالعات برف، مخاطرات طبیعی روی زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز مثل مترو، راه‌آهن، جاده‌ها، مناطق شهری، رانش سطح زمین، مانیتورینگ گسل‌ها و... را دارد.

حرکت رو به جلو و در مسیر مشخص (Trajectory) ماهواره‌های راداری، امکان رسیدن به رزولوشن‌های خیلی بالا (بعضاً زیر یک متر برای ماهواره‌های با موج راداری  $X$ ) با روش‌های پردازش سیگنالی و ایجاد آنتن ماهواره‌ای (به‌صورت مصنوعی) به طول چندین کیلومتر را می‌دهد. سیستم‌های راداری مثل دوربین معمولی کار می‌کنند و تنها تفاوت آنها، کارکرد سیستم‌های راداری در حوزه امواج رادار است. هر سیستم راداری دارای نوعی فرستنده (Transmitter)، Switch، آنتن (Antenna)، دریافت‌کننده (Recevier) و ثبت‌کننده (Data recorder) است. موج بازگشتی از اهداف تصویربرداری شده دیجیتالی شده (Conversion to digital number) و برای پردازش‌های بعدی ثبت (Record) می‌شود.

استفاده از ماهواره‌های تحقیقاتی/کاربردی راداری برای مانیتورینگ تغییر شکل‌های موجود در سطح زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز، به روش تداخل‌سنجی راداری که اختصاراً InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) نامیده می‌شود، در این کتاب با جزئیات بیشتر بررسی شده است.

سری‌های زمانی (time series) تداخل‌سنجی راداری مانند PSI (Permanent Scatterer Interferometry) و SBAS (Small Baseline Subset)، در دو دهه اخیر مورد علاقه محققان و دانشمندان ماهواره‌های راداری بوده است. این روش‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که خصوصیات زمانی تغییرات سطح زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز را از تعداد زیادی از تصاویر ماهواره‌ای راداری به دست آورد. این روش به روش Virtual GPS نیز مشهور است و بعضاً با توجه به پوشش گسترده ماهواره‌های راداری سطح زمین، علی‌رغم صحت و دقت کمتری که از GPS دارند، به این روش ترجیح داده می‌شوند (مخصوصاً در مناطقی که دسترسی به آنها آسان نیست یا هزینه سنگینی دارند). این تکنیک‌ها همچنین قادر به غلبه بر محدودیت‌های روش‌های معمولی InSAR نیز است که بعضاً از نبود هم‌دوسی (coherence) مناسب رنج می‌برند. در این کتاب، این روش‌ها نیز با مثال‌های گوناگون شرح داده شده و جزئیات تکنیک‌های استفاده‌شده، با دقت فراوان ارائه شده است.

یکی از اهداف اصلی این کتاب تشریح دقیق روش‌های نوین تداخل‌سنجی راداری، سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری و کاربردهای آن است.



## ۲. این کتاب برای چه افرادی نوشته شده است؟

در این کتاب به طور مفصل دربارهٔ اصول اولیهٔ الکترومغناطیس، رادار و داده‌های ماهواره‌های راداری بحث و تحقیق کرده‌ایم. این کتاب برای دانشمندان، دانشجویان و محققان طیف وسیعی از رشته‌های دانشگاهی و کاربردی/عملی تهیه و تدوین شده است. محققان رشته‌های مهندسی نقشه‌برداری می‌توانند از کاربردهای ماهواره‌های راداری برای مساحی تغییر شکل سطح زمین، سازه‌های مهندسی‌ساز، مقایسه با GPS، classification، ترکیب با GIS و... استفاده کنند. محققان رشته‌های جغرافیا می‌توانند از داده‌های راداری برای classification مناطق شهری، فرونشست‌های مناطق شهری، تغییر شکل مترو، جاده‌ها، پل‌ها، راه‌آهن، تعیین آب سطحی و عمیق کشاورزی فایده ببرند. مهندسان عمران می‌توانند از داده‌های راداری برای مانیتورینگ سازه‌های مهندسی‌ساز، کیفیت خاک و سنگ، رانش زمین، سیل، زلزله و دیگر مخاطرات زمینی استفاده لازم را ببرند. محققان زمین‌شناسی و مهندسان معدن می‌توانند از داده‌های راداری برای تغییر شکل (deformation) معادن، معادن روباز، open pit، تونل‌ها، مانیتورینگ گسل‌ها، تکتونیک، آتشفشان‌ها، توپوگرافی و... استفاده کنند.

همچنین محققان رشته‌های محیط زیست می‌توانند از داده‌های ماهواره‌های راداری برای آلودگی‌های نفتی، نشت خطوط لوله، آلودگی‌های اتمسفر، جنگل‌ها، دشت‌ها، آتش‌سوزی‌های عظیم و آلودگی‌های هوای شهرهای بزرگ و... استفاده کنند. محققان رشته‌های نفت می‌توانند از داده‌های ماهواره‌های راداری برای مانیتورینگ مخازن نفتی، دکل‌های نفتی، آلودگی‌های نفتی و حتی اکتشاف نفت (به‌عنوان مکمل داده‌های ماهواره‌ای اپتیک مثل ASTER، Sentinel2 و...) بهره ببرند. محققان باستان‌شناسی، با توجه به توانایی نفوذ امواج راداری در زمین (به‌خصوص امواج الکترومغناطیسی با طول موج‌های بالاتر مثل باندهای  $L$  و  $P$  راداری)، از داده‌های ماهواره‌ای و پهپادهای راداری استفاده لازم را می‌برند. همچنین روش‌های Ground Penetrating RADAR که به اختصار GPR نامیده می‌شود، در نزد این محققان بسیار شناخته شده و کاربردی است. محققان هوافضا نیز قطعاً از رادار و داده‌های ماهواره‌های راداری استفاده کرده و برای مانیتورینگ، راهبری (navigation) و ارتباطات خود بهره لازم را برده‌اند. مهندسان کشاورزی نیز می‌توانند از داده‌های ماهواره‌های راداری برای تعیین آب سطحی و عمیق زمین، کیفیت خاک و کیفیت محصولات کشاورزی و... استفاده کنند. مهندسان ترافیک نیز از داده‌های ماهواره‌ای و پهپادها برای مانیتورینگ ترافیک شهری و برنامه‌ریزی‌های لازم شهری استفاده می‌کنند. مهندسان علوم دریایی برای برآورد سرعت کشتی‌ها، ناوبری دریایی و تعیین ارتفاع موج‌های دریا و اقیانوس‌ها، سونامی‌ها از روش‌های راداری استفاده می‌کنند. طراحی و ساخت سنسور/آنتن‌های ماهواره‌های راداری، حل معادلات امواج الکترومغناطیسی بازتابیده از سطح مواد،

س □ سنجش از دور ماهواره‌ای با اینترفرومتری راداری

معادلات رادار، پلاریزاسیون و... قسمتی از تخصص رشته‌های مهندسی الکترونیک و مخابرات بوده و متخصصان این رشته‌ها که علاقه‌مند به رادار، الکترومغناطیس و آنتن باشند، می‌توانند از این کتاب بهره ببرند.

فصل اول و دوم این کتاب، اصول اولیه الکترومغناطیس و ماهواره‌های راداری را به‌طور جامع توصیف کرده است. بنابراین، می‌توان از آن به‌عنوان مرجعی برای روش‌های راداری دیگر مثل پلاریمتریک، classification، پردازش تصاویر راداری، پهپادها و... نیز استفاده کرد. در حال حاضر، ده‌ها ماهواره راداری (و هزاران هواپیما و پهپاد با سیستم‌های راداری) به‌صورت تجاری و رایگان داده‌های سنجش از دور را در اختیار استفاده‌کنندگان قرار داده و این نوع آنالیز داده‌ها در تمامی دنیا جایگاه ویژه‌ای یافته است. برای استفاده از این حجم و کیفیت داده‌ها، دانش اولیه در زمینه داده‌های ماهواره‌ای راداری، آماده‌سازی، پردازش، تعبیر و تفسیر و نمایش آنها را به‌طور جامع در این کتاب آورده‌ایم.

### ۳. ساختار این کتاب چگونه است؟

این کتاب در هفت فصل و یک فصل نتیجه‌گیری (فصل هشتم) تدوین شده است. در فصل اول به اصول اولیه الکترومغناطیس و چگونگی بازتاب امواج الکترومغناطیس از سطح زمین پرداخته‌ایم. این فصل را با معادلات ماکسول شروع کرده و حرکت موج الکترومغناطیسی و معادلات آن را به دست داده‌ایم. چگونگی محاسبه پتانسیل‌های الکترومغناطیس، چگالی توان و تقریب مناطق دور را در ادامه آورده‌ایم. سپس معادله‌های اصلی رادار را توضیح داده و معادلات SNR (Signal to Noise Ratio) را ثابت نموده‌ایم. در این فصل همچنین روش‌های برداشت‌های رادارهای پالسی را نیز توضیح داده‌ایم.

در فصل دوم، اصول اولیه مطالعات دورسنجی به روش SAR (Synthetic Aperture Radar) ارائه شده است. تاریخچه مختصری از سیستم‌های راداری، دلیل یک‌سوی بودن سیستم‌های راداری (side looking radar systems)، سیستم‌های راداری RAR (Real Aperture Radar)، چگونگی ایجاد دهانه مصنوعی (Synthetic Aperture) رادار در سیستم‌های SAR، پردازش‌های لازم پس از دریافت سیگنال از بازتابنده‌ها (reflectors)، روش فشرده‌سازی امواج (pulse compression technique) را توضیح داده‌ایم.

در فصل سوم، اصول اولیه مطالعات راداری دورسنجی به روش InSAR ارائه خواهد شد. چگونگی ایجاد اینترفروگرام (تداخل‌سنج) در فیزیک و مطالعات راداری، خطاهای موجود، کاربردهای روش

## پیشگفتار □ ش

راداری InSAR در کارهای مهندسی، جغرافیا، محیط زیست، زمین‌شناسی و... بررسی شده است. در آخر این فصل نیز مثال‌هایی عملی از چگونگی تولید تداخل‌سنج‌ها در روش InSAR را آورده‌ایم. در روش آنالیز داده‌های راداری به روش معمول InSAR کاهش هم‌دوسی (coherence) یا تشابه آماری بین تصاویر راداری، کاهش هم‌دوسی هندسی (geometrical coherence)، کاهش هم‌دوسی زمانی (temporal coherence)، تغییرات سیگنال اتمسفری، خطای ارتفاعی و خطای مداری (orbit errors) محدودیت‌های زیادی ایجاد می‌کنند. اما برای اهدافی مثل مناطق شهری و مناطق کوهستانی، coherence در طول زمان تغییر زیادی نشان نداده و بالا می‌ماند. برای غلبه بر این قبیل مشکلات، در روش InSAR، روش‌های سری‌های زمانی InSAR ابداع شده است. در فصل چهارم این روش‌های سری‌های زمانی InSAR time series که به اختصار PSI و SBAS نامیده می‌شود، با جزئیات شرح داده‌ایم. شاید بتوان گفت این فصل، هسته اصلی این کتاب را تشکیل داده است.

در فصل‌های پنجم، ششم و هفتم، سه مثال عملی از کاربردهای InSAR و سری‌های زمانی InSAR در کارهای مهندسی و مخاطرات طبیعی را خواهیم آورد تا تکنیک‌های تفسیر داده‌های راداری در روش‌های InSAR و PSI را شرح داده باشیم. در فصل پنجم از داده‌های سنجنده ENVISAT-ASAR که در باند C فعالیت می‌کند و در فصل‌های ششم و هفتم، از داده‌های سنجنده با رزولوشن بالای CosmoSkyMed که در باند راداری X فعالیت می‌کند، استفاده شده است.

در فصل پنجم، فرونشست (subsidence) شهر مکزیکوسیتی، پایتخت مکزیک، با داده‌های InSAR بررسی شده است. شهر مکزیکوسیتی (Mexico City) با فرونشست (subsidence) حیرت‌انگیز و بالای خود، به دلیل استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی معروف است. در این فصل، این پدیده با داده‌های ماهواره‌ای راداری و با روش‌های تداخل‌سنجی InSAR، CGPS (Continuous Global Positioning Systems) و تصاویر دورسنجی اپتیکی بررسی شده است. برای انجام این کار، از ۵۲ تصویر ماهواره‌ای راداری ENVISAT-ASAR، ۹ ایستگاه فعال CGPS و تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی Landsat ETM+ استفاده شده است. در روش راداری InSAR، از تکنیک‌های تداخل‌سنجی و PSI استفاده کرده‌ایم. تصاویر ماهواره‌ای InSAR از سال ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۰ و داده‌های CGPS از ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ در دسترس بوده است. مقدار فرونشست شهر مکزیکوسیتی توسط داده‌های راداری و CGPS اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در فصل ششم، به مطالعه انجام‌شده توسط داده‌های راداری با رزولوشن بالای ماهواره CosmoSkyMed پرداخته‌ایم. ۵۲ تصویر راداری در مود (mode) بالارونده (ascending) و ۳۵ داده راداری در مود کاهشی (descending) بررسی شده است. داده‌های سایت Medicina در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ تولید و آنالیز گردیده‌اند. سایت Medicina یک سایت مخصوص برای مطالعات فضایی

است. این سایت به دو دستگاه GPS (Global Positioning Systems)، یک گراویمتر، یک VLBI (Very Long Baseline Interferometry) با بشقاب/آنتن ۳۲ متری و یک SLR (Satellite laser ranging) تجهیز شده است. هدف از این مطالعه ترکیب روش‌های معمولی ژئودتیکی با روش‌های پیشرفته راداری است. امواج راداری استفاده شده در این مطالعه در رده امواج الکترومغناطیسی باند X است (با طول موج تقریباً ۳/۱ سانتی‌متر). در مطالعه این منطقه از روش‌های InSAR بهره برده‌ایم. برای هر دو مجموعه از داده‌های راداری، روش تداخل‌سنجی انجام گرفته و با استفاده از روش PSI، سری‌های زمانی مدنظر تولید شده است. سپس این سری‌های زمانی (از داده‌های InSAR)، با سری‌های زمانی موجود از GPS مقایسه شده است. بشقاب ۳۲ متری VLBI را در مرکز مطالعه راداری خود قرار داده و مستطیلی به بزرگی  $15 \times 9 \text{ km}^2$  را پوشش داده‌ایم. نتایج به دست آمده از دو روش مستقل به مقدار زیادی شبیه هم بود و می‌توان از روش راداری به‌عنوان روش ژئودتیکی مستقل در سایت‌هایی شبیه Medicina استفاده کرد.

در فصل هفتم، بعضی از ویژگی‌ها/ توانایی‌های داده‌های InSAR برای مانیتورینگ راه‌آهن‌ها و پل‌ها را بررسی کرده‌ایم. به‌عنوان کاربرد عملی، مثالی که در ایتالیا روی خطوط راه‌آهن توسط نگارنده و تیم دانشگاهی وی انجام شده، آورده‌ایم. منطقه Triflisco و پل راه‌آهن در نزدیکی این شهر مورد بررسی ماهواره‌ای راداری قرار گرفته است. این پل در سال ۱۹۵۶ ساخته شده و در حال حاضر، در حال سرویس‌دهی به خطوط راه‌آهن کشوری ایتالیاست. کارشناسان راه‌آهن و نگهداری خطوط راه‌آهن، نگران فرونشست احتمالی خطوط راه‌آهن بوده‌اند. با وجود تزریق سیمان و دیگر روش‌های نگهداری مهندسی، از تیم دانشگاهی نگارنده درخواست بررسی تغییر شکل احتمالی این پل را کردند. تیم دانشگاهی از ۲۶ تصویر ماهواره‌ای CosmoSkyMed که در فاصله‌های زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ برداشت شده بود، استفاده کرد و تغییر شکل‌های احتمالی پل را بررسی کرد و به تحقیق درباره آن پرداخت.

برای این مطالعه از روش PSI استفاده گردید. در این راستا، نقاط PS موجود در روی پل مدنظر به‌دقت بررسی شد و سیستم تغییر شکل کلی خطوط راه‌آهن و محیط مجاور، تعیین شد. به دلیل وجود تصاویر ماهواره‌ای راداری و دیگر داده‌های مهندسی، رفتار PS‌ها با داده‌های موجود دیگر مقایسه و نتایج مدنظر، با روش‌های اجزای محدود (finite-element model) مدل‌سازی شده است.

نتیجه‌گیری از مباحث هفت‌گانه بالا در فصل هشتم آمده است.

علاقه وافر نویسنده به یادگیری تکنیک‌های ماهواره‌ای و زمینی برای مانیتورینگ سطح زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز سبب شد مدت‌های متمادی در کشورهای اروپایی شامل آلمان، فرانسه، ایتالیا، هلند و... به تحصیل، تدریس و تحقیق در این زمینه‌ها بپردازد. وی در رشته‌های ماهواره‌ای راداری، روش‌های دورسنجی لیزری و اپتیک به تحقیق و تفحص پرداخته و تعداد زیادی تداخل‌سنجی،

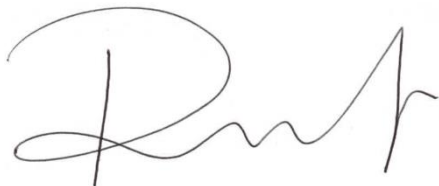
پیشگفتار □ ض

داده‌های سری‌های زمانی راداری (PSI و SBAS)، توپوگرافی (Digital Elevation Models) DEM، داده‌های لیزر، هوابرد و دریایی و... را تهیه و از آنها استفاده کرده است. این تحقیق و مطالعه گسترده، با وجود دشواری‌های ایجادشده، ابزار مناسبی در اختیار نویسنده قرار داد که با کمک آنها بتواند به سؤال‌های موجود در زمینه‌های ذکرشده بپردازد. امیدوارم اطلاعاتی که در این کتاب داده می‌شود، مشارکت معنی‌داری در جهت گسترش علم و دانش روز باشد و درهای تازه‌ای به روی محققان در رشته‌های مرتبط بگشاید.

در انتها بر خود لازم می‌دانم از عزیزانی که در نگارش و تصحیح این کتاب بنده را یاری کرده‌اند، سپاسگزاری کنم. پروفسور عباس مجدی را فردی بسیار دانشمند و دانش‌دوست می‌دانم؛ ایشان از اولین دوران آکادمیک من (در دانشگاه تهران) تا به حال، راهنما و مشوق من بوده‌اند و من صمیمانه از ایشان متشکرم. پروفسور رشیدیان (در دانشگاه شریف) مشوق بنده در آماده‌سازی این کتاب بودند و در چاپ آن صمیمانه همکاری داشتند. از همکاران عزیزم پروفسورهای ایتالیایی (هرچند این متن فارسی را نمی‌توانند بخوانند) Daniele Riccio و Antonio Iodice که با دوستی بی‌دریغ و حمایت‌هایشان همیشه مرا یاری رسانده و می‌رسانند، بسیار سپاسگزارم. از خانم‌ها سمیه پاک وجدان و لیلا ابراهیمی و همچنین آقای رسول مظلوم که کمک‌های شایانی به بنده کرده‌اند نیز سپاسگزارم.

داده‌های ماهواره‌ای CosmoSkyMed را تحت قرارداد پروژه MODISTA از سازمان فضایی ایتالیا (ASI)، داده‌های سنجنده ENVISAT-ASAR را از سازمان فضایی اروپایی (ESA) و داده‌های توپوگرافی سنجنده SRTM را از وبسایت سازمان فضایی آمریکا (NASA) دریافت کرده‌ایم. داده‌های GPS از وبسایت (JPL) که متعلق به سازمان فضایی آمریکا (NASA) است (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>)، قابل دریافت است. داده‌های GPS مربوط به شهر مکزیکوسیتی را نیز از طریق دانشگاه Mexico City به دست آورده‌ایم.

داود پوره



## لغات و اصطلاحات

یک‌بعدی.....	1D
دو‌بعدی.....	2D
سه‌بعدی.....	3D
میدان الکتریکی.....	$\underline{E}$
میدان مغناطیسی.....	$\underline{H}$
چگالی شار الکتریکی.....	$\underline{D}$
چگالی شار مغناطیسی.....	$\underline{B}$
چگالی جریان الکتریکی.....	$\underline{J}$
Curl عملگر.....	$\nabla \times$
Divergence عملگر.....	$\nabla \cdot$
چگالی شار الکتریکی.....	$\rho$
بردار واحد در جهت x.....	$\hat{u}_x$
گذردهی محیط.....	$\mu_0$
سرعت نور در خلأ.....	C
ثابت دی الکتریک.....	$\epsilon_0$
زاویه فاز.....	$\emptyset$
سرعت زاویه‌ای.....	$\omega$
فرکانس حرکت موج.....	$f$
عدد موج.....	$k$
بردار نرمال سطح.....	$\hat{n}$
پتانسیل الکتریکی.....	$\underline{F}$
پتانسیل بردار مغناطیسی.....	$\underline{A}$
ماتریس جونز.....	$T$
امپدانس محیط موج.....	$Z_0$
فاز دوپلری.....	$f_{DOP}$
توان دریافتی در آنتن گیرنده.....	$P_r$

..... توان ارسالی از آنتن فرستنده	$P_t$
..... Gain آنتن	$G$
..... فاصله رادار تا بازتابنده امواج	$R$
..... طول موج استفاده شده توسط فرستنده	$\lambda$
..... مقطع بازتابنده راداری (Radar target cross-section)	$\sigma$
..... نسبت سیگنال به نویز (Signal to Noise Ratio)	$SNR$
..... ثابت استفان بولتزمن	$K$
..... ثابت شکل نویز	$F$
..... ضریب بازتابنده	$\sigma_0$
..... توان متوسط	$\bar{P}$
..... رادار با دهانه مصنوعی	SAR
..... رادار با دهانه حقیقی	RAR
..... طول فیزیکی آنتن ماهواره‌ای	$l$
..... طول موج سیگنال	$\lambda$
..... فرکانس تکرار پالس	$PRF$
..... طول پالس (Pulse length)	$\tau$
..... فاصله قائم دو سنجنده	$B_{\perp}$
..... تداخل سنجی دو تصویر راداری	$ifg$
..... جابه‌جایی در جهت بردار رنج (Line-Of-Sight deformation)	$D_p$
..... همدوسی	$\gamma$
..... integer ambiguity	$a \in N$
..... Small BAseline Subset	SBAS
..... خط دید ماهواره	LOS
..... Support vector machine آنالیز	SVM
..... تداخل سنجی راداری	InSAR
..... تداخل سنجی راداری دائمی	PSI