

تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری

محمدامین قنادی^۱

حمید عنایتی^۲

الهه خصالی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۱/۱۵

چکیده

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و اهمیت بحث تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین از تمام نقاط کشور، می توان به لزوم استفاده هرچه بیشتر از سنجش از دور ماهواره ای پی برد. یکی از ارکان اصلی سنجش از دور ماهواره ای، سنجش از دور راداری می باشد. در سال های اخیر پروژه های فضایی بسیاری، اخذ اطلاعات از سطح کره زمین را آغاز کرده اند که آخرین آنها پروژه سنتینل می باشد. سنتینل-۱ بخش راداری پروژه سنتینل است که با دوره زمانی ۱۲ روز از سطح زمین تصاویر با توان تفکیک مکانی متوسط اخذ می کند. در این مقاله دقت و قابلیت تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین با استفاده از این تصاویر مورد بررسی قرار می گیرد. تصاویر مورد استفاده در پژوهش حاضر، از شهر تهران و حومه آن می باشد. جهت انجام آزمایش ها هم از بخش کوهستانی (شمال تهران) و هم بخش هموار (جنوب تهران) استفاده شده است. تکنیک تولید مدل ارتفاعی رقومی، روش تداخل سنجی راداری با دو عبور تکراری می باشد. مدل ارتفاعی رقومی تولید شده با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری با مدل ارتفاعی رقومی مرجع با دقت یک متر مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج تحقیق نشان می دهند که در منطقه هموار، دقت ارتفاعی (انحراف معیار) مدل ارتفاعی رقومی ۱/۲۶ متر و دقت ارتفاعی در منطقه کوهستانی ۱۰/۳۲ متر می باشد. با در نظر گرفتن این نکته که می توان با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ که تصاویری با توان تفکیک مکانی متوسط محسوب می شوند به دقت نسبتاً مناسبی خصوصاً در مناطق غیر کوهستانی سخت دست یافت، لزوم مطالعه عمیق تر و استفاده بیشتر از این تصاویر بر محققان مشخص می شود.

واژه های کلیدی: مدل رقومی ارتفاعی، تداخل سنجی راداری، تصاویر سنتینل-۱، سنجش از دور ماهواره ای

۱- دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) amin.ghannadi@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی ژئوماتیک و ژئودزی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی enayati_hamid@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک و ژئودزی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی elahe.khesali@mail.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

با استفاده از چند فرآیند با کمک تصاویر راداری می‌توان مدل ارتفاعی رقومی زمین^۱ در واقع نمایش فیزیکی زمین و تعیین توپوگرافی آن است که بوسیله یک مدل سه بعدی رقومی نمایش داده می‌شود. مدل رقومی زمین کاربردهای فراوانی دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به مدیریت منابع طبیعی، مهندسی و پروژه‌های زیرساختی، مدیریت حوادث و آنالیز ریسک، باستان شناسی، امنیت، صنعت هوایی، جنگل‌داری، انرژی، نقشه برداری توپوگرافی، زمین لغزش و آنالیز فرونشست و تولید سامانه اطلاعات مکانی اشاره نمود (Makineci and karabork, 2016). یکی از رایج‌ترین روش‌های تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین روش‌های سنجنش از دوری می‌باشند. این روش‌ها معمولاً مقرون به صرفه‌ترین و مهم‌ترین روش در تولید مدل ارتفاعی رقومی می‌باشند. تصاویر ماهواره‌ای نوری و تصاویر راداری بیشترین سهم را در این بین دارا می‌باشند. با توجه به اینکه استفاده از هرکدام از این دسته از تصاویر با خود مزایا و محدودیت‌هایی را به همراه خواهند داشت، لذا این گونه نتیجه‌گیری می‌شود که در شرایط مناسب می‌توان از هرکدام از این دسته از تصاویر ماهواره‌ای بهره برد. با توجه به ویژگی‌هایی که تصاویر راداری دارند در بسیاری از مواقع استفاده از این تصاویر می‌تواند بهترین گزینه در تولید مدل ارتفاعی رقومی سطح زمین باشد. در ادامه چند مورد از مهم‌ترین ویژگی‌های تصویربرداری راداری نام برده می‌شود. ماهواره‌های راداری قابلیت تصویربرداری در شب و روز و در شرایط جوی مختلف از جمله هوای ابری را دارند. در کنار اطلاعات دامنه، اطلاعات فاز این تصاویر نیز می‌تواند در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد (فتادی، ۱۳۹۲).

مدل ارتفاعی رقومی زمین^۱ در واقع نمایش فیزیکی زمین و تعیین توپوگرافی آن است که بوسیله یک مدل سه بعدی رقومی نمایش داده می‌شود. مدل رقومی زمین کاربردهای فراوانی دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به مدیریت منابع طبیعی، مهندسی و پروژه‌های زیرساختی، مدیریت حوادث و آنالیز ریسک، باستان شناسی، امنیت، صنعت هوایی، جنگل‌داری، انرژی، نقشه برداری توپوگرافی، زمین لغزش و آنالیز فرونشست و تولید سامانه اطلاعات مکانی اشاره نمود (Makineci and karabork, 2016). یکی از رایج‌ترین روش‌های تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین روش‌های سنجنش از دوری می‌باشند. این روش‌ها معمولاً مقرون به صرفه‌ترین و مهم‌ترین روش در تولید مدل ارتفاعی رقومی می‌باشند. تصاویر ماهواره‌ای نوری و تصاویر راداری بیشترین سهم را در این بین دارا می‌باشند. با توجه به اینکه استفاده از هرکدام از این دسته از تصاویر با خود مزایا و محدودیت‌هایی را به همراه خواهند داشت، لذا این گونه نتیجه‌گیری می‌شود که در شرایط مناسب می‌توان از هرکدام از این دسته از تصاویر ماهواره‌ای بهره برد. با توجه به ویژگی‌هایی که تصاویر راداری دارند در بسیاری از مواقع استفاده از این تصاویر می‌تواند بهترین گزینه در تولید مدل ارتفاعی رقومی سطح زمین باشد. در ادامه چند مورد از مهم‌ترین ویژگی‌های تصویربرداری راداری نام برده می‌شود. ماهواره‌های راداری قابلیت تصویربرداری در شب و روز و در شرایط جوی مختلف از جمله هوای ابری را دارند. در کنار اطلاعات دامنه، اطلاعات فاز این تصاویر نیز می‌تواند در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد (فتادی، ۱۳۹۲). همچنین این تصاویر قابلیت اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین را با دقت بسیار بالا دارند. این موارد باعث می‌شود که تصاویر ماهواره‌ای راداری جایگاه بالایی در سنجنش از دور ماهواره‌ای به ویژه تولید مدل ارتفاعی رقومی از سطح زمین را داشته باشند.

رادارو ایترنرفرومتری برای اولین بار در جنگ جهانی دوم و در سال ۱۹۴۶ توسعه پیدا کرد. در اواخر دهه ۵۰ و اوایل دهه ۶۰ در دانشگاه ایلینویز و میشیگان مفهوم SAR از نظر پیشرفت به اوج خود رسید. در سال ۱۹۶۸ ایوانز و هگفورز^۲ توانستند با استفاده از انعکاس رادار از خط ایزو رنج^۳ و ایزو داپلر^۴ نقشه مسطحاتی تولید کنند. مفهوم تداخل سنجنی راداری اولین بار توسط راجرز و اینگالز^۵ در سال ۱۹۶۹ برای مفاهیم غیر از نقشه‌برداری مطرح شد. در سال ۱۹۷۲ برای اولین بار از مفهوم تداخل سنجنی راداری جهت محاسبه اختلاف ارتفاع استفاده شد. این کار توسط زیسک^۶ صورت پذیرفت. یکسال قبل از آن یعنی در سال ۱۹۷۱ برای اولین بار ارتش ایالات متحده به وسیله سنجنده هوابرد SAR از تداخل سنجنی راداری برای نقشه برداری توپوگرافی استفاده نمود. این عملیات در واقع به دست آوردن اختلاف ارتفاع

^۲- Radargrammetry

^۳- Interferometry

^۴- Intensity

^۵- Evans and Hagfors

^۶- Range

^۷- Doppler

^۸- Ragers and Ingalls

^۹- Zisk

^۱- Digital Elevation Model

در سال ۲۰۱۰ پروژه TANDEM شروع به کار کرد. این پروژه قادر بود از سطح زمین RAWDEM با قدرت تفکیک مکانی بالا تولید کند (Pitz and Miller, 2010). امروزه از ترکیب روش تداخل سنجی راداری با سایر تکنیک‌های موجود اخذ داده، می‌توان مسائل مختلفی را حل نمود. به عنوان نمونه در سال ۲۰۱۳ سوچا و اولاندر^۶ از دانشگاه گوتنبرگ سوئد با تلفیق لیدار و تداخل سنجی، مدل رقومی زمین با پوشش سایبانی (جنگل) تولید کردند (Soja and Ulander, 2013). در سال‌های اخیر تلاش برای بهبود هرچه بیشتر از مدل رقومی تولید شده از تداخل سنجی می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ نیتی^۷ و همکاران با کمک مدل هواشناسی و استفاده از اطلاعات سنجنده Cosmo-SkyMed از فرآیند تداخل سنجی راداری به مدل ارتفاعی رقومی زمین با توان تفکیک مکانی خوبی رسیدند (Nitti and et al, 2013). در طی سال‌های اخیر روش‌های مختلفی نیز برای بهبود مراحل مختلف تداخل سنجی پیشنهاد شده است که هر یک به شکلی سعی در بهبود آن دارند. با آغاز پروژه سنتینل، مطالعاتی با هدف بهبود مراحل تولید مدل رقومی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و با کمک تداخل سنجی راداری صورت پذیرفته است. در یکی از این مطالعات با ارائه روشی اینترفروگرام تولید شده از تصاویر سنتینل-۱ بهبود داده شده است (Martinez and et., al, 2016). در قسمت بعد تصاویر و داده‌های استفاده شده در مقاله جهت تولید مدل ارتفاعی رقومی و ارزیابی دقت آن و همچنین ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه بیان خواهد شد.

۲- تصاویر و داده‌های مورد استفاده

در این مقاله از تصاویر سنتینل-۱ برای تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده شده است. این تصاویر از شهر تهران و اطراف آن اخذ شده‌اند. در بخش بعد در مورد تصاویر سنتینل-۱ توضیحاتی داده می‌شود و سپس منطقه مورد مطالعه معرفی می‌شود.

با استفاده از اختلاف فاز بود. نتایج این روش برای اولین بار توسط گراهام^۱ در سال ۱۹۷۴ انتشار یافت. در سال ۱۹۸۵ فرآیند تداخل سنجی راداری با استفاده از داده‌های سنجنده هوابرد دو آنتنی به وسیله پردازش رقومی انجام گرفت. این فرآیند به صورت تک عبور صورت گرفت. در سال ۱۹۸۶ برای اولین بار اینترفروگرام^۲ توسط زبکر و گلدستین^۳ تولید شد. یکسال بعد زبکر و گلدستین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تداخل سنجی راداری با عبور تکراری ماهواره را آزمایش کردند و دیده شد که می‌تواند در شرایطی خاص، نتایج بهتری به همراه داشته باشد. مشابه این آزمایش‌ها تا سال ۱۹۹۳ ادامه پیدا کرد. در سال ۱۹۹۳ برای اولین بار فرآیند تداخل سنجی تفاضلی صورت پذیرفت. این عملیات موجب رسیدن به جابه جایی سطح زمین می‌شد. این فرآیند برای کاربردهای زمین نگاری و زلزله سنجی بسیار مفید بود. خروجی این روش اینترفروگرام تفاضلی است. در سال ۱۹۹۴، زبکر روش سه عبور را برای کاربردهای زلزله سنجی پیشنهاد داد. ویممر^۴ در سال ۲۰۰۰ موفق به تولید مدل ارتفاعی زمین با دقت بالا از داده‌های هوابرد به کمک روش تداخل سنجی شد (واجدیان، ۱۳۸۹).

در سال ۲۰۰۱ برای اولین بار مفهوم تداخل سنجی راداری با استفاده از مفهوم پراکنش‌های پایدار^۵ مطرح شد (Ferretti and et al, 2001). در سال ۲۰۰۳ ارتباط ریاضی میان فازهای اینترفروگرام و تارگت‌های ارتفاعی معرفی شد که نهایتاً موجب بهبود مدل ارتفاعی رقومی تولید شده از تداخل سنجی راداری شد (واجدیان، ۱۳۸۹). در سال ۲۰۰۴ چگونگی شروع پروژه TANDEM در کشور آلمان مطرح گردید. در این مأموریت که قرار بود که در سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ آغاز شود، بیان گردید که از سنجنده‌ای به نام TerraSAR-X با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری از تمام سطح کره زمین مدل رقومی تولید شود (Moreira and et al, 2004).

¹- Graham

²- Interferogram

³- Zebker and Goldstein

⁴- Wimmer

⁵- Permanent Scatterers

⁶- Soja and Ulander

⁷- Nitti



نگاره ۱: تصویر شهر
تهران

خواهد رسید. زاویه برخورد این سنجنده ۲۹/۱ الی ۴۶ درجه است. سنجنده سنتینل-۱ در چهار حالت از سطح زمین تصویربرداری می‌کند. این چهار حالت عبارتند از: حالت (Stripmap (SM)، حالت (Interferometric Wide Swath (IW)، حالت (Extra Wide Swath (EW) و حالت (Wave Mode (WM). حالت IW اصلی‌ترین نوع تصویربرداری سنتینل-۱ با اهداف تداخل سنجی راداری می‌باشد. پهنای نوار تصویربرداری در این حالت ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. توان تفکیک مکانی در این نوع از تصویربرداری ۵ متر در امتداد آزیموت^۵ و ۲۰ متر در امتداد رنج می‌باشد (www.Earth.esa.int). و این نشان دهنده حجم بزرگ این تصاویر و نیاز به روش‌ها و نرم افزارهایی با قابلیت پردازش داده‌های سنگین می‌باشد (Lazeky and et al, 2017). تصاویر IW از سه قسمت به نام‌های IW1، IW2 و IW3 تشکیل شده است، این تقسیم‌بندی در امتداد پیکسل‌ها^۶ می‌باشد. در تصویربرداری این حالت از تکنیک TOPSAR^۷ استفاده شده است.

۱-۲- تصاویر سنتینل-۱

پروژه سنتینل-۱ در واقع مجموعه مشاهدات راداری ماهواره‌ای است که با همکاری اتحادیه اروپا و آژانس فضایی اروپا صورت می‌پذیرد. سکوی A پروژه سنتینل-۱^۲ در تاریخ ۳ آوریل سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد و از تاریخ ۳ اکتبر سال ۲۰۱۴ تصاویر آن در اختیار کاربران قرار گرفته است. این پروژه از ترکیب دو سکوی A و B در یک صفحه مداری با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نسبت به هم، تشکیل شده است. سنتینل-۱ تجهیزات یک سنجنده SAR^۳ با مرکز فرکانس ۵/۴۰۵ که در باند C قرار دارد را حمل می‌کند. این سنجنده قابلیت اخذ تصویر راداری به صورت پلاریزاسیون دوگانه HH, HV و VV, VH را دارد. ماهواره سنتینل-۱ قادر است هر ۱۲ روز یکبار از کل کره زمین تصویر برداری کند. بنابراین در صورت استفاده از هر دو سکوی سنتینل-۱ توان تفکیک زمانی و یا به عبارتی بازدید^۴ سنتینل-۱ به ۶ روز

^۱- Sentinel-1

^۲- Sentinel-1A

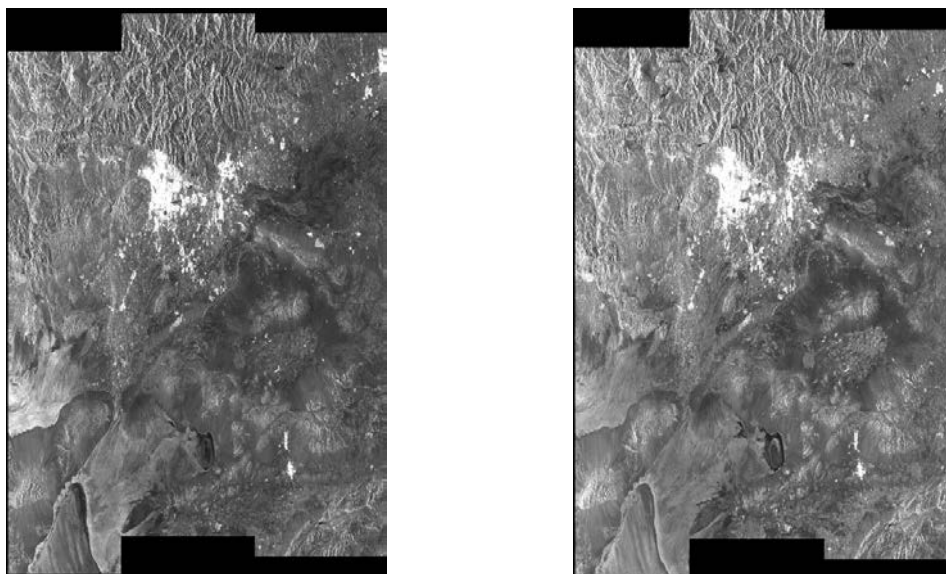
^۳- Synthetic Aperture Radar

^۴- Revisit

^۵- Azimuth

^۶- Pixel

^۷- Terrain Observation with Progressive Scans SAR



نگاره ۲: سمت چپ تصویر Master و سمت راست تصویر Slave سنجنده سنتینل-۱ از شهر تهران

جدول ۱: ویژگی و مشخصات تصاویر سنتینل-۱ اخذ شده از ایران-تهران

تاریخ اخذ تصویر Master	تاریخ اخذ تصویر Slave	کانال	قطبش	زاویه برخورد	جهت مدار	نوع و پردازش تصویر	توان تفکیک مکانی
۲۰۱۵/۰۳/۱۳	۲۰۱۵/۰۵/۲۴	C	VV	۳۳/۸ درجه	ascending	IW-SLC	۵×۲۰

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جهت انجام آزمایش‌ها و تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین، کشور ایران و شهر تهران می‌باشد. تهران در شمال کشور و جنوب دامنه رشته‌کوه البرز در ۱۱۲ کیلومتری جنوب دریای خزر واقع شده است. شهر تهران در ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع آن از ۲۰۰۰ متر در مرتفع‌ترین نقاط شمال تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است. در نگاره ۱ تصویر شهر تهران نمایش داده شده است.

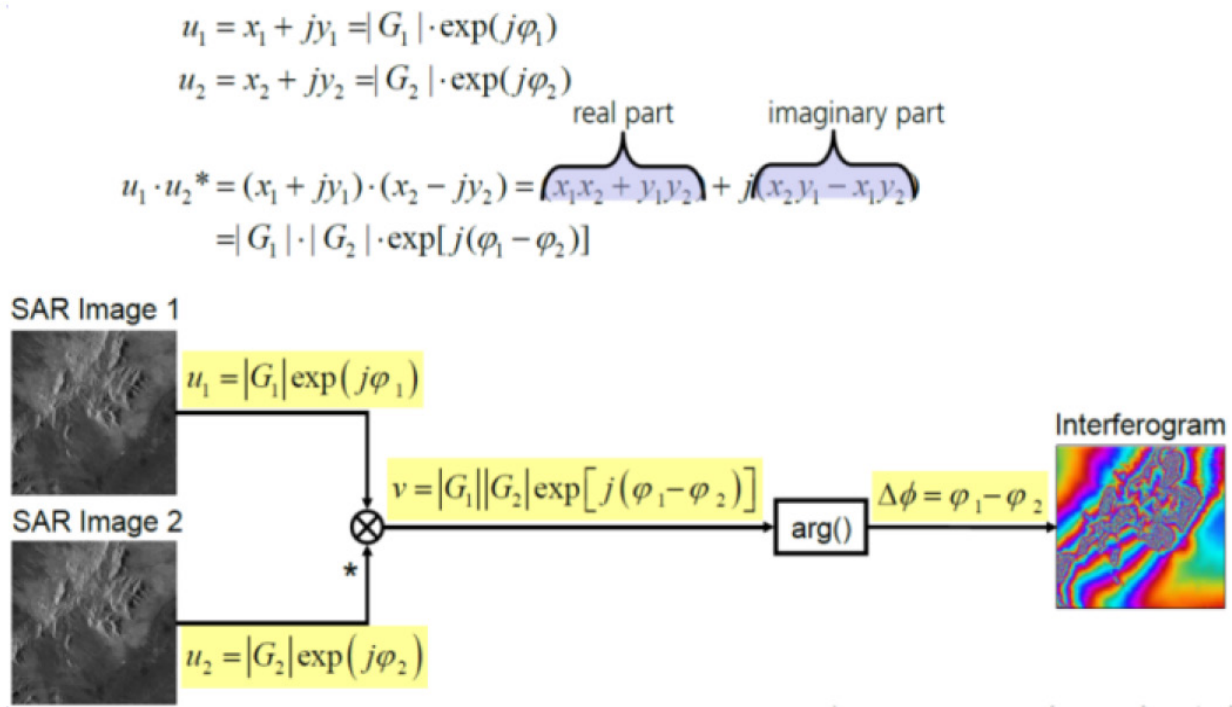
در ادامه داده‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش در این مقاله معرفی خواهند شد.

منطقه مورد مطالعه جهت انجام آزمایش‌ها و تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین، کشور ایران و شهر تهران می‌باشد. تهران در شمال کشور و جنوب دامنه رشته‌کوه البرز در ۱۱۲ کیلومتری جنوب دریای خزر واقع شده است. شهر تهران در ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع آن از ۲۰۰۰ متر در مرتفع‌ترین نقاط شمال تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است. در نگاره ۱ تصویر شهر تهران نمایش داده شده است.

در ادامه داده‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش در این مقاله معرفی خواهند شد.

۲-۳- داده‌های مورد استفاده جهت تولید مدل رقومی زمین

در این مقاله جهت تولید مدل ارتفاعی زمین از زوج تصویر ماهواره‌های سنتینل-۱ استفاده شده است. در بخشی از این تصاویر شهر تهران واقع شده است. در نگاره ۲ تصاویر سنتینل-۱ مورد استفاده نمایش داده شده است. اطلاعات تصاویر ۲ در جدول شماره ۱ ذکر شده است. تصاویر سنتینل-۱ فوق تصاویری با توان تفکیک مکانی متوسط محسوب می‌شوند. همان گونه که در نگاره ۲ دیده می‌شود این تصاویر از سه نوار عمودی IW1، IW2 و IW3 تشکیل شده است که تهران در IW2 و اندکی در IW1 قرار دارد. جهت ارزیابی مدل رقومی تولید شده توسط این تصاویر از مدل رقومی مرجع که با دقت یک متر از شهر تهران تهیه شده است استفاده می‌گردد. این اطلاعات ارتفاعی با



نگاره ۳: فرآیند تولید اینترفروگرام در تداخل سنجی راداری

استفاده از روش نقشه برداری زمینی و فتوگرامتری هوایی جمع آوری شده است. دیتوم ارتفاعی اطلاعات جمع آوری شده ژئوئید می باشد. قابل ذکر است که توجیه مسطحاتی مدل رقومی نسبی تولید شده با استفاده از سنجنده سنتینل-۱ از مدل ارتفاعی رقومی SRTM استفاده می کند و دیتوم مسطحاتی آن WGS84 است ولی دیتوم ارتفاعی استفاده شده در سنتینل-۱ بیضوی EGM96 می باشد. لذا نیاز است که ارتفاع ژئوئید (جدایی ژئوئید از بیضوی مذکور) در محدوده مورد آزمایش محاسبه شود تا ارزیابی ارتفاعی مدل رقومی تولید شده توسط سنجنده سنتینل-۱ و مدل ارتفاعی رقومی مرجع در یک دیتوم ارتفاعی صورت بگیرد.

تداخل سنجی راداری، استفاده از تصاویر راداری، تداخل سنجی راداری^۱ می باشد. خروجی این فرآیند اطلاعات ارتفاعی از سطح زمین و همچنین اطلاعات از جابه جایی های رخ داده در سطح زمین است. در ادامه این مفهوم معرفی خواهد شد. تداخل سنجی راداری تکنیکی است که به واسطه آن اختلاف فاز بین تصاویر راداری اخذ شده از یک منظر، محاسبه می شود. این تصاویر ممکن است از موقعیت های تصویربرداری و یا حتی زمان های تصویربرداری مختلف، اخذ شده باشند. تفاضل فازهای تصاویر، نوع جدیدی از تصویر است که اینترفروگرام نام دارد. اینترفروگرام برای منطقه ای که در حدها فصل زمانی دو تصویربرداری دچار هیچگونه تغییری نشده باشد می تواند بیانگر ارتفاع منطقه باشد. نگاره ۳ بیانگر مفهوم تداخل سنجی راداری می باشد.

در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت های تصویربرداری و یا زمان های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می شود. از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویر جدید حاصل می شود که اینترفروگرام

استفاده از روش نقشه برداری زمینی و فتوگرامتری هوایی جمع آوری شده است. دیتوم ارتفاعی اطلاعات جمع آوری شده ژئوئید می باشد. قابل ذکر است که توجیه مسطحاتی مدل رقومی نسبی تولید شده با استفاده از سنجنده سنتینل-۱ از مدل ارتفاعی رقومی SRTM استفاده می کند و دیتوم مسطحاتی آن WGS84 است ولی دیتوم ارتفاعی استفاده شده در سنتینل-۱ بیضوی EGM96 می باشد. لذا نیاز است که ارتفاع ژئوئید (جدایی ژئوئید از بیضوی مذکور) در محدوده مورد آزمایش محاسبه شود تا ارزیابی ارتفاعی مدل رقومی تولید شده توسط سنجنده سنتینل-۱ و مدل ارتفاعی رقومی مرجع در یک دیتوم ارتفاعی صورت بگیرد.

۳- تداخل سنجی راداری

امروزه با گسترش فن آوری و به ویژه انجام مأموریت های مختلف در جهت تهیه تصاویر SAR از سراسر دنیا، بحث استفاده از این تصاویر در جهت تولید محصولات گوناگون اهمیت یافته است. یکی از اصلی ترین فرآیندها جهت

^۱- SAR Interferometry

متناظر دو تصویر بیش از نیمی از طول موج نباشد. لذا این شرط جدایی (فاصله) بین مسیر مداری، ماهواره‌ها را در حین اخذ دو تصویر به فاصله‌ای مشخص (مثلاً در مواردی حدود ۱۰۰۰ متر) محدود می‌کند. این در حالی است که مدارهای ماهواره طوری طراحی شده‌اند که به طور یکسان بعد از طی دوره زمانی، تصویربرداری را به شکلی تکرار می‌کنند که شرط فوق برقرار باشد. از جمله مواردی که شرایط را برای تداخل سنجی راداری دشوار می‌کنند، شیب زیاد زمین، زاویه شدید برخورد، توان تفکیک بالا و طول موج کوتاه می‌باشد (Massonnet and Feigl, 1998).

اختلاف فاز به دست آمده از تداخل سنجی راداری متأثر از چند مؤلفه می‌باشد. برخی از مهمترین آنها عبارتند از: مؤلفه‌های مسیره‌های مداری، مؤلفه توپوگرافی، مؤلفه جابه‌جایی و مؤلفه اتمسفری. در رابطه (۲) تأثیر پارامترهای ذکر شده بر اختلاف فاز حاصل شده قابل مشاهده می‌باشد.

$$\Delta\varphi_{int} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \varepsilon}{R_0 + \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d_{los} + \Delta\varphi_{atmo} + \Delta\varphi_{noise} + 2\pi k \quad (2)$$

در این رابطه فاز تداخل سنجی راداری، λ طول موج رادار، R_0 فاصله مایل از هدف زمینی تا سنجنده، θ زاویه مایل، B_{\parallel} و B_{\perp} مؤلفه موازی و عمودی اختلاف مداری زوج تصویر، ε ارتفاع توپوگرافیک پیکسل مدنظر، d_{los} تغییرات سطح زمین در دو تصویر، $\Delta\varphi_{atmo}$ اختلاف فاز اتمسفری، و $\Delta\varphi_{noise}$ اختلاف فاز ناشی از نویز می‌باشد. با حذف قسمت عمده مؤلفه مداری (و محاسبه اثر سایر مؤلفه‌ها و یا ناچیز فرض نمودن آنها در قیاس با مؤلفه مداری و توپوگرافی)، به دلیل اینکه رادار توپوگرافی زمین را از دو نقطه دید مختلف مشاهده می‌کند، اثر استریوسکوپي آشکار می‌شود.

این مؤلفه توپوگرافی منجر به فرینج‌هایی می‌شود که توپوگرافی را مانند خط منحنی میزان در بر می‌گیرد که به این طرح‌ها فرینج توپوگرافی گفته می‌شود.

نکته قابل توجه اینجاست که می‌توان با حذف مؤلفه

نام دارد. اینترفروگرام یک طرح تداخلی فرینج^۱ است. فرینج‌ها خطوطی با اختلاف فازهای مساوی شبیه به خطوط تراز در نقشه‌های توپوگرافی هستند.

بطور کلی دو روش برای تداخل سنجی راداری وجود دارد که عبارت است از: روش تداخل سنجی تک مسیر و روش تداخل سنجی با تکرار مسیر. در روش تداخل سنجی تک مسیر، با استفاده از دو آنتنی که روی یک سکو نصب شده‌اند به صورت همزمان اطلاعات جمع‌آوری می‌شود. که این حالت خود نیز به دو حالت تداخل سنجی در راستای پرواز^۲ و تداخل سنجی در جهت عمود بر راستای پرواز^۳ تقسیم‌بندی می‌شود. و اما در تداخل سنجی با تکرار مسیر، سکو تنها حامل یک آنتن می‌باشد. این آنتن یک منطقه را در دو عبور مختلف با هندسه تقریباً مشابه پوشش می‌دهد. در پژوهش حاضر، بوسیله این روش اطلاعات جمع‌آوری شده است. این روش بر پایه اطلاعات دقیق از مسیر پرواز است و برای نظارت بر دگرشکلی، زمین لغزش و مطالعات آتشفشان بسیار حائز اهمیت است. در کنار کاربردهای ذکر شده، تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین نیز از اصلی‌ترین کاربردهای این روش می‌باشد.

فاصله بین دو مسیر پرواز خط مبنا نامیده می‌شود. برای هر سیستم تصویربرداری SAR، خط مبنای بحرانی وجود دارد، که در صورت بیشتر بودن طول خط مبنا از این مقدار، تداخل سنجی غیر ممکن می‌شود. مقدار این پارامتر از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

$$B_c = \frac{\lambda R}{2\delta R_g \cos\theta} \quad (1)$$

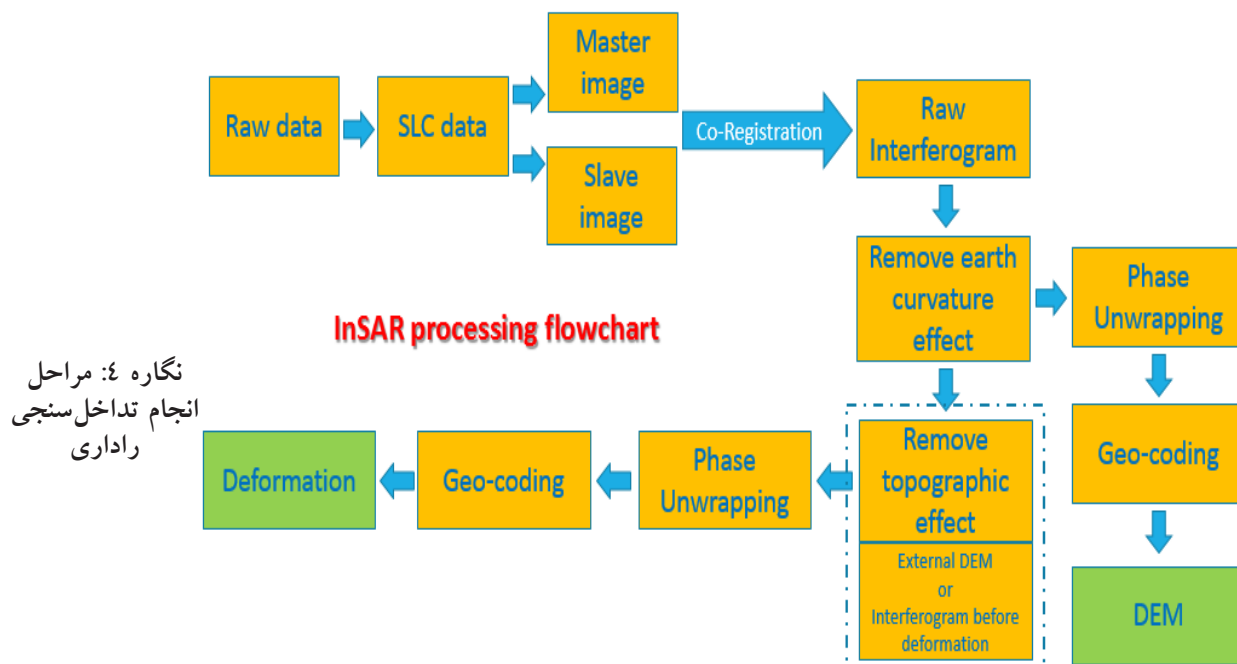
در رابطه (۱) λ طول موج رادار، θ زاویه‌ی میل ماهواره، R فاصله بین سنجنده و نقطه مورد نظر روی زمین و R_g توان تفکیک زمینی در جهت رنج^۴ می‌باشد. همچنین، شرط تداخل سنجی راداری این است که اختلاف فاز پیکسل‌های

^۱- fringe

^۲- Along-track

^۳- Across-track

^۴- Range



نگاره ۴: مراحل انجام تداخل سنجی راداری

می‌کند. مقدار صفر دلالت بر نویز و ناهمبستگی کامل دارد که به این معنی است که اطلاعات مفیدی در اینترفروگرام نمی‌باشد و مقدار یک دلالت بر هم چسبی کامل اطلاعات بدون نویز در اینترفروگرام دارد (واجدیان، ۱۳۸۹).

تداخل سنجی راداری با محدودیت‌هایی نیز همراه است که مهمترین آنها عبارت است از: توان تفکیک زمانی پایین، اختلال در صورت عدم همبستگی زمانی و مکانی میان تصاویر، نیاز به مدل‌سازی و تصحیح اثر یونسفری و تروپوسفری و نهایتاً یک بعدی بودن اندازه‌گیری (اندازه‌گیری در راستای خط دید سنجنده) در تداخل سنجی راداری. در ادامه تولید مدل رقومی زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری و به وسیله تصاویر سنتینل-۱ شرح داده می‌شود.

۴- تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل-۱

تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و به روش تداخل سنجی راداری فرآیندی چند مرحله‌ای می‌باشد که در ادامه بیان می‌شوند.

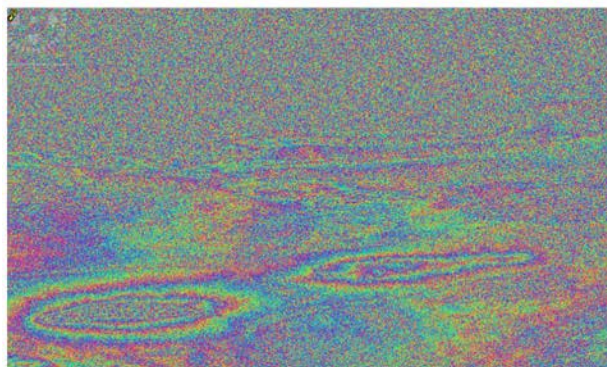
مداری و توپوگرافی و همچنین حذف سایر مؤلفه‌ها که مدل آنها موجود و مقدار آنها قابل تصحیح شدن می‌باشند، مؤلفه تغییر شکل سطح زمین در راستای خط دید سنجنده را محاسبه نمود که البته موضوع کار تحقیقاتی در این مقاله نمی‌باشد. در نگاره ۴ فلوجارت فرآیند تداخل سنجی راداری نمایش داده شده است.

یکی از مفاهیم مهم در تداخل سنجی راداری مفهوم هم‌چسبی می‌باشد. تصویر هم چسبی^۱ تصویری است که میزان وابستگی (همبستگی) بین تصاویر را نشان می‌دهد، از این تصویر برای تخمین کیفیت اینترفروگرام تولید شده استفاده می‌شود. اینکه چگونه دو تصویر SAR نسبت به هم همبسته می‌شوند با پارامتر γ تخمین زده می‌شود. این پارامتر تشابه دو تصویر SAR مختلط است و به عنوان مقدار ضریب همبستگی مختلط در نظر گرفته می‌شود. نظر به اینکه پروسه با میانگین‌گیری تعدادی پیکسل اجرا می‌شود، بصورت زیر تخمین زده می‌شود.

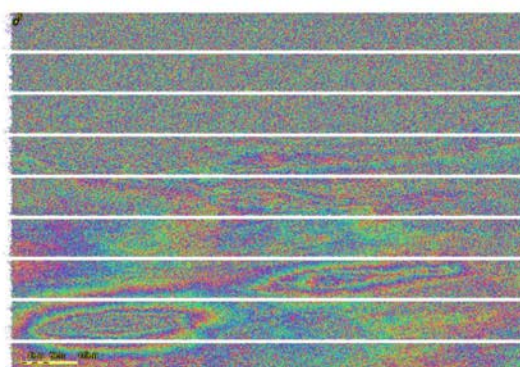
$$\gamma = \frac{\sum c_1 c_2^*}{\sqrt{|\sum c_1|^2 \sum |c_2|^2}} \quad (۳)$$

مقدار هم چسبی تداخل سنجی از صفر تا یک تغییر

^۱- Coherence



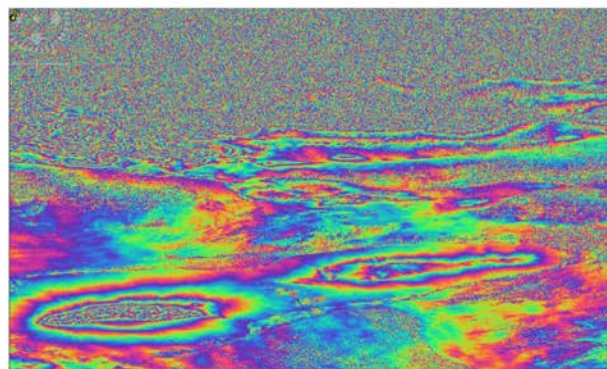
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

نگاره ۵: الف) تصویر اینترفروگرام تولید شده، ب) تصویر اینترفروگرام پس از انجام موزاییک نوارهای افقی، ج) تصویر اینترفروگرام پس از اعمال فیلتر گلدستین، د) تصویر هم چسبی

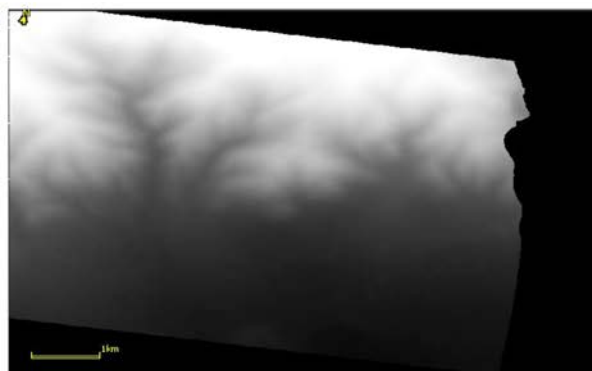
افقی تشکیل شده است. این نوارها پس از انجام موزاییک بین نواری (debursting) یکپارچه می‌شوند (نگاره ۵). بنا به دلایل مختلف، از جمله شرایط طبیعی، اختلاف ارتفاع شدید، خطا در انجام هم مرجع سازی تصاویر و غیره، اینترفروگرام حاصل شده تا حدی دارای نویز می‌باشد. از این رو برای کاهش نویز رخ داده از یک فیلتر کاهش دهنده نویز فاز به نام فیلتر گلدستین^۲ استفاده می‌شود (نگاره ۵).

اینترفروگرام تولید شده حاوی اطلاعات ارتفاعی می‌باشد. اما به علت وجود تناوب در فاز بین π و π ، لذا می‌بایست که این اطلاعات متناوب به اطلاعاتی مطلق و از نوع ارتفاع تبدیل شود. این کار با انجام عملیات unwrapping صورت می‌پذیرد (Goldstein and Werner, 1998). جهت انجام unwrapping از الگوریتم SNAPHU استفاده می‌شود. پس

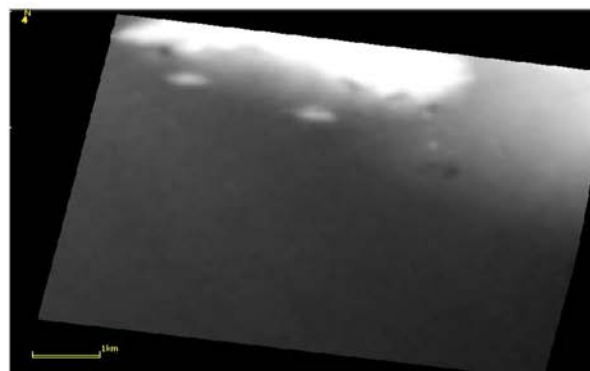
^۲- Goldstein

با توجه به حجم وسیع تحت پوشش هر تصویر کامل سنتینل، می‌توان بخشی از تصویر که مدنظر می‌باشد را جدا نمود. لذا با توجه به اینکه بخشی از شهر تهران در قسمت IW1 داده‌های این مقاله که در بخش ۲-۳ توضیح داده شد قرار دارد لذا این بخش از هر دو تصویر جدا می‌شود و ادامه فرآیند تولید مدل رقومی زمین بر روی این تصاویر جدید انجام می‌شود. مرحله بعد تولید اینترفروگرام از زوج تصویر می‌باشد. این مرحله پس از انجام هم مرجع سازی^۱ میان تصاویر صورت می‌پذیرد. همان طور که در بخش ۳ توضیح داده شد، اینترفروگرام از حاصل ضرب مختلط پیکسل به پیکسل تصاویر حاصل می‌شود، در نگاره ۵ اینترفروگرام حاصل از زوج تصویر سنتینل-۱ نمایش داده شده است. اینترفروگرام تولید شده همانند تصاویر اصلی از نوارهای

^۱- Registration

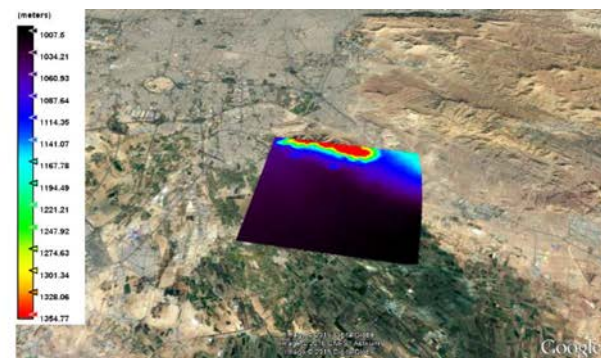
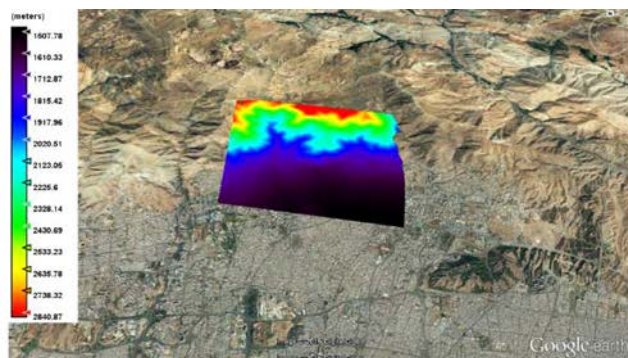


(ب)



(الف)

نگاره ۶: الف) مدل رقومی ارتفاعی تولید شده از بخشی از جنوب تهران، ب) مدل رقومی ارتفاعی تولید شده از بخشی از شمال تهران



نگاره ۷: موقعیت جغرافیایی و وضعیت مدل‌های رقومی ارتفاعی تولید در جنوب (الف) و شمال (ب) تهران

کوهستانی و دیگری منطقه‌ای هموار می‌باشند انتخاب شده و از تصویر اصلی جدا می‌گردند. منطقه کوهستانی از شمال تهران، و منطقه هموار از جنوب تهران انتخاب می‌شود. مراحل ذکر شده فوق بر روی این تصاویر پیاده‌سازی و اجرا می‌شوند. در نگاره ۶ مدل ارتفاعی تولید شده در این دو ناحیه نمایش داده شده است. در نگاره ۷ نیز موقعیت جغرافیایی و وضعیت مدل‌های رقومی ارتفاعی تولید شده از نظر بصری و کیفی قابل مشاهده می‌باشد. در بخش بعد به بررسی نتایج کمی مدل‌های رقومی ارتفاعی تولید شده با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و ارائه دقت حاصل پرداخته شده است.

۵- بحث و بررسی نتایج آزمایش‌ها

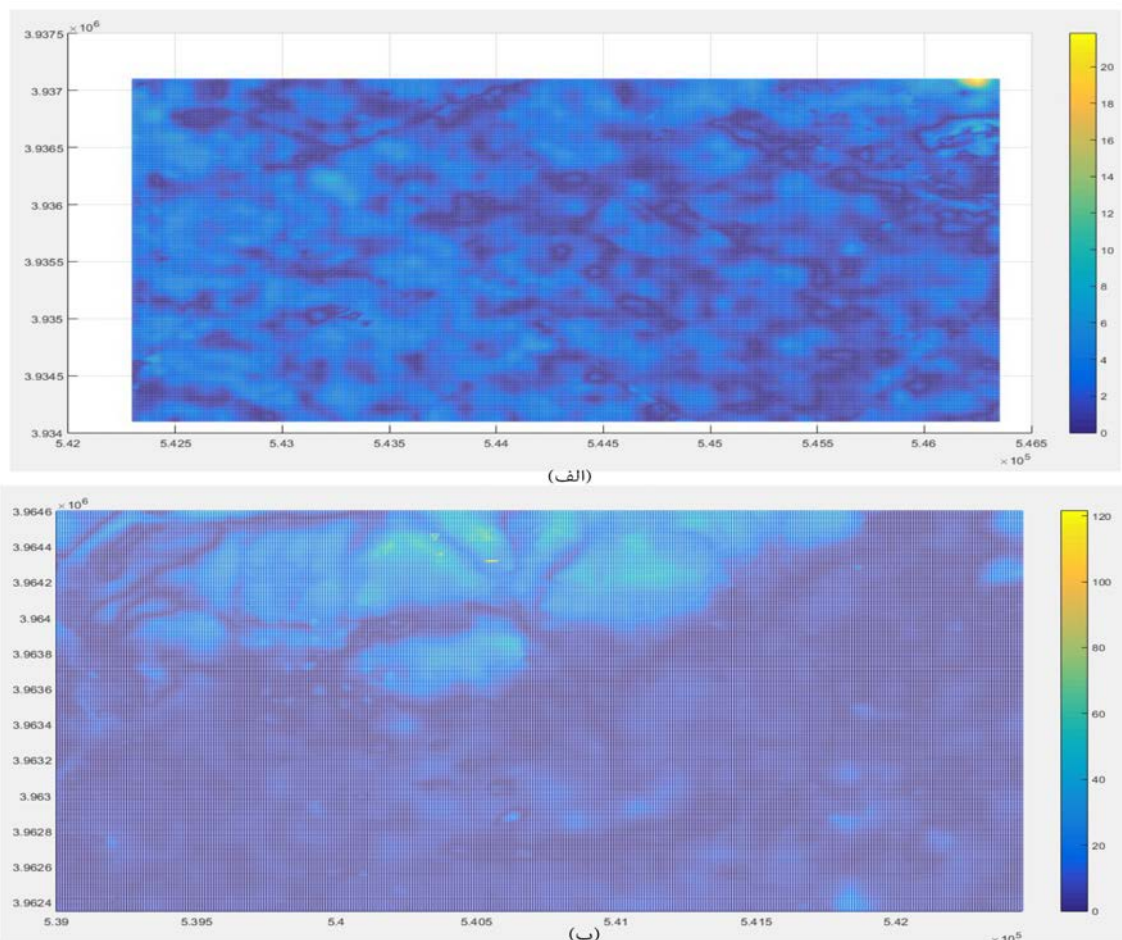
پس از تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین با استفاده از

از انجام unwrapping نیاز است که هندسه تصویربرداری از حالت رنج مایل^۱ به رنج زمینی^۲ تبدیل شود.

پس از تغییر هندسه تولید شده اطلاعات ارتفاعی به صورت نسبی تولید می‌شود. برای مطلق شدن مدل رقومی ارتفاعی نیاز است که یا از نقطه کنترل و یا از روش تناظریابی دو مدل رقومی که اخیراً در نرم افزارهایی همچون SNAP استفاده می‌شود، بهره‌برداری گردد. در پژوهش حاضر، از روش دوم استفاده شده است. در این روش مدل رقومی تولید شده که دقت معلوم و مشخصی دارد جهت رسیدن به صحت مدنظر، از تناظریابی با مدل رقومی‌ای همچون SRTM که از صحت کافی برخوردار است استفاده می‌کند، بی آن که به نقطه کنترل نیازی باشد. برای انجام آزمایش‌های مورد نظر در این مقاله، دو بخش از منطقه تهران که یکی منطقه‌ای

^۱- Slant Range

^۲- Ground Range



نگاره ۸: تصویر خطای رخ داده در دو مدل رقومی (الف) منطقه هموار و (ب) منطقه کوهستانی

همان طور که انتظار می‌رفت در مناطق هموار نتایج در مقایسه با مناطق کوهستانی مطلوب‌تر می‌باشد. پس از تست خطای ۵۳ و حذف خطاهای بزرگ^۱ رخ داده در مدل رقومی، میزان خطای انحراف معیار برای مدل رقومی ارتفاعی منطقه هموار (جنوب تهران) ۱/۲۶ متر و برای منطقه کوهستانی (شمال تهران) ۱۰/۳۲ متر به دست آمده است. در نگاره ۹ هیستوگرام نرمال شده خطای رخ داده در هر دو مدل رقومی نمایش داده شده است. نمودار افقی بیانگر میزان خطای ارتفاعی و واحدهای عمودی درصد خطای مدنظر را نمایش می‌دهند.

تصاویر سنتینل-۱ و مقایسه آن با مدل ارتفاعی رقومی مرجع که دقت ارتفاعی آن یک متر می‌باشد، دقت مدل رقومی تولید شده تعیین گردید. به منظور بررسی دقت مدل ارتفاعی رقومی تولید شده، یک شبکه منظم از نقاط کنترل به ابعاد ۱۳۸۷۶۱ از منطقه هموار و یک شبکه منظم از نقاط کنترل به ابعاد ۷۸۱۹۶ از منطقه کوهستانی از مدل رقومی مرجع استخراج گردیده است. ارتفاع این نقاط با ارتفاع نقاط متناظر بر روی مدل ارتفاعی رقومی تولید شده مقایسه شده است. تصویر خطای مدل رقومی تولید شده در هر دو ناحیه هموار و کوهستانی در نگاره ۸ نشان داده شده است. هر پیکسل از این تصاویر در واقع اختلاف ارتفاع دو مدل رقومی در محل نقاط کنترل می‌باشد.

^۱- Blunder error

تصاویر راداری سنتینل-۱ با توان تفکیک مکانی متوسط این امکان را جهت تولید مدل ارتفاعی از سطح کشور فراهم می‌سازند.

این تحقیق اولین مطالعه در مورد دقت مدل ارتفاعی رقومی حاصل از تصاویر راداری سنتینل-۱ در ایران می‌باشد. در این مقاله با استفاده از زوج تصویر راداری سنتینل-۱ از نوع تصویربرداری IW و با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری با عبور تکراری از قسمت‌هایی از تهران مدل ارتفاعی رقومی تولید شده است.

مدل ارتفاعی رقومی تولید شده با استفاده از یک مدل ارتفاعی رقومی مرجع با دقت ارتفاعی یک متر که اطلاعات ارتفاعی آن به روش زمینی و فتوگرامتری جمع‌آوری شده است، مورد ارزیابی قرار گرفت. در منطقه کوهستانی دقت ارتفاعی ۱۰/۳۲ متر و در منطقه هموار دقت ۱/۲۶ متر حاصل شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که این تصاویر ماهواره‌ای قابلیت تولید مدل ارتفاعی رقومی نسبتاً مطلوب خصوصاً در مناطق غیر کوهستانی را دارند.

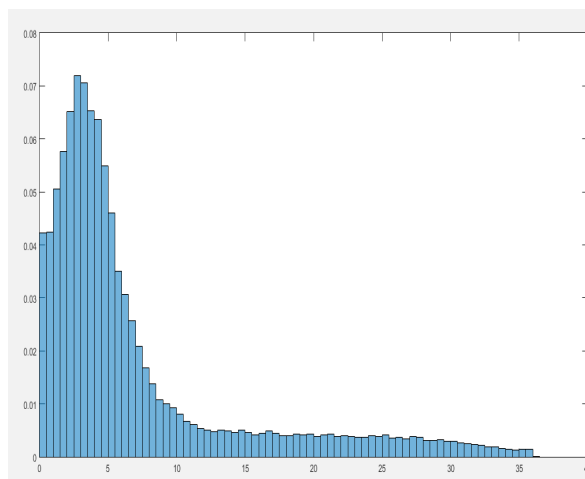
۷- ارائه پیشنهادات

با در نظر گرفتن این نکته که تصاویر راداری ماهواره‌ای سنتینل-۱، تصاویری با توان تفکیک مکانی متوسط می‌باشند و در کنار نرم افزارهای حمایت کننده به صورت رایگان به کاربران ارائه می‌شوند، پیشنهاد می‌شود که از این اطلاعات در جهت ایجاد فرصت و ابزاری در راستای تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین از سطح کشور ایران استفاده شود.

۸- سپاسگزاری

بدینوسیله از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران و جناب آقای دکتر مدیری بابت حمایت‌های معنوی از نویسندگان این مقاله و همچنین در اختیار قرار دادن بخشی از اطلاعات ارتفاعی جمع‌آوری شده از شهر تهران جهت تولید مدل ارتفاعی رقومی مرجع، تشکر و قدردانی می‌شود.

همان گونه که در نگاره فوق مشخص است دیده می‌شود که اکثر خطای رخ داده شده کمتر از حدوداً ۱۰ متر می‌باشد، اگرچه در بعضی مناطق خصوصاً مناطق با توپوگرافی کوهستانی سخت خطای بیش از ۲۰ متر نیز رخ می‌دهد.



نگاره ۹: هیستوگرام خطای رخ داده شده در تولید مدل ارتفاعی رقومی با استفاده از تصاویر سنتینل-۱

با توجه به مشخص شدن توانمندی این تصاویر و تکنیک تداخل سنجی راداری در تولید مدل ارتفاعی رقومی سطح زمین و وجود ویژگی‌های منحصر به فرد تصاویر راداری می‌توان به لزوم اهمیت مطالعه و استفاده هرچه بیشتر از این تصاویر در تولید مدل ارتفاعی رقومی سطح زمین پی برد. نباید از این نکته غافل شد که این ماهواره تصاویری با توان تفکیک مکانی و زمانی مناسب از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۱ (Martínez and et.all, 2016) بصورت رایگان در اختیار کاربران قرار می‌دهد که می‌تواند در مواردی از جمله پایش دوره‌ای سطح زمین بسیار سودمند باشد.

۶- جمع بندی

با توجه به توسعه تکنولوژی و شروع پروژه‌های جدید تصویربرداری ماهواره‌ای از زمین و لزوم اهمیت وجود مدل رقومی ارتفاعی از سطح کشور می‌توان به اهمیت مطالعه هر چه بیشتر بر روی این تصاویر پی برد. یکی از آخرین پروژه‌های سنجش از دور ماهواره‌ای، پروژه سنتینل می‌باشد.

for single-pass SAR interferometry. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International (Vol. 2, pp. 1000-1003). IEEE.

11- Nitti, D. O., Bovenga, F., Nutricato, R., Intini, F., & Chiaradia, M. T. (2013). On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 250-271.

12- Pitz, W., & Miller, D. (2010). The TerraSAR-X satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 615-622.

13- Soja, M. J., & Ulander, L. M. (2013, July). Digital canopy model estimation from TanDEM-X interferometry using high-resolution lidar DEM. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International* (pp. 165-168). IEEE.

14- www.Earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1

15- Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., González, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220-2234.

۹- منابع و مآخذ

۱- قنادی، م.، (۱۳۹۲)، ارزیابی روش‌های تناظریابی تصویری در تصاویر ماهواره‌ای راداری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران.

۲- قنادی، م.، افتخاری، ا.، سعادت سرشت، م.، (۱۳۹۳)، استخراج اطلاعات ارتفاعی زمین با استفاده از مؤلفه دامنه تصاویر TerraSAR-X، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صفحه ۱-۴.

۳- واجدیان، س.، (۱۳۸۷)، پایش دگر شکلی پوسته با استفاده از تکنیک تداخل سنجی رادار با دریچه مصنوعی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران.

4- Eftekhari, A., Ghannadi, M. A., Motagh, M., & Seresht, M. S. (2013). 3D object coordinates extraction by radargrammetry and multi-step image matching. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 147-151.

5- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.

6- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035-4038.

7- Lazecky, M., Comut, F. C., Qin, Y., & Perissin, D. (2017). Sentinel-1 Interferometry System in the High-Performance Computing Environment. In *The Rise of Big Spatial Data* (pp. 131-139). Springer International Publishing.

8- Makineci, H. B., & Karabörk, H. (2016). EVALUATION DIGITAL ELEVATION MODEL GENERATED BY SYNTHETIC APERTURE RADAR DATA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.

9- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.

10- Moreira, A., Krieger, G., Hajnsek, I., Hounam, D., Werner, M., Riegger, S., & Settlemyer, E. (2004, September). TanDEM-X: a TerraSAR-X add-on satellite

