

ارائه روشی جهت بهبود مدل ارتفاعی رقومی حاصل از تصاویر سنتینل-۱ با استفاده از مدل رقومی SRTM و تبدیل موجک دوبعدی

امیررضا مرادی^۱

محمدامین قنادی^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۱۴

چکیده

تولید مدل رقومی زمین با قدرت تفکیک و دقت ارتفاعی بالا همیشه یکی از مهم‌ترین اهداف سنجش از دور ماهواره‌ای بوده است. یکی از ارکان اصلی سنجش از دور ماهواره‌ای، سنجش از دور راداری می‌باشد. تولید مدل ارتفاعی رقومی از سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری به علت ویژگی‌های منحصر به فرد این تصاویر برای محققین جذاب است. در سال‌های اخیر پروژه‌های فضایی بسیاری آغاز به اخذ اطلاعات از سطح کره زمین کرده‌اند که یکی از آخرین آنها پروژه سنتینل می‌باشد. سنتینل-۱ بخش راداری پروژه سنتینل است. مدل‌های رقومی حاصل از تداخل سنجی راداری به علت وجود خطاهای متنوع از جمله خطا در اطلاعات فاز اینترفروگرام دارای خطا و گاهی اوقات اشتباه بزرگ در نقاط ارتفاعی می‌باشند. از این رو مدل‌های رقومی حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری پس از تولید نیاز به بهبود دارند.

در این مقاله روشی برای بهبود مدل رقومی ارتفاعی به دست آمده از تصاویر سنتینل-۱ با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی موجود SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) و روشی بر اساس تبدیل موجک دوبعدی، پیشنهاد می‌شود. تصاویر مورد استفاده در این مقاله بخشی از شمال شهر تهران است. مدل ارتفاعی رقومی تولید شده با استفاده از روش پیشنهادی با مدل ارتفاعی رقومی مرجع یک متر با دقت ارتفاعی بالا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج مقاله نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به شکل مؤثری در بهبود دقت مدل رقومی حاصل از تصاویر سنتینل-۱ عمل می‌کند. با استفاده از این روش خطای مدل رقومی ارتفاعی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (۳۰٪ الی ۸۲٪) و این بدین معنی می‌باشد که با حفظ قدرت تفکیک مدل رقومی حاصل از تصاویر سنتینل-۱ می‌توان دقت ارتفاعی آن را به شکل محسوسی بهبود داد.

واژه‌های کلیدی: مدل رقومی ارتفاعی، تبدیل موجک دوبعدی، تداخل سنجی راداری، تصاویر سنتینل-۱

۱- دکتری ژئودزی، عضو هیأت علمی گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک (نویسنده مسئول) a-moradi@arakut.ac.ir

۲- دکتری فتوگرامتری، عضو هیأت علمی گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک m.ghannadi@arakut.ac.ir

۱- مقدمه

مدل ارتفاعی رقومی زمین^۱ (DEM) نمایش فیزیکی زمین و تعیین توپوگرافی آن است که بوسیله یک مدل سه بعدی رقومی نمایش داده می‌شود. تولید DEM با قدرت تفکیک مکانی^۲ بالا و همچنین دقت و صحت ارتفاعی مطلوب بطور گسترده در کاربردهای متفاوت استفاده می‌شود. DEM کاربردهای فراوانی دارد که 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، نقشه‌برداری توپوگرافی، پایش زمین لغزش، آنالیز فرونشست و تولید سامانه اطلاعات مکانی اشاره نمود (Makineci & Karabörk, 2016). یکی از اصلی‌ترین منابع اطلاعاتی مورد نیاز جهت تولید DEM تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. در سنجش از دور ماهواره‌ای غالباً تصاویر نوری و راداری جهت تولید DEM استفاده می‌شوند. بزرگترین مزیت استفاده از تصاویر راداری جهت تولید DEM در مقایسه با تصاویر نوری، قابلیت تصویربرداری راداری در شب و روز و شرایط آب و هوایی متنوع است (Mohammad Amin Ghannadi, 2013).

دو استراتژی تولید DEM از تصاویر راداری، تداخل‌سنجی راداری^۳ (Chu, Das, & Lindenschmidt, 2017; Lombardi, Lorusso, & Fasano, & Milillo, 2016; Xinshuang, Lingling, Xiaoliang, Xitao, & Wei, 2018) و رادارگرامتری است (Balz, Zhang, & Liao, 2013; Dong, 2018; Zhang, Balz, Luo, & Liao, 2018; M. A. Ghannadi & Saadatseresht, 2018; Saadatseresht & Ghannadi, 2018). در فرآیند تداخل‌سنجی از اطلاعات فاز تصاویر استفاده می‌شود و این در حالی است که اطلاعات دامنه تصاویر در فرآیند رادارگرامتری مورد استفاده واقع می‌گیرد (M. Ghannadi, Saadatseresht, & Eftekhary, 2014). در تداخل‌سنجی راداری از تصاویر با طول باز کوتاه میان زوج تصویر و در رادارگرامتری از تصاویر با طول باز بلند استفاده می‌شود (M. Ghannadi & SaadatSeresh, 2014). هر کدام

از این دو استراتژی مزایا و معایب خاص خود را دارند که در مطالعه‌های صورت گرفته در گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Capaldo et al., 2015).

با استفاده از تداخل‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای راداری می‌توان برای مناطق با وسعت بالا DEM تولید نمود. در سال‌های گذشته مطالعات فراوانی در حوزه تداخل‌سنجی راداری صورت گرفته است. در سال ۱۹۷۴ برای اولین بار اثر طول مبنا بر روی نقشه توپوگرافی تولید شده از تداخل‌سنجی راداری مورد ارزیابی قرار گرفت. این موضوع توسط سایر پژوهشگران از جمله زبکر و گلدستین در سال ۱۹۸۶ نیز مورد پیگیری قرار گرفت (Geymen, 2014). اولین ماهواره^۴ SAR که در مدار قرار گرفت SEASAT بود که توسط ناسا^۵ در سال ۱۹۷۸ به فضا پرتاب شد. در سال ۱۹۹۰ ماهواره ماجلان^۶ برای رصد سایر سیارات به فضا پرتاب شد. سازمان فضایی اتحادیه اروپا (ESA^۷) در سال‌های بعد ماهواره‌های ERS^۸ 1/2 را برای تصویربرداری از سطح زمین ارسال نمود (Geymen, 2014). یکی از مأموریت‌های موفق تولید DEM از تصاویر ماهواره‌ای راداری با فرآیند تداخل‌سنجی، پروژه^۹ SRTM است. SRTM از ۵۶ درجه جنوبی تا ۶۰ درجه شمالی کره زمین را پوشش می‌دهد. ناسا مدل ارتفاعی رقومی با قدرت تفکیک ۳۰ متر و ۹۰ متر را به رایگان در اختیار کاربران قرار داده است. پروژه موفق دیگر نیز TanDEM-X است. در این پروژه از ماهواره‌های TerraSAR-X استفاده می‌شود. TanDEM-X با استفاده از تداخل‌سنجی راداری مدل ارتفاعی سطح زمین را بصورت سراسری با قدرت تفکیک بالا تولید می‌کند (Gao, Liu, Li, & Wu, 2017). بهبود DEM تولید شده از تصاویر TerraSAR-X نیز توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است (Xinshuang et al., 2018). در سال‌های اخیر علاوه

4- Synthetic Aperture Radar

5- Nasa

6- Magellan

7- The European Space Agency

8- European Remote Sensing

9- Shuttle Radar Topography Mission

1- Digital Elevation Model

2- Spatial Resolution

3- Interferometry SAR

سنجنده قابلیت اخذ تصاویر 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 تصویربرداری کند. بنابراین در صورت استفاده از هر دو سکوی سنتینل-۱ قدرت تفکیک زمانی^۲ و یا بعبارتی بازدید^۳ سنتینل-۱ به ۶ روز خواهد رسید. زاویه برخورد^۴ 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 Strip Map (SM)، حالت Interferometric Wide Swath (IW)، حالت Extra Wide Swath (EW)، حالت Wave Mode (WM). حالت IW اصلی‌ترین نوع تصویربرداری سنتینل-۱ با اهداف تداخل سنجی راداری می‌باشد (Yagüe-Martínez et al., 2016). پهنای نوار تصویربرداری در این حالت ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. قدرت تفکیک مکانی در این نوع از تصویربرداری ۵ متر در امتداد آزمون^۵ و ۲۰ متر در امتداد رنج^۶ می‌باشد و این نشان دهنده حجم بزرگ این تصاویر و نیاز به روش‌ها و نرم افزارهایی با قابلیت پردازش داده‌های سنگین می‌باشد. تصاویر IW از سه sub-swath به نام‌های IW1, IW2 و IW3 تشکیل شده است، این تقسیم بندی در امتداد پیکسل‌ها می‌باشد. در تصویربرداری این حالت از تکنیک TOPSAR^۷ استفاده شده است (Yagüe-Martínez et al., 2016).

ارزیابی دقت تداخل سنجی راداری با تصاویر سنتینل-۱ (Yagüe-Martínez et al., 2016) و همچنین تولید DEM از این تصاویر از موضوعات مورد مطالعه چند سال اخیر بوده است (Letsios et al.; Nikolakopoulos & Kyriou, 2015). غالباً DEM حاصل از تداخل سنجی راداری نیاز به بهبود دارد. یکی از اصلی‌ترین دلایل آن نیز اثر خطاهای فاز است که در

بر پروژه‌های SRTM و TanDEM-X ماهواره‌های راداری متنوعی شروع به تصویربرداری از سطح زمین کرده‌اند. از مهم‌ترین ماهواره‌های راداری می‌توان به ALOS-PALSAR، Radarsat-2 و CosmoskyMed اشاره نمود که با اخذ تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط و بالا در باندهای متفاوت نقش مؤثری در جمع‌آوری اطلاعات از سطح زمین داشته‌اند. یکی از پروژه‌های اخیر سنجش از دور ماهواره‌ای، سنتینل^۱ است. ماهواره‌های سنتینل انواع تصاویر چندطیفی (Immitzer, Vuolo, & Atzberger, 2016)، راداری (Yagüe-Martínez et al., 2016) و حرارتی (Toming et al., 2017) را از سطح زمین اخذ می‌کنند. بیشترین کاربرد اطلاعات اخذ شده از مأموریت سنتینل، تداخل سنجی راداری با هدف تعیین جابجایی سطح زمین (Yagüe-Martínez et al., 2016)، تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین (Letsios, Faraslis, & Stathakis; Nikolakopoulos & Kyriou, 2015)، تهیه نقشه پوشش اراضی از سطح زمین (Ghorbanian et al., 2020)، کشف تغییرات پوشش اراضی (Clement, Kilsby, & Moore, 2018)، تعیین دمای سطح زمین (Nie, Ren, Zheng, Ghent, & Tansey, 2020)، کشف عوارض (Taghadosi, Hasanlou, & Eftekhari, 2019) و پایش سطح زمین (Y. Li, Martinis, Plank, & Ludwig, 2018) می‌باشد. سنتینل-۱ بخش راداری پروژه سنتینل است. در این مطالعه از تصاویر سنتینل-۱ برای تولید DEM استفاده شده است، از این رو در ادامه جزئیات بیشتری در مورد این ماهواره و تصاویر آن ارائه می‌شود.

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 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 با مرکز فرکانس ۵,۴۰۵ که در باند C قرار دارد را حمل می‌کند. این

2- Temporal Resolution

3- Revisit

4- Incidence Angle

5- Azimuth

6- Range

7- Terrain Observation with Progressive Scans SAR

1- Sentinel

۲، مروری بر مبانی تئوری تبدیل موجک و تبدیل موجک دوبعدی صورت می‌پذیرد. سپس در بخش ۳، روش پیشنهادی جهت بهبود مدل ارتفاعی رقومی تولید شده از تصاویر سنتینل-۱ معرفی می‌شود. در بخش ۴، نتایج آزمایش‌ها نمایش داده شده و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند و نهایتاً در بخش ۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- مروری بر مبانی تئوری تبدیل موجک و تبدیل موجک دوبعدی

تبدیل موجک به عنوان یک ابزار تحلیل طیفی، مبتنی است بر بسط هر تابع مانند $f(t)$ به صورت رابطه (۱)

$$f(t) = \sum_i a_i \psi_i(t) \quad (1)$$

که در آن، a_i ضرایبی حقیقی موسوم به ضرایب بسط و ψ_i ها نیز توابعی حقیقی بنام توابع بسط یا پایه‌ای برای فضای شامل f هستند. در صورتی که این توابع پایه، متعامد یک‌به‌یک^۶ باشند می‌توان نوشت (Primer, Burrus, & Gopinath, 1998):

$$\langle \psi_k(t), \psi_l(t) \rangle = \int (\psi_k(t) \psi_l(t)) dt = \delta_{k,l} \quad (2)$$

و در این صورت، ضرایب بسط در رابطه (۱) از رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشند:

$$a_k = \langle f(t), \psi_k(t) \rangle = \int \psi_k(t) f(t) dt \quad (3)$$

در یک سری فوریه، توابع پایه متعامد سیستم، توابع نمایی و در سری تیلور این توابع، غیرمتعامد و به صورت مجموعه چندجمله‌ای‌ها خواهند بود. اما در تبدیل موجک، توابع پایه، امواجی با انرژی متمرکز موسوم به موجک‌ها می‌باشند که می‌توانند متناسب با سیگنال مورد تحلیل، انتخاب گشته و متعامد یا غیر متعامد باشند. در این تبدیل می‌توان رابطه (۱) را چنین بازنویسی نمود:

$$f(t) = \sum_k \sum_j a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (4)$$

در این رابطه، $\psi_{j,k}$ ها همان موجک‌ها یا توابع پایه

موارد بسیاری تبدیل به اشتباهات^۱ در نقاط ارتفاعی می‌شود (Zhang, Wang, Huang, Zhou, & Wu, 2012). یکی دیگر از عوامل ایجاد نویز در فاز اینترفروگرام میزان خط مبنای^۲ تصاویر است که در این زمینه مطالعاتی پیرامون اثر این نوع از نویز بر DEM تولید شده از تصاویر سنتینل-۱ صورت گرفته است (Nonaka, Asaka, Iwashita, & Ogushi, 2019). برای بهبود DEM تولید شده از تصاویر SAR از روش‌های مختلفی استفاده شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از اطلاعات موجود در SRTM می‌باشد. برای نمونه در یکی از مطالعات صورت گرفته از اطلاعات SRTM برای بهبود DEM تولید شده از ERS1/2 استفاده شده است. با کمک اطلاعات SRTM، فاز اینترفروگرام نواحی با هم‌چسبی پایین، ارتقا یافته است (Zhang et al., 2012).

از مطالعات صورت گرفته می‌توان به این جمع‌بندی رسید که تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ پتانسیل بالایی در تولید محصولاتی همچون DEM دارند. در سال‌های اخیر مطالعاتی پیرامون ارزیابی دقت DEM تولید شده از تصاویر سنتینل-۱ و بهبود آن ارائه شده است. یکی از ابزارهای بهبود دقت DEM استفاده از اطلاعات SRTM است. در این مقاله نیز روشی جهت بهبود دقت DEM تولید شده از تصاویر سنتینل-۱ پیشنهاد می‌شود. در واقع نوآوری این پژوهش ارائه مدلی مبتنی بر تبدیل موجک^۳ دوبعدی است که از داده‌های ارتفاعی موجود در SRTM در جهت بهبود دقت مدل رقومی ارتفاعی سنتینل-۱ استفاده می‌کند. در این روش پیشنهادی، ابتدا با استفاده از دو زوج تصویر با عبور صعودی^۴ و نزولی^۵ ماهواره سنتینل-۱ از منطقه مورد مطالعه، DEM تهیه می‌شود. از فرآیند تداخل سنجی راداری برای این کار استفاده می‌شود. سپس با استفاده از SRTM موجود و روشی مبتنی بر موجک دوبعدی، دقت آن افزایش می‌یابد. مباحث این مقاله بدین صورت می‌باشد که در بخش

1- Outliers

2- Base Line

3- Wavelet

4- Ascending

5- Descending

6- Orthonormal

تبدیل موجک سریع شناخته می‌شود، مبتنی است بر دو رابطه بازگشتی (۸) و (۹) که بین توابع مقیاس و موجک در مقیاس‌های متوالی برقرار هستند (Primer et al., 1998):

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) \varphi(2t - n) \quad (8)$$

و

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n) \varphi(2t - n) \quad (9)$$

در عبارات فوق ضرایب بسط یعنی h و g ها به ترتیب فیلترهای مقیاس و موجک نامیده می‌شوند و ارتباط آن‌ها با ضرایب c و d در رابطه (۷) به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد (Primer et al., 1998):

$$c_j(k) = \sum_m h(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (10)$$

و

$$d_j(k) = \sum_m g(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (11)$$

همچنین بین ضرایب h و g رابطه (۱۲) برقرار می‌باشد:

$$g(n) = (-1)^n h(1 - n) \quad (12)$$

در صورتی‌که نمونه‌های عددی موجود از یک سیگنال را متناظر با مجموع c_{j+1} ها در نظر بگیریم آنگاه دو رابطه (۱۰) و (۱۱) متناظر با اعمال تبدیل موجک گسسته به عنوان فیلترسازی بوده و دو عبارت فوق را که به محاسبه دو بخش مشتمل بر کلیات و جزئیات سیگنال می‌انجامد، بعنوان تبدیل گسسته موجک سیگنال، لحاظ نموده و برعکس در بازسازی سیگنال اولیه نیز می‌توان از ضرایب مقیاس و موجک در تناظر با تبدیل موجک معکوس به صورت رابطه (۱۳) استفاده نمود (Primer et al., 1998):

$$c_{j+1}(k) = \sum_m h(k - 2m) c_j(m) + \sum_m g(k - 2m) d_j(m) \quad (13)$$

با تعمیم آنچه که در مورد تبدیل یک بعدی بیان گردید می‌توان برای محاسبه تبدیل موجک گسسته دوبعدی نیز بر مبنای فیلترهای موجک و مقیاس از روابط (۱۴) بهره جست (Z. Li, 1996):

سیستم بوده و ضرایب بسط را تبدیل گسسته موجک تابع و برعکس، رابطه (۴) را تبدیل گسسته معکوس موجک می‌دانند. در هر سیستم موجک، مجموعه توابع پایه سیستم در نتیجه انبساط یا انقباض و نیز جابجایی یک تابع مولد اولیه بنام موجک مادر ($\psi(t)$) بدست می‌آیند؛ یعنی

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (5)$$

یکی از ویژگی‌های جذاب تبدیل موجک گسسته، امکان توجه به مقوله قدرت تفکیک داده‌ها و استفاده از آن به عنوان یک ابزار تحلیل چندتفکیکی^۱ است؛ بدین منظور لازم است که رابطه (۴) به شکل دیگری بازنویسی شود. برای این کار از دسته‌ای از توابع موسوم به توابع مقیاس^۲ یا $\{\varphi_k(t)\}$ در کنار موجک‌ها، برای بازسازی فضای توابع بهره برده می‌شود. در اینجا نیز مشابه با موجک مادر، از یک تابع مولد موسوم به تابع مقیاس اولیه یا $\varphi(t)$ استفاده نموده و با جابجا نمودن آن از طریق وارد کردن پارامتر جابجایی k ، دسته توابع پایه‌ای را که همان توابع مقیاس $\varphi_k(t)$ هستند، به صورت رابطه (۶) خواهیم داشت:

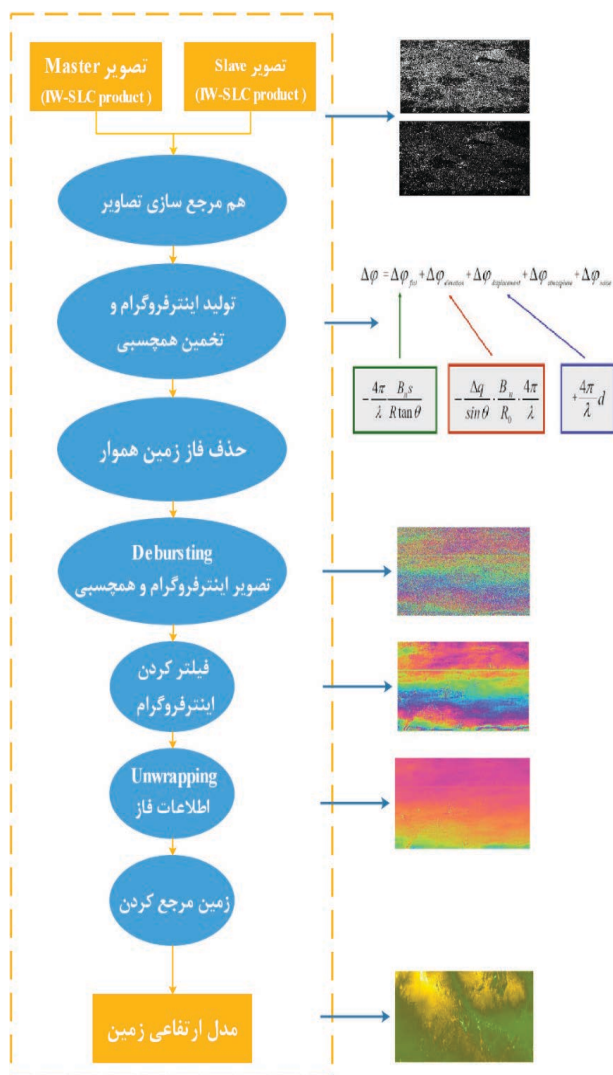
$$\forall k \in \mathbb{Z}, \varphi_k(t) = \varphi(t - k) \quad (6)$$

این توابع قادر به تبیین کلیات سیگنال مورد تحلیل بوده و موجک‌ها در مقیاس‌های مختلف، جزئیات سیگنال را پوشش می‌دهند؛ به نحوی که می‌توان متناظر با رابطه (۴) به بیان دیگری برای تبدیل موجک دست یافت که در آن هر تابع دلخواه مانند $g(t)$ به دو بخش مجزا یعنی کلیات و جزئیات به صورت زیر تفکیک می‌گردد (Primer et al., 1998):

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k \varphi_k(t) + \sum_{j=0}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (7)$$

مقوله تفکیک جزئیات و کلیات سیگنال مورد تحلیل، پایه الگوریتم محاسبه تبدیل موجک گسسته در عمل می‌باشد که در سال ۱۹۸۹ توسط مالات (Mallat, 1989) معرفی و توسط بیلکین و همکاران در سال ۱۹۹۱ توسعه داده شد (Beylkin, Coifman, & Rokhlin, 1991). این فرآیند که به عنوان

توجه به قابلیت تبدیل موجک در تفکیک جزئیات و کلیات سیگنال‌ها به عنوان یک ابزار تحلیل چندتفکیکی، فرآیند معرفی شده در نگاره ۲ برای بهبود کیفیت مدل ارتفاعی زمین مدنظر قرار گرفته است.



نگاره ۱: تولید DEM از تصاویر سنتینل-۱ با استفاده از

تداخل سنجی راداری

در این فرآیند، ابتدا با استفاده از تبدیل موجک گسسته دوبعدی، یعنی بر مبنای معادلات (۱۴)، کلیات و جزئیات هریک از مدل‌های رقومی تولید شده از حالات صعودی و نزولی سنتینل-۱، تفکیک گردیده و با توجه به ماهیت این

$$\begin{cases} c_j(n, m) = \sum_k \sum_l h(k-2n)h(l-2m)c_{j+1}(k, l) \\ d_{j,1}(n, m) = \sum_k \sum_l g(k-2n)h(l-2m)c_{j+1}(k, l) \\ d_{j,2}(n, m) = \sum_k \sum_l h(k-2n)g(l-2m)c_{j+1}(k, l) \\ d_{j,3}(n, m) = \sum_k \sum_l g(k-2n)g(l-2m)c_{j+1}(k, l) \end{cases} \quad (14)$$

همچنین بازیابی سیگنال اولیه از تبدیل موجک گسسته دو بعدی معکوس، به طریق رابطه (۱۵) انجام می‌گردد (Z. Li, 1996)

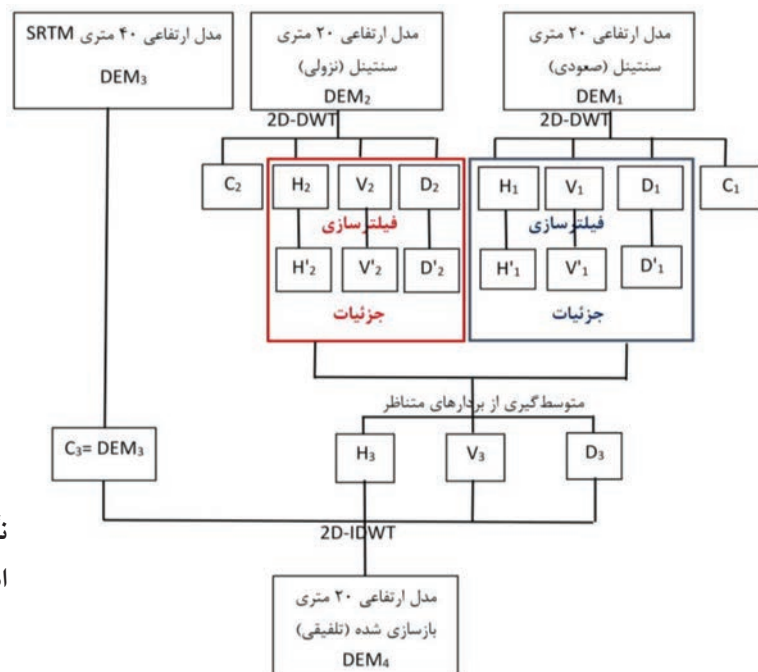
$$\begin{aligned} c_{j+1}(n, m) = & \sum_k \sum_l h(2k-n)h(2l-m)c_j(k, l) \\ & + \sum_k \sum_l g(2k-n)h(2l-m)d_{j,1}(k, l) \\ & + \sum_k \sum_l h(2k-n)g(2l-m)d_{j,2}(k, l) \\ & + \sum_k \sum_l g(2k-n)g(2l-m)d_{j,3}(k, l) \end{aligned} \quad (15)$$

در این‌جا نیز ضرایب c_j نمایانگر کلیات سیگنال دوبعدی و ضرایب d_j نیز معرف جزئیات آن می‌باشند؛ با این تفاوت که در هر سطح، جزئیات به سه بخش افقی، عمودی و مورب تقسیم‌بندی می‌گردند.

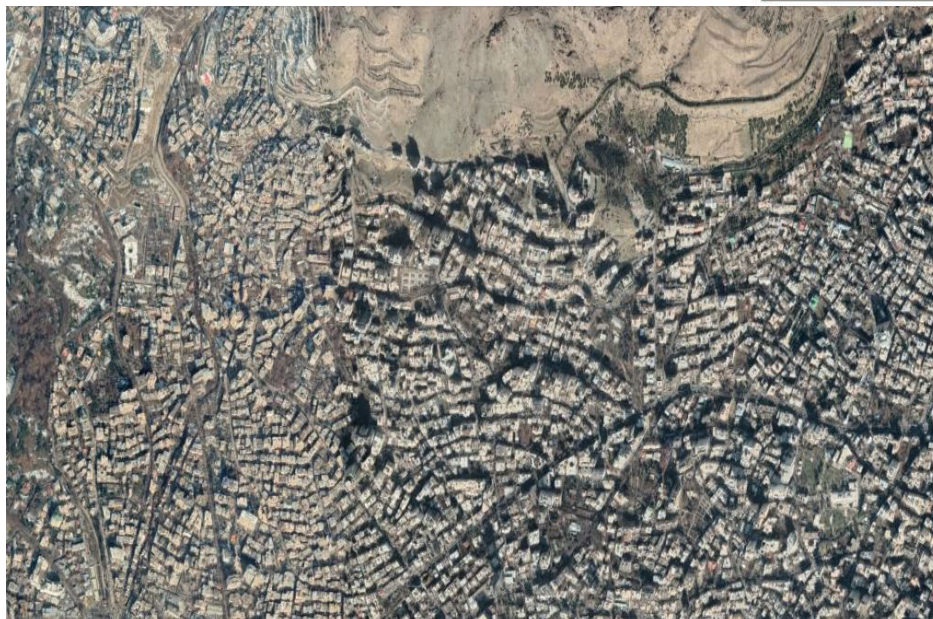
۳- روش پیشنهادی

در این مقاله از تداخل سنجی راداری برای تولید DEM از تصاویر سنتینل-۱ استفاده شده است. فرآیند صورت گرفته برای این کار در فلوچارت نگاره ۱ نمایش داده شده است. برای دریافت جزئیات بیشتر از فرآیند تولید DEM از تصاویر سنتینل-۱ می‌توان به مقاله قنادی و همکاران (۱۳۹۷) مراجعه نمود (ENAYATI & Khesali, 2019).

همانگونه در بخش مقدمه اشاره شد، DEM تولید شده از تداخل سنجی راداری بعلت وجود خطا در فاز اینترفروگرام نیاز به اصلاح دارد. در این بخش روشی جهت بهبود DEM حاصل از تصاویر سنتینل-۱ با کمک SRTM موجود براساس تبدیل موجک دو بعدی ارائه می‌شود. با



نگاره ۲: فرآیند بهبود کیفیت مدل ارتفاعی زمین با استفاده از تبدیل موجک گسسته دوبعدی



نگاره ۳: منطقه مورد مطالعه واقع در شمال شهر تهران

دارای قدرت تفکیک ۴۰ متر بوده و داده‌های مربوط به مدل SRTM با همین قدرت تفکیک (بازسازی شده از SRTM ۳۰ متری)، از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار می‌باشند، در فرآیند بازسازی به کمک تبدیل موجک گسسته دو بعدی معکوس، داده‌های مدل مذکور را جایگزین بردار کلیات نموده و نهایتاً با اعمال تبدیل موجک گسسته دو بعدی معکوس، خروجی مدل ارتفاعی بهبود یافته با قدرت تفکیک ۲۰ متری محاسبه می‌گردد.

مدل‌ها، برای بازسازی مدل ارتفاعی بهبود یافته، دو اقدام مدنظر قرار گرفته است؛ اولاً با آستانه‌گذاری روی ضرایب متناظر با جزئیات، این ضرایب فیلتر شده و متوسط نتایج به‌عنوان جزئیات یا بخش با فرکانس بالای مدل بهبود یافته لحاظ می‌گردد.

ثانیاً از آنجا که کلیات بدست آمده از تبدیل موجک

جدول ۱: مشخصات تصاویر سنتینل-۱ مورد استفاده جهت تولید DEM

عبور	تاریخ اخذ تصویر Master	تاریخ اخذ تصویر Slave	قطبش	زاویه برخورد	حالت تصویر	قدرت تفکیک مکانی
صعودی	۲۰۱۵/۰۳/۲۴	۲۰۱۵/۰۵/۱۱	VV	۴۳/۹ درجه	IW-SLC	۵×۲۰
نزولی	۲۰۱۴/۱۱/۲۵	۲۰۱۵/۰۵/۲۴	VV	۳۹/۲ درجه	IW-SLC	۵×۲۰



نگاره ۴: منطقه تحت پوشش زوج تصویر سنتینل-۱ با عبور صعودی (۱) و نزولی (۲) ماهواره از شهرستان تهران

۴-۳- پیاده‌سازی آزمایش‌ها

از DEM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری SRTM موجود جهت بهبود DEM تولید شده از تصاویر سنتینل-۱ استفاده شده است. جهت ارزیابی مدل رقومی تولید شده توسط تصاویر سنتینل-۱ از DEM مرجع یک متر که با دقت ارتفاعی بالا از منطقه تهیه شده است، استفاده می‌گردد. این اطلاعات ارتفاعی با استفاده از روش فتوگرامتری هوایی جمع‌آوری شده است. دو شبکه با ۱۹۵۴۹ نقطه ارتفاعی خروجی تولید DEM با استفاده از دو زوج تصویر سنتینل-۱ از منطقه می‌باشد. همچنین SRTM نیز بصورت یک شبکه ارتفاعی با ۴۸۱۶ نقطه از منطقه وارد فرآیند روش پیشنهادی می‌شود. نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی، به‌عنوان DEM بهبود یافته منطقه مورد مطالعه در نگاره ۳ به تصویر درآمده است. به‌علاوه، به جهت مقایسه و بررسی کارایی روند پیشنهادی، مدل ارتفاعی زمین در منطقه مورد مطالعه، بدون استفاده از تبدیل موجک دوبعدی و تنها از طریق میانگین‌گیری از خروجی مدل‌های رقومی حاصل از حالت‌های صعود و فرود ماهواره سنتینل-۱ (با و بدون

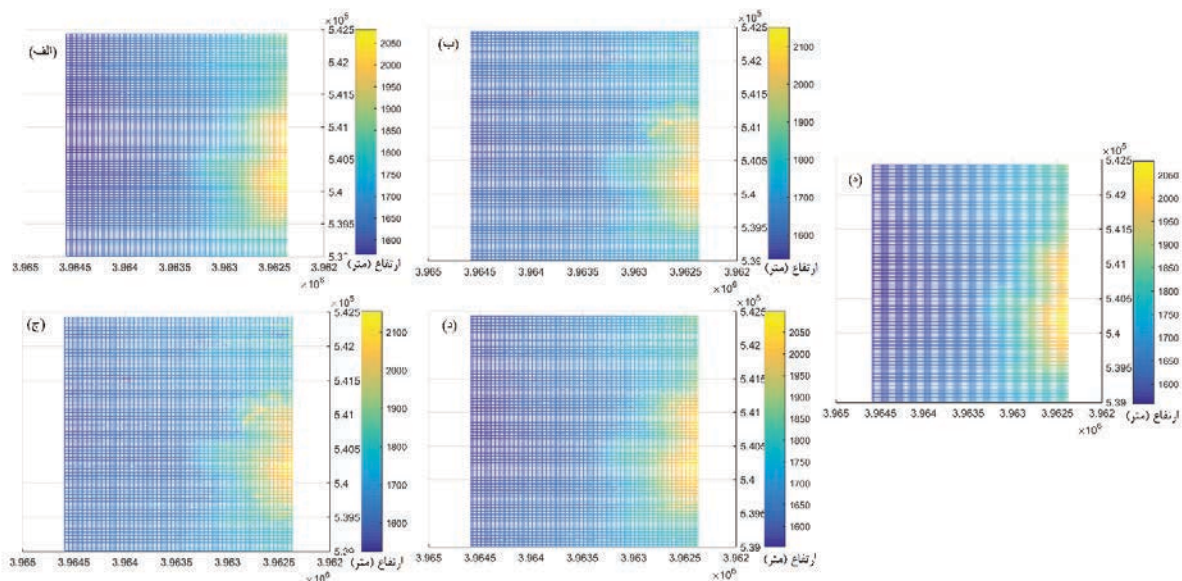
۴-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مقاله جهت تولید مدل ارتفاعی زمین از دو زوج تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ استفاده شده است. یکی از این زوج تصاویر مربوط به تصاویر با عبور صعودی در مدار ماهواره و زوج تصویر دیگر تصاویر با عبور نزولی ماهواره در مدار مربوطه می‌باشد. مشخصات این تصاویر در جدول ۱ ارائه شده است. در نگاره ۴ محدوده تحت پوشش تصاویر سنتینل-۱ معرفی شده در جدول ۱، نمایش داده شده است.

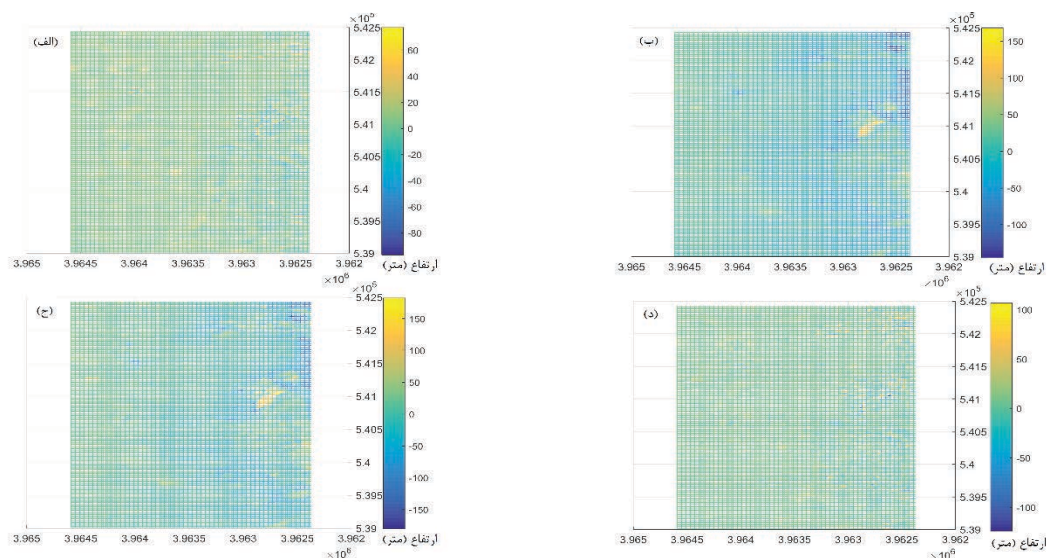
۴-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جهت انجام آزمایش‌ها و تولید DEM، کشور ایران و بخشی از شمال شهر تهران می‌باشد. مختصات UTM^۱ محدوده مورد مطالعه از شمال شرقی به مختصات (۵۴۲۴۵۰، ۳۹۶۴۵۹۰) تا جنوب غربی به مختصات (۵۳۹۰۱۰، ۳۹۶۲۳۵۰) و در زون ۳۹ شمالی می‌باشد. نگاره ۳ منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

1- Universal Transverse Mercator



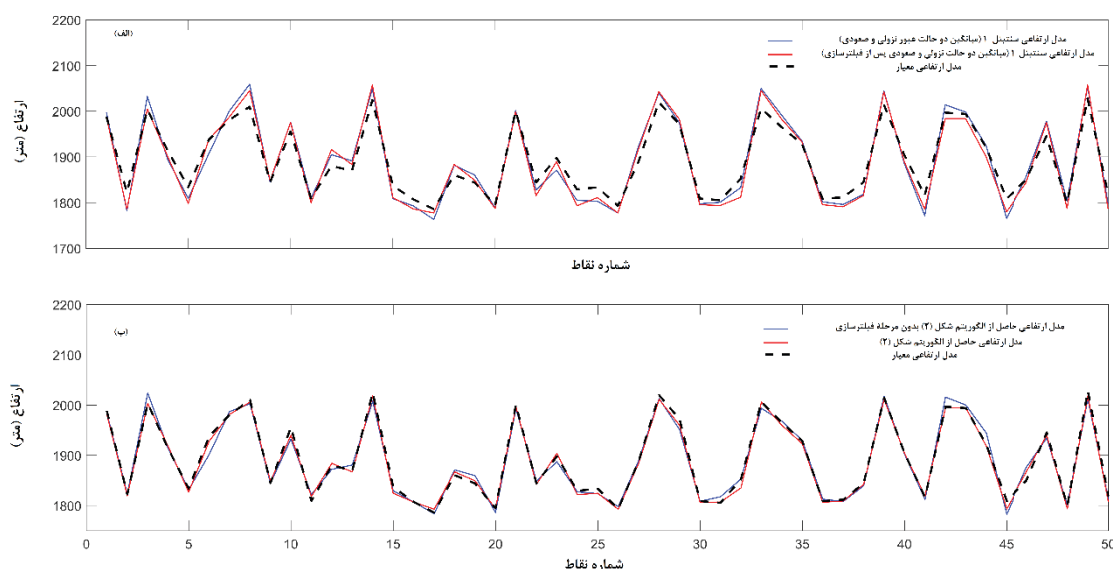
نگاره ۵: به ترتیب از (الف) تا (ه)، مدل‌های ارتفاعی حاصل از اجرای روند روش پیشنهادی نگاره ۲، میانگین حالت صعودی و نزولی ماهواره سنتینل-۱ با فیلترسازی، میانگین دو مدل بدون فیلترسازی، تبدیل موجک بدون فیلترسازی و مرجع



نگاره ۶: به ترتیب از (الف) تا (د)، اختلافات مدل ارتفاعی معیار با مدل‌های ارتفاعی حاصل از اجرای روند روش پیشنهادی نگاره ۲، میانگین حالت صعودی و نزولی ماهواره سنتینل با فیلترسازی داده‌ها، میانگین دو مدل بدون فیلترسازی و تبدیل موجک بدون فیلترسازی

آمده است را به عنوان مرجع لحاظ نموده و خروجی‌های متناظر با همه مدل‌های مذکور نیز در نگاره ۵ نمایش داده شده‌اند. این مدل‌ها به ترتیب DEM‌های حاصل از اجرای روند روش پیشنهادی نگاره ۲، میانگین حالت صعودی و

فیلترسازی داده‌ها) و بار دیگر با حذف مرحله فیلترسازی از روند پیشنهاد شده در نگاره ۲، برآورد شده‌اند. همچنین، برای اعتبار سنجی و مقایسه، DEM صحیح و دقیق با دقت ارتفاعی بالا از منطقه مورد نظر که به شیوه فتوگرامتری بدست



نگاره ۷: مقایسه ارتفاعات معیار در نقاط تصادفی واقع در منطقه مورد مطالعه با ارتفاعات نقاط متناظرشان، حاصل از (الف) میانگین حالت صعودی و نزولی ماهواره سنتینل-۱، بدون فیلترسازی و پس از فیلترسازی داده‌ها و (ب)، اعمال تبدیل موجک بدون فیلترسازی و به‌کارگیری روند پیشنهادی نگاره ۲

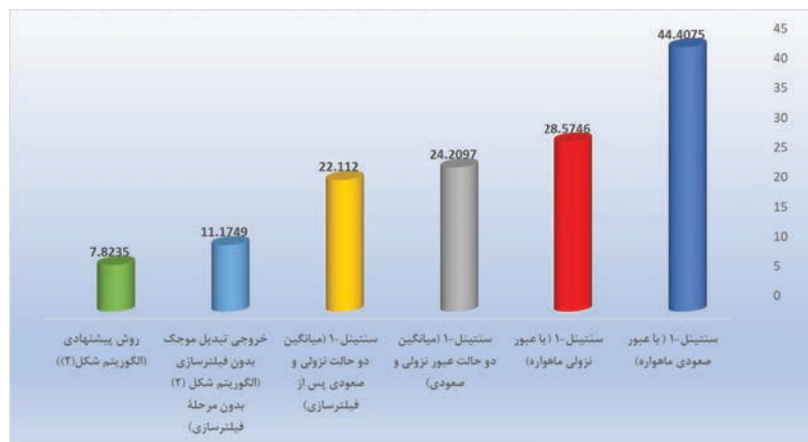
جدول ۲: مقادیر RMSE حاصل از مقایسه مدل ارتفاعی مرجع با سایر مدل‌های ارتفاعی

مبنای مدل ارتفاعی	RMSE (متر)
سنتینل-۱ (با عبور صعودی ماهواره)	۴۴/۴۰۷۵
سنتینل-۱ (با عبور نزولی ماهواره)	۲۸/۵۷۴۶
سنتینل-۱ (میانگین دو حالت عبور نزولی و صعودی)	۲۴/۲۰۹۷
سنتینل-۱ (میانگین دو حالت نزولی و صعودی پس از فیلترسازی)	۲۲/۱۱۲۰
خروجی تبدیل موجک بدون فیلترسازی (الگوریتم نگاره ۲ بدون مرحله فیلترسازی)	۱۱/۱۷۴۹
روش پیشنهادی (الگوریتم نگاره ۲)	۷/۸۲۳۵

جهت بررسی مناسب‌ترین نتایج بدست آمده، آزمونی دیگر طراحی گردید که در آن تعدادی نقاط مشترک به صورت اتفاقی از تصاویر ارائه شده در نگاره ۵ انتخاب و ارتفاعات برآورد شده این نقاط، با ارتفاعات معیار متناظرشان در نگاره ۷، مقایسه شده است. تمام مقایسه‌های صورت گرفته میان DEMها در شرایط هم مرجع‌سازی کلی^۱ می‌باشد.

نزولی ماهواره سنتینل-۱ با فیلترسازی داده‌ها، میانگین دو مدل بدون فیلترسازی، تبدیل موجک بدون فیلترسازی و DEM مرجع می‌باشد.

نگاره ۶ نیز اختلافات DEM مرجع با هر یک از DEMهای تولید شده را به ترتیب قبل نشان می‌دهند. مقادیر مربوط در هریک از زیربخش‌ها در واقع همان اختلاف ارتفاع مدل مرجع از هریک از DEMها می‌باشد که بیانگر خطای مربوط به هر نقطه است.



نگاره ۸: مقایسه دقت DEMهای به دست آمده از روش های مختلف براساس معیار RMSE (متر)

نگاره ۲ مدنظر قرار گرفته، توانسته نزدیک به ۳۰٪ دیگر خطای مدل را کاهش دهد. در مجموع روش پیشنهادی به ترتیب باعث بهبود نتایج مدل های رقومی تولید شده در جدول ۲ به میزان تقریبی ۸۲، ۷۲، ۶۸، ۶۵ و ۳۰ درصد می شود. در نگاره ۸ RMSE مدل های به دست آمده از روش های مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند.

همچنین در نگاره ۷ ملاحظه می گردد که ارتفاعات حاصل از اعمال فرآیند پیشنهادی به طرز ملموسی به ارتفاعات معیار نزدیک تر بوده و در وهله اول فیلترسازی و متعاقب آن اصلاح کلیات با استفاده از فرآیند پیشنهاد شده توانسته است بالاترین بهبود را در مدل ارتفاعی ایجاد نماید.

درانتها ذکر سه نکته در ارتباط با اعمال تبدیل موجک گسسته دوبعدی در فرآیند پیشنهادی ضروری است؛ اول آنکه تنوع توابع پایه یا موجک مادری که در تبدیل موجک مورد استفاده قرار می گیرد یکی از جذابیت های این تبدیل بوده و در مقاله حاضر، با آزمودن انواع توابع پایه موجود (Primer et al., 1998)، منتج بدان شده است که از توابع پایه معروف هار^۱ بهترین نتیجه را بدست آوریم و این شاید بدین علت باشد که این توابع در تبدیل موجک دوبعدی و در تفکیک جزئیات و کلیات داده ها که منجر به تولید داده هایی با قدرت تفکیک ۴۰ متری از داده های ۲۰ متری می گردد، نگاهی هم وزن به همه داده ها داشته و بهترین سنخیت را با هدف مورد نظر این مقاله دارا می باشد. نکته

۴-۴- ارزیابی نتایج

همانطور که در نگاره ۶ ملاحظه می گردد محدوده اختلافات با مدل ارتفاعی مرجع، برای مدل حاصل از روند پیشنهاد شده در نگاره ۲ کمترین مقادیر را دارا می باشد. البته بهتر است به صورت کمی نیز میزان صحت مدل های حاصل، به ویژه مدل برآورد شده از اعمال فرآیند نگاره ۲ مورد ارزیابی قرار گیرند؛ بدین منظور، مجدداً با در نظر گرفتن ارتفاعات اندازه گیری شده در منطقه به روش فتوگرامتری هوایی، به عنوان مدل رقومی معیار، مقادیر خطا در قالب RMSE برای هریک از مدل ها محاسبه و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

مقادیر RMSE به خوبی مؤید بهترین کارایی در روند اصلاح و بهبود کیفیت مدل ارتفاعی حاصل از مأموریت سنیتیل-۱، برای روش پیشنهادی این مقاله بوده و حاکی از آن است که تزریق اطلاعات ارتفاعی کیفی ولی با قدرت تفکیک کمتر مدل SRTM، به عنوان کلیات یا داده های با فرکانس پائین در فرآیند بازسازی داده های ارتفاعی، مبتنی بر تبدیل موجک گسسته دوبعدی، نقش مهمی در بهبود صحت مدل خروجی داشته است.

روش پیشنهادی توانسته است مقدار RMSE در مدل ارتفاعی را از ۲۴/۲۰۹۷ متر به ۱۱/۱۷۴۹ متر، یعنی نزدیک به ۵۴٪ کاهش دهد و البته مطابق مقادیر مندرج در جدول ۲، اصلاح کلیات سیگنال به شیوه مذکور در کنار فیلترسازی جزئیات که به صورت توأمان در فرآیند نشان داده شده در

وجود اشتباه در نقاط ارتفاعی ناشی از وجود خطای فاز اینترفروگرام نیازمند اصلاح می‌باشد. بر این اساس، در مقاله حاضر شیوه‌ای برای دستیابی به مدل ارتفاعی با قدرت تفکیک متناظر با مدل ارتفاعی رقومی حاصل از تصاویر سنتینل-۱، یعنی ۲۰ متر و با دقت و صحتی بهبود یافته، مبتنی بر تبدیل موجک دوبعدی ارائه گردید. در روش پیشنهادی، فرآیند متداول فیلترسازی جزئیات مدل ارتفاعی، حاصل از اعمال تبدیل موجک دوبعدی گسسته بر مدل ارتفاعی، از یک سو و اصلاح کلیات مدل مورد تحلیل با جایگزینی DEM حاصل از تصاویر STRM، به عنوان مدلی با کیفیت ولی با قدرت تفکیک پائین‌تر در هنگام بازسازی مدل با استفاده از تبدیل موجک دوبعدی معکوس، از سویی دیگر منجر به تولید مدلی با قدرت تفکیک بالا و بهبود یافته گردید.

مدل بهبود یافته حاصل از اعمال فرآیند پیشنهادی پس از مقایسه با مدل رقومی مرجع حاصل از فرآیند فتوگرامتری هوایی، نسبت به هریک از مدل‌های ارتفاعی حاصل از حالات صعودی و نزولی ماهواره سنتینل-۱، میانگین آن‌ها بدون اعمال فیلتر، میانگین با اعمال فیلتر و نیز اعمال تبدیل موجک بدون فیلترسازی جزئیات، کمترین اختلاف را با مدل ارتفاعی مرجع نشان داده و میزان صحت این مدل از حیث اندازه RMSE، پس از مقایسه با مدل رقومی مرجع، نسبت به مدل‌های مذکور، به ترتیب به میزان تقریبی ۷۲٪، ۶۸٪، ۶۵٪ و ۳۰٪ بهبود یافته است.

در تبدیل موجک دوبعدی مورد استفاده، توابع پایه هار از میان موجک‌های معروف، بهترین نتیجه را تولید نمودند و در فرآیند فیلترسازی نیز آستانه‌گذاری نرم در مقایسه با آستانه‌گذاری سخت به میزان جزئی نتایج بهتری در پی داشتند که هر دو مقوله بررسی اثر دقیق‌تر موجک مادر انتخابی و یا قابل طراحی و نیز اثر انواع آستانه‌گذاری‌های پیچیده‌تر در کیفیت مدل ارتفاعی حاصل از روش مدنظر این مقاله، می‌توانند در تحقیقات آتی مورد مطالعه بیشتر قرار بگیرند.

دوم این است که در تحقیق حاضر از آستانه‌گذاری نرم برای فیلترسازی ضرایب متناظر با جزئیات حاصل از اعمال تبدیل موجک گسسته استفاده شده است که در آن بالحاظ نمودن آستانه δ ، با جزئیات d_i به طریق رابطه برخورد می‌گردد (Z. Li, 1996):

$$d'_i = \begin{cases} 0, & |d_i| \leq \delta \\ d_i - \delta, & d_i > \delta \\ d_i + \delta, & d_i < -\delta \end{cases} \quad (16)$$

که در رابطه (۱۶)، d'_i مقادیر حاصل از فیلترسازی جزئیات پس از آستانه‌گذاری بوده و مقدار آستانه برابر با میانه قدرمطلق جزئیات d_i انتخاب شده که در صورت صفر بودن میانه جزئیات، مقدار آستانه مساوی با پنج درصد حداکثر اندازه جزئیات لحاظ می‌گردد (Z. Li, 1996). انتخاب این نوع آستانه‌گذاری در مقایسه با آستانه‌گذاری سخت، منجر به بهبود جزئی نتایج گردیده است که البته در تحقیقات احتمالی آتی می‌توان سایر انواع آستانه‌گذاری و تأثیر آن بر نتایج و نیز در مورد نکته اول، یعنی انتخاب توابع پایه سیستم موجک، طراحی تابع پایه بهینه برای این منظور را بیشتر بررسی نمود. نکته سوم آن است که با توجه به تلفیق داده با قدرت تفکیک پائین‌تر SRTM با کلیات حاصل از تبدیل موجک، لازم است که موقعیت مسطحاتی نقاط متناظر در این دو دسته همخوانی داشته باشند که برای این مهم، موقعیت مسطحاتی نقاط مستخرج در مدل‌های ارتفاعی با قدرت تفکیک بالا، چنان انتخاب شده‌اند که مرکز هر سلول در شبکه این نقاط، مختصاتی برابر با رأس متناظرش در شبکه ارتفاعی با قدرت تفکیک پائین‌تر SRTM دارد.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله، ضمن مرور شیوه‌های استخراج مدل رقومی زمین از تصاویر ماهواره‌ای به ویژه تصاویر راداری، فرآیند استفاده از تصاویر سنتینل-۱ برای تولید DEM تبیین و ملاحظه گردید که چنین مدل ارتفاعی رقومی از زمین، علیرغم قدرت تفکیک بالای خود، به دلایلی همچون

Step Strategy for SAR Image Matching. Journal of Geomatics Science and Technology, 4(2), 11-24.

11. Ghannadi, M., Saadatseresht, M., & Eftekhary, A. (2014). Terrain height information extraction using TerraSAR-X images intensity component. Conferences of Geophysics, Iran, Tehran, 59-63.

12. Ghannadi, M. A., & Saadaseresht, M. (2018). A modified local binary pattern descriptor for SAR image matching. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 16(4), 568-572.

13. Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadzadeh, A., & Hasanlou, M. (2020). Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 167, 276-288.

14. Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. Remote Sensing, 8(3), 166.

15. Letsios, V., Faraslis, I., & Stathakis, D. (2019). InSAR DSM using Sentinel 1 and spatial data creation. In Proceedings of the 22th AGILE International Conference on Geographic Information Science (AGILE 2019).– Limassol: Cyprus University of Technology.

16. Li, Y., Martinis, S., Plank, S., & Ludwig, R. (2018). An automatic change detection approach for rapid flood mapping in Sentinel-1 SAR data. International journal of applied earth observation and geoinformation, 73, 123-135.

17. Li, Z. (1996). Multiresolution approximation of the gravity field. Journal of geodesy, 70(11), 731-739.

18. Lombardi, N., Lorusso, R., Fasano, L., & Milillo, G. (2016). Interferometric COSMO-SkyMed Spotlight DEM generation. Paper presented at the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).

19. Makineci, H., & Karabörk, H. (2016). Evaluation digital elevation model generated by synthetic aperture radar data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1.

20. Mallat, S. G. (1989). Multiresolution approximations

منابع و مأخذ

1. Balz, T., Zhang, L., & Liao, M. (2013). Direct stereo radargrammetric processing using massively parallel processing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, 137-146.

2. Beylkin, G., Coifman, R., & Rokhlin, V. (1991). Fast wavelet transforms and numerical algorithms I. Communications on pure and applied mathematics, 44(2), 141-183.

3. Capaldo, P., Nascetti, A., Porfiri, M., Pieralice, F., Fratarcangeli, F., Crespi, M., & Toutin, T. (2015). Evaluation and comparison of different radargrammetric approaches for Digital Surface Models generation from COSMO-SkyMed, TerraSAR-X, RADARSAT-2 imagery: Analysis of Beauport (Canada) test site. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 100, 60-70.

4. Chu, T., Das, A., & Lindenschmidt, K.-E. (2017). RADARSAT-2-based digital elevation models derived from InSAR for high latitudes of northern Canada. Journal of Applied Remote Sensing, 11(3), 035013.

5. Clement, M., Kilsby, C., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. Journal of Flood Risk Management, 11(2), 152-168.

6. Dong, Y., Zhang, L., Balz, T., Luo, H., & Liao, M. (2018). Radargrammetric DSM generation in mountainous areas through adaptive-window least squares matching constrained by enhanced epipolar geometry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 137, 61-72.

7. Enayati, H., Khesali, E. (2019). Generating Digital Elevation Model of the Earth Using Sentinel-1 Images and Interferometry. GEOGRAPHICAL DATA, 109-121.

8. Gao, X., Liu, Y., Li, T., & Wu, D. (2017). High precision DEM generation algorithm based on InSAR multi-look iteration. Remote Sensing, 9(7), 741.

9. Geymen, A. (2014). Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique. Arabian Journal of Geosciences, 7(2), 827-83.

10. Ghannadi, M., & SaadatSeresht, M. (2014). A Multi-

54(4), 2220-2234.

31. Zhang, D., Wang, F., Huang, Z., Zhou, L., & Wu, Y. (2012). Reconstruction of InSAR DEM using ERS-1/2 interferogram and SRTM data. In *Advances in Computational Environment Science*, Springer, Berlin, Heidelberg, 129-136.

and wavelet orthonormal bases of Transactions of the American mathematical society, 315.69-87, (1).

21. Mohammad Amin Ghannadi, Mohanmmad Saadatseresht & Hamid Abrishamimoghadam. (2013). Evaluation of Radar Spaceborne Image Matching Methods. (MSc). University of Tehran.

22. Nie, J., Ren, H., Zheng, Y., Ghent, D., & Tansey, K. (2020). Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval From Nighttime Middle-Infrared and Thermal-Infrared Sentinel-3 Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.

23. Nikolakopoulos, K., & Kyriou, A. (2015). Preliminary results of using Sentinel-1 SAR data for DSM generation. *European Journal of Geography*, 6(3), 52-68.

24. Nonaka, T., Asaka, T., Iwashita, K., & Ogushi, F. (2019). The Relationships between Errors of Dem and the Height of Ambiguity of Sentinel-1. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1725-1728.

25. Sidney Burrus, C., Gopinath, R. A., & Guo, H. (1998). Introduction to wavelets and wavelet transforms. A Primer; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA.

26. Ghannadi, M., & Saadatseresht, M. (2018). Efficient method for outlier removal in SAR image matching based on epipolar geometry. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 12(11), 1307-1312.

27. Taghadosi, M. M., Hasanlou, M., & Eftekhari, K. (2019). Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 138-154.

28. Toming, K., Kutser, T., Uiboupin, R., Arikas, A., Vahter, K., & Paavel, B. (2017). Mapping water quality parameters with sentinel-3 ocean and land colour instrument imagery in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 9(10), 1070.

29. Wang, X., Liu, L., Shi, X., Huang, X., & Geng, W. (2018). a High Precision dem Extraction Method Based on Insar Data. In *ISPAN*, (4), 211-216.

30. Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, 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*,