https://gep.ui.ac.ir/?lang=en
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 35, Issue 2, No.94, Summer 2024, pp. 1- 2
Received: 11/10/2022 Accepted: 09/01/2023

Evaluation of the Quality of a Digital Elevation Model (DEM) Prepared by Using Sentinel-1 Images for Extracting Waterway Networks: A Comparative Study in Taftan Watershed

Mostafa Mahdavifard[1], Ayoub Mohammadi [2], Mohammad Hossein Reazaei Moghaddam [3]*, Sadra Karimzadeh [4]

1- Master's graduate in Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
mostafamahdavi842@gmail.com

2- Post-doctorate student in Remote Sensing and Geographic Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran
mohammadi.ayub@tabrizu.ac.ir

3- Professor of Geomorphology Department, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran
rezmogh@tabrizu.ac.ir

4- Assistant professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran
sa.karimzadeh@tabrizu.ac.ir

Abstract

Morphometric study of a watershed plays a very important role in land structure. Remote sensing methods provide a good tool for studying and extracting stream networks. One of the common methods for extracting waterway networks and conducting a morphometric study of watersheds is the use of Digital Elevation Models (DEMs) with a high spatial resolution. The purpose of this study was to extract stream networks by using the DEMs of high spatial resolution, such as ALOS-1 and Sentinel-1, and those of medium spatial resolution like SRTM and TanDemX. To produce the DEM by using Sentinel-1 images, the InSAR method was applied. Finally, to validate the accuracy of this DEM for checking Sentinel-1 ability to extract stream networks, the ALOS-1 DEM with the spatial resolution of 12.5 m was used. The results revealed that the produced DEMs by using Sentinel-1 images had a high correlation of about 0.99 with the reference data of ALOS-1, thus showing the high

*Corresponding Author

Mahdavifard, M., Mohammadi, A., Rezaei Moghaddam, M. H., & Karimzadeh, S. (2023). Evaluation of the quality of Digital Elevation Model (DEM) prepared from Sentinel-1 images for waterway extraction: A comparative study in Taftan watershed. *Geography and Environmental Planning*, 35 (2), 1 -2.

10.22108/GEP.2023.135341.1547

capability of the DEM for extracting stream networks. The results of extracting the waterway networks demonstrated that each of the two DEMs of Sentinel-1 and ALOS-1 with high spatial resolutions could extract 9 waterway networks, while the digital models of SRTM and TanDemX with medium resolutions could only extract 7 and 6 stream networks, respectively. The studies indicated that the baseline parameters, as well as the time difference between the two Master and Slave images in InSAR, had to be highly considered by researchers to improve the quality of the Sentinel-1 DEM.
Keywords*:* Digital Elvation Model (DEM), Sentinel-1 Image, InSAR, Stream Extraction, Remote Sensing, Taftan

Introduction

Stream network is an important feature for hydrological modeling, geomorphological analysis of the landscape, and many other applications. Recently, Digital Elevation Models (DEM) have emerged as a powerful tool for assessing landscape deformation via time, place, and especially stream network analysis, which itself requires a DEM of high spatial resolution. In Iran, due to the lack of DEMs with high spatial resolutions, more digitized topographic maps are used, which are time-consuming to scan. With recent advances in optical and radar remote sensing, these limitations can be partially overcome and various methods can be used to produce DEMs. The main advantage of using radar data compared to other methods is that these types of satellites can capture images of the regions in any weather conditions and even during day and night. This can be an acceptable method for producing DEMs with high spatial resolutions in different spatial and temporal conditions. One of the most important and common methods of producing the DEMs of radar data is using InSAR technique, which considers the phase difference between two radar images to produce DEMs. So far, few studies have been conducted to produce a DEM with high spatial resolution and finally accurately extract waterway networks in Iran. Therefore, the aim of this study was to generate a DEM between Sentinel-1 images by using InSAR and evaluating it with the ALOS-PALSAR DEM. Finally, using the sentinel-1, ALOS, TanDemX, and SRTM DEMs, the stream networks could be extracted in the study area.

Materials and Methods

In this study, two images of Sentinel-1 with the time difference of about 12 days and baseline of 161 were used by InSAR to produce a DEM. The D8 algorithm was used to extract the stream networks from the DEMs of ALOS-1, SRTM-1arc, TanDemX, and Sentinel-1 in the study area.

Research findings

The DEM produced by Sentinel-1 had a correlation of 0.99 with the base-altitude digital model (ALOS), but the standard deviation between these two data was 31 m despite the obtained positive result. The DEMs of Sentinel-1 and ALOS-1 were both able to extract 9 rates of stream networks, but the DEMs of SRTM and TanDEMX were both able to extract 7 and 6 stream networks, respectively.

Discussion of Results & Conclusion

Analysis of the results obtained from the compatibility of the DEMs of Sentinel-1 and ALOS-1 showed that the high correlation between these two data could confirm extractions of the stream networks, which exactly resulted in the same extraction of the stream rate. On the other hand, SRTM and TanDemX satellites both had relatively similar results, but the reason for not extracting a rate with TanDemX compared to SRTM was the different spatial resolutions between the two satellites.

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی
سال ۳۵، پیاپی ۹۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۴۴- ۲۳
وصـول: ۱۴۰۱/۷/۱۹ پـذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

مقاله پژوهشی

بررسی کیفیت مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده از تصاویر سنتینل -۱ برای استخراج آبراهه‌ها: مطالعهٔ تطبیقی در حوضهٔ آبخیز تفتان

مصطفی مهدوی‌فرد، کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز،دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران
mostafamahdavi842@gmail.com
ایوب محمدی، محقق پسادکترای سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز،دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران
mohammadi.ayub@tabrizu.ac.ir
محمد حسین رضائی مقدم *، استاد تمام گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز،دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران
rezmogh@tabrizu.ac.ir
صدرا کریم‌زاده، ، استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز،دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، تبریز، ایران
sa.karimzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده

بررسی مورفومتری یک حوضهٔ آبخیز نقش بسیار مهمی در ساختار زمین دارد. روش‌های سنجش از دور ابزار مناسبی برای بررسی و استخراج شبکهٔ آبراهه به شمار می‌آیند. یکی از روش‌های رایج برای استخراج شبکهٔ آبراهه و بررسی مورفومتری حوضهٔ آبخیز بهره‌گیری از مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی زیاد است. هدف از این پژوهش، استخراج شبکهٔ آبراهه با استفاده از مدل‌های رقومی با قدرت تفکیک مکانی زیاد مانند آلوس و سنتینل -۱ و مدل‌های رقومی با قدرت تفکیک مکانی متوسط مانند اس آر تی ام و تان دم ایکس است. به‌منظور تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. درنهایت، برای اعتبارسنجی دقت این مدل رقومی ارتفاعی از آلوس استفاده شد. نتایج نشان‌دهندهٔ آن است که مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده از سنتینل -۱ با دادهٔ مرجع در این پژوهش (آلوس) دارای همبستگی حدود ۰/۹۹ که نشان‌دهندهٔ قابلیت زیاد این مدل رقومی ارتفاعی در استخراج شبکهٔ آبراهه است. نتایج استخراج آبراهه حاکی از آن است که دو مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی زیاد سنتینل -۱ و آلوس هرکدام تعداد ۹ شبکهٔ آبراهه را استخراج کردند؛ در حالی که مدل‌های رقومی با قدرت تفکیک مکانی متوسط اس آر تی ام و تان دم ایکس به‌ترتیب توانستند فقط ۷ و ٦ شبکهٔ آبراهه را استخراج کنند. بررسی‌ها در این پژوهش نشان‌دهندهٔ آن است که برای بهبود کیفیت مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ باید پارامترهای خط مبنا و همچنین اختلاف زمانی بین دو تصویر قدیم و جدید در تداخل‌سنجی راداری بسیار موردتوجه پژوهشگران قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: DEM، تصاویر راداری، تداخل‌سنجی راداری، آبخیزداری، سنجش از دور

---

*نویسنده مسؤول

مهدوی‌فرد، مصطفی، محمدی، ایوب، رضائی مقدم، محمد حسین، کریم زاده، صدرا. (۱۴۰۲). بررسی کیفیت مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده از تصاویر سنتینل-۱ جهت استخراج آبراهه‌ها: مطالعه تطبیقی در حوضه آبخیز تفتان. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۵ (۲)، ۴۴- ۲۳ .

10.22108/GEP.2023.135341.1547

مقدمه

شبکهٔ آبراهه از ویژگی‌های مهم برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی، تجزیه‌وتحلیل ژئومورفولوژیکی چشم‌انداز و بسیاری از کاربردهای دیگر است (Luo et al., 2014, p. 183). تعیین دقیق آبراهه برای درک جریان آب از روی زمین و کاهش سیلاب حیاتی و ضروری است (Cho et al., 2007, p. 3182). به‌طور کلی به کمک بررسی‌های مورفومتری شبکهٔ آبراههٔ حوضه‌ای آبخیز رفتار رودخانه برای سال‌های آینده تخمین و برآورد می‌شود (Parveen et al., 2012, p. 1042). به‌تازگی مدل‌های رقومی ارتفاعی[1] به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای ارزیابی تغییر شکل چشم‌انداز با زمان، مکان و به‌ویژه با بررسی و تحلیل شبکهٔ آبراهه ظهور کرده است (Paul et al., 2017, p. 311). پژوهش‌ها نشان‌دهندهٔ آن است که با افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی، اطلاعات مستخرج و مشتق از آن بیشتر می‌شود (مکرم و همکاران، ۱۳۹۷، ص. ۸۱)؛ از این رو، ترسیم شبکهٔ آبراهه به قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی وابسته است (Paul et al., 2017, p. 311). در بسیاری از موارد در کشور ما به علت فقدان مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی زیاد از نقشه‌های توپوگرافی اسکن و رقومی‌شده به‌منظور تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی و استخراج مشتقات آن استفاده می‌شود که این روش زمان‌بر و به دقت بسیار زیاد نیازمند است. با پیشرفت‌های اخیر در زمینهٔ سنجش از دور این محدودیت تا حدودی پوشش داده و با استفاده از روش‌های مختلف مدل رقومی ارتفاعی با دقت مکانی زیاد و بدون محدودیت زمانی و مکانی تهیه می‌شود. اغلب از چهار تکنیک رایج: عملیات زمینی (نقشه‌برداری میدانی)، فتوگرامتری، تداخل‌سنجی راداری و تکنیک لایدار برای تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی استفاده می‌شود (Bossler et al., Jansen., 2015, p. 102010, p. 25 ;). از بین این روش‌ها تصاویر ماهواره‌ای اپتیک و راداری رایج‌ترین منبع برای تولید مدل رقومی ارتفاعی به شمار می‌آیند (Ghannadi et al., 2022, p. 1Jacobsen et al., 2013, p. 483 ;). مزیت اصلی تصاویر راداری در مقایسه با تصاویر اپتیک، این است که این نوع تصاویر در شرایط مختلف آب و هوایی و حتی در شب در دسترس هستند. در برخی موارد، مدل‌های رقومی ارتفاعی تولیدشده از تصاویر استریوی نوری و راداری برای بهبود کیفیت این مدل‌ها تلفیق می‌شوند (Ghannadi et al., 2022, p. 1Bhardwaj et al., 2019, p. 1). تداخل‌سنجی راداری و رادارگرامتری دو تکنیک مهم برای تهیهٔ مدل‌های رقومی ارتفاعی با استفاده از تصاویر راداری است. در فرایند رادارگرامتری از تصاویر دامنهٔ[2] راداری با زوج تصاویر استریوسکوپی حاصل از یک جهت و درعین‌حال، زاویهٔ انتشار متفاوت استفاده و در تداخل‌سنجی راداری اختلاف سیگنال‌های فاز[3] به کار گرفته می‌شود (Crosetto., 2000, p. 367). اغلب دو نوع الگوریتم برای جریان تکی و جریان چندگانه برای محاسبه جهت آبراهه رایج است. در کنار این الگوریتم‌ها یک الگوریتم دیگر مدل رقومی ارتفاعی با عملگر ریخت‌شناسی ریاضی تحلیل می‌شود؛ از این رو، مدل‌های رقومی ارتفاعی به‌منظور استخراج آبراهه‌ها با قدرت تفکیک مکانی زیاد مناسب هستند (Amatulli., 2018, p. 1Yan et al., 2018, p. 1322) تاکنون پژوهش‌های بسیار کمی در ایران دربارهٔ استخراج شبکهٔ

1. Digital Elevation Model
2. amplitude
3. Phase

آبراهه با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی با توان تفکیک مکانی زیاد انجام شده است. در این بخش به پیشینهٔ داخلی و خارجی تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی با دقت مکانی زیاد و استخراج شبکهٔ آبراهه از مدل‌های رقومی دقت زیاد توجه می‌شود.

پیشینهٔ پژوهش

حسین‌زاده و جهادی طرقی (۱۳۸۹) مدل‌های رقومی ارتفاعی تهیه‌شده از سنجندهٔ استر، نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی را به‌منظور استخراج حوضهٔ آبریز ارزیابی کردند. آنها بیان داشتند که الگوریتم‌های هیدرولوژی استخراج آبراهه از مدل‌های رقومی ارتفاعی در مناطق کم شیب برای تجزیه‌وتحلیل‌های طول رود ناتوان و در مناطق پرشیب با خطاهایی همراه بوده است.

برای نخستین بار قنادی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از تصاویر سنتینل -۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مدل رقومی ارتفاعی شهر و حومهٔ تهران را تهیه کردند. نتایج حاکی از آن بود که دقت ارتفاعی (انحراف معیار) مدل رقومی ارتفاعی به‌ترتیب در مناطق هموار و کوهستانی معادل ۱/۲۶ و ۱۰/۳۲ متر است. این پژوهشگران پیشنهاد کردند که از تصاویر سنتینل -۱ برای تهیهٔ مدل‌های رقومی ارتفاعی مناطق هموار و غیر کوهستانی استفاده شود.

مکرم و همکاران (۱۳۹۷) برای ارزیابی، مدل‌سازی و استخراج آبراهه در جنوب شهرستان از الگوریتم جاذبه برای بهبود و افزایش دقت مکانی مدل رقومی ارتفاعی ۹۰ متر استفاده کردند. پژوهشگران اظهار داشتند که استفاده از مدل جاذبه علاوه بر بهبود دقت مکانی مدل رقومی ارتفاعی باعث افزایش دقت در استخراج آبراهه شده است.

چو و همکاران در پژوهشی از داده‌های هوابرد با قدرت تفکیک مکانی ۱ متر برای تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی و استخراج آبراهه بهره گرفتند. نتایج این پژوهش نشان‌دهندهٔ آن بود که شناسایی کانال آبراهه با استفاده از مورفولوژی در مقیاس دقیق‌تر و با تأثیر بروی اطلاعات ارتفاعی عملکرد خوبی دارد (Cho et al., 2006).

لیو و ژانگ برای استخراج شبکهٔ زه‌کشی در منطقهٔ مطالعاتی‌شان از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۵ متر استفاده کردند. استفاده از این مدل رقومی ارتفاعی پژوهشگران را قادر کرد تا پارامترهایی همانند تعداد و طول آبراهه‌ها را با دقت زیاد استخراج کنند (Liu & Zhang, 2010).

شاوکی و همکاران از مدل‌های رقومی ارتفاعی جهانی (اس آر تی ام[1] و آلوس[2]) برای ارزیابی هندسهٔ پیکسل پایهٔ شبکهٔ آبراهه بهره گرفتند و نتایج حاصله را با مدل رقومی زمین[3] لایدار[4] با دقت مکانی ۱۲/۵ متر ارزیابی کردند. نتیجهٔ ارزیابی نشان از این دارد که مدل رقومی ارتفاعی آلوس با کمترین خطای ریشه میانگین مربعات (٤/٥٧) نسبت‌به سایر مدل‌های رقومی جهان برتری دارد (Shawky et al., 2019).

1. Shuttle-Radar-Topography-Mission (SRTM)
2. Advanced Land Observing Satellite (ALOS)
3. Digital Surface Model (DSM)
4. LiDAR

قنادی و همکاران به‌منظور حذف خطای تداخل‌سنجی نقاط دورافتاده در تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی با سنتینل -۱ از فیلتر ۲ بعدی کالمن استفاده کردند. پژوهشگران به این نتیجه دست یافتند که روش پیشنهادی به‌عنوان روشی مؤثر برای به‌روزرسانی نیمه خودکار DEM های تولیدشده از تصاویر سنتینل -۱ استفاده می‌شود (Ghannadi et al., 2022).

حوضهٔ آبخیز تفتان به‌عنوان منطقهٔ مطالعاتی در این پژوهش انتخاب شده است؛ زیرا این حوضه، منطقه‌ای با پستی و بلندی به‌نسبت زیاد و دارای سرشاخه‌های اصلی (رتبهٔ ۱ و ۲) است. پس حائز اهمیت است که این سرشاخه‌ها برای مدیریت منابع طبیعی در زمینهٔ آبخیزداری استخراج شوند. یکی دیگر از دلایل اصلی انتخاب این حوضه در دسترس بودن داده‌های ماهواره‌ای با معیارهای مناسب بود.

همان‌طور که از پژوهش‌های پیشین مشاهده شد، تاکنون در پژوهش‌های داخلی و خارجی از مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱[1] به‌منظور استخراج شبکهٔ آبراهه استفاده نشده و درحقیقت این پژوهش جزو اولین پژوهش در زمینهٔ یادشده است. هدف از این پژوهش، تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی از سنتینل -۱ با روش تداخل‌سنجی راداری، تطابق و ارزیابی آن با مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار -۱ با دقت مکانی ۱۲/۵ متر و درنهایت، استخراج شبکهٔ آبراهه از مدل‌های رقومی ارتفاعی سنتینل -۱، آلوس، اس آر تی ام و تان دم ایکس[2] است که با یکدیگر مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

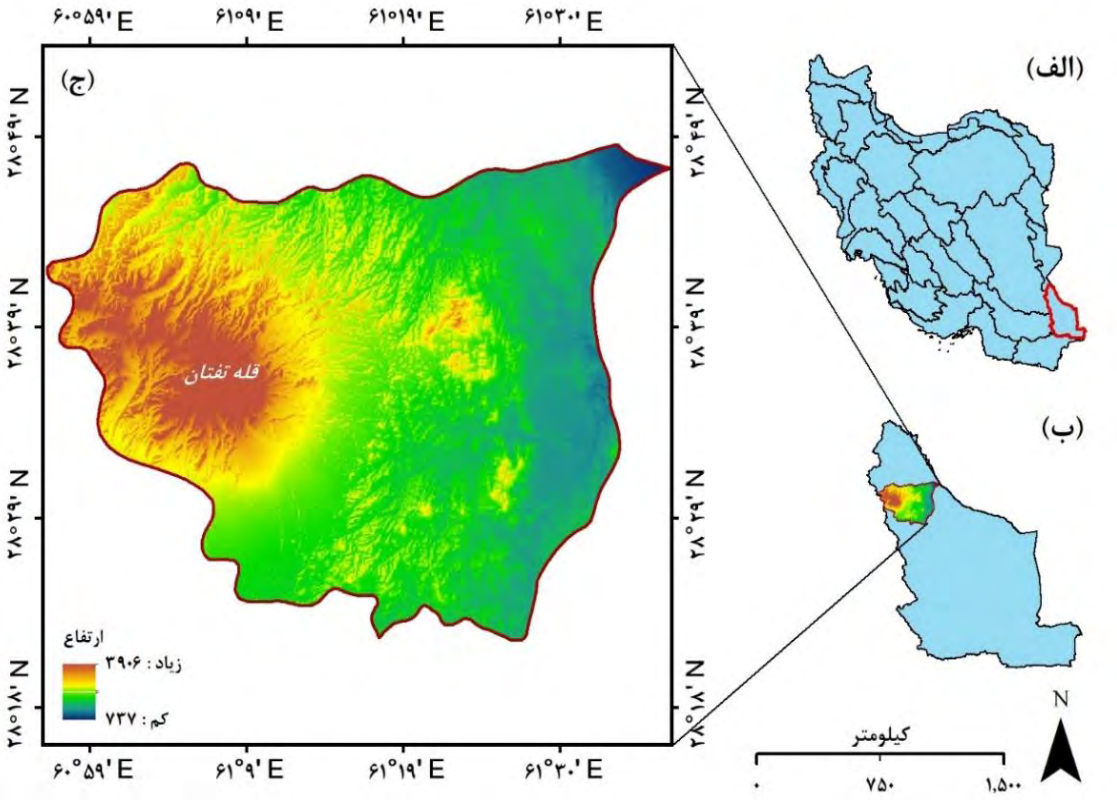
مواد و روش

در این بخش توضیحات مختصری از منطقهٔ مطالعاتی و داده‌های مورداستفاده ارائه شده است. در ادامه، روی داده‌های مورداستفادهٔ پیش‌پردازش، پردازش صورت گرفته و در گام آخر داده‌ها تجزیه‌وتحلیل می‌شود.

منطقهٔ موردمطالعه

منطقهٔ مطالعاتی این پژوهش (اطراف کوه تفتان) در حدود ۳۰ کیلومتری شهرستان خاش در منطقهٔ تفتان است. منطقهٔ موردمطالعه بین مختصصات ٦٠ درجه و ٥٩ دقیقه، ٦١ درجه و ٣٠ دقیقه طول شرقی، عرض شمالی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه و ۲۸ درجه و ٤٩ دقیقه قرار دارد (شکل ۱). بیشترین ارتفاع این منطقه مربوط به قلهٔ آتشفشانی تفتان با ارتفاع ۳۹٤۱ متر است. شرایط نامناسب اکولوژیکی منطقه ازنظر بارش، استقرار و رویش پوشش گیاهی را با محدودیت و مشکل مواجه کرده است. تیپ غالب پوشش گیاهی حوضه را گیاه درمنه تشکیل داده است. متوسط بارندگی و همچنین دمای سالیانهٔ این منطقه به‌ترتیب ۱۷٤/۹ میلی‌متر (بیشترین بارندگی در فصل زمستان) و ۱۵/۷ درجهٔ سانتی‌گراد (مردادماه گرم‌ترین ماه سال با ۳٦/۲ درجهٔ سانتی‌گراد و بهمن‌ماه سردترین ماه سال با ۱/۱۱- درجهٔ سانتی‌گراد) است. درحقیقت محدودهٔ مطالعاتی جزو مناطق خشک در جنوب شرقی کشور محسوب می‌شود که بارندگی‌های شدید و سیل‌آسا در فصول زمستان و بهار دارد (جهانتیغ، ۱۳۹۵، ص. ۸۱).

1. Sentinel-1
2. TanDEMx



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مطالعاتی

Figure (1) Geographical location of the study area

داده‌های مورداستفاده

در این پژوهش از دو تصویر سنتینل -۱ (با اختلاف زمانی حدود ۱۲ روز) برای تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی و درنهایت، استخراج آبراهه استفاده شد؛ همچنین از پروداکت‌های آمادهٔ مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار، اس آر تی ام و تان دم ایکس به‌منظور استخراج آبراهه در منطقهٔ موردمطالعه بهره گرفته شد. مشخصات داده‌های مورداستفاده در جدول (۱) آورده شده است.

سنتینل -۱

ماهواره‌ی سنتینل -۱ در ۳ آوریل سال 2014 با همکاری اتحادیه و سازمان فضایی اروپا مأموریت خود را آغاز کرد. این ماهواره ماهیتی راداری دارد و در باند C در مدار قطبی از کرهٔ زمین تصویربرداری می‌کند. ماهوارهٔ راداری سنتینل توانایی اخذ تصویر را به‌صورت پلاریزه‌های دوگانه HH[1]، HV[2] و VV[3]، VH[4] دارد. این ماهواره همانند ماهوارهٔ چند طیفی سنتینل -۲ دارای دو نوع A و B است که با وجود دوقلوبودن این ماهواره قدرت تفکیک زمانی آن

1. Horizontal- Horizontal
2. Horizontal- Vertical
3. Vertical- Vertical
4. Vertical- Horizontal

به ۵ روز در مناطق استوایی کاهش یافته است. سنجنده راداری سنتینل -۱ دارای چهار حالت: SM[1]، IW[2]، EW[3] و WM[4] است که از بین این حالات، IW اصلی‌ترین حالت برای اهداف تداخل‌سنجی راداری است. به‌طوری‌که این حالت دارای توان تفکیک مکانی ۲۰×۵ در امتداد آزیموت و رنج و همچنین عرض برداشتی حدود ۲۵۰ کیلومتر داراست (قنادی و همکاران، ۱۳۹۷، ص. ۱۰۹). به‌طور کلی از اهداف این ماهواره نظارت بر یخچال‌های طبیعی، پایش و شناسایی لکهٔ نفتی، سرعت امواج، پایش خطرات جابه‌جایی سطوح زمین، تهیهٔ نقشهٔ مناطق جنگلی، آبی، خاکی و کشاورزی و همچنین تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی نام برده می‌شود.

آلوس -۱

ماهوارهٔ ALOS-1 در ۲۴ ژانویهٔ 2006 از طرف ژاپن پرتاب شد. این ماهواره دارای سه سنجندهٔ PRISM[5] برای اندازه‌گیری‌های ارتفاعی، AVNIR-2[6] به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پوشش اراضی در باندهای مرئی و سنجندهٔ راداری پالسار در باند L است. از آنجا که تصاویر این ماهواره به‌صورت پروداکت عرضه می‌شود، مرکز بایگانی داده‌های فعال توزیع‌شدهٔ ماهواره‌ای آلاسکا هم‌اکنون مجموعه‌ای از محصولات دادهٔ تصحیح‌شده را ازلحاظ هندسی و رادیومتری[7] ارائه می‌دهد که از آلوس پالسار مشتق و با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری سنجش از دور گاما پردازش شده است (Logan et al., 2014, p. 3762). این نوع محصولات در دو دقت مکانی متفاوت توزیع می‌شوند. محصول RT1 با اندازهٔ پیکسل ۱۲/۵ متر در فرمت مدل رقومی ارتفاعی با وضوح زیاد و متوسط تولید و محصول RT2 برای تمام مدل‌های رقومی موجود در سطح ۳۰ متر تولید می‌شود (Logan et al., 2014, p. 3762) در این پژوهش از محصولات RT1 استفاده شد.

اس آر تی ام

مأموریت توپوگرافی شاتل رادار[8] از ۱۱ تا ۲۲ فوریهٔ 2000 با شاتل فضایی Endeavor انجام شد. شرکای اصلی این پروژه، ناسا و آژانس اطلاعات ملی فضایی هستند که هدف اصلی‌شان به دست آوردن داده‌های راداری رقومی ارتفاعی جهان بود. رادارهای مورداستفادهٔ اس آر تی ام به‌منظور جمع‌آوری تداخل‌سنجی راداری تصحیح‌شده از دو تصویر راداری در باند X با زاویهٔ سیگنال متفاوت استفاده می‌کند. در طول مدت مأموریت ۱۶ روزه‌ای که این شاتل داشت، بیش از ۸۰ درصد داده‌های راداری را در عرض ۶۰ درجهٔ شمالی تا ۵۶ درجهٔ جنوبی از سطح زمین در هر ۱ ثانیه (arcsec۱) با دقت ۳۰ متر جمع‌آوری کرد (Usgs.gov).

1. Stripmap
2. Interferometric Wide
3. Extra Wide Swath
4. Wave
5. Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping
6. Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2
7. Radiometric Terrain Correction
8. Shuttle-Radar-Topography-Mission (SRTM)

تان دم ایکس

تان دم ایکس[1] (برای اندازه‌گیری رقومی ارتفاعی) یک مأموریت راداری پایش زمین است که متشکل از یک تداخل‌سنج راداری است که با دو ماهوارهٔ یکسان ساخته شده است. با یک جدایش معمول بین ماهواره‌های m۱۲۰ تا m۵۰۰ یک مدل رقومی ارتفاعی جهانی تولید شده است. تولید مدل رقومی ارتفاعی جهانی در سپتامبر 2016 به پایان رسید. مدل رقومی ارتفاعی تان دم ایکس با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر محصولی است که از مدل رقومی ارتفاعی جهانی با ۰/٤ ثانیه کمانه[2] تهیه شده و دارای فاصلهٔ پیکسل کاهش‌یافتهٔ ۳ ثانیه کمانه[3] است که به‌طور تقریبی مربوط به دقت ۹۰ متر در استواست. از کاربردهای این نوع محصول به مطالعهٔ زمین‌شناسی، اقیانوس‌شناسی، هیدرولوژی، کاربری اراضی، پایش پوشش گیاهی و برنامه‌ریزی شهری و همچنین مدیریت بحران اشاره می‌شود (Geoservice.dlr.de).

جدول (۱) مشخصات داده‌های مورداستفاده

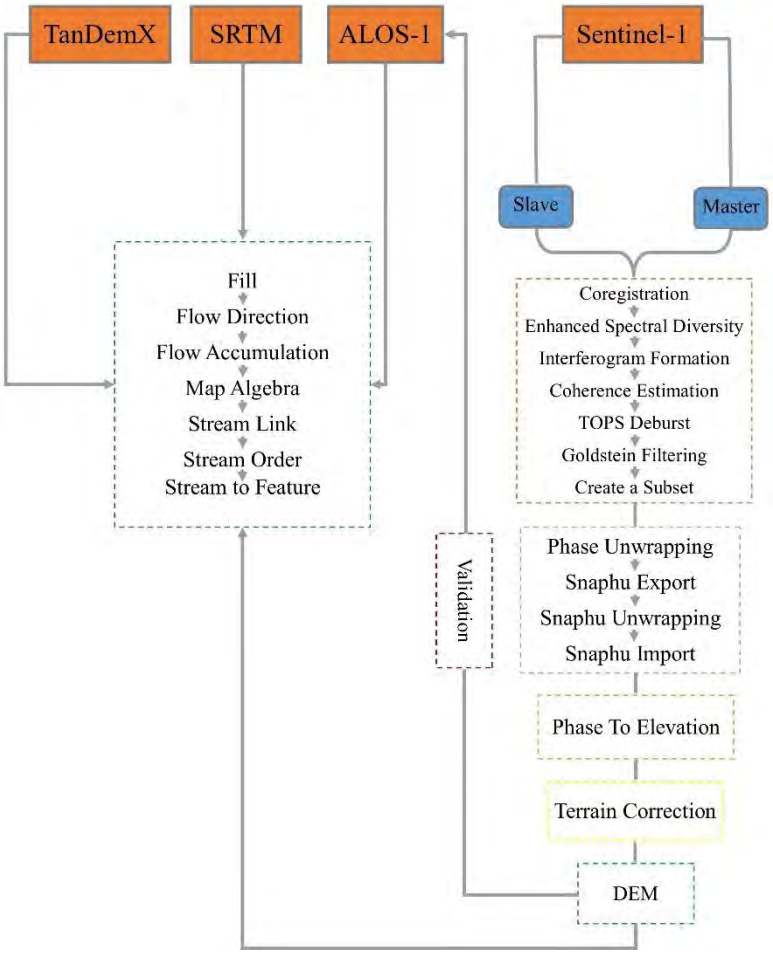
Table (1) Specifications of the data use

ماهواره	زمان برداشت		میزان خط مبنا	باند	قطبش	نوع محصول	قدرت تفکیک مکانی (متر)
Sentinel-1	Master	۲۰۱۹/۹/۱۸	۱٦۱	C	VV	SLC[4]	۱۳/۹٤
	Slave	۲۰۱۹/۹/۳۰					
ALOS-1						DEM	۱۲/۵
SRTM							۳۰
TanDemX							۹۰

روش پژوهش

در راستای اهداف این پژوهش به‌منظور پیش‌پردازش، تداخل‌سنجی راداری و تولید مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی سنتینل -۱ از ابزار Radar نرم‌افزار مبتنی بر پردازش تصاویر ماهواره‌ای SNAP[5] نسخهٔ ۰/۸ استفاده و در آخر با استفاده از نرم‌افزار تجزیه‌وتحلیل داده‌های جغرافیایی و مکانی ArcGIS نسخهٔ ۱۰/۵ آبراهه‌ها از مدل‌های رقومی ارتفاعی استخراج شد. شکل (۲) نشان‌دهندهٔ فلوچارت روند پژوهشی است.

1. TerraSAR-X
2. 0.4 arcsec
3. 3 arcsec
4. Single Look Complex
5. SNAP Platphorm



شکل (۲) روند پژوهشی

Figure (2) Research process flowchart

ثبت هندسی و پیش‌پردازش

برای استخراج اختلاف فاز باید دو تصویر قدیم و جدید که در این پژوهش دارای خط مبنای ۱۶۱ هستند، در یک مجموع داده قرار گیرند؛ در حالی که محصولات معمولی رادار در یک مرحله ثبت می‌شود، محصولات سنتینل -۱ توپوسار[1] به دلیل شکل خاص جمع‌آوری‌شان، به یکسری مراحل نیاز دارند (Braun., 2020, p. 1). بدین منظور تصاویر سنتینل -۱ ثبت هندسی شدند. در این مرحله با توجه به اینکه سنتینل -۱ پهنای وسیعی از زمین را در هر فریم (۲۵۰ کیلومتری) پوشش می‌دهد، ابتدا منطقهٔ مورد مطالعاتی در بخش توپوسار-۱ انتخاب شد. در این پژوهش به دلیل اینکه منطقهٔ مطالعاتی در IW3 قرار داشت، بخشی از حالت IW3 برش داده و قطبش عمودی-عمودی[2] انتخاب شد. سپس اطلاعات مداری دو تصویر استخراج و درنهایت، دو تصویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی اس آز تی ام

1. S1 TOPOSAR
2. Vertical- Vertical

۳ ثانیه کمان[1] ژئوکد شدند. مشاهدهٔ زمین با اسکنرهای پیشروندهٔ حالت تداخل سنجی رادار با دیافراگم مصنوعی به دقت زیادی در ترازهای نواری[2] نیاز دارد. تراز نواری هندسی با تکیه بر مدارهای دقیق و توپوگرافی رقومی برای تداخل سنجی حالت یادشده همیشه کافی نیست. بدین منظور از روش تنوع طیفی پیشرفته (ESD[3]) استفاده می‌شود که برای تخمین یک تغییر آزیموت ثابت بین تصاویر رادار ارائه شده است. درحقیقت این روش ناپیوستگی فاز را در پشت نوار به کمترین می‌رساند (Wang et al., 2017, p. 2423).

تداخل‌سنجی راداری[4]

پس از انجام ثبت اطلاعات و پیش‌پردازش تصاویر، روی تصاویر ژئوکدشده عملیات تداخل‌سنجی راداری صورت پذیرفت تا تصویر فاز اینترفروگرام و همدوستی حاصل شود (شکل ۳). تداخل‌سنجی راداری یک روش ژئودتیک جدید برای تعیین توپوگرافی زمین است. اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری بسیار متراکم است و فقط اطلاعات مربوط به LSR[5] را می‌دهد (Geymen , 2014, p. 827). این تکنیک با اختلاف فاز بین تصاویر راداری اخذشده از یک منظر محاسبه می‌شود و فاز تصاویر دریافتی از موقعیت‌های تصویربرداری یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل باهم مقایسه می‌شوند. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی با عنوان اینترفروگرام تهیه می‌شود (قنادی و همکاران، ۱۳۹۷، ص. ۱۰۹). اطلاعات موجود در یک اینترفروگرام برای استخراج اطلاعات توپوگرافی و تولید تصاویر سه بعدی از ارتفاع زمین استفاده می‌شود (مرکز سنجش از دور کانادا، ۱۳۹۸، ص. ۲۷۰). با استفاده از رابطهٔ ۱ و ۲ تصویر اینترفروگرام و فاز محاسبه می‌شود (Mangla & Kumar, 2014, p. 817).

$$\varphi = tan^{-1}\frac{(Img\ I_x)}{(Real\ I_x)}$$ رابطهٔ ۱

در این رابطه منظور از φ، فاز سیگنال، I_x، مقدار پیکسل اینترفروگرام است که خود از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$I_x = M_x \times S_x$$ رابطهٔ ۲

در رابطهٔ فوق I_x، مقدار پیکسل اینترفروگرام، منظور از M_x و S_x به‌ترتیب تصویر قدیم (Master) و جدید (Slave) است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در مباحث تداخل‌سنجی راداری مهم است، مفهوم کوهرنسی یا همدوسی است. تصویر همدوسی، همبستگی بین دو تصویر راداری را با دریچهٔ مصنوعی مختلط براساس شماری از پنجره‌های مستطیلی کوچک اندازه می‌گیرد. به‌طور کلی تصویر همدوسی نشانه‌ای از نرخ تغییر بین دو تاریخ تصویربرداری را

1. 3 arcsec
2. Burts
3. Enhanced spectral diversity
4. Interferometric synthetic aperture radar
5. Line of Sight of Radar

ارائه می‌دهد (Mather & Koch., 2011, p. 1). اهمیت نقشهٔ کوهرنسی به تخمین کیفیت جفت اینترفروگرام تولید شده است. درواقع، همدوسی کم (منفی) به این معناست که داده‌ها دارای نویز هستند و برای تولید مدل رقومی ارتفاعی مناسب نیستند. مقدار همدوسی از رابطهٔ ۳ حاصل می‌شود (Ferretti & Guarnieri., 2007, p. 1).

$$\gamma = \frac{\sum_N M_1 S_1^*}{\sqrt{\sum_N |M_1|^2} \sqrt{\sum_N |S_1|^2}_1}$$ رابطهٔ ۳

در این رابطه منظور از γ، مقدار همدوسی است. N در اینجا تعداد پیکسل‌ها نیست. M_1 و S_1 به‌ترتیب تصویر قدیم و جدید و S_1^* زوج SLC تصویر جدید (Slave) است.

حذف موزاییک بین نواری و پیاده‌سازی فیلتر

به دلیل اینکه داده‌های TOPS[1] به‌صورت نوار[2] تهیه می‌شوند، در تصویر باعث ایجاد یکسری خطوط تیره می‌گردد که این نوارها با استفاده از موزاییک‌های بین نواری[3] یکپارچه می‌شوند (شکل ۳). با توجه به اثرات بخار آب در جو و ضریب همبستگی مکانی و زمانی، فاز تداخل‌سنجی تولیدشده همیشه دارای نویز است (Zebker & Villasenor, 1992, p. 950). اگر نویز به‌درستی حذف یا کاهش نیابد، نه‌تنها بر کیفیت اندازه‌گیری ارتفاع یا تغییر شکل حاصل از تداخل‌سنجی تأثیر می‌گذارد، سبب باقی‌ماندن پیکسل‌های کاذب در تصویر فاز می‌شود و در روند بازیابی فاز تداخل ایجاد می‌کند (Goldstein et al., 1988, p. 713). میان روش‌های متعدد برای کاهش نویز در تصویر فاز الگوریتم گلدشتین متداول‌ترین روش برای کاهش نویز در برخی نرم‌افزارهای معروف پردازش داده‌های SAR[4] است. این فیلتر در دامنهٔ فرکانس پیاده‌سازی شده است و طیف را هموار می‌کند (Sun et al., 2013, p. 1896).

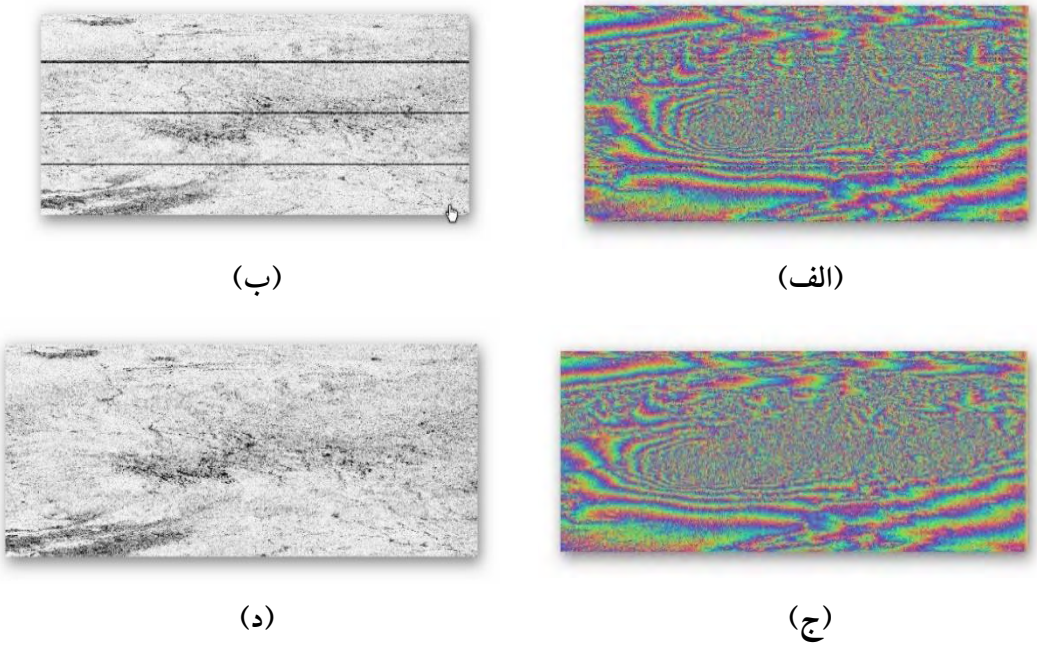
بازیابی اثر فاز

یک پیچیدگی ایجادشده در اینترفروگرام خام به علت این است که اختلاف فازهای نشان داده‌شده برحسب تعداد کل چرخهٔ طول موج کامل نیستند، بلکه فقط برحسب محدوده‌ای از رنج زاویه‌ای ۲π رادیان هستند که اندازه‌گیری می‌شوند. هر چرخهٔ کامل از ۰–۲π رادیان نشان‌دهندهٔ یک فریم اینترفرومتری است. اختلاف فازهای مطلق باید با افزودن مضرب مناسبی از ۲π قبل استخراج ارتفاع بازیابی[5] شود. این مرحله به‌عنوان بازیابی فاز[6] یاد می‌شود. به‌طور کلی اجرای این مرحله پیچیده است (Mather & Koch., 2011, p. 1). برای انجام این فرایند از الگوریتمی در نرم‌افزار Snap[7] استفاده شد. الگوریتم Snaphu Unwraping از رابطهٔ ٤ حاصل می‌شود (Reigber & Moreira., 1997, p. 869).

1 .Terrain Observation with Progressive Scans SAR
2. Burst
3. Deburst
4. Synthetic Aperture Radar
5. Unwrap
6. Unwrap Phase
7 Snaphu

$$\varphi_{\text{wrapped}} = \varphi_{Un\text{wrapped}} + 2n\pi$$ رابطهٔ ٤

در این رابطه: φ_{wrapped} فاز wrapped ، $\varphi_{Un\text{wrapped}}$ فاز بازیابی و n عدد ثابت



شکل (۳) الف) تصویر فاز دارای نوار؛ ب) تصویر کوهرنسی دارای نوار؛ ج) تصویر فاز تصحیح نوارشده؛ (ج) و د) تصویر کوهرنسی نواری‌شده

Figure (3) a) Burst phase image; b) Burst coherence image; c) Burst correction phase image; (c) and d) Bursted coherence image

تبدیل فاز به ارتفاع و تصحیح هندسی

برای اینکه مقادیر فاز بازیابی‌شده به مقادیر ارتفاعی تبدیل شود، به یک مدل رقومی مبنا نیاز است تا با آن عمل ژئوکد انجام و سپس درون‌یابی انجام شود (Ali et al., 2019, p. 012019). بدین منظور در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاعی اس آر تی ام با دقت ۳۰ متر (۱ثانیه) برای درون‌یابی ابرنقاط و تعمیم آن استفاده شد. به‌منظور تخمین ارتفاع پراکنش فازی مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده از تکنیک تداخل‌سنجی SAR از رابطهٔ ۵ استفاده می‌شود.

رابطهٔ ۵

$$\sigma_h = \sigma_\emptyset \frac{R\lambda \sin\theta}{4\pi B}$$

در گام آخر به دلیل اینکه هندسهٔ تصویربرداری سیستم‌های راداری به‌صورت رنج مایل است، برای زمین مرجع‌سازی مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده به رنج زمینی تبدیل شد تا به‌صورت زمین مرجع شده باشد.

استخراج شبکهٔ آبراهه از مدل رقومی ارتفاعی

پس از آماده‌سازی و تهیهٔ مدل‌های رقومی ارتفاعی نوبت به استخراج آبراهه‌های منطقهٔ موردمطالعه رسید. در این پژوهش به‌منظور استخراج آبراهه از مدل رقومی ارتفاعی در منطقهٔ مورد مطالعاتی از ابزار هیدرولوژی[1] در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده شد. از این ابزار برای مدل‌سازی جریان آب در سطح استفاده می‌شود. این ابزار براساس الگوریتم پرکاربرد D8 ساخته و توسعه داده شده است (O'Callaghan et al., 1984, p. 323). این روش جهت جریان یک سلول را به یکی از هشت سلول در برگیرندهٔ آن هدایت می‌کند که دارای بیشترین اختلاف شیب است و اجازهٔ تقسیم جریان را به چند سلول نمی‌دهد (حسین‌زاده و جهادی طرقی، ۱۳۸۹، ص. ۲۰۰). به‌طور کلی مراحل اصلی برای محاسبه و استخراج آبراهه پرکردن فرورفتگی[2]، شناسایی جهت جریان[3]، محاسبهٔ تجمع جریان[4] و شناسایی و استخراج آبراهه[5] است (Liu & Zhang., 2010, p. 1). در این راستا، ابتدا عملیات پر شدگی[6] روی مدل‌های رقومی به‌منظور پرکردن فرورفتگی‌ها انجام شد. بهره‌گیری از این پردازش به‌منظور از بین بردن بلندی‌ها همانند قله‌ها استفاده و سپس جهت جریان آبراهه تعیین و لایهٔ تجمع جریان آب از این لایه محاسبه شد. این ابزار تجمع جریان را به‌صورت وزن تجمعی تمام سلول‌های جریان‌یافته به هر سلول با شیب پایین در رستر خروجی محاسبه می‌کند. در ادامه، تصویر تجمع جریان انتخاب و استخراج شد که بزرگ‌تر و مساوی مقدار ۱۰۰ پیکسل بود. این مقدار پیکسل تعیین‌شده به‌صورت سعی و خطا تعیین شد. در گام بعدی کانال آبراهه و جریانات شبکهٔ زهکشی از ابزار به هم پیوست داده شد. ترکیب یک شبکهٔ زهکشی یا کانال آبراهه ازنظر برخی ویژگی‌ها مانند رتبهٔ آبراهه، طول جریان و تراکم زهکشی به‌صورت کمی توصیف می‌شود (Horton, 1945, p. 275). به این منظور برای طبقه‌بندی بخش‌های آبراهه براساس تعداد انشعابات بالادست، از یک سیستم سفارش جریان پایین به بالا استفاده شد که توسط هورتون توسعه‌یافته و استراهلر (Strahler, 1957, p. 913) اصلاح شده است. درنهایت، بردارسازی شبکهٔ آبراهه انجام، در گام نهایی طول آبراهه‌های حاصل از مدل‌های رقومی ارتفاعی محاسبه و با استفاده از روش ارائه‌شده از سوی هورتن (Horton, 1945, p. 275) نسبت طول آبراهه محاسبه شد. نسبت طول آبراهه از رابطهٔ ٦ محاسبه می‌شود.

رابطهٔ ٦

$$R_L = \frac{L_u}{L_{(u-1)}}$$

در این رابطه، R_L نسبت طول آبراهه، L_u طول آبراهه رتبهٔ پایین‌تر و $L_{(u-1)}$ مجموع طول آبراهه است.

1. Hydrology
2. Sink filling
3. Flow direction
4. Flow accumulation
5. Stream
6. Fill

ارزیابی صحت

در پژوهشی محمدی و همکاران، به‌منظور اعتبارسنجی و میزان همبستگی مدل رقومی ارتفاعی (تهیه‌شده با استفاده از تداخل‌سنجی راداری در تصاویر سنتینل -۱) از مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار -۱ با دقت ۱۲/۵ متر استفاده کردند (Mohammadi et al., 2020). در این پژوهش نیز مبنای اعتبارسنجی مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده از سنتینل -۱، مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار -۱ است. در این راستا، ابتدا به‌صورت تصادفی روی هر مدل رقومی ارتفاعی تعداد ۳۰۰ نقطه تعیین و برداشت شد. سپس از پارامترهای آماری انحراف معیار و ضریب تعیین به‌منظور برآورد همبستگی و اعتبارسنجی بین دو داده بهره گرفته شد. مقادیر ضریب همبستگی بین ۱+ و ۱- است. در جایی که ۱ نشان‌دهندهٔ همبستگی خطی مثبت، ۰ نبودِ همبستگی خطی و ۱- همبستگی خطی منفی است. تخمین انحراف معیار نشان‌دهندهٔ صحت پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته است. در این پارامتر هرچه عدد کمتر باشد، دقت پیش‌بینی بیشتر است (Mohammadi et al., 2018, p. 1) به‌طور کلی پارامتر آماری انحراف معیار (Std) و ضریب تعیین (R2) از رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

رابطهٔ ۷

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P}_i)(O_i - \overline{O}_i)^2)}{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P}_i)^2 \ \sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O}_i)^2}$$

در این رابطه مقادیر P_i، مقادیر ارتفاعی برآوردشده با استفاده از سنجنده‌های مختلف (Sentinel-1، SRTM و TanDemX) و مقادیر O_i، مقادیر ارتفاعی آلوس پالسار -۱ (در اینجا مرجع) است.

رابطهٔ ۸

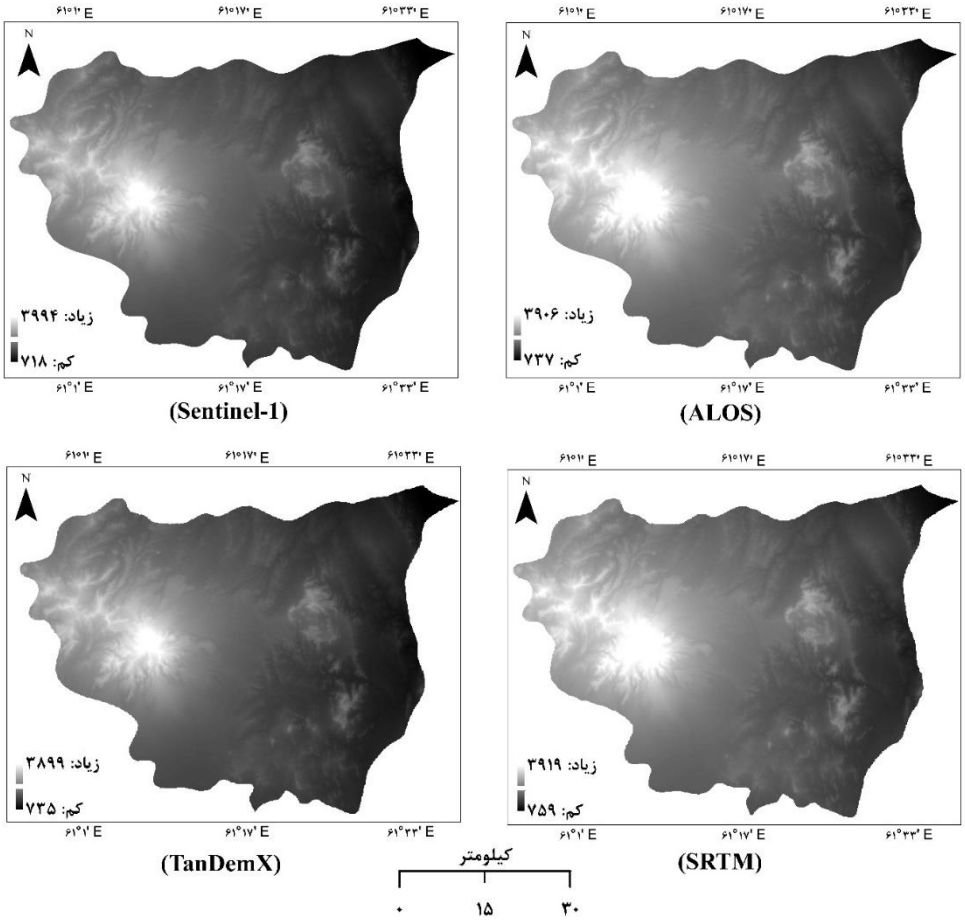
$$\sigma_{est} = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y} - Y)^2}{N - 2}}$$

در این رابطه، σ_{est} انحراف معیار، $\hat{Y}$ متغیر تخمین، Y متغیر واقعی (در این پژوهش مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار) و N تعداد نقاط برداشت‌شده از تصویر مرجع.

یافته‌های پژوهش

پس از تهیه، آماده‌سازی مدل‌های رقومی ارتفاعی و استخراج آبراهه، نتایج نهایی حاصل شد. شکل (٤) نتایج حاصل از استخراج مدل‌های رقومی ارتفاعی با استفاده از داده‌های سنتینل -۱ و پروداکت‌های آمادهٔ مدل رقومی ارتفاعی نشان داده شده است. طبق این اشکال تمامی مدل‌های رقومی ارتفاعی از کمینه و بیشینهٔ به‌نسبت مشابه و نزدیکی با یکدیگر بهره‌مند بودند، به‌جز مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده با استفاده از داده‌های سنتینل -۱ که با کمی اغراق برآورد شد. به این ترتیب، کمینهٔ ارتفاعی برآوردشده از سوی سنتینل -۱ (۷۱۸)، آلوس (۷۳۷)، اس آر تی ام (۷۵۹) و تان دم ایکس (۷۳۵) تخمین زده و بیشینهٔ ارتفاعی در منطقهٔ مطالعاتی به‌ترتیب در ماهواره‌های سنتینل -۱ (۳۹۹٤)، آلوس (۳۹۰٦)، اس آر تی ام (۳۹۱۹) و تان دم ایکس (۳۸۹۹) برآورد شد. نتایج پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ با مدل رقومی ارتفاعی مبنا (آلوس) شامل انحراف معیار و ضریب تعیین

(همبستگی) در جدول (۲) آورده شده است. طبق این یافته مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ هبستگی مناسبی (دارای انحراف معیار به‌مراتب زیادی) نسبت‌به دادهٔ مبنا دارد.



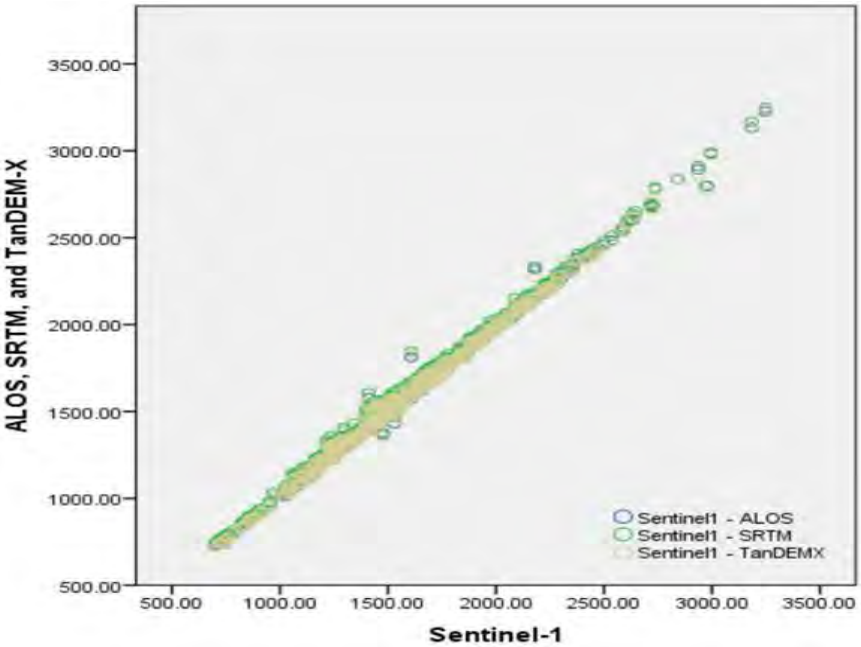
شکل (٤) مدل‌های رقومی ارتفاعی مورداستفاده در استخراج آبراهه

Figure (4) Digital Elevation Models extraction used in waterway

جدول ۲

	ضریب تعیین (R^2)	انحراف معیار (Std) (متر)
Sentinel-1	۰/۹۹	۳۱

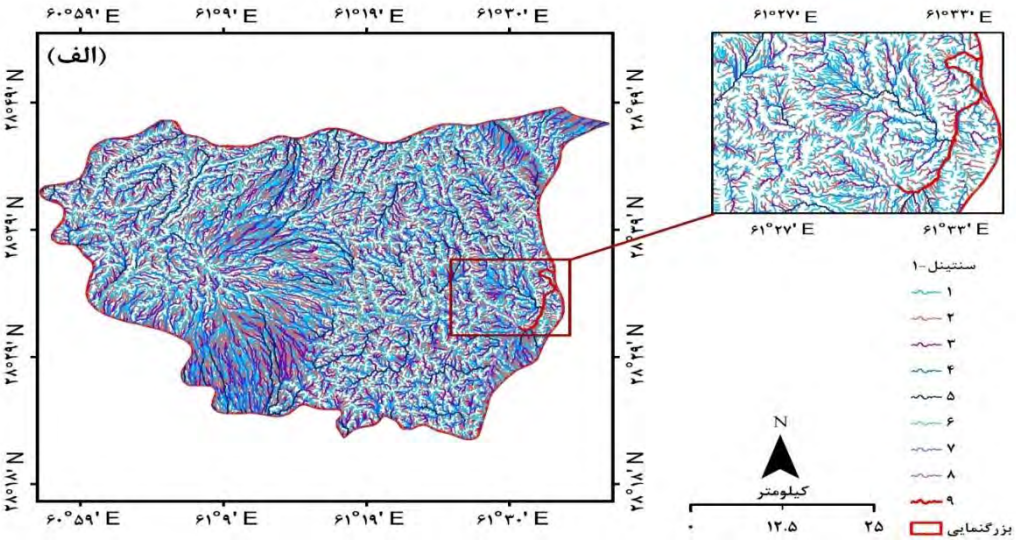
شکل (۵) نشان‌دهندهٔ پلات همبستگی خطی بین مدل‌های رقومی ارتفاعی استفاده‌شده است؛ همان‌طور که از پلات پیداست، در این پژوهش مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ (حاصل از تداخل‌سنجی راداری) با تمامی پروداکت‌های مدل رقومی ارتفاعی استفاده‌شده به‌ویژه آلوس دارای رابطهٔ خطی مناسب و نزدیکی است و تنها چند نقطه خارج از همبستگی خطی قرار دارد.



شکل (۵) پلات رگرسیون خطی بین مدل‌های رقومی ارتفاعی

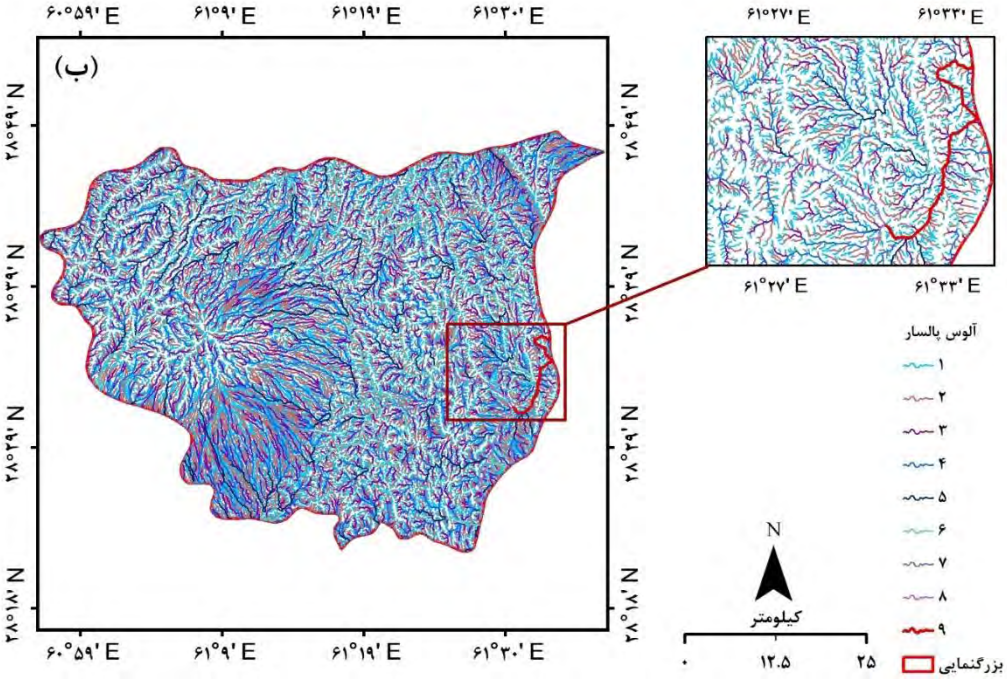
Figure (5) Linear regression plot between Digital Elevation Models

اشکال ٦، ۷، ۸ و ۹ نشان‌دهندهٔ شبکهٔ آبراههٔ استخراجی از مدل‌های رقومی ارتفاعی است؛ همان‌طور که از اشکال نمایان است، مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بالا سنتینل -۱ و آلوس هرکدام تعداد ۹ شبکهٔ آبراهه را استخراج کردند. مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی متوسط اس آر تی ام و تن دم ایکس فقط توانستند هرکدام ۷ و ٦ شبکهٔ آبراهه را استخراج کنند. درحقیقت این ماهواره‌ها برخلاف ماهواره‌های سنتینل -۱و آلوس قادر به استخراج آبراهه‌های رتبهٔ ۸ و ۹ نبودند.



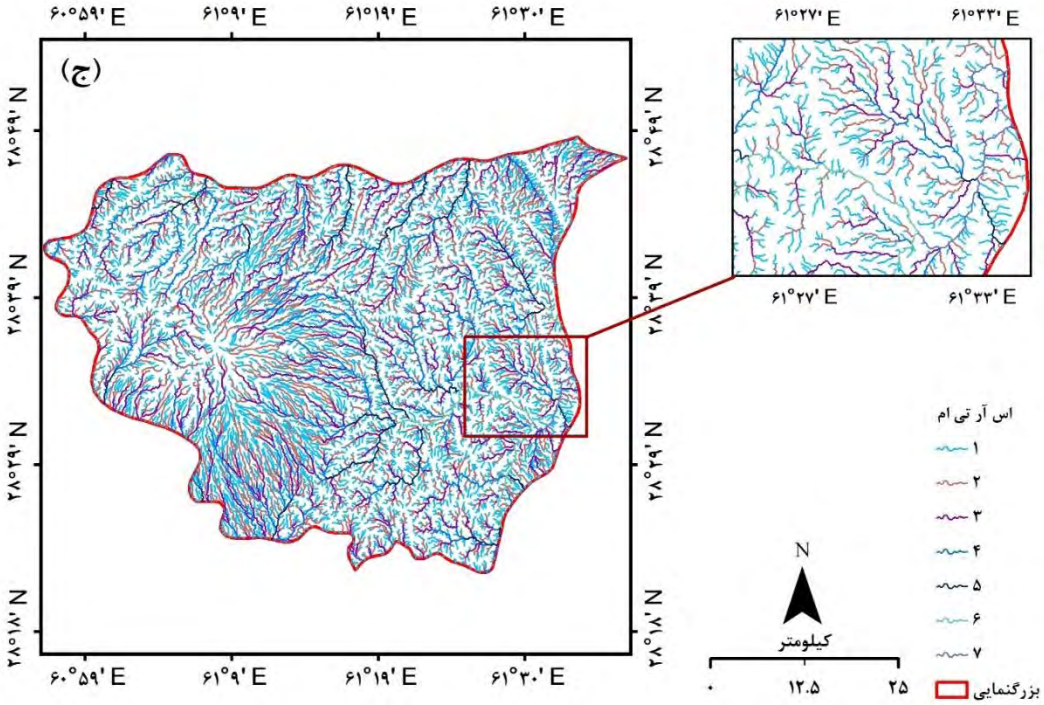
شکل (٦) شبکهٔ آبراهه استخراجی از مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱

Figure (6) Waterway network extracted from Sentinel-1 digital elevation model



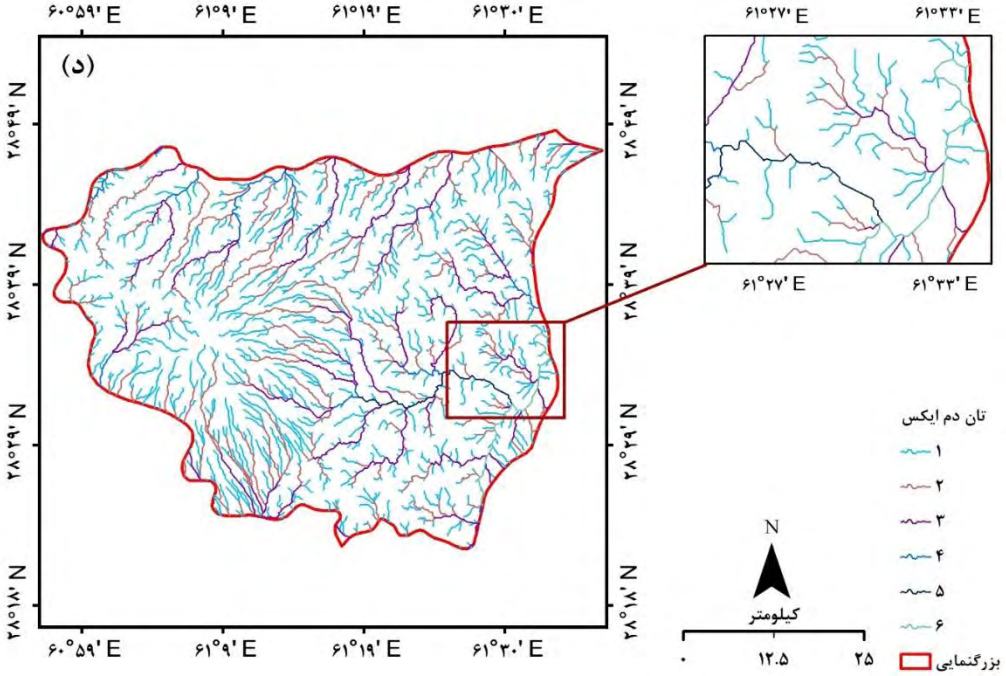
شکل (۷) شبکهٔ آبراههٔ استخراجی از مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار

Figure (7) Waterway network extracted from ALOS-1 digital elevation model



شکل (۸) شبکهٔ آبراههٔ استخراجی از مدل رقومی ارتفاعی اس آر تی ام

Figure (8) Waterway network extracted from SRTM digital elevation model



شکل (۹) شبکهٔ آبراههٔ استخراجی از مدل رقومی ارتفاعی تان دم ایکس

Figure (9) Waterway network extracted from TanDemX digital elevation model

در جدول (۳)، تعداد آبراهه و طول شبکهٔ آبراههٔ استخراجی با مدل‌های رقومی آورده شده است. طبق این یافته به‌ترتیب مجموع طول آبراههٔ استخراجی با مدل‌های رقومی ارتفاعی آلوس، سنتینل -۱، اس آر تی ام و تان دم ایکس برابر ۱۱۷۵۲/۹، ۱۳۵۵۸/۷، ۵۸۷۹/۲ و ۲۱۵۲/۰ کیلومتر محاسبه شد که بیشترین طول آبراهه را سنتینل -۱ و کمترین طول آبراهه را تان دم ایکس تخمین و ارزیابی کرد.

جدول (۳) طول آبراهه‌های استخراجی رتبه‌ها به تفکیک هر ماهواره (کیلومتر)

Table (3) The length of the extractive waterways of the ratings by each satellite (km)

ماهواره / رتبه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	مجموع
ALOS	٥٦٦٥/٦	۳۰۰۲/٥	۱٥٥۸/٥	۸٥۱/۷	۳۹۹/٥	۲۱٤/٥	۱٦/٥	۲۷/٤	۱٦/۲	۱۱۷٥۲/۹
Sentinel-1	۷۰۰۷/۹	۳۳٤۱/٦	۱٦۰۷/۸	۹۱٥/۸	٤٥۳/۹	۱٥۷/۷	۳۳/٦	۲۳/۸	۱٦/۳	۱۳٥٥۸/۷
SRTM	۲۹۷٦/۱	۱٥۱۱/۸	۷٦٦/۱	٤۰۷/۷	۱٤۷/۰	٥٤/۰	۱٦/۳			٥۸۷۹/۲
TanDemX	۱۱۹٦/۲	٥۲۸/۷	۳۱۳/۱	٥۷/۳	۲٦/۷	۲۹/۹				۰/۲۱

نسبت طول رتبه آبراهه‌های استخراجی در مدل‌های رقومی ارتفاعی در جدول (٤) آورده شده است. درحقیقت نسبت طول آبراهه نشان‌دهندهٔ نسبت بین تعداد آبراهه‌های یک رتبه به رتبهٔ پایین‌تر است. با توجه به جدول (٤) مشخص می‌شود که کمترین و بیشترین نسبت طول آبراهه به‌ترتیب برای مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵متری آلوس برابر با ۰/۰۷ و ۰/۵۹، برای مدل رقومی ارتفاعی ۱۳/۹ متری سنتینل -۱ برابر با ۰/۲۱ و ۰/٦۸، برای مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری اس آر تی ام برابر با ۰/۳۰ و ۰/۵۳ و برای تان دم ایکس با دقت مکانی ۹۰ متر برابر با ۰/۱۸ و ۱/۱ است.

جدول (٤) نسبت طول آبراهۀ رتبه‌ها به تفکیک هر ماهواره

Table (4) The ratio of the waterway length of the ratings by each satellite

ماهواره / رتبه	۱ به ۲	۲ به ۳	۳ به ٤	٤ به ٥	٥ به ٦	٦ به ۷	۷ به ۸
ALOS	۰/٥۲	۰/٥۱	۰/٥٤	۰/٤٦	۰/٥۳	۰/۰۷	۰/٥۹
Sentinel-1	۰/٤۷	۰/٤۸	۰/٥٦	۰/٤۹	۰/۳٤	۰/۲۱	۰/٦۸
SRTM	۰/٥۰	۰/٥۰	۰/٥۳	۰/۳٦	۰/۳٦	۰/۳۰	
TanDemX	۰/٤٤	۰/٥۲	۰/۱۸	۰/٤٦	۱/۱	۲۹/۹	

نتیجه‌گیری

استخراج دقیق شبکۀ آبراهه یکی از مهم‌ترین کاربردهای زمین‌شناسی و مورفومتری است. شناسایی و استخراج دقیق شبکۀ آبراهه نیاز به مدل رقومی ارتفاعی با دقت زیاد دارد. در این پژوهش تلاش شد، ابتدا با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ تهیه و سپس شبکۀ آبراهه با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی مختلف (سنتینل -۱، آلوس، اس آر تی ام و تان دم ایکس) استخراج و نسبت‌به یکدیگر مقایسه و ارزیابی شود؛ همان‌طور که در شکل (٥) و نتایج پارامتر ارزیابی در جدول (۲) نشان داده شده است، با وجود اختلاف ارتفاعی حدود ۳۱ متری بین دو دادۀ سنتینل -۱ و آلوس، همبستگی زیاد (۰/۹۹) و مثبتی برقرار است. به عبارتی دیگر، این اختلاف ارتفاعی ۳۱ متری بین این دو داده ناشی از ۹ الی ۱۰ نقطه از مجموع ۳۰۰ نقطه برداشت شده است و به‌طور کلی این مقدار انحراف معیار به کل فرایند کاری تعمیم داده نمی‌شود؛ با این حال، میزان زیاد همبستگی (R^2) سنتینل -۱ نسبت به دادۀ مرجع دلیل و مزیتی برای استخراج شبکۀ آبراهه است. در این پژوهش علاوه بر استخراج شبکۀ آبراهه با مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی زیاد از مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی متوسط نیز بهره گرفته شد. نظر به شکل (٦) و (۷) مشاهده می‌شود که تعداد آبراهه‌های استخراجی توسط دو ماهواره با قدرت تفکیک مکانی بالای آلوس و سنتینل -۱ برابر است. به‌طوری که در این پژوهش سنتینل -۱ با دقت ۱۳/۹ متر و آلوس با دقت ۱۲/٥ متر توانستند هرکدام تعداد ۹ شبکۀ آبراهه را استخراج کنند که درحقیقت این مطابقت و نزدیکی در استخراج شبکۀ آبراهه بین این دو ماهواره بدون در نظر گیری پارامتر انحراف معیار ارتفاعی دلیل همبستگی زیاد و همچنین کمترین اختلاف دقت مکانی حدود ۱/٥ متری آنها باشد. در سوی دیگر ماهواره‌های اس آر تی ام و تان دم ایکس نتیجۀ به‌نسبت مشابه و نزدیکی باهم داشتند که اس آر تی ام با دقت ۳۰ متر تعداد ۷ شبکۀ آبراهه و تان دم ایکس با دقت ۹۰ متر تعداد ٦ شبکۀ آبراهه را استخراج کردند. دلیل اختلاف تعداد ۱ شبکۀ آبراهه استخراجی بین این دو ماهواره اختلاف زیاد حدود ٦۰ متر دقت مکانی آنهاست. به‌طور کلی نتایج نشان‌دهندۀ آن بود که هرچه قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی مورداستفاده بیشتر باشد، قابلیت استخراج رتبۀ آبراهه هم بیشتر می‌شود که رابطۀ مستقیمی بین دقت مدل رقومی ارتفاعی و تعداد رتبۀ شبکۀ آبراهۀ استخراجی وجود دارد. در این پژوهش یکی از دلایلی که موجب بهبود کیفیت و نبودِ گپ در تصویر مدل رقومی

ارتفاعی استخراجی از داده‌های سنتینل -۱ شد، به علت کمترین اختلاف زمانی بین دو تصویر (۱۲روز اختلاف) و دارابودن خط مبنای بالا حدود ۱٦۱ (بین تصویر قدیم و جدید در سنتینل -۱) است. با توجه به اینکه این پژوهش برای اولین بار در ایران از مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ به‌منظور استخراج شبکهٔ آبراهه استفاده می‌کند، پیشنهاد می‌شود، برای هرچه بهترشدن کیفیت مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از داده‌های این ماهواره و تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌منظور استخراج مشتقات از آن باید چندین پارامتر شامل: مقدار رطوبت موجود در منطقه، فصل موردمطالعه، اختلاف زمانی کم بین دو تصویر به‌منظور ایجاد شرایط پایدار، خط مبنای بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ و نبودِ پوشش گیاهی و حاکمیت شرایط خشکی در منطقهٔ مطالعاتی در نظر گرفته شود تا مشتقات مناسبی از مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ همانند شیب، جهت شیب، آبراهه، خطواره و ... استخراج شود؛ همچنین به دلیل هزینه زیاد تهیهٔ مدل رقومی ارتفاعی زیر ۳۰ متر و نبود پوشش کامل کرهٔ زمین ازجمله مناطق ایران توسط ماهواره آلوس پیشنهاد می‌شود، از مدل رقومی ارتفاعی سنتینل -۱ با شرط برخورداری از پارامترهای فوق استفاده و از آن نقشه خطواره و آبراهه حاصل شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از آژانس فضایی اروپا، سازمان زمین‌شناسی آمریکا و مرکز بایگانی داده‌های فعال توزیع‌شدهٔ ماهواره‌ای آلاسکا به دلیل در دسترس قراردادن داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ارتفاعی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

جهان‌تیغ، منصور (۱۳۹۵). بررسی تأثیر فعالیت‌های آبخیزداری در کنترل رسوب مناطق خشک (مطالعهٔ موردی زیر حوضهٔ تفتان خاش). *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، *۱۰*(۳۵)، ۸۱-۸۸.
http://jwmsei.ir/article-1-414-fa.html

حسین‌زاده، رضا، و جهادی طرقی، مهناز (۱۳۸۹). ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع (**DEMs**) و الگوریتم‌های **GIS** در تحلیل‌های مورفومتری رودخانه‌ای (نمونهٔ مورد مطالعه: حوضهٔ آبریز رباط قره بیل در خراسان شمالی). *جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای*، *۸*(۱٤)، ۱۸۳-۲۱۲. https://doi.org/10.22067/geography.v8i14.9001

قنادی، محمدامین، عنایتی، حمید، و خصالی، الهه (۱۳۹۷). تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل -۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری. *اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، *۲۷*(۱۰۸)، ۱۰۹-۱۲۱.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.34623

مرکز سنجش از دور کانادا (۱۳۹۸). *مبانی سنجش از دور کاربردی-مرکز سنجش از دور کانادا* (مصطفی مهدوی فرد و خلیل ولی‌زاده کامران، مترجم). انتشارات ماهواره.

مکرم، مرضیه، زارعی، عبدالرسول، و امیری، محمدجواد (۱۳۹۷). ارزیابی مرفومتری، مدل‌سازی و استخراج آبراهه‌ها از مدل رقومی ارتفاع (**DEM**) با استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه. *علوم آب و خاک*، ۲۲(۳)، ۸۱-۹٤.
10.29252/jstnar.22.3.81

References

Ali, S., Arief, R., Dyatmika, H. S., Maulana, R., Rahayu, M. I., Sondita, A., ... & Sudiana, D. (2019, June). Digital Elevation Model (DEM) Generation with Repeat Pass Interferometry Method Using TerraSAR-X/Tandem-X (Study Case in Bandung Area). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 280, No. 1, p. 012019). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012019

Amatulli, G., Domisch, S., Kiesel, J., Sethi, T., Yamazaki, D., & Raymond, P. (2018). *High-resolution stream network delineation using digital elevation models: assessing the spatial accuracy* (No. e27109v1). PeerJ Preprints. https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27109v1

Bhardwaj, A., Jain, K., & Chatterjee, R. S. (2019). Generation of high-quality digital elevation models by assimilation of remote sensing-based DEMs. *Journal of Applied Remote Sensing*, *13*(4), 044502. https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.4.044502

Bossler, J. D., Campbell, J. B., McMaster, R. B., & Rizos, C. (2010). *Manual of geospatial science and technology*. CRC Press.

Braun, A. (2020). *DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges*. Technical report, Sky Watch Space Applications Inc. https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20DEM%20generation%20with%20Sentinel-1%20IW%20Tutorial.pdf

Canadian Center for Remote Sensing (2018). *Fundamentals of applied remote sensing, canadian center for remote sensing* (M. Mahdavifard & Kh. Valizade Kamran, Trans). Mahvareh publication. [In Persian].

Cho, H. C., Kampa, K., & Slatton, K. C. (2007, July). Morphological segmentation of lidar digital elevation models to extract stream channels in forested terrain. In *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3182-3185). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423521

Cho, H. C., Srinivasan, S., Sedighi, A., & Slatton, K. (2006, July). Extraction of stream channels in high-resolution digital terrain images using morphology. In *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing* (pp. 1078-1081). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.278

Crosetto, M., & Pérez Aragues, F. (2000, March). Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation: validation and data fusion. In *SAR workshop: CEOS committee on earth observation satellites* (Vol. 450, p. 367). https://adsabs.harvard.edu/full/record/seri/ESASP/0450/2000ESASP.450..367C.html

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation* (Vol. 19). (n.p). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007ESATM..19.....F

Geymen, A. (2014). Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique. *Arabian Journal of Geosciences*, *7*, 827-837. https://doi.org/10.1007/s12517-012-0811-3

Ghannadi, M. A., Alebooye, S., Izadi, M., & Moradi, A. (2022). A method for Sentinel-1 DEM outlier removal using 2-D Kalman filter. *Geocarto International*, *37*(8), 2237-2251. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1815866

Goldstein, R. M., Zebker, H. A., & Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, *23*(4), 713-720. https://doi.org/10.1029/RS023i004p00713

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, *56*(3), 275-370. https://pdfs.semanticscholar.org/39c3/9bbea565f8f963309e65506d7756f6571c18.pdf

Hosseinzadeh, R., & Jahadi Targhi, M. (2010). Evaluating the accuracy of digital elevation models (DEMs) and GIS algorithms in river morphometric analysis (Case study: Rabat qarabil watershed in north Khorasan). *Geography and Regional Development*, *8*(14), 183-212. https://doi.org/10.22067/geography.v8i14.9001 [In Persian].

Jacobsen, K. (2013). DEM generation from high resolution satellite imagery. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 483-493. 10.1127/1432-8364/2013/0194

Jahantigh, M. (2015). Investigating the effect of watershed management activities on sedimentation control in dry areas (A case study Taftan Khash basin). *Journal Of Watershed Science and Engineering Of Iran*, *10*(35), 81-88. http://jwmsei.ir/article-1-414-fa.html [In Persian].

Jansen, J. R. (2015) *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall Press.

Liu, X., & Zhang, Z. (2010). Extracting drainage network from high resolution DEM in Toowoomba, Queensland. In *Proceedings of the 2010 Queensland Surveying and Spatial Conference (QSSC 2010)*. University of Southern Queensland. http://www.spatialsciences.org/images/QLD/QSSC/Program/xiaoye_liu_qssc_paper_revised.pdf

Logan, T. A., Nicoll, J., Laurencelle, J., Hogenson, K., Gens, R., Buechler, B., ... & Guritz, R. (2014). Radiometrically terrain corrected ALOS PALSAR Data available from the Alaska Satellite Facility. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2014, pp. IN33B-3762). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014AGUFMIN33B3762L

Luo, W., Li, X., Molloy, I., Di, L., & Stepinski, T. (2014). Web service for extracting stream networks from DEM data. *GeoJournal*, *79*, 183-193. https://doi.org/10.1007/s10708-013-9502-1

Mangla, R., & Kumar, S. (2014). DEM construction using DINSAR. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *40*(8), 817. https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-8/817/2014/isprsarchives-XL-8-817-2014.pdf

Mather, P. M., & Koch, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley & Sons.

Mohammadi, A., Bin Ahmad, B., & Shahabi, H. (2018). Extracting digital elevation model (dem) from sentinel-1 satellite imagery: Case study a part of Cameron highlands, Pahang, Malaysia. *International Journal of Applied Management Science*, *4*(9), 109-114. https://www.researchgate.net/publication/332257612

Mohammadi, A., Karimzadeh, S., Jalal, S. J., Kamran, K. V., Shahabi, H., Homayouni, S., & Al-Ansari, N. (2020). A multi-sensor comparative analysis on the suitability of generated DEM from Sentinel-1 SAR interferometry using statistical and hydrological models. *Sensors*, *20*(24), 7214. https://doi.org/10.3390/s20247214

Mokrem, M., Zarei, A., & Amiri, M. J. (2017). Morphometric evaluation, modeling and extraction of waterways from digital elevation model (DEM) using gravity subpixel model. *Journal of Water and Soil Sciences*, *22*(3), 81-94. 10.29252/jstnar.22.3.81 [In Persian].

O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Journal of Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, *28*(3), 323-344. https://www.academia.edu/download/47710594/s0734-189x_2884_2980011-020160801-5103-19m2b12.pdf

Parveen, R., Kumar, U., & Singh, V. K. (2012). Geomorphometric characterization of Upper South Koel Basin, Jharkhand: a remote sensing & GIS approach. *Journal of Water Resource and Protection*, *4*(12), 1042. http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2012.412120

Paul, D., Mandla, V. R., & Singh, T. (2017). Quantifying and modeling of stream network using digital elevation models. *Ain Shams Engineering Journal*, *8*(3), 311-321. https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.09.002

Qanadi, M., Enayati, H., & Khesali, E. (2017). Production of digital earth height model using Sentinel-1 images and radar interferometric technique. *Journal Of Geographic Information (Sepehr)*, *27*(108), 109-121. https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.34623 [In Persian].

Reigber, A., & Moreira, J. (1997). Phase unwrapping by fusion of local and global methods. In *IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development* (Vol. 2, pp. 869-871). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.615282

Shawky, M., Moussa, A., Hassan, Q. K., & El-Sheimy, N. (2019). Pixel-based geometric assessment of channel networks/orders derived from global spaceborne digital elevation models. *Remote Sensing*, *11*(3), 235. https://doi.org/10.3390/rs11030235

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *38*(6), 913-920. https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913

Sun, Q., Li, Z. W., Zhu, J. J., Ding, X. L., Hu, J., & Xu, B. (2013). Improved Goldstein filter for InSAR noise reduction based on local SNR. *Journal of Central South University*, *20*(7), 1896-1903. https://doi.org/10.1007/s11771-013-1688-3

Wang, K., Xu, X., & Fialko, Y. (2017). Improving burst alignment in TOPS interferometry with bivariate enhanced spectral diversity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *14*(12), 2423-2427. https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2767575

Yan, Y., Tang, J., & Pilesjö, P. (2018). A combined algorithm for automated drainage network extraction from digital elevation models. *Journal of Hydrological Processes*, *32*(10), 1322-1333. https://doi.org/10.1002/hyp.11479

Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*(5), 950-959. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8c282de3b8cd9f5003d87a0722b2966e28e9757c