



Research Paper

Factors Affecting Late Quaternary River Terrace Sequences in Jajrood River

Shahnaz Joudaki ^a, Ali Reza Taghian ^{b*}, Mojtaba Yamani ^c

^a. PhD. student, Department of physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and planning, , university of Isfahan, Isfahan, Iran

^b. Department of physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and planning, , university of Isfahan, Isfahan, Iran

^c. Department of physical Geography, Faculty of Geographical, , university of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

River terraces represent a history of river stratigraphy and provide valuable information for understanding the interactions of tectonics, erosion, and climate change. The high altitude of the Jajrood basin has resulted in extensive glacial remnants, especially the accumulation of moraines upstream of the basin. The extent of moraine depositions under the upstream basins of the Jajrood River is not evident in the structure of river terraces and they do not have a uniform elevation. Moreover, the relations of old glacial conditions in the sedimentary interference of terraces cannot be easily reconstructed and discriminated, and there is no regular order in the stratigraphic sequence and sedimentological conditions of the river terraces. The moraine deposition seemingly has had a major role in the differences in river terrace sequences from upstream to downstream of the study area, which calls for further investigation and is also addressed in this study. Many studies have delved into the analysis of the evolution of the river terraces. Other important areas of study include paleontology and sedimentology and their effects on the canal sustainability against flow dynamics. This study aimed to explore the climatic and neo-tectonic developments of the Jajrood River Basin and the role they have played in creating terrace sequences.

Materials and methods

This pure research investigated the role of neo-tectonic developments and climate change on the formation and evolution of terraces in the Jajrood River Basin. The research was based on analytical calculations and reports prepared through surveys as well as remote sensing methods to examine the effects of tectonics in the area. In addition, sedimentological evidence was studied to see how climate change has affected the formation and evolution of these terraces. The primary research tools were topographic and geological maps alongside aerial photographs and satellite images. Other fieldworks such as terrace morphometry using GPS measurements and sedimentological analysis helped to add insight to the findings. Then, the data was analyzed in ArcGIS. Here, the Jajrood Canyon was divided into three sections to better examine the morphogenesis of the terraces. Next, the transverse profiles and stratigraphic sections were drawn up to investigate the sedimentary strata in each section through morphometry, and then the evolution of the terraces was analyzed and reconstructed. The tectonics were studied using radar images to determine vertical displacement through the small baseline subset (SBAS) time series. Here, 27 Sentinel-1 images were used for the period from Oct. 14, 2014, to Oct.

* . Corresponding author (a.taghian@geo.ui.ac.ir)

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.342291.1007699>

Received: 26 June 2022; Received in revised form: 1 September 2022; Accepted: 27 October 2022

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

27, 2016. which was performed using Generic Mapping Tools (GMT) in Linux OS. After preparing the interferogram maps, a map of the displacement in the study area was generated using the SBAS method (Zhao, 2013). Moreover, changes in the climate were studied using sedimentological and stratigraphic evidence.

Result and discussion

The research findings can be classified into two parts. First, neo-tectonics was investigated through remote sensing methods and the analysis of vertical displacement across the region. Then, the effects of these neo-tectonic processes on the genesis and evolution of terraces were examined. In the second part, the effect of climate change on terrace developments was explored using sedimentological and stratigraphic evidence.

In the first part, the region's tectonics was analyzed using radar imagery. In doing so, the vertical displacement was measured using SBAS time series and 27 Sentinel-1 imagery during the period from Oct. 14, 2014, to Oct. 27, 2016. The specifications of the research images are presented in Table 1. The images were selected based on the research purpose and the baseline of the images relative to each other. The VV polarization was used for all images since co-polarizations exhibit a stronger backscatter. Some sensors have different polarizations, and images with different polarizations can inform interpretations to a great extent.

After preparing the images, for measuring displacement using the SBAS method, first, the temporal and spatial baseline of the images was examined and image pairs were selected for interferogram generation (Table 2 and Figure 3), which was performed using Generic Mapping Tools (GMT) in Linux OS. After preparing the interferogram maps, a map of the displacement in the study area was generated using the SBAS method. In the end, the role of morphotectonic relations in the morphogenesis (i.e., origin and development) of the terraces were examined.

Conclusion

These findings suggest that terraces in the Jajrood Canyon are highly heterogeneous in terms of sedimentological structures, stratigraphy, and altitude. For instance, the T3 to T1 terraces, respectively, were located 130, 90, and 80 m above the river. These terraces have also experienced three intermittent processes. These three river terraces were created through the combined effects of climate change, tectonic uplifts, and the formation of dam lakes. The results of SAR interferometry (InSAR) and fieldworks also confirm the effect of active tectonic uplift differences along the main canal. These differences reflect the differences in their morphogenetic processes. The altitude of the terraces at the Oushan River tributary (Section 1) is nearly 130 meters. However, this section's altitude downstream (near Hajiabad Village) is estimated at 90 m. This difference cannot be merely due to baseline discrepancies. Evidence indicates that a sedimentary interference originating in the lake due to a past landslide downstream of the study area (Hajiabad landslide) is the cause of the higher altitude of the terraces in this section. The terrace sequences were not the same in any of the three sections. To be more precise, there are three identifiable terrace levels in Section 1, two in Section 2, and one in Section 3. In addition to the differences in the tectonic baseline, three factors—namely climate change, moraine, and the formation of a landslide-dam lake downstream—were identified for the genetic diversity, sequence differences, and terrace sequences throughout the three sections. In addition to morphometric differences, there were great differences in the genesis of the terrace sediments. The river has contributed the most to the formation and structure of terraces and their genesis. Nevertheless, the interference of landslide-dam lake deposits, moraines, and alluvial deposits, consecutively or simultaneously, have affected particularly sections 1 and 2 through differences in flow dynamics. Such that upstream terraces in this section are predominantly glacial.

Keywords: Terrace, Interferometri, Jajrood Basin, Quaternary.

تحلیل عوامل تأثیرگذار بر سکناس‌های پادگانه‌ای رودخانه جاجرود طی کواترنری پسین

شهناز جودکی - دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
علیرضا تقیان^۱ - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

پادگانه‌های رودخانه‌ای میراثی از چینه‌شناسی برای درک تأثیرات متقابل تکتونیک، فرسایش و تغییرات آب و هوایی به شمار می‌روند. در این پژوهش، تحولات اقلیمی و نو زمین‌ساختی حوضه جاجرود و تأثیرات آن بر سکناس‌های پادگانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و GPS ابزارهای اساسی پژوهش را تشکیل داده‌اند. بدین منظور ابتدا مسیر آبراهه مورد مطالعه به سه بازه تقسیم شد. سپس برای بررسی تأثیرات تکتونیک روش تداخل سنجی راداری به کار گرفته شده است. میزان جابجایی عمودی توسط روش سری زمانی SBAS تعیین و از این طریق، اثرات تکتونیک بر تشکیل و تحول پادگانه‌های دره جاجرود مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین توالی تغییرات اقلیمی و دینامیک جریان رودخانه متأثر از آن نیز بر اساس شواهد رسوب‌شناسی پادگانه‌ها بازسازی شده است. سرانجام داده‌ها بعد از ورود به نرم‌افزارهای ArcGIS، GMT مورد تحلیل قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که منطقه مطالعاتی بین $+10.3$ تا -28 میلی‌متر جابجایی داشته است (۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱). مقدار بر خاستگی تحت تأثیر زمین‌ساخت فعال به‌سوی بالادست افزایش نشان می‌دهد. این اختلاف در مقدار بر خاستگی، در ارتفاع و توالی پادگانه‌ها به‌خوبی انعکاس یافته است. همچنین ورود جریان‌های یخ‌رفتی دیرینه در تلاقی انشعابات اصلی جاجرود و نیز وقوع لغزش‌های قدیمی و ایجاد دریاچه سدی در تغییرات مقطعی سطوح ارتفاعی پادگانه‌ها و بی‌نظمی آن‌ها تأثیرگذار بوده‌اند.

واژگان کلیدی: پادگانه، تداخل سنجی راداری، حوضه جاجرود، کواترنری.

مقدمه

در طی کواترنری، نیروهای تکتونیکی با دخالت تغییرات اقلیمی منجر به ایجاد لندفرم‌ها و یا تغییر شکل در لند فرم‌های قدیمی شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). با توجه به ارتفاع حوضه جاجرود آثار یخچالی به‌ویژه انباشت یخرفت‌ها در بالادست حوضه موردبررسی و حد گسترش جریان‌های یخرفتی زیر حوضه‌های بالادست رودخانه جاجرود در ساختمان پادگانه‌های رودخانه‌ای مشخص نبوده و حد ارتفاعی یکنواختی را نشان نمی‌دهند. از طرفی ارتباط شرایط یخچالی دیرینه در تداخل رسوبی پادگانه‌ها به‌سادگی قابل‌بازسازی و تفکیک نیست و توالی چینه‌شناسی و شرایط رسوب‌شناسی پادگانه‌های رودخانه‌ای ترتیب مشخصی را نشان نمی‌دهد. این یخرفت‌ها طی دوره گرم توسط سرشاخه‌های رود جاجرود به‌صورت پادگانه‌ای حفر شده‌اند. به نظر می‌رسد نفوذ جریان‌های یخرفتی نقش مهمی در اختلاف توالی پادگانه از بالادست حوضه تا پایین دست محدوده مورد مطالعه داشته‌اند که نیازمند بررسی بوده و این موارد مسائل اصلی این پژوهش را تشکیل داده‌اند. همچنین توالی پادگانه‌ها در طول مسیر رودخانه یکسان نیست و مشخص نیست که تغییرات دینامیک جریان نتیجه تغییرات اقلیمی گذشته از طریق نفوذ جریان‌های یخچالی عامل این اختلافات بوده‌اند یا ژنز این تناوب، عملکرد متفاوت مورفودینامیک درونی در طول حوضه بوده است؛ گذشته از این مهم‌ترین مسئله پژوهش آن است که این سطوح فرسایشی که آثار آن‌ها در دامنه‌های جاجرود قابل مشاهده است، آیا صرفاً تحت تأثیر دینامیک جریانی رودخانه جاجرود ایجاد شده‌اند یا عوامل دیگری نیز مشارکت داشته‌اند؟ برای دستیابی به مورفوژنز پادگانه‌های جاجرود، فرضیه‌ها بیشتر روی ژنتیک سه نوع پادگانه یعنی پادگانه‌های یخچالی، دریاچه‌ای و پادگانه‌های رودخانه‌ای و تداخل آن‌ها تأکید دارد. همچنین به نظر می‌رسد برخلاف ترتیب سنی منظم در پادگانه‌های رودخانه‌ای، نهشته‌های پادگانه‌ای دریاچه‌ای با منشأ یخچالی، سدی-لغزشی، سدی-یخرفتی، موجب عدم تطابق سنی چینه‌شناسی پادگانه‌ها در طول مسیر آبراهه شده‌اند.

پادگانه‌های رودخانه‌ای، سوابق روشنی از فرآیندهای زمین‌شناسی را به شکل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و رسوبات رودخانه‌ای در نتیجه فعالیت‌های درونی و بیرونی حفظ می‌کنند (شوم، ۱۹۷۷). تغییرات ناشی از عوامل تأثیرگذار معمولاً در مقیاس‌های زمانی نسبتاً کوتاه (۱۰ a - ۱۰۰۰) رخ می‌دهند و لند فرم‌های کوچکی (در مقیاس ۱۰-۱۰۰۰ متر) را ایجاد می‌کنند (مدی و همکاران ۲۰۰۱؛ ۲۰۰۸؛ واندنبرگ، ۲۰۰۲). عوامل اولیه مؤثر بر تکامل پادگانه‌های رودخانه‌ای در مقیاس‌های مکانی-زمانی بیشتر شامل فرآیندهای خارجی، بوده است به‌عنوان مثال، فعالیت‌های زمین ساختی، تغییرات آب و هوایی و تغییرات سطح اساس (بریگلند، ۲۰۰۰؛ واندنبرگ و مدی، ۲۰۰۱؛ واندنبرگ، ۲۰۰۳، ۲۰۰۲). تغییرات آب و هوایی و تغییرات دبی متأثر از آن منجر به برش و رسوب متناوب ناشی از تغییر در نسبت جریان به بار رسوب می‌شود. چنین فرآیندهایی ممکن است توسعه پادگانه را در مناطقی با فعالیت‌های تکتونیکی جزئی توضیح دهند، اما نمی‌توانند توسعه پادگانه‌های چندمرحله‌ای را توضیح دهند (بول، ۱۹۷۹، ۱۹۹۰؛ ژو و ژو، ۲۰۰۷).

برخاستگی تکتونیکی پایدار نقش مهمی در توسعه پادگانه‌ها ایفا می‌کند. در طول قرن نوزدهم و بیستم، نظریه پانژئوسنگلینال مبنای مدل‌های برخاستگی پوسته و کنترل آن بر توسعه پادگانه‌های رودخانه‌ای بود (چمبرز، ۱۸۴۸؛ هوم، ۱۸۷۵؛ ویتاکر، ۱۸۷۵). در حال حاضر، اکثر زمین‌شناسان موافق‌اند که توسعه پادگانه‌های رودخانه‌ای توسط اثرات ترکیبی برخاستگی تکتونیکی و تغییرات آب و هوایی هدایت می‌شود (مدی و همکاران، ۲۰۰۰؛ بریگلند و همکاران، ۲۰۰۴؛ بریگلند و وستاوی، ۲۰۰۸؛ وستاوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ هر فرید و همکاران، ۲۰۱۲؛ هو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ویوین و همکاران، ۲۰۱۳؛ رن و همکاران، ۲۰۱۴). برخی محققان معتقدند که عامل اصلی کنترل‌کننده توسعه پادگانه، برخاستگی تکتونیکی است و تغییرات آب و هوایی را می‌توان در مناطق با بالا آمدن سریع نادیده گرفت (چنگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ سان، ۲۰۰۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴). درواقع، آب‌وهوا و تکتونیک هر دو به‌عنوان عوامل مؤثر در شکل‌گیری پادگانه‌ها به‌حساب می‌آیند. محققان مختلفی در ایران پادگانه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند؛ از جمله مقصودی و

شرفی (۱۳۹۴) به مطالعات زمین‌باستان‌شناسی در قلمرو پادگانه‌های رودخانه‌ای در حوضه رودخانه سیمره پرداخته‌اند. احمدی و همکاران (۱۴۰۰) به تحلیل مورفوتنیکی سکناس‌های پادگانه‌ای دره هراز در محدوده آب اسک پرداختند. در این پژوهش فرایندهای دخیل در تشکیل پادگانه‌های دره هراز و نقش رسوبات آذرآواری دماوند در تغییر رفتار آبی رودخانه هراز و تشکیل دریاچه سدی در محل آب اسک مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف روش تحلیلی و بازسازی زمانی تغییرات به کار گرفته شده است. تکنیک کار، مقایسه مورفومتری پادگانه‌های دریاچه‌ای و سدهای یخچالی - پیروکلاستی به چهار روش بازه بندی منطقه مورد مطالعه، مقایسه ارتفاع و ضخامت رسوبات آبرفتی، تعیین حدود گسترش رسوبات دریاچه‌ای و بازیابی حد ارتفاعی موانع محصورکننده دره هراز استوار است.

معینی و همکاران (۱۳۸۸) به تعیین سن پادگانه‌های دوره کواترنری در حوضه آبخیز طالقان پرداختند، روشی که برای سن سنجی استفاده شده است، لومینسانس حرارتی یا ترمولومینسانس است که در حوضه آبخیز طالقان انجام گرفته است. داودی و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل ویژگی‌های رسوب‌شناسی پادگانه‌های آبرفتی رودخانه زاینده‌رود و تعیین منشأ آن‌ها پرداختند. یمانی و همکاران (۱۳۹۴) به بازسازی سطوح دیرینه دریاچه ارومیه در کواترنری با مطالعه پادگانه‌های دریاچه‌ای پرداختند. هدف آن‌ها از انجام این پژوهش شناسایی و بررسی پادگانه‌های کواترنری دریاچه ارومیه، تعیین ارتفاع آن‌ها و بازسازی سطوح و مناطق دیرینه تحت تأثیر نوسانات سطح آب دریاچه بود.

محققانی دیگری مانند (جعفری و عباسی، ۱۳۹۸؛ رضایی و زارع زاده، ۱۳۹۳؛ درفشی و همکاران، ۱۳۹۶؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ ترابی گل‌سفیدی و کریمیان اقبال، ۱۳۸۱؛ صالحی پور میلانی و همکاران، ۱۳۹۶ و فتاحی و همکاران، ۱۳۹۸) پادگانه‌ها را مورد پژوهش و مطالعه قرار داده‌اند.

با توجه به بررسی پیشینه و سابقه مطالعاتی که در منطقه جاجرود صورت گرفته، مطالعات قبلی به صورت پراکنده و در ارتباط با زمین‌شناسی عمومی، هیدرولوژی و... بوده است و هیچ مطالعه جامعی در مورد ژئومورفولوژی و لندفرم‌های منطقه و عوامل به وجود آورنده آن‌ها و پادگانه‌ها و ارتباط این پادگانه‌ها با تغییرات اقلیمی و تکتونیک منطقه در گذشته و بازسازی تغییرات اقلیمی کواترنری در ارتباط با مورفونز این پادگانه‌ها صورت نگرفته است. لذا این پژوهش در پی تحلیل عوامل تأثیرگذار بر سکناس‌های پادگانه‌ای رودخانه جاجرود طی کواترنری پسین است.

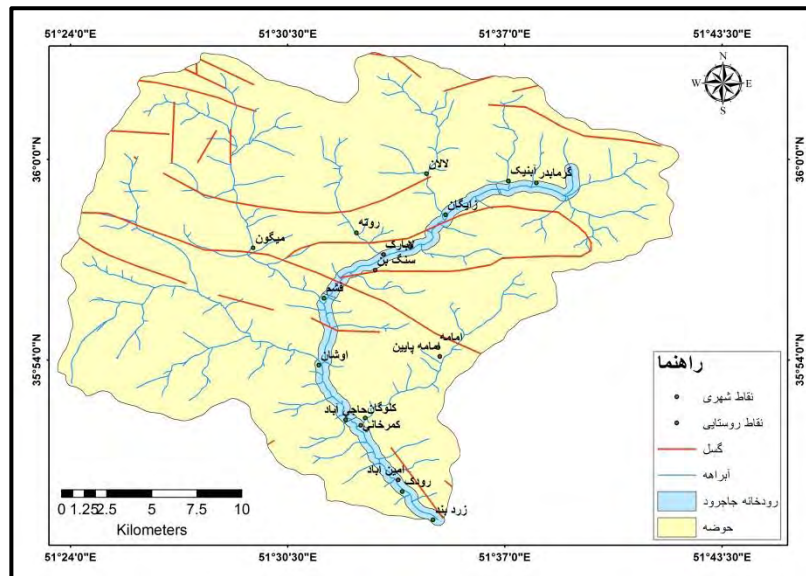
روش پژوهش

پژوهش حاضر بنیادی است که باهدف بررسی نقش نو زمین ساخت و تغییرات اقلیمی بر تشکیل و تحول پادگانه‌ها در سطح حوضه آبریز جاجرود، بر اساس محاسبات تحلیلی و گزارش‌های نهایی به‌دست‌آمده از پژوهش‌های میدانی، روش‌های سنجش‌ازدوری برای ارزیابی اثرات تکتونیک بر منطقه و همچنین شواهد رسوب‌شناسی جهت بررسی نقش تغییرات اقلیمی و تکتونیک بر تشکیل و تحول پادگانه‌ها صورت گرفته است. نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای برای مقایسه تغییرات زمانی و مکانی، ابزارهای اصلی پژوهش را تشکیل داده‌اند. علاوه بر این از تکنیک‌های میدانی مانند مورفومتری پادگانه‌ها توسط دستگاه GPS برای تعیین موقعیت پادگانه‌ها در بازه‌های رودخانه‌ای و برای بررسی ساختمان و تناوب چینه‌شناسی پادگانه‌ها، متر کشی ساختمان چینه‌بندی و بررسی‌های رسوب‌شناسی استفاده شده است. داده‌های به‌دست‌آمده بعد از ورود به نرم‌افزار ArcGIS مورد تحلیل قرار گرفته است؛ در گام بعد برای بررسی مورفونز پادگانه‌ها، طول دره جاجرود به سه بازه اصلی تقسیم‌بندی شده است. سپس با ترسیم پروفیل‌های عرضی و مقاطع چینه‌شناسی، لایه‌های رسوبی در بازه‌های مورد بررسی مورفومتری شد و سپس سیر تحولات پادگانه‌های مورد بررسی تحلیل و بازسازی شده است. تکنیک کار طی مراحل مشخصی انجام شده است: الف (مقایسه ارتفاع، ضخامت و توالی رسوب پادگانه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه، از طریق کارهای میدانی ب) تعیین ارتفاع

پادگانه‌ها و ساختمان و بافت لایه‌های رسوبی آن‌ها با استفاده از آزمایش‌های دانه سنجی یا گرانولومتری (ج) بازه بندی منطقه با توجه به تفاوت‌های لند فرمی به سه سایت مجزا برای مقایسه مکانی تفاوت مورفومتری پادگانه‌ها؛ د تطبیق یافته‌ها و تحلیل نتایج و سرانجام بازسازی تحولات دیرینه منطقه مورد بررسی. در مراحل مورد اشاره برای بررسی تأثیرات زمین ساختی، با استفاده از تصاویر راداری، به منظور بررسی میزان جابجایی عمودی منطقه از روش سری زمانی SBAS استفاده شده است، در این میان ۲۷ تصویر ماهواره سنتینل ۱ در طی بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۱۴ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۷ به کار گرفته شده‌اند. انتخاب تصاویر بر مبنای هدف تحقیق و همچنین میزان Baseline تصاویر نسبت به هم بوده است. برای هر ۲۷ تصویر نیز از قطبش VV به دلیل هم‌سان داری بازگشت قوی‌تری استفاده شده است. در روش تداخل سنجی راداری، تصاویر مختلف راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویری در قالب تداخل نگاشت (اینترفروگرام) تولید شده است (دنیل و همکاران، ۲۰۰۳). در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار گرفته است که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کم‌تر از مقدار بحرانی خط مبنای بوده است، همچنین خط مبنای برای فاصله زمانی آن‌ها نیز هم برای زمان کمینه در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، فقط تداخل نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کم‌ترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود (دونگ و همکاران، ۲۰۱۴). پس از تهیه تصاویر، به منظور ارزیابی میزان جابجایی منطقه با استفاده از روش سری زمانی SBAS، ابتدا وضعیت بیس لاین زمانی و مکانی تصاویر بررسی شده است و بر اساس آن زوج تصاویر برای تشکیل اینترفروگرام انتخاب شده است. پس از انتخاب زوج تصاویر مورد نظر، از طریق نرم‌افزار GMT در سیستم عامل LINUX، نقشه‌های اینترفروگرام مورد نظر تهیه شده است. پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، با استفاده از روش سری زمانی SBAS نقشه میزان جابجایی منطقه تهیه شده است (ژائو، ۲۰۱۳). جهت بررسی تغییرات اقلیمی از شواهد رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی استفاده است.

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز جاجرود، در شمال شرقی شهرستان تهران، بین طول ۵۱ درجه و ۲۲ دقیقه الی ۵۱ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه الی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی واقع شده است. البرز از نظر چینه‌شناسی و تکتونیک اختصاصات یکنواخت نداشته و به واحدهای مختلف کپه داغ و البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی و آذربایجان تقسیم می‌شود. حوضه آبریز جاجرود در یال جنوبی البرز مرکزی قرار گرفته است. مساحت آن ۱۸۹۰ کیلومتر مربع است که از این مساحت حدود ۷۱۰ کیلومتر مربع آ در بالادست سد لتیان و ۱۱۸۰ کیلومتر مربع آن در پایین دست سد لتیان قرار گرفته است. طول شاخه اصلی جاجرود حدود ۴۲ کیلومتر است. از نظر زمین‌شناسی توف سبز بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و به لحاظ زمین‌ساخت تحت تأثیر راندگی مشاء-فشم قرار گرفته است که دارای راستای شرق-جنوب شرق، غرب-شمال غرب است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰) (شکل ۱).



شکل ۱. حوضه آبریز جاجرود

بحث و یافته‌ها

یافته‌های این تحقیق در دو بخش بررسی شده است. بخش نخست نو زمین ساخت با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدوری از طریق ارزیابی میزان جابجایی عمودی منطقه و سپس ارزیابی اثرات نو زمین ساخت بر تشکیل و تحول پادگانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ سپس در بخش دوم به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی در تشکیل و تحول پادگانه‌ها، با استفاده از شواهد رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی پرداخته شده است.

۱. تحلیل وضعیت تکتونیکی منطقه با استفاده از تصاویر راداری

یکی از اهداف پژوهش، ارزیابی وضعیت تکتونیکی منطقه با استفاده از تصاویر راداری است. به منظور بررسی میزان جابجایی عمودی منطقه از روش سری زمانی SBAS استفاده می‌شود، از ۲۷ تصویر ماهواره سنتینل ۱ در طی بازه زمانی ۲۰۱۴/۱۰/۱۴ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۷ استفاده شده است که در جدول ۱ مشخصات تصاویر مورد استفاده نشان داده شده است. انتخاب تصاویر بر مبنای هدف تحقیق و همچنین میزان Baseline تصاویر نسبت به هم بوده است. برای هر ۲۷ تصویر نیز از قطبش VV استفاده گردیده است چراکه قطبش‌های همسان داری بازگشت قوی‌تری هستند. بعضی از سنجنده‌ها می‌توانند چندین نوع قطبش داشته باشند که در این صورت، داشتن تصاویر با قطبش‌های مختلف کمک بزرگی به تفسیر می‌کند.

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده

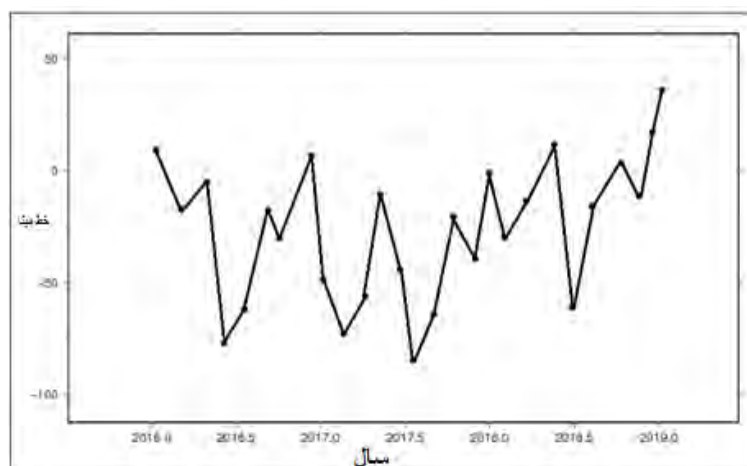
ردیف	ماهواره	تاریخ	Beam	نوع تصویر	حالت مداری	Polarization
۱	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۱/۰۶	IW	SLC	صعودی	VV
۲	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۲/۲۳	IW	SLC	صعودی	VV
۳	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۴/۱۱	IW	SLC	صعودی	VV
۴	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۵/۲۹	IW	SLC	صعودی	VV
۵	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۷/۰۴	IW	SLC	صعودی	VV
۶	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۸/۰۹	IW	SLC	صعودی	VV
۷	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۰۹/۲۶	IW	SLC	صعودی	VV
۸	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۱۱/۱۳	IW	SLC	صعودی	VV
۹	سنتینل ۱	۲۰۱۶/۱۲/۳۱	IW	SLC	صعودی	VV
۱۰	سنتینل ۱	۲۰۱۷/۰۲/۰۵	IW	SLC	صعودی	VV

۱۱	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۰۳/۱۳	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۲	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۰۴/۱۸	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۳	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۰۵/۲۴	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۴	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۰۶/۲۹	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۵	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۰۸/۰۴	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۶	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۰۹/۰۹	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۷	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۱۱/۲۰	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۸	۱	ستتیل	۲۰۱۷/۱۲/۲۶	IW	SLC	صعودی	۷۷
۱۹	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۰۱/۳۱	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۰	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۰۳/۰۸	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۱	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۰۵/۱۹	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۲	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۰۶/۲۴	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۳	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۰۷/۳۰	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۴	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۰۹/۰۴	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۵	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۱۰/۱۰	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۶	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۱۱/۱۵	IW	SLC	صعودی	۷۷
۲۷	۱	ستتیل	۲۰۱۸/۱۲/۲۱	IW	SLC	صعودی	۷۷

پس از تهیه تصاویر، به منظور ارزیابی میزان جابجایی منطقه با استفاده از روش سری زمانی SBAS، ابتدا وضعیت بیس لاین زمانی و مکانی تصاویر بررسی، و بر اساس آن زوج تصاویر برای تشکیل اینترفروگرام انتخاب شده است (جدول ۲ و شکل ۳). پس از انتخاب زوج تصاویر موردنظر، از طریق نرم‌افزار GMT در سیستم عامل LINUX، نقشه‌های اینترفروگرام موردنظر تهیه شده است.

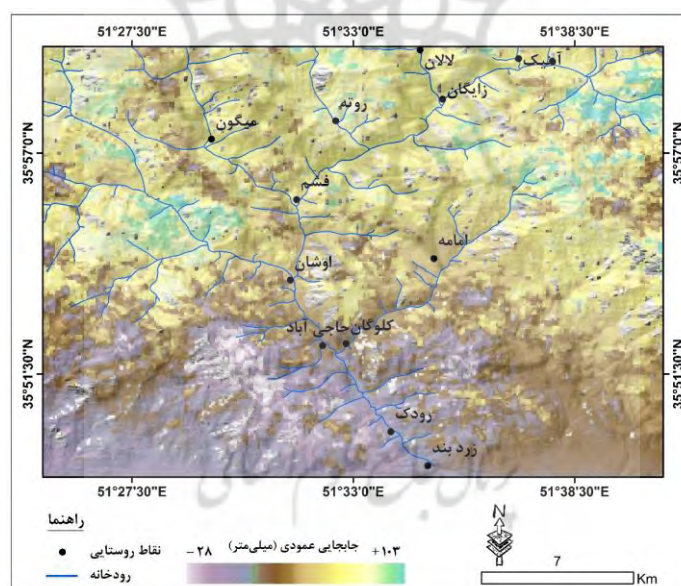
جدول ۲. زوج تصاویر انتخابی برای تشکیل اینترفروگرام

ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر
۱	۲۰۱۶/۰۲/۲۳-۲۰۱۶/۰۱/۰۶	۱۴	۲۰۱۷/۰۸/۰۴-۲۰۱۷/۰۶/۲۹
۲	۲۰۱۶/۰۴/۱۱-۲۰۱۶/۰۲/۲۳	۱۵	۲۰۱۷/۰۹/۰۹-۲۰۱۷/۰۸/۰۴
۳	۲۰۱۶/۰۵/۲۹-۲۰۱۶/۰۴/۱۱	۱۶	۲۰۱۷/۱۱/۲۰-۲۰۱۷/۰۹/۰۹
۴	۲۰۱۶/۰۷/۰۴-۲۰۱۶/۰۵/۲۹	۱۷	۲۰۱۷/۱۲/۲۶-۲۰۱۷/۱۱/۲۰
۵	۲۰۱۶/۰۸/۰۹-۲۰۱۶/۰۷/۰۴	۱۸	۲۰۱۸/۰۱/۳۱-۲۰۱۸/۱۲/۲۶
۶	۲۰۱۶/۰۹/۲۶-۲۰۱۶/۰۸/۰۹	۱۹	۲۰۱۸/۰۳/۰۸-۲۰۱۸/۰۱/۳۱
۷	۲۰۱۶/۱۱/۱۳-۲۰۱۶/۰۹/۲۶	۲۰	۲۰۱۸/۰۵/۱۹-۲۰۱۸/۰۳/۰۸
۸	۲۰۱۶/۱۲/۳۱-۲۰۱۶/۱۱/۱۳	۲۱	۲۰۱۸/۰۶/۲۴-۲۰۱۸/۰۵/۱۹
۹	۲۰۱۷/۰۲/۰۵-۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۲۲	۲۰۱۸/۰۷/۳۰-۲۰۱۸/۰۶/۲۴
۱۰	۲۰۱۷/۰۳/۱۳-۲۰۱۷/۰۲/۰۵	۲۳	۲۰۱۸/۰۹/۰۴-۲۰۱۸/۰۷/۳۰
۱۱	۲۰۱۷/۰۴/۱۸-۲۰۱۷/۰۳/۱۳	۲۴	۲۰۱۸/۱۰/۱۰-۲۰۱۸/۰۹/۰۴
۱۲	۲۰۱۷/۰۵/۲۴-۲۰۱۷/۰۴/۱۸	۲۵	۲۰۱۸/۱۱/۱۵-۲۰۱۸/۱۰/۱۰
۱۳	۲۰۱۷/۰۶/۲۹-۲۰۱۷/۰۵/۲۴	۲۶	۲۰۱۸/۱۲/۲۱-۲۰۱۸/۱۱/۱۵



شکل ۳. انتخاب تصاویر بر اساس بیس‌لاین زمانی و مکانی

پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، با استفاده از روش سری زمانی SBAS نقشه میزان جابجایی منطقه تهیه شده است (شکل ۴)؛ که بر اساس نتایج حاصله منطقه مورد مطالعه بین $+۱۰۳$ تا -۲۸ میلی‌متر جابجایی داشته است که به عبارت دیگر می‌توان گفت که این منطقه در طی دوره زمانی ۳ ساله (از تاریخ $۲۰۱۶/۰۱/۰۶$ تا $۲۰۱۸/۱۲/۲۱$) ۱۰۳ میلی‌متر بالآمدگی نیمرخ طولی آبراهه یعنی در حوضه تا بازه یک و همچنین ۲۸ میلی‌متر فرونشست داشته است. بررسی نقشه نهایی بیانگر این است که ارتفاعات شمالی محدوده مطالعاتی دارای بالآمدگی بوده است که می‌توان آن را به عوامل تکتونیکی نسبت داد.



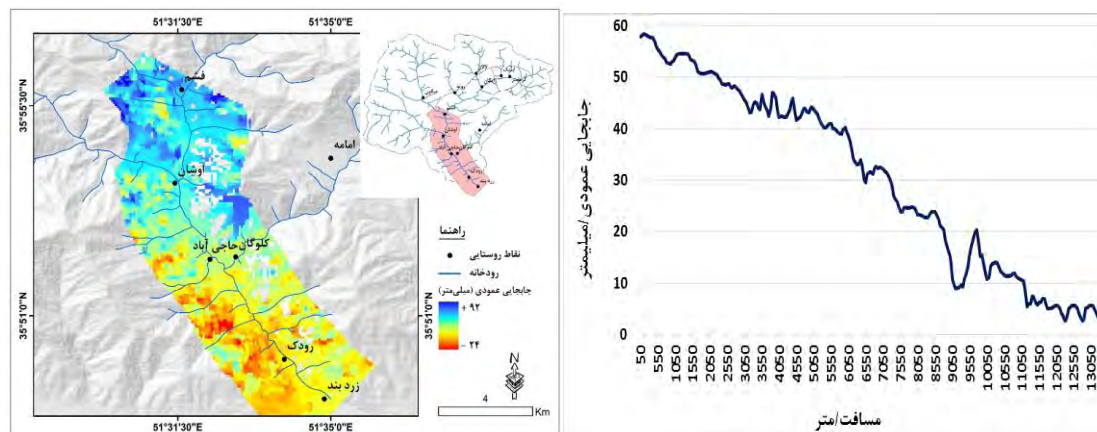
شکل ۴. میزان جابجایی عمودی منطقه از تاریخ $۲۰۱۶/۰۱/۰۶$ تا $۲۰۱۸/۱۲/۲۱$

با توجه اینکه از تصاویر راداری و روش تداخل‌سنجی راداری به منظور ارزیابی وضعیت تکتونیکی منطقه و همچنین صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است،

۱.۱. بررسی وضعیت تکتونیکی در محدوده بازه‌های مورد مطالعه و محاسبه میزان جابجایی عمودی در مسیر رودخانه و نیمرخ‌های آن‌ها

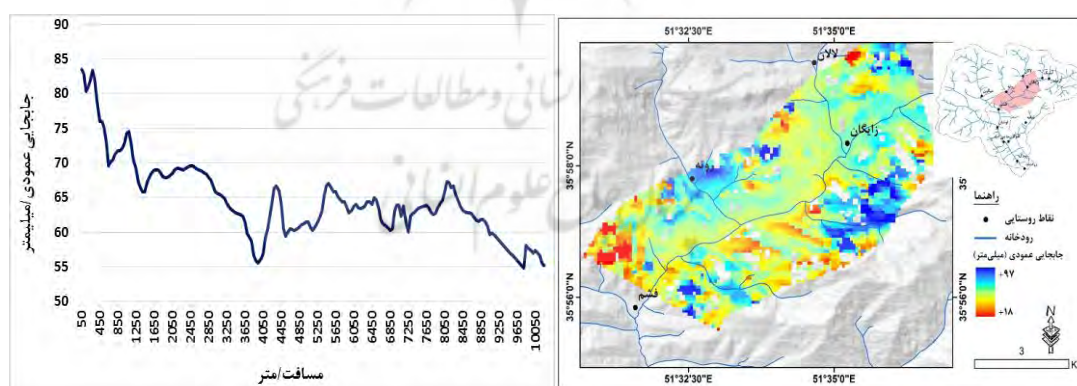
الف. (بازه ۱)، در شکل ۵ نقشه میزان جابجایی عمودی و نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در بازه ۱ نشان داده شده است. بر اساس نقشه تهیه شده، در یک‌روند کلی، مناطق بالادست این بازه با بالآمدگی مواجه شده، و مناطق پایین‌دست

آن با پایین رفتگی همراه بوده است. همچنین در نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه، مناطق بالادست رودخانه حدود ۶۰ میلی‌متر و مناطق پایین‌دست آن حدود ۳ میلی‌متر بالآمدگی داشته است. بر اساس نیمرخ تهیه‌شده، جابجایی عمودی ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی سبب شده است تا در یک‌روند کلی، مناطق بالادست رودخانه با بالآمدگی زیادی مواجه شود که همین مسئله در بلندمدت سبب افزایش شیب رودخانه و تشدید فرسایش می‌شود.



شکل ۵. میزان جابجایی عمودی و نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در بازه ۱ از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱

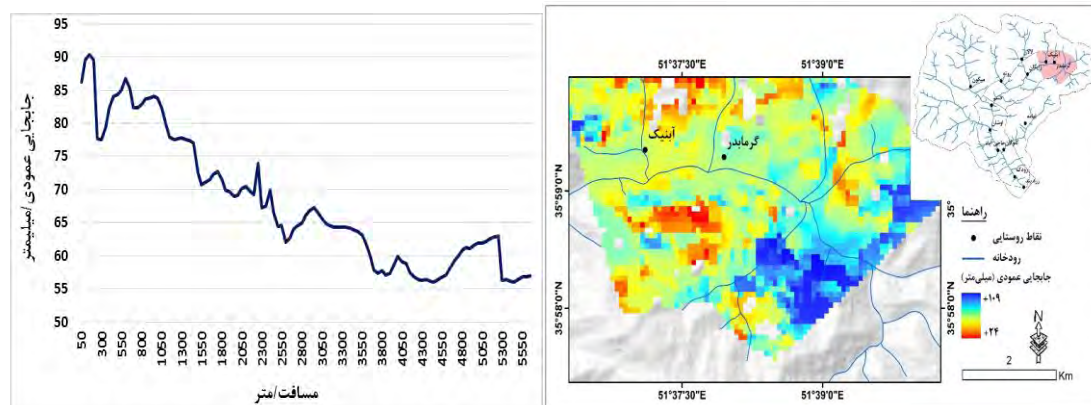
ب. (بازه ۲)، در شکل ۶ نقشه میزان جابجایی عمودی و نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در بازه ۲ نشان داده شده است. بر اساس نقشه تهیه‌شده، در این بازه نیز در یک‌روند کلی، مناطق بالادست این بازه با بالآمدگی و مناطق پایین‌دست آن با پایین‌افتادگی همراه بوده است. همچنین بر اساس نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در این بازه، مناطق بالادست رودخانه حدود ۸۴ میلی‌متر و مناطق پایین‌دست آن حدود ۵۵ میلی‌متر بالآمدگی داشته است. بر اساس نیمرخ تهیه‌شده، جابجایی عمودی ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی سبب شده است تا در یک‌روند کلی، مناطق بالادست رودخانه با بالآمدگی زیادی مواجه شود.



شکل ۶. میزان جابجایی عمودی و نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در بازه ۲ از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱

ج. (بازه ۳)، در شکل ۷ نقشه میزان جابجایی عمودی و نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در بازه ۳ نشان داده شده است. بر اساس نقشه تهیه‌شده، در این بازه نیز، مناطق بالادست این بازه با بالآمدگی و مناطق پایین‌دست آن با پایین‌افتادگی همراه بوده است. همچنین بر اساس نیمرخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در این بازه، مناطق بالادست رودخانه حدود ۹۰ میلی‌متر و مناطق پایین‌دست آن حدود ۵۶ میلی‌متر بالآمدگی داشته است. بر اساس نیمرخ تهیه‌شده، جابجایی عمودی

ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی سبب شده است تا در یک‌روند کلی، مناطق بالادست رودخانه با بالآمدگی زیادتری مواجه شود که همین مسئله در بلندمدت سبب افزایش شیب رودخانه و تشدید فرسایش شده است.



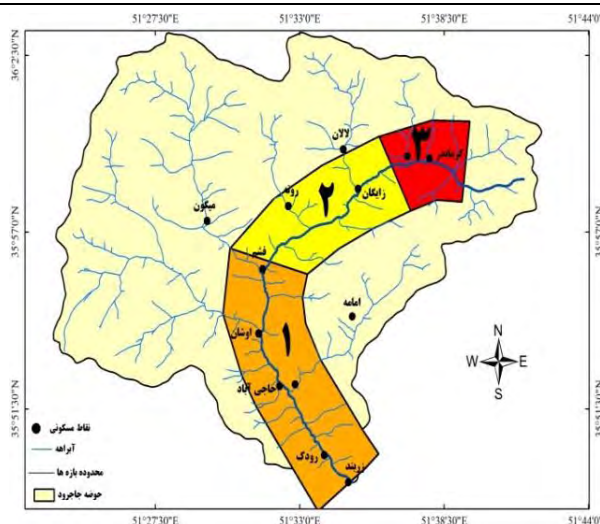
شکل ۷. میزان جابجایی عمودی و نیم‌رخ میزان جابجایی عمودی رودخانه در بازه ۳ از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱

۲.۱. ارتباط مورفو تکتونیک در مورفوژنتیک پادگانه‌ها

از آنجا که پادگانه‌های جدیدتر بیش از ۱۰ متر بالاتر از بستر رودخانه ارتفاع دارند بنابراین به نظر نمی‌رسد تنها تحولات آب و هوایی تأثیرگذار بوده‌اند. از طرفی ضخامت چینه‌شناسی لایه‌های واحد در بخش شمالی تقریباً برابر با ضخامت بخش جنوبی است. این ویژگی را می‌توان در هر چهار پادگانه اصلی بازیابی نمود. این ویژگی‌های بر خاستگی زمین ساختی پادگانه‌ها را تأیید می‌کند. یافته‌های تداخل سنجی راداری نیز مؤید این موضوع است. با این وجود، فرایش در طول نیم‌رخ اصلی جاجرود یکسان نیست. به طوری که یافته‌ها نشان می‌دهد که مقدار بالآمدگی در بالادست حوضه حدود ۹۰ میلی‌متر و در پایین دست حوضه حدود ۶۰ میلی‌متر است. بدیهی است این اختلاف در دامنه بر خاستگی می‌تواند نیروی پیوسته‌ای را برای برش پادگانه‌ها به‌ویژه در بالادست و بخش میانی آبراهه فراهم کند. به همین دلیل ارتفاع پادگانه‌ها در بخش‌های مورد اشاره بیش از ۱۰ متر مرتفع‌تر از سایر بخش‌ها است.

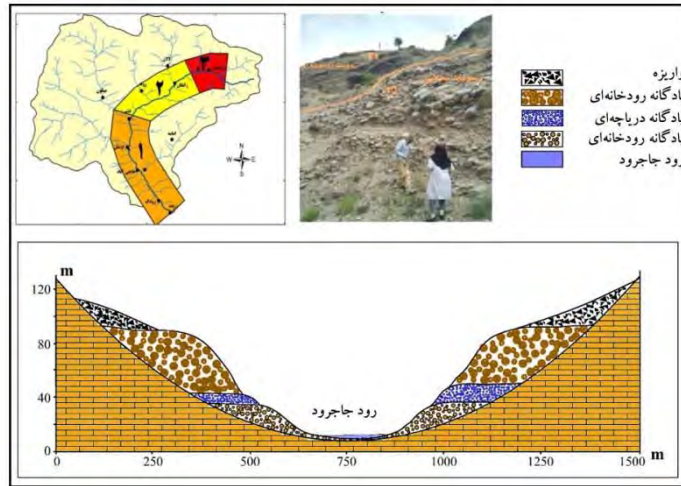
۲. تحلیل شواهد رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی پادگانه‌ها از منظر نقش تغییرات اقلیمی

با توجه به ارتفاع قله کوهستانی در سرشاخه‌های حوضه جاجرود و وجود آثار یخچالی به‌ویژه انباشت‌های یخرفتی و سیرک‌های متعدد در بالادست حوضه، استیلای فرآیندهای یخچالی را بر تحول پادگانه‌ها تأیید می‌کند. وجود توده‌های یخرفتی قدیمی در خروجی برخی از سرشاخه‌های منتهی به آبراهه اصلی تأثیر توسعه یخچالی را در آن دوره اثبات می‌کند. در این میان شواهد رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی شاخص‌ترین کلیدها برای تأیید این موضوع به شمار می‌روند. در این راستا برای دستیابی به هدف کارهای رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی در قالب سه بازه مشخص در طول آبراهه اصلی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۸).



شکل ۸. بازه بندی مسیر آبراهه مورد مطالعه

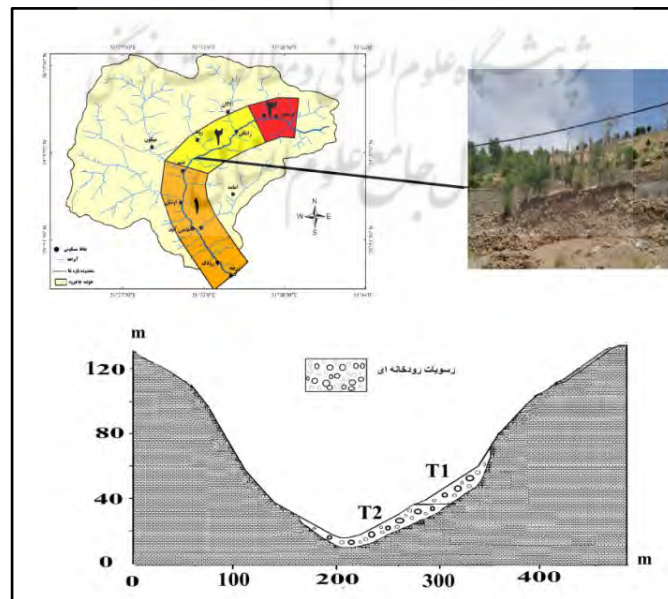
بازه (۱) پادگانه‌های دریاچه‌ای: این بازه از آبدی زربند شروع می‌شود و تا حدود فشم ادامه دارد. در این محدوده با توجه به موقعیت زمین لغزشی، آثار سد لغزشی و همچنین داده‌های رسوب‌شناسی ژئوگال پادگانه‌ها از نوع دریاچه‌ای است (شکل ۸). مرتفع‌ترین پادگانه‌های دره جاجرود با ارتفاع حدود ۱۳۰ متر از بستر کنونی رودخانه در این بازه قرار گرفته است. علاوه بر این ضخیم‌ترین پادگانه‌ها نیز در این بازه قرار دارند. به نظر می‌رسد دلیل آن علاوه بر اختلاف ارتفاع ناشی از دخالت گسل مشاء فشم، دبی جریان بعد از پارگی سد لغزشی نیز تأثیرگذار بوده است. پادگانه‌های این بازه از سه سطح متمایز به ترتیب از قدیم به جدید T1، T2 و T3 تشکیل شده‌اند. رسوبات پادگانه T1 عمدتاً آبرفت دانه زیر و پادگانه T2 آبرفت با بافت درشت و سیلابی و سپس پادگانه T3 از رسوبات با بافت نسبتاً ریز تشکیل شده است (شکل ۹). از آنجاکه رسوب‌گذاری دریاچه‌ها در محیط آرام‌تری نسبت به محیط‌های پرتلاطم رودخانه‌ای انجام می‌گیرد، بنابراین، نهشته‌های دریاچه‌ای در این بازه عموماً ریزدانه‌تر و درجه همگنی بالاتری دارند. علاوه بر این، نهشته‌های دریاچه‌ای چینه‌بندی منظم‌تری نسبت به نهشته‌های رودخانه‌ای دارند و این سه ویژگی وجه تمایز نهشته‌های این دو محیط محسوب می‌شود. علاوه بر این ضخامت زیاد لایه‌ها در پادگانه‌های این بازه، تابع دو متغیر اصلی است. یکی طول مدت نهشته‌گذاری در شرایط پایدار و دوم تناوب جریان دبی بعد از پارگی سد لغزشی است. بدیهی است در شرایط پایدار، ضخامت لایه‌ها رابطه مستقیمی با حجم دبی رسوبی و زمان نهشته‌گذاری دارد (یمانی، ۱۳۹۹)؛ از این رو تسلط چنین شرایطی در بازه یک توجیه‌کننده ارتفاع پادگانه‌ها در این بخش است. ناگفته نماند که مورفومتری و ساختمان چینه‌بندی پادگانه‌ها از تسلط دوره‌های سیلابی رودخانه هم‌زمان با گذر از دوره یخچالی و گرم شدن اقلیم و تابع آن ذوب یخچال‌های کوهستانی بالادست تأثیر پذیرفته است. به عبارتی با پس‌روی یخچال‌ها در بالادست حوضه و فراوانی نهشته‌ها و تیل‌های یخرفتی باقی‌مانده در کف دره‌ها موجب شده‌اند که هم‌زمان با افزایش دبی حجم دبی رسوبی نیز افزایش چشمگیری نسبت به شرایط کنونی داشته باشند. بدیهی است تسلط چنین شرایطی ضخامت پادگانه‌ها را در پایین‌دست حوضه توجیه می‌کند.



شکل ۹. موقعیت مرتفع‌ترین پادگانه دره جاجرود مقطع چینه‌شناسی و نیم‌رخ عرضی در محل اوشان (بازه اول)

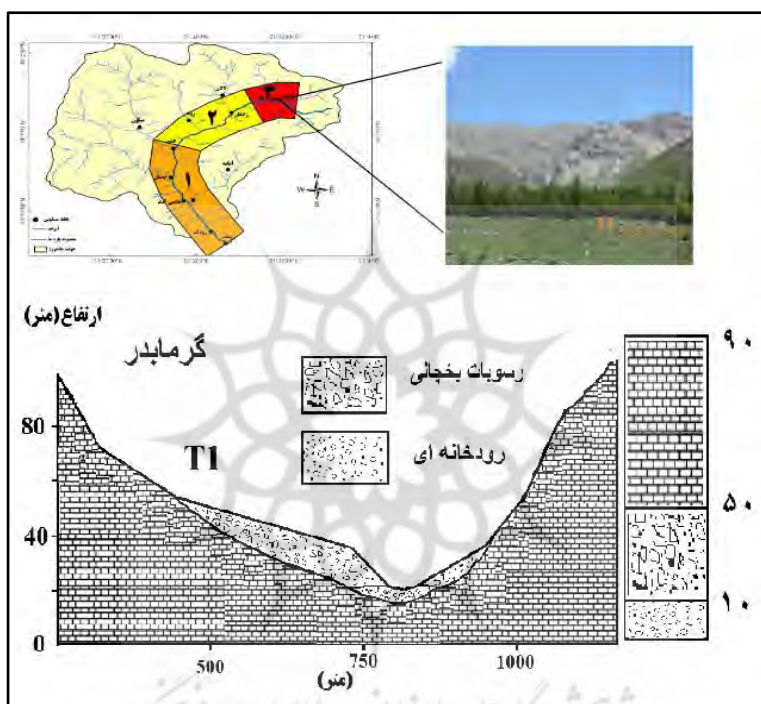
بازه ۲ پادگانه‌های رودخانه‌ای: این بازه از حدود فشم آغاز می‌شود و تا آبنیک ادامه دارد؛ ژنز غالب پادگانه‌ها در این بازه رودخانه‌ای است. رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای بیشتر بسیار ناهمگن بوده و تغییرات بافت آن‌ها بسیار زیاد است به طوری که بین نهشته‌های کواترنری جزء بی‌نظم‌ترین آن‌ها قرار می‌گیرند. (یمانی، ۱۳۹۹).

پادگانه‌ها در این بازه دارای دو سطح پادگانه T1 و T2 با بافت رسوبی رودخانه‌ای عادی می‌باشند ساختمان چینه‌بندی در پادگانه‌های رودخانه‌ای نیز تابع تغییرات مسیر جریان است. این ساختمان‌ها در داخل دره‌های کم‌عرض نظم بیشتری دارند. به طوری که لایه‌ها امتداد افقی و تناوب چینه‌بندی قلوه‌سنگی همراه با لایه‌های شن و ماسه دارند؛ اما ساختمان چینه‌بندی پادگانه‌ها در دره‌های پهن و پای کوه‌ها به علت تغییر مسیر مکرر آبراهه به مخروط افکنه‌ها شباهت پیدا می‌کند و نظم مشخصی در آن‌ها دیده نمی‌شود. آنچه مهم است، موضوع توالی پادگانه و ترتیب سنی پادگانه‌ها است. در برخی نقاط، ترتیب سنی لایه‌ها عکس ترتیب چینه‌بندی در شرایط معمول است، یعنی لایه‌های رسوبی در پادگانه‌های مرتفع‌تر عموماً قدیمی‌تر هستند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. ترسیم نیم‌رخ عرضی و مقطع چینه‌شناسی پادگانه در محل فشم در (بازه ۲)

بازه (۳) پادگانه‌های یخچالی: این بازه از حدود آبادی روته آغاز و تا گرمابدر ادامه دارد. ژنز پادگانه‌ها در این بازه یخچالی است. بافت رسوبات پادگانه‌ها در این بازه شامل شن و قلوه‌سنگ با جور شدگی ضعیف و بسیار زاویه‌دار است. حوضه گرمابدر یک حوضه گسترده است که سرشاخه‌های متعددی دارد که اغلب از سیرک‌های یخچالی بالادست منشعب شده‌اند. در خروجی حوضه دو انشعاب اصلی از جهات شرق و غرب وارد یک میدان یخچالی شده و در نتیجه به هم پیوستن آن‌ها یک توده یخرفت میانی به طول حدود یک کیلومتر و ارتفاعش ۳۰ متر درست در وسط این میدان یخچالی نهشته کرده‌اند. وجود قطعات حجیم یخرفتی با لیتولوژی آهک لار که ابعاد برخی از آن‌ها بیش از ده مترمکعب است ژنز یخرفتی آن را اثبات می‌کند. با پس‌روی جریان‌های یخچالی بعد از یخبندان وورم، جریان رودخانه‌ای دو انشعاب مورد اشاره، بستر دره را حفر کرده و منجر به تشکیل پادگانه جدیدی در این بخش شده است (شکل ۱۱). با توجه به جوان بودن دره و تغییر سطح اساس ناشی از تناوب اقلیمی به نظر نمی‌رسد زمین‌ساخت اخیر در تحول این پادگانه نقش چندانی ایفا کرده باشد.



شکل ۱۱. ترسیم نیمرخ عرضی و مقطع چینه‌شناسی پادگانه در محل گرمابدر (بازه ۳)

میراث‌های یخچالی در دره جاجرود

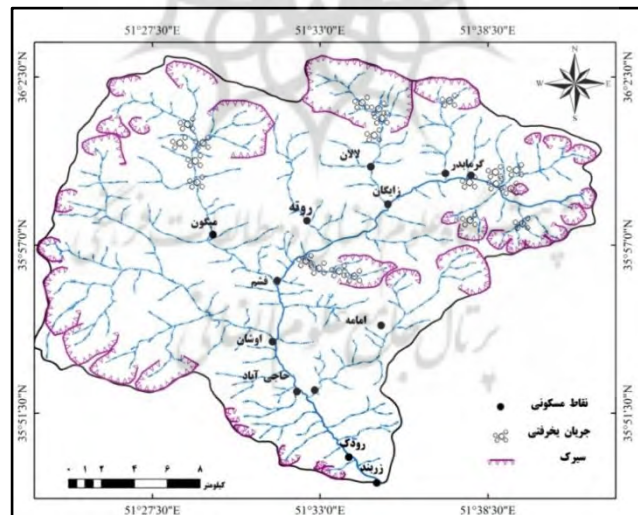
بررسی‌های میدانی وجود نمونه‌های مختلفی از لند فرم‌های یخچالی از جمله، دره‌های U شکل (شکل ۱۲). سیرک‌های کوچک و بزرگ (شکل ۱۳) و توده‌های بزرگی از تیل‌های یخرفتی را ثابت می‌کند. تیل‌های یخرفتی ترکیبی از سنگ‌های سرگردان با تکه‌های بزرگ تا کوچک هستند. همچنین با توجه به وجود یخرفت در توالی پادگانه‌ها، وجود یخچال متصور است (یمانی، ۱۳۹۰).



شکل ۱۲. دره U شکل در زیر حوضه گرمابدر که بعد از دوره یخچالی بر اثر فرسایش آبی تغییر شکل یافته است.

وجود سیرک‌های متعدد در دره جاجرود

با توجه به عرض جغرافیایی، جهت‌گیری دامنه‌ها و موقعیت قرارگیری آن‌ها، برودت هوا در منطقه بالا بوده به طوری که وجود سیرک‌های وسیع در حوضه جاجرود و ارتفاعات هم‌جوار حوضه مانند ارتفاعات هراز، توچال و کرج نشان می‌دهد که این منطقه با توجه به عرض جغرافیایی و ارتفاع بالا در سیطره یخچال بوده و محیط بسیار سردی بر آن حاکم بوده است. در انتهای اغلب این سیرک‌ها و همچنین در بیشتر دره‌ها شاهد حجم وسیعی از رسوبات درشت‌دانه در میان انبوهی از مواد ریزدانه هستیم. یخرفت‌های موجود نشان می‌دهد جریان‌ها یخچالی توانسته‌اند در دره جاجرود و دامنه‌های اطراف آن فعالیت نمایند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. موقعیت سیرک‌ها و جریان‌های یخرفتی دره جاجرود

ارتباط تغییرات اقلیمی در مورفوژنز پادگانه‌های دره جاجرود

بدیهی است تناوب تغییرات بافت رسوبی پادگانه‌ها ارتباط مستقیمی با تناوب تغییرات نیروی جریان دارد، علاوه بر این، از نظر ژنتیک (آبرفتی، یخرفتی) تناوب تسلط شرایط آب‌وهوایی و تغییرات محیطی به خوبی در ساختمان چینه‌شناسی انعکاس یافته است. در شرایط بین یخچالی با توجه به گرم شدن آب‌وهوا، یخچال‌ها پس‌روی داشته‌اند، با ذوب یخ‌ها در بالادست

حوضه و همچنین افزایش میزان بارندگی در پایین دست رودخانه نیروی جریان و سطح آب رودخانه جاجرود افزایش می‌یافته است در نتیجه حجم رسوب گذاری افزایش یافته است. به همین دلیل لایه‌های یخرفتی پادگانه‌ها در پایین دست حوضه، بازه اول (محل اوشان) شاخص هستند. در شرایط تسلط یخچالی نیز به دلیل کاهش نیروی جریان رود، میزان بار رسوبی کاهش یافته و در نتیجه این دوره با تناوب لایه‌های رسوبی با ضخامت کمتر در بازه پایین دست مشخص می‌شود. در گذر از دوره یخچالی، افزایش دما موجب ذوب شدن برف و یخ شده و متعاقب آن، جریان‌ها از قدرت بیشتری برخوردار بوده و بار رسوبی را افزایش داده‌اند؛ بنابراین بر اساس شواهد چینه‌شناسی در پادگانه‌های جاجرود، سه دوره تغییرات اقلیمی رخ داده قابل شناسایی است: ۱- در اوج یخچالی دبی رودخانه کاهش یافته، زیرا بارش به صورت برف در ارتفاعات کوهستانی و حوضه‌های مرتفعی مانند جاجرود انباشته می‌شده است از این رو نوسانات سیلابی بسیار کاهش داشته است. ۲- گذر از دوره یخچالی به دوره گرم (احتمالاً بین ۱۱ تا ۶ هزار سال قبل) رودخانه بیشترین دبی را داشته است زیرا نه تنها یخچال‌ها به سرعت در حال ذوب بوده‌اند بلکه توأم با بارش در حوضه روی می‌داده است و منجر به وقوع سیلاب‌های شدیدی هم می‌شده است که وجود قطعات درشت در پادگانه‌های هولوسن مربوط به این دوره زمانی است. ۳- تسلط شرایط گرم و خشک بین یخچالی (از حدود ۶ هزار سال پیش تاکنون) باز دبی کاهش یافته است به طوری که در شرایط کنونی یخچال‌ها تقریباً از میان رفته‌اند و دبی رودخانه صرفاً نتیجه بارش‌های فصلی است. تغییرات دبی و وقوع سیلاب‌های دوره‌ای نتیجه مستقیم بارش هست که بیشتر پایین دست حوضه جاجرود از حدود سرشاخه روته تا خروجی حوضه را تحت تأثیر قرار داده است (توسکانو و ماسینتایر، ۲۰۰۳).

در بالادست آبراهه (بازه یک)، ساختمان رسوبی پادگانه T2 نهشته گذاری غالب دوره سرد را نشان می‌دهد و برعکس پادگانه T1 نشانگر گذر از دوره یخچالی به دوره گرم هست؛ زیرا بافت و ضخامت چینه‌شناسی پادگانه T2 حجم نهشته گذاری را نسبت به پادگانه مربوط به دوره یخچالی T1 بیان می‌کند. در بازه سوم که از حدود دره روته تا خروجی زیر حوضه گرمابدر را در برمی‌گیرد تنها یک سطح پادگانه T1 شاخص است؛ شاید دلیل اصلی آن ارتفاع بالای ۲۵۰۰ متر و گسترش و تسلط زمانی شرایط یخچالی در دوره‌های طولانی تری نسبت به سایر بازه‌ها بوده است. در حوضه گرمابدر دو انشعاب اصلی یخچالی قابل شناسایی است این دو جریان توسط یک توده حجیم یخرفت میانی از هم تفکیک شده‌اند. پیوستن این دو جریان یخچالی در خروجی زیر حوضه گرمابدر توسط نهشته گذاری حجم گسترده‌ای از یخرفت‌های کناری با بافت بسیار درشت و ناهمگن قابل بازیابی است. از این رو در این بخش بیش از یک پادگانه تشکیل نشده است. به نظر می‌رسد در تشکیل این پادگانه تحولات اقلیمی بیش از فرایش زمین ساختی تأثیرگذار بوده است. از طرفی به دلیل ارتفاع زیاد حوضه و نوع بارش‌ها که اغلب برف هست ذوب تدریجی برف با فرارسیدن دوره گرم سال موجب می‌شود که حوضه گرمابدر فاقد هرگونه سابقه سیل باشد. بدیهی است کوتاه بودن طول سرشاخه‌ها در حوضه‌های بالادست از جمله حوضه گرمابدر یکی از دلایل فقدان رخداد سیلاب‌ها در دوره‌های بازگشت کوتاه مدت و حتی بلندمدت هست. این شرایط دینامیکی نبودن سکنس‌های پادگانه‌ای را در این بخش از حوضه و آبراهه اصلی توجیه می‌نماید.

نتیجه گیری

هدف این پژوهش، بررسی مورفوژنز پادگانه‌های دره جاجرود از طریق شناسایی تأثیرات زمین ساختی، مورفومتری و رسوب شناسی پادگانه‌ها و تأثیرات دیرینه اقلیمی مسلط بر این حوضه بوده است. از این رو طول مسیر رودخانه جاجرود بر اساس تفاوت‌های لند فرمی به سه بازه تقسیم و داده‌های تأثیرگذار برداشت و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که پادگانه‌های دره جاجرود از نظر ساختمان و بافت رومی و ارتفاع تفاوت زیادی را نشان می‌دهند. به طوری که از نظر ارتفاعی، سطوح پادگانه‌های T3 تا T1 به ترتیب با ارتفاعات متوسط ۱۳۰، ۹۰، ۸۰ متر بالاتر از سطح بستر رودخانه قرار دارند.

پادگانه‌های T3 تا T1 سه مرحله گذر متناوب را تجربه کردند. سه پادگانه رودخانه در نتیجه ترکیبی از دخالت عوامل تغییرات آب و هوایی، بر خاستگی تکتونیکی و تشکیل دریاچه‌های سدی توسعه یافته‌اند. به کارگیری روش تداخل سنجی راداری و تلفیق یافته‌های میدانی نیز تأثیر اختلاف بر خاستگی زمین ساختی فعال را در طول آبراهه اصلی را تأیید می‌کند. بدیهی است این تفاوت‌ها نتیجه اختلاف در فرآیندهای مؤثر در شکل‌گیری و تغییر آن‌ها است. ارتفاع سطوح پادگانه‌ها در خروجی سرشاخه رود اوشان (بازه ۱) حدود ۱۳۰ متر است. این در حالی است که ارتفاع سطوح پادگانه‌ای در پایین‌دست این بازه یعنی در نزدیکی آبادی حاجی‌آباد به حدود ۹۰ متر افزایش می‌یابد. روشن است که این اختلاف ارتفاع نمی‌تواند صرفاً نتیجه اختلاف در مقدار تغییر سطح اساس باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد که وقوع یک لغزش قدیمی در پایین‌دست بازه مورد بررسی (زمین لغزش حاجی‌آباد) موجب تداخل رسوبی با منشأ دریاچه‌ای و نهایتاً ارتفاع بیشتر پادگانه‌های این بازه شده است. علاوه بر این سکناس‌های پادگانه‌ای در طول سه بازه مورد بررسی یکسان نیست. به طوری که در بازه ۱ سه سطح، در بازه ۲ دو سطح و در بازه ۳ فقط یک سطح پادگانه قابل شناسایی است. بررسی‌ها نشان داده که علاوه بر تغییر سطح اساس زمین ساختی تحولات اقلیمی، ورود جریان‌های یخ‌رفتی و تشکیل دریاچه سدی لغزشی در پایین‌دست سه عامل اصلی در تنوع ژنتیکی و اختلاف در توالی و سکناس‌های پادگانه‌ای در طول سه بازه مورد بررسی می‌باشند. علاوه بر تفاوت‌های مورفومتریک، ژنز رسوبات پادگانه‌های محدوده مورد بررسی نیز بسیار متفاوت است. اگرچه رودخانه عمده‌ترین فعالیت مؤثر در تولید و به تبع آن در شکل‌گیری پادگانه‌ها بوده و ژنز غالب آن‌ها است؛ اما دخالت نهشته‌های دریاچه‌ای سدی - لغزشی، جریان‌های یخ‌رفتی و نهشته‌های آبرفتی به صورت متوالی و همگام با اختلاف در دینامیک جریان به‌ویژه در بازه اول و دوم نقش داشته‌اند. این شرایط به سمت بالادست به‌ویژه در موقعیت حوضه گرمابدر (بازه ۳)، به سمت یکنواختی پیش رفته به طوری که تشکیل پادگانه‌های بالادست بازه ۳ صرفاً یخچالی است. لازم به یادآوری است که پژوهش‌های مختلفی در مورد پادگانه‌های رودخانه‌ای در ایران انجام شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱، ۱۳۹۴، ۱۳۹۷، مقصودی و شرفی ۱۳۹۲، شرفی، ۱۳۹۴، عظیمی راد، ۱۳۹۱). لیکن در خصوص ژنتیک و تحول سکناس‌های پادگانه‌ای جاجرود و ارتباط سکناس‌ها و تفاوت‌های ارتفاعی آن‌ها در پژوهش‌های گذشته کاری انجام نشده است.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- احمدی، طیبه؛ صفاری، امیر کرم؛ یمانی، مجتبی و رضایی، خلیل. (۱۴۰۰). تحلیل مورفوژنتیکی سکناس‌های پادگانه‌ای دره هراز (محدوده آب اسک). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۰ (۱)، ۷۲-۵۵.
- ترابی گل سفیدی، حسین و کریمیان اقبال، مصطفی. (۱۳۸۱). بررسی تکامل خاک در یک ردیف زمانی روی پادگانه‌های حاشیه رودخانه سفیدرود در گیلان مرکزی. *مجله علوم خاک و آب*، ۱۶ (۱)، ۱-۱۲.
- جعفری، غلام حسن و عباسی، مهدی. (۱۳۹۸). بررسی فضایی پادگانه‌های حوضه قزل اوزن در ارتباط با تکتونیک و تغییرات آب و هوایی. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۹ (۳۳)، ۷۶-۹۱.
- داودی، الهام؛ شبانیان بروجنی؛ ناهید و داودیان دهکردی، علیرضا. (۱۳۹۴). تحلیل ویژگی‌های رسوب‌شناسی پادگانه‌های آبرفتی رودخانه زاینده‌رود و تعیین منشأ آن‌ها. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۲۵ (۱۸)، ۶۷-۸۴.
- درفشی، خه بات؛ امینی، صارم؛ حسین زاده، محمد مهدی و نصرتی، کاظم. (۱۳۹۶). ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی، و شیمیایی نهشته‌های آبرفتی و پادگانه‌های دیرینه رودخانه سقر. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۹ (۴)، ۶۹۸-۶۸۳.

- (۶) رضائی، پیمان و زارع زاده، رضوان. (۱۳۹۳). پادگانه‌های دریایی کربناتی جزیره قشم، نمادی از تغییرات سطح آب دریای خلیج فارس در کواترنری. علوم زمین، ۲۳ (۹۲)، ۶۷-۷۴.
- (۷) شرفی، سیامک. (۱۳۹۴). زمین‌باستان‌شناسی حوضه رودخانه سیمره در قلمرو پادگانه‌های دریاچه‌ای هولوسن، رساله دکتری، اساتید راهنما مجتبی‌مانی و مهران مقصودی، دانشکده جغرافیا، ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، ایران.
- (۸) صالحی پور میلانی، علیرضا؛ یمانی، مجتبی؛ مقیمی، ابراهیم؛ لک، راضیه؛ جعفریگلو، منصور و محمدی، علی. (۱۳۹۶). بررسی شواهد رسوبی نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه در کواترنری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۶ (۱)، ۱-۲۰.
- (۹) عظیمی راد، صمد (۱۳۹۱). تأثیر زمین‌لغزش بزرگ سیمره در تشکیل و تکامل تراس‌های دریاچه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
- (۱۰) مقصودی، مهرن و شرفی، سیامک (۱۳۹۴). مطالعات زمین‌باستان‌شناسی در قلمرو پادگانه‌های رودخانه‌ای. دومین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
- (۱۱) معینی، ابوالفضل؛ احمدی، حسن؛ جعفری، محمد؛ فیض نیا، سادات و سرمدیان، فریدون. (۱۳۸۸). تعیین سن پادگانه‌های دوره کواترنر مطالعه موردی حوزه آبخیز طالقان. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۲ (۵)، ۳۹-۴۸.
- (۱۲) یمانی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر و جعفری اقدم، مریم. (۱۳۹۰). بازسازی برف مرزهای پلیستوسن در حوضه جاجرود، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۶، ۳۵-۵۰.
- (۱۳) یمانی، مجتبی. (۱۳۹۹). روش‌ها و تکنیک‌های پژوهش در ژئومورفولوژی. چاپ اول، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- (۱۴) یمانی، مجتبی؛ مقیمی، ابراهیم؛ گورابی، ابوالقاسم؛ زمان زاده، سید محمد و محمدی، ابوطالب. (۱۳۹۷). ارتباط تناوب آخرین فوران‌های دماوند و توالی دریاچه‌های سدی گدازه‌ای طی کواترنری پسین. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۳)، ۱۹۶-۲۱۵.
- (۱۵) یمانی، مجتبی؛ گورابی، ابوالقاسم و عظیمی‌راد، صمد. (۱۳۹۱). زمین‌لغزش بزرگ سیمره و توالی پادگانه‌های دریاچه‌ای. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴ (۴)، ۴۳-۶۰.
- (۱۶) یمانی، مجتبی؛ مقیمی، ابراهیم. لک؛ راضیه؛ جعفریگلو؛ منصور و صالحی پور میلانی، علیرضا. (۱۳۹۴). بازسازی سطوح دیرینه دریاچه ارومیه در کواترنری با مطالعه پادگانه‌های دریاچه‌ای. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸ (۱)، ۱-۱۹.

References

- Ahmadi, T., safari, A., yamani, M., & Rezaei, Kh. (2021). Morphogenetic analysis of terraces sequences in Haraz valley (Ab-e-Ask area), *quantitative geomorphological researches*, 10 (1), 55-72.
- Azimi Rad, S. (2012). *Impact of Seymareh landslide on the formation and evolution of lake terraces*. Master Thesis, Faculty of Geography, University of Tehran.
- Bridgland, D.R. (2000). River terrace systems in north-west Europe: an archive of environmental change, uplift and early human occupation. *Quat. Sci. Rev*, 19, 1293-1303.
- Bridgland, D.R., & Westaway, R. (2008). Climatically controlled river terrace staircases: a worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98, 285-315.
- Bridgland, D.R., Maddy, D., & Bates, M. (2004). River terrace sequences: templates for Quaternary geochronology and marine-terrestrial correlation, *J. Quat. Sci*, 19, 203-218.
- Bull, W.B. (1979). Threshold of critical power in streams, *Geol. Soc. Am. Bull*, 90, 453-464.
- Bull, W.B. (1990). Stream-terrace genesis: implications for soil development. *Geomorphology*, 3, 351-367.
- Chambers, R. (1848). *Ancient Sea Margins as Memorials of Changes in the Relative Level of Sea and Land*. W.S. Orrltd, London.
- Cheng, S.P., Deng, Q.D., Zhou, S.W., & Yang, G.Z. (2002). Strath terraces of Jinshaan Canyon, Yellow River, and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau, North China. *Terra Nova*, 14, 215-224.

- Daniel, R. C., Maisons, C., Carnec, S., Mouelic, L., King, C., & Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88, 468-478.
- Davoudi, A., Shabani Boroujeni, N., & Davoudian Dehkordi, A.R. (2015). Analysis of sedimentological features of alluvial terraces of Zayandehrood river and determining their origin. *Environmental Erosion Research*, 2, 5 (18), 67-84.
- Darafshi, KH.B., Amini, S., Hosseinzadeh, M.M. & Nusrati, K.. (2017). Mineralogical, textural, and chemical characteristics of alluvial deposits and ancient terraces of Saqez River. *Natural Geography Research*, 49 (4), 698-683.
- Dong, S. C., Samsonov, S., & Yin, H. W. (2014). Time–Series Analysis of Subsidence Associated with Rapid Urbanization in Shanghai, China Measured with SBAS InSAR Method. *Environmental Earth Sciences*, 72 (3), 677–691.
- Herfried, M., Frank, P., & Olivier, F. (2012). Climatic and tectonic controls on the development of the River Ognon terrace system (eastern France). *Geomorphology*, 151–152, 126–138.
- Home, D.M. (1875). Notice of some high-water marks on the banks of the river Tweed some of its tributaries, and also of drift deposits in the valley of the Tweed Trans, *Roy. Soc. Edinb*, 27, 513–562.
- Hu, Z.B., Pan, B.T., Wang, J.P., Cao, B., Gao, H.S. (2012). Fluvial terrace formation in the eastern Fenwei Basin, China, during the past 1.2 Ma as a combined archive of tectonics and climate change. *J. Asian Earth Sci*, 60, 235–245.
- Jafari, G. H. & Abbasi, M. (2019). Spatial study of terraces in Ghezel Ozan basin in relation to tectonics and climate change. *Journal of Spatial Planning*, 9 (33), 76-91.
- Maddy, D., Demir, T., Bridgland, D.R., Veldkamp, A., Stermerdink, C., van der Schriek, T., & Westaway, R. (2008). The Early Pleistocene development of the Gediz River, Western Turkey: an uplift-driven, climate-controlled system?. *Quat. Int.* 189, 115–128.
- Maddy, D., Macklin, M.G., & Woodward, J.C. (2001) *b. River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change*. Balkema, Lisse, pp. 1–503.
- Maddy, D., Bridgland, D.R., & Westaway, R. (2001)a. Uplift-driven valley incision and climate controlled river terrace development in the Thames Valley. *UK. Quat. Int.* 79, 23–36.
- Maddy, D., Bridgland, D.R., & Green, C.P. (2000). Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace records. *Geomorphology*, 33, 167–181.
- Maghsoudi, M., & Sharafi, S. (2015). Geological Archaeological Studies in the Territory of River terraces, *Second National Conference of the Iranian Geomorphological Association, Faculty of Geography, University of Tehran*.
- Moeini, A., Ahmadi, H., Jafari, M., Feyznia, S., & Sarmadi, F. (2009). Determining the age of Quaternary terraces Case study of Taleghan watershed. *Journal of Natural Geography*, 2(5), 39-48.
- Ren, J.J., Zhang, S.M., Meigs, A.J., Yeats, R.S., Rui, D., Shen, X.M. (2014). Tectonic controls for transverse drainage and timing of the Xin-Ding paleolake breach in the upper reach of the Hutuo River, north China. *Geomorphology*, 206, 452–467.
- Rezaei, P., & Zarezadeh, R. (2014). Qeshm Island Carbonate Marine terraces, a Symbol of Changes in the Water Level of the Persian Gulf in the Quaternary. *Earth Sciences*, 23 (92), 67-74.
- Salehipour Milani, A.R., Yamani, M., Moghimi, A., Lak, R., Jafar Begloo, M., & Mohammadi, A. (2017). Investigation of sedimentary evidence of Urmia Lake water level fluctuations in Quaternary. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(1), 1-20.
- Schumm, S.A., (1977). *The Fluvial System*. John Wiley, New York, pp. 1–211.
- Sun, L., (2005). Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India–Asia collision system during the Quaternary. *Quat. Sci. Rev.* 24, 1279–1286.
- Sharafi, S. (2015). *Archaeological geography of Seymareh river basin in the territory of Holocene lake terraces*. PhD thesis, Supervisors Mojtaba Yamani and Mehran Maghsoudi, Faculty of Geography, Geomorphology, University of Tehran, Iran.

- Torabi Gol Sefidi, H., & Karimian Iqbal, M. (2002). Investigation of soil evolution in a chronological order on Sefidrood river terraces in Central Gilan. *Journal of Soil and Water Sciences*, 16 (1), 1-12.
- Toscano, M.A., & Macintyre, I.G. (2003). Corrected western Atlantic sea-level curve for the last 11,000 years based on calibrated 14c dates from acropora palmata framework and intertidal mangrove peat, *Coral Reefs*, 22, 257-270.
- Vandenberghe, J. (2002). The relation between climate and river processes, land-forms and deposits during the Quaternary. *Quat. Int*, 91, 17-23.
- Vandenberghe, J. (2003). Climate forcing of fluvial system development: an evolution of Ideas, *Quat. Sci. Rev*, 22, 2053-2060.
- Vandenberghe, J., & Maddy, D. (2001). The response of river systems to climate change, *Quat. Int*. 79, 1-3.
- Viveen, W., Schoorl, J.M., Veldkamp, A., van Balen, R.T., Desprat, S., & Vidal-Romani, J.R. (2013). Reconstructing the interacting effects of base level, climate, and tectonic uplift in the lower Miño River terrace record: a gradient modelling evaluation. *Geomorphology*, 186, 96-118.
- Wang, P., Jiang, H.C., Yuan, D.Y., Liu, X.W., & Zhang, B. (2010). Optically stimulated luminescence dating of sediments from the Yellow River terraces in Lanzhou: tectonic and climatic implications, *Quat. Geochronol.* 5, 181-186.
- Whitaker, W. (1875). *Guide to the Geology of London and the Neighbourhood*. Mem, Geol. Survey of England and Wales, H.M.S., London.
- Xu, L.B., & Zhou, S.Z. (2007). Formation process and driving mechanisms of fluvial terrace. *Sci. Geogr. Sin*, 27 (5), 672-677
- Zhang, T.Q., Lv, H.H., Zhao, J.X., & Zhen, X.X. (2014a). Fluvial terrace formation and tectonic uplift rate—a case study of late Quaternary fluvial process in the North piedmont of the Tianshan, Northwestern China. *Quat. Sci*, 34 (2), 281-291
- Zhou, Z. (2013). *The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands*. University of Glasgow.
- Yamani M., Shamsipoor A.A. & Jafari Aghdam, M. (2011). Snow Reconstruction of Pleistocene Boundaries in Jajroud Basin. *Natural Geography Research*, 76, 50-35.
- Yamani, M. (2020), *Research Methods and Techniques in Geomorphology*, Tehran : University of Tehran Press.
- Yamani, M., Moghimi, A., Gorabi, A., Zamanzadeh, S.M. & Mohammadi, A. (2018). The relationship between the frequency of the last Damavand eruptions and the sequence of lava dam lakes during the Late Quaternary. *Quantitative Geomorphological Research*, 7 (3), 215-196.
- Yamani, M.; Gorabi, A. & Azimi Rad, S. (2012). Seymareh Great Landslide and the Sequence of Lake terraces. *Natural Geography Research*, 44 (4), 60-43.
- Yamani, M., Moghimi, A., Lak, R., Jafar Biglo, M. & Salehipour, A. (2015). Reconstruction of ancient surfaces of Lake Urmia in the Quaternary by studying lake terraces. *Natural Geography Research*, 48 (1), 19-1.