

## Original Research Paper

# Paleoclimate reconstruction in Jiroft during the late Holocene

Alireza Vaezi<sup>1\*</sup>, Vahid Tavakoli<sup>2</sup> and Abdolmajid Naderi-Beni<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS), Tehran, Iran

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received: 2022 October 18

Accepted: 2023 March 16

Available online: 2023 September 23

### Keywords:

Wind

Siberian high

Climate change

Iranian plateau

Holocene

## ABSTRACT

In the present study, in order to reconstruct the paleoenvironmental and climatic changes of Jiroft during the last 4000 years, several evidences of sedimentology and biogeochemistry on a sedimentary core have been investigated. Around. 3950 cal yr BP, low values of Ti/Al, Si/Al, C/N and CPI along with high values of  $\delta^{13}\text{COM}$ , and Paq indicate a wet period in Jiroft. evidence indicates a relative decrease in humidity between about 3900 and 3293 cal yr BP. Between 3293 and 2897 cal yr BP, Jiroft was dry and dusty. The results show very dry conditions with a significant increase in the amount of dust around 3200 cal yr BP. A long-wet period from about 2897 to 2302 cal yr BP can be recognized with high Paq values. The highest Ti/Al values along with the lowest  $\delta^{13}\text{COM}$  values indicate increased wind activity and dry conditions between 2100 and 1650 cal yr BP. Jiroft experienced wet conditions between 1540 and 1315 cal yr BP. With the relative decrease of rainfall, a semi-humid climate prevailed in Jiroft between 1315 and 854 cal yr BP.

## 1. Introduction

Influenced by complex interactions between the southwest Indian Ocean Summer Monsoon (IOSM), the Mid-Latitude Westerlies (MLW), and the northeast Siberian Anticyclone, southeastern Iranian Plateau marked the development of early Bronze Age settlements followed by the Iron Age, and finally transitioning into urban cities, all the way up to the rule of the Persian Empire (Hamzeh et al., 2016; Sharifi et al., 2015; Vaezi et al., 2019). At the center of all these socio-cultural changes there was a medley of climatic, phytogeographic and cultural transitions that swept through the region setting the stage for dramatic changes that were encountered during Holocene (Gurjazkaite et al., 2018;

Sharifi et al., 2015; Vaezi et al., 2019).

There are very few high resolution studies on the past climate change in Iran compared to other parts of the world (Karimi et al., 2011; Kehl, 2009). Recently two studies have been done with the author of current paper in this region. One, in the Jazmurian playa, a mostly dry ephemeral lake located ca. 100 km to the south of the Bronze Age excavation sites in Jiroft that showed IOSM and MLW impacted the landscape resulting in multiple wet and dry periods during the late Pleistocene-Holocene period (Vaezi et al., 2019). Increased fluvial inputs, coupled with a low abundance of evaporite minerals in Jazmurian sediments,

\* Corresponding author: Alireza Vaezi; E-mail: Vaezi@ries.ac.ir

### Citation:

Vaezi, A., Tavakoli, V., and Naderi-Beni, A., 2023. Paleoclimate reconstruction in Jiroft during the late Holocene. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 55-70. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.366231.2035>

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2023 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2023.366231.2035

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.4



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

indicated a greater influence of the IOSM between 14 and 13.2 cal kyr BP. In contrast, the Jazmurian playa was dry and dusty between 13.2 and 11.4 cal kyr BP, as reflected by an increase in aeolian sands, and the presence of evaporite minerals. This was followed by a period of strong IOSM activity during the early Holocene, coinciding with higher fluvial input ca. 11.4 cal kyr BP. Several intense dry periods with sharp increases in aeolian inputs occurred after the early Holocene, due to southward migration of the Intertropical Convergence Zone. Precipitation sources changed from a monsoon-dominated regime to one influenced by the MLW during the late-Holocene (Vaezi et al., 2019). Unfortunately the resolution of that study within the late-Holocene period was very low. In the other study a peat sequence near the archaeological complex at Konar Sandal was investigated with detailed palynology and showed that Konar Sandal was dominated by the Saharo-Sindian open pseudo-savanna vegetation for ca. 4000 years and Agro-pastoral activities and climatic factors changed the land-cover from open xeric scrubland to a degraded landscape (Gurjzkaite et al., 2018).

The location of Jiroft is situated in a transitional zone between the semi-arid to the north and the arid to the south, and tough aquatic and terrestrial ecosystems is very sensitive to the consequences of climatic changes (Gurjzkaite et al., 2018). This is particularly unfortunate that detailed biomarker studies tracing changes up to the present day in the arid to hyper-arid regions in south Iran are non-existent. Hence, in the present study, we have performed a detailed multi-proxy palaeo-environmental reconstruction using multiple sedimentological, geochemical, biogeochemical, and paleontological proxies in a 250-cm long peat sequence covering the last 4000 cal yr BP to better reconstruct past climatic changes and its spatio-temporal influences on the Iranian Plateau.

## 2. Research methodology

A detailed multi-proxy palaeo-environmental reconstruction using multiple sedimentological, geochemical, biogeochemical, and paleontological proxies in a 250-cm long peat sequence used to interpret the palaeoenvironmental conditions in this study, are summarized below.

### 1.2. Sampling, magnetic susceptibility, and grain size analysis

Two cores, labeled as Dar-1 and Dar-2 with lengths of ca. 2.5 and 1.9 m were retrieved using a Russian peat borer. The deposit lies between the raised archeological mounds at Konar Sandal from a spot named Daryache (Persian name for lake), 25 km south of the modern city of Jiroft (27°37'04" N, 58°34'77" E; Fig. 1). The core was logged in the field, described, photographed, and stored at 4°C and constant humidity at the Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS) marine geology laboratory. Intact peat cores were passed through a MS2C Bartington

magnetic susceptibility (MS) meter (sensitivity of about  $2 \times 10^{-6}$  SI) and measured at 2-cm increments. The cores were then transported to Linköping University in Sweden, where the longer Dar-1 core was sub-sampled at 1-cm intervals and freeze-dried for further analysis. Grain size was measured every 1-4 cm in the freeze-dried sediments using a Micromeritics SediGraph III Particle Size Analyzer.

### 2.2. Radiocarbon analyses

Based on variations in the sediment characteristics (lithology, MS, and grain size), eight sub-samples were submitted for radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) analysis to the Poznań Radiocarbon Laboratory. Gurjzkaite et al. (2018) describe sample pre-treatment and data handling. The age data obtained from the core analysis were extrapolated within the Bayesian framework, using the R-software package BACON (Blaauw and Christen, 2011) and Intcal 20 (Reimer et al., 2020). Radiocarbon dates were calibrated using the Intcal 20 curve (Reimer et al., 2020; Fig. 2).

### 3.2. Elemental and mineralogical analyses

The X-ray fluorescence (XRF) analysis was carried out at intervals of 1-5 cm with a hand-held XRF scanner (S1 TITAN, Bruker), equipped with a rhodium X-ray tube and XFlash® Silicon Drift Detector (SDD). First, calibration in the mass percent unit was done using the Geochem Trace program. Then, 22 sub-samples covering the entire length of the peat were selected for major and trace element analysis using an Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (Perkin Elmer NexION 300) to verify the XRF results. For extracting the metals, a pseudo-total digestion method using 10 mL of  $\text{HNO}_3$  acid (14 M) was added to 0.3 g sediments and digested by a Microwave Milestone Ethos 1 digester.

### 4.2. C/N and Stable isotope analyses

Forty-three freeze-dried, acid-treated sediment samples (fumigation method; Hedges and Stern, 1984) were analyzed for organic C and N concentrations and isotopic compositions. The analyses were done at the Stable Isotope Mass Spectrometry Laboratory, University of Florida, using a Carlo Erba Elemental Analyzer NC1500 attached to a Thermo Electron DeltaV Advantage gas-ratio mass spectrometer. The C/N value was reported as a mass ratio; the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{OM}}$  were reported in conventional delta ( $\delta$ ) notation vs. V-PDB.

### 5.2. Lipid extraction

5–6 g of freeze-dried peat sample was extracted with a mixture of  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  and MeOH (9:1 v/v) using an accelerated solvent extractor (Dionex ASE 300; 3 cycles at 1000 psi and 100 °C). The extracts were reduced using a Büchi SPE extractor, and half the volume was stored for archival purposes. The separation of lipid fractions was done using the solid phase extraction technique, followed by

derivatization based on the method developed by Wakeham et al. (2002). The biomarker extracts were analyzed on a GCMS (Agilent 6890 GC with a 5973 MS) system, and the compounds were identified based on their retention time, m/z ratios, and authentic standards.

### 3. Results

The magnetic susceptibility (MS) ranges from  $2.92 \times 10^{-4}$  to  $7.25 \times 10^{-3}$  SI, with a mean value of  $6.43 \times 10^{-5}$  SI. The MS values are high from bottom of core to 200 cm. Percentage of sand showed high amplitude variation (min 51.04%, max 95.67%) around a mean of 78.63% (Fig. 3). From 175 to 80 cm sand content is very high and relatively constant. Generally, there is no or very weak correlation between magnetic susceptibility and sand content. But between the depth of 10 and 80 cm shows a R2 value of 0.318 which is higher compared to other intervals.

Major and trace elements distribution pattern obtained by XRF and ICP-MS represent generally similar trends. Si concentration fluctuates between 2.93-23.48%. Al concentration fluctuates between 0.29-3.59%. K concentration fluctuates between 0.10-0.93%. Ca concentration fluctuates between 0.48-6.88%. S concentration fluctuates between 0.42-7.16% (Table 3). Also, a strong correlation ( $>0.9$ ) between the Si, Al and K were found in the peat sediments. Paleoenvironmental changes (wet/dry periods and aeolian activity) were shown using the elemental ratios of Si/Al, Ti/Al, Rb/K, Ca/Ti, Fe/Al and K/Ti were calculated and plotted versus depth and calibrated ages (Fig. 3).

Total organic carbon (TOC) and Total nitrogen (TN) in the decarbonated sediments ranged from 0.61% to 12.32% and 0.07% to 0.8%, respectively (Fig. 3). The C/N ratio varied from 5.75 to 19.18 wt%. The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  values ranged from -25.30‰ to -19.67‰,

whereas  $\delta^{15}\text{N}_{\text{OM}}$  ranged from 0.78‰ to 6.71‰ (Fig. 4).

### 4. Discussions

Jiroft experienced mild condition from 3900 to 3300 cal yr BP. The milder conditions followed the short-wet interval at the bottom of the core and were punctuated by two short dry periods around 3800 and 3575 cal yr BP. From 3293 to 2897 cal ye, Jiroft was dry and windy. The driest and very windy condition in Jiroft during this arid interval occurred at ca. 3200 cal yr BP. From 2897 to 2302 cal yr BP was the wettest period since 4000 cal yr BP in Jiroft. Dry condition from 2302 to 2240 cal yr BP occurred based on the sharp increase in aeolian input. A significant increase in aeolian activity and dry condition occurred between 2000 and 1650 cal yr BP probably due to the intensity of the Siberian anticyclone. Jiroft experienced wet conditions between 1540 and 1315 cal yr BP. The wet condition coincided with the weakness of Siberian High over Iran. Most of the time, between 1315 and 854 cal yr BP, Jiroft had mild conditions (Vaezi et al., 2022).

### 5. Conclusion

Hydrology variations of Jiroft is more matched-up with similar trends at other Mid-Latitude Westerlies (MLW)-dominated sites e.g., Lake Tecer. It seems, the hydroclimatic variations of the region since the Late Holocene is more related to the Mid-Latitude Westerlies (MLW), and the northeast Siberian Anticyclone rather than the southwest Indian Ocean Summer Monsoon (IOSM) variations. However, it is still difficult to evaluate direct impact of southwest Indian Ocean Summer Monsoon (IOSM) variations on the paleohydrology of the due to the lack of a continuous monsoon record from the region.

# بازسازی تغییرات دیرینه اقلیمی جیرفت در طول هولوسن پسین

علیرضا واعظی<sup>۱</sup>، وحید توکلی<sup>۲</sup> و عبدالمجید نادری‌بنی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

## چکیده

در مطالعه حاضر به‌منظور بازسازی تغییرات دیرینه محیطی و اقلیمی جیرفت در طول ۴۰۰۰ سال گذشته، به بررسی شواهد متعدد رسوب‌شناسی و بیوژئوشیمی بر روی یک مغزه رسوبی پرداخته شده است. در حدود ۳۹۵۰ سال پیش از حاضر مقادیر پایین  $Si/Al$ ،  $Ti/Al$ ،  $C/N$  و  $CPI$  به همراه مقادیر بالای  $\delta^{13}C_{OM}$  و  $Paq$  می‌تواند شواهدی از یک دوره مرطوب در جیرفت باشد. شواهد حاکی از کاهش نسبی رطوبت بین حدود ۳۹۰۰ و ۳۲۹۳ سال پیش از حاضر می‌باشد. در حدود ۲۸۹۷ تا ۲۸۹۳ سال پیش از حاضر جیرفت خشک و گردوغباری بوده است. نتایج شرایط بسیار خشک همراه با افزایش قابل توجه میزان گردوغبار را در حدود ۳۲۰۰ سال پیش از حاضر نشان می‌دهد. یک دوره طولانی مرطوب از حدود ۲۸۹۷ تا ۲۳۰۲ سال پیش از حاضر با مقادیر بالای  $Paq$  قابل تشخیص است. بالاترین مقادیر  $Ti/Al$  در کنار کمترین مقادیر  $\delta^{13}C_{OM}$  نشان‌دهنده افزایش فعالیت بادی و شرایط خشک بین ۲۱۰۰ و ۱۶۵۰ سال پیش از حاضر است. جیرفت بین ۱۵۴۰ تا ۱۳۱۵ سال پیش از حاضر، شرایط مرطوبی را تجربه کرده است. با کاهش نسبی بارش‌ها، آب‌وهوای نیمه‌مرطوب بین ۱۳۱۵ و ۸۵۴ سال پیش از حاضر در جیرفت حاکم بوده است.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

باد

پرفشار سیبری

تغییر اقلیم

فلات ایران

هولوسن

## ۱- پیش‌نوشتار

مطالعات اخیر نشان‌دهنده تعاملات پیچیده بین سامانه اقلیمی مونسون تابستانه هند و بادهای باختر وزان عرض‌های میانی و آنتی‌سیکلون سیبری در جنوب خاوری فلات ایران است که تأثیرات فراوانی بر تغییرات چشم‌انداز این مناطق داشته است (Gurjazkaite et al., 2018; Sharifi et al., 2015; Vaezi et al., 2019). بی‌تردید در دوران‌های زمین‌شناسی گذشته هر گونه تغییر در این سامانه‌ها اعم از جابه‌جایی مکانی یا تضعیف و تقویت شدن آنها اثر مهمی بر چهره محیط داشته است. از این‌رو جنوب خاور ایران با توجه به حساسیت آن نسبت به تغییرات اقلیمی و محیطی، بستر مناسبی برای پژوهش‌های دیرینه محیط‌شناسی و دیرینه آب‌وهواشناسی به منظور بازسازی محیط‌های دیرینه و عوامل شکل‌دهنده آنهاست (Vaezi et al., 2022). با وجود این پتانسیل متأسفانه تا کنون پژوهش‌های اندکی در این زمینه در سطح کشور انجام شده است و هنوز وضعیت پاسخگویی مناطق مختلف ایران به واداشت‌های اقلیمی، مبهم باقی‌مانده است. به‌طور کلی پژوهش‌های دیرینه محیط‌شناسی انجام شده در ایران که به بررسی

آب‌وهوایی و محیطی کشور در دوره کواترن به‌ویژه پلیستوسن و هولوسن پرداخته‌اند اندک هستند و عمدتاً در منطقه باختری، شمال باختری و منطقه شمالی کشور (Djamali et al., 2010a,b, 2008; Griffiths et al., 2001; Sharifi et al., 2015; Stevens et al., 2006, 2001) انجام شده‌اند. ناکافی بودن سن‌سنجی‌ها و پایین بودن تفکیک زمانی برخی از مطالعات انجام شده به‌ویژه در جنوب خاوری ایرن سبب شده است که تنها روند کلی و بلند مدت تغییرات آب‌وهوایی شناسایی شود (Kehl, 2009; Nicoll and Kucukuyusal, 2013). نبود داده‌های دیرینه- اقلیمی جامع و دقیق از نظر زمانی، دستیابی به یک تصویر واضح و نسبتاً قابل اطمینان از تغییرات آب‌وهوایی گذشته ایران و تأثیرات آن بر محیط پیرامون و تمدن‌های باستانی منطقه را دشوار ساخته است (Vaezi et al., 2022).

به‌تازگی دو مطالعه توسط نویسنده مقاله و تیم همکار در جنوب خاور ایران صورت پذیرفته است. در مطالعه اول برای اولین بار نتایج نشانگرهای دیرینه

\* نویسنده مسئول: علیرضا واعظی؛ E-mail: Vaezi@ries.ac.ir

ماخذ نگاری:

واعظی، ع، توکلی، و. و نادری‌بنی، ع، ۱۴۰۲، بازسازی تغییرات دیرینه اقلیمی جیرفت در طول هولوسن پسین. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳ (۳)، ۱۲۹، ۵۵-۷۰.  
https://doi.org/10.22071/gsj.2023.366231.2035  
doi: 10.22071/gsj.2023.366231.2035  
dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.3.4



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

شده‌اند. بخش باقی‌مانده از تورب‌زار که در حال حاضر به دلیل نامناسب بودن خاک آن جهت کشاورزی به شکل تقریباً دست‌نخورده باقی‌مانده است نزدیک به ۲۰ هکتار می‌باشد.

هلیل‌رود از کوه‌های کرمان سرچشمه می‌گیرد و حدود ۴۰۰ کیلومتر در جهت جنوب خاوری جریان دارد و سپس به دریاچه جازموریان (هامون جازموریان) که یک پلایای بسته است می‌ریزد. در دوران برنز اولیه و عصر آهن، موقعیت اصلی رودخانه در باختر مکان کنونی آن بوده است (Fouacheet et al., 2005). آب رودخانه از باران و ذوب برف‌های کوه‌های بارز و کرمان تغذیه می‌شود. با توجه به ورودی متغیر آب شیرین، رژیم هیدرولوژیکی هلیل‌رود دارای جریان‌های متناوب می‌باشد که تنوع بین سالانه بالایی را نشان می‌دهد، که ممکن است خود را از طریق رویدادهای سیل نشان دهد (Fouacheet et al., 2005). ساخت سدها در بخش‌های بالایی رودخانه منجر به جریان نامنظم در سمت پایین دست شده است (Mashkour et al., 2013)، به ویژه در پلایای جازموریان که در بیشتر مواقع سال خشک می‌ماند (Zandifar et al., 2022). بر اساس طبقه‌بندی زیست-آب‌وهوایی ایران، جیرفت یک بیابان گرمسیری به‌شمار می‌رود که ویژگی بارز آن بارش اندک سالانه است (Djamali et al., 2010b). همچنین بر اساس طبقه‌بندی آب‌وهوایی کوپن-گایگر (Kotteck et al., 2006) جیرفت دارای آب‌وهوای جنب-حاره‌ای است. این منطقه تحت تأثیر دو سیستم آب‌وهوایی متفاوت قرار دارد (شکل ۱) که عبارتند از بادهای باختری عرض‌های میانی یا سامانه‌های مدیترانه‌ای، و دیگری سامانه موسمی تابستان هندوستان (Gurjazkaite et al., 2018; Vaezi et al., 2019). این دو سامانه سبب بروز تغییرات قابل توجهی در آب‌وهوای جیرفت می‌شوند. آب‌وهوای چیره جیرفت، آب‌وهوای مدیترانه‌ای است که با یک فصل مرطوب کوتاه در زمستان و تابستان‌های خشک مشخص می‌شود (Blumler, 2005). بارندگی‌های فصل زمستان جیرفت ناشی از نوسانات اقیانوس اطلس شمالی می‌باشند که سبب راندن سیکلون‌های مدیترانه‌ای به سوی آسیای مرکزی می‌شود (Fallah et al., 2017). با این حال، جیرفت و به‌طور کلی جنوب خاوری ایران به سبب جایگاه جغرافیایی خود که در مجاورت کمربند همگرایی بین حاره‌ای قرار دارد، در مرز شمال باختری منطقه تحت تأثیر سامانه موسمی تابستانه هندوستان جای گرفته است (Gurjazkaite et al., 2018; Vaezi et al., 2019).

داده‌های ایستگاه هواشناسی واقع در حدود ۱۰ کیلومتری جنوب جیرفت نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه در این منطقه در حال حاضر ۲۶/۳ درجه سانتی‌گراد است که به‌طور متوسط ماهانه بین ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۷/۱ درجه سانتی‌گراد در ژانویه و ژوئیه در نوسان است. بالاترین دمای ثبت شده ۴۸/۶ درجه سانتی‌گراد است. میزان بارش سالانه ۱۹۴ میلی‌متر است. فصل مرطوب، با بارندگی ماهانه بیش از ۳۰ میلی‌متر، از دسامبر تا مارس رخ می‌دهد. فصل خشک با میزان بارندگی ماهانه کمتر از ۱۰ میلی‌متر از آوریل تا نوامبر رخ می‌دهد. مرطوب‌ترین ماه فوریه (۴۶/۶ میلی‌متر) و خشک‌ترین ماه جولای (۱ میلی‌متر) است.

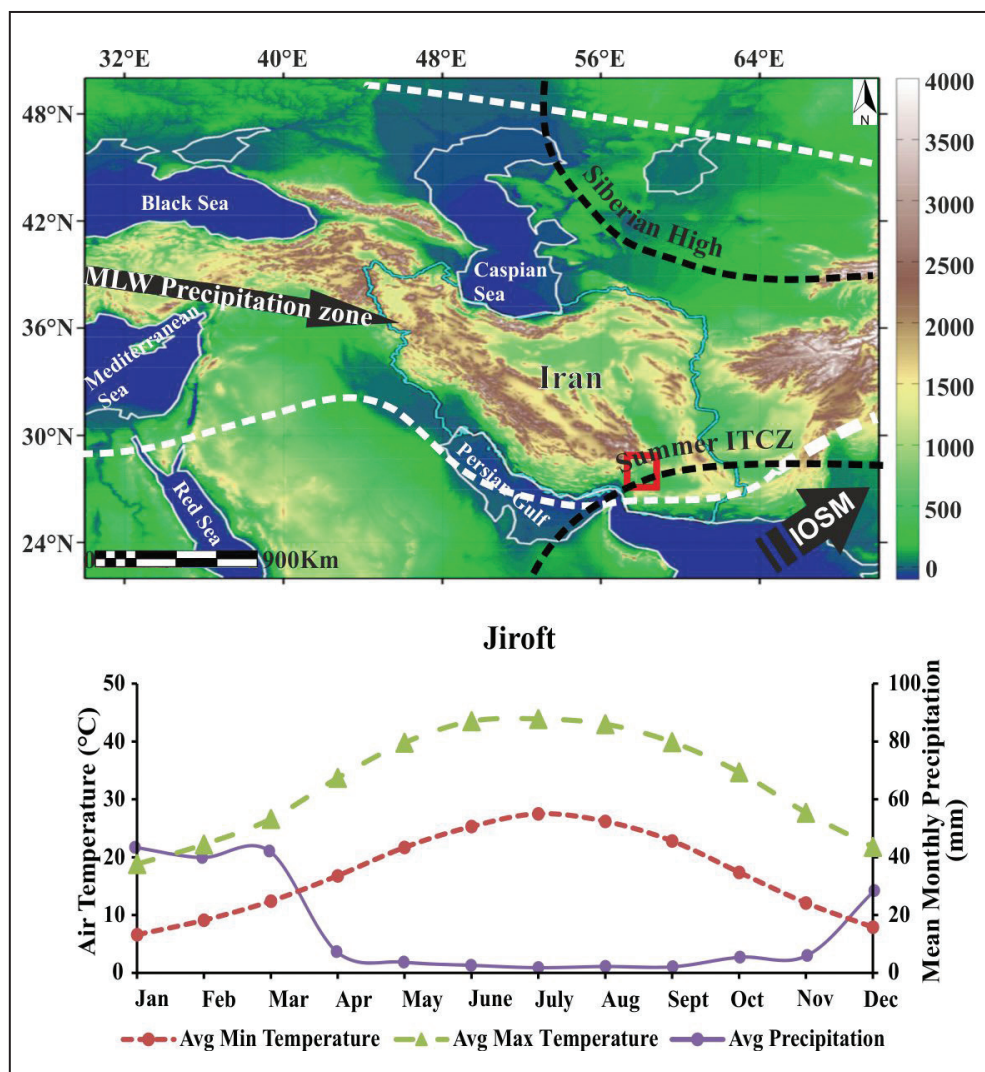
بررسی ارتباط بین شاخص شدت خشکسالی SPEI دوازده ماه و نوسانات جوی اقیانوسی که با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه انجام شده است، نشان داد که خشکسالی حوضه آبخیز جازموریان با شاخص‌های جوی اقیانوسی نوسان چند دهه اقیانوس اطلس (AMO) و شاخص نوسان جنوبی (SOI) رابطه معنادار قوی‌تری در سطح خطای ۵ درصد دارند و بر اساس نتایج مدل رگرسیون چندگانه، شاخص چند دهه‌ای اقیانوس اطلس بیش از ۷۰ درصد خشکسالی حوضه آبخیز جازموریان را تبیین می‌کند. تحلیل همدید خشکسالی نشان داد که شرایط پایداری و جریان‌مداری جو در طی فاز گرم نوسان AMO باعث فرونشینی و شرایط پایداری هوا شده و بر شدت خشکسالی در حوضه آبخیز جازموریان در فاز گرم از سال ۱۹۹۹ تا کنون افزوده است (Akbari Azirani, 2022).

اقلیم‌شناسی متنوعی در مغزه ۵ متری رسوبی استخراج شده از پلایای جازموریان در جنوب خاوری ایران در جهت ایجاد درک ژرف‌تر از چگونگی تأثیرگذاری رویدادهای بزرگ آب‌وهوایی شناخته شده و چگونگی تأثیرگذاری دو سامانه اقلیمی مونسون تابستانه اقیانوس هند و بادهای باختر وزان عرض‌های میانی در تغییرات دیرینه اقلیمی باختر آسیا از زمان آخرین بیشینه یخچالی تا کنون ارائه شده است. افزایش در ورود رسوبات رودخانه‌ای و میزان بسیار کم کانی‌های تبخیری در رسوبات پلایای جازموریان بین ۱۴ تا ۱۳/۲ هزار سال پیش نشانگر افزایش قابل توجه بارندگی‌های مونسونی اقیانوس هند است. بین ۱۳/۲ تا ۱۱/۴ هزار سال پیش محیط پلایا بسیار خشک و گردوغباری بوده است که به‌وسیله افزایش قابل توجهی در ورودی ماسه بادی و میزان بالایی کانی‌های تبخیری قابل تشخیص است. ابتدای هولوسن آغازین دوره بسیار مرطوبی به واسطه شدت یافتن مونسون تابستانی اقیانوس هند در پلایای جازموریان است که با کاهش شدید رسوبات بادی و افزایش رسوبات رودخانه‌ای در ۱۱/۴ هزار سال پیش آغاز می‌شود. چندین دوره خشکسالی شدید به دلیل مهاجرت مرز منطقه همگرایی بین حاره‌ای به سمت جنوب در هولوسن میانی در رسوبات پلایا ثبت شده است. رژیم چیره بارش از بارندگی مونسونی در ابتدای هولوسن به بارندگی مدیترانه‌ای در هولوسن آخرین تغییر یافته است. متأسفانه آن مطالعه در دوره اواخر هولوسن بسیار پایین بود (Vaezi et al., 2019). مطالعه دیگری که بر روی تورب‌زاری در نزدیکی مجموعه باستان‌شناسی کنار صندل با استفاده از شواهد دقیق گرده‌شناسی صورت گرفت نشان داد که منطقه از حدود ۴۰۰۰ سال پیش تا کنون تحت پوشش گیاهی شبه ساوانا و صحرای-سندی بوده است (Gurjazkaite et al., 2018).

انجام پژوهش‌های دیرینه محیط‌شناسی و دیرینه آب‌وهواشناسی در مناطقی از کشور همچون منطقه جنوب خاوری ایران که از وضعیت دیرینه آنها اطلاعات مستند زیادی در دست نیست کاملاً ضروری است. تنها با درک تغییرات زمانی و مکانی آب‌وهوا در یک منطقه خاص می‌توان پیشی را نسبت به سازوکارهای تغییردهنده آب‌وهوای آن منطقه به‌دست آورد و الگویی از تغییرات آب‌وهوایی آن را شناسایی کرد (Chen et al., 2008). موقعیت منطقه باستانی جیرفت بین دو اقلیم نیمه خشک در شمال و خشک در جنوب واقع شده است که سبب حساسیت بالای اکوسیستم‌های آبی و خشکی نسبت به پیامدهای تغییرات آب‌وهوایی در این منطقه می‌شود. به همین دلیل این منطقه باستانی مکان امیدوارکننده‌ای برای مطالعات دیرینه اقلیم جهت آشکار کردن نوسانات اقلیمی و تأثیر بالقوه آنها بر جوامع انسانی در فلات ایران است (Gurjazkaite et al., 2018; Vaezi et al., 2019). شرایط سخت محیطی همراه با ویژگی‌های جغرافیای گیاهی پیچیده اهمیت بیشتر داده‌های حاصل از مطالعات دیرینه محیطی در جنوب خاوری ایران را آشکار می‌سازد. افزون بر این، فقدان عمومی آرشیو رسوبی مناسب، به عنوان مثال، تالاب‌ها و محیط‌های دریاچه‌ای، سطح دیگری از پیچیدگی را در این مناطق ایجاد کرده است (Vaezi et al., 2022). مطالعه حاضر با بررسی شواهد متعدد رسوب‌شناسی و بیوژئوشیمی (بایومارکرها، ایزوتوپ‌ها و عناصر) در مغزه رسوبی از منطقه باستانی جیرفت به بازسازی تغییرات دیرینه محیطی و اقلیمی منطقه در طول ۴۰۰۰ سال گذشته می‌پردازد. این نکته گفتنی است که مطالعات بایومارکرها (نشان‌گرهای زیستی) تا کنون نه تنها در جنوب خاور ایران بلکه تا محدوده وسیعی در این عرض جغرافیایی صورت نپذیرفته است.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

تورب‌زار مورد مطالعه در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر جیرفت در استان کرمان قرار دارد. این تورب‌زار با ارتفاع ۵۷۰ متر از تراز آب‌های آزاد در فاصله نزدیک به دو کیلومتری کرانه خاوری رودخانه هلیل‌رود جای دارد. این تورب‌زار در حال حاضر یک تورب‌زار مرده محسوب می‌شود و زمین‌های آن که پیشتر بخشی از تورب‌زار بوده‌اند در پی خشکیدگی آن توسط ساکنین منطقه تبدیل به زمین‌های کشاورزی



شکل ۱- فلات ایران از دیدگاه آب و هواشناسی یکی از مناطق بسیار پویای جهان به شمار می آید که اقلیم آن را برآیند برهم کنش جبهه پرفشار سیرری، بادهای باختری مدیترانه ای و بادهای موسمی اقیانوس هند (مونسون) کنترل می کند (Vaezi et al., 2019). موقعیت جیرفت در جنوب خاوری ایران به وسیله یک مستطیل قرمز رنگ نشان داده شده است. رنگ های زمینه در این شکل، توپوگرافی را بر حسب متر در باختر آسیا نشان می دهند. در پنل پایین تغییرات ماهانه بارش و دما نشان داده شده است.

Figure 1. Climate on the Iranian Plateau in southwest Asia is largely governed by complex interactions between the southwest Indian Ocean Summer Monsoon (IOSM), the Mid-Latitude Westerlies (MLW), and the northeast Siberian Anticyclone (Vaezi et al., 2019). Red rectangle indicates the study area. Colours in this figure shows topography in meter over West Asia. A 30-years average of the minimum and maximum monthly mean air temperature (°C) and monthly precipitation (mm) as recorded in the Jiroft weather station.

### ۳- روش پژوهش ۳-۱- نمونه برداری

کربن ۱۴ با استفاده از پایگاه داده (Intcal 20; Reimer et al., 2020) که ویژه کالیبره کردن سن های کربن ۱۴ است، کالیبره شدند. مدل سن- ژرفا با استفاده از نرم افزار (R-software package BACON; Blaauw and Christen, 2011) ایجاد شد.

مغزه رسوبی جیرفت به طول دو و نیم متر از یک تورب زار خشکیده در ۲۵ کیلومتری جنوب شهر جیرفت کنونی با استفاده از مغزه گیر روسی برداشت شد.

### ۳-۲- سن سنجی

۳-۳- خاصیت پذیرفتاری مغناطیسی  
پذیرفتاری مغناطیسی از دهه نود قرن بیستم به این سو به طور فزاینده ای در پژوهش های آب و هواشناسی دیرینه مورد استفاده قرار گرفته است (Magyari et al., 2014). وجود رابطه

تعیین سن ۸ نمونه به وسیله اندازه گیری ایزوتوپ های ناپایدار کربن ۱۴ در مغزه های رسوبی به وسیله شتاب دهنده طیف سنج جرمی در آزمایشگاه رادیو کربن پزنان لهستان بر مبنای روش استاندارد صورت گرفت (Goslar and Czernik, 2000). سن های

طیف سنج جرمی (Thermo Electron Delta V Advantage isotope ratio mass spectrometer) اندازه گیری شده است. نسبت های ایزوتوپی در نمونه ها بر حسب استاندارد (VPDB) گزارش شد. فراوانی ایزوتوپ های پایدار با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$\delta (\%) = \left[ \left( \frac{R_{\text{Sample}}}{R_{\text{Standard}}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

در معادله بالا  $R_{\text{Sample}}$  و  $R_{\text{Standard}}$  به ترتیب نسبت ایزوتوپ های سنگین کربن  $^{13}\text{C}$  به ایزوتوپ های سبک کربن  $^{12}\text{C}$  برای نمونه مورد مطالعه و نمونه استاندارد می باشند.  $\delta$  ترکیب ایزوتوپ مورد نظر در نمونه را نسبت به نمونه استاندارد نشان می دهد. مقادیر مثبت  $\delta$  نشان دهنده غنی شدن نمونه از ایزوتوپ های سنگین و مقادیر منفی نشان دهنده کاهش ایزوتوپ های سنگین و افزایش ایزوتوپ های سبک در نمونه است.

### ۳-۸- آلکان های نرمال

در شیمی آلی به هیدروکربن های اشباع غیرسیکلی، آلکان گفته می شود. به دیگر سخن، یک آلکان متشکل از اتم های هیدروژن و کربن است به صورتی که تمام اتم های کربن دارای پیوند یگانه با یکدیگر هستند. آنالیز آلکان های نرمال در آزمایشگاه زمین شناسی دریایی دانشگاه لیشوپینگ در سوئد انجام گرفت. تمامی ظروف و وسایل مورد استفاده برای اندازه گیری آلکان های نرمال ابتدا با آب و صابون و آب دو بار تقطیر شده شست و شو داده شدند و با پوشش آلومینیومی مناسب در  $450^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد به مدت ۶ ساعت قرار گرفتند. سپس با حلال متانول شست و شو داده شدند. آماده سازی نمونه ها به اختصار شامل استخراج بخش لیپیدی رسوبات با حلال های آلی و به دنبال آن انجام تمیز سازی و جداسازی بخش های هیدروکربنی و آلکان های نرمال بود.

به منظور استخراج مواد آلی از دستگاه Accelerated Solvent و مخلوط حلال های دی کلرومتان و متانول به نسبت ۹ به ۱، استفاده می شود. کاهش حجم نمونه های استخراجی توسط تبخیر کننده دوار BuchiSyncore انجام شد. پس از حلال پرانی، جداسازی فاز جامد (SPE) به وسیله حلال دی کلرومتان و پروپان به نسبت ۲ به ۱ در کارتریج های (LC-NH aminopropyl cartridges) که بر روی BuchiSyncore قرار می گیرند، انجام پذیرفت. بخش هیدروکربنی جداسازی شده توسط کارتریج مرحله اول، دوباره حلال پرانی شده و وارد کارتریج نوع دوم (Bond Elute Alumina-N cartridge) شد. در ادامه نمونه ها با استفاده از جریان آرام گاز نیتروژن با درجه خلوص تقریباً ۱۰۰٪ به طور کامل خشک شدند. سپس آلکان ها به وسیله دی کلرومتان حل شدند و محلول به دستگاه GC-MS تزریق شد (Wakeham et al., 2002).

### ۴- داده ها و اطلاعات

#### ۴-۱- سن سنجی

هشت سن رادیوکربن برای ساخت مدل سنی مغزه حیرفت استفاده شد (جدول ۱). هفت سن کالیبره شده در ترتیب زمانی بود و یک سن در ژرفای ۲۴۵ سانتی متری در ترتیب زمانی نبود و نشانگر واژگونی بودند (واژگونی زمانی در حدود یک قرن). سن کالیبره شده ژرف ترین نمونه سن سنجی شده ۳۶۵۵ سال به دست آمد. نتایج سن سنجی با استفاده از منحنی کالیبراسیون Intcal ۲۰ کالیبره شدند (Reimer et al., 2020). نتایج سن سنجی مغزه حیرفت با استفاده از یکجی نرم افزاری BACON (Blaauw and Christen, 2011)، سن مغزه ۲/۵ را در محدوده ۴۰۱۱ تا ۸۵۴ سال پیش نشان داد (شکل ۲).

بر اساس مدل سن- ژرفا، دو بالاترین نرخ رسوب ( $2/04$  و  $1/76$  میلی متر در سال) بین ۲۵۰ سانتی متر و ۱۹۵ سانتی متر رخ داده است. کمترین نرخ رسوب گذاری ( $0/33$  میلی متر در سال) بین ژرفای ۳۵ سانتی متری تا بالای مغزه رسوبی رخ داده است.

مستقیم بین پذیرفتاری مغناطیسی، میزان ورودی مواد معدنی در رسوبات، سبب شده است که از پذیرفتاری مغناطیسی به عنوان یک شاخص آب و هواشناسی دیرینه استفاده شود (Robinson, 1986). از پذیرفتاری مغناطیسی به عنوان یک پروکسی برای تشخیص رسوبات بادی که در دوره های گردوغباری در محیط های دریاچه ای نهشته می شوند، استفاده شده است (Magyari et al., 2014). در طی این پژوهش، پس از انتقال نمونه ها از عملیات میدانی به آزمایشگاه، نخست، پذیرفتاری مغناطیسی مغزه ها با کمک دستگاه (MS2C) Bartington متعلق به موسسه ملی اقیانوس شناسی اندازه گیری شد. قطر دهانه اسکنر این دستگاه ده سانتی متر و حساسیت آن X10-6 SI 6 است. فاصله بین دو اندازه گیری متوالی در این پژوهش دو سانتی متر در نظر گرفته شد (Dearing, 1994).

### ۳-۴- تعیین غلظت عناصر بوسیله فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس رایج ترین فن تجزیه ای تعیین شیمی اکسید عناصر اصلی و کمیاب در رسوبات است. تلفیق این گونه مطالعات و مطالعات پایه رسوب شناسی تا حدود زیادی در شناخت منشأ رسوبات موثر خواهد بود. اصلی ترین کاربرد آن در تفسیر و تعیین شرایط ژئوشیمیایی محیط رسوبی و تغییرات آن در طول زمان است (Maher et al., 1994; Thompson and Morton 1979). هدف عمده از مطالعات ژئوشیمی به روش فلورسانس پرتو ایکس، بررسی همبستگی تغییرات عناصر اصلی و فرعی با ویژگی های فیزیکی رسوبات به ویژه پذیرفتاری مغناطیسی و نوع رخساره های رسوبی است تا از این طریق به تفسیری مناسب دست یابیم. این مطالعه، در آزمایشگاه دانشگاه لیشوپینگ سوئد انجام گرفت. هر آنالیز یک دقیقه به طول می انجامد و در فواصل تا ۵ سانتی متری به وسیله Hand-held XRF scanner (SI TITAN, Bruker) انجام می پذیرد. این دستگاه نتایج را به صورت % نشان می دهد.

### ۳-۵- تعیین غلظت عناصر به وسیله ICP

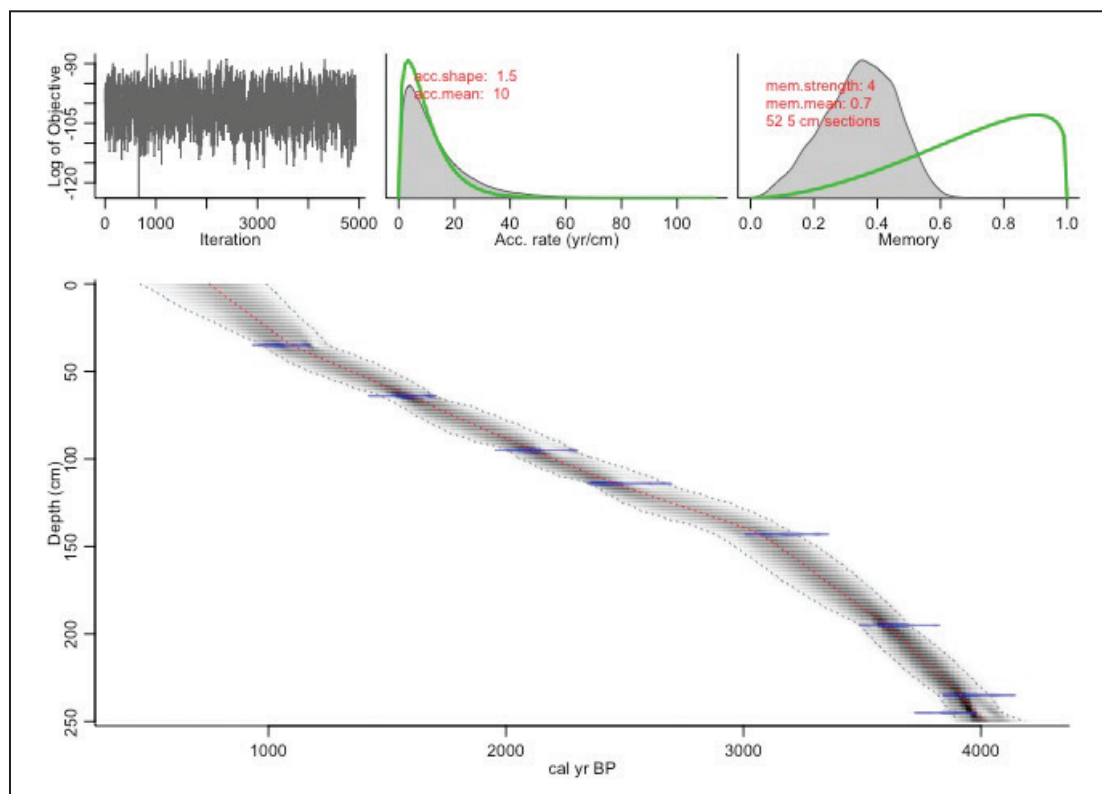
برای اطمینان از دقت نتایج XRF، غلظت عناصر در ۲۲ نمونه از رسوبات به وسیله ICP اندازه گیری شد. از هر نمونه  $0/3$  گرم وزن شد و  $10$  میلی لیتر اسید نیتریک ۶۵٪ در داخل محفظه دستگاه به آن اضافه شد. سپس نمونه ها به دمای  $185^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد در مدت ۳۰ دقیقه رسیدند و ۱۵ دقیقه دیگر نیز در این دما حرارت داده شدند. سپس نمونه ها با آب مقطر (MQ water) به حجم ۵۰ میلی لیتر رسیدند.

### ۳-۶- محاسبه میزان وزنی کربن آلی و نیتروژن

برای اندازه گیری مقدار کل کربن آلی (TOC) در رسوبات پس از پودر کردن و شستن نمونه با اسید کلریدریک (برای از بین رفتن کربنات) از دستگاه Fumigation (Carlo-Erba NC-1500) CHN Elemental Analyzer استفاده شد (method; Hedges and Stern, 1984).

### ۳-۷- ایزوتوپ پایدار کربن در مواد آلی موجود در نهشته ها

برای آماده سازی جهت تجزیه و تحلیل  $\delta^{13}\text{C}_{\text{COM}}$  در آزمایشگاه کربنات کلسیم نمونه ها مطابق مراحل یاد شده در بالا با HCl حذف شد (Fumigation method; Hedges and Stern, 1984). نمونه ها جهت آنالیز به آزمایشگاه بخش علوم زمین شناسی دریایی دانشگاه فلوریدا ایالات متحده منتقل شد. در این آزمایشگاه، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت تحت تاثیر اسید فسفریک در دمای  $25^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد قرار گرفته و گاز دی اکسید کربن متصاعد شده از هر نمونه به کمک دستگاه



شکل ۱- مدل سن-ژرفای مغزه جیرفت با استفاده از نرم‌افزار BACON (Blaauw and Christen, 2011). خط سیاه نشان‌دهنده سن کالیبره شده متوسط است، سایه خاکستری کمینه و بیشینه مقادیر را در فاصله اطمینان ۹۵٪ نشان می‌دهد.

Figure 2. Age-depth model of the Jiroft using R-software package BACON (Blaauw and Christen, 2011). The calibrated  $^{14}\text{C}$  dates (transparent blue) and the age-depth model (darker greys indicate more likely calendar ages and grey stippled lines infer 95% confidence intervals) are shown.

جدول ۱- نتایج سن‌سنجی (آزمایشگاه رادیوکربن پزنان لهستان) مغزه جیرفت کالیبره شده به وسیله IntCal 20.

Table 1. Calibrated radiocarbon dates (Laboratory, Poland Poznań Radiocarbon) using IntCal 20.

| Sample no. | Depth (cm) | Lab no.   | Age $^{14}\text{C}$ (yr BP) | Calibrated age (cal yr BP) |
|------------|------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|
| Dar-35     | 34-35      | Poz-85097 | $30 \pm 1125$               | 1037                       |
| Dar-64     | 63-64      | Poz-83152 | $35 \pm 1700$               | 1579                       |
| Dar-95     | 94-95      | Poz-83153 | $30 \pm 2130$               | 2139                       |
| Dar-114    | 113-114    | Poz-85099 | $30 \pm 2405$               | 2510                       |
| Dar-143    | 142-143    | Poz-83154 | $35 \pm 3010$               | 3080                       |
| Dar-195    | 194-195    | Poz-83155 | $35 \pm 3400$               | 3672                       |
| Dar-235    | 234-235    | Poz-83156 | $35 \pm 3655$               | 3902                       |
| Dar-245    | 244-245    | Poz-85100 | $30 \pm 3570$               | 3935                       |

## ۴-۲- نتایج مطالعات پایه رسوب‌شناسی

۰/۳ تا ۳/۶ درصد با میانگین ۲٪ متغیر است. همچنین، یک همبستگی قوی (بزرگتر از ۰/۹) بین عناصر آواری Al، Si، و K در طول مغزه رسوبی وجود دارد. به عنوان شاخص‌های اصلی تغییرات دیرینه محیطی (دوره‌های مرطوب/خشک)، نسبت‌های عناصر Fe/Al، Ca/Ti، Rb/K، Si/Al، Ti/Al و K/Ti محاسبه و در مقایسه با ژرفا و سن‌های کالیبراسیون رسم شد (شکل ۳).

خاصیت مغناطیسی (MS) از انتهای مغزه رسوبی تا ژرفای ۲۰۰ سانتی‌متری مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد (شکل ۳). درصد ماسه دارای دامنه تغییرات زیادی از کمینه ۵۱٪ تا بیشینه ۹۶٪ با میانگین ۷۹٪ درصد است. از ۱۷۵ تا ۸۰ سانتی‌متر در مغزه، میزان ماسه زیاد اما به نسبت ثابت است. در طول مغزه رسوبی همبستگی بین خاصیت مغناطیسی و میزان ماسه ضعیف است یا وجود ندارد. با این حال، در فاصله ژرفاهای ۸۰ تا ۱۰ سانتی‌متری، همبستگی (R2) به مقدار ۰/۳۲ افزایش می‌یابد.

## ۴-۳- نتایج آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

## ۴-۴- محاسبه میزان وزنی کربن آلی، نیتروژن و ایزوتوپ کربن مواد آلی

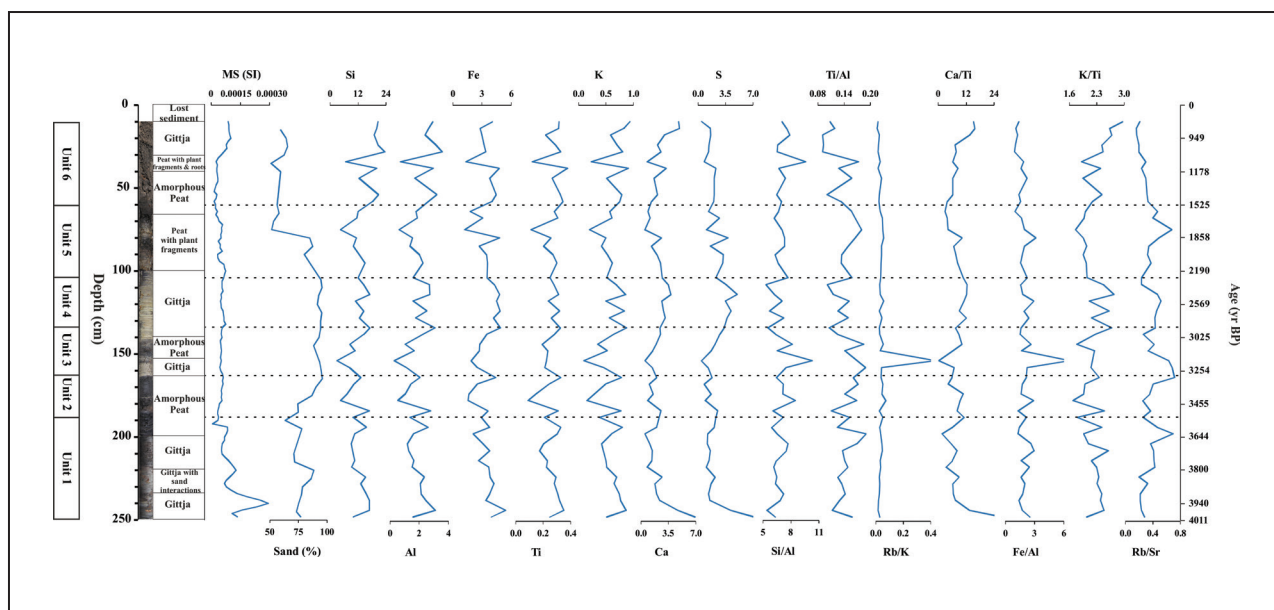
همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود در رسوبات مغزه جیرفت مقادیر مجموع کربن آلی (TOC) از ۰/۶۱٪ تا ۱۲/۳٪ متغیر است. نیتروژن کل (TN) در رسوبات از ۰/۰۷٪ تا ۰/۸۰٪ متغیر است. نسبت C/N از حدود ۵/۸ تا ۱۹ متغیر است. مقادیر ایزوتوپ کربن آلی از بیشینه ۱۹/۶۷- تا کمینه ۲۵/۳۰- در نوسان است.

به ترتیب بیشترین غلظت عناصر مربوط به  $Si > Fe > S > Ca > Al > K > Ti > As > Mn$  در شکل ۳ روند تغییرات برخی از عناصر نشان داده شده است (جدول ۲). در شکل ۲/۹ تا ۲۳/۵ درصد با میانگین ۱۳/۱ درصد است. Al از

جدول ۲- تغییرات آماری غلظت برخی از عناصر در مغزه جیرفت اندازه‌گیری شده با استفاده از XRF.

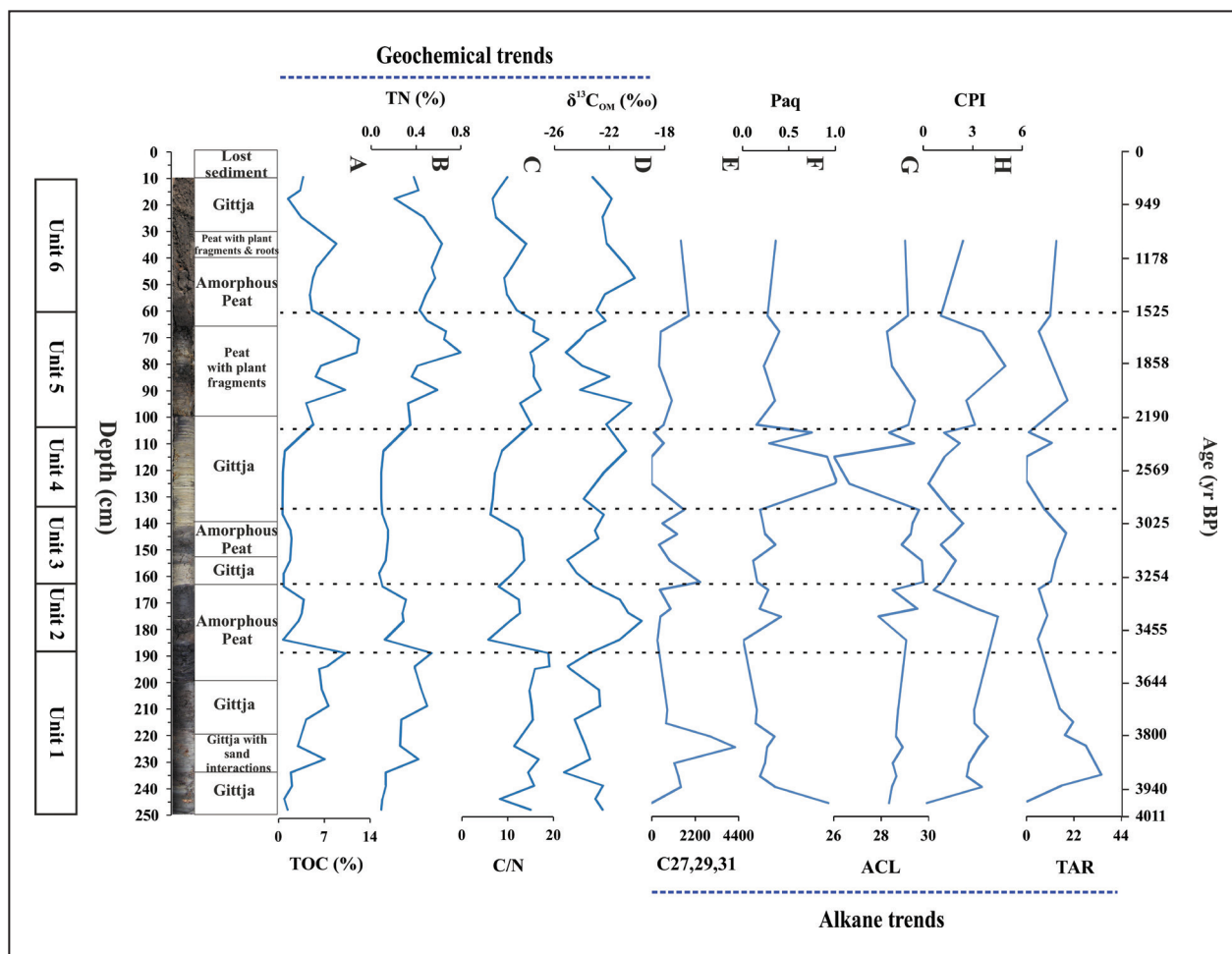
Table 2. Statistical changes of concentration of some elements in the Jiroft core measured by XRF.

|      | Si    | Fe   | S    | Ca   | Al   | K    | Ti   | As   | Mn   | Sr   | Rb   |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Mean | 13.10 | 3.40 | 2.18 | 2.22 | 1.96 | 0.59 | 0.26 | 0.07 | 0.05 | 0.06 | 0.02 |
| SD   | 4.65  | 1.01 | 1.28 | 1.27 | 0.78 | 0.20 | 0.06 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.01 |
| Max  | 23.48 | 5.41 | 7.16 | 6.88 | 3.59 | 0.93 | 0.38 | 0.16 | 0.19 | 0.09 | 0.04 |
| Min  | 2.93  | 1.22 | 0.42 | 0.48 | 0.29 | 0.10 | 0.09 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |



شکل ۳- خاصیت پذیرفتاری مغناطیسی، درصد ماسه و تغییرات غلظت عناصر مختلف در مغزه جیرفت اندازه‌گیری شده با استفاده از XRF و نسبت عناصر در برابر ژرفا و سن رسم شده‌اند. تصویری از مغزه رسوبی نیز نمایش داده شده است. ۶ واحد رسوبی بر مبنای تغییرات در رسوبات ارائه شده است.

Figure 3. Magnetic susceptibility; % Sand content and geochemical trends are plotted vs. depth and age. The visual characteristics of the 2.5-m peat sequence, and depth are also included. The units (Unit 1-Unit 6) represent shifts in sedimentological and geochemical properties.



شکل ۴- نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی رسوبات مغزه جیرفت. تغییرات کل کربن آلی و نیتروژن (% درصد وزن خشک نمونه)، نسبت C/N، ایزوتوپ کربن آلی  $\delta^{13}C_{OM}$ ، مجموع زنجیره آلکان‌های نرمال، شاخص CPI، شاخص TAR و شاخص Paq در برابر ژرفا و سن رسم شده‌اند. تصویری از مغزه رسوبی نیز نمایش داده شده است. ۶ واحد رسوبی بر مبنای تغییرات در رسوبات ارائه شده است.

Figure 4. total organic carbon; total nitrogen; C/N wt%;  $\delta^{13}C$  in organic matter; n-C27, 29, 31 alkanes ng/g; Paq; ACL; CPI; TAR trends are plotted vs depth and age. The visual characteristics of the 2.5-m peat sequence, and depth are also included. The units (Unit 1-Unit 6) represent shifts in sedimentological and geochemical properties.

#### ۴-۵- بررسی و تعیین زنجیره‌های کربنی تشکیل دهنده مواد آلی

از ۱۶۴ سانتی‌متر تا ۱۳۴ سانتی‌متری مقادیر به نسبت بالای آلکان‌های نرمال بلند زنجیره و TAR در کنار مقادیر پایین Paq دیده شد. بلافاصله از ۱۳۴ سانتی‌متر تا ۱۰۶ سانتی‌متری بالاترین مقادیر Paq در کنار کاهش شدید در مقادیر ACL و CPI همزمان رخ داده است (شکل ۴).

#### ۵- بحث

##### ۵-۱- کاربرد شاخص‌ها در بازسازی آب‌وهوای دیرینه

در این بخش بحثی در مورد چگونگی تجزیه و تحلیل شاخص‌های اقلیمی استفاده شده در این پژوهش ارائه شده است و سپس در ادامه به بازسازی اقلیم دیرینه جیرفت در طول ۴ هزار سال گذشته پرداخته شده است.

– **مطالعات پایه رسوب‌شناسی:** بافت مغزه رسوبی متناوب بین Gytja و انواعی از تورب تخریب شده (amorphous degraded peat) تغییر نشان می‌دهد. Gytja به عنوان مواد رسوبی تفسیر می‌شود که در طول غرقابی تشکیل شده و محیط‌های دریاچه یا برکه را نشان می‌دهد. در مقابل، تورب آمورف با سطوح تخریب بالا مشخص می‌شود که در طی قرار گرفتن در معرض هوا، اکسیداسیون

و خشک شدن به دلیل سطح پایین آب در تالاب رخ می‌دهد (Myslinska, 2003). ذرات با اندازه بزرگ (ماسه) بیشتر در نتیجه فرسایش در حوضه آبریز ظاهر می‌شوند که به نوبه خود یا به دلیل دبی رودخانه‌ای بیشتر (رویدادهای سیل) یا حمل و نقل بادی به دلیل بیابان‌زایی رخ می‌دهد (Thompson and Morton 1979).

پذیرفتاری مغناطیسی یک ابزار مناسب برای فهم تغییرات ترکیب رسوب است. در محیط‌های طبیعی، میزان مغناطیسی شدن به نوع کانی‌ها، به‌ویژه کانی‌های آهن‌داری ارتباط دارد که در رسوبات وجود دارند. تغییر ترکیب رسوب به فرایندهای رسوبی مرتبط است و فرایندهای رسوبی با تغییر آب‌وهوا و تغییرات محیطی مرتبط است. افزایش میزان پذیرفتاری مغناطیسی رسوبات در کنار اندازه بزرگ‌تر ذرات به معنی انرژی بیشتر در محیط و افزایش فرسایش در حوضه آبریز است (Thompson and Morton, 1979).

– **استفاده از نتایج آنالیز عنصری در تحلیل رفتار دیرینه حوضه آبریز:** طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس رایج‌ترین فن تجزیه‌ای تعیین شیمی اکسید عناصر اصلی و کمیاب در رسوبات است. تلفیق این گونه مطالعات و مطالعات پایه رسوب‌شناسی تا حدود زیادی در شناخت منشا رسوبات موثر خواهد بود. اصلی‌ترین کاربرد آن در

گیاه پی برد. عملا هیچ تبادل ایزوتوپی در طول تجزیه بستر گیاه و اختلاط پس از آن در مراحل اولیه توسعه خاک رخ نمی‌دهد (Melillo et al., 1989). فشارهای زیست محیطی به دلیل کاهش آب شیرین، احتمالا منجر به مقادیر منفی تر  $\delta^{13}C_{OM}$  در رسوبات در دوره‌های خشک‌تر می‌شود. در مقابل، افزایش  $\delta^{13}C_{OM}$  در طول دوره‌های مرطوب نشان‌دهنده افزایش سطح دریاچه و همزمان افزایش جلبک‌ها و میکروارگانیسم‌ها در دریاچه است (Enzel et al., 1999).

– **بازسازی اقلیم دیرینه با کمک آلکان‌های نرمال:** در مطالعه حاضر ردیابی منشأ مواد آلی با محاسبه شاخص‌های مختلف زیر در مجموع آلکان‌های نرمال استخراج شده از مواد آلی در نمونه‌ها تعیین شد:

Carbon Preference Index (CPI)

Average Chain Length (ACL)

Terrigenous Aquatic Ratio (TAR)

Paq

شاخص ارجحیت کربن به صورت مجموع غلظت آلکان‌های نرمال با تعداد کربن‌های فرد نسبت به مجموع آلکان‌های نرمال با تعداد کربن‌های زوج تعریف می‌شود. گیاهان آوندی خشکی‌زی دارای غلبه زنجیره‌های کربنی زوج نسبت به فرد هستند و دارای مقادیر CPI بیش از ۳ می‌باشند. در مقابل جلبک‌های دریایی، پلانکتون‌ها و باکتری‌ها دارای مقادیر CPI کم‌تر از ۱ هستند (Cranwell et al., 1987).

$$CPI = (\sum (C23 - C31)_{odd} + \sum (C25 - C33)_{odd}) / 2 \sum (C24 - C32)_{even}$$

به‌طور کلی آلکان‌های نرمال بلند (n-C31, n-C29, n-C27) شاخص حضور گیاهان آوندی خشکی‌زی و آلکان‌های نرمال کوتاه زنجیره (n-C19, n-C17, n-C15) شاخص حضور جلبک‌های دریایی، پلانکتون‌ها و باکتری‌ها به‌شمار می‌آیند (Meyers, 2003). نسبت آلکان‌های نرمال با منشأ گیاهان خشکی به آلکان‌های نرمال با منشأ گیاهان آبرزی به‌وسیله شاخص TAR بررسی می‌شود (Bourbonniere and Meyers, 1996).

$$TAR = (C27 + C29 + C31) / (C15 + C17 + C19)$$

نسبت Paq سهم نسبی گیاهان آبرزی (انواع مختلف گیاهان در داخل دریاچه) به گیاهان زمینی و باکتری‌ها/جلبک‌های هالوفیت بر مبنای نسبت آلکان‌های نرمال میان زنجیره (n-C23, n-C25) به آلکان‌های نرمال بلند زنجیره (n-C29, n-C31) می‌باشد (Ficken et al., 2000).

$$Paq = (C23 + C25) / (C23 + C25 + C29 + C31)$$

مقادیر ACL به شدت تغییرات در سطح آب پاسخ می‌دهند و کاهش ACL را می‌توان با شرایط مرطوب مرتبط دانست (Eglinton and Hamilton, 1967).

$$ACL = (25C25 + 27C27 + 29C29 + 31C31 + 33C33) / (C25 + C27 + C29 + C31 + C33)$$

## ۵-۲- بازسازی اقلیم دیرینه حیرفت در طول ۴ هزار سال گذشته

این واحد از انتهای مغزه تا ژرفای ۱۸۹ سانتی‌متری را پوشش می‌دهد که مربوط به بازه زمانی ۴۰۱۱ تا ۳۵۴۸ سال پیش از حاضر است. شرایط دیرینه اقلیمی در این بازه زمانی عمدتاً نیمه مرطوب بوده است. اما دو دوره کوتاه خشک نیز در این بازه زمانی قابل تشخیص است. واحد ۱ همزمان با بالاترین نرخ رسوب‌گذاری نسبت به دیگر بخش‌های مغزه، خاصیت پذیرفتاری مغناطیسی بالا و میزان ماسه نسبتاً بالا بوده است. مجموع این شرایط نشانگر وجود یک محیط پراثرژی (Jiang and Ding, 2010) است.

تقریباً در انتهای مغزه، خاصیت پذیرفتاری مغناطیسی بالاترین مقادیر را نشان می‌دهد و نمایانگر تأثیرات احتمالی سیلاب توسط لیل‌رود بر تورب‌زار است (Gurjazkaite et al., 2018). افزون بر این، نسبت‌های پایین Si/Al و Ti/Al نشان‌دهنده کاهش ورودی رسوبات بادی است، به این معنی که آب‌وهوا احتمالاً

تفسیر و تعیین شرایط ژئوشیمیایی محیط رسوبی و تغییرات آن در طول زمان است (Maher et al., 1994; Thompson and Morton, 1979).

افزایش مقادیر Al در رسوبات نشان‌دهنده افزایش فرسایش و در نتیجه ورود بیشتر مواد آواری به محیط است. با توجه به این که Al در طی هوازدگی و دیاژنز به نسبت بدون تغییر است و معمولاً به عنوان عاملی مناسب برای بهنجار کردن عناصر کمیاب (Trace Elements) به‌شمار می‌روند. رسوبات در تورب‌زار حیرفت در گذر زمان به وسیله هر دو فرایند آبی و بادی نهشته شده‌اند. به‌طور کلی، در دوره‌های مرطوب ورود رسوبات بادی به محیط کاهش می‌یابد. در نتیجه شاخص‌های میزان ورود گردوغبار (مانند Si/Al و Ti/Al) در رسوبات کاهش می‌یابد (Martinez-Ruiz et al., 2015). در محیط تورب‌زار، افزایش نسبت Si/Al نشانگر افزایش میزان کوارتز بادی در رسوبات است (Calvert and Fontugne, 2001; Martinez-Ruiz et al., 2015). با توجه به چگالی بیشتر کانی‌های سنگینی که حامل Ti هستند، این عناصر معمولاً با دانه‌های بزرگ‌تر انتقال می‌یابند (Grousset et al., 1989; Martinez-Ruiz et al., 2015; Samthein et al., 1982). از آنجایی که کانی‌های سنگین به دلیل چگالی متفاوت معمولاً در دامنه کوه‌های مجاور رسوب می‌کنند، افزایش Ti/Al در رسوبات مناطق پست ارتفاعی می‌تواند مربوط به فعالیت‌های بادی یا وقوع سیلاب‌های شدید باشد. اصولاً وقتی محیط تبخیری می‌شود میزان  $Rb^{+}$  در رسوبات نهشته شده افزایش می‌یابد (Martinez-Ruiz et al., 2015; Taylor and McLennan, 1985). از این رو، افزایش نسبت Rb/K نشان‌دهنده افزایش خشکی محیط (به عنوان مثال افزایش شوری آب) است (Ocakoglu et al., 2016; Sinha et al., 2006). افزایش K/Al معمولاً شاخصی برای افزایش ورود رسوبات آبی در محیط تورب‌زار در نظر گرفته می‌شود. به بیان دیگر در طول دوره‌های مرطوب، میزان هوازدگی شیمیایی افزایش یافته و در نتیجه نسبت K/Al در رسوبات افزایش می‌یابد (Martinez-Ruiz et al., 2015; Wehausen and Brumsack, 2000).

حضور آهن (Fe) نشان‌دهنده قرار گرفتن تورب‌زار در معرض هوا در شرایط خشک است، که نشان می‌دهد که تورب در معرض تخریب اکسیداتیو قرار گرفته است (Nichols, 2009). در مقابل، سطوح پایین Fe بیانگر شرایط بدون اکسیژن است که اغلب نتیجه غرقابی است.

– **ردیابی میزان تولید مواد آلی و شرایط و چگونگی حفظ مواد آلی در رسوبات به‌وسیله درصد وزنی نیتروژن و کربن:** درصد وزنی نیتروژن و کربن و نسبت آنها و ترکیبات ایزوتوپ پایدار مواد آلی به‌طور گسترده‌ای برای بازسازی پوشش گیاهی دیرینه محیط‌های رسوبی استفاده می‌شود (Hodell and Schelske, 1998; Meyers, 1997). TOC و N برای ردیابی میزان تولید زیست توده و شرایط و نحوه حفظ مواد آلی در رسوب استفاده می‌شود (Meyers, 2003; Talbot et al., 2006). افزایش ذرات آواری می‌تواند TOC را رقیق کند، در حالی که انحلال کربنات‌های معدنی می‌تواند میزان TOC را افزایش دهد (Dean, 1999). افزون بر این، میزان TOC می‌تواند با توجه به اندازه دانه‌ها متفاوت باشد، زیرا رسوبات دانه ریز توانایی ذخیره میزان بیشتری از مواد آلی را دارند.

نسبت C/N برای ردیابی منشأ مواد آلی استفاده می‌شود. مقادیر C/N بین ۴ تا ۱۰ نشان‌دهنده تولید بیشتر کربن آلی توسط گیاهان آبرزی است، از سوی دیگر، گیاهان آوندی خشکی‌زی به خاطر وجود بافت‌های فیبری، سلولز و لیگنین، مقادیر نسبت C/N بالای ۲۰ دارند (Meyers and Ishiwatari, 1993; Meyers, 1997). مقادیر بین ۱۲ و ۱۸، نشان‌دهنده منابع مخلوط و تجزیه مواد آلی است، به عنوان مثال، به دلیل نوسانات فصلی یا سالانه تراز آب در تورب‌زار.

– **بازسازی اقلیم دیرینه با کمک ایزوتوپ پایدار کربن در مواد آلی موجود در نهشته‌ها:** بر اساس درجه جداسازی کربن ۱۳ به‌وسیله گیاهان در طول فرایند فتوسنتز، گیاهان به گروه‌های مختلف تقسیم می‌شوند (Meyers and Teranes, 2002). بنابراین با توجه به عدد کربن و ترکیب ایزوتوپی آن می‌توان به شرایط آب‌وهوایی در زمان رشد

تورب زار است. این بازه زمانی یک دوره خشک طولانی با بیشترین شدت خشکی در حدود ۳۲۰۰ سال پیش از حاضر را پوشش می‌دهد. رسوبات ته‌نشین شده در این واحد دارای مقادیر  $\delta^{13}C_{OM}$  منفی‌تر هستند که شرایط خشک را پشتیبانی می‌کنند. مقادیر بالای آلکان‌های نرمال بلند زنجیره و TAR در کنار مقادیر پایین Paq، از تسلط شرایط خشک در این بازه حمایت می‌کنند. شدت و مدت این دوره خشک نسبت به دوره‌های خشک پیشین در طول ۴۰۰۰ سال گذشته افزایش نشان می‌دهد. شرایط خشک و بادی در جیرفت با افزایش پتاسیم در مغزه یخی GISP2 گرینلند، به عنوان شاخص افزایش شدت آنتی‌سیکلون سیرری (Mayewski et al., 1997)، و دوره افزایش رسوبات بادی دریاچه نئور، ایران (Sharifi et al., 2015) همخوانی دارد. در دریاچه مهارلو (جنوب باختری ایران)، این دوره با کاهش میزان ورودی رسوبات رودخانه‌ای و ترسیب زیاد کانی‌های تبخیری مطابقت دارد (Brisset et al., 2018). شرایط خشک مشابهی در این بازه زمانی در دریاچه زریبار (باختر ایران) و مغزه‌های رسوبی دریای مدیترانه گزارش شده است (Schilman et al., 2001). کاهش شدید سطح دریاچه تسر در مرکز ترکیه نشانگر شرایط خشک در این بازه زمانی است (Kuzucuoglu et al., 2011). به طور مشابه، شرایط خشک در دریای مرده بین ۳۳۰۰ تا ۳۰۰۰ سال پیش از حاضر (Kagan et al., 2015; Migowski et al., 2006) و در دریاچه وان در حدود ۳۳۰۰ سال پیش از حاضر گزارش شده است (Lemcke and Sturm, 1997).

واحد ۴ از ۱۳۴ تا ۱۰۶ سانتی‌متری (متعلق به ۲۸۹۷ تا ۲۳۰۲ سال پیش از حاضر) را در برمی‌گیرد. در واحد ۴ مقادیر بسیار بالای عناصر (Si, Al, K) در کنار کمترین مقدار ورودی رسوبات بادی (پایین‌ترین مقادیر Ti/Al و Si/Al) شرایط مرطوب را نشان می‌دهد. مطابق با این ایده، روند افزایشی  $\delta^{13}C_{OM}$  در کنار نسبت‌های پایین C/N و آلکان‌های نرمال بلند زنجیره در این واحد از وجود شرایط مرطوب پشتیبانی می‌کند. کاهش شدید در مقادیر ACL و CPI همزمان با بالاترین مقادیر Paq در واحد ۴ رخ داده است که شرایط مرطوب را تایید می‌کند. مطابق با شرایط مرطوب در جیرفت در این بازه زمانی، رسوبات دریاچه تسر نیز شرایط مرطوبی را بین ۲۸۰۰ تا ۲۰۰۰ سال پیش از حاضر نشان می‌دهند (Kuzucuoglu et al., 2011).

واحد ۵ از ۱۰۶ تا ۶۱ سانتی‌متری (متعلق به ۲۳۰۲ تا ۱۵۴۰ سال پیش از حاضر) را در برمی‌گیرد. وضعیت خشک در ابتدای این واحد بلافاصله پس از دوره مرطوب در جیرفت بر اساس کاهش شدید مقادیر K و K/Ti و افزایش نسبت‌های Ti/Al و Si/Al قابل استنباط است. به‌طور کلی، در واحد ۵، مقادیر پایین داشت. در مقابل، Ti/Al مقادیر بالایی داشت و بیشینه تغییر بین ۲۰۰۰ تا ۱۵۳۰ سال پیش از حاضر رخ داد که نشان‌دهنده فعالیت بادی بالا و شرایط خشک در این بازه زمانی است. شرایط خشک همچنین توسط کمترین مقادیر  $\delta^{13}C_{OM}$  در کل مغزه رسوبی در این واحد پشتیبانی می‌شود. افزایش قابل توجه فعالیت بادی و شرایط خشک در طول این بازه زمانی، به ویژه بین ۲۰۰۰ تا ۱۶۵۰ سال پیش از حاضر با افزایش قابل توجه پتاسیم در مغزه یخی GISP2، گرینلند (Migowski et al., 1997) مطابقت دارد.

واحد ۶ از ۶۱ تا ۱۰ سانتی‌متری (متعلق به ۱۵۴۰ تا ۸۵۴ سال پیش از حاضر) را در برمی‌گیرد. در ابتدای واحد ۶ بین ۱۵۴۰ تا ۱۳۱۵ سال پیش از حاضر ورود رسوبات بادی کاهش شدیدی نشان می‌دهد. در واقع مقادیر بالای K/Ti و  $\delta^{13}C_{OM}$  در کنار مقادیر پایین Ti/Al و C/N شرایط مرطوب‌تری را در جیرفت در این بازه زمانی نشان می‌دهد. کاهش قابل توجه غلظت پتاسیم در مغزه یخی GISP2 گرینلند در این بازه زمانی ثبت شده است (Migowski et al., 1997) پس از این بازه زمانی مرطوب، بیشتر بخش‌های واحد ۶ مقادیر متوسط نسبت‌های عنصری مشخص شدند که شرایط نیمه مرطوب را نشان می‌دهد. در طول این دوره نیمه مرطوب یک بازه زمانی خشک‌تر همراه با میزان بالای ورود رسوبات بادی به تورب‌زار در حدود ۱۰۷۵ سال پیش از حاضر به وسیله مقادیر بالای Si/Al و Ti/Al شناسایی شد.

مرطوب بوده است (Calvert and Fontugne, 2001; Martinez-Ruiz et al., 2015). مطابق با این تفسیر، مقادیر بالای K/Ti در طول این بازه حاکی از افزایش هوازگی شیمیایی و ورودی‌های آبرفتی بالاتر است (Martinez-Ruiz et al., 2015; Wehausen and Brumsack). به‌طور کلی افزایش دسترسی به منابع آب شیرین می‌تواند منجر به مقادیر بالاتر  $\delta^{13}C_{OM}$  در طول دوره‌های مرطوب شود (Enzel et al., 1999). بر این اساس و مقادیر کم C/N، این احتمال وجود دارد که شرایط مرطوب در حدود ۳۹۵۰ سال پیش از حاضر در جیرفت وجود داشته است. مقادیر بالای Paq (در حدود ۰/۹) همزمان با مقادیر پایین CPI، نشانه غرقابی شدن تورب‌زار است که از حضور گیاهان آبرزی غوطه ور/شناور در تورب‌زار پشتیبانی می‌کند (Meyers and Ishiwatari 1993; Meyers, 1997).

پس از این دوره کوتاه مرطوب، شرایط آب‌وهوایی نیمه مرطوب بین ۳۹۱۰ تا ۳۶۳۰ سال پیش از حاضر در جیرفت حاکم بوده است. این استنباط با مقادیر نسبتا بالاتر Si/Al، Ti/Al و C/N مطابقت دارد. این دوره نیمه مرطوب همزمان با مقادیر متوسط C/N و مقادیر CPI بین ۲ تا ۴ است که نشان‌دهنده ترکیبی از گیاهان خشکی‌زی و آبرزی است.

شرایط اقلیمی جیرفت در بازه زمانی ۴۰۱۱ تا ۳۵۴۸ سال پیش از حاضر عمدتا نیمه مرطوب و در بازه‌هایی مرطوب بوده است. با این حال، دو دوره خشک کوتاه در این بازه زمانی قابل تشخیص است. اولین خشکسالی کوتاه مدت در حدود ۳۸۰۰ سال پیش از حاضر رخ داده است. این شرایط خشک توسط قله‌های متمایز آلکان‌های نرمال بلند زنجیره (n-C29, n-C31) در این بازه زمانی قابل تشخیص بود (شکل ۴). شرایط خشک دوم حدود ۳۶۰۰ تا ۳۵۵۰ سال پیش از حاضر رخ داده است. این دوره خشک با افزایش نسبت Ti/Al و با مقادیر پایین  $\delta^{13}C_{OM}$  و مقادیر بسیار بالای نسبت C/N همراه بود. این دوره خشک کوتاه با افزایش ورودی رسوبات بادی در پلایای جازموریان همزمان است (Vaezi et al., 2019). همچنین، یک خشکسالی کوتاه حدود ۳۶۰۰ سال پیش از حاضر در شمال سوریه (Fiorentino et al., 2008) با کاهش شدید سطح دریای مرده مطابقت دارد (Migowski et al., 2006; Neumann et al., 2007).

واحد ۲ از ۱۸۹ تا ۱۶۴ سانتی‌متری (متعلق به ۳۵۴۸ تا ۳۲۹۳ سال پیش از حاضر) را در برمی‌گیرد. این واحد با افزایش قابل توجه در  $\delta^{13}C_{OM}$  و با افت شدید نسبت C/N در مقایسه با واحد ۱ مشخص می‌شود، که نشان‌دهنده یک شرایط نیمه مرطوب است. مقادیر ACL به شدت به تغییرات در سطح آب پاسخ می‌دهند و کاهش ACL را می‌توان با شرایط مرطوب مرتبط دانست (Cranwell, 1974; Schwark et al., 2002). مطابق با این، شرایط نیمه مرطوب در این واحد با مقادیر کم ACL مطابقت دارد.

بازه زمانی واحدهای ۱ و ۲ با یک دوره مرطوب در دریاچه زریبار، شمال باختری ایران همزمان است (Wasylikowa and Witkowski, 2008; Stevens et al., 2008). وضعیت مرطوب مشابهی از غار جیتا لبنان ثبت شده است (Verheyden et al., 2008). مطابق با تفسیر ما در این واحد، افزایش رطوبت در شمال سوریه بین ۳۹۰۰ تا ۳۷۰۰ سال پیش از حاضر نشانگر وجود شرایط نیمه مرطوب است (Roberts et al., 2008). سوابق ایزوتوپ‌های پایدار از دریاچه‌های مدیترانه چندین دوره افزایش رطوبت را بین ۳۹۰۰ تا ۳۴۰۰ سال پیش از حاضر نشان می‌دهد (Roberts et al., 2008). به عنوان مثال، شرایط مرطوب در کاپادوکیا در حدود ۳۹۰۰ سال پیش از حاضر رخ داده است (Roberts et al., 2008). مطابق با این شرایط مرطوب، مطالعات رسوب‌شناسی و ژئوشیمیایی رسوبات دریاچه تسر در مرکز ترکیه شرایط مرطوب را در حدود ۳۹۰۰ سال پیش از حاضر و بین ۳۶۵۰ تا ۳۴۰۰ سال پیش از حاضر نشان داده است (Kuzucuoglu et al., 2011).

واحد ۳ از ۱۶۴ تا ۱۳۴ سانتی‌متری (متعلق به ۳۲۹۳ تا ۲۸۹۷ سال پیش از حاضر) را در برمی‌گیرد. در واحد ۳ رسوبات به‌طور عمده تشکیل شده از ماسه به همراه مقادیر بالای Si/Al و Ti/Al می‌باشند که نشانگر ورودی بالای رسوبات بادی به

## ۶- نتیجه گیری

نیمه مرطوب بین ۱۳۱۵ و ۸۵۴ سال پیش از حاضر در حیرفت حاکم بوده است. به نظر می‌رسد همزمانی برخی از دوره‌های خشکسالی در طول ۴۰۰۰ سال گذشته می‌تواند با شدت یافتن آنتی سیکلون‌های سیری بر فراز فلات ایران ارتباط داشته است. البته در این مورد نیاز به شواهد بیشتری است. تغییرات آب‌شناختی (هیدرولوژیکی) حیرفت در طول ۴۰۰۰ سال گذشته با روندهای مشابه در دیگر مکان‌های تحت سلطه بارندگی مدیترانه‌ای مانند دریاچه تسر در مرکز ترکیه بیشتر مطابقت دارد. به نظر می‌رسد تغییرات دیرینه محیطی حیرفت بیشتر از این که همخوان با تغییرات مونسون اقیانوس هند باشد، منعکس‌کننده تغییرات اقلیمی مربوط به نوسانات اطلس شمالی و تغییرات بادهای باختر وزان عرض‌های میانی است. اما هنوز قضاوت در مورد میزان تغییرات دبی هلیل رود تحت‌تاثیر تغییرات مونسون اقیانوس هند و سیلاب‌های ناگهانی احتمالی مربوط به بارش‌های تابستانی و طوفان‌های بارانی مرتبط با آن در کوه‌های کرمان دشوار است. زیرا متاسفانه مقایسه دقیقی رکورد ما با تغییرات سامانه مونسون اقیانوس هند به دلیل تعداد کم رکوردهای مداوم موسمی از منطقه، هنوز امکان‌پذیر نیست.

در مطالعه حاضر به منظور بازسازی تغییرات دیرینه محیطی و اقلیمی حیرفت در جنوب خاوری ایران در طول ۴۰۰۰ سال گذشته، به بررسی شواهد متعدد رسوب‌شناسی و بیوژئوشیمی (بایومارکرها، ایزوتوپ‌ها و عناصر) بر روی یک مغزه رسوبی دو و نیم متری در جنوب خاور ایران پرداخته شده است. مغزه رسوبی بازه زمانی از ۴۰۱۱ تا ۸۵۴ سال پیش از حاضر را پوشش می‌دهد. در حدود ۳۹۵۰ سال پیش از حاضر شرایط مرطوب بر حیرفت حاکم بوده است. بین حدود ۳۹۰۰ تا ۳۲۹۳ سال پیش از حاضر، آب‌وهوای نیمه مرطوب غالب بوده است. به نظر می‌رسد در حدود ۳۲۹۳ تا ۲۸۹۷ سال پیش از حاضر شرایط خشک و گردوغباری بر حیرفت حاکم بوده است. نتایج، شرایط بسیار خشک همراه با افزایش قابل توجه میزان گردوغبار را در حدود ۳۲۰۰ سال پیش از حاضر نشان می‌دهد. پس از این دوره خشک، یک دوره طولانی مرطوب از حدود ۲۸۹۷ تا ۲۳۰۲ سال پیش از حاضر قابل تشخیص است. مجدداً نتایج حاکی از افزایش فعالیت بادی و شرایط خشک بین ۲۱۰۰ و ۱۶۵۰ سال پیش از حاضر در منطقه می‌باشد. دره حیرفت بین ۱۵۴۰ تا ۱۳۱۵ سال پیش از حاضر، شرایط مرطوبی را تجربه کرده است. به نظر می‌رسد با کاهش نسبی بارش‌ها، آب و هوای

## References

- Akbari Azirani, T., 2022. Detection and trend analysis of drought in the Jazmurian basin of Iran associated with ocean- atmospheric indices. *Clim. Chang. Res.* 3, 1–16. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.359615.1091>.
- Allan, J., and Douglas, A.G., 1977. Variations in the content and distribution of n-alkanes in a series of Carboniferous vitrinites and sporinites of bituminous rank. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 1223–1230.
- Blaauw, M., and Andrés Christen, J., 2011. Flexible Paleoclimate Age-Depth Models Using an Autoregressive Gamma Process, Bayesian Analysis. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>.
- Blumler, M., 2005. Three Conflated Definitions of Mediterranean Climates. *Middle States Geogr.* 38.
- Bourbonniere, R.A., and Meyers, P.A., 1996. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie. *Limnol. Oceanogr.* 41. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.2.0352>.
- Calvert, S.E., and Fontugne, M.R., 2001. On the late Pleistocene-Holocene sapropel record of climatic and oceanographic variability in the eastern Mediterranean. *Paleoceanography* 16, 78–94.
- Chen, F., Yu, Z., Yang, M., Ito, E., Wang, S., Madsen, D.B., Huang, X., Zhao, Y., Sato, T., John, H., Boomer, I., Chen, J., An, C., and Wünnemann, B., 2008. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat. Sci. Rev.* 27. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.017>.
- Cranwell, P.A., 1974. Monocarboxylic acids in lake sediments: Indicators, derived from terrestrial and aquatic biota, of paleoenvironmental trophic levels. *Chem. Geol.* 14. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(74\)90092-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(74)90092-8).
- Cranwell, P.A., Eglinton, G., and Robinson, N., 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments-II. *Org. Geochem.* 11, 513–527.
- Dearing, J., 1994. Environmental magnetic susceptibility. Using Barting. MS2 Syst. Kenilworth, Chi Publ.
- Djamali, M., Akhiani, H., Andrieu-Ponel, V., Braconnot, P., Brewer, S., de Beaulieu, Jacques-L., Fleitmann, D., Fleury, J., Gasse, F., Guibal, F., Jackson, S., Lezine, A.-M., Médail, F., Ponel, P., Roberts, N., and Stevens, L., 2010a. Indian Summer Monsoon variations could have affected the early-Holocene woodland expansion in the Near East, The Holocene. <https://doi.org/10.1177/0959683610362813>.
- Djamali, M., Beaulieu, J. de, and Shah-hosseini, M., 2008. A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia, NW Iran. *Quaternary*.
- Djamali, M., Miller, N.F., Ramezani, E., Andrieu-Ponel, V., de Beaulieu, J.-L., Berberian, M., Guibal, F., Lahijani, H., Lak, R., and Ponel, P., 2010b. Notes on Arboricultural and Agricultural Practices in Ancient Iran based on New Pollen Evidence. *Paléorient* 36. <https://doi.org/10.3406/paleo.2010.5394>.
- Eglinton, G., and Hamilton, R.J., 1967. Leaf epicuticular waxes. *Science* (80- ). 156. <https://doi.org/10.1126/science.156.3780.1322>.
- Enzel, Y., Ely, L.L., Mishra, S., Ramesh, R., Amit, R., Lazar, B., Rajaguru, S.N., Baker, V.R., and Sandler, A., 1999. High-resolution holocene environmental changes in the Thar Desert, northwestern India. *Science* (80- ). 284, 125 LP – 128.

- Fallah, B., Sodoudi, S., Russo, E., Kirchner, I., and Cubasch, U., 2017. Towards modeling the regional rainfall changes over Iran due to the climate forcing of the past 6000 years. *Quat. Int.* 429. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.061>.
- Ficken, K.J., Li, B., Swain, D.L., and Eglinton, G., 2000. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes, in: *Organic Geochemistry*. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00081-4).
- Fiorentino, G., Caracuta, V., Calcagnile, L., D'Elia, M., Matthiae, P., Mavelli, F., and Quarta, G., 2008. Third millennium B.C. climate change in Syria highlighted by Carbon stable isotope analysis of  $^{14}\text{C}$ -AMS dated plant remains from Ebla. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 266. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.03.034>.
- Fouache, E., Garçon, D., Rousset, D., Sénéchal, G., and Madjidzadeh, Y., 2005. La vallée de l'Halil Roud (région de Jiroft, Iran) : étude géoarchéologique, méthodologie et résultats préliminaires. *Paléorient* 31. <https://doi.org/10.3406/paleo.2005.5128>.
- Goslar, T., and Czemik, J., 2000. Sample preparation in the Gliwice Radiocarbon Laboratory for ams  $^{14}\text{C}$  dating. *Geochronometria* Vol. 18, 1–8.
- Griffiths, H., Schwalb, A., and Stevens, L., 2001. Environmental change in southwestern Iran: the Holocene ostracod fauna of Lake Mirabad. *The Holocene*.
- Grousset, F., Buatmenard, P., Boust, D., Tian, R.C., Baudel, S., Pujol, C., and Vergnaudgrazzini, C., 1989. Temporal changes of aeolian Saharan input in the Cape Verde abyssal-plain since the last glacial period. *Oceanol. acta* 12, 177–185.
- Gurjazkaite, K., Routh, J., Djamali, M., Vaezi, A., Poher, Y., Beni, A.N., Tavakoli, V., and Kylin, H., 2018. Vegetation history and human-environment interactions through the late Holocene in Konar Sandal, SE Iran. *Quat. Sci. Rev.* 194. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.06.026>.
- Hedges, J.I., and Stern, J.H., 1984. Carbon and nitrogen determinations of carbonate-containing solids1. *Limnol. Oceanogr.* 29, 657–663. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.3.0657>.
- Hodell, D.A., and Schelske, C.L., 1998. Production, sedimentation, and isotopic composition of organic matter in Lake Ontario. *Limnol. Oceanogr.* 43, 200–214. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.2.0200>.
- Jiang, H., and Ding, Z., 2010. Eolian grain-size signature of the Sikouzi lacustrine sediments (Chinese Loess Plateau): Implications for Neogene evolution of the East Asian winter monsoon. *GSA Bull.* 122, 843–854.
- Joy Kagan, E., Langgut, D., Boaretto, E., Herald Neumann, F., and Stein, M., 2015. Dead Sea Levels during the Bronze and Iron Ages. *Radiocarbon* 57. [https://doi.org/10.2458/azu\\_rc.57.18560](https://doi.org/10.2458/azu_rc.57.18560).
- Kehl, M., 2009. Quaternary Climate Change in Iran—the State of Knowledge, *Erdkunde*. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.01.01>.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., and Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschrift* 15. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- Kuzucuoğlu, C., Dörfler, W., Kunesch, S., and Goupille, F., 2011. Mid- to late-Holocene climate change in central Turkey: The tecer lake record. *Holocene* 21. <https://doi.org/10.1177/0959683610384163>.
- Lemcke, G., and Sturm, M., 1997.  $\delta^{18}\text{O}$  and Trace Element Measurements as Proxy for the Reconstruction of Climate Changes at Lake Van (Turkey): Preliminary Results, in: Dalfes, H.N., Kukla, G., Weiss, H. (Eds.), *Third Millennium BC Climate Change and Old World Collapse*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 653–678. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60616-8\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60616-8_29).
- Magyari, E.K., Veres, D., Wennrich, V., Wagner, B., Braun, M., Jakab, G., Karátson, D., Pál, Z., Ferenczy, G., St-Onge, G., Rethemeyer, J., Francois, J.P., von Reumont, F., and Schäbitz, F., 2014. Vegetation and environmental responses to climate forcing during the Last Glacial Maximum and deglaciation in the East Carpathians: Attenuated response to maximum cooling and increased biomass burning. *Quat. Sci. Rev.* 106. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.015>.
- Maher, B.A., Thompson, R., and Zhou, L.P., 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach. *Earth Planet. Sci. Lett.* 125, 461–471. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90232-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90232-1).
- Martinez-Ruiz, F., Kastner, M., Gallego-Torres, D., Rodrigo-Gámiz, M., Nieto-Moreno, V., and Ortega-Huertas, M., 2015. Paleoclimate and paleoceanography over the past 20,000 yr in the Mediterranean Sea Basins as indicated by sediment elemental proxies. *Quat. Sci. Rev.* 107, 25–46.
- Mashkour, M., Tengberg, M., Shirazi, Z., and Madjidzadeh, Y., 2013. Bio-archaeological studies at Konar Sandal, Halil Rud basin, southeastern Iran. *Environ. Archaeol.* 18, 222–246.
- Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Twickler, M.S., Whitlow, S., Yang, Q., Lyons, W.B., and Prentice, M., 1997. Major features and forcing of high-latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000-year-long glaciochemical series. *J. Geophys. Res. Ocean.* 102, 26345–26366.

- Melillo, J.M., Aber, J.D., Linkins, A.E., Ricca, A., Fry, B., and Nadelhoffer, K.J., 1989. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: plant litter to soil organic matter. *Plant Soil* 115, 189–198.
- Mercone, D., Thomson, J., Abu-Zied, R.H., Croudace, I.W., and Rohling, E.J., 2001. High-resolution geochemical and micropalaeontological profiling of the most recent eastern Mediterranean sapropel. *Mar. Geol.* 177, 25–44.
- Meyers, P.A., 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Org. Geochem.* 34, 261–289. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00168-7).
- Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Org. Geochem.* 27, 213–250. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00049-1).
- Meyers, P.A., and Ishiwatari, R., 1993. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* 20, 867–900. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90100-P](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90100-P).
- Meyers, P.A., and Teranes, J.L., 2001. Sediment Organic Matter, in: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Geochemical Methods*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 239–269. [https://doi.org/10.1007/0-306-47670-3\\_9](https://doi.org/10.1007/0-306-47670-3_9).
- Migowski, C., Stein, M., Prasad, S., Negendank, J.F.W., and Agnon, A., 2006. Holocene climate variability and cultural evolution in the Near East from the Dead Sea sedimentary record. *Quat. Res.* 66. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.06.010>.
- Neumann, F.H., Kagan, E.J., Schwab, M.J., and Stein, M., 2007. Palynology, sedimentology and palaeoecology of the late Holocene Dead Sea. *Quat. Sci. Rev.* 26. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.03.004>.
- Nicoll, K., and Küçükuysal, C., 2013. Emerging multi-proxy records of Late Quaternary Palaeoclimate dynamics in Turkey and the surrounding region. *Turkish J. Earth.*
- Ocakoğlu, F., Dönmez, E.O., Akbulut, A., Tunoğlu, C., Kır, O., Açıkalın, S., Erayık, C., Yılmaz, İ.Ö., and Leroy, S.A.G., 2016. A 2800-year multi-proxy sedimentary record of climate change from Lake Çubuk (Göynük, Bolu, NW Anatolia). *The Holocene* 26, 205–221.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., Van Der Plicht, J., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., and Talamo, S., 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>.
- Roberts, N., Jones, M.D., Benkaddour, A., Eastwood, W.J., Filippi, M.L., Frogley, M.R., Lamb, H.F., Leng, M.J., Reed, J.M., Stein, M., 2008. Stable isotope records of Late Quaternary climate and hydrology from Mediterranean lakes: the ISOMED synthesis. *Quat. Sci. Rev.* 27, 2426–2441.
- Roberts, N., Reed, J.M., Leng, M.J., Kuzucuoğlu, C., Fontugne, M., Bertaux, J., Woldring, H., Bottema, S., Black, S., Hunt, E., and Karabiyikoğlu, M., 2001. The tempo of Holocene climatic change in the eastern Mediterranean region: New high-resolution crater-lake sediment data from central Turkey. *Holocene* 11. <https://doi.org/10.1191/09596830195744>.
- Robinson, S.G., 1986. The late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Inter.* 42. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(86\)80006-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(86)80006-1).
- Sarnthein, M., Thiede, J., Pflaumann, U., Erlenkeuser, H., Fütterer, D., Koopmann, B., Lange, H., and Seibold, E., 1982. Atmospheric and oceanic circulation patterns off Northwest Africa during the past 25 million years, in: *Geology of the Northwest African Continental Margin*. Springer, pp. 545–604.
- Schilman, B., Bar-Matthews, M., Almogi-Labin, A., and Luz, B., 2001. Global climate instability reflected by Eastern Mediterranean marine records during the late Holocene. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 176. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00336-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00336-4).
- Schwark, L., Zink, K., and Lechterbeck, J., 2002. Reconstruction of postglacial to early Holocene vegetation history in terrestrial Central Europe via cuticular lipid biomarkers and pollen records from lake sediments. *Geology* 30. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0463:RO PTEH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0463:RO PTEH>2.0.CO;2).
- Sharifi, A., Pourmand, A., Canuel, E.A., Ferer-Tyler, E., Peterson, L.C., Aichner, B., Feakins, S.J., Daryaei, T., Djamali, M., Beni, A.N., Lahijani, H.A.K., and Swart, P.K., 2015. Abrupt climate variability since the last deglaciation based on a high-resolution, multi-proxy peat record from NW Iran: The hand that rocked the Cradle of Civilization? *Quat. Sci. Rev.* 123, 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.006>.

- Sinha, R., Smykatz-Kloss, W., Stüben, D., Harrison, S.P., Berner, Z., and Kramar, U., 2006. Late Quaternary palaeoclimatic reconstruction from the lacustrine sediments of the Sambhar playa core, Thar Desert margin, India. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 233, 252–270. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.09.012>.
- Stevens, L.R., Ito, E., Schwalb, A., and Wright, H.E., 2006. Timing of atmospheric precipitation in the Zagros Mountains inferred from a multi-proxy record from Lake Mirabad, Iran. *Quat. Res.* 66, 494–500.
- Stevens, L.R., Ito, E., and Wright, H.E., 2008. Variations in effective moisture at Lake Zeribar, Iran during the last glacial period and Holocene, inferred from the  $d^{18}O$  values of authigenic calcite, *Diatom Monographs*, 8. p. 377.
- Stevens, L.R., Wright, H.E., and Ito, E., 2001. Proposed changes in seasonality of climate during the Lateglacial and Holocene at Lake Zeribar, Iran. *The Holocene* 11, 747–755.
- Talbot, M.R., Jensen, N.B., Lærdal, T., and Filippi, M.L., 2006. Geochemical responses to a major transgression in giant African lakes. *J. Paleolimnol.* 35, 467–489.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1985. The continental crust: its composition and evolution.
- Thompson, R., and Morton, D.J., 1979. Magnetic susceptibility and particle-size distribution in Recent sediments of the Loch Lomond drainage basin, Scotland. *J. Sediment. Res.* 49, 801 LP – 811.
- Vaezi, A., Ghazban, F., Tavakoli, V., Routh, J., Beni, A.N., Bianchi, T.S., Curtis, J.H., and Kylin, H., 2019. A Late Pleistocene-Holocene multi-proxy record of climate variability in the Jazmurian playa, southeastern Iran. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 514. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.09.026>.
- Vaezi, A., Routh, J., Djamali, M., Gurjazkaite, K., Tavakoli, V., Beni, A.N., and Roberts, P., 2022. New multi-proxy record shows potential impacts of precipitation on the rise and ebb of Bronze Age and imperial Persian societies in southeastern Iran. *Quat. Sci. Rev.* 298, 107855. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2022.107855>.
- Verheyden, S., Nader, F.H., Cheng, H.J., Edwards, L.R., and Swennen, R., 2008. Paleoclimate reconstruction in the Levant region from the geochemistry of a Holocene stalagmite from the Jeita cave, Lebanon. *Quat. Res.* 70, 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.05.004>.
- Wakeham, S.G., Peterson, M.L., Hedges, J.I., and Lee, C., 2002. Lipid biomarker fluxes in the Arabian Sea, with a comparison to the equatorial Pacific Ocean. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 49, 2265–2301.
- Wasylikowa, E.K., and Witkowski, A. (Eds.), 2008. *Diatom Monographs Vol.8 The palaeoecology of Lake Zeribar and surrounding areas , Western Iran , during the last 48000 years.* A.R.G.Gantner Verlag K.G.
- Wehausen, R., and Brumsack, H.-J., 2000. Chemical cycles in Pliocene sapropel-bearing and sapropel-barren eastern Mediterranean sediments. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 158, 325–352.
- Zandifar, S., Tavakoli, V., Vaezi, A., Naeimi, M., Naderi Beni, A., Sharifi-Yazdi, M., and Routh, J., 2022. Influence of transport mechanism on playa sequences, late Pleistocene-Holocene period in Jazmurian Playa, southeast Iran. *Arab. J. Geosci.* 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09918-2>.