

Original Research Paper

# Taphonomy of dinosaur footprints in the Shurijeh Formation (Tithonian-Neocomian), Kopet-Dagh, northeastern Iran

Nasrollah Abbassi<sup>1\*</sup>, Pouria Vaeznia<sup>2</sup>, Behzad Saeedi Razavi<sup>3</sup>, and Alireza Mohammadabadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Construction and Mining Research Group, Institute of Technology and Engineering, Standard Research Institute, Karaj, Iran

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received: 2025 August 09

Accepted: 2025 October 12

Available online: 2025 December 22

### Keywords:

Dinosaur

Footprint

Taphonomy

Cretaceous

Kopet-Dagh

Shurijeh Formation

## ABSTRACT

The Tithonian-Neocomian Shurijeh Formation was surveyed in the north of Mashhad. A set of dinosaur footprints was found in the sedimentary layer of the middle part of this formation, in a section near the Ghozlogh village on the way from Mashhad to Kalat-e Naderi. This layer has long been of interest to the authors, and in the recent studies, it was confirmed that the depression structures in the upper bedding surface were poorly preserved footprints. The footprints are the result of the herd movement of dinosaurs. At least four trackways are identified in this set of footprints, which are attributed to tetrapod dinosaurs such as sauropods. Similar to the footprints reported from Cretaceous dinosaurs in the other parts of Iran, these dinosaurs were also small in size. The fossilization process of these footprints in the warm climatic conditions of the Early Cretaceous is accompanied by the deposition of iron oxide in the form of hematite cement in the depressions of footprints.

## 1. Introduction

Discovering dinosaurs is important due to their sudden disappearance and their large sizes. Various dinosaur fossils have been found, including bones, teeth, eggs, skin impressions, gastroliths, coprolites, feeding traces, and footprints (Thulborn, 1900). Footprints are especially valuable for studying dinosaur's

paleoecology. Many dinosaur footprints have been found around the world, including in Iran since the 1950s (de Lapparent and Davoudzadeh, 1972; de Lapparent and Nowgol Sadat, 1975; Kellner et al., 2003; Abbassi and Madanipour, 2014; Abbassi et al., 2015, 2018; Xing et al., 2018; Wilmsen et al., 2022). The Kopet-Dagh

\* Corresponding author: Nasrollah Abbassi; E-mail: [abbasi@znu.ac.ir](mailto:abbasi@znu.ac.ir)

### Citation:

Abbassi, N., Vaeznia, P., Saeedi Razavi, B., and Mohammadabadi, A.R., 2025. Taphonomy of dinosaur footprints in the Shurijeh Formation (Tithonian-Neocomian), Kopet-Dagh, northeastern Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(4), 138, 117-132. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.540312.2219>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.540312.2219

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.4.7.4



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

and Zagros regions in Iran, which have extensive Mesozoic sediments, are good places to search for vertebrate fossils, but no dinosaur fossils have been reported from Zagros. The Kopet-Dagh basin has yielded fossils, including those of the skeletal body fossils of reptile *Plesiosaurus* and various dinosaur footprints. Other geological formations in the area, such as the Shurijeh Formation, are also worth for dinosaur fossils investigation.

The paper aims to introduce a new record of dinosaur footprints found in the Kopet-Dagh sedimentary basin in northeast of Iran. It also discusses the fossilization process of these footprints and examines their significance through petrological and stratigraphic observations.

## 2. Research methodology

The stratigraphic section studied in this research is located 65 km north of Mashhad, near the village of Ghozlogh, just to the Mashhad to Kalat-e Naderi road (Figure 1), the red sedimentary sequence of the Shurijeh Formation in this section is bounded by Mozdouran and Tiran Formations, making it easily identifiable in the field landscape. The sedimentary sequence of the Shurijeh Formation in this area consists mainly of sandstone and red shale, with a specific layer of dark red sandstone covering an area of approximately 17 square meters, exposed on a steep slope. This layer comprises numerous dinosaur footprints. Due to the steepness of the slope, accessing all parts of the rock directly is challenging and requires safety equipment. Nevertheless, necessary photographs were taken to document the entire surface of the rock. In the 1970s, a Yashica 2000 FX-3 super analog camera was used for photography. In recent years, Canon EOS M2 (EF-M 18–55 mm, 1:3.5–5.6) and Sony 12x DSC-H5 (zoom, 35–70 mm) digital cameras were used for photography during the last two decades (by N.A.) (Figure 2). During field surveys, one notable visual feature of interest in studying these structures was the darker color inside the depressions compared to the host rock texture. To investigate the petrological nature, 10 samples were collected from the middle part of the depressions on their surface. Five thin sections and two thin-polished sections were prepared from these samples and examined using an Olympus BX51TRF binocular polarizing microscope at the University of Zanjan. To analyze the chemical composition and ultrafine structure of these samples, four samples were studied by field emission gun scanning electron microscope (FE-SEM), model EM8000F with an EDS detector, model OXFORD XPLORE30 at the Central Laboratory of the University of Zanjan. Photoshop (Photoshop CC ver. 2018) and Adobe Illustrator (Adobe Illustrator CC ver. 2019) software were employed to process the photos and images. Traditional methods (such as Leonardi, 1987) were used to measure the footprint geometry and dimensions. Due to the quality of footprint

preservation, only the footprint length (FL), width (FW), and the trackway outer width (OW) were utilized.

## 3. Results

The layer discussed is 30 cm thick and has an uneven upper surface marked by more than 200 depressions of varying sizes and depths. These depressions have different shapes, including round, elliptical, egg-shaped, and triangular, and some overlap while others do not. A significant feature is the dark color within the depressions, contrasting with the lighter surface of the layer. The author (N.A.) has been questioning whether these are animal footprints or merely non-biological depressions. The irregular arrangement and poor preservation have made it challenging to identify them as footprints.

With the advancement of artificial intelligence (AI), attempts were made to analyze the depressions to determine their nature. Unfortunately, the AI systems produced nonsensical images, making it difficult to establish order among the depressions. Despite this, by referencing photographs and manually modeling the relationships between depressions, the author reconstructed at least four trackways, suggesting the depressions likely belong to dinosaur tracks based on their repetitive patterns and arrangement. The examination of the prospective footprints revealed four distinct tracks. The first track features pairs spaced about half a meter apart, with sizes varying from 10 to 20 centimeters. The second track consists of three to four elliptical tracks, repeated at around one meter apart. The third path is characterized by pairs of tracks in a narrow arrangement with the front track being larger. The fourth track includes five pairs of smaller, round tracks, with some having single tracks at the ends. However, determining the direction of movement is impossible due to the lack of defining features.

The fossilization process of footprints, known as taphonomy, is important for studying these fossils from their creation to discovery. Footprints stay where they were made, helping to reconstruct past environmental conditions. Several factors affect the quality of fossilization, including sediment size, water content, sediment plasticity, the animal's characteristics, trampling, and burial speed, along with post-burial processes like cementation and tectonic changes.

The study examined the dark color of footprints compared to the surrounding rock and questioned why the inside is darker. In a continental setting, red layers are linked to iron oxide and diagenetic processes (Walker, 1976; Amini, 2001). Footprint samples showed specific sediment characteristics and minerals like hematite, chalcopyrite, magnetite, and goethite, which contribute to understanding the fossilization and paleoecological context.

## 4. Discussions

The fossilization process of footprints, known as ichnotaphonomy,

is an important study in ichnology of the vertebrate's footprint. It includes everything from when a footprint is made to its discovery. Footprints are valuable because they stay in one place, helping to understand the ancient environmental conditions of a location.

Many factors affect the fossilization quality, such as sediment size, water content, and animal characteristics. After burial, processes like cementation can also impact quality. Post-exposure erosion can further influence preservation. The study examined why the inside of the footprints is darker than the surrounding rock and noted that dark coloration in continental environments is linked to certain iron oxides. Samples from the footprint site showed unique features, like imbricated sandstone and traces of bioturbation, which provide insights into paleoecological conditions.

The Shurijeh Formation is a geological unit shaped by the Late Cimmerian process and formed in dry land conditions. It shares similarities with some rock units in the other parts of Iran, having been created during sea level fall and continental environment developed. This formation was deposited in three stages. The lower part indicates a sudden deposition of sediments in the form of longitudinal dams, which were influenced by the movement of transverse dams in braided river channels, leading to fine-grained sand deposits. The middle part reflects depositions in the river's distal areas, often leaving behind fine sediments after floods. The upper part was formed under fully meandering rivers in mostly dry conditions, with few plant fossils found.

The Cretaceous period had higher levels of atmospheric CO<sub>2</sub> than earlier periods, resulting in increased temperature and humidity that caused extensive weathering of land. This deep weathering can be seen in the dark layers of the Shurijeh Formation, which may be due to the lateritization process. Fossil footprints in the formation can be understood better, in this context. After fine-grained sandy layers

were deposited, surface of sediments was bioturbated by dinosaur movements, and it was possible to plant debris trapping in footprint hollows. On the other hand, stagnant water in the footprints created reduction conditions, and led to the transformation of iron from Fe<sup>3+</sup> to Fe<sup>2+</sup>. The rock fragment (RF), is considered here as a main supplier of Fe<sup>3+</sup>, were likely originated from nearby igneous rocks. The formation of an iron sludge crust in the footprint pits was influenced by microbial activities, which is often found in various aquatic environments. This interaction of microorganisms and sediment led to a darker color in the crust. Overall, the sediment characteristics and biological activity during the deposition of the Shurijeh Formation contributed significantly to its current features.

## 5. Conclusion

The search for and discovery of dinosaur footprints in the Iranian Plateau can greatly aid in reconstructing its palaeobiological conditions. The sedimentary structures in the form of depressions on the upper surface of one of the beds in the middle part of this formation in the Ghozlogh section are footprints of small-bodied tetrapod dinosaurs those moved in herds and groups. At least four distinct movement paths can be identified in these footprints. However, due to the poor preservation of the footprints, it is difficult to determine the specific tetrapod dinosaur groups responsible for them. The present research indicates these footprints were made in hot, dry climatic conditions in a riverside environment. The sedimentary bed containing these footprints is primarily composed of iron oxide bearing detrital sediment. The fossilization process involved the footprints being filled with water, forming small ponds. Under anaerobic and reducing conditions, Fe<sup>3+</sup> changed to Fe<sup>2+</sup> accompanied with bacteria activities, and finally, the footprints' floor was cemented with hematite.

# تافونومی ردپای دایناسورها در سازند شوریجه (تیتونین-نئوکومین)، کپه داغ، شمال خاوری ایران

نصراله عباسی<sup>۱\*</sup>، پوریا واعظنیا<sup>۱</sup>، بهزاد سعیدی رضوی<sup>۲</sup> و علیرضا محمدآبادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> گروه پژوهشی ساختمانی و معدنی، پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

## چکیده

سازند شوریجه به سن تیتونین-نئوکومین در برش روستای قزلُق در سر راه مشهد به شهر کلات نادری، جهت بررسی امکان وجود بقایای مهره‌داران خشکی‌زی، مورد پیمایش قرار گرفت و در یکی از لایه‌های رسوبی بخش میانی این سازند، مجموعه‌ای از ردپاهای دایناسورها یافت شد. بررسی و مقایسه عکس‌های در دسترس، نشان می‌دهد که به تدریج این ردپاها در سه دهه اخیر، دچار هوازدگی و فرسایش شده‌اند. همین امر سبب حفظ‌شدگی ضعیف این ردپاها شده است. مجموعه ردپاها نشان دهنده حرکت گله‌ای دایناسورها هستند. دست‌کم ۴ مسیر حرکتی در این مجموعه ردپاها تشخیص داده شد که به دایناسورهایی چون سوروپودها نسبت داده می‌شوند. همانند ردپاهای گزارش شده از واحدهای سنگی کرتاسه سایر مناطق ایران، این دایناسورها نیز کوچک جثه بوده‌اند. عمق اندک رسوب در این ردپاها با تمرکز ترکیبات اکسید آهن به رنگ تیره است. فرایند سنگواره شدن این ردپاها در شرایط آب و هوایی گرم کرتاسه پیشین، به گونه‌ای بوده است که فقط در گودی‌های حاصل از ردپاها، رسوب‌گذاری اکسید آهن به صورت سیمان هماتیته رخ داده است. با گزارش حاضر، اطلاعات جدیدی از وجود دایناسورها در ایران به ثبت می‌رسد و این سومین گزارش از ردپای دایناسورهای کرتاسه در ایران است.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

دایناسور

ردپا

تافونومی

کرتاسه

کپه‌داغ

سازند شوریجه

## ۱- پیش‌نوشتار

۱- پیش‌نوشتار

یافتن بقایای دایناسورها برای دیرینه‌شناسان جهت بررسی و تحقیق درباره ظهور، پراکنش جغرافیایی یا انقراض این گروه از مهره‌داران، مهم است (Brusatte 2012). سنگواره‌های گوناگونی از دایناسورها به جای مانده است، که هر کدام، اهمیت خاص مطالعاتی خود را دارند. بقایای استخوان، دندان، تخم، اثر پوست بر روی رسوبات، گاسترولیت، کوپرولیت، اثر تغذیه و ردپاها از جمله سنگواره‌های دایناسورهاست (Thulborn, 1990). به غیر از استخوان و دندان که از بخش‌های سخت و در عین حال مستعد سنگواره شدن هستند، اثر ردپای این گروه از جانوران منقرض شده،

برای مطالعات دیرین‌بوم‌شناختی دایناسورها ارزشمند است. در بسیار از نقاط زمین، ردپای دایناسورها گزارش شده است و در ایران نیز از دهه ۵۰ خورشیدی، با کشف ردپای دایناسورها، وجود این جانوران در این سرزمین اثبات گردیده است (de Lapparent and Davoudzadeh, 1972; de Lapparent and Sadat, 1975; Kellner et al., 2003; Abbassi and Madanipour, 2014; Abbassi et al., 2015; Xing et al., 2018; 2018).

در میان پهنه‌های زمین‌شناختی ایران، دو پهنه کپه داغ و زاگرس، که توالی رسوبی سبتر و گسترده مزوزوییک را در خود جای داده‌اند، از مناطق مناسب برای

\* نویسنده مسئول: نصراله عباسی؛ E-mail: abbasi@znu.ac.ir

## ماخذنگاری:

عباسی، ن.، واعظنیا، پ.، سعیدی رضوی، ب. و محمدآبادی، ع. ر.، ۱۴۰۴، تافونومی ردپای دایناسورها در سازند شوریجه (تیتونین-نئوکومین)، کپه داغ، شمال خاوری ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۴): ۱۳۸-۱۱۷. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.540312.2219>

doi: 10.22071/gsj.2025.540312.2219



doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.4.7.4

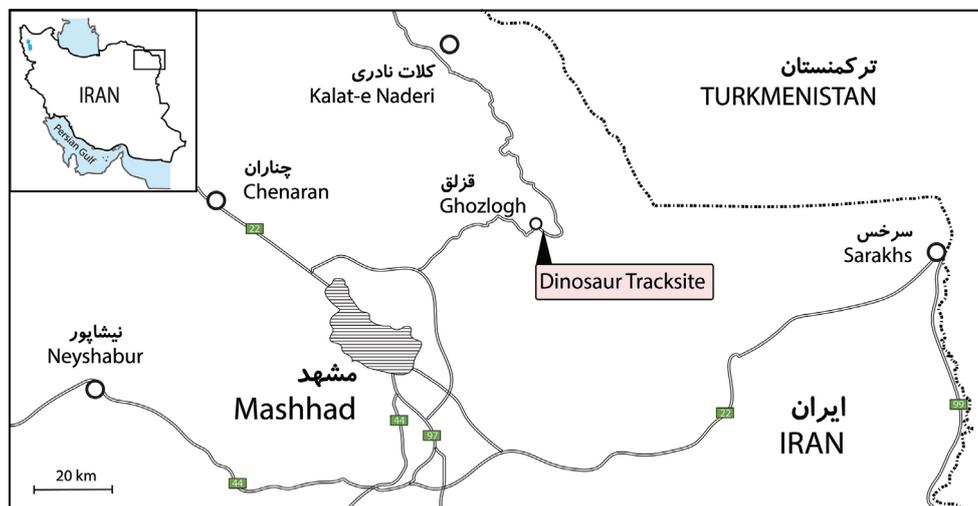
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



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

و شیل قرمز است (Afshar-Harb, 1979; Stöcklin and Setudehnia, 1991)؛ اسماعیلی خوشمردان و همکاران، ۱۴۰۴). در سه دهه اخیر، در رخنمونی از سازند شورپیجه در منطقه قزلق، در سر راه مشهد به کلات نادری، چاله‌هایی نامنظم در سطح بالایی یکی از لایه‌های آواری، مورد توجه نگارندگان بوده است (شکل ۱). با بررسی‌ها و پیمایش‌هایی که بر روی سازند شورپیجه در این برش انجام پذیرفت، داده‌ها و اطلاعات کافی سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی به دست آمد و در نهایت مشخص شد که این ساخت‌ها، در واقع همان ردپاهای دایناسورها می‌باشند. از سوی دیگر، با وجود تصاویر و عکس‌های موجود از سه دهه اخیر، امکان مقایسه تغییرات در اثر فرایندهای هوازدگی و فرسایش فراهم شد. هدف از ارائه این مقاله، معرفی یک ثبت جدید از ردپای دایناسورها در فلات ایران و در حوضه رسوبی کپه داغ در شمال خاوری ایران است و همچنین فرایند سنگواره شدن این ردپاها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

جستجوی بقایای مهره‌داران می‌باشند. در حوضه رسوبی کپه داغ، سنگواره استخوان شانه خزننده دریایی پلزیوزوروس (Plesiosaurus) از سازند آیتامیر (آپسین-آلبین پیشین) (موسوی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۳) و همچنین سنگواره‌ها و رد پای دایناسورهای کوچک پیکر سوروپود، اورنیتوپود و استیگوسوروس (Stegosaurus) از سازند تیرگان (نئوکومین-آپتین) (Abbassi et al., 2018)، گزارش گردیده است. با وجود واحدهای سنگی چون سازند قره قیطان (تریاس پیشین) (Baud and Stampfli, 1989; Ruttner, 1993)، رخساره‌های قاره‌ای سازند کشف رود (بازوسین-باتونین) (Taheri et al., 2009)، گروه شمشک (ژوراسیک پیشین-میانی) و سازند شورپیجه (تیتونین-نئوکومین) (Moussavi-Harami and Brenner, 1993)؛ که خاستگاه شناخته شده قاره‌ای دارند، ارزش شناسایی و پی‌جویی برای یافتن سنگواره دایناسورها در پهنه کپه داغ را دو چندان می‌کنند (Afshar-Harb, 1979). سازند شورپیجه در یک محیط قاره‌ای ته‌نشست شده است و مرکب از توالی کنگلومرا، ماسه‌سنگ

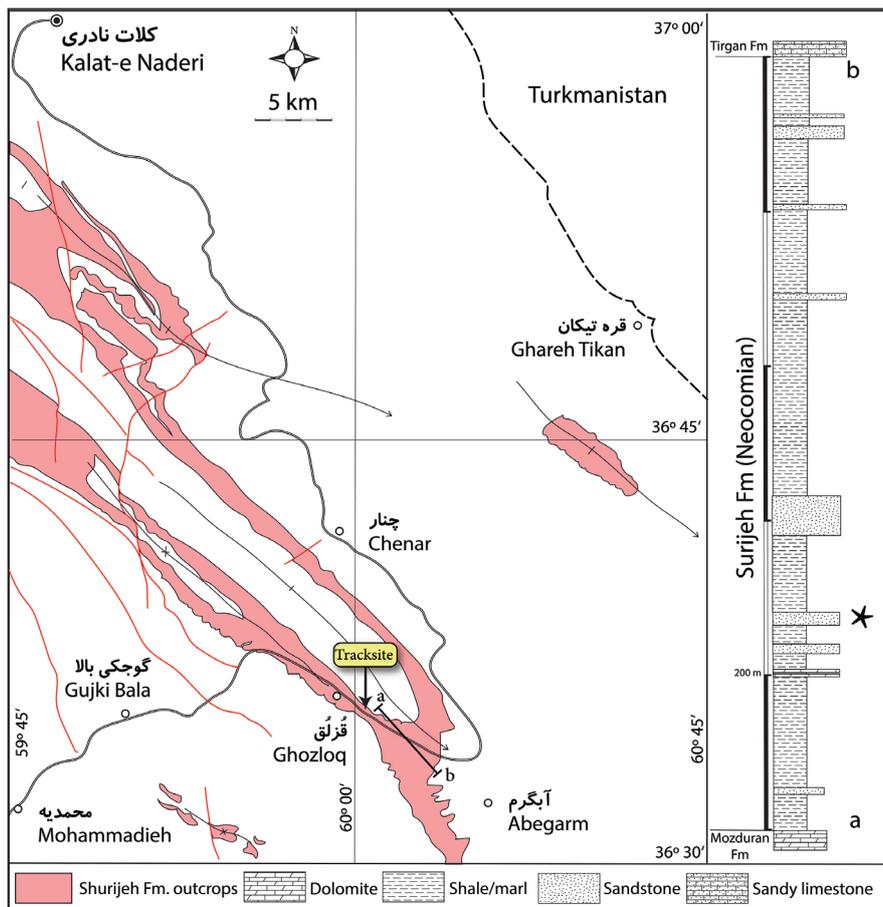


شکل ۱- نقشه راه‌های دسترسی در منطقه شمال خاوری ایران و موقعیت ردپاهای مورد مطالعه در شمال مشهد.

Figure 1. Map of Ghozlogh dinosaur tracksite in northeast Mashhad, NE Iran.

است. سازند شورپیجه در گستره‌ی خود، به طور هم شیب بر روی سازند مزدوران و در زیر سازند تیرگان، جای دارد. در واحدهای کربناته میانی این سازند مجموعه‌ای از ریزسنگواره‌هایی به سن نئوکومین تا بارمین گزارش شده است و در مناطق باختری کپه داغ، سن قاعده این سازند به تیتونین نیز می‌رسد (Afshar-Harb 1979). برش چینه‌شناسی مورد مطالعه، بعد از روستای گوگچی بالا و در حدود ۲۰۰ متری خاور پل روستای قزلق، و به سبب برای تقریبی ۹۸۰ متر قرار دارد (شکل ۲). مرز زیرین آن هم شیب بر روی سازند مزدوران است. در اینجا، سازند شورپیجه در ابتدا با توالی شیل‌های یکنواخت سرخ با میان لایه‌های نازک گچ شروع می‌شود. در ادامه توالی، ماسه‌سنگ قرمز و ارغوانی و شیل قرمز واحدهای سنگی آن را می‌سازند. دو لایه کربناته‌ی سفید رنگ در تناوب با لایه‌های شیل قرمز، واحدهای سنگی بعدی آن هستند. سپس لایه‌های آواری دانه درشت و شیل به رنگ قرمز، تشکیل دهنده‌ی این سازند هستند. لایه مورد نظر که ردپای دایناسور در آن است، حدود ۱۰۰ متر بالاتر از آخرین لایه کربناته یاد شده، قرار دارد.

برش الگوی سازند شورپیجه، در حوضه کپه داغ به سن تیتونین-نئوکومین است و در منطقه خور، در خاور دره قزلق در شمال مشهد، معرفی شده است (Afshar-Harb, 1979) (شکل ۲). این سازند، در بخش‌های خاوری کپه داغ یعنی حدفاصل مشهد تا کلات نادری بیشترین ستبرایا دارد که در حدود ۱۰۰۰ متر است. به سوی باختر، یعنی در منطقه جاجرم، کمترین ستبرایا داشته و در حدود ۱۰۰ متر می‌باشد. همین کاهش ستبرایا سازند در منطقه سرخس واقع در خاور کپه داغ نیز دیده می‌شود. بخش زیرین این سازند در برش الگو، شامل لایه‌های ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ، با میان لایه‌های ژپیس است. در بخش میانی آن، توالی سنگ آهک الیتی فسیل‌دار و دولومیت با لایه‌های آواری وجود دارند و بالاخره در بخش‌های بالایی، تناوب شیل‌های قرمز رنگ، ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ این سازند را تشکیل می‌دهند (شکل ۲). با این وجود، در بخش‌های حاشیه‌ای و کناری حوضه رسوبی، سنگ‌های آواری دانه درشت و کنگلومرا، واحدهای سنگی این سازند را تشکیل می‌دهند و در مناطقی چون زنگانلو، ستبرایا لایه‌های گچی در این سازند، قابل توجه



شکل ۲- رخنمون سازند شوریهجه در منطقه کلات نادری و ستون چینه‌نگاری این سازند در برش قزلوق (a-b). موقعیت ردپای دایناسورها در ستون چینه‌شناسی با علامت \* نشان داده شده است (نقشه مینا بر اساس روشن‌روان (Rowshanvaran, 2010) و نبویه (Nabavieh, 1998)).

Figure 2. Outcrops of Shurijeh Formation in the Kalat-e Naderi area, with location of studied section (a-b) and position of dinosaur tracks in the stratigraphic column (\*) (base maps by Nabavieh (1998) and Rowshanvaran (2010)).

## ۲- روش پژوهش

ردپاها، به‌ویژه ردپاهایی به رنگ تیره‌تر بودند، برداشت گردید. از این نمونه‌ها، ۵ مقطع نازک و ۲ مقطع نازک-صیقلی تهیه شد و با میکروسکوپ پلاریزان دو چشمی الپوس مدل BX51TRF در دانشگاه زنجان، مورد مطالعه قرار گرفتند. برای تعیین درصد فراوانی کانی‌ها و ذرات رسوبی یا کانه‌ها در دو نور انعکاسی و انعکاسی از روش نورم و شمارش ذرات در میدان دید، استفاده شد. برای بررسی ترکیب شیمیایی و ساختار بسیار ریز در این نمونه‌ها، ۴ نمونه با استفاده از دستگاه FE-SEM مدل EM8000F ساخت شرکت KYKY با آشکارساز EDS مدل OXFORD XPLOR30 در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه زنجان مورد مطالعه قرار گرفتند. برای پردازش عکس‌ها و تصاویر از نرم‌افزارهای فتوشاپ (Photoshop CC ver. 2018) و ادوب‌الستریتور (Adobe Illustrator CC ver. 2019) استفاده شد. جهت ژئومتری ردپا و اندازه‌گیری ابعاد آن‌ها، از روش‌های متداول (مانند Leonardi, 1987) استفاده گردید که به طور مستقیم در صحرا یا از روی عکس‌های گرفته شده، اندازه‌گیری انجام گرفت. با توجه به کیفیت حفظ‌شدگی ردپاها، تنها به دراز و پهنای ردپاها (footprints length, FL and width, FW) و پهنای بیرونی مسیر حرکت (trackway outer width, OW) پسنده شد.

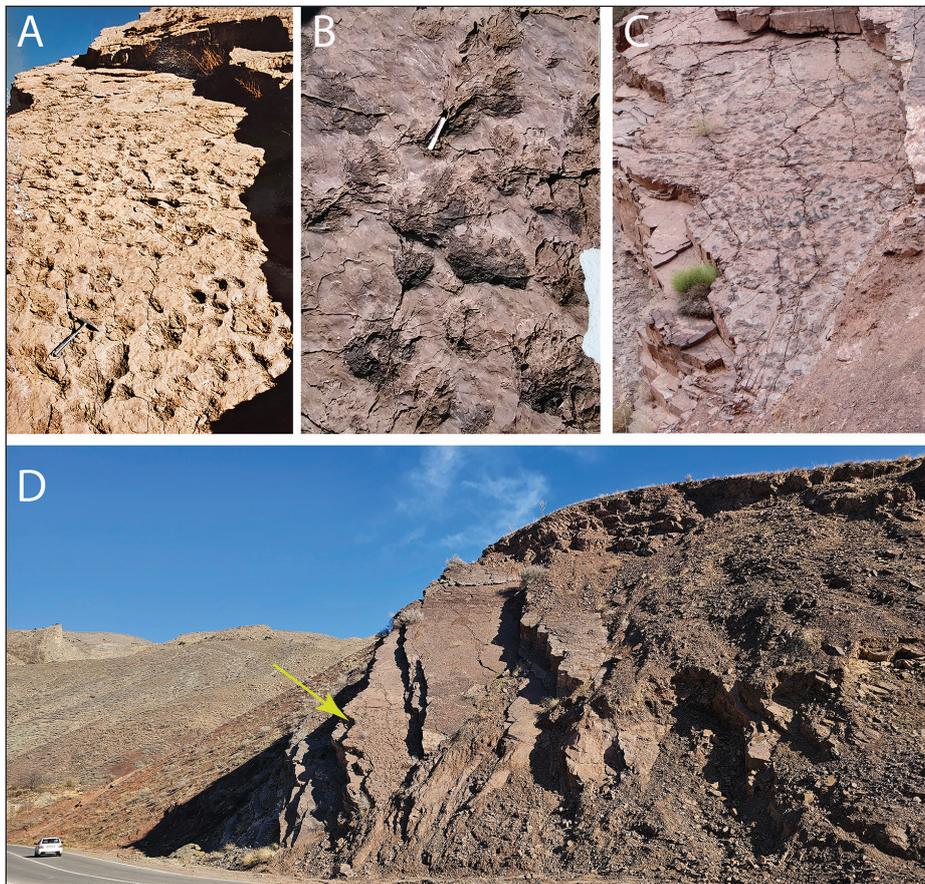
برش چینه‌نگاری مورد مطالعه در این پژوهش، در ۶۵ کیلومتری شمال مشهد و در کنار روستای قزلوق و در سرراه جاده مشهد به کلات نادری واقع است (شکل ۱). در این برش، توالی رسوبی قرمز رنگ سازند شوریهجه، در میان دو سازند مزدوران در زیر و تیرگان در بالا جای دارد که در صحرا، به خوبی قابل تشخیص است. توالی رسوبی سازند شوریهجه در این منطقه، بیشتر از جنس ماسه‌سنگ و شیل قرمز می باشد و لایه مورد نظر از ماسه سنگ به رنگ قرمز تیره که در یک دامنه پر شیب برون‌زد دارد. مساحت سطح لایه دارای ردپا ۱۷ مترمربع است. به دلیل شیب زیاد، دسترسی مستقیم به همه بخش‌های تخته‌سنگ امکان‌پذیر نیست و نیاز به تجهیزات ایمنی دارد. با این حال، برای برداشت کامل از همه سطح سنگ، عکس‌برداری‌های لازم، انجام پذیرفت. در دهه هفتاد، از دوربین آنالوگ و در سال‌های اخیر، از دوربین‌های دیجیتال برای عکس‌برداری استفاده شد (شکل ۲). بررسی این عکس‌ها امکان مقایسه تغییرات سطح لایه بر اثر عوامل هوازدگی را فراهم می‌نماید. در برداشت‌های صحرائی، یکی از ویژگی‌های ظاهری مورد توجه در این ساخت‌ها، وجود رنگ تیره‌تر در درون فرورفتگی‌ها، نسبت به متن سنگ میزبان بود. جهت بررسی ماهیت سنگ‌شناسی، ۱۰ نمونه از بخش میانی فرورفتگی‌های حاصل از

### ۳- داده‌ها و اطلاعات

#### ۳-۱- ساخت غیرزیستی، یا ردپا

نیز یکسان نیست و به صورت کاملاً گرد، بیضوی، تخم‌مرغی شکل، سه گوشه مانند، دیده می‌شوند. برخی از گودی‌ها مجزا هستند و برخی با تماس با همدیگر، یا با هم‌پوشانی و روی هم افتادگی، هستند. لبه گودی‌ها در تماس با سطح بالایی رسوب مشخص، یا با خمیدگی ملایم است. آن چه که در همه این فرورفتگی‌ها مشترک است، وجود رنگ تیره در گودی ردپاها نسبت به سطح لایه است. همین تفاوت رنگ سبب می‌شود که به خوبی، این فرورفتگی‌ها مشخص و قابل دیدن باشند. ماهیت این فرورفتگی‌ها، اینکه ردپای جانور هستند، یا فقط یک سری فرورفتگی و ساخت‌های غیرزیستی می‌باشند، چالش ابتدایی در بررسی این ساخت‌هاست. چراکه به دلیل تجمع و فراوانی فرورفتگی‌ها از یک سو، و نبود نظم مشخص در میان آن‌ها از سوی دیگر، تشخیص ردپا بودن آن‌ها، عملاً دشوار است.

لایه مورد نظر به ستبرای ۳۰ سانتی‌متر است که بر روی سطح بالایی آن، اثر فرورفتگی‌هایی بسیار زیادی وجود دارد. این آثار در اندازه متفاوت بوده و به طور نامنظم آرایش یافته‌اند (شکل ۳). همچنین این لایه، پر از درز و شکستگی است. در این توالی، سطوح چین‌بندی لایه‌های کناری صاف، یا با موج‌نقش (ریپل مارک)‌های جریانی است. طبق عکس‌های موجود از سه دهه پیش از سطح لایه مورد نظر (شکل ۳)، ساخت‌های فرورفته در سطح بالایی این تخته‌سنگ کم و بیش دچار فرسودگی و فرسایش شده‌اند. تعداد این فرورفتگی‌ها، به بیش از ۲۰۰ عدد می‌رسد، که اندازه آن‌ها از ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر متغیر است. میزان گودی این فرورفتگی‌ها، نیز متفاوت بوده و از کمتر از ۱ سانتی‌متر تا بیش از ۱۰ سانتی‌متر است. شکل فرورفتگی‌ها



شکل ۳- عکس‌هایی از ردپاها در سطح لایه مورد مطالعه، دید به سوی شمال است. (A-B) عکس‌برداری در سال ۱۳۷۳ با دوربین آنالوگ، (C) عکس‌برداری سال ۱۳۹۳، (D) عکس‌برداری در سال ۱۴۰۳ که محل لایه با پیکان زرد مشخص شده است و بخش‌هایی از بالای لایه دچار فرسایش شده است.

Figure 3. Photographs of footprints on the surface of the studied layer, looking north ward. A-B) Photograph taken in 1994 with an analog camera, C) Photograph taken in 2014, D) Photograph taken in 2024, where the location of the layer is indicated by a yellow arrow and parts of the top of the layer have eroded.

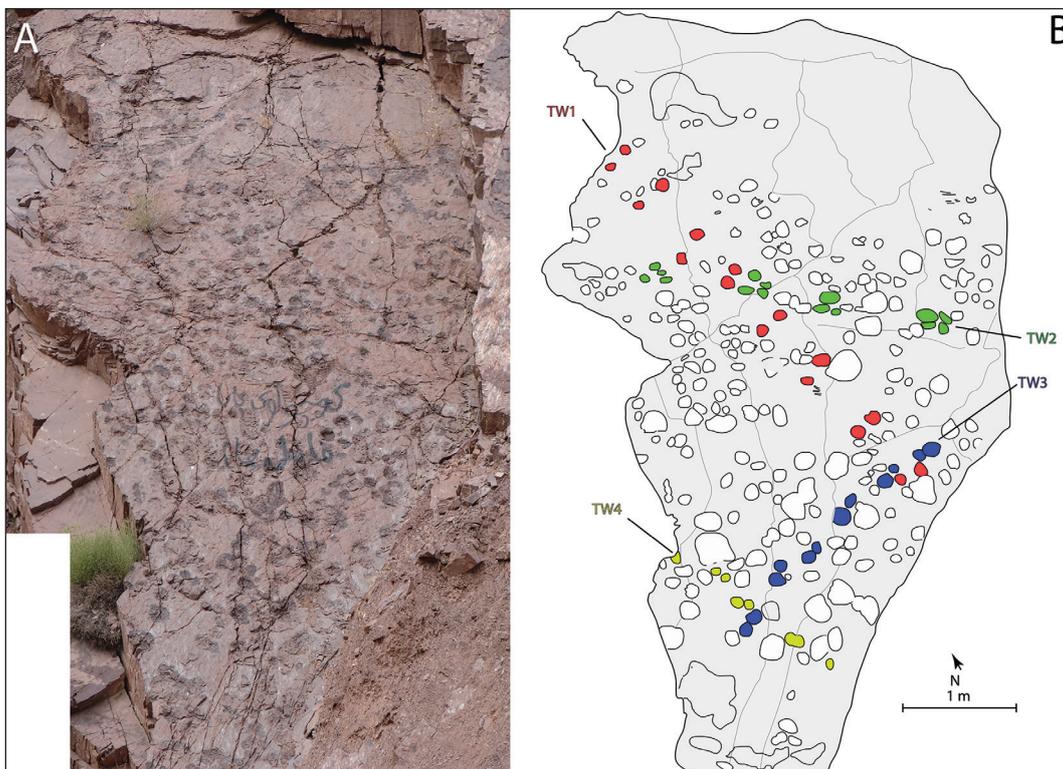
با بررسی ردپاها و توجه ویژه به اندازه و فاصله تکرار شدگی آن‌ها از همدیگر، دست کم ۴ مسیر حرکتی به شرح زیر قابل شناسایی است (شکل B-۴). اندازه ردپاها از ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر متغیر است. البته، به دلیل نبود اثر انگشتان در این ردپاها، امکان تعیین سمت و سوی حرکت، وجود ندارد:

- مسیر حرکتی شماره یک، در شکل B-۴، شامل جفت ردپاهایی است که در فاصله تقریبی نیم متری تکرار شده و از همدیگر ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر، فاصله دارند. قطر این ردپاها به طور متوسط ۱۵ سانتی‌متر است و لبه آن‌ها گرد، بیضوی یا نامنظم است. هشت جفت ردپا در این مسیر حرکتی قابل شمارش است و پهنای مسیر حرکت در حدود ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد.

- مسیر دوم شامل ۳ تا ۴ ردپاست که در فاصله‌ای در حدود ۱ متری تکرار شده‌اند. شکل ردپاها، بیضوی است که ۲ رد جلو و ۲ رد در عقب قرار دارند. ردپاهای جلویی، بزرگ‌تر هستند. فاصله هر دسته ردپا نسبت به هم اندک، و در کنار هم، قرار دارند. پهنای مسیر حرکت باریک می‌باشد.

- ردپاهای مسیر سوم، با آرایش منظمی هستند، به گونه‌ای که جفت ردپاها، پی در پی و در فاصله کم، در یک مسیر حرکتی باریک قرار دارند. ردپاها گرد بوده و رد جلویی، بزرگ‌تر از رد عقبی است. ردپاها نسبت به محور میانی مسیر حرکت به سمت داخل متمایل هستند. تعداد ۶ جفت ردپا در این مسیر قابل شمارش است. مسیر حرکت چهارم، از ۵ جفت ردپای گرد و به نسبت کوچک تشکیل شده‌اند و ردپاهای انتهایی، شامل تنها ۱ ردپاست.

به هر ترتیب، در نگاه نخست، به سختی می‌توان نظم و آرایشی در پراکنش این ردپاها را به دست آورد، چراکه حفظ شدگی آن‌ها ضعیف و تنها به صورت فرورفتگی‌هایی بی‌نظم و بدون جزئیات، مانند اثر انگشت هستند. بنابراین، یافتن نظم و تکرارپذیری ردپاها برای یک مسیر حرکتی جانور، دشوار است. با این حال، با مراجعه به تصاویر و عکس‌های در دسترس و الگوبرداری و تکرارپذیری از پراکنش تک تک فرورفتگی‌ها و ارتباط آن‌ها با همدیگر، بازسازی مسیرهای حرکتی موجود در میان ردپاها انجام پذیرفت. در این راستا، دست کم ۴ مسیر تکرارپذیر از فرورفتگی‌ها تشخیص داده شدند (شکل ۴). همین تکرارشدگی در فرورفتگی‌ها، اندازه و آرایش آن‌ها در جهت معین، تایید می‌کنند که این ساخت‌ها، ردپای جانوران می‌باشند و با توجه به سن توالی، به احتمال قریب به یقین، متعلق به ردپای دایناسورها هستند که در پی حرکت گله‌ای آن‌ها برجای مانده‌اند. لازم به یادآوری است که در ساخت‌های غیرزیستی، همانند موج‌نقش (ریپل‌مارک)‌های زبانی (linguoid) یا جارویی (swept) شکل، ممکن است بخش‌های گودی و تالوگ موج‌نقش‌ها، طبق الگوهای هندسی معین تکرار شوند که اساساً با فرورفتگی‌های مورد نظر در این مطالعه، به‌طور کامل متفاوت هستند. به همین ترتیب اثر ساخت وزنی، معمولاً به صورت برجسته در زیر یک لایه آواری مانند ماسه‌سنگ (load cast) باقی می‌ماند و کاملاً بی‌نظم و بی‌شکل می‌باشند (Collinson and Mountney, 2019). بنابراین فرورفتگی‌ها در لایه مورد نظر، مسیرهای حرکتی دایناسورهایی می‌باشند که در پی حرکت گله‌ای، برجای مانده‌اند.



شکل ۴- A) عکس لایه مورد مطالعه با انباشتی از ردپاها که به رنگ تیره باقی مانده‌اند، B) تصویر رسم شده از موقعیت ردپاها و مسیرهای حرکتی (trackway, TW1-4) در میان آن‌ها، دید به سوی شمال است.

Figure 4- A) Photograph of the studied layer with a numerous footprints left in dark color, B) Sketch of the location of the footprints and trackways (TW1-4) among them, looking north ward.

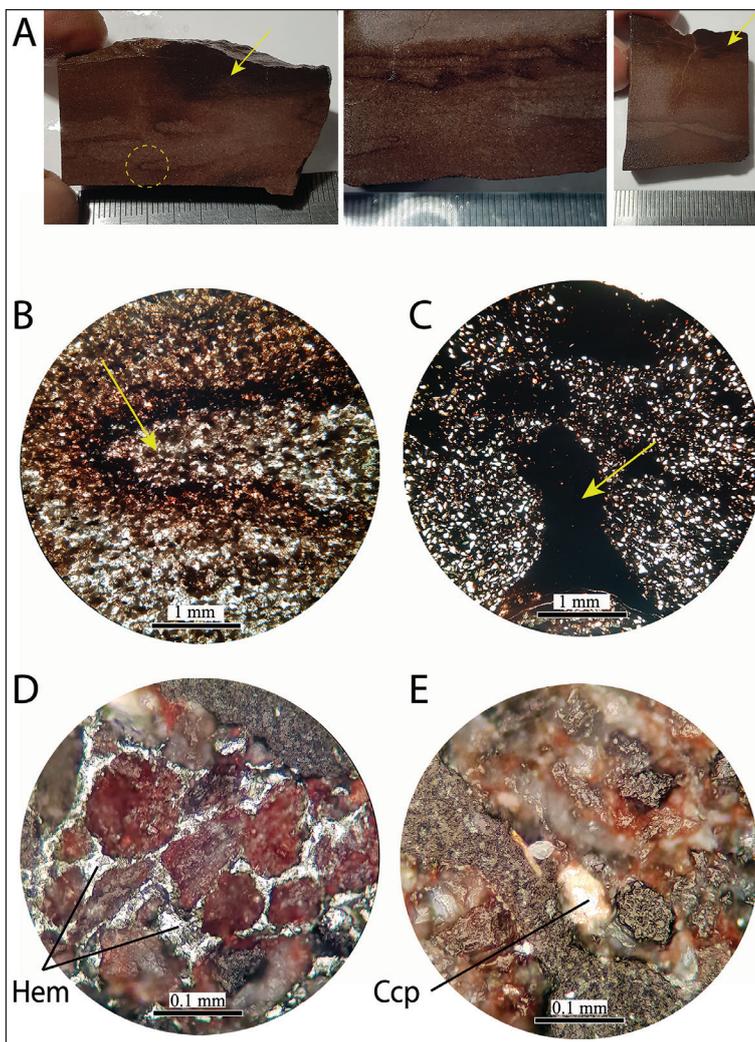
### ۳-۲- سنگواره شدن ردپاها

فرایند سنگواره شدن یا تافتونومی (Taphonomy) ردپاها از موضوعات مهم، در مطالعه این گروه از اثر فسیل هاست و از زمان ایجاد تا زمان کشف ردپا را شامل می شود (Marchetti et al., 2017). از آنجا که ردپاها، یک سنگواره برجا (in situ) هستند، یعنی در همان محل که ایجاد شده اند، باقی می ماند و در اثر جریان حمل و نقل پیدا نمی کنند، بنابراین در بازسازی شرایط دیرین بوم شناختی همان موقعیت جغرافیایی، از اهمیت ویژه ای برخوردارند.

در هنگام برجای ماندن ردپاها، عواملی چون اندازه ذرات بستر رسوبی، محتوای آب میان ذره ای رسوب و میزان شکل پذیری آن؛ ویژگی های زیستی جانور اثرگذار، مانند وزن و نوع حرکت، میزان لگدمال شدن ردپاها و سرعت دفن شدن ردها، از عوامل مهم کنترل کننده در کیفیت سنگواره شدن ردپاها می باشند. پس از دفن نیز، فرایندهای سنگ شدن لایه های رسوبی، چگونگی سنگواره شدن آن ها را تحت تاثیر قرار می دهند. پدیده هایی چون میزان سیمان شدن یا دگرریختی های ناشی از عوامل زمین ساختی بر کیفیت سنگواره شدن تاثیر می گذارند. در نهایت، پس از رخنمون یافتن، فرایندهای فرسایشی بر چگونگی حفظ شدگی آن ها موثر است. ردپاها مورد مطالعه به صورت فرورفته در سطح بالایی رسوب باقی مانده اند و در صورتی که عوامل تافتونومی به طور یکسان در سطح سنگ تاثیر گذاشته باشد و همه ردها همزمان ایجاد شده باشند، تفاوت اندازه ردپاها را می توان به تفاوت اندازه دایناسورها نسبت داد. در این مطالعه، چرایی رنگ تیره ردپاها، نسبت به سنگ میزبان، مورد توجه قرار گرفت و این پرسش مطرح گردید که چرا فقط درون گودی های حاصل از

ردپاها، تیره هستند؟ لایه هایی که در محیط قاره ای ته نشست شده اند، اساسا به دلیل اکسید آهن سه ظرفیتی، به رنگ قرمز می باشند و رنگ قرمز آن ها می تواند ناشی از فرایندهای دیاژنزی باشد (Walker, 1976; Amini, 2001; Bábek et al., 2021). ماسه سنگ های سازند شورپیچ، بیشتر از نوع ساب لیتارآنایت می باشند که در طی مرحله پس روی و در پی رسوب گذاری سریع مواد آواری، برجای مانده اند (Moussavi-Harami and Brenner, 1993).

در بررسی نمونه های برداشت شده از محل ردپاها، آثار لامیناسیون تیره غیرممتد و ناموازی، درست زیر سطح لایه بندی مشاهده شد (شکل ۵-۵A). با مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از همین محل ها، مشخص گردید که سنگ رسوبی مورد نظر از نوع ماسه سنگ ساب لیتارنایت ریز تا متوسط دانه نابالغ (Immature) با سیمان رسی-آهنی است. در مقاطع نازک، آثاری از زیست آشفتنگی بی مهره گان نیز مشاهده گردید و در جاهایی، محل حفاری بی مهره گان با رسوبات ریزدانه اکسید آهن پر شده است (شکل های ۵-۵B-C). تشخیص نوع ایکونجنس این اثر فسیل ها، به دلیل محدودیت مشاهده ساختار سه بعدی آن ها، امکان پذیر نبود. با بررسی مقاطع نازک-صیقلی مشخص شد که کانه هماتیت برخی از جاها پرکننده فضای میان ذرات به صورت سیمان است. همچنین، کانه کالکوپیریت، در مقاطع نازک-صیقلی مشاهده شد که به صورت دانه هایی ریز تا اندازه ۰/۱ میلی متر و با انعکاس رنگ زرد پررنگ و با فراوانی اندک، می باشند. کانه های مگنتیت و گوتیت نیز به مقدار اندک، در این مقاطع مشاهده شدند. نود و پنج درصد از کانه ها را هماتیت و ۵ درصد را کانه های کالکوپیریت، مگنتیت یا گوتیت می سازند (شکل های ۵-۵D-E).

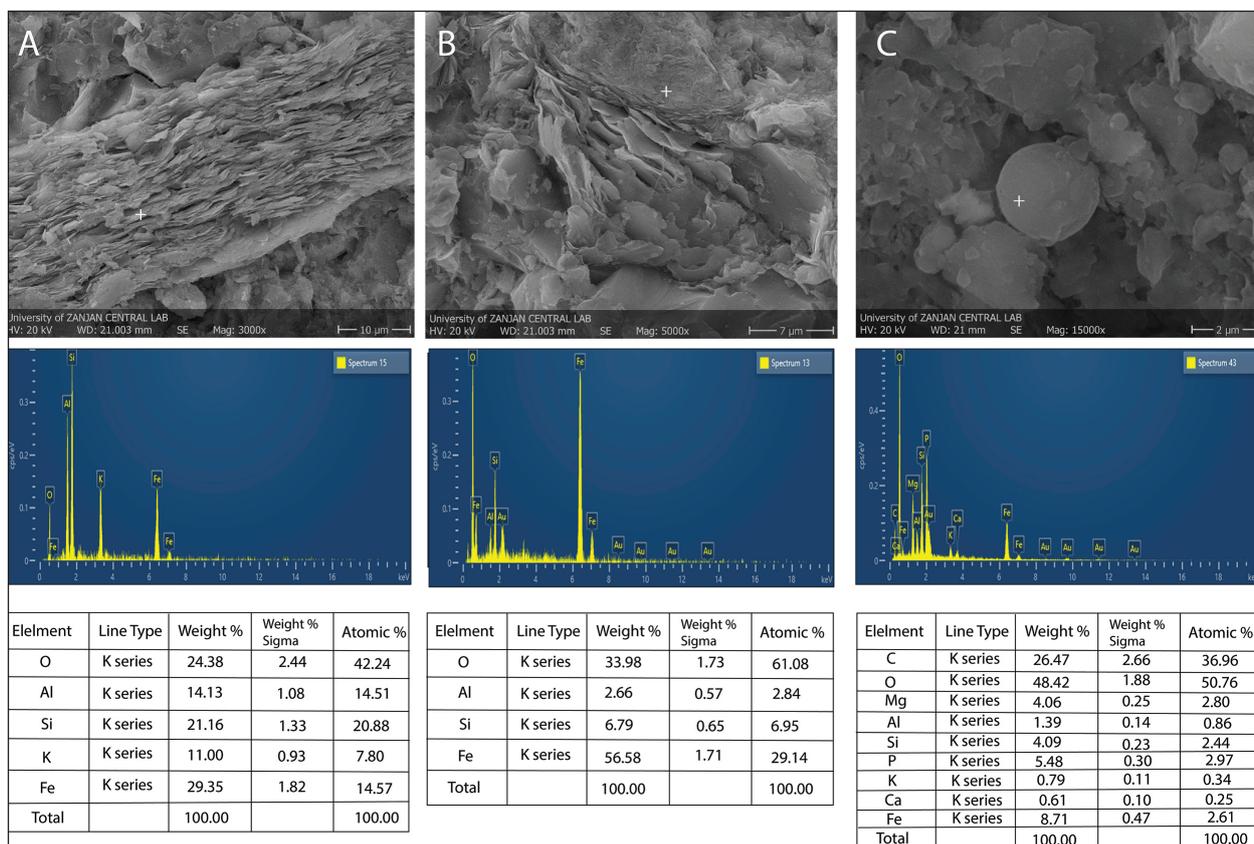


شکل ۵- تصاویر نمونه های دستی و میکروسکوپی قشر سطحی لایه دارای ردپا، (A) بخش بالایی لایه تیره رنگ و غنی از اکسید آهن (پیکان) و همراه با لامیناسیون و آثار زیست آشفتنگی بی مهرگان است (دایره خط چین محل مقطع نازک شکل B-C). تمرکز اکسید آهن که معمولا در پیرامون یا درون حفاری بی مهره گان است (پیکان)، بالای تصویر سمت بالای طبقه است. (D-E) تمرکز کانه های هماتیت (Hem) و کالکوپیریت (Ccp) به صورت سیمان یا دانه ای در مقاطع نازک-صیقلی.

Figure 5. Images of chip and microscopic samples from surface of the footprints, A) The upper part of the layer is darker and rich in iron oxide (arrow) and accompanied by lamination and traces of invertebrate bioturbation (dashed circle is the location of the thin section in Figure B). B-C) Concentration of iron oxide, usually around or within the invertebrate excavation (arrow), top of the images shows the top of the layer. D-E) Concentration of hematite (Hem) and Chalcopyrite (Ccp) minerals in cement or granular in thin-polished sections.

نمونه از این باکتری‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه در میکروسکوپ الکترونیکی مشاهده شدند. با توجه به اندازه و شکل، این باکتری‌ها به *Metallosphaera sedula* نسبت داده می‌شوند. باکتری *Metallosphaera sedula*، که از گروه آرکئاها (Archaeon) هستند، قادر به واکنش‌های شیمیولیتوتروفیک (chemolithoautotrophic) در محیط‌های احیایی بر روی ترکیبات مختلف حاوی فلز می‌باشند (Kölbl et al., 2020).

با بررسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونیکی تجمع ورقه‌های رسی در نوارهایی مشخص، یا به صورت پراکنده، کانی هماتیت و به شکل ورقه‌ای و پراکنده مشاهده شدند (شکل‌های ۶-A-B). نکته شایان توجه، وجود سنگواره باکتری‌های توپی شکل در این نمونه‌هاست (شکل‌های ۶-C-D)، که مشابه چنین باکتری‌هایی کروی شکل، در نهشته‌های بوکسیتی پرمین چین نیز گزارش شده است (Liu et al., 2017). تعداد ۴



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونیکی FE-SEM و آنالیز ترکیب شیمیایی، از باند ورقه‌های رسی (A)، هماتیت (B) و سنگواره باکتری توپی شکل *Metallosphaera sedula* (C) در نمونه‌های سنگی، بستر ردپای دایناسور سازند شورجه.

Figure 6. FE-SEM electron microscope image and chemical analysis of a band of clays (A), hematite (B), and ball-shaped bacterial fossil, *Metallosphaera sedula* (C) in bed-rock samples of dinosaur footprint of the Shurijeh Formation.

## ۴- بحث

### ۴-۱- اثرسازها

همگی، هتروپود بوده و رد دست در اندازه کوچک‌تر، در جلوی رد پا قرار می‌گیرد (Thulborn, 1990; Wright, 2005). در سورپودها در هر دو رد دست و پا ۵ انگشت وجود دارد و ردپای آن‌ها بزرگ و شامل فرورفتگی‌های بزرگی شبیه به حوضچه هستند که بیشتر توسط لبه‌ای برجسته از رسوبات جابه‌جا شده، احاطه شده‌اند و رد دست آن‌ها آشکارا به صورت هلالی تا نیم گرد در اندازه کوچک‌تر در جلوی ردپا می‌باشد (Thulborn, 1990). چنین تفکیکی از رد دست و پا در لایه مورد مطالعه امکان‌پذیر نبود. در مطالعه ردپاهای سورپود به پهنای حرکتی (gauge) نیز توجه می‌شود و ممکن است در تفکیک گروه‌های مختلف سورپود به کار رود (مانند Marty, 2009). در این ویژگی پهنای مسیر حرکت به ۳ دسته کلی، باریک، متوسط و پهن تقسیم می‌شود (Meyer et al., 1994; Lockley et al., 1994) و برای بیان آن می‌توان از نسبت پهنای حرکت (Trackway ratio, TR) استفاده نمود (Romano et al., 2007).

ردپاهای مورد مطالعه در این پژوهش، به صورت اثرهایی گودی شکل در اندازه متوسط تا کوچک (۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) و عموماً گرد تا بیضوی هستند. به دلیل درز و شکاف‌های متعدد لایه رسوبی و فرسایش این ردپاها تحت تاثیر قرار گرفته‌اند و جزئیات زیادی مانند تعداد و موقعیت انگشتان، اثر چنگال یا حتی تفکیک رد دست از رد پا در آن‌ها، قابل استخراج نیست و از نظر کیفیت حفظ‌شدگی (Marchetti et al., 2017) درجه ۰/۵ تا ۱ را دارند. این ردپاها را می‌توان به گروه‌های مختلف دایناسورهای چهارپای ژوراسیک پسین-کرتاسه پیشین، نسبت داد. دایناسورهای سورپود (Sauropod)، پروسارپودها یا سورپودریختان (Sauropodomorpha)، آنکیلوسورها (Ankylosaur)، سراتوپس‌ها (Ceratops) از نامزدهای اثرساز تریاس در زمان رسوب‌گذاری لایه مورد مطالعه در سازند شورجه می‌باشند. این گروه‌ها

به نظر می‌رسد موقعیت جغرافیای زیستی (بایوژئوگرافی) محدودی در زمان کرتاسه در برای دایناسورهای ایران ایجاد شده است. به دلیل محدودیت محیط زیستی و پراکنشی برای دایناسورها، عملاً گروه‌های خزندگان ایران کوچک‌جثه باقی مانده‌اند.

#### ۴-۲- محیط رسوبی و سنگوارگی

سازند شورپیچه به عنوان یک واحد سنگی متأثر از فرایند سیمین پسن و رسوب شده در شرایط خشکی‌زایی شناخته می‌شود، این سازند، همانند واحدهای سنگی چون گچ مگو، لایه‌های قرمز گره‌دو در ایران مرکزی یا گچ و ملافیر دماوند در البرز در شرایط پس‌روی دریا و در یک محیط قاره‌ای ته‌نشست شده است (آقانی، ۱۳۸۳). رخساره سنگی این سازند به گونه‌ای است که در ۳ مرحله رسوب‌گذاری برجای مانده است (Moussavi-Harami and Brenner, 1990): در بخش پایینی، با چیرگی سنگی آواری دانه درشت Gm و Gp و برخی از رخساره‌های سنگی Sp، St و Sh (علائم رخساره سنگی، بر اساس میال- Miall, 1981) نشان دهنده ته‌نشست حجم بالایی از رسوبات به طور ناگهانی و به صورت سدهای طولی است. این رسوبات با مهاجرت سدهای عرضی در مناطق ژرف کانال رودخانه‌های بریده بریده همراه بوده است که در افق‌هایی با کاهش انرژی، رسوبات دانه ریز ماسه ته‌نشست شده‌اند. بخش میانی این بازه به‌طور عمده از ماسه‌سنگ‌های ریگی ریزدانه تا درشت‌دانه (رخساره‌های سنگی Sp، St، Sh و Sr) تشکیل شده است و برخی رسوبات ریزدانه‌تر (رخساره سنگی Fl)، نیز وجود دارند. این رسوبات در بخش پایین دست (distal) رودخانه‌های بریده‌بریده ته‌نشست شده‌اند که گاهی، در پی سیلاب‌ها رسوبات ریز دانه برجای مانده‌اند. وجود واحدهای غنی از سیلیس و گره‌های کلکریته نشان‌دهنده شرایط محیطی خشک است و خشکی آب و هوا در این زمان را تایید می‌کند. بخش بالایی این سازند، در شرایط رودخانه‌های کاملاً پیچان‌رودی (مآندری) و در چرخه‌های دانه ریزشونده به سمت بالا و در شرایط خشک تا نیمه‌خشک با بقایای گیاهی کم ایجاد شده است. افق‌های کربناته در سازند شورپیچه که نشانگر گسترش و پیش‌روی زبان‌هایی از حوضه‌های دریایی، مانند حوضه‌های کربناته سازند زرد هستند، و گسترش موقت شرایط دریایی را نشان می‌دهند. به غیر از لایه‌های کربناته سازند شورپیچه، این سازند فقیر از سنگواره است و به طور پراکنده سنگواره‌های گیاهی را می‌توان در رخساره‌های سنگی ریزدانه (Fl) آن یافت (گل افشانی، ۱۳۹۳). از سوی دیگر، سطح CO<sub>2</sub> اتمسفری در کرتاسه نسبتاً بالاتر از ژوراسیک و سنوزویک بوده که سبب افزایش شایان توجه دما و رطوبت در آن دوره شده است. تعامل بین سطوح بالای CO<sub>2</sub> اتمسفری، گرمای شدید جهانی و رطوبت در کرتاسه به هوازگی ژرف گسترده انجامیده است (Bata, 2016; Retallack, 2016). همین شرایط حاره‌ای سبب هوازگی شدید زمین‌های قاره‌ای گردیده است و در واقع افق‌های تیره رنگ سازند شورپیچه را می‌توان به عنوان افق‌های لاتریتی شدن زمین‌ها در نظر گرفت (گفتگو با آقای دکتر عبدالحسین امینی). البته، در بخش‌هایی از حوضه تیس، نهشته‌های لاتریتی کرتاسه پیشین ناشی از آب و هوای گرم و مرطوب آن زمان نیز، گزارش شده است (Skarpelis, 2006; Chen et al. 2007). با توجه به محیط رسوب‌گذاری، ویژگی‌های سنگ‌شناسی، افق چینه‌نگاری و شرایط آب و هوایی دیرینه که بیان گردید، چگونگی ایجاد ردپاهای مورد مطالعه در لایه مورد نظر را می‌توان بدین گونه بازسازی نمود (شکل ۷):

ابتدا، در پی رسوب‌گذاری یک لایه ماسه ریزدانه، جریان‌ات آبی عقب‌نشسته و این لایه رخنمون پیدا کرده است. سطح این لایه با حرکت دایناسورها زیست‌آشفته یا اصطلاحاً Dinoturbation شده است. با لگدمال شدن سطح رسوب چاله‌هایی ایجاد گردیده است. با وجود آب و رطوبت کافی، چنین گودال‌هایی خود زیستگاه‌های کوچکی برای جوامع بی‌مهرگان ایجاد کرده است (Frey, 1975) و ممکن است با رسوب خرده‌های گیاهی در این چاله‌ها نیز همراه باشد. فعالیت زیست‌آشفستگی

در این روش کافی است نسبت پهنای ردها (footprint width, FW) را به پهنای مسیر حرکت تقسیم نمود و حاصل را به درصد بیان کرد. در میان مسیرهای حرکتی تشخیص داده شده، مسیر حرکتی یک نسبت پهنای حرکت برابر ۳۰٪ (پهن) و در سایر مسیرها ۵۰ تا ۶۰ درصد (باریک) می‌باشند.

ساختار اسکلتی رد دست‌های پروساروپودها ساختار منحصر به فردی دارد به طوری که انگشت شست (داخلی‌ترین انگشت) نسبت به انگشتان خارجی بزرگ‌تر و چنگالی زمخت دارد. انگشتان از سمت داخل پیکر به سوی خارج کوچک‌تر می‌شوند یا به بیان دیگر، شست، کلفت‌ترین انگشت بود و از یک چنگال بزرگ، پشتیبانی می‌کرد. پای پروساروپودها نیز ۵ انگشتی بوده و انگشت اول به طور فزاینده‌ای بلندتر و قوی‌تر است و بیشترین وزن بدن را تحمل می‌کند. انگشت بیرونی کوچک بود و احتمالاً زمین را لمس نمی‌کرده، بنابراین رد پا معمولاً تتراداکتیلی است. در بسیار موارد، ردپای سایر دایناسورها به اشتباه به ردپای پروساروپودها نسبت داده شده‌اند. در زمانی می‌توان به قطعیت ردپای چهارپایی را به پروساروپودها نسبت داد که ساختار انگشت منحصر به فرد یعنی انگشت و چنگال درشت در انگشت داخلی مشاهده شود. از آنجا که در ردپاهای مورد مطالعه، چنین جزئیاتی مشاهده نمی‌شوند، عملاً نسبت دادن آن‌ها به پروساروپودها ممکن نیست.

آنکیلوسوروها دست و پای ۵ انگشت داشته که به صورت نیم‌دایره‌ای آرایش دارند. دست‌ها کمی کوچک‌تر از پاها بوده و در نوک آن‌ها چنگال‌های پهنی وجود دارد. رد دست اثر ۵ انگشت کوتاه دارد و رد پای ۴ انگشت بلندتر دارد و هر دو رد چرخش به سمت بیرون مسیر حرکت را نشان می‌دهند. پروتوسراتوپسین‌ها دست‌ها و پایایی شبیه به برخی از اورنیتوپودها داشته‌اند. دست آن‌ها کوچک‌تر از پا بوده، و با ۵ انگشت شامل انگشتان باریک و واگرا به چنگال‌های کوتاه ختم می‌شدند. قوی‌ترین انگشتان II و III بودند، در حالی که انگشت I کوچک‌تر بود و IV و V کوتاه‌تر هستند. پاها چهار انگشت بلند داشته که انگشت پنجم کوتاه و به صورت متاتارس باقی‌مانده است. انگشتان پای لپتوسراتوپ‌ها باریک و دارای چنگال‌های تیز بودند، در حالی که پروتوسراتوپ‌ها انگشتان کوتاه‌تر با چنگال‌های پهن‌تر و گردتر داشته‌اند (Thulborn, 1990). در سراتوپسین‌هایی دست‌ها و پاها کوتاه‌تر و سنگین‌تر بوده‌اند. ردپایی که به سراتوپسین‌ها نسبت داده شده‌اند، سوال برانگیزند و تشخیص دقیق آن‌ها نیازمند بررسی بیشتر است. با توجه به تفاوت اندک اندازه در رد پای مورد مطالعه، دور از ذهن به نظر می‌رسد که این ردپاها به سراتوپسین‌ها تعلق داشته باشند. با توجه به فراوانی داده‌ها و گزارش‌ها، ردپاهای مورد مطالعه احتمالاً متعلق به دایناسورهای کوچک جثه سوروپود باشند.

به غیر از گزارش حاضر، در دو منطقه کپه داغ و ایران مرکزی ردپای دایناسورهای کرتاسه گزارش شده‌اند. ردپاهای دایناسورهای سازند تیرگان در جنوب شیروان (Abbassi et al., 2018) مربوط به ردپاهای دایناسورهای چهارپای کوچک جثه هستند. اندازه کوچک این ردپاها به تاثیر عوامل فرسایشی، سن یا روند تکاملی جانوران ایجاد کننده نسبت داده شده است. هرچند در طول زمان، از دوره تریاس تا کرتاسه، انتظار می‌رود اندازه ردپای دایناسورها، افزایش یابد (طبق قانون کوپ- Cope, 1896)، ولی ردپاهای سازند تیرگان اندازه کوچکی دارند. همین وضعیت در ردپاها سازند فرخی به سن کامپانین- مایستریشتین در منطقه خور در ایران مرکزی نیز مشاهده شده است (Wilmsen et al., 2022) که احتمالاً به ردپای سوروپودهای کوچک جثه نسبت داده شده‌اند. ردپاهای سازند شورپیچه نیز در اندازه نسبی کوچک (متوسط پهنای ردپاهای با حفظ‌شدگی خوب ۱۰ سانتی‌متر) است. اندازه کوچک دایناسورهای کرتاسه ایران را شاید بتوان به قانون جزیره نیز مرتبط دانست. این قانون نشان می‌دهد که نژادهای کوچک‌تر حیوانات اغلب در جزایر، در مقایسه با خویشاوندان بزرگ‌تر خود در سایر جاها هستند (Foster, 1964). ردپاهای کوچک دایناسورها در مناطق جزیره‌ای ایران، در اطراف منطقه تیس یافت شده‌اند. با توجه به مراحل تکامل زمین‌ساخت صفحه‌ای فلات ایران (Stern et al., 2021)،

در مطالعه مقاطع نازک به جای پیریت، کانه کالکوپیریت ( $CuFeS_2$ ) مشاهده گردید. مس ( $Cu^{2+}$ ) با منشا آلی (گیاهی) یا معدنی به همراه آهن و با حضور سولفید در محیط احیایی به ایجاد کالکوپیریت انجامیده است. البته درصد فراوانی کالکوپیریت در مقاطع مورد مطالعه کمتر از ۱% است. در کالکوپیریت، ساختار دانه‌ای مشاهده شد که نشان می‌دهد کالکوپیریت شکل بلوری ندارد. مطالعات نشان می‌دهند که در آزاد سازی آهن یا مس، کالکوپیریت در محیط‌های اسیدی با تشکیل یک لایه غیرفعال کننده مهار می‌شود (Li et al., 2010; Viramontes-Gamboa et al., 2010) و همین لایه سطحی سبب می‌شود که فرایند جاننشینی اکسیدها یا سایر آتیون‌ها به جای آهن و مس کالکوپیریت به کندی پیش رود یا کامل نشود (Li et al., 2010). به هر ترتیب، در پی زیست آشفستگی، آب‌های اکسیژن‌دار به ژرفای رسوب نفوذ کرده و در نهایت، هماتیت ایجاد می‌شود. آهن دو ظرفیتی کلوییدی بوده و در طی تبخیر تدریجی آب گودال‌ها و در شرایط اکسیدان غیر اسیدی، به صورت هیدروکسید فریک توسط مواد آلی و کانی‌های رسی حمل شده و قشری از لجن آهنی در کف گودال‌های ردپا یا در ژرفای کم رسوب باقی مانده است. در نتیجه، با وجود کربن آلی و خود اکسید آهن رنگ تیره‌تر در کف و دیواره گوال‌ها به صورت رسوب قشری ایجاد شده است.

بی‌مهرگان با وجود آثار حفاری مشخص می‌گردد که در نمونه‌های دستی یا در مقاطع نازک مشاهده شدند. با راکد ماندن آب در گودال‌ها و ایجاد شرایط احیایی و اسیدی و همچنین فعالیت باکتریایی در دمای مناسب،  $Fe^{3+}$  احیا گردیده و کربن آلی نیز در این احیا نقش داشته است و در نهایت  $Fe^{2+}$  ایجاد گردیده است. منشا آهن سه ظرفیتی را می‌توان، این‌گونه توجیه نمود که برخاستگاه ذرات رسوبی در ماسه‌سنگ‌های سازند شورجه سرزمین‌های رخنمون یافته آن زمان در سمت جنوب تا جنوب باختری حوضه شورجه بوده است (Moussavi-Harami and Brenner, 1990). احتمالاً منشا خرده سنگ‌های موجود در این ماسه‌سنگ‌ها از سنگ‌های آذرین چون سنگ‌های اولترامافیک تا مافیک جنوب مشهد باشد. حاصل دگرسانی خرده سنگ‌های موجود در این رسوبات،  $Fe^{3+}$  را آزاد کرده است. به بیان دیگر، معمولاً بخش بالایی لایه رسوب که اکسیژن را از آب دریا دریافت می‌کند و به باکتری‌ها اجازه می‌دهد مواد آلی را اکسید کنند. در مقابل، در ژرفای کم رسوبات، در افق‌های احیایی، باکتری‌های بی‌هوازی با حضور کربن آلی (که در این اینجا فرض می‌شود از مواد گیاهی موجود، تامین شده باشد)، اکسیدهای آهن سه ظرفیتی را احیا نموده‌اند. در این فرایند، با وجود سولفات‌ها امکان تشکیل پیریت نیز وجود دارد (Brenchley and Harper, 1998; Sobolev and Roden, 2001; Roden, 2012).

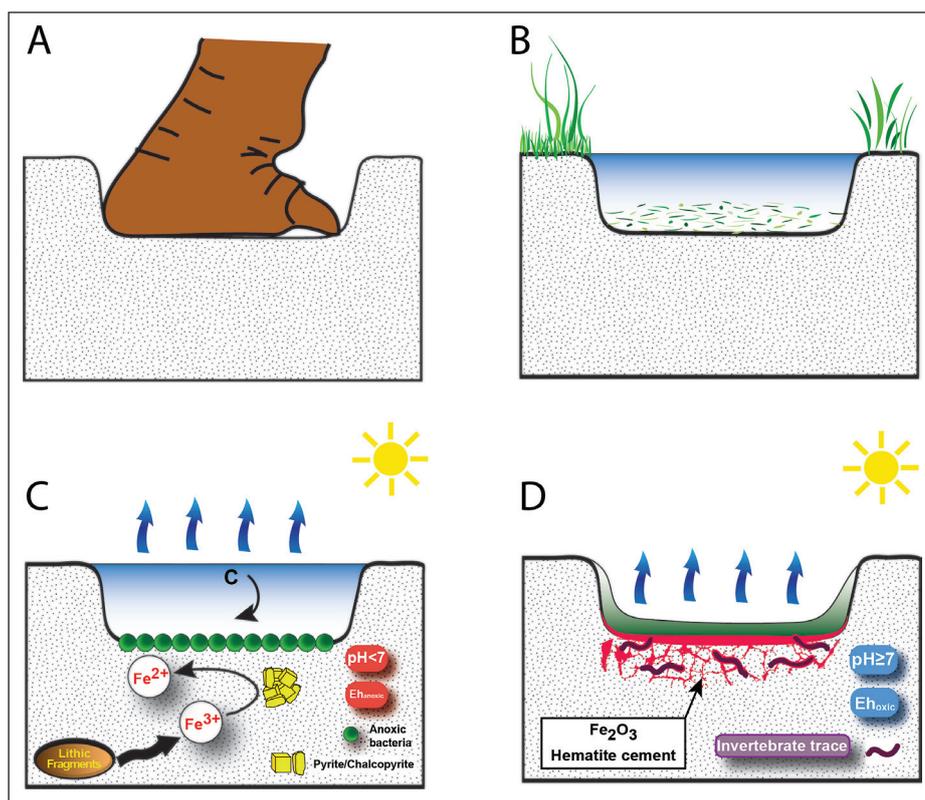


Figure 7. Cratonic images of stages of taphonomy of dinosaur footprints in the Shurijeh Formation. A) hole is created by the impact of a dinosaur's foot on soft sediment, B) Subsequently, during flooding, these holes are filled with water and may be surrounded by plant growth around the footprints. Plant debris is also deposited in the hole. C) Creating a low-oxygen and acidic condition, along with the activity of anaerobic bacteria and the presence of organic carbon in hot and dry weather conditions, causes the trivalent  $Fe^{3+}$  from the alteration of rock fragments to be reduced and converted to divalent iron  $Fe^{2+}$ , in this transformation, the formation of pyrite or chalcopyrite minerals in the presence of sulfates is considered an intermediate process, D) As environmental conditions shift to oxidant and alkaline, and the water in the pits evaporates, and increasing of oxygen due to invertebrate bioturbation disturbance a precipitate of divalent iron oxide  $Fe^{2+}$  forms in the shape of hematite cement at the bottom of the pits resulting from the footprints. The sun symbol shown in C-D indicates the prevailing warm climate at the time of deposition.

شکل ۷- تصویر نقاشی شده از مراحل سنگوارگی ردپای دایناسورها در سازند شورجه، (A) با برخورد پای دایناسور بر روی رسوب نرم، گودی ایجاد می‌شود. (B) در طی آب‌گذری بعدی این گودال‌ها با آب پر شده و ممکن است همراه با رشد گیاهان در پیرامون ردپاها باشد و خرده‌های گیاهی در گودال‌ها نیز رسوب کند، (C) با ایجاد محیط کم‌اکسیژن و اسیدی و فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی و با وجود کربن آلی، در شرایط آب و هوایی گرم و خشک، آهن سه ظرفیتی حاصل از دگرسانی خرده‌های سنگی احیا شده و به آهن دو ظرفیتی تبدیل می‌شود. در این تبدیل ایجاد کانی‌های پیریت یا کالکوپیریت در حضور سولفات‌ها به عنوان یک فرایند میانه در نظر گرفته می‌شود، (D) با تغییر شرایط محیطی به اکسیدان و قلیایی و تبخیر آب گودال‌ها، و همچنین افزایش سطح اکسیژن در اثر زیست آشفستگی بی‌مهرگان، رسوب اکسید آهن دو ظرفیتی به صورت سیمان هماتیته در کف گودال‌های حاصل از ردپا ایجاد می‌گردد. علامت خورشید نشان داده شده در C-D نشانگر حاکم بودن آب و هوای گرم در زمان رسوب‌گذاری است.

فعالیت زیستی بی‌مهره‌گان در طی ایجاد لجن میکروبی آهنی ادامه داشته است.

### ۵- نتیجه‌گیری

جستجو و یافتن ردپاهای دایناسورها در پهنه ایران، می‌تواند کمک بزرگی در بازسازی وضعیت و شرایط دیرینه‌شناسی ایران نماید. سازند شورپیچہ به دلیل داشتن رخساره قاره‌ای، استعداد مناسبی برای این پی‌جویی‌هاست. مجموعه ساخت‌های رسوبی به صورت فرورفتگی در سطح بالایی یکی از لایه‌های بخش میانی این سازند در برش قزلق، در واقع ردپای دایناسورهای کوچک پیکری هستند که با حرکت گله‌ای و دسته جمعی خود این ردپاها را برجای گذاشته‌اند. در این ردپاها، دست کم ۴ مسیر حرکتی قابل تشخیص است. به دلیل عدم حفظ‌شدگی خوب این ردپاها، تشخیص این که جانور یا جانوران اثرساز از کدامیک از گروه‌های دایناسورها بوده‌اند، امکان‌پذیر نبود، با این وجود به دلیل شکل گرد تا بیضوی ردپاها احتمالاً سورپودها، سازنده این ردپاها بوده‌اند. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهند که این ردپاها در شرایط آب و هوایی گرم و خشک و در یک محیط کرانه‌ای برجای مانده‌اند. بستر رسوبی تمامی این ردپاها با وجود قشری از رسوب اکسید آهن هستند. فرایند سنگواره شدن این ردپاها به گونه‌ای بوده است که چاله‌های حاصل از ردپاها با آب پر شده و به صورت یک حوضچه کوچک تبدیل شده است. این حوضچه‌ها در شرایط بی‌هوازی و احیایی و با عملکرد باکتری‌های بی‌هوازی، کاتیون‌های سه ظرفیتی آهن را احیا نموده و با تبخیر کامل آب، کف و بستر رسوبی ردپاها با آهن دو ظرفیتی سیمان شده‌اند.

### سپاسگزاری

نگارندگان از داوران بزرگوار، برای رهنمودهای سازنده ایشان سپاسگزارند. همچنین از راهنمایی علمی آقای دکتر عبدالحسین امینی و آقای دکتر میرعلی اصغر مختاری سپاسگزاریم.

لجن‌های میکروبی (Microbial mat) در درون گودال‌های ردپای دایناسورها معمولاً به صورت پوشش رسوبی چین و چروک‌دار باقی می‌ماند (Dai et al., 1991; Bernier et al., 2013; de Souza Carvalho et al., 2015) و سطح ناهموار و ناصاف ردپاهای مورد مطالعه نیز می‌تواند به این موضوع مربوط باشد. قشر لجن میکروبی معمولاً با زیستگاه‌های آبی، از جمله چشمه‌های آب گرم، حوضچه‌های فوق شور، و مناطق ساحلی میان‌کشدی (بین جزر و مدی) و محیط‌های فقیر از مواد غذایی (الیگوتروفیک) مرتبط هستند که همه آن‌ها دارای بسترهای فتوتروفیک می‌باشند و محیط‌های دیگری مانند چشمه‌های آب گرم اسیدی یا زه‌کشی بسترهای اسیدی دارای شرایط غیرفوتوسنتزی بوده و مناسب ته‌نشست لجن‌های میکروبی می‌گردد (Prieto-Barajas et al., 2018). در قشر و ژرفای کم این نوع بسترها فعالیت بی‌مهره‌گان معمولاً در شرایط بی‌هوازی، یا با سطح اکسیژن پایین رخ می‌دهد (Baucon, 2008; Yang et al., 2025). از سوی دیگر، ممکن است همین زیست‌آشفته‌گی ناشی از فعالیت بی‌مهرگان سبب افزایش میزان اکسیژن در ژرفای بیشتر رسوب گردد (Brenchley and Harper, 1998). از دیرباز، یعنی از زمان پرکامبرین در بسترهای رسوبی سیلیسی آواری با وجود زه‌کشی و بلوغ (مچورتی) بافتی مناسب، امکان به دام افتادن و اتصال میکروبی وجود داشته است و ساختارهای میکروبی ایجاد شده، بدون تخریب و فرسایش در سطح قشری رسوبات دفن گردیده است (Noffke et al., 2002). معمولاً قشر نازک لجن‌های میکروبی با ساختارهایی چون هلالی، موجی، شعاعی، پارچه پارچه، یا مخلوطی از ساختارها ظاهر می‌شود (Bernier et al., 1991). به نظر می‌رسد در ردپاهای مورد مطالعه به دلیل محدود بودن فضای و کوچک بودن گودی‌های حاصل از ردپاها، امکان ایجاد چنین ساختارهایی به طور گسترده فراهم نشده است. با ایجاد اکسید آهن در این گودال‌ها، هماتیت به صورت سیمان، فضای میان ذره‌ای را پر نموده و ذرات را به همدیگر سیمان نموده است. با توجه به نوع ذرات، سیمان‌شدگی آهنی و جورشدگی زیستی (biogenic sorting) در رسوبات مورد مطالعه، به نظر می‌رسد

### کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ ص.
- اسماعیلی خوشمردان، ز.، محمودی قرائی، م. ح.، محبوبی، ا.، موسوی حریمی، ر.، ۱۴۰۴، مقایسه رسوب‌شناسی و تغییرات محیط رسوبی سازند شورپیچہ در بخش مرکزی و خاوری کپه داغ، شمال خاور ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، سال سی و پنجم، شماره ۱۳۷، ص. ۴۱-۶۲. doi: 10.22071/gsj.2025.520806.2194
- گل افشانی، ط.، خانه باد، م.، موسوی حریمی، ر.، محبوبی، ا.، ۱۳۹۳، محیط رسوبی و برخاستگاه ماسه‌سنگهای سازند شورپیچہ (نئوکومین) در برش آبگرم، شرق حوضه کپه داغ. نشریه علمی پژوهشی رخساره‌های رسوبی، شماره ۷، ص. ۱۲۵-۱۴۹.
- موسوی‌نیا، ع.، سیدامامی، ک.، و آریایی، ع.، ۱۳۹۳، آمونیت‌های سازند آیتامیر در برش زاوین (خاور کپه داغ) و گزارش اولین فسیل دایناسور دریایی از کرتاسه ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، سال بیست و سوم، شماره ۹۱، ص. ۳۹-۴۴. doi:10.22071/GSJ.2014.43761

### References

- Abbassi, N., Alimohammadian, H., Shakeri, S., Broumand, S., and Broumand, A. 2018. Aptian small dinosaur footprints from the Tirgan Formation, Kopet-Dagh Region, northeastern Iran. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, 80, 5–14.
- Abbassi, N., and Madanipour, S., 2014. Dinosaur tracks from the Jurassic Shemshak Group in the central Alborz Mountains (northern Iran). *Geologica Carpathica*, 65(2), 99-115. doi: 10.2478/geoca-2014-0007.
- Abbassi, N., Porchetti, S.D.O., Wagensommer, A., and Dehnavi, M.G., 2015. Dinosaur and crocodylomorph footprints from the Hojedk Formation (Bajocian, Middle Jurassic) of north Kerman, central Iran. *Italian Journal of Geosciences*, 134(1), 86-94. doi: 10.3301/IJG.2014.30.
- Afshar-Harb, A., 1979. The stratigraphy, Tectonics and Petroleum Geology of the Kopet Dagh Region, Northern Iran (Ph.D. thesis). Imperial College of Science and Technology, University of London.
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran, Geological Survey of Iran, 586 p. (In Persian)*.

- Amini, A., 2001. Red colouring of the Upper Red Formation in central part of its basin, central zone, Iran. *Journal of Sciences Islamic Republic of Iran*, 12, 145-156.
- Bábek, O., Vodrážková, S., Kumpan, T., Kalvoda, J., Holá, M., and Ackerman, L., 2021. Geochemical record of the subsurface redox gradient in marine red beds: A case study from the Devonian Prague Basin, Czechia. *Sedimentology*, 68(7), 3523–3548. doi: 10.1111/sed.12910.
- Bata, T., 2016. Evidences of widespread cretaceous deep weathering and its consequences: a review. *Earth Science Research*, 5(2), 69-84. doi: 10.5539/esr.v5n2p69.
- Baucon, A., 2008. Neoichnology of a microbial mat in a temperate, siliciclastic environment: Spiaggia al Bosco (Grado, Northern Adriatic, Italy). *Studi Tridentino di Scienze Naturali Acta Geologica*, 83, 165–185.
- Baud, A., and Stampfli, G., 1989. Tectonogenesis and evolution of a segment of the Cimmerides: the volcano-sedimentary Triassic of Aghdarband (Kopet-Dagh, North-East Iran). In: Şengör A.M.C. (ed.) *Tectonic evolution of the Tethyan Region*, Kluwer, Academic Publishers, Dordrecht, 265–275.
- Bernier, P., Gaillard, C., Gall, J.C., Barale, G., Bourseau, J.P., Buffetaut, E., and Wenz, S., 1991. Morphogenetic impact of microbial mats on surface structures of Kimmeridgian micritic limestones (Cerin, France). *Sedimentology*, 38(1), 127-136. doi: 10.1111/j.1365-3091.1991.tb01858.x.
- Brenchley, P.J., and Harper, D.A.T., 1998. *Palaeoecology Ecosystems, environments and evolution*. Chapman & Hall.
- Brusatte, S.L., 2012. *Dinosaur paleobiology*. John Wiley & Sons.
- Chen, X., Wang, C., Hu, X., Huang, Y., Wang, P., Jansa, L., and Zeng, X., 2007. Cretaceous oceanic red beds: distribution, lithostratigraphy and paleoenvironments. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 81(6), pp.1070-1086. doi: 10.1111/j.1755-6724.2007.tb01029.x.
- Collinson, J. and Mountney, N., 2019. *Sedimentary structures*. Liverpool University Press, 340 pp.
- Cope, E.D., 1896. *The Primary Factors of Organic Evolution*, Open Court Publishing Company. 547pp.
- Dai, H., Xing, L., Marty, D., Zhang, J., Persons IV, W.S., Hu, H., and Wang, F., 2015. Microbially-induced sedimentary wrinkle structures and possible impact of microbial mats for the enhanced preservation of dinosaur tracks from the Lower Cretaceous Jiaguan Formation near Qijiang (Chongqing, China). *Cretaceous Research*, 53, 98-109. doi: 10.1016/j.cretres.2014.10.012.
- de Lapparent, A.F. de, and Davoudzadeh, M., 1972. Jurassic dinosaur footprints of the Kerman area, central Iran. *Geol Surv Iran Rep*, 26, 5–22.
- de Lapparent, A.F. de, and Nowgol Sadat, M.A.A., 1975. Une trace de pas de dinosaure dans le Lias de l'Elborz, en Iran: Conséquences de cette découverte. *C R Acad Sci D Sci Nat*, 280, 161–163.
- de Souza Carvalho, I., Borghi, L., and Leonardi, G., 2013. Preservation of dinosaur tracks induced by microbial mats in the Sousa Basin (Lower Cretaceous), Brazil. *Cretaceous Research*, 44, 112-121. doi: 10.1016/j.cretres.2013.04.004.
- Esmaeili Khoshmardan, Z., Mahmudy Gharaie, M.H., Mahboubi, A., and Moussavi Harami, S.R., 2025. *Comparison of sedimentology and changes in the sedimentary environment of the Shurijeh Formation in the central and eastern parts of the Kopet-Dagh Basin, northeastern Iran*, 35(3), 137, 41-62. Doi: 10.22071/gsj.2025.520806.2194. (In Persian).
- Foster, J.B., 1964. Evolution of mammals on islands: *Nature*, 202, 234–235.
- Frey, R.W., 1975. The realm of ichnology, its strengths and limitations. In *The study of trace fossils: A synthesis of principles, problems, and procedures in ichnology* (pp. 13-38). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Golafshani, T., Khanehbad, M., Moussavi-Harami, S.R., Mahboubi, A. 2014. *Depositional environment and provenance of the Shurijeh Formation sandstones (Neocomian) in the Abgarm village, east of Kopet-Dagh basin. Sedimentary Facies*, 7 (1): 125–149. (in Persian).
- Kellner, A.W.A., Mirzaie Ataabadi, M., Dalla Vecchia, F.M., Pourbagheban, M., and De Paula Silva, H., 2003. Theropod dinosaurs from Iran. In *Resumos, Il Simposio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados*, p. 34.
- Kölbl, D., Blazevic, A., Albu, M., Fasching, C., and Milojevic, T., 2020. Desiccation of the Extreme Thermoacidophile Metallosphaera sedula Grown on Terrestrial and Extraterrestrial Materials. *Front. Astron. Space Sci.* 7:41. doi: 10.3389/fspas.2020.00041.
- Leonardi, G., 1987. *Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology*. Departamento Nacionalde Producao Mineral, Brasilia. 120 pp.
- Li, J., Kawashima, N., Kaplun, K., Absolon, V.J., and Gerson, A.R., 2010. Chalcopyrite leaching: The rate controlling factors. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 2881–2893. doi:10.1016/j.gca.2010.02.029.
- Liu, X., Wang, Q., Zhang, Q., Yang, S., Liang, Y., Zhang, Y., Li, Y., and Guan, T., 2017. Genesis of the Permian karstic Pingguo bauxite deposit, western Guangxi, China. *Mineralium Deposita*, 52(7), 1031-1048. doi: 10.1007/s00126-017-0723-y.
- Lockley, M.G., Farlow, J.O., and Meyer, C.A., 1994. *Brontopodus* and *Parabrontopodus* ichnogen. nov. and the significance of wide- and narrow-gauge sauropod trackways. *Gaia* 10, 135–145.

- Lockley, M.G., Farlow, J.O., and Meyer, C.A., 1994. Brontopodus and Parabrontopodus ichnogen. nov. and the significance of wide- and narrow-gauge sauropod trackways. *Gaia* 10, 135–145.
- Marchetti, L., Tessarollo, A., Felletti, F., and Ronchi, A., 2017. Tetrapod footprint paleoecology: behavior, taphonomy and ichnofauna disentangled. A case study from the Lower Permian of the Southern Alps (Italy). *Palaios*, 32(8), pp.506-527. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.008.
- Marty, D., 2009. Narrow-and wide-gauge sauropod trackways with similar track morphology and trackway configuration from the Late Jurassic of NW Switzerland: Brontopodus and/or Parabrontopodus?. In 7th Annual meeting of the European Association of Vertebrate Palaeontologists (p. 46). European Association of Vertebrate Palaeontologists.
- Meyer, C.A., Lockley, M.G., Robinson, J.W., and dos Santos, V.F., 1994. A comparison of well-preserved sauropod tracks from the Late Jurassic of Portugal and the western United States: evidence and implications. *Gaia* 10, 57–64.
- Miall, A. D., 1981. Analysis of fluvial depositional systems. American Association of Petroleum Geologists,
- Mosavinia, A., Seyed-Emami, K., and Aryai, A.A., 2014. *Ammonites of the Aitamir Formation in the Zawin Section (E Kopeh Dagh) and the First Record of Marine Dinosaurs from the Cretaceous of Iran*, 23(91), P. 39-45. Doi: 10.22071/gsj.2014.43761. (In Persian).
- Moussavi-Harami, R., and Brenner, R.L., 1990. Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits in eastern Kopet-Dagh basin, northeastern Iran. *Cretaceous Research*, 11(2), pp.163-174.
- Moussavi-Harami, R., and Brenner, R.L., 1993. Diagenesis of non-marine petroleum reservoirs: The Neocomian (Lower Cretaceous) Shurijeh Formation, Kopet-Dagh Basin, NE Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 16(1), pp.55-72.
- Nabavieh, S.M., 1998. Geology map of Kalat-e Naderi, scale 100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Noffke, N., Knoll, A.H., and Grotzinger, J.P., 2002. Sedimentary controls on the formation and preservation of microbial mats in siliciclastic deposits: a case study from the Upper Neoproterozoic Nama Group, Namibia. *Palaios*, 17(6), 533-544. doi: 10.1669/0883-1351(2002)017<0533:SCOTFA>2.0.CO;2.
- Prieto-Barajas, C.M., Valencia-Cantero, E., and Santoyo, G., 2018. Microbial mat ecosystems: structure types, functional diversity, and biotechnological application. *Electronic journal of biotechnology*, 31, pp.48-56. doi: 10.1016/j.ejbt.2017.11.001.
- Retallack, G.J., 2010. Lateritization and bauxitization events. *Economic Geology*, 105(3), pp.655-667. doi: 10.2113/gsecongeo.105.3.655.
- Roden, E. E., 2012. Microbial iron-redox cycling in subsurface environments. *Electron Transfer at the Microbe–Mineral Interface*, 40, 1249–1256; doi:10.1042/BST20120202.
- Romano, M., Whyte, M. A., and Jackson, S. J., 2007. Trackway ratio: A new look at trackway gauge in the analysis of quadrupedal dinosaur trackways and its implications for ichnotaxonomy, *Ichnos*, 14:3, 257–270. doi: 10.1080/10420940601050014.
- Rowshanvaran, J., 2010. Geology map of Chahchaheh, scale 100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Ruttner, A.W., 1993. Southern borderland of Triassic Laurasia in north-east Iran. *Geologische Rundschau*, 82(1), 110-120.
- Skarpelis, N., 2006. Lateritization processes of ultramafic rocks in Cretaceous times: The fossil weathering crusts of mainland Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), pp.325-328. doi: 10.1016/j.gexplo.2005.08.066.
- Sobolev, D., and Roden, E. E., 2001. Suboxic Deposition of Ferric Iron by Bacteria in Opposing Gradients of Fe(II) and Oxygen at Circumneutral pH. *Applied and Environmental Microbial Microbiology*, 67(3), 1328–1334. doi: 10.1128/AEM.67.3.1328–1334.2001.
- Stern, R.J., Moghadam, H.S., Pirouz, M., and Mooney, W., 2021. The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1), pp.9-36. doi: 10.1146/annurev-earth-071620-052109.
- Stöcklin, J., and A. Setudehnia, 1991. Stratigraphic Lexicon of Iran, 379. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. , pp. 376.
- Taheri, J., Fürsich, F.T., and Wilmsen, M., 2009. Stratigraphy, depositional environments and geodynamic significance of the Upper Bajocian–Bathonian Kashafrud Formation, NE Iran. In Brunet, M.F., Granath, J.W. and Wilmsen, M., (eds). *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society, London, Special Publications, pp. 205-218.
- Thulborn, T., 1990. *Dinosaur tracks*, Chapman and Hall London, 410 p.
- Viramontes-Gamboa, G., Peña-Gomar, M.M., Dixon, D.G., 2010. Electrochemical hysteresis and bistability in chalcopyrite passivation. *Hydrometallurgy*; 105,140-147. Doi: 10.1016/j.hydromet.2010.08.012.
- Walker, T.R., 1976. Diagenetic Origin of Continental Red Beds. In: Falke, H. (eds) *The Continental Permian in Central, West, and South Europe*. Nato Advanced Study Institutes Series, vol 22. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-1461-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-010-1461-8_20).
- Wilmsen, M., Fürsich, F.T., and Majidifard, M.R., 2022. Youngest Cretaceous dinosaur tracksite from the Middle East (Maastrichtian, Farrokhi Formation, Central Iran). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 102(2), pp.437-447. doi: 10.1007/s12549-021-00516-w.
- Wright, J. L., 2005. Steps in Understanding Sauropod Biology. In Curry Rogers, K. A., Wilson, J. A. (eds) *The Sauropods: Evolution and Paleobiology*. University of California Press, pp. 252-280.

- Xing, L.D., Abbassi, N., and Lockley, M.G., 2018. Enigmatic didactyl tracks from the Jurassic of Iran. *Historical Biology*, 30(8), 1132-1138. doi: 10.1080/08912963.2017.1339700.
- Yang, Q., Xing, L., Du, F., Chen, Q., Klein, H., Romilio, A., Jin, Y., Liu, L., Qi, J., Zhao, M., and Chen, X., 2025. A new sauropod-dominated tracksite from the Lower Cretaceous in central Ningxia, northwestern China, and the implications on palaeoenvironments: Q. Yang et al. *Swiss Journal of Palaeontology*, 144(1), p.35. doi: 10.1186/s13358-025-00378-1.