



<https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches

E-ISSN: 2423-8007

Vol. 40, Issue 2, No. 95, Summer 2024, pp 1-26

Received: 26.04.2024 Accepted: 05.07.2024

Research Paper

Facies, sedimentary environment and log facies of the Hojedk Formation (Middle Jurassic) in Parvadeh Tabas Coal Mine, South of Tabas

Najmeh Mahdieh NajafAbadi

MSc of Geology, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran
njmahdieh@gmail.com

Mohammad Ali Salehi* 

Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Iran
ma.salehi@sci.ui.ac.ir

Vesal Yahya Sheibani

Assistant Professor, Department of Geology, Payame Noor University of Tabas Center, Tabas, Iran
v.y.sheibani@pnu.ac.ir

Abstract

The Middle Jurassic Hojedk Formation in the Parvadeh Coal Mine (90 km south of Tabas) has been studied. The study area is structurally located on the northern Tabas Block in the north of the Parvadeh–Nayband coal-bearing basin, east-central Iran. The Hojedk Formation has a thickness of 40 meters in the studied outcrop section. Five lithostratigraphic units have been identified, which mainly consist of sandstones, shales, conglomerates, siltstones and thin bioclastic sandy limestone. Based on field and petrographic studies, four groups of lithofacies including coarse- (Gcm and Gt), medium- (St, Sp, Sh and Sr) and fine-grained clastic (Fl and Fm) as well as carbonate facies (echinoid brachiopod grainstone-packstone) have been identified in the Hojedk Formation. The architectural elements of channels and point bars of a meandering tidal creek and coastal plain swamp have been identified in the Hojedk Formation and its palaeodepositional conditions can be attributed to the tidal flat of a marginal marine siliciclastic environment. To investigate the characteristics of the Hojedk Formation in the subsurface, the electrical facies were defined in an exploration borehole in the eastern part of Parvadeh Mine. In this borehole, the Hojedk Formation is 48 meters thick, and four electro/log facies have been identified by considering the gamma-ray motif and resistivity logs. These electro facies are compatible with the sub-environments of coastal sand flats, tidal channels and coastal plain swamps.

Keywords: Tabas Block, Hojedk Formation, Middle Jurassic, Facies, Log facies

Introduction

Central-East-Iranian-Microcontinent is a part of Iran Plate, which can be structurally divided into Lut, Tabas and Yazd blocks (Takin 1972; Aghanabati 2004). The tectono-sedimentary evolution of east-central Iran during the Late Triassic to the Late Jurassic is governed by the Cimmerian orogenic events (Fürsich et al. 2005; Seyed-Emami et al. 2004, 2020; Wilmsen et al. 2009, 2021). The Hojedk Formation is the last lithostratigraphic unit of the Shemshak Group in east-central Iran, which during the Middle Jurassic in this area was affected by Cimmerian tectonic events resulting in large thickness and facies variations (Wilmsen et al. 2009). Biostratigraphic studies have led to determining the age of this formation (early Bajocian) in eastern central Iran (Seyed-

Emami et al. 2020). Macrofloras, palynology and sedimentary environment analysis have been conducted on the Hojedk Formation in Tabas Block, which has led to the reconstruction of the palaeoenvironmental and palaeoclimatic conditions of this formation (Vaez-Javadi and Mirzaei-Ataabadi 2006; Vaez-Javadi 2016; Badihagh et al. 2019; Khalilzadeh et al. 2023; Salehi et al. 2023). Based on preliminary studies conducted in the northern part of Tabas Block, the Hojedk Formation was formed in different sub-environments including lakes, coastal plains, deltas, fluvial and flood plains as well as the marine environment (Seyed-Emami et al. 2006). Due to the importance of the Hojedk Formation in the reconstruction of the tectonic-sedimentary evolution of northern Tabas Block during the Middle Jurassic as well as

*Corresponding author

Mahdieh NajafAbadi N. Salehi M. A. and Yahya Sheibani V. (2024). Facies, sedimentary environment and log facies of the Hojedk Formation (Middle Jurassic) in Parvadeh Tabas Coal Mine, South of Tabas. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 40(2):1-26.
<https://doi.org/10.22108/jssr.2024.141278.1284>



2423-8007 / © 2024 University of Isfahan

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



<https://doi.org/10.22108/jssr.2024.141278.1284>

its coal resources, this succession has been studied in the outcrop and subsurface sections in the Parvadeh Coal Mine. The facies and sedimentary environment of this formation are still less known in many areas of the northern Tabas Block, including the Parvadeh Coal Mine area. Considering the extensive coal reserve of 1.1 billion tons in the northern Tabas Block, this region is important for detailed geological studies for the exploration of workable coal seams. To reconstruct the palaeoenvironmental deposition of the Hojedk Formation, field, subsurface and laboratory studies were carried out and all the data were integrated with the geological information of the area. Furthermore, the identification of log facies of this formation in the exploration boreholes, drilled in eastern Parvadeh Mine, is useful for coal exploration, discovery and production from the coal-bearing strata of the studied area.

Material & Methods

The outcrop section of the Middle Jurassic Hojedk Formation was logged and measured by Jacob's staff (Sdzuy and Monninger 1985) in the western part of the Parvadeh Coal Mine. Sampling was done systematically and sometimes according to the identical facies changes. In total 25 hand specimens were collected and thin sections were prepared from the sandstone and limestone samples. Clastic facies have been identified and classified based on Miall's classification (Miall 1985, 2014). Carbonate facies have been classified based on Dunham's scheme for carbonate rocks (Dunham 1962), and microfacies character defined based on criteria described by Flügel (2010). In addition, a subsurface study has been carried out on an exploration borehole (BH#341), which was drilled in the eastern part of the Parvadeh Mine. The lithostratigraphy and sedimentological characteristics of this formation in the borehole were compared with the adjacent studied outcrop section. Graphical and Gamma-ray well logs motifs of the borehole have been used in this study for electrical/log facies identification.

Discussion of Results & Conclusions

In this research, the Hojedk Formation is studied in the north of Parvadeh-Nayband coal basin, 90 km south of Tabas (Parvadeh Coal Mine). Based on field studies, five lithostratigraphic units have been identified. The succession mainly consists of sandstones, shales, conglomerates, siltstones and thin bioclastic sandy limestone. Clastic facies were defined in the field by considering lithology, sedimentary structure, geometry, stratal surface, palaeocurrent and fossil/trace fossil content. Four groups of facies including coarse-, medium- and fine-grained clastic facies and one carbonate facies have been identified. Two coarse- (Gcm and Gt), four medium- (St, Sp, Sh and Sr), and two fine-grained facies including Fl and Fm were identified in the field. Some medium-grained facies are bioturbated and sometimes show vertical cylindrical burrows (e.g. Skolithos). The carbonate microfacies recognized based on rock texture (echinoid brachiopod grainstone-packstone), is equivalent to the standard microfacies (SMF) 18. The latter facies were formed in carbonate bioclastic sand shoals in a marginal shallow marine mixed environment. In order to identify the architectural elements in the Hojedk Formation, features such as the lithology, stratal surface, geometry, and their associated facies have been considered. In the studied succession, three architectural elements including channel and point bars of a meandering tidal creek and coastal plain swamp have been identified in the Hojedk Formation. This formation also has been investigated in the subsurface section (exploration borehole No. 341) in the eastern part of the Parvadeh Coal Mine. In this borehole, the Hojedk Formation is 48 meters thick and consists of sandstones, shales, limestones and siltstones. In this study, four electrical facies (log facies) were identified in the Hojedk Formation, which is compatible with the sub-environments of coastal sand flats, tidal channels, crevasse splay and coastal plain swamps. According to the identified lithofacies, microfacies, architectural elements and log facies in vertical and lateral distribution, the sedimentary environment of the Hojedk Formation in the studied outcrop and borehole is attributed to a tidal flat of a marginal marine siliciclastic environment.



مقاله پژوهشی

رخساره‌ها، محیط رسوبی و رخساره‌های الکتریکی سازند هجدک (ژوراسیک میانی) در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، جنوب طبس

نجمه مهدیه نجف‌آبادی، کارشناسی ارشد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

njmahdiah@gmail.com

محمدعلی صالحی^{id*}، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

ma.salehi@sci.ui.ac.ir

وصال یحیی شیبانی، استادیار، دانشگاه پیام نور مرکز طبس، خراسان جنوبی، ایران

v.y.sheibani@pnu.ac.ir

چکیده

سازند هجدک با سن ژوراسیک میانی در شمال حوضه زغال‌دار پروده-نابیند و در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب طبس در محدوده معدن زغال‌سنگ پروده و از نظر ساختاری بر بلوک طبس در زون شرقی ایران مرکزی مطالعه شده است. این سازند در برش مطالعه‌شده، ضخامت ۴۰ متر دارد. در این توالی رسوبی پنج واحد چینه سنگی شناسایی و تفکیک شده است که عمدتاً شامل ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا و سیلتستون است. براساس مطالعات صحرایی و مطالعات پتروگرافی در سازند هجدک چهار دسته رخساره سنگی دانه‌درشت (Gt و Gcm)، متوسط (St، Sp، Sh و Sr)، ریز (Fl و Fm) و کربناته (براکیوپود اکیونئید گرینستون-پکستون) شناسایی شده است. به‌طور کلی عناصر ساختاری کانال و پرکننده کانال مربوط به کانال‌های جزر و مدی و باتلاق دشت ساحلی در رسوبات سازند هجدک شناسایی شده است و شرایط رسوب‌گذاری آن به محیط پهنه ساحلی از یک محیط حاشیه دریایی آواری نسبت داده می‌شود. به‌منظور بررسی ویژگی‌های الکتریکی رخساره‌های سازند هجدک در زیر سطح این سازند در یک گمانه اکتشافی در محدوده معدن پروده نیز بررسی شد. در این گمانه سازند هجدک ۴۸ متر ضخامت دارد و با در نظر گرفتن تغییرات شکل لاگ گاما و مقاومت چهار رخساره الکتریکی تشخیص داده شد که با زیرمحیط‌های پهنه‌های ماسه‌ای ساحلی، کانال‌های جزرومدی کوچک و باتلاق دشت ساحلی انطباق‌دانی‌اند.

واژه‌های کلیدی: بلوک طبس، سازند هجدک، ژوراسیک میانی، رخساره، رخساره‌های الکتریکی.

* نویسنده مسئول

مهدیه نجف‌آبادی، نجمه؛ صالحی، محمدعلی. و یحیی شیبانی، وصال. (۱۴۰۳). رخساره‌ها، محیط رسوبی و رخساره‌های الکتریکی سازند هجدک (ژوراسیک میانی) در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، جنوب طبس. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴۰(۲): ۱-۲۶. <https://doi.org/10.22108/jssr.2024.141278.1284>

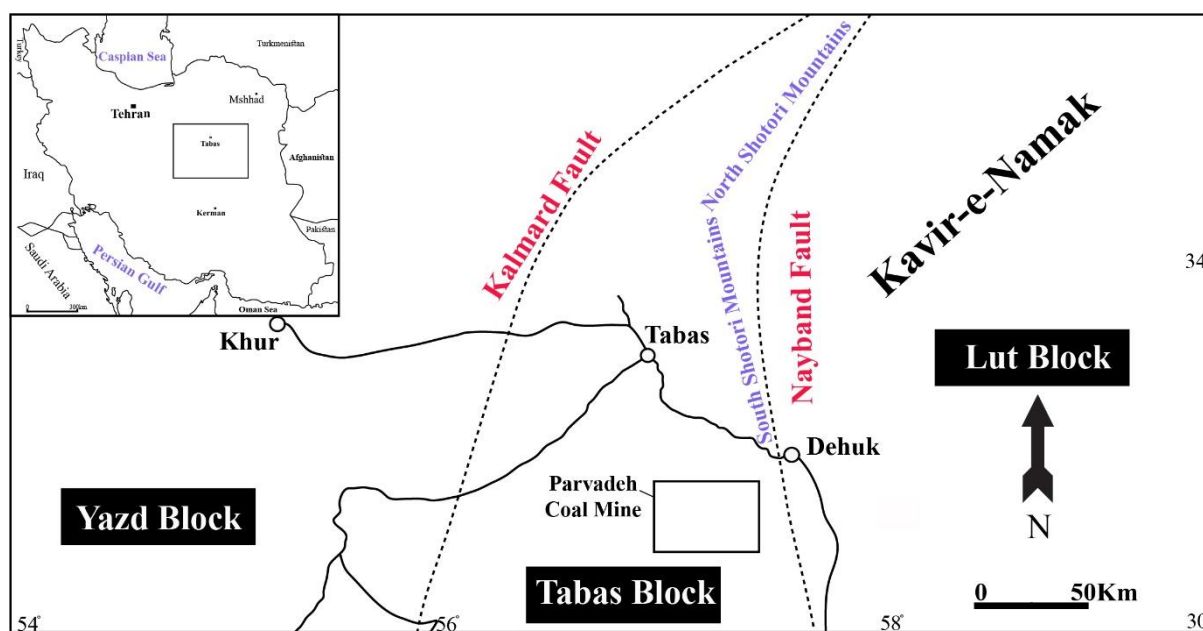


مقدمه

شرق ایران مرکزی با نام خردقاره ایران مرکزی شناخته می‌شود که از لحاظ ساختاری به بلوک‌های لوت، طبس و یزد تقسیم‌شدنی است (Takin 1972; Aghanabati 2004) (شکل ۱). این بخش از ایران مرکزی در طی مزوزویک و سنوزویک به منطقه‌های پرتحرک و پویا تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که هرکدام از بلوک‌ها ویژگی جداگانه داشته‌اند و فعالیت آنها با یکدیگر یکسان نبوده است (Fürsich et al. 2003; Aghanabati 2004; Seyed-Emami et al. 2004). تحولات تکتونیکی-رسوبی شرق ایران مرکزی در طی تریاس پسین تا ژوراسیک پسین تحت تأثیر وقایع تکتونیکی سیمرین بوده است (Seyed-Emami et al. 2004, 2020; Fürsich 2009, 2021; Wilmsen et al. 2005; et al. 2005). سازند هجدک بخشی از گروه شمشک در ایران مرکزی است که در طی ژوراسیک میانی در این محدوده متأثر از عملکرد نیروهای تکتونیکی حاصل از گسل‌های بزرگی چون گسل نایبند و کلمرد و نیز تغییرات حوضه رسوب‌گذاری، تغییرات سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی بسیار زیادی دارد. مطالعات زیست چینه‌ای به تعیین سن این سازند (باژوسین پیشین) در شرق ایران مرکزی منجر شده است (Seyed-Emami et al. 2020). مطالعات زیست چینه‌نگاری و محیط رسوبی بر سازند هجدک در بلوک طبس انجام شده که به بازسازی شرایط محیطی این سازند منجر شده است (Vaez-Javadi and Mirzaei-Ataabadi 2006; Vaez- 2023; Badihagh et al. 2019; Khalilzadeh et al. 2023; Salehi et al. 2023). با وجود اهمیت این سازند در بازسازی شرایط تکتونیکی-رسوب‌گذاری، توجه زیادی به تغییرات رخساره این سازند در منطقه معدن پروده در شمال بلوک طبس نشده است. براساس مطالعات اولیه انجام‌شده در بخش شمالی بلوک طبس، سازند هجدک در محیط‌های متفاوتی نظیر دریاچه‌ای، مردابی، دلتایی، رودخانه‌ای و دشت‌های

سیلابی و همچنین دریایی تشکیل شده است (Seyed-Emami 2006). et al. رخساره‌ها و محیط رسوبی این سازند در بسیاری از مناطق شمالی بلوک طبس، از جمله محدوده معدن زغال‌سنگ پروده ناشناخته است که شناسایی آنها در بازسازی جغرافیایی دیرینه این منطقه و بخشی از لبه شرقی بلوک طبس در طی ژوراسیک میانی، به‌ویژه در رخنمون زیر ناپیوستگی مرتبط با واقعه کوهزایی سیمرین میانی اهمیت دارد. با توجه به ذخیره زمین‌شناسی، ۱/۱ میلیارد تن زغال‌سنگ کک‌شو در منطقه طبس این منطقه، از نظر مطالعات دقیق‌تر زمین‌شناسی با هدف توسعه و افزایش تولید ملی زغال‌سنگ اهمیت دارد. به‌منظور رسیدن به اهداف ذکرشده، از روش‌های مطالعات صحرایی، تحت‌الارضی و آزمایشگاهی استفاده و سپس تمام داده با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه تلفیق و تاریخچه رسوب‌گذاری سازند هجدک و جغرافیای دیرینه منطقه مطالعه‌شده تفسیر شده است. همچنین معرفی ویژگی‌های لاگ رخساره‌های این سازند در گمانه‌های اکتشافی حفرشده در توسعه و شناخت فازهای اکتشافی و در حال استخراج توالی‌های زغال‌دار منطقه مطالعه‌شده و دیگر مناطق مشابه مفید است. در این تحقیق سازند هجدک در شمال حوضه زغال‌دار پروده - نایبند و در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب طبس در محدوده معدن زغال‌سنگ پروده، که از نظر ساختاری در زون ایران مرکزی در پهنه (زیر بلوک) نایبند از بلوک طبس واقع‌شده است، مطالعه می‌شود (شکل ۱). منطقه زغال‌دار پروده از لحاظ تقسیم‌بندی‌های ساختاری انجام‌شده به پنج بلوک ۱ تا ۴ و بلوک شرقی تقسیم شده است. رخنمون مدنظر در محدوده بلوک پروده ۱ (یال جنوبی تاقدیس ساندویچ) و مختصات جغرافیایی آن به شرح زیر است:

32°59'42.41" N 56°48'12.94" E



شکل ۱- نقشه راه‌های ارتباطی منطقه مطالعه شده (که روی آن مرز بلوک‌های ساختاری شرق ایران مرکزی مشخص شده است) (برگرفته با تغییرات از Wilmsen et al. 2009). منطقه مطالعه شده شامل محدوده معدن زغال‌سنگ پروده طیس در قسمت شرقی بلوک طیس واقع شده است.

Fig 1- Road map of the studied area along with the border of the structural blocks of East Central Iran is shown (modified after Wilmsen et al. 2009). The studied area is located in the Parvadeh Coal Mine in eastern part of the Tabas Block.

روش مطالعه

برای انجام مطالعات صحرایی پس از بررسی و مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی شرق ایران مرکزی، در بازدید از رخنمون از GPS برای تعیین مختصات جغرافیایی قاعده برش مطالعه شده، استفاده شده است. در این مطالعه، ضخامت سازند با ابزار ژاکوب تعیین شد (Sdzuy and Monninger 1985). نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک و در فواصل منظم دو متری و گاهی با توجه به تغییر رخساره‌ها انجام و تعداد ۲۵ نمونه از ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها برداشت شد. برداشت جهت جریان دیرینه با استفاده از ساخت‌های رسوبی جهت‌دار، به کمک کمپاس انجام شد. رخساره‌های سنگی آواری براساس تقسیم‌بندی میال (Miall 1985, 2014) شناسایی و معرفی شده‌اند. همچنین مطالعه در یک گمانه اکتشافی در محدوده بلوک شرقی معدن زغال‌سنگ پروده طیس (معدن پروده یک)، با هدف بررسی خصوصیات رسوب‌شناسی این سازند در مقاطع تحت‌الارضی و مقایسه آن با برش سطح‌الارضی مجاور انجام شده است. با توجه به اینکه از چاه‌های اکتشافی، مغزه و

خرده‌های حفاری وجود ندارد، فقط از ستون سنگ‌شناسی و لاگ الکتریکی گامای طبیعی موجود از این چاه استفاده شده است.

چینه‌شناسی ژوراسیک زیرین تا میانی در بلوک طیس

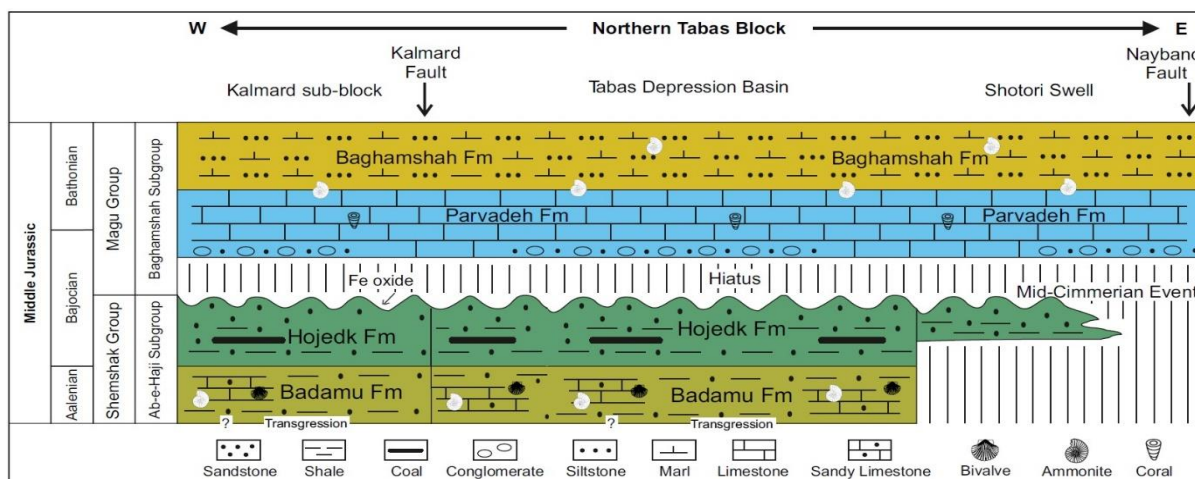
در ایران مرکزی مشابه برخی بخش‌های بلوک ایران، یک تغییر مشخص در تبدیل سنگ‌های کربناته تریاس میانی به سنگ‌های سیلیسی آواری گروه شمشک (تریاس پسین تا ژوراسیک میانی) مشاهده می‌شود (Seyed-Emami 2003; Fürsich et al. 2005, 2009).

گروه شمشک توالی ضخیمی از سنگ‌های سیلیسی آواری ته‌نشست‌یافته در محیط‌های رودخانه‌ای، مردابی، ساحلی و دریایی است و یک چرخه بزرگ ساختاری-رسوبی است که با رویدادهای سیمرین پیشین (کارنین) و سیمرین میانی (باژوسین میانی) محدود شده است (Aghanabati, 1998a, b; Seyed-Emami et al. 2001). همسانی و انطباق رخساره‌های چینه سنگی گروه شمشک (نورین تا باژوسین زیرین) در

مرکز و شمال ایران نشان می‌دهد که صفحه ایران در طول این چرخه به صورت یک پهنه یکپارچه و پیوسته عمل کرده است. درواقع خردشدن صفحه ایران به واحدهای ساختاری و رسوبی متعدد، مانند بلوک‌های لوت، طبس، پشت‌بادام، یزد و غیره در رابطه با رویداد سیمین میانی در آخر بازوسین پیشین انجام شده است (Seyed-Emami and Alavi-Naini 1990). در این میان رویدادهای سه گانه سیمید، بیشترین تأثیر را بر زمین‌ساخت مرکز و شمال ایران داشته است (Wilmsen et al. 2009). گروه شمشک در ایران مرکزی شامل سازندهای ناینند، آب حاجی (شمشک)، بادامو و هجدک است (Aghanabati 1998a) (شکل ۲) و عمدتاً از تناوب ماسه‌سنگ، سیلتستون و شیل تشکیل و با داشتن رنگ خاکستری تیره تا سبز و تناوب‌های زغال‌سنگ، کنگلومرا و افق‌های دریایی (کربناته) شناخته می‌شود (Asserto 1966; Aghanabati 1998b).

سازند هجدک چهارمین و آخرین عضو از گروه شمشک در ایران مرکزی است که در شرق ایران مرکزی از جمله بلوک طبس به صورت توالی‌های بسیار ضخیم از رسوبات آواری و با میان‌لایه‌هایی از سنگ‌آهک‌های پرفسیل دریایی، گسترش چینه‌شناسی دارد (Aghanabati 2004; Seyed-Emami et al. 2006; Yahya Shibani 2021). این سازند آواری از ماسه‌سنگ‌های قهوه‌ای و شیل سبزرنگ تشکیل شده و به صورت پیوسته، اما با مرز مشخص بر سازند آهکی بادامو و به صورت ناپیوسته و با مرز فرسایشی در زیر سازند پروده قرار گرفته است. سازند هجدک در برخی مناطق بلوک طبس نظیر منطقه کلشانه و مزینو تا چند صد متر ضخامت دارد (Wilmsen et al. 2009; Salehi et al. 2023)، اما این سازند

تغییرات ضخامت و محیط رسوبی درخور توجهی در این منطقه دارد، به طوری که ضخامت آن در مناطقی مانند معدن زغال‌سنگ پروده، تا چند ده متر کاهش می‌یابد و حتی در بخشی از مناطق، مانند بالاآمدگی شتری کاملاً فرسایش یافته و یا رسوب‌گذاری نشده است (Wilmsen et al. 2009). نام سازند هجدک از دهکده و معادن زغال‌سنگ هجدک در نزدیکی زرند کرمان گرفته و در منطقه طبس به آن نام غیررسمی سازند مزینو نیز اطلاق می‌شود (Yahya Shibani 2021). سازند هجدک شامل مجموعه‌ای گسترده از رسوبات آواری نظیر ماسه‌سنگ و شیل‌های سبز، خاکستری و قهوه‌ای است که ضخامت آنها در منطقه طبس، به ویژه در جنوب بلوک طبس در منطقه زرند و راور به بیش از ۱۰۰۰ متر می‌رسد. مرز بالایی سازند هجدک منطبق بر رویداد سیمین میانی بوده و با رسوبات دریایی سازند پروده پوشیده می‌شود. بارزترین ویژگی این سازند، وجود لایه‌هایی از زغال‌سنگ حرارتی است که گستره وسیعی از ناحیه کرمان تا شمال طبس را در بر می‌گیرند. همچنین سازند هجدک از نگاه فسیل‌شناسی شامل مجموعه‌ای از فسیل‌های گیاهی و جانوری، به ویژه دو کفه‌ای‌هاست (Vaez-Javadi and Mirzaei- 2023; Khalilzadeh et al. 2016; Vaez-Javadi 2006; Ataabadi 2006). سازند هجدک در شرق بلوک‌های طبس و لوت، رخساره‌های دریایی دارد و با فسیل‌های آمونیت تعیین سن شده است (Seyed-Emami et al. 2004). سن سازند هجدک براساس مطالعات بایواستراتیگرافی سازندهای کربناته زیر و رو، بازوسین پیشین در نظر گرفته شده است (Seyed-Emami et al. 2020). گروه شمشک نیز با ناپیوستگی سیمین میانی در رأس سازند هجدک خاتمه می‌یابد (شکل ۲).



شکل ۲- تطابق چینه‌شناسی توالی‌های رسوبی ژوراسیک میانی در شمال بلوک طبس در شرق ایران مرکزی (Wilmsen et al. 2009; Salehi et al. 2023)

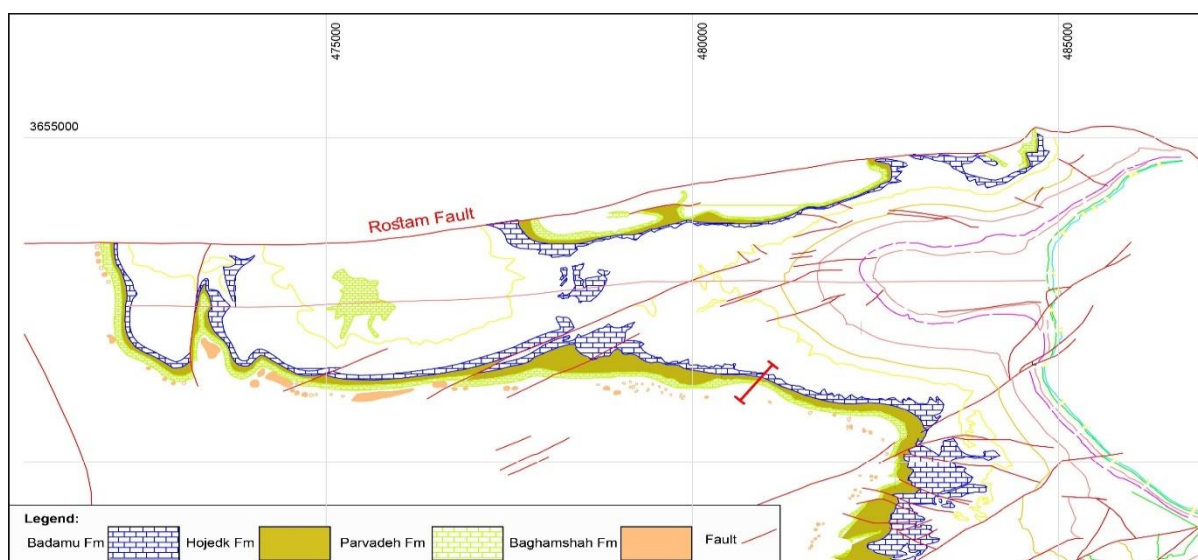
Fig 2- Stratigraphic correlation chart of the Middel Jurassic sedimentary strata in the north of Tabas Block in east central Iran (Wilmsen et al. 2009; Salehi et al. 2023)

مرز زیرین سازند هجدک بر نهشته‌های کربناته (سنگ آهک) سازند بادامو به صورت پیوسته، اما مشخص قرار گرفته است (شکل ۳). مرز بالایی سازند هجدک در محدوده معدن پروده به صورت ناپیوسته با مرز فرسایشی در زیر سازند پروده مشخص شده است که عمدتاً لیتولوژی سنگ آهک و شیل دارد.

چینه‌شناسی سازند هجدک در برش معدن پروده

برش سطح‌الارضی مطالعه‌شده

این برش در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ غرب شکسته آبشاله (Masoudi et al. 2004) قرار دارد. ضخامت سازند هجدک در این برش ۴۰ متر است. مجموعه‌های سنگی در این برش شامل ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا و سیلتستون است.



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی معدن زغال‌سنگ پروده طبس (که محل برش مطالعه‌شده سازند هجدک، در بین سازندهای بادامو و پروده، بر آن با خط قرمز مشخص شده است) (برگرفته از گزارش داخلی معدن پروده)

Fig 3- Geological map of Parvadeh Coal Mine. The location of the Hojedk Formation in outcrop (between Badamu and Parvadeh formations) is marked with a red line (adopted from unpublished internal report of Parvadeh Coal Mine).

در سازند هجدک در برش معدن پروده، پنج واحد چینه سنگی شناسایی و تفکیک شده است که از پایین به بالا مشخصات آنها شرح داده شده است:

واحد ۱

این بخش شامل لایه‌هایی از شیل، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک است که ۱۰ متر ضخامت دارد و با مرز پیوسته و مشخص بر سنگ‌های آهکی سازند بادامو قرار گرفته است (شکل‌های ۴ A و ۸). لایه انتهایی سازند بادامو یک سنگ‌آهک خاکستری تیره با بافت ایبد گرینستون است. شروع سازند هجدک با لایه شیلی به ضخامت ۳/۸ متر با رنگ سبز تیره است که با یک مرز مشخص از لایه ماسه‌سنگی خیلی ریز (۰/۲ متر) با رنگ قهوه‌ای در بالا تفکیک شده است. سنگ‌آهک ماسه‌ای قرمز تا قهوه‌ای در این واحد دارای فسیل نظیر دوکفه‌ای و اکیونئید است و در کل توالی به سمت بالا ریزشونده است (شکل ۸). در ادامه این واحد شیل‌های با رنگ سبز روشن دارد.

واحد ۲

این بخش ۶ متر ضخامت دارد و از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سیلتستون تشکیل شده است. در کنگلومراها قطعه‌های قرمز تیره به همراه خرده‌های گیاهی و آثار تنه درختان مشاهده می‌شود. ماسه‌سنگ‌ها ریپل رورانه (climbing ripple) و ریپل موجی دارند و همچنین بقایای گیاهی و ساقه درختان نیز در این بخش مشاهده می‌شود (شکل ۸). سیلتستون‌های این واحد رنگ نارنجی تا زردرنگ دارند.

واحد ۳

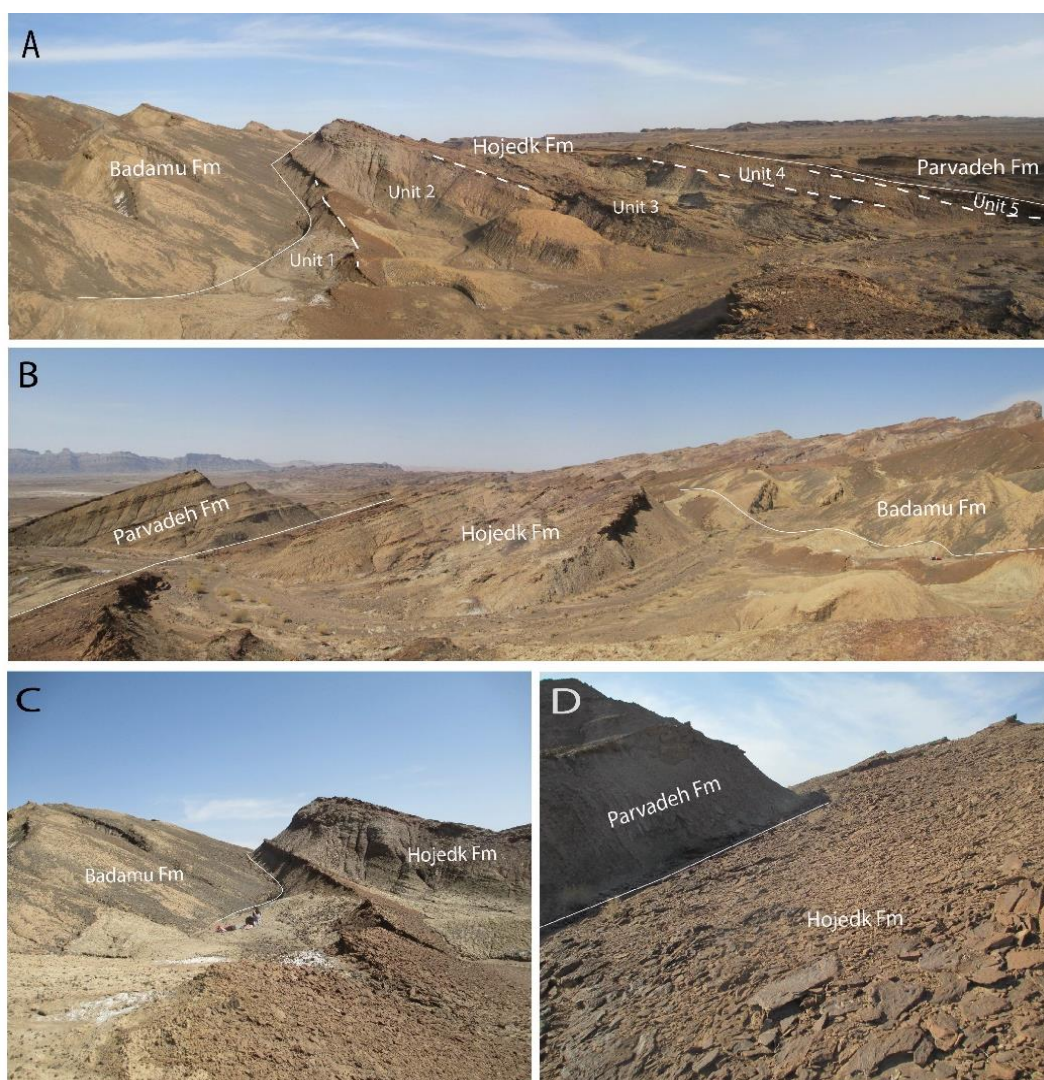
این بخش دارای کنگلومرا، شیل، سیلتستون و ضخامت زیادی ماسه‌سنگ است که به ۱۰٫۵ متر می‌رسد. سیلتستون‌ها رنگ روشن و شیل‌ها سبز روشن دارند. ماسه‌سنگ‌ها دارای رنگ روشن و خاکستری روشن همراه با خرده‌های گیاهی‌اند و سوراخ‌های حفرشده عمودی در این بخش مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اثر فسیل و آشفته‌گی زیستی است. طبقه‌بندی مورب مسطح و ریپل‌های موجی از ساخت‌های رسوبی مشاهده‌شده در این بخش است (شکل ۸).

واحد ۴

بخش چهارم ۹/۵ متر ضخامت دارد و بیشترین ضخامت این بخش به شیل اختصاص یافته است، همچنین سیلتستون و کنگلومرا نیز در این بخش حضور دارد. شیل رنگ خاکستری تیره و سیلتستون‌ها خاکستری روشن دارند. لایه نازک کنگلومرای شامل آشفته‌گی زیستی بالا و قلوه‌های آواری با گردش‌گی بالاست (شکل ۸).

واحد ۵

آخرین بخش شامل ۳/۵ متر شیل و ماسه‌سنگ است که شیل‌ها رنگ سبز دارند. در این واحد سه لایه ماسه‌سنگی وجود دارد که دو لایه بالایی صورتی‌رنگ‌اند و اندازه ماسه در آنها متوسط تا درشت است؛ اما لایه ماسه‌سنگی سوم، سبزرنگ و اندازه دانه‌های آن متوسط است. در ماسه‌سنگ‌های این بخش، ساخت رسوبی طبقه‌بندی مورب عدسی‌شکل و مسطح و ریپلی وجود دارد (شکل ۸).



شکل ۴- نمای کلی از منطقه و رخنمون سازند مطالعه‌شده: A- واحدهای چینۀ سنگی تفکیک‌شده در سازند هجدک به همراه سازندهای زیر و رو؛ B- سازند هجدک با سازند پروده پوشیده شده و بر سازند بادامو قرار گرفته است؛ C - نمای نزدیک از مرز زیرین سازند هجدک که به صورت پیوسته، اما مشخص بر سنگ‌آهک‌های اوولیتی سازند بادامو قرار گرفته است؛ D- نمای نزدیک از مرز بالای سازند هجدک که با مرز فرسایشی در زیر سازند پروده قرار گرفته است.

Fig 4- Field view of the studied area and the outcrop of Hojedk Formation with over and underling formations. A- Identified lithostratigraphic units in the Hojedk Formation. B- The Hojedk Formation is underlined by the Parvadeh Formation and is overlain on top of the Badamu Formation. C - Close-up view of the lower boundary of the Hojedk Formation, which is conformable but sharp on the oolitic limestones of the Badamu Formation. D- A close-up view of the upper boundary of the Hojedk Formation, which is an erosional unconformity placed under the Parvadeh Formation.

است (جدول ۱):

رخساره‌های شناسایی‌شده

براساس مطالعات صحرایی و در نظر گرفتن پارامترهای فوق رخساره‌های سنگی مشاهده‌شده در سازند هجدک، رخساره‌های آواری به سه دسته دانه‌درشت، متوسط و ریز و یک رخساره سنگی کربناته تقسیم شده است که به شرح زیر

رخساره‌های سنگی دانه‌درشت

رخساره گراولی دانه‌پشتیان توده‌ای (Gcm)

توصیف: این رخساره در بخش انتهایی توالی سازند هجدک



و ساخت طبقه‌بندی مورب عدسی‌شکل و در برخی نقاط توده‌ای است. دانه‌های گراول ترکیب اکسید آهن و به رنگ قرمز دارند و مقدار زیادی ماتریکس شامل ماسه دانه‌ریز کرمی‌رنگ، فضای بین دانه‌ها را پر کرده است (شکل ۵-B). این رخساره گردشگری خوب و جورشدگی ضعیفی دارد و در بخش بالایی به رخساره‌های دانه متوسط ماسه‌سنگی با ساخت رسوبی طبقه‌بندی مورب مسطح با رنگ سبز روشن تبدیل می‌شود. مرز زیر به صورت فرسایشی است.

تفسیر: با توجه به گردشگری خوب و جورشدگی ضعیف دانه‌های آواری، حاکی از انرژی بالا و بار رسوبی متوسط در محیط قاره‌ای است. احتمالاً جریان این رخساره، ویسکوزیته کمی دارد و بیشتر تحت تأثیر جریان و کمتر تحت تأثیر دانه است. رنگ قرمز دانه‌ها، نشان‌دهنده اکسیدان‌بودن محیط در زمان تشکیل رخساره است. با توجه به رخساره‌های مجاور این رخساره، احتمالاً به صورت کانال‌های رودخانه‌ای کوچک مقیاس در دشت ساحلی است (Fürsich and Flessa 1987).

رخساره‌های سنگی دانه متوسط

رخساره ماسه‌سنگی با لایه‌های مورب عدسی (St)

توصیف: این رخساره لایه‌بندی مورب عدسی دارد و با اندازه دانه از ماسه ریز تا متوسط دیده می‌شود (شکل ۵-C). لایه‌های مورب دارای زاویه‌ای بین ۱۰ تا ۳۰ درجه است. ذرات ماسه از دید بلوغ بافتی، گردشگری و جورشدگی متوسط تا خوب دارد. حداکثر ضخامت این رخساره، در واحد سنگی دوم در حد نیم‌متر است و بر رخساره کنگلومرای Gt قرار می‌گیرد و در بالا به رخساره ماسه‌سنگ با طبقه‌بندی مورب مسطح تبدیل می‌شود.

تفسیر: این رخساره نیز بیشتر در اثر حرکت ریپل مارک‌ها یا مگاریپل‌های سه‌بعدی با خط رأس سینوسی حاصل می‌شوند (Miall 2014). تشکیل این رخساره در سازند هجدک، حاصل پرشدن کانال‌های رودخانه‌ای در دشت ساحلی است.

حضور دارد و شامل دانه‌های اصلی در اندازه پیل، با دامنه تغییر اندازه ۳ تا ۵ سانتی‌متر با جورشدگی نسبتاً خوب، اما فاقد ساخت رسوبی و آرایش منظم است. همچنین گردشگری پیل‌ها خوب است. در این رخساره مقدار ناچیزی ماتریکس در فضای بین پیل‌ها حضور دارد، اما در محدود نقاطی مقدار گل بیشتر می‌شود و درکل دانه‌پشتیبان است (شکل ۵-A). همچنین علاوه بر قطعات پیل آواری، قطعات فسیل‌های بزرگ نظیر دوکفه‌ای و بلمنیت در آن مشاهده می‌شود. رنگ غالب این رخساره، به‌ویژه قطعات پیل قرمز است. در زمینه این رخساره، آثار حفر موجودات به‌وضوح مشاهده می‌شود. ضخامت این رخساره کمتر از ۲۰ سانتی‌متر، اما امتداد جانبی درخور توجهی دارد (شکل ۵-A). مرز زیر و رو مشخص و مرز رو به صورت فرسایشی است. جنس قطعات عمدتاً آواری (از نوع ماسه‌سنگ) هستند. این کنگلومرا به مرز زیرین سازند پروده مربوط است.

تفسیر: فراوانی پیل‌ها با جورشدگی نسبتاً خوب، نشان‌دهنده جریان با انرژی و سرعت بالاست. همچنین اندازه قطعات در حد پیل نشانگر نزدیکی به محل منشأ ذرات آواری است. کنگلومراهای با جورشدگی خوب از محیط‌های مختلفی گزارش شده‌اند (Zhang et al. 2020). این رخساره احتمالاً به صورت بار بستر و در اثر جریان‌های رفت و برگشت امواج ساحلی تشکیل شده است که سرعت و انرژی بالایی دارند (Reading 2009). با توجه به رنگ غالب قرمز این رخساره، به شرایط اکسیدان محیط در زمان تشکیل پی برده می‌شود.

رخساره گراولی همراه با ساخت طبقه‌بندی مورب عدسی (Gt)

توصیف: این رخساره در بخش میانی سازند مشاهده شده است که ضخامت حداکثر ۲۰ سانتی‌متر را شامل می‌شود. از ویژگی اصلی این رخساره، وجود ذرات دانه‌درشتی در حد پیل تا گرانول با دامنه تغییر اندازه چند میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر

رخساره ماسه‌سنگی با لایه‌های مورب مسطح (Sp)

توصیف: در این رخساره سنگی، اندازه دانه‌ها از ماسه ریز تا متوسط (۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر) در تغییر است و در بیشتر موارد جورشدگی و گردشدگی خوبی دارند. این رخساره، لایه‌بندی مورب مسطح در برخی موارد با زاویه کم (بین ۱۰ تا ۲۰ درجه) و در برخی دیگر با زاویه بیشتر (۳۰ تا ۴۰ درجه) دارد. حداکثر ضخامت این رخساره در واحد سنگی دوم و پنجم، در حد نیم‌متر است و بر رخساره ماسه‌سنگی St قرار می‌گیرد و در بالا به رخساره ماسه‌سنگ با طبقه‌بندی افقی تبدیل می‌شود (شکل D-۵).

تفسیر: این رخساره بیشتر در اثر حرکت ریپل‌های دوبعدی و با خط رأس مستقیم تشکیل می‌شود (Ghosh et al. 2006). همچنین، ماسه‌سنگ‌های همانند با این رخساره، نهشته‌های سدهای زبانه‌ای یا متقاطع در شرایط رژیم جریانی پایین تفسیر شده است (برای نمونه Khalifa and Catuneanu 2012; Tewari et al. 2008; Türkmen et al. 2007; Miall 2006).

رخساره‌های ماسه‌سنگی با لایه‌های افقی (Sh)

توصیف: از ویژگی‌های اصلی این رخساره، وجود لایه‌ها و لامیناسیون‌های موازی و افقی در حد میلی‌متر است که بیشتر لایه‌هایی با ضخامت حداکثر تا ۲ متر را به وجود می‌آورند. رخساره Sh در ماسه‌سنگ‌های با اندازه دانه در حد ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر تشخیص داده شده است. همچنین از لحاظ بافتی دارای جورشدگی و گردشدگی بالایی است. این رخساره در واحد سنگی پنجم بر رخساره ماسه‌سنگی Sr و St قرار می‌گیرد و در بالا با مرز فرسایشی به رخساره Gcm تبدیل می‌شود (شکل E-۵).

تفسیر: این رخساره، در رسوبات با اندازه و سرعت‌های مختلف جریان آب تشکیل می‌شود (Ghazizadeh and Mounsey 2009)؛ به‌طوری که در جریان‌های با انرژی بالا، لامیناسیون‌ها بیشتر در رسوبات در حد ماسه و سیلت شکل گرفته‌اند و همراه با ریپل مارک نیستند، برخلاف آن در جریان‌های با انرژی پایین، لامیناسیون‌های افقی بیشتر در

رسوبات ماسه‌ای با اندازه دانه بیشتر از ۰/۶ دیده شده است که در چنین حالتی نیز سرعت جریان به حد شکل‌گیری ریپل نیست (Ghazizadeh and Mounsey 2009; Higgs et al. 2012). به نظر می‌رسد در سازند هجدک، رخساره Sh در سرعت‌های پایین و بالای جریان آب تشکیل شده است.

رخساره ماسه‌سنگی ریپلی (Sr)

توصیف: رخساره Sr یکی از رخساره‌های شناسایی‌شده متداول در سازند هجدک در واحدهای سنگی دوم، سوم و پنجم است (شکل A-۶). شکل‌های ریپلی در سازند هجدک، از نوع سینوسی و با خط‌الرأس مستقیم متقارن‌اند. این ریپل‌ها در سازند هجدک، از نوع موجی تشکیل شده‌اند. این رخساره ضخامت در حد یک متر دارد و اندازه دانه‌ها در این رخساره، در حد ماسه بسیار ریز تا ریز در تغییر است. در رخساره Sr، جورشدگی و گردشدگی دانه‌ها زیاد و از لحاظ بافتی بالغ است. این رخساره زیست‌آشفته‌گی فراوانی دارد (شکل B-۶) و همچنین در سطح لایه اثر فسیل اسکولایتوس در این رخساره مشاهده شد (شکل C-۲).

تفسیر: در این رخساره ریپل مارک‌های موجی نشان‌دهنده تشکیل آنها در محیط‌های تحت تأثیر امواج ساحلی است (Davis 2012). ریپل مارک‌های جریانی نتیجه رسوب‌گذاری از طریق جریان‌های یک طرفه در محیط‌های رودخانه‌ای است (برای نمونه Higgs et al. 2012). با توجه به مشاهده هر دو نوع ریپل مارک متقارن و جریانی در سازند هجدک، وجود محیط‌های رسوبی زیر آب و قاره‌ای تأیید می‌شود. اثر فسیل‌ها یا سنگواره‌های اثری ساختارهایی به‌جامانده از جانداران در رسوبات است. ساختمان‌های زیست‌آشفته وقتی تشکیل می‌شوند که فعالیت جانداران رسوب را در هم می‌ریزد (Vaziri-Moghaddam et al. 2005). اثر فسیل اسکولایتوس که نشان‌دهنده انرژی بالای امواج جریان است و در بسترهای ماسه‌ای جورشدگی محیط‌های دریایی ایجاد می‌شود. این اثر رخساره در محیط‌های بالایی و میانی حاشیه ساحلی و پیش‌ساحل و به‌طور خاص در

محیط‌های جزر و مدی (intertidal) تشکیل می‌شود که تغییرات ناگهانی در میزان رسوب‌گذاری، فرسایش و انتقال مجدد رسوبات متداول است (MacEachern et al. 2007).

رخساره سنگی دانه‌ریز

رخساره گلی (سیلت) دارای لامیناسیون (Fl)

توصیف: رخساره Fl از رخساره‌های متداول در واحد سنگی دوم تا چهارم است و شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دانه‌ریز گل‌سنگی است که اندازه دانه‌ها بیشتر در حد رس است، ولی در برخی بخش‌های توالی به دانه‌های در حد ماسه ریز یا سیلت تبدیل می‌شود. لامیناسیون‌های موازی مهم‌ترین ساخت رسوبی این رخساره سنگی است (شکل ۶-۵).

تفسیر: این رخساره بیشتر در انرژی‌های پایین جریان آب و در نتیجه جریان‌های معلق، حاصل شده است (Higgs et al. 2012).

رخساره گلی (شیل) بدون لامیناسیون (Fm)

توصیف: این رخساره بدون هرگونه لایه‌بندی و ساخت رسوبی است و معمولاً در سازند هجدک به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود. رخساره Fm در برش مطالعه‌شده در واحدهای سنگی یک و چهارم فراوانی بیشتری دارد و در حدود ۵ متر ضخامت دارد و همراه با رخساره Fl نیز مشاهده می‌شود. این رخساره در بالا، به صورت تدریجی به رخساره ماسه‌سنگی نیز تبدیل می‌شود (شکل ۶-۵).

تفسیر: همراهی این رخساره با رخساره‌های دانه‌ریز، حاکی از رسوب‌گذاری سریع ذرات معلق در آب در یک محیط کم‌انرژی مانند دشت‌های سیلابی محیط رودخانه‌ای یا دشت‌های ساحلی است (Miall 2006; Zamani et al. 2023).

رخساره کربناته براکیوپود اکتینوئید گرینستون-پکستون (Brachiopod, Echinoid Grainstone to Packstone)

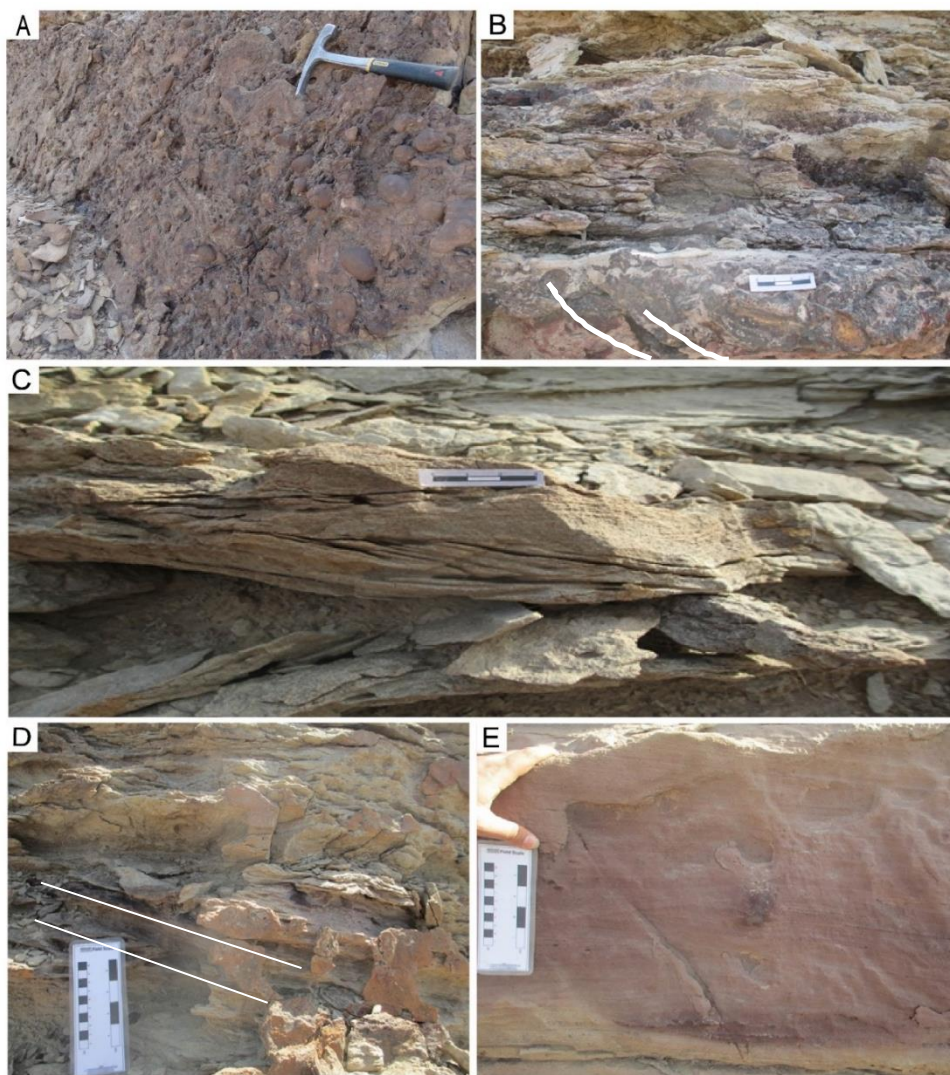
توصیف: رنگ ظاهری این رخساره کربناته در رخنمون قرمز

تا قهوه‌ای است و ضخامت در حد ۲۰ سانتی‌متر در بخش پایینی (واحد سنگی یک) سازند مشاهده شده است. این رخساره ماکروفسیل‌هایی نظیر دوکفه‌ای، براکیوپود و اکتینوئید دارد (شکل ۶-۴). مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که آلوم‌های اصلی این ریزرخساره اکتینوئید و براکیوپود است. خار براکیوپود نیز یکی از قطعات همراه این رخساره است. همچنین این رخساره، علاوه بر براکیوپود و اکتینوئید، قطعاتی از دوکفه‌ای‌ها، استرا (یکی از مهم‌ترین گروه‌های دوکفه‌ای‌های کلسیتی)، لاله‌وش و دانه‌های پراکنده کوارتز دارد. بافت این رخساره پکستون و زمینه میکرایتی در آن بسیار ناپیچ است و گاهی بافت گرینستونی را نشان می‌دهد. مخلوطی از سیمان کلسیت اسپاری و گل‌های آهکی، زمینه بین این آلوم‌ها را تشکیل می‌دهد. قطعات اسکلتی بیشتر حاشیه میکرایتی ضخیم دارند. ذرات آواری کوارتز در اندازه ماسه‌ریز تا متوسط و در زمینه اسپاریتی پراکنده شده است.

تفسیر: اکتینوئیدها در محیط‌های دریایی با آب گرم و نیز آب سرد رایج‌اند و در شوری نرمال و بازه بسیار محدودی از شوری (معمولاً در حد چند پی‌پی‌ام) زندگی می‌کنند (Scholle and Ulmer-Scholle 2006). براکیوپودها نیز بیشتر جانداران دریایی بوده و هستند و اصولاً تمام براکیوپودها کفزی (چسبیده به سنگ بستر) است و در آب‌های مربوط به محیط‌های سکوبی و در عرض‌های جغرافیایی بالا تا پایین زندگی می‌کنند. براکیوپودها مربوط به آب‌های کم‌عمق و گرم، صدف‌های ضخیم‌تری نسبت به شکل‌های مربوط به آب‌های عمیق‌تر و سرد دارند (Scholle and Ulmer-Scholle 2006). دوکفه‌ای‌ها در محیط‌های کم‌عمق دریایی زندگی می‌کنند و بیشترشان در بستر حوضه ساکن‌اند (Scholle and Ulmer-Scholle 2006). با توجه به بافت این رخساره، این رخساره را معادل ریزرخساره استاندارد SMF18 معرفی‌شده به‌وسیله فلوگل (Fügel 2010) در نظر گرفته می‌شود. چنین رخساره‌هایی در سدها و کانال‌ها و همچنین تپه‌های ماسه‌ای (شول)، با جریان‌های جزرومدی در محیط‌های لاگونی

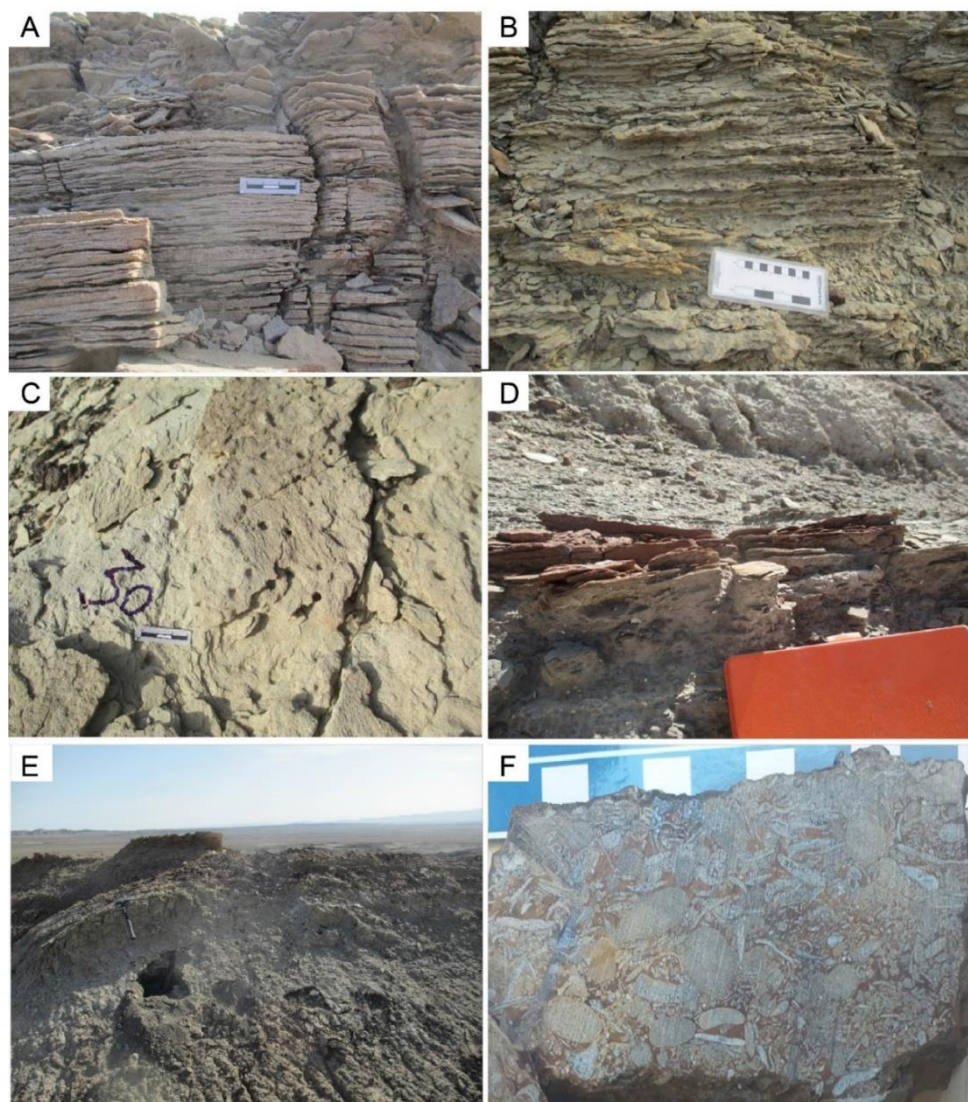
پرانرژی از راه کانال‌های قطع‌کننده سد و یا نهشته‌های مجاور
با پشته‌های بایوکلاستی/اولیتی است (Tucker and Wright
1990).

کم‌عمق و خلیج‌های محدود شده تشکیل می‌شوند (Flügel
2010). حضور با فابریک دانه‌پشتیان، بیان‌کننده جابه‌جایی آنها
از یک محیط کم‌انرژی نظیر لاگون به سمت محیط‌های



شکل ۵- تصاویر صحرایی از رخساره‌های سنگی دانه‌درشت و دانه‌متوسط شناسایی شده در سازند هجدک: A- رخساره کنگلومرای دانه‌پشتیان با ساخت توده‌ای مربوط به قاعده سازند پروده (Gcm); B- رخساره کنگلومرای با ساخت طبقه‌بندی مورب عدسی (Gt); C- رخساره ماسه‌سنگی با لایه‌های مورب عدسی (St); D- رخساره ماسه‌سنگی با لایه‌های مورب مسطح (Sp); E- رخساره‌های ماسه‌سنگی با لایه‌های افقی (Sh).

Fig 5- Field view of coarse- and medium-grained lithofacies identified in the Hojedk Formation; A- Clast supported conglomerate lithofacies related to the base of the Parvadeh Formation (Gcm); B- Trough cross-bedding conglomerate facies (Gt); C- Trough cross-bedding sandstone facies (St); D- Planar cross-bedding sandstone facies (Sp); E- Horizontal laminated sandstone facies (Sh).



شکل ۶- تصاویر صحرایی (A تا E) از رخساره‌های سنگی دانه متوسط و ریز شناسایی شده در سازند هجدک: A- رخساره ماسه سنگی ریلی (Sr); B- رخساره ماسه سنگی ریلی با آشفستگی زیستی (Sr); C- اثر فسیل اسکولایتوس در رخساره ماسه سنگی ریلی (Sr); D- رخساره گلی (سیلت) دارای لامیناسیون (Fl); E- رخساره گلی بدون لامیناسیون (Fm); F- تصویر نمونه دستی برش خورده از رخساره کربناته براکیوپود اکتینوئید گرینستون-پکستون (MF1).

Fig 6- Field view (A to E) of medium to fine-grained lithofacies identified in the Hojedk Formation; A- Ripple lamination sandstone facies (Sr); B- Ripple lamination sandstone facies with bioturbation (Sr); C- The Skolithos trace fossil in the ripple lamination sandstone facies (Sr); D- Laminated mudstone facies (silt) (Fl); E- mudstone facies without lamination (Fm); F- Image of a rock slab from the echinoid brachiopod Grainstone-Packstone microfacies (MF1).

عناصر ساختاری

مجموعه رخساره‌های سنگی سبب جدایش عناصر ساختاری می‌شود. عناصر ساختاری شامل شکل‌های رسوب‌گذاری و

فرسایشی می‌شود که بر پایه محیط رسوبی دسته‌بندی می‌شوند (Miall 2000). به منظور شناسایی عناصر ساختاری در سازند هجدک، ویژگی‌هایی مانند نوع سطح تماس زیرین و

تحتانی پوینت بار، رسوبات دانه‌درشت‌تر و در قسمت فوقانی رسوبات دانه‌ریزترند. پوینت بارها با توالی‌های ریزشونده به‌سوی بالا و با لایه‌بندی مورب شناخته می‌شود که از ماسه‌های دانه‌متوسط تشکیل شده است (Salehi 2014). مرز زیرین و بالایی این عنصر ساختاری به‌صورت تدریجی است، ضخامت آن ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر است و تا حدود ۱۰ درصد از کل توالی را به خود اختصاص می‌دهد. رخساره‌های سنگی St, Sp, Sh, و Sr سازنده این عنصر ساختاری و معمولاً این عنصر همراه با عنصر ساختاری کانال دیده می‌شود (شکل B-۷).

عنصر ساختاری باتلاق دشت ساحلی (CPS)

عنصر ساختاری باتلاق دشت ساحلی بیشتر از رخساره‌های سنگی ریزدانه و رخساره آلی زغال تشکیل شده است. لایه‌بندی در این عنصر ساختاری به‌صورت افقی، ولی گاهی نیز به‌صورت توده‌ای است که لایه‌های ماسه‌ای کروس‌های پهن دارد (شکل C-۷). در توالی مطالعه‌شده، مرز زیرین این عنصر ساختاری با رسوبات سد نقطه‌ای تدریجی و مرز بالایی در صورتی فرسایشی است که کانال وجود داشته باشد. ضخامت رخساره باتلاق دشت ساحلی از ۲ تا ۳ متر در نوسان است. رخساره‌های سنگی این عنصر ساختاری St, Fm, Sr, Gt, و Gcm است. رخساره باتلاق دارای آثار فسیلی گیاهی است که حمل‌بخشی از آنها را از طریق رودخانه به‌سوی دشت ساحلی و باتلاق‌های آن را نشان می‌دهد (Ojo and Akande 2009).

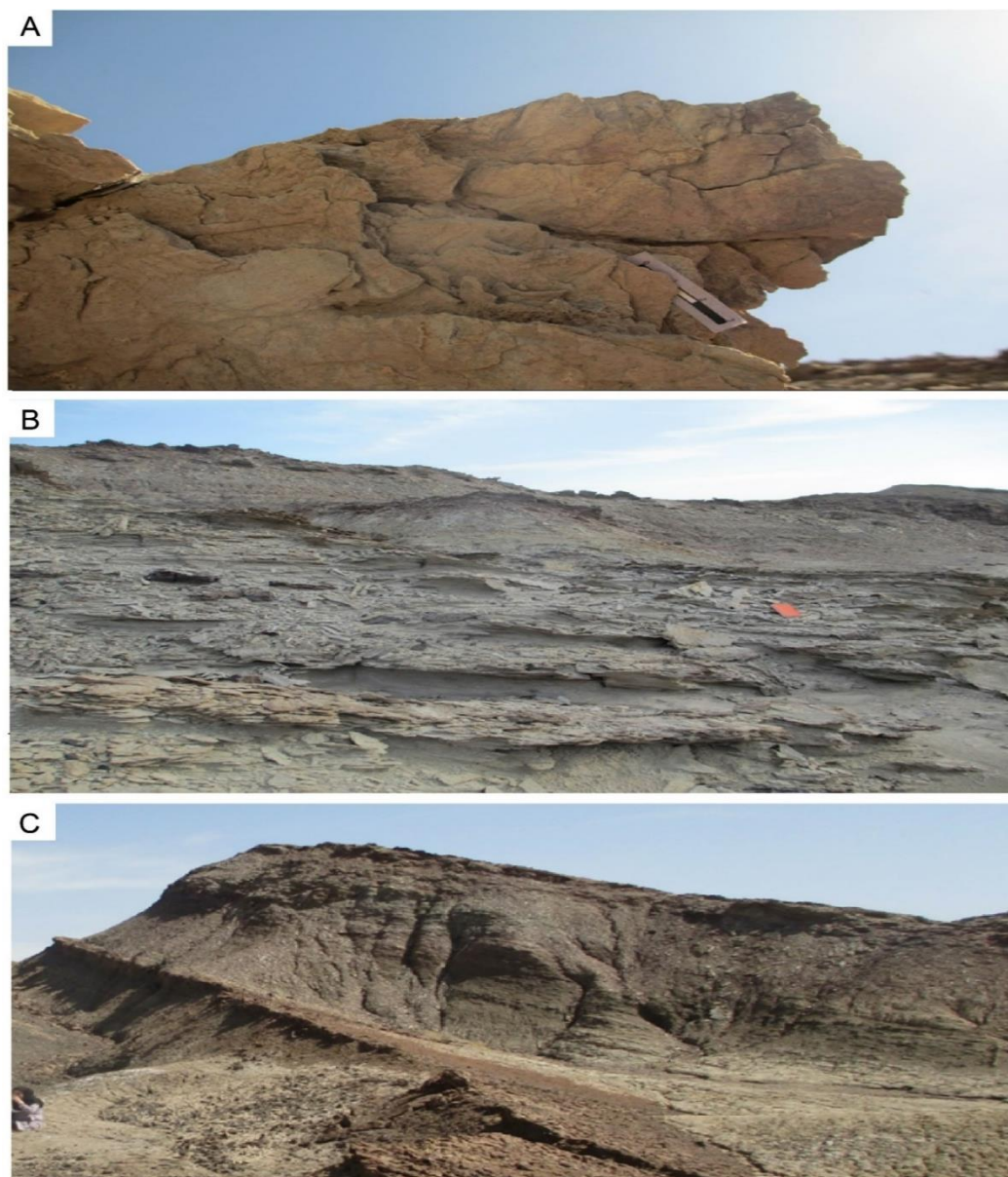
بالایی لایه‌ها، فرم هندسی رسوبات، نوع سنگ‌شناسی و رخساره آنها در نظر گرفته شده است (Salehi 2014). به‌طور کلی عنصر ساختاری کانال، پرکننده کانال و باتلاق دشت ساحلی در رسوبات سازند هجدک شناسایی شده است.

عنصر ساختاری کانال (CH)

این عنصر ساختاری به فرم رسوبات پرکننده کانال، با شکل هندسی کانالی و در بخش زیرین توالی‌های ریزشونده، در قسمت میانی سازند هجدک در برش مطالعه‌شده وجود دارند. بخش زیرین این عنصر ساختاری به‌صورت فرسایشی، ولی مرز بالایی آن به‌صورت تدریجی است. ارتفاع میانگین کانال‌ها ۱ متر است و پهنای آنها تا ۱۰ متر می‌رسد (شکل A-۷). کانال‌ها بیشتر به شکل منفرد در کنار هم قرار گرفته و گاه نیز به یکدیگر متصل‌اند و اثر حرکت جانبی در آنها دیده می‌شود. این عنصر ساختاری در رخنمون مطالعه‌شده در بخش میانی سازند نسبتاً فراوان است. رخساره‌های سنگی Sr, Sh, St, Gt, و Gcm سازنده این عنصر ساختاری‌اند و رخساره Gcm نشانگر بخش کف کانال است. گسترش جانبی زیاد کانال، نشان از جابه‌جایی زیاد این زیرمحیط است (Ghazi and Mountney 2009; Salehi et al. 2023).

عنصر ساختاری پرکننده کانال (پوینت بار) (PB)

این عناصر ساختاری در رودخانه‌هایی که پیچش زیاد دارند (رودخانه‌های مئاندری) و همچنین جزر و مدی تشکیل می‌شوند (Yeste et al. 2024). مرز زیرین این رسوبات با طبقات زیرین به‌صورت تخریبی است و رسوبات پوینت بار بر رسوبات کف کانال بر جای گذاشته می‌شود. در قسمت



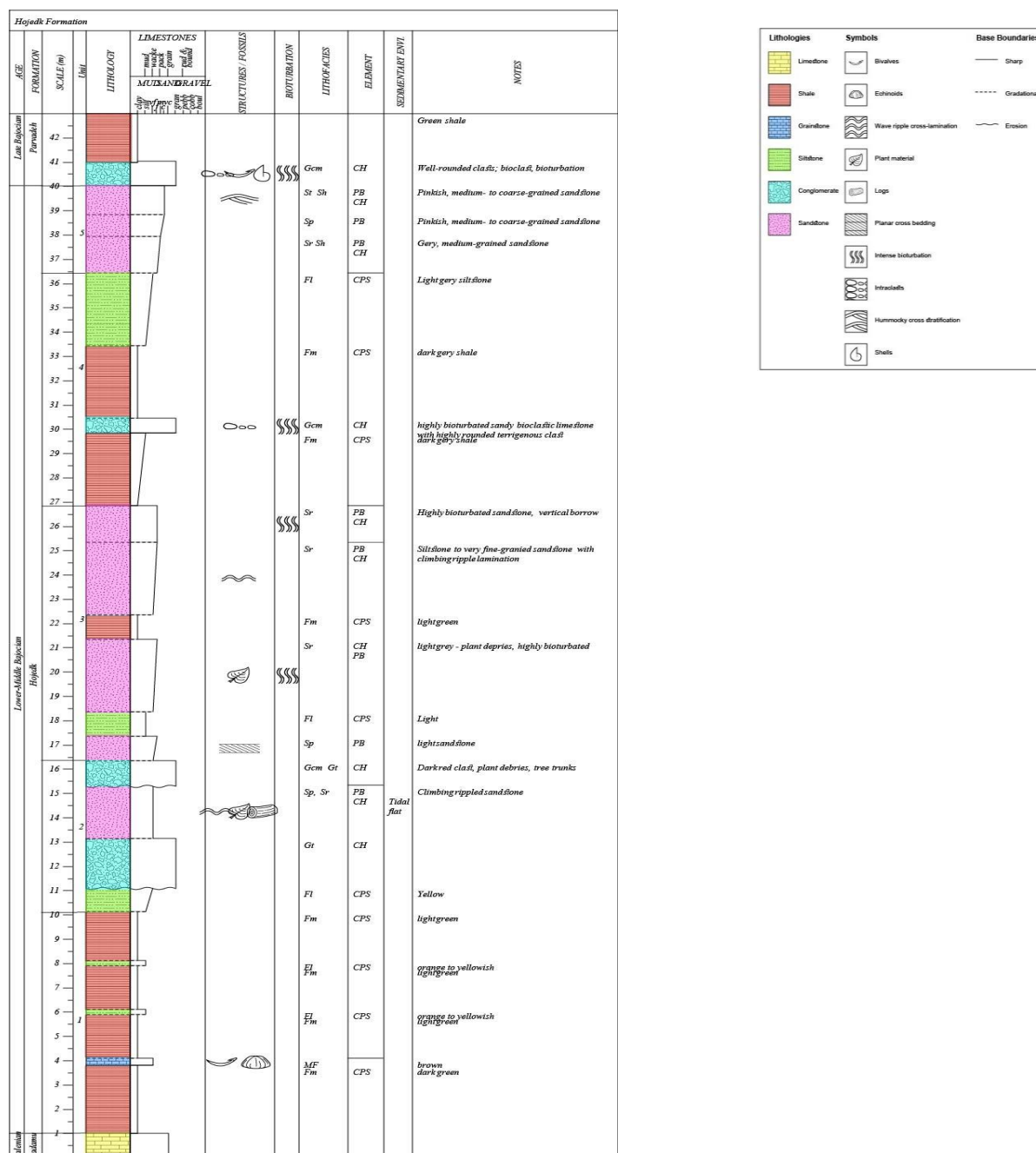
شکل ۷- تصاویر صحرایی از عناصر ساختاری شناسایی شده در سازند هجدک: A- عنصر ساختاری کانال (CH); B- عنصر ساختاری پوینت بار (PB); C- عنصر ساختاری باتلاق دشت ساحلی (CPS)

Fig 7- Field view of architectural elements identified in the Hojedk Formation; A- channel (CH); B- Point bar (PB); C- Coastal plain swamp (CPS)

جدول ۱- رخساره‌های سنگی شناسایی شده در سازند هجدک به همراه ویژگی‌های مختلف آنها (Miall 2014; Salehi et al. 2023)

Table 1- Lithofacies identified in the Hojedk Formation and their characteristics (Miall 2014; Salehi et al. 2023)

	Facie code	Facies name	Characteristics	Sedimentary processes; facies association
1	Gcm	Clast supported, massive conglomerate	Red, pebble size, no sedimentary structure, the upper and lower boundry are erosional, contains macro fossils	Pseudoplastic debris flow (inertial bedload, turbulent flow)
2	Gt	Gravel, stratified, trough cross bedding	Red to light brown, set thickness maximum 20 cm, pebble to granule size, immature, lower contact erosional	Minor channel fills
3	St	Trough cross-bedded sandstone	Light brown to light grey, fine- to medium-grained, mature sandstone, lenticular or wedge-shaped bodies	Sinuuous-crested and linguoid (3D) dunes
4	Sp	Planar cross-bedded sandstone	Light brown, fine to medium-grained, mature sandstone, set thickness generally 0.5 m, lenticular to tabular geometry and sigmoidal-shaped accretionary foresets	Migration of 2D dunes in response to unidirectional currents on fluvial bedforms, Transverse and linguoid bedforms (2-D dunes)
5	Sh	Horizontally laminated sandstone	red to pink, fine-grained, super-mature sandstone	Deposited under the condition of either upper or lower flow regime by unidirectional currents, Plane-bed flow (critical flow)
6	Sr	Wavey-rippled, cross laminated sandstone	Light brown to light grey, very fine to fine grain sand, mature sandstone, thin sheet like geometry, set thickness generally 1 m	Current ripple in fluvial floodplains, Ripples (lower flow regime)
7	Fm	Massive claystone to siltstone	Dark grey, with frequent organic matter, clay size, set thickness generally 5 m, upper contact is typically gradational, at the top it becomes a sandstone facies	Deposition from lower flow regime or suspension process in floodplain and overbank sub-environments, Overbank, abandoned channel, or waning flood deposits
8	Fl	Horizontally laminated claystone and siltstone	Red to pink, clay and silt size, sheet like bodies	Deposition from lower flow regime or suspension process in floodplain and overbank sub-environments, Overbank, abandoned channel, or waning flood deposits
9	MF1	Brachiopod, Echinoid Grainstone to Packstone	Red to brown, set thickness 20 cm, contains microfossils and macrofossils with grainstone texture	Deposited most likely in carbonate sand shoals



شکل ۸- ستون چینه‌شناسی سازند هجدک در منطقه معدن پروده طیس، به همراه رخساره‌ها، کدهای رخساره‌ای، ساخت‌های رسوبی، عناصر ساختاری و محیط رسوبی

Fig 8- The stratigraphic column of the Hojedk Formation in the Parvadeh Coal Mine area, along with the facies, facies codes, sedimentary structures, structural elements and identified sedimentary environment

چاه‌نگارها، در بین داده‌های زیرسطحی کاربرد کمتری برای

مطالعات زیرسطحی (گمانه اکتشافی)

لاگ مقاومت

این لاگ مقاومت توده‌ای (رسانایی متقابل) سازند را اندازه‌گیری می‌کند و درجه‌ای تعریف می‌شود که یک ماده در برابر جریان الکتریکی مقاومت می‌کند. مقاومت، تابعی از تخلخل و سیال منفذی در سنگ است. این لاگ علاوه بر شناسایی نوع سیال سازند، به عنوان شاخص سنگ‌شناسی سازند استفاده می‌شود (Rider 1986; Emery and Myers 1996; Krassay 1998).

مشخصات چینه‌شناسی سازند هجدک در گمانه اکتشافی

سازند هجدک در برش تحت‌الارضی از گمانه اکتشافی شماره ۳۴۱ در پروده شرقی (با فاصله نزدیک به ۲۰ کیلومتر در سمت شرق برش سطح‌الارضی مطالعه‌شده) بررسی شده است (شکل ۹). عمق نهایی این گمانه اکتشافی ۶۰۹ متر است و سازندهای پروده، هجدک، بادامو، آبجی و قسمتی از بخش قدیر از سازند نایبند حفاری شده است. سنگ‌شناسی در این چاه، با رخنمون مطالعه‌شده در این محدوده تقریباً یکسان است، ولی ضخامت آنها با رخنمون‌های محدوده مطالعه‌شده کمی تفاوت دارد. در این گمانه، سازند هجدک با سن ژوراسیک میانی، ۴۸ متر ضخامت دارد و بر سازند بادامو و زیر سازند پروده واقع شده است. سازند هجدک طبقات ماسه‌سنگی، شیل، سنگ‌آهک (دارای فسیل) و سیلتستون دارد که هر لیتولوژی لاگ گاما مختص به خود را نشان می‌دهد.

رخساره الکتریکی

روشی را برای دسته‌بندی لاگ‌های چاه‌پیمایی، رخساره الکتریکی می‌نامند که سبب جدایش دسته‌هایی (خوشه‌ها) از لاگ‌ها با ویژگی‌های همانند می‌شود و نشان‌دهنده تغییر ویژگی‌های زمین‌شناسی (رسوبی و دیاژنتیکی) لایه‌هاست (Serra 1986; Ghazi and Mountney 2010). در این مطالعه برای بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و تعیین ویژگی الکتریکی رخساره‌های معین‌شده در رخنمون معدن پروده و همچنین بازسازی محیط رسوب‌گذاری سازند هجدک در این محدوده،

مطالعات محیط‌های رسوبی دارند، با وجود این، به دلیل فراوانی در بین داده‌های زیرسطحی و به دلیل کاربرد گسترده در تجزیه و تحلیل‌های زمین‌شناسی، در بازسازی شرایط محیطی نیز استفاده می‌شوند (Amini 2017). اساس کار در چاه‌نگارها، تجزیه و تحلیل واحدهای رسوبی در قالب مجموعه واحدهای رسوبی با مشخصات یکسان است. چاه‌نگارها مشخصات فیزیکی واحدهای رسوبی (چگالی، سرعت صوت، مقاومت و تابش اشعه گاما) را منعکس می‌کنند (Amini 2017). اشعه‌های گاما با اشکال زنگوله‌ای، شیپوری، دندان‌اره، متقارن و سیلندری ثبت می‌شوند. هر نوع از این اشکال گاما، نمایانگر یک محیط رسوبی خاص‌اند. زمانی که مقدار لاگ گاما کم باشد، نشانگر رخساره‌های تمیز و عاری از رس (کنگلمورایی) است و زمانی که لاگ گاما مقدار بالایی را نشان دهد، نشانگر رخساره‌های غنی از رس‌اند.

لاگ‌های استفاده‌شده در این مطالعه

از ابزارهای ژئوفیزیکی، به‌ویژه در چاه‌های حفاری‌شده در زغال‌سنگ برای شناسایی ضخامت، امتداد و حتی کیفیت زغال‌ها استفاده می‌شود که این روش به لاگ‌های ژئوفیزیکی معروف است (Yazdi 2003). به‌طور کلی در این مطالعه، از دو لاگ گاما و مقاومت استفاده شده است که در ادامه، این دو لاگ شرح داده شده است.

لاگ گاما

لاگ‌های پرتو گاما، یکی از متداول‌ترین لاگ‌های استفاده‌شده برای تحلیل چینه‌نگاری توالی‌ها هستند (Rider 1986; Emery and Myers 1996; Krassay 1998). از این اشعه برای تشخیص لایه‌های زغال‌سنگ، تعیین ضخامت و ساختار لایه‌های زغال‌سنگ استفاده می‌شود. براساس روش‌های اندازه‌گیری اشعه گاما، به شیوه‌های متعددی از قبیل روش اندازه‌گیری گامای طبیعی و روش چگالی گاما-گاما اشاره می‌شود (Yazdi 2003).

زنگوله‌ای شکل (Bell shape) و دامنه تغییرات لاگ گاما از ۲۰۰ تا ۵۳۰ گاما/سانتی‌متر در تغییر است، به گونه‌ای که در ابتدا مقدار آن کم و به طرف بالای توالی زیاد می‌شود (شکل ۹). این رخساره سنگ‌آهک در پایین و در بالا به سیلتستون و بین لایه شیل تبدیل شده است.

تفسیر: شکل زنگوله‌ای لاگ گاما در این رخساره، مختص رسوبات کانال‌های جزرومدی کوچک (Tidal creek) است (Cant 1992; Ghazi and Mountney 2010)، و با رخساره‌های سنگی Fm و Fm منطبق است.

رخساره الکتریکی ۳ (EF-3)

توصیف: رخساره الکتریکی شماره سه، حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از توالی تحت‌الارضی سازند هجدک را شامل می‌شود. لاگ گاما در این رخساره، قیفی شکل (Funnel shape) و مقدار آن به سمت بالا کاهش نشان می‌دهد. تغییرات لاگ گاما بین ۲۲۰ و ۴۰۰ گاما/سانتی‌متر و ضخامت آن در حد پنج متر است (شکل ۹). این رخساره در بخش‌های گوناگونی از توالی مشاهده و از شیل و ماسه دانه متوسط تا ریز تشکیل شده است.

تفسیر: در این رخساره لاگ گاما روند کاهشی و اندازه دانه، روند درشت‌شونده دارد که با وجود مرز مشخص زیرین، نشان‌دهنده رسوبات کروس پهن است (Cant 1992; Ghazi and Mountney 2010) و با رخساره‌های سنگی Sr، Fm و Sp تطابق دارد.

رخساره الکتریکی ۴ (EF-4)

توصیف: این رخساره ۱۰ تا ۲۰ درصد از توالی سازند هجدک در گمانه اکتشافی را شامل می‌شود و شکل لاگ گاما در این رخساره به صورت دندان‌های نامنظم (Serrated) است (شکل ۱۰). مقدار لاگ گاما از ۳۸۴ تا ۴۸۰ گاما/سانتی‌متر در تغییر است و از شیل و ماسه دانه ریز تشکیل شده است.

تفسیر: لاگ گاما در این رخساره، شکل نامنظم و مقدار

از اطلاعات سنگ‌شناسی و نمودار چاه‌پیمایی گمانه اکتشافی استفاده شده است. استفاده از اطلاعات چاه‌های اکتشافی مجاور با رخنمون برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر از تغییرات جانبی رخساره‌ها، در محدوده مطالعه شده انجام می‌شود (Luthi and Flint 2014). از روش آماری تحلیل خوشه‌ای، که از روش‌های پرکاربرد و سودمند در دسته‌بندی داده‌هاست، برای دسته‌بندی داده‌های لاگ‌های چاه‌پیمایی و در تعیین رخساره‌های الکتریکی و انطباق آن با رخساره‌های همانند نیز بهره گرفته می‌شود (Tavakoli and Amini 2006; Kadhodaie-Ilkhchi et al. 2013).

در این پژوهش چهار رخساره الکتریکی در سازند هجدک در گمانه اکتشافی شماره ۳۴۱ تشخیص داده شد که با زیرمحیط‌های پهنه‌های ماسه‌ای ساحلی، کانال‌های جزرومدی کوچک، کروس پهن و باتلاق دشت ساحلی انطباق‌دانی‌اند.

رخساره الکتریکی ۱ (EF-1)

توصیف: این رخساره ۸ تا ۱۰ درصد از توالی گمانه اکتشافی سازند هجدک را در بر می‌گیرد و با شکل لاگ گاما استوانه‌ای (Cylandrical) شناسایی‌شدنی است (شکل ۹). دامنه تغییرات لاگ گاما برای این رخساره از ۱۹۲ تا ۲۶۰ گاما/سانتی‌متر در تغییر است. این رخساره متشکل از ماسه سنگ‌های دانه متوسط تا دانه ریز است.

تفسیر: شکل استوانه‌ای لاگ گاما به همراه مقدار کم آن بیانگر پهنه‌های ماسه‌ای ساحلی است (Cant 1992; Higgs et al. 2012). این رخساره الکتریکی احتمالاً با رخساره‌های سنگی Sr، Sp، Gt و Gcm در رخنمون انطباق دارد.

رخساره الکتریکی ۲ (EF-2)

توصیف: این رخساره ۲۰ درصد از توالی گمانه اکتشافی مطالعه شده را تشکیل می‌دهد و ضخامت آن حداکثر ۸ تا ۱۰ متر است. شکل لاگ گاما در رخساره الکتریکی شماره دو،

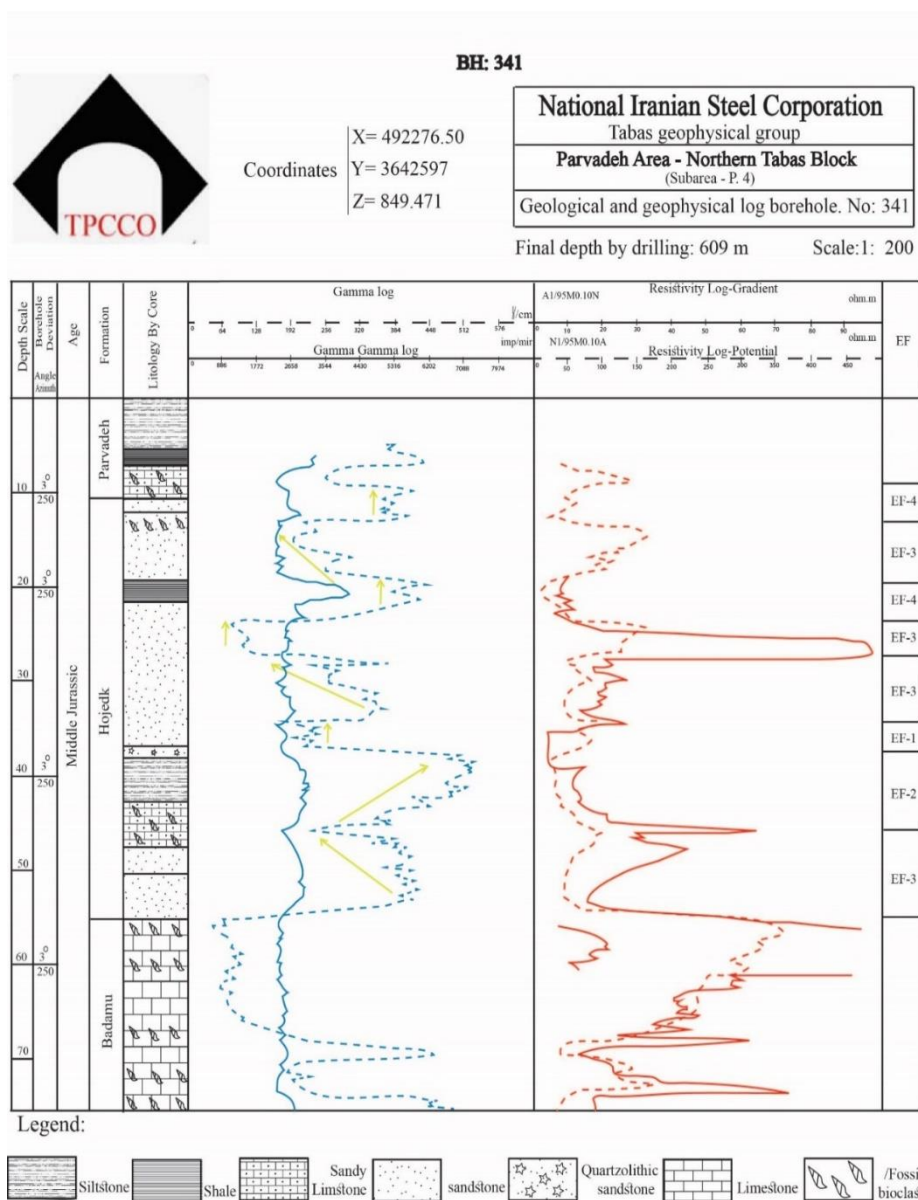
بالا دارد که بیانگر وجود رسوبات دانه‌ریز رسی-سیلتی و لایه‌هایی از ماسه دانه‌ریز است که در محیط باتلاق دشت ساحلی نهشته می‌شوند (Cant 1992; Ghazi and Mountney 2010). رخساره الکتریکی شماره چهار، با رخساره‌های سنگی Fm, Sr, Sp, Sh و St انطباق دارند.

محیط رسوبی

در این مطالعه دو رخساره گراولی، چهار رخساره ماسه‌سنگی و دو رخساره دانه‌ریز (هشت رخساره آواری) و یک رخساره کربناته براساس بررسی‌های صحرایی انجام‌شده در منطقه مطالعه‌شده در سازند هجدک شناسایی شده‌اند. با توجه به عناصر ساختاری شناسایی‌شده نظیر کانال، پوینت بار و باتلاق دشت ساحلی، محیط رسوبی سازند هجدک به محیط پهنه ساحلی (tidal flat) نسبت داده می‌شود (شکل‌های ۸ و ۱۰). شواهدی نظیر فراوانی رخساره‌های گل‌سنگی نسبتاً ضخیم به‌همراه ماسه‌سنگ‌های با اندازه دانه متوسط تا ریزدانه و عمدتاً جورشده با ساخت رسوبی طبقه‌بندی افقی و فرم هندسی گسترده و همچنین حضور رپیل مارک‌های متقارن و تمرکز صدف‌های آلوکم‌های دریایی در رخساره‌های کربناته نازک همراه با آنها، تأییدکننده این محیط رسوبی است. حضور عناصر ساختاری کانال و پوینت بارها در توالی مطالعه‌شده، احتمالاً کانال‌های مئاندری کوچک (Meandering tidal creek) جریان‌یافته در این محیط ساحلی را نشان می‌دهد (Scholle and Spearing 1988). محیط سازند هجدک در منطقه پروده با سواحل شمالی خلیج کالیفرنیا در غرب آمریکا، برای نمونه عهد حاضر، مقایسه‌شدنی است (Fürsich and Flessa 1987) و محیط ساحلی توصیف‌شده برای سازند نایبند، به سن تریاس پسین و سازند پادها به سن دونین در بلوک طبس است (Fürsich et al. 2005; Zand-Moghadam et al. 2014).

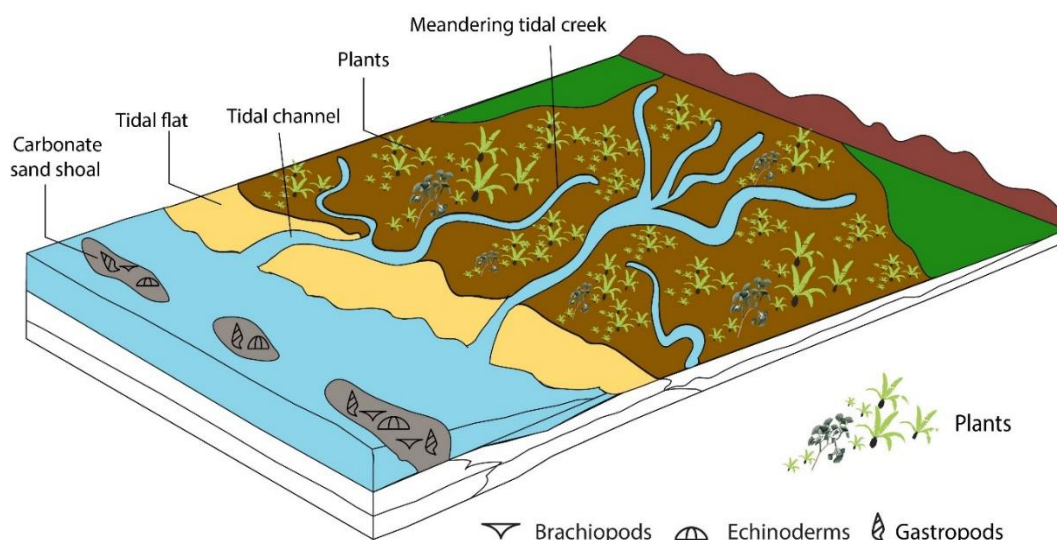
رسوبات کانال‌های جزرومدی خیلی شبیه به رسوبات رودخانه‌ای است، با این تفاوت که ماسه‌های کانال‌های جزرومدی، بلوغ بافتی بهتری نسبت به ماسه‌های رودخانه‌ای دارند و نیز حاوی فسیل‌های دریایی‌اند (Mousavi Harami 2010). در ضمن پراکندگی برای شیب طبقات مورب در ماسه‌های کانال‌های جزرومدی به فرم بایمدال (به دلیل طبقات مورب درهم) است، ولی در ماسه‌های رودخانه‌ای به فرم یونی مدال است (Mousavi Harami 2010). رخساره‌های کربناته محدود شکل‌گرفته نیز، بیانگر تشکیل سدها و کانال‌ها و همچنین تپه‌های ماسه‌ای (شول) به‌وسیله جریان‌های جزرومدی در محیط ساحل است. حضور با فابریک دانه‌پشتیان بیان‌کننده جابه‌جایی آنها از یک محیط کم‌انرژی نظیر لاگون به سمت محیط‌های پرانرژی از راه کانال‌های قطع‌کننده سد و یا نهشته‌های مجاور با پشته‌های بایوکستی/اولیتی است. تشکیل محدود این رخساره‌های کربناته، حاکی از زمان‌های ورودنیافتن گسترده رسوبات آواری به محیط ساحلی بوده است (Flügel 2010). مطالعات گسترده‌تر چینه‌شناسی و بررسی‌های اولیه محیط رسوبی نیز حاکی از شکل‌گیری محیط حاشیه دریا در زمان تهنشست سازند هجدک در منطقه معدن پروده است (Wilmsen et al. 2009). با استفاده از اطلاعاتی نظیر طبقه‌بندی مورب درهم، طبقات فلاسر، موجی و عدسی و اطلاعات دیگر مانند موقعیت چینه‌شناسی و بافت، رسوبات جزرومدی از رسوبات دلتایی، جزایر سدی و دریایی به‌خوبی تفکیک می‌شود (Mousavi Harami 2010).

همچنین با توجه به رخساره‌های الکتریکی شناسایی و تفسیرشده محیط رسوبی سازند هجدک در گمانه اکتشافی، همانند رخنمون مطالعه‌شده، به یک محیط پهنه ساحلی (tidal flat) نسبت داده می‌شود.



شکل ۹- ستون چینه‌شناسی سازند هجدک در گمانه اکتشافی ۳۴۱ در پروده شرقی لاگ گاما، گاما-گاما، مقاومت و رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده در امتداد توالی نشان داده شده است.

Fig 9- Stratigraphic column of the Hojedk Formation in exploration borehole No. 341 in East Parvadeh area. Gamma, gamma-gamma, resistivity logs and electrofacies identified along the succession are shown.



شکل ۱۰- مدل شوماتیک از محیط رسوبی سازند هجدک در محدوده برش معدن پروده طبس (که نمایانگر محیط جزرومدی است)

Fig 10- Schematic sedimentary environment model of the of the Hojedk Formation in the outcrop of the Parvadeh Coal Mine, which represents the tidal environment.

نتیجه

عناصر ساختاری در سازند هجدک، ویژگی‌هایی مانند نوع سطح تماس زیرین و بالایی لایه‌ها، فرم هندسی رسوبات، نوع سنگ‌شناسی و رخساره آنها در نظر گرفته شده است. به طور کلی عناصر ساختاری کانال، پرکننده کانال و باتلاق دشت ساحلی در رسوبات سازند هجدک شناسایی شده است.

سازند هجدک در برش تحت‌الارضی، از گمانه اکتشافی شماره ۳۴۱ در پروده شرقی بررسی شده است. در این گمانه، سازند هجدک با سن ژوراسیک میانی ۴۸ متر ضخامت دارد و بر سازند بادامو و زیر سازند پروده واقع شده است. سازند هجدک طبقات ماسه‌سنگی، شیل، آهک (دارای فسیل) و سیلتستون دارد که هر لیتولوژی لاگ گاما و مقاومت مختص به خود را نشان می‌دهد. در این پژوهش چهار رخساره الکتریکی در سازند هجدک در گمانه مطالعه‌شده تشخیص داده شد که با زیرمحیط‌های پهنه‌های ماسه‌ای ساحلی، کانال‌های جزرومدی کوچک، کروس پهن و باتلاق دشت ساحلی انطباق‌دانی‌اند. با توجه به عناصر ساختاری و رخساره‌های الکتریکی شناسایی و تفسیرشده محیط رسوبی سازند هجدک در رخنمون و گمانه اکتشافی مطالعه‌شده به یک محیط پهنه ساحلی (tidal flat) نسبت داده می‌شود.

در این پژوهش، سازند هجدک در شمال حوضه زغال‌دار پروده-نایبند و در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب طبس در محدوده معدن زغال‌سنگ پروده، که از نظر ساختاری در زون ایران مرکزی در پهنه نایبند از بلوک طبس واقع شده است، مطالعه شده است. براساس مطالعات صحرایی و در نظر گرفتن پارامترهای ساخت رسوبی، فرم هندسی، سطوح چین‌های و برای جریان دیرینه رخساره‌های سنگی مشاهده‌شده در سازند هجدک، چهار دسته رخساره سنگی دانه‌درشت، متوسط، ریز و کربناته شناسایی شده است. رخساره‌های سنگی دانه‌درشت شامل رخساره‌های کنگلومرایی Gcm و Gt است. رخساره‌های سنگی دانه‌متوسط عبارت‌اند از: Sp، St، Sh و Sr و رخساره‌های سنگی دانه‌ریز شامل Fl و Fm هستند. در رخساره کربناته براکیوپود اکیئوئید گرینستون-پکستون، با توجه به بافت این رخساره، معادل ریزرخساره استاندارد SMF18 در نظر گرفته می‌شود. چنین رخساره‌هایی در سدها و کانال‌ها و همچنین تپه‌های ماسه‌ای (شول) با جریان‌های جزرومدی در محیط‌های لاگونی کم‌عمق و خلیج‌های محدودشده تشکیل می‌شوند. به‌منظور شناسایی

- Fürsich F.T. and Flessa K.W. 1987. Taphonomy of tidal flat molluscs in the Northern Gulf of California: paleoenvironmental analysis despite the perils of preservation. *The Paleontological Society Special Publications*, 2: 200-237. <https://doi.org/10.1017/S2475262200004822>
- Fürsich F. Wilmsen M. Seyed-Emami K. and Majidifard M. 2003. Evidence of synsedimentary tectonics in the Northern Tabas Block, East Central Iran: The Callovian (Middle Jurassic) Sikhor Formation. *Facies*, 48: 151-170.
- Fürsich F.T. Hautmann M. Senowbari-Daryan B. and Seyed-Emami K. 2005. The Upper Triassic Nayband and Darkuh formations of east-central Iran: stratigraphy, facies patterns and biota of extensional basins on an accreted terrane. *Beringeria*, 35: 53-133.
- Fürsich F.T. Wilmsen M. Seyed-Emami K. and Majidifard M. R. 2009. The Mid-Cimmerian tectonic event (Bajocian) in the Alborz Mountains, Northern Iran: evidence of the break-up unconformity of the South Caspian Basin. In: M.-F. Brunet, M. Wilmsen and J.W. Granath (Eds.), *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 312:189-203. <https://doi.org/10.1144/SP312.9>
- Ghazi S. and Mountney N.P. 2009. Facies and architectural element analysis of a meandering fluvial succession: The Permian Warchha Sandstone, Salt Range, Pakistan. *Sedimentary Geology*, 221(1-4): 99-126. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.08.002>
- Ghazi S. and Mountney N.P. 2010. Subsurface lithofacies analysis of the fluvial Early Permian Warchha Sandstone, Potwar Basin, Pakistan. *Journal Geological Society of India*, 76, 505-517.
- Ghosh P. Sarkar S. and Maulik P. 2006. Sedimentology of a muddy alluvial deposit: Triassic Denwa Formation, India. *Sedimentary Geology*, 191: 3-36. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.01.002>
- Hautmann M. 2001. Die Muschelfauna der Nayband-Formation (Obertrias, Nor - Rhät) des östlichen Zentraliran. *Beringeria*, 29: 1-181. <https://doi.org/10.23689/fidgeo-792>
- Hautmann M. Aghababalou B. and Krystyn L. 2011. An Unusual Late Triassic Nuculid bivalve with divaricate shell ornamentation, and the evolutionary history of oblique ribs in Triassic bivalves. *Journal of Paleontology*, 85: 22-28.
- Higgs K.E. King P.R. Raine J.I. Sykes R. Browne G.H. Crouch E.M. and Baur J.R. 2012. Sequence stratigraphy and controls on reservoir sandstone distribution in an Eocene marginal marine-coastal plain fairway, Taranaki Basin, New Zealand. *Marine and Petroleum Geology*, 32: 110-137. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.12.001>

مطالعات گسترده‌تر چینه‌شناسی و بررسی‌های اولیه محیط رسوبی نیز حاکی از شکل‌گیری محیط حاشیه دریا در زمان ته‌نشست سازند هجدک در منطقه معدن پروده است.

تشکر و سپاسگزاری

به این وسیله از ژئوپارک جهانی طبس و معدن زغال‌سنگ پروده تشکر و قدردانی می‌شود که ما را در انجام این پژوهش حمایت کردند و نهایت همکاری را داشتند. همچنین از آقای مهندس زمانیان، بابت همکاری در بخش‌های مختلف این تحقیق تشکر می‌شود.

References

- Aganbati A. 1998a. Jurassic stratigraphy of Iran, Volume 1, Geological Survey and Mineral Exploration of the Iran, No. 65, 365 p. [In Persian]
- Aganbati A. 1998b. Jurassic stratigraphy of Iran vol.2, Geological Survey and Mineral Exploration of the Iran, No. 65, 381 p. [In Persian]
- Aganbati A. 2004. Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of the Iran, 586 p. [In Persian]
- Amini A. 2017. Sedimentary environments (from sedimentary model to reconstruction of environmental conditions). University of Tehran Press, 476 p. [In Persian]
- Asserto R. 1966. The Jurassic Shemshak Formation in central Elburz (Iran). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 72: 1133-1182.
- Badihagh M.T. Sajjadi F. Farmani T. and Uhl D. 2019. Middle Jurassic palaeoenvironment and palaeobiogeography of the Tabas Block, Central Iran: palynological and palaeobotanical investigations. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 99(3): 379-399.
- Cant D. J. 1992. Subsurface facies analysis. In: Walker R. G. James N. P (Eds.), *Facies Models, Response to Sea Level Changes*. Geological Association of Canada, Reprint Series, 1: 27-45.
- Davis R. A. 2012. Tidal signatures and their preservation potential in stratigraphic sequences. In: Davis R. A. and Dalrymple R. W (Eds.), *Principles of Tidal Sedimentology*, Springer, Heidelberg, 35-55.
- Emery D. and Myers K. J. 1996. Sequence stratigraphy. Blackwell Science Limited, 297p.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application* (2nd edition). Springer, Berlin, 976p.

- Cretaceous Research, 30(6): 1415–1425. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2009.08.006>
- Reading H.G. 2009. Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy. John Wiley & Sons, 704 p.
- Rider M. 1986. The Geological Interpretation of Well Logs. Blackie, Halsted Press, New York, 432 p.
- Salehi M.A. Wilmsen M. Zamanian E. Baniasad A. and Heubeck C. 2023. Depositional and thermal history of a continental, coal-bearing Middle Jurassic succession from Iran: Hojedk Formation, northern Tabas Block. Geological Magazine, 160: 235–259. <https://doi.org/10.1017/S0016756822000814>
- Salehi M.A. 2014. Sequence stratigraphic framework and sedimentary environment of Ab-e-Haji Formation in eastern central Iran. PhD Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 245 p. [In Persian with English abstract]
- Scholle P.A. Spearing D. 1988. Sandstone Depositional Environments. AAPG Memoir, 31: 1–410. <https://doi.org/10.1306/M31424>
- Scholle P.A. Ulmer-Scholle D.S. 2006. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 77: 459p.
- Sdzuy k. and Monninger W. 1985. Neue modelle des “Jakobstabes”. Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie – Monatshefte, 1985: 300–320. DOI: 10.1127/njgpm/1985/1985/300
- Senowbari-Daryan B. Rashidi K. and Torabi H. 2010. Foraminifera and their associations of a possibly Rhaetian section of the Nayband Formation in central Iran, northeast of Esfahan. Facies, 56: 567–596.
- Serra O. 1986. Fundamentals of Well Log Interpretation: The Interpretation of Logging Data. Elsevier, Amsterdam, 280 p.
- Seyed-Emami K. 2003. Triassic in Iran. Facies, 48: 91–106.
- Seyed-Emami K. and Alavi-Naini M. 1990. Bajocian stage in Iran. Memorie del Descrizione della Carta Geologica d'Italia, 40: 215–22.
- Seyed-Emami K. Fürsich F.T. and Schairer G. 2001. Lithostratigraphy, ammonite faunas and palaeoenvironments of Middle Jurassic strata in North and Central Iran. Newsletters on Stratigraphy, 38: 163–184.
- Seyed-Emami K. Fürsich F.T. and Wilmsen M. 2004. Documentation and significance of tectonic events in the Northern Tabas block (EastCentral Iran) during the Middle and Late Jurassic. Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia, 110: 163–171.
- Seyed-Emami K. Fürsich F. and Wilmsen M. 2006. New evidence on the lithostratigraphy of the Jurassic System in the Northern Tabas Block, East-Central Iran. Geosciences Scientific Kadkhodaie-Ilkhchi R. Rezaee R. Moussavi-Harami R. and Kadkhodaie-Ilkhchi A. 2013. Analysis of the reservoir electrofacies in the framework of hydraulic flow units in the Whicher Range Field, Perth Basin, Western Australia. Journal of Petroleum Science and Engineering, 111: 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.10.014>
- Khalifa M.A. and Catuneanu O. 2008. Sedimentology of the fluvial and fluvio-marine facies of the Bahariya Formation (Early Cenomanian), Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. Journal of African Earth Sciences, 51: 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2007.12.004>
- Khalilizadeh H. Ashouri A.R. Ghaderi A. and Barbacka M. 2023. Two fossilized swamps containing in situ Sphenophyta stems, rhizomes, and root systems from the Middle Jurassic Hojedk Formation, Kerman area (Iran). Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments, 103: 3–20.
- Krassay A.A. 1998. Outcrop and drill core gamma ray logging integrated with sequence stratigraphy: examples from Proterozoic sedimentary successions of northern Australia. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(4): 285–299.
- Luthi S.M. and Flint S.S. 2014. The application of outcrop-based research boreholes for reservoir modelling: potential, challenges and pitfalls. Geological Society of London, Special Publication, 387: 233–246. <https://doi.org/10.1144/SP387.6>
- MacEachern J.A. Pemberton S.G. Gingras M.K. Bann K.L. and Dofoe L.T. 2007. Uses of trace fossils in genetic stratigraphy. In: Miller III W. (Ed.), Trace Fossils: Concepts, problems, prospects. Elsevier, Amsterdam, 110–134. <https://doi.org/10.1016/B978-044452949-7/50133-9>
- Masoudi A. Nazimi M. Faridi M. Naimi-Qasbian N. 2004. Geological map of Gharb-e-Abshaleh, scale 1/100000, No 735, Geological Survey and Mineral Exploration of the Iran, Tehran.
- Miall A.D. 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. Earth-Science Reviews, 22(4): 261–308. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(85\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(85)90001-7)
- Miall A.D. 2000. Principle of Sedimentary Basin Analysis. Springer, New York, 616p.
- Miall A.D. 2006. The Geology of Fluvial Deposits (3rd edition). Springer, Berlin, 582p.
- Miall A.D. 2014. Fluvial Depositional Systems. Springer, Berlin, 316p.
- Mousavi Harami S.R. 2010. Sedimentology. Astan Quds Razavi Publishing House, Mashhad, 474 p. [In Persian]
- Ojo O.J. and Akande S.O. 2009. Sedimentology and depositional environments of the Maastrichtian Patti Formation, southeastern Bida Basin, Nigeria.

- M.-F. Brunet, M. Wilmsen and J.W. Granath (Eds.), South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society, London, Special Publications, 312: 323–343. <https://doi.org/10.1144/SP312.15>
- Wilmsen M. Fürsich F.T. Seyed-Emami K. and Majidifard M.R. 2021. The Upper Jurassic Garedu Red Bed Formation of the northern Tabas Block: elucidating Late Cimmerian tectonics in east-Central Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 110(3): 767-790.
- Yahya Shibani V. 2021. Tabas geological heritage atlas. Birjand University Press, Birjand, 318 p. [In English and Persian]
- Yazdi M. 2003. Coal (from origin to environmental effects). Jahad Daneshgahi University Publications (Amir Kabir University of technology), Tehran, 263 p. [In Persian]
- Yeste L.M. Gil-Ortiz M. García-García F. Viseras C. McDougall N.D. Cabello P. and Caracciolo L. 2024. Tidal versus fluvial point bars: Key features from the integration of outcrop, core and wireline log information of Triassic examples. *The Depositional Record*, [In Press]
- Zamani Z. Rahimpour-Bonab H. and Littke R. 2023. Palaeoenvironmental reconstruction of a coal bearing unit: the Upper Triassic Nayband Formation, Tabas Block, East-Central Iran. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 103: 733–757.
- Zand-Moghadam H. Moussavi-Harami R. and Mahboubi A. 2014. Sequence stratigraphy of the Early–Middle Devonian succession (Padeha Formation) in Tabas Block, East-Central Iran: Implication for mixed tidal flat deposits. *Palaeoworld*, 23: 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2013.06.002>
- Zhang C. Song X. Wang X. Wang X. Zhao K. Shuang Q. and Li S. 2020. Origin and depositional characteristics of supported conglomerates. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 292-305. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60047-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60047-7)
- Quarterly Journal, 57: 78-97. [In Persian with English abstract]
- Seyed-Emami K. Wilmsen M. and Fürsich F.T. 2020. A summary of the Jurassic system in north and East-Central Iran. *Zitteliana* 94: 99–156.
- Takin M. 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, 235: 147–150.
- Tavakoli V. and Amini A. 2006. Application of multivariate cluster analysis in logfacies determination and reservoir zonation, case study of Marun Field, south of Iran. *Journal of Sciences University of Tehran*, 32(2): 69–75.
- Tewari R.C. Hota R.N. and Maejima W. 2012. Fluvial architecture of Early Permian Barakar rocks of Korba Gondwana basin, easterncentral India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52: 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.02.009>
- Tucker M.E. and Wright V.P. 1990. *Carbonate Sedimentology*. Wiley, 496p.
- Türkmen İ. Aksoy E. and Taşgin C.K. 2007. Alluvial and lacustrine facies in an extensional basin: The Miocene of Malatya basin, eastern Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 181–198. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.08.006>
- Vaez Javadi F. 2016. Plant macrofossils and biostratigraphy of the Calshaneh section, NW Tabas and its palaeoclimate analysis. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 31: 105–23 [In Persian with English abstract]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1394.31.4.6.6>
- Vaez-Javadi F. and Mirzaei-Ataabadi M. 2006. Jurassic plant macrofossils from the Hojedk Formation, Kerman area, east-central Iran. *Alcheringa. An Australasian Journal of Palaeontology*, 30: 63–96. <https://doi.org/10.1080/03115510608619345>
- Vaziri-Moghaddam H. Taheri A. and Kimiagari M. 2005. *Principles of stratigraphy*. Isfahan University Press, 320 p. [In Persian]
- Wilmsen M. Fürsich F.T. Seyed-Emami K. and Majidifard M.R. 2009. An overview of the stratigraphy and facies development of the Jurassic System on the Tabas Block, east-central Iran. In: