



<http://ui.ac.ir/en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan  
Vol. 36, Issue 2, No. 79, Summer 2020  
pp. 1-22  
Received: 26.11.2019 Accepted: 03.02.2020

## Comparison of variations in sediment accumulation rates of the upper part of Zakeen Formation through cyclostratigraphic study in 2SK-1 and 2SKD-1 wells in Salman gas field

**Omid Falahatkah**

*M.Sc. Student of Stratigraphy & Paleontology, Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran  
falahatkah.omid@gmail.com*

**Aliasghar Ciabeghodsai\***

*Associate Professor, Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran  
a.siabeghodsai@urmia.ac.ir*

**Ali Kakhodaie**

*Associate Professor, Department of Geology, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
kakhodaie\_ali@yahoo.com*

### Abstract

The Zakeen Formation is one of the possible gas reservoirs in the Zagros sedimentary basin. In this paper, the cyclostratigraphic study of the upper part of the Zakeen Formation was performed by using evolutionary spectral analysis methods. The Multi-Taper Method (MTM) periodogram is one of the evolutionary spectral analysis methods used in this study to identify and prove the frequency ratios of Milankovitch cycles in the studied sediment sequences. In this study, using the introduced methodology, the frequency ratios of the Milankovitch cycles in the upper part of the Zakeen Formation was identified for the first time, and their existence was confirmed. Besides, the spectral powers of spectral gamma-ray (SGR) and density (RHOB) series, in evolutionary Fast Fourier Transform (FFT) and Wavelet Transform (WT) Scalograms, in 2SK-1 and 2SKD-1 wells of Salman gas field show strong astronomical signals of the Milankovitch cycles (E, e, O, P). After investigating the cyclostratigraphy of the upper part of the Zakeen Formation in the studied wells, by using new methods of evolutionary correlation coefficient and evolutionary significance levels, comparison of sediment accumulation rate variations of the Zakeen Formation was performed in the studied wells.

**Keywords:** Cyclostratigraphy, Sediment accumulation rate, Milankovitch cycles, Zakeen Formation, Salman gas field

### Introduction

The Zakeen Formation is a clastic succession and in its type section at Faraghan Mountains, north Bandar-Abbas, has 285 m thickness. It is composed of sandstones, shales, and with several dolostones horizons (Ghavidel-Syooki 1999). The Zakeen Formation, based on palynological studies by Ghavidel-Syooki (1999 & 2003), is attributed to the early to late Devonian (Lochkuvian to Frasnian). In this study, only the Frasnian sequence of the upper part of the Zakeen Formation in 2SK-1 and 2SKD-1 wells of the Salman gas field was studied. Cyclostratigraphic studies were also focused primarily on proving the existence of Milankovitch cycles in sedimentary sequences, determining timelines, calculating sediment accumulation rates and stratigraphic classifications (Zheng & Luo 2004; Li et al. 2018a; Chen et al. 2019). To compare the sediment accumulation rates of the upper part of the Zakeen Formation in the studied wells, cyclostratigraphy study was first performed to show the existence of the Milankovitch cycles and the way they affect the upper part of the Zakeen Formation. The spectral analysis methods together with density and spectral gamma-ray logs data were used to study the cyclostratigraphy of the studied formation. Milankovitch (Serbian scientist) has calculated the

duration of the three main parameters of the Earth's orbit around the sun that affect global climate change, known as eccentricity, obliquity, and precession, and these are referred to Milankovitch cycles (Milankovitch 1941; Fletcher 2013). Cyclostratigraphy of the Devonian system in the different parts of Earth including southern China (Gong et al. 2001; Chen & Tucker 2003; De Vleeschouwer et al. 2017), France, Morocco (Ellwood et al. 2011), Canada (De Vleeschouwer et al. 2012; De Vleeschouwer et al. 2017), Poland (De Vleeschouwer et al. 2013, 2017), Belgium (De Vleeschouwer et al. 2014, 2017), USA (De Vleeschouwer et al. 2017; Pas et al. 2018) and varying frequencies of Milankovitch cycles from the deposits of these areas have been reported. The purpose of this study is to analyze cyclostratigraphy and compare the sediment accumulation rates of the upper part of the Zakeen Formation in 2SK-1 and 2SKD-1 wells of the Salman gas field.

### Material & Methods

In this paper, by using evolutionary spectral analysis techniques (FFT spectrogram and WT scalogram) and MTM periodogram in a series of digital signal processing methods in Acycle v2.0 software (Li et al. 2018a), time series were

\*Corresponding author

extracted from SGR and RHOB logs. Afterward, their spectral powers were used in the cyclostratigraphic analysis of the upper part of the Zakeen Formation.

Milankovitch cycles recorded in the upper part of Zakeen Formation were identified using a set of evolutionary spectral analysis methods for the desired logs including MTM and subsequently analyzed in the FFT Spectrogram (Kodama and Hinnov 2015). The influence of such cycles on sedimentation of the upper part of the Zakeen Formation and their abundance in this formation at different depths from the two studied wells were studied. The WT scalogram is then used to compare statistically significant zones between time series (Grinsted et al. 2004). The frequency ratio method (Mayer & Appel 1999) was used to establish the link between the cycles identified in the sedimentary signals and the theoretical astronomical parameters.

After identifying the Milankovitch cycles in MTM periodograms, they were then extracted from the SGR logs by filtering the cycles of 405 kyr (E), 100 kyr (e), 34.4 kyr (O) and 21.3 kyr (P).

Subsequently, confidence levels with median, 90, 95, 99% levels were plotted for each MTM periodogram and almost all cycles were sampled from the median confidence level and some above 90%.

Through performing MTM periodograms, Milankovitch cycles were detected. Also, by using FFT spectrograms (reviewed by Hinnov), their influence on deposition of the upper part of Zakeen Formation and their abundance were labeled. Through the extraction of WT scalograms, high statistical significance zones were compared (correlation against E, e, O, and P cycle filters) to find the main lithological changes, probabilistically.

Finally, cyclostratigraphic results in two studied wells were investigated. Moreover, sediment accumulation rates of the upper part of the Zakeen Formation in two studied wells (2SK-1 and 2SKD-1) were estimated. Through applying evolutionary correlation coefficients and evolutionary significance levels of spectral analysis methods for the SGR logs in both wells, estimates of sediment accumulation rates of the upper part of Zakeen Formation was precisely carried out.

### Discussion of Results & Conclusions

Through plotted MTM periodograms for each well logs, the cycles ratio were identified in well 2SK-1 based on SGR MTM periodogram as 18.03, 5.63, 3.6, 2.39, 2.08, 1.58, 1.2, while with refer to RHOB MTM periodogram they are 20.8, 7.11, 4.0, 2.33, 2.0, 1.48, 1.33. This is close to the ratio of 20:5:2:1 cycles (from left to right we have the component ratio of the cycles E, e, O, and P). In contrast, in the MTM periodogram plotted for the SGR log, the ratios are 18.24, 6.08, 3.78, 2.87, 2.38, 1.55, while in MTM periodogram plotted for the RHOB log, ratios of 19.38, 6.45, 4.43, 3.6, 2.62, 2.16, 1.83, 1.49 were obtained. All ratios in two wells, being approximately equal to 20:5:2:1 and thus the relative ratios, each based on their value, are interpreted as one of the Milankovitch cycles (E or e or O or P).

In this study, by evolutionary spectral analysis methods including MTM periodograms, FFT spectrograms, and WT scalograms, cyclostratigraphy study of the upper part of the Zakeen Formation were performed in 2SK-1 and 2SKD-1 wells of Salman gas field. Evaluation of sediment accumulation rates of the upper part of Zakeen Formation in

these two wells was performed with evolutionary correlation coefficients and evolutionary significance levels. This allows them to be observed in the stratigraphic domain alongside the well log data. Based on FFT spectrograms in 2SK-1 well, three cycles including E, e and O have more effect on the sedimentation rate of the upper part of the Zakeen Formation. In 2SKD-1 well such an effect is due to four cycles comprising of E, e, O and P.

Subsequent analyses by the evolutionary correlation coefficient spectrogram plotted for the SGR log in 2SK-1 well revealed that only the E cycle affected the deposition of the upper part of the Zakeen Formation. The evolutionary correlation coefficient plotted for SGR log in 2SKD-1 well also confirmed the effect of E and O cycles on the deposition of Zakeen Formation. Other cycles with low impact on cyclic sedimentation of the upper part of the Zakeen Formation have been involved in these two wells. Sediment accumulation rates of the upper part of Zakeen Formation were estimated by time columns from cyclostratigraphy and thickness of the upper part of the Zakeen Formation for both wells by approximately 0.8 cm per thousand years. Subsequently, through the analysis of evolutionary correlation coefficients plotted for SGR logs, it was determined that sediment accumulation rates of the upper part of the Zakeen Formation in 2SK-1 wells show ascending, constant and descending trends. In contrast, in the 2SKD-1 well, sediment accumulation rates have been almost constant. In general, the sediment accumulation rates of the upper part of Zakeen Formation in 2SK-1 well are estimated more compared to 2SKD-1 well. Also, large variations in sediment accumulation rates of the upper part of the Zakeen Formation were observed in the 2SK-1 well compared to the 2SKD-1 well, indicating the occurrence of hidden effective processes for these changes.

## مقایسه تغییرات میزان‌های انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاگین از طریق بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای در چاه‌های 2SK-1 و 2SKD-1 میدان گازی سلمان

امید فلاحت‌خواه، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

falahatkah.omid@gmail.com

علی اصغر ثیاب قدسی\*، دانشیار، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

a.siabeghodsy@urmia.ac.ir

علی کدخدایی، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

kadkhodaie\_ali@yahoo.com

### چکیده

سازند زاگین یکی از سازندهای مخزنی احتمالی گاز در ناحیه رسوبی زاگرس محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای بخش بالایی این سازند با استفاده از روش‌های تحلیل طیفی تحولی (Evolutionary Spectral Analysis methods) انجام شد؛ به این ترتیب که ابتدا با یکی از روش‌های تحلیل طیفی تحولی یعنی دوره‌نگار روش چندکاهنده (Multi-tapper method) که در مطالعه‌ها صرفاً برای شناسایی و اثبات نسبت بسامدهای چرخه‌های میلانکوویچ در رسوبات به کار می‌رود، نسبت بسامدهای چرخه‌های میلانکوویچ برای نخستین بار از بخش بالایی سازند زاگین شناسایی و وجود آنها در این بخش از سازند زاگین اثبات شد؛ به علاوه، توان‌های طیفی موجک‌ها نیز در تبدیل سریع فوریه تحولی (FFT) و نمایش و ارائه تبدیل موجک (Wavelet transform) (Scalograms) سری‌های نگاره‌ی پرتوی گامای طیفی (SGR) و چگالی (RHOB) در چاه‌های 2SK-1 و 2SKD-1 میدان گازی سلمان، سیگنال‌های نجومی قوی از چرخه‌های میلانکوویچ (E, e, O و P) را نشان دادند. پس از انجام بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای زیرسطحی بخش بالایی سازند زاگین در چاه‌های مطالعه‌شده و بررسی تأثیرات چرخه‌های میلانکوویچ شناسایی شده روی این رسوبات، مقایسه تغییرات میزان انباشت رسوب این بخش از سازند زاگین در چاه‌های مطالعه‌شده میدان گازی سلمان با استفاده از روش‌های نوین ضریب همبستگی تحولی (Evolutionary correlation coefficient) و سطوح معنادار تحولی (Evolutionary significance levels)، انجام شد.

واژه‌های کلیدی: چینه‌نگاری چرخه‌ای، میزان انباشت رسوب، چرخه‌های میلانکوویچ، سازند زاگین، میدان گازی سلمان

\* نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۴۱۹۷۱۱

## مقدمه

چینه‌نگاری (1990; Mitchell et al. 2008; Chen et al. 2019a). چرخه‌ای زیرسطحی با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی، سنگ‌شناسی، نگاره‌های ژئوفیزیکی و به‌ویژه نگاره‌های پرتوی گاما انجام می‌شود؛ به طوری که اجزای سیگنال این نگاره‌ها سبب تسهیل شناسایی روندهای بسامد بالا و آنومالی‌ها و تغییرات چرخه‌ای مربوط به فراسنجه‌های نجومی<sup>۵</sup> (چرخه‌های میلانکوویچ) می‌شوند (Ji- Melnyk et al. 1994; Feng 2008; Zhang et al. 2019). چرخه‌ای زیرسطحی که از طریق داده‌های نگاره‌های ژئوفیزیکی از جمله خانواده نگاره‌های پرتوهای گاما (Molinie and Ogg 1990b; Wonik 2001; Weedon et al. 2004; Baumgarten and Wonik 2015, Zhang et al. 2019) مقاومت (Golovchenko et al. 1990)، سرعت لرزه‌ای (Jarrard and Arthur 1989)، حساسیت مغناطیسی (Barthes et al. 1999)، چگالی (Bahk et al. 2015)، تخلخل و میکرواسکتر سازندی (Armando et al. 2001; Williams et al. 2002) انجام شده‌اند، موفقیت‌آمیز بوده‌اند. در مطالعه حاضر برای بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای زیرسطحی و مقایسه میزان انباشت بخش بالایی سازند زاگین در دو چاه 2SKD-1 و 2SK-1 میدان گازی سلمان از نگاره SGR و به‌منظور افزایش دادن دقت کار از نگاره RHOB برای داده شاهد استفاده شد. چرخه‌های میلانکوویچ در بسیاری از حوضه‌های نفتی بر اساس نمونه‌های مختلف آب‌وهوایی که برای نمونه، از درجه‌های خاکستری سنگ‌شناسی<sup>۶</sup>، حساسیت مغناطیسی و نگاره‌های پرتوی گاما حاصل شده‌اند، ردیابی شده‌اند (Zheng and Luo 2004; Hinnov and Ogg 2007; Mitchell et al. 2008; Abels et al. 2010, Chen et al. 2019a). در سال ۱۹۴۱ میلادی، ریاضی‌دانی صربستانی به نام میلوتین میلانکوویچ توانست نقش خورشید و منظومه شمسی را در تحریک تغییرات آب‌وهوایی روی زمین اثبات کند؛ او این کار را با تفسیر کامل ریاضی از تغییرات تابش خورشیدی به‌طور هم‌زمان برای عرض‌های جغرافیایی و فصل‌ها انجام داد (Milankovitch 1941; Hinnov 2013).

دوین پسین بازه‌ای کلیدی در تاریخچه زمین است که با کاهش چشمگیر غلظت CO<sub>2</sub> مشخص می‌شود (Berner 2006; Pas et al. 2018). یکی از انقراض‌های توده‌ای (پنج بزرگ<sup>۱</sup>) در تاریخچه زمین دقیقاً پیش از مرز فراسنین- فامنین (دوین پسین) رخ داده است و به نظر می‌رسد میزان این انقراض از میزان انقراض مرز دوین و کربونifer نیز بیشتر بوده است (McGhee 1996; De Vleeschouwer et al. 2012). از جمله سطح آب دریا، محیط‌های رسوبی و آبی، حمل‌ونقل رسوب، رسوب‌گذاری و ... که آب‌وهوا آنها را کنترل می‌کند، به‌شکل چرخه‌ای در شاخص‌های سنگ‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی رخ می‌دهند (Mitchell et al. 2008; Hinnov 2013). در مطالعه حاضر برای نخستین‌بار، ردیابی شاخص‌های چرخه‌ای یادشده از طریق بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای<sup>۲</sup> زیرسطحی و با استفاده از داده‌های نگاره‌های گامای طیفی و چگالی برای بخش بالایی سازند زاگین در میدان گازی سلمان انجام شد. چینه‌نگاری چرخه‌ای زیرشاخه‌ای از علم چینه‌نگاری است که به شناسایی، توصیف، انطباق و تفسیر تغییرات چرخه‌ای شکل‌گرفته تحت‌تأثیر چرخه‌های میلانکوویچ در تمام طول تاریخچه زمین می‌پردازد؛ همچنین این شاخه از علم چینه‌نگاری با بهره‌گیری از چرخه‌های میلانکوویچ شناخته‌شده در مطالعه‌ها به سن‌گذاری، تفسیر تاریخچه رسوبی و برآورد میزان انباشت رسوب<sup>۳</sup> کمک می‌کند (Strasser et al. 2006; Hinnov 2013). مطالعه‌های چینه‌نگاری چرخه‌ای در درجه اول بر اثبات وجود چرخه‌های میلانکوویچ در نهشته‌های رسوبی، تعیین زمان‌شناسی زمین<sup>۴</sup>، محاسبه میزان انباشت رسوب و تعیین طبقه‌بندی دقیق چینه‌ای تمرکز دارند (Zheng and Luo 2004; Li et al. 2018a; Chen et al. 2019a). نگاره‌های پرتوی گاما، چگالی و القایی با حساس بودن به تغییرات چرخه‌ای در رسوبات به‌طور ویژه برای مطالعه‌های چینه‌نگاری چرخه‌ای مفیدند (Worthington

<sup>1</sup> Big Five<sup>2</sup> Subsurface Cyclostratigraphy<sup>3</sup> Sediment accumulation rate<sup>4</sup> Geochronology<sup>5</sup> Astronomical parameters<sup>6</sup> Lithological grayscales

دونین (لوچکووین تا فراسنین) سن سازند زاکین تعیین شده است. سازند زاکین از جنبه چینه‌نگاری زیستی به‌طور خاصی به نهشته‌های دونین عربستان سعودی از جمله سازندهای تاویل، جوف و جبه شباهت دارد و باتوجه‌به اینکه سازندهای یادشده در این کشور سنگ مخزن نفت هستند، سازند زاکین نیز می‌تواند به‌شکل مخازن نفتی یا گازی احتمالی بررسی شود (Aghanabati 2004; Ghavidel-Syooki 1999). این سازند از نظر طرز قرارگیری چینه‌ای در زون زاگرس و بین دو ناپیوستگی فرسایشی محصور شده و مرز زیرین آن با سازند سرچاهان (سیلورین) و مرز بالایی آن با سازند فراقان (پرمین زیرین) است (Ghavidel-Syooki 1999). در مطالعه حاضر، تنها بخش بالایی سازند زاکین یعنی نهشته‌های فراسنین (دونین بالایی) این سازند مطالعه شد (شکل ۲). انباشت رسوب به مقدار رسوب جمع‌شده در رخنمون‌ها، چاه‌ها و توالی‌های رسوبی گفته می‌شود که در نتیجه پیشینه‌های تأمین رسوب و فرسایش در محیط رسوب‌گذاری حاصل می‌شود (Pomar and Kendall 2008). برآورد میزان انباشت رسوب از طریق چینه‌نگاری چرخه‌ای یکی از جدیدترین روش‌ها در زمینه علم زمین‌شناسی است؛ به‌طوری‌که در این روش، هدف یادشده با استفاده از انواع داده‌ها (ژئوشیمیایی و نگاره‌های ژئوفیزیکی) و با کاربرد نرم‌افزار Acycle v 2.0 (Li et al. 2019a; Li et al. 2018a) و روش‌های تحلیل طیفی تحولی<sup>۴</sup> موجود در این نرم‌افزار برآورده می‌شود و مطالعه‌های بسیاری با استفاده از این روش انجام شده‌اند (Li et al. 2018a; Huang and Hinnov 2019; Chen et al. 2019a; Chen et al. 2019b; Zhang et al. 2019; Zhong et al. 2019; Su et al. 2019). در مطالعه حاضر، ابتدا چینه‌نگاری چرخه‌ای بخش بالایی سازند زاکین با روش‌های تحلیل طیفی تحولی بررسی و سپس میزان انباشت رسوب در دو چاه مطالعه‌شده برای این بخش از سازند زاکین با دو روش جدید (طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی<sup>۵</sup> و طیف‌نگار سطوح معنادار تحولی<sup>۶</sup>) مقایسه شد.

اصلی مدار زمین پیرامون خورشید را که در تغییرات آب‌وهوای جهانی نقش دارند، محاسبه کرد که به نام‌های حرکت گریز از مرکز محور زمین<sup>۱</sup>، حرکت انحرافی محور چرخش زمین<sup>۲</sup> و حرکت تقدیمی محور زمین<sup>۳</sup> خوانده می‌شوند و به چرخه‌های میلانکوویچ معروفند (Milankovitch 1941; Fletcher 2013). چینه‌نگاری چرخه‌ای سیستم دونین در نقاط مختلف زمین از جمله جنوب چین (Gong et al. 2001; Chen and Tucker 2003)، فرانسه، مراکش (Ellwood et al. 2011)، کانادا (De Vleeschouwer et al. 2012)، لهستان (De Vleeschouwer et al. 2013)، بلژیک (De Vleeschouwer et al. 2014)، غرب کانادا، ایالات متحده آمریکا، لهستان، بلژیک، چین (De Vleeschouwer et al. 2017)، ایالات متحده آمریکا (Pas et al. 2018) انجام شده است و بسامدهای متفاوت چرخه‌های میلانکوویچ از نهشته‌های این نواحی گزارش شده‌اند. در جدول ۱، نسبت‌های بسامد چرخه‌های میلانکوویچ برخی از این بررسی‌ها در برابر نسبت‌های یافت‌شده در مطالعه حاضر نشان داده شده‌اند.

میدان سلمان یکی از میدادین نفتی/گازی در شرق خلیج فارس است که دارای مخزن گازی در ناحیه زاگرس است (شکل ۱). این میدان در فاصله ۱۴۴ کیلومتری جزیره لاوان، نزدیک به مرز آبی ایران و امارات متحده عربی قرار دارد و سه‌چهارم آن در آب‌های ایران و یک‌چهارم آن در آب‌های امارات متحده عربی واقع شده است؛ بخشی از این میدان که در آب‌های امارات متحده عربی قرار دارد، با نام میدان ابوالبوخوش شناخته می‌شود. سازند زاکین، سازندی آواری و در مقطع تپ در تنگه زاکین، کوه فراقان دارای ۲۸۵ متر ضخامت است و از سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ و شیل همراه با چند افق دولومیت شکل گرفته است (Ghavidel-Syooki 1999). باتوجه‌به مطالعه‌های گرده‌شناسی که قویدل سیوکی (۱۹۹۹، ۲۰۰۳) درباره گونه‌های پالینومورف (دانه‌های گرده، آکریتارشا، میوسپورها و اسکلوکودونت‌ها) انجام داده،

<sup>4</sup> Evolutionary Spectral Analysis methods

<sup>5</sup> Evolutionary Correlation Coefficients spectrogram

<sup>6</sup> Evolutionary significance levels spectrogram

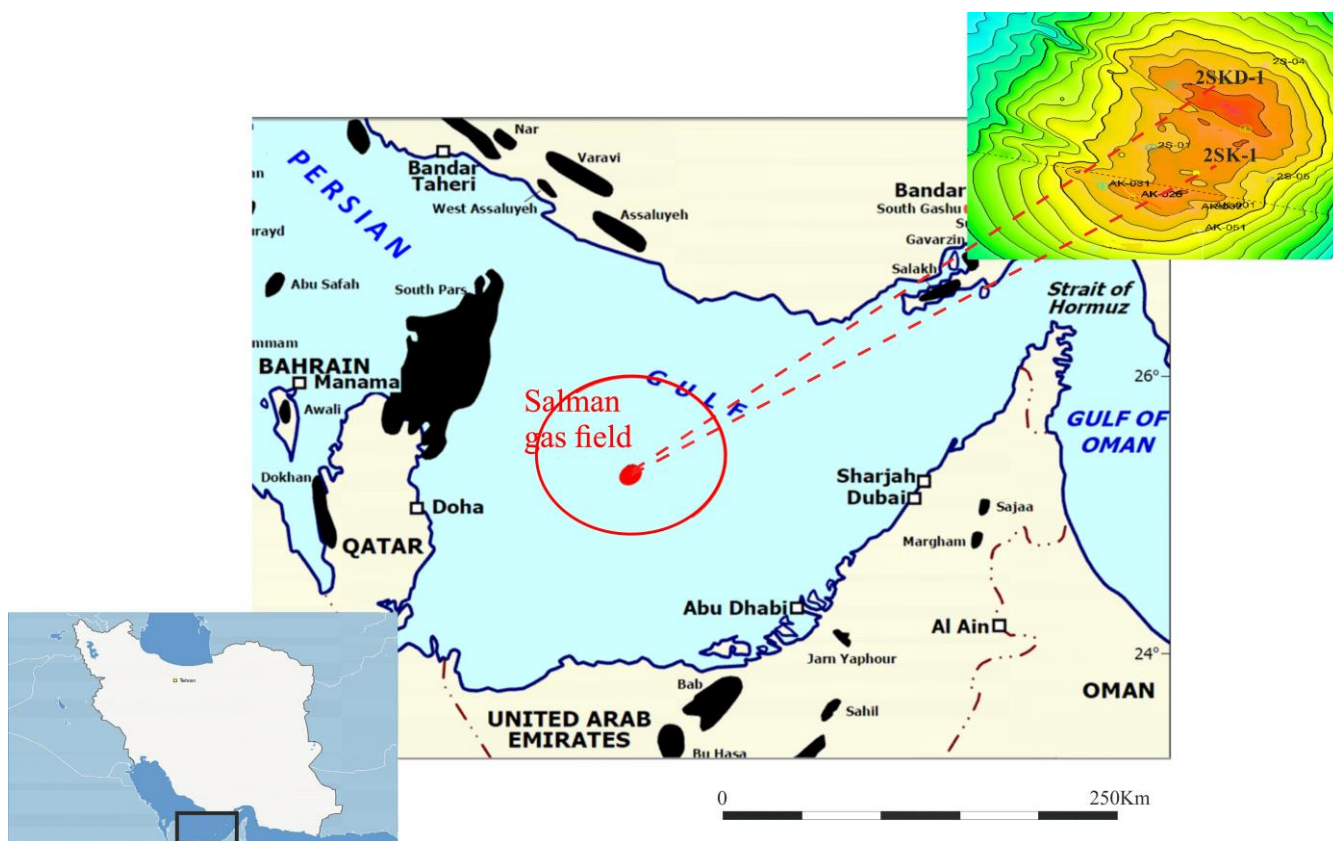
<sup>1</sup> Eccentricity

<sup>2</sup> Obliquity

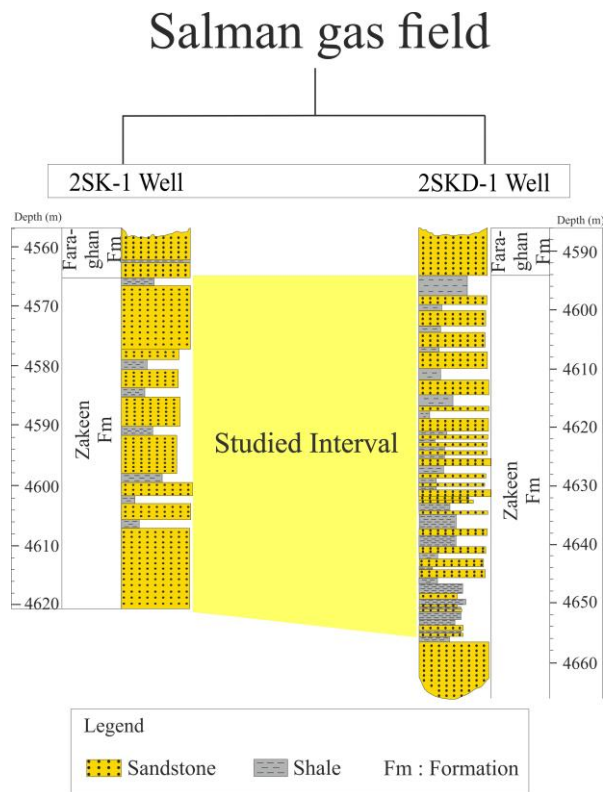
<sup>3</sup> Precession

جدول ۱- نسبت چرخه‌های میلانکوویچ یافت شده در مطالعه حاضر و دیگر بررسی‌ها برای سیستم دونین از طریق روش چندکاهنده (MTM)

چرخه‌های میلانکوویچ	Pas et al. 2018	De Vleeschouwer et al. 2014	De Vleeschouwer et al. 2012	مطالعه حاضر
حرکت گریز از مرکز طولانی مدت زمین (E)	۱۲	۳۳/۳۳	۲۵	۱۹/۳۸-۱۸/۲۴-۲۰/۸-۱۸/۰۳
حرکت گریز از مرکز کوتاه مدت زمین (e)	۴	۸-۱۶-۹/۹-۵/۵	۵-۵/۵۵	-۴/۰-۷/۱۱-۳/۶-۵/۶۳ ۶/۰۸-۳/۶-۴/۴۳-۶/۴۵-۳/۷۸
حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O)	۱	-	۲/۵-۴	-۲/۰-۲/۳۳-۲/۰۸-۲/۳۹ ۲/۸۷-۲/۶۲-۲/۱۶-۲/۳۸
حرکت تقدیمی طولانی مدت زمین (P1)	-	۳/۲	-	-۱/۴۸-۱/۲-۱/۵۵-۱/۸۳ ۱/۴۹-۱/۵۸-۱/۳۱
حرکت تقدیمی میان مدت زمین (P2)	-	-	-	-
حرکت تقدیمی کوتاه مدت زمین (P3)	-	-	-	-



شکل ۱- موقعیت میدان نفتی/گازی سلمان در خلیج فارس همراه با نقشه خطوط هم‌تراز (UGC) چاه‌های مطالعه‌شده (برگرفته از KPE 2015 با ایجاد تغییرات)



شکل ۲- بازه‌های مطالعه‌شده از سازند زاکین (بخش بالایی سازند زاکین) در چاه‌های 2SK-1 و 2SKD-1 میدان گازی سلمان

#### روش مطالعه

نگاره‌های ژئوفیزیکی چاه‌های نفتی می‌توانند چرخه‌های رسوبی‌ای را که در بخش‌های عمیق سازند دفن شده‌اند و در دسترس نیستند، به‌طور غیرمستقیم ثبت کنند (Yuan et al. 2019). به‌منظور استخراج و درک تغییرات چرخه‌ای<sup>۱</sup> و دوره‌ای این نگاره‌ها لازم است داده‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل سیگنال رقومی<sup>۲</sup> پردازش شوند (Yuan et al. 2019). روش‌های پردازش سیگنال رقومی که برای مهندسی برق و ارتباطات و ژئوفیزیک (لرزه‌نگاری) ایجاد شده‌اند، ابزاری را ارائه می‌دهند که امروزه برای تحلیل سری‌های زمانی زمین‌شناسی استفاده می‌شود (Kodama and Hinnov 2015). توان طیفی سری‌های زمانی یک متغیر، اساس تحلیل آنهاست که توزیع واریانس سری زمانی (توان) را به‌شکل تابعی از بسامد بررسی می‌کند (Kodama and Hinnov 2015) و در مطالعه‌های چینه‌نگاری چرخه‌ای، تحلیل توان طیفی به

سنگ‌بنایی برای شناسایی اجزای دوره‌ای یا شبه‌دوره<sup>۳</sup> تبدیل شده است (Weedon 2003; Li et al. 2019a). توان طیفی را می‌توان با رویکردهای مختلف غیرپارامتری یا پارامتری ارزیابی کرد (Li et al. 2019a). روش‌های طیفی غیرپارامتری که اغلب استفاده می‌شوند، عبارتند از: دوره‌نگار یکنواخت‌شده<sup>۴</sup>، همبستگی نگار بلک‌من-توکی<sup>۵</sup> و دوره‌نگار روش چندکاهنده<sup>۶</sup> (MTM) (Weedon 2003; Kodama and Hinnov 2015; Li et al. 2019a). یکی از اهداف مهم چینه‌نگاری چرخه‌ای، تعیین پاسخ این پرسش است که آیا چرخه‌های میلانکوویچ در چرخه‌های رسوبی حفظ شده‌اند یا خیر؟ و این امر به استفاده گسترده از دوره‌نگارها به‌ویژه روش تخمین طیفی چندکاهنده (MTM) منجر شده است (Thomson 1982; Li et al. 2019a)؛ به‌این ترتیب که به‌منظور اثبات وجود چرخه‌های میلانکوویچ در بخش بالایی سازند زاکین در چاه‌های میدان مطالعه‌شده،

<sup>3</sup> Quasi-period

<sup>4</sup> smoothed periodogram

<sup>5</sup> Blackman-Tukey correlogram

<sup>6</sup> Multi taper method (MTM) periodogram

<sup>1</sup> cyclicity

<sup>2</sup> Digital signal processing techniques

نگاره‌های مدنظر ثابت شد و سپس در طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه که هینوف آن را بازبینی کرده است (Kodama and Hinnov 2015)، تأثیرگذاری این چرخه‌ها بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین و میزان فراوانی آنها در این بخش از سازند و بخش‌های متفاوتی از طول سازند زاکین در چاه‌های مطالعه‌شده بررسی شد؛ سپس از نمایش و ارائه تبدیل موجک برای مقایسه پهنه‌های دارای اهمیت آماری زیاد بین سری‌های زمانی استفاده شد (Grinsted et al. 2004) و برای ایجاد ارتباط بین چرخه‌های شناسایی‌شده در سیگنال‌های رسوبی با فراسنجه‌های نجومی نظری<sup>۳</sup> از روش نسبت بسامد<sup>۴</sup> (Mayer and Appel 1999) استفاده شد؛ گفتنی است عمل درون‌یابی<sup>۵</sup> داده‌ها با میزان ۰/۱۵۲ برای منظم کردن فاصله داده‌ها انجام شد تا سرعت نمونه‌برداری از داده‌ها دقیق‌تر شود (Li et al. 2018b). پس از شناسایی قطعی چرخه‌های میلانکوویچ، آنها به روش فیلترکردن<sup>۶</sup> از نگاره‌های SGR دو چاه استخراج شدند؛ زیرا فیلترکردن در چینه‌نگاری چرخه‌ای اجازه می‌دهد چرخه‌ها در دامنه چینه‌ای به‌طور دقیق از هم جدا شوند (Pas et al. 2018).

#### فراسنجه‌های نجومی دونین

چرخه‌های میلانکوویچ به‌جز چرخه حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E) هیچ‌گاه در طول زمان زمین‌شناسی پایدار نبوده‌اند و مدت زمان آنها همواره درحال نوسان بوده است (Berger and Loutre 1994; Laskar et al. 2004)؛ گفتنی است به‌علت مدارهای پایدار سیاره‌های مشتری و زهره در سرتاسر زمان زمین‌شناسی، طول مدت این چرخه‌های ۴۰۵ هزارساله (E) تقریباً ثابت بوده است (Laskar et al. 2004). چرخه حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت زمین (e) در دونین پسین دارای طول مدت ۱۰۰ هزار ساله بوده است (De Vleeschouwer et al. 2017; Pas et al. 2018)؛ باوجوداین، سرعت چرخش زمین در سیستم دونین به‌طور درخور توجهی

دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) برای نگاره‌های SGR و RHOB در نرم‌افزار Acycle v2.0 (Li et al. 2018) اعمال و از این طریق، نسبت بسامد چرخه‌های میلانکوویچ در هر دوره‌نگار مشاهده و وجود آنها اثبات شد (شکل‌های ۳، A و B و ۴، A و B). پس از نخستین گزارش وجود چرخه‌های میلانکوویچ در نهشته‌های بخش بالایی سازند زاکین در چاه‌های مطالعه‌شده میدان گازی سلمان به روش MTM، دیگر روش‌های تحلیل طیفی تحولی شامل طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه<sup>۱</sup> و نمایش و ارائه تبدیل موجک<sup>۲</sup> که در نرم‌افزار Acycle گنجانده شده است، به‌منظور بررسی تأثیرهای دقیق‌تر این چرخه‌های نجومی روی بخش بالایی سازند زاکین در چاه‌های 2SKD-1 و 2SK-1 میدان گازی سلمان به کار گرفته شدند. پس از بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای بخش بالایی سازند زاکین در دو چاه مطالعه‌شده میدان گازی سلمان با استفاده از دو روش نوین موجود در این نرم‌افزار (طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی و طیف‌نگار سطوح معنادار تحولی)، مقایسه میزان‌های انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در چاه‌های مطالعه‌شده میدان گازی سلمان امکان‌پذیر شد. روش‌های ضریب همبستگی تحولی و سطوح معنادار تحولی برای ردیابی میزان‌های انباشت رسوب متغیر در سری‌های زمانی داده‌ها (در مطالعه حاضر از سری‌های زمانی داده‌نگاره‌های گامای طیفی برای هر دو چاه استفاده شد) ایجاد شده‌اند (Li et al. 2018, Hinnov 2018; Zhang et al. 2019)؛ این روش‌ها با ارزیابی ضریب همبستگی بین توان‌های طیفی نجومی و سری‌های زمانی داده استفاده‌شده، میزان‌های انباشت رسوب را در محدوده قابل قبول برآورد می‌کنند (Li et al. 2018; Zhong et al. 2019).

#### نتایج و بحث

##### تحلیل طیفی تحولی برای چینه‌نگاری چرخه‌ای

وجود چرخه‌های میلانکوویچ در رسوبات بخش بالایی سازند زاکین با اعمال دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) برای

<sup>3</sup> Theoretical astronomical parameters

<sup>4</sup> Frequency ratio method

<sup>5</sup> Interpolation

<sup>6</sup> Filtering

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform (LAH) Spectrogram

<sup>2</sup> Wavelet Transform Scalogram



انحرافی (O) و چرخه حرکت تقدیمی (P) تفسیر شد و این نسبت‌ها در دوره‌نگارهای رسم‌شده برای نگاره‌های SGR و RHOB تطبیق یافتند تا وجود چرخه‌های میلانکوویچ در رسوبات بخش بالایی سازند زاگین در هر دو چاه مشخص شود (شکل ۳ و ۴). در پژوهش حاضر، در همه دوره‌نگارهای روش چندکاهنده (MTM) رسم‌شده برای نگاره‌ها از دو کاهنده ( $2\pi$ ) استفاده شد.

#### دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) برای چاه 2SKD-1

در این چاه، نسبت‌های  $1/24$ ،  $6/0.8$ ،  $7/8.3$ ،  $2/1.87$ ،  $2/3.8$  و  $1/5.5$  در دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم‌شده برای نگاره SGR و نسبت‌های  $19/3.8$ ،  $6/4.5$ ،  $4/4.3$ ،  $3/6$ ،  $2/6.2$ ،  $1/1.83$  و  $1/4.9$  در دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم‌شده برای نگاره RHOB به دست آمدند که همه نسبت‌ها تقریباً با نسبت  $1:2:5:20$  برابر بودند و از این طریق، هرکدام از نسبت‌های نزدیک بر پایه مقدار خود یکی از چرخه‌های میلانکوویچ (E یا e یا O یا P) تفسیر شد (شکل ۴). پس از اینکه وجود چرخه‌های میلانکوویچ (و تأثیر آنها بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاگین) از طریق دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم‌شده برای نگاره‌های SGR و RHOB در هر دو چاه تأیید شد، رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاگین در این دو چاه با کاربرد طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه (که هینوف آن را بازبینی کرده است) از نظر کنترل‌شدن از طریق چرخه‌های میلانکوویچ و میزان فراوانی این چرخه‌ها در عمق‌های متفاوت بررسی شد.

خروجی‌های فیلتر چرخه‌های میلانکوویچ برای نگاره SGR در هر دو چاه

چرخه‌های شناسایی‌شده از طریق روش چندکاهنده (MTM) با نرم‌افزار QAnalySeries و به‌کاربردن روش فیلترکردن از نگاره‌های SGR هر دو چاه 2SKD-1 و 2SK-1 میدان‌گازی سلمان استخراج شدند و از طریق این روش، فیلترهای  $40.5$  هزارساله (E)،  $100$  هزارساله (e)،  $34/4$  هزارساله (O)،  $21/3$  هزارساله (P) برای نگاره‌های SGR هر دو چاه رسم شدند (شکل ۵، A و ۶، A).

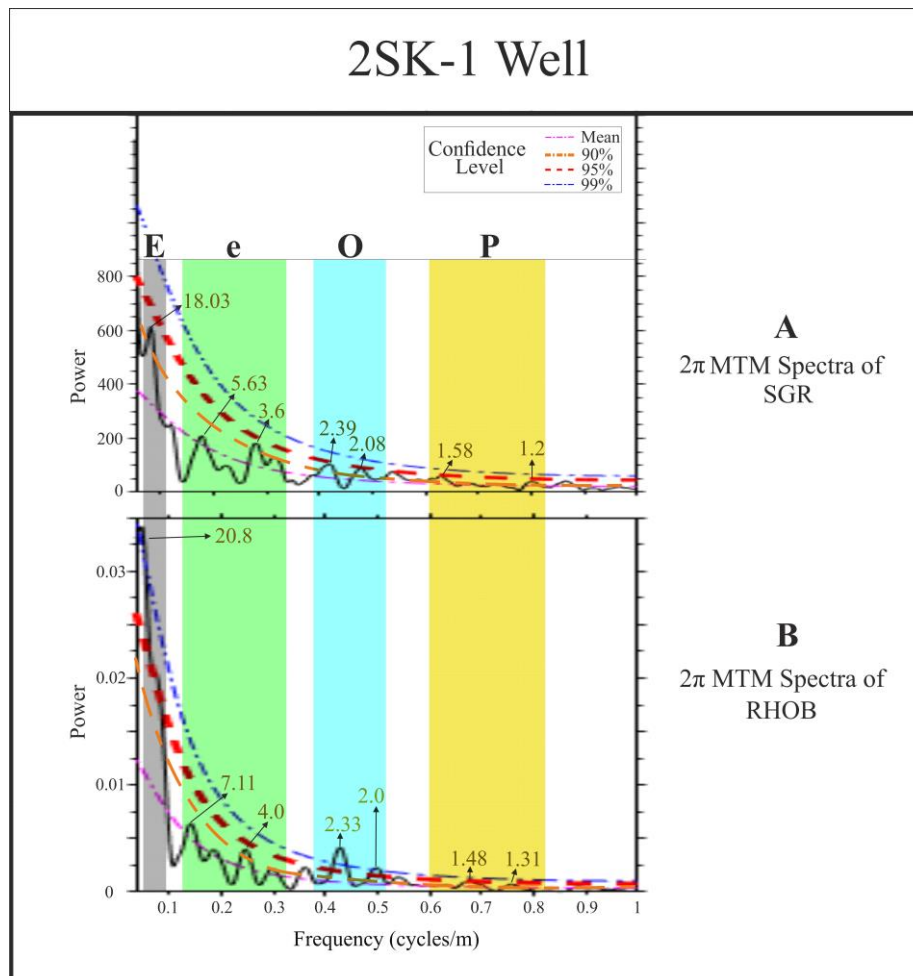
سریع‌تر از امروز بوده است و به‌همین‌علت، مدت زمان‌های حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) و حرکت تقدیمی محور زمین (P) کوتاه‌تر پیش‌بینی می‌شود (Waltham 2015)؛ به‌طوری‌که حرکت‌های انحرافی زمین (O)، تقدیمی طولانی‌مدت زمین (P1)، تقدیمی میان‌مدت زمین (P2) و تقدیمی کوتاه‌مدت زمین (P3) دارای طول مدت تقریباً  $34/4$ ،  $21/3$ ،  $20/2$  و  $17/3.8$  هزار سال بوده‌اند (Waltham 2015).

در مطالعه حاضر به‌علت دقت داده‌ها و نبود داده شاهد دیگر (داده چینه‌نگاری زیستی، ایزوتوپی و غیره)، هر نسبت نزدیک به چرخه حرکت تقدیمی، چرخه حرکت تقدیمی (P) شناخته و  $21/3$  هزارساله در نظر گرفته شد.

#### دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) برای چاه 2SK-1

به‌منظور بررسی سری‌های زمانی داده‌های نگاره‌های مدنظر، دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) برای آنها در هر دو چاه رسم شد؛ اگر سری‌های زمانی حاوی سیگنال دوره‌ای یا شبه‌دوره‌ای قوی باشند، مدل‌سازی سطوح اطمینان<sup>۱</sup> به‌طور خاصی در دقت نمونه‌برداری نسبت‌ها در دوره‌نگارها اهمیت دارد (Mann and Lees 1996; Li et al. 2019b)؛ ازاین‌رو، سطوح اطمینان با ترازهای میانه،  $90$  درصد،  $95$  درصد و  $99$  درصد برای هر دوره‌نگار روش چندکاهنده رسم شد و تقریباً همه چرخه‌ها از سطح اطمینان میانه و برخی از  $90$  درصد به بالا نمونه‌برداری شدند. نسبت چرخه‌های شناسایی‌شده در چاه 2SK-1 در دوره‌نگار چندکاهنده نگاره SGR عبارتند از:  $18/0.3$ ،  $5/6.3$ ،  $3/6$ ،  $2/3.9$ ،  $2/0.8$ ،  $1/5.8$  و  $1/2$  و در دوره‌نگار چندکاهنده نگاره RHOB عبارتند از:  $20/8$ ،  $4/0$ ،  $7/11$ ،  $2/3.3$ ،  $2/0$ ،  $1/4.8$  و  $1/3.1$  که نزدیک به نسبت چرخه‌های  $1:2:5:20$  (که به‌ترتیب از چپ به راست نسبت مؤلفه چرخه‌های E، e، O و P را تشکیل می‌دهد) است (Kodama and Hinnov 2015; Friedrich et al. 2016; Lang et al. 2018; Jin et al. 2019)؛ بر همین اساس، هر نسبت ملاحظه‌شده باتوجه‌به مقدار عددی آن در دوره‌نگار، چرخه حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت (E)، چرخه حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت (e)، چرخه حرکت

<sup>1</sup> Confidence Levels



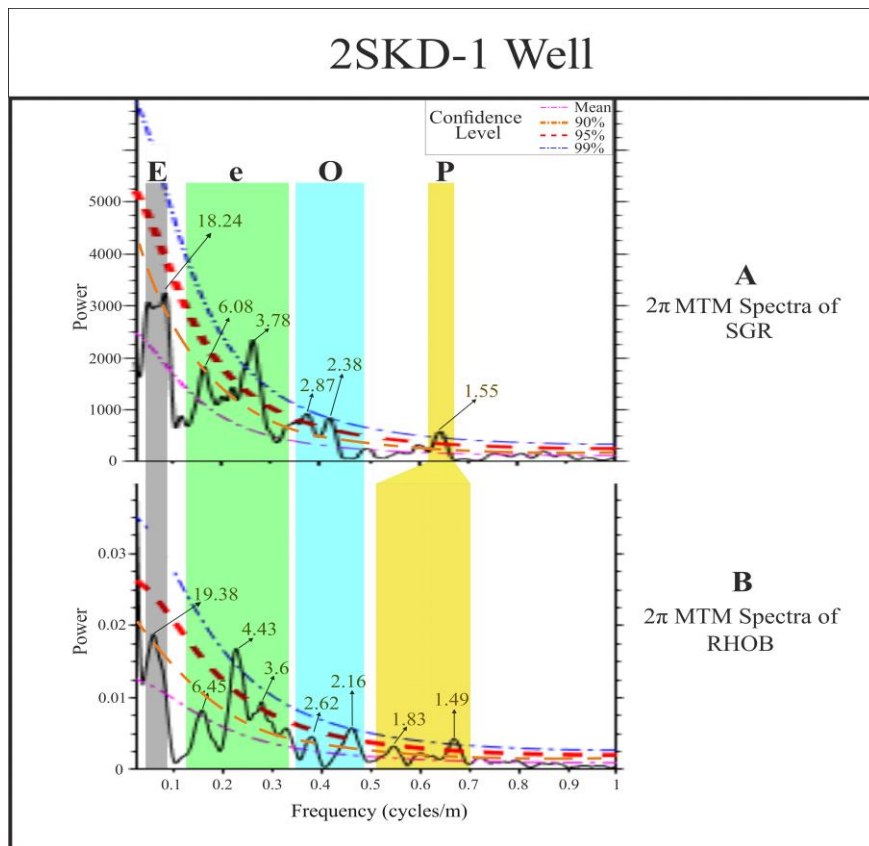
شکل ۳- A. دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم شده برای نگاره SGR در چاه 2SK-1، B. دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم شده برای نگاره RHOB در چاه 2SK-1؛ با این عمل، نسبت چرخه‌های میلانکوویچ ۴۰۵ هزارساله (E)، ۱۰۰ هزارساله (e)، ۳۴/۴ هزارساله، ۲۱/۳ هزارساله (P) از طریق طیف‌های دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) نگاره‌های SGR و RHOB شناسایی و باهم تطبیق شدند.

(Kodama and Hinnov 2015)؛ همچنین با استفاده از طیف‌نگار تبدیل سریع فوری می‌توان تغییرات چرخه‌های میلانکوویچ را به‌طور دقیق رمزگشایی (Westerhold et al. 2018) و آثار آنها را در رسوب‌گذاری توالی‌های رسوبی و مدت زمان‌های هیاتوس‌های احتمالی شناسایی کرد (Husson et al. 2014). اعمال طیف‌نگار یادشده برای نگاره‌های SGR و RHOB در هر دو چاه سبب آشکار شدن فراوانی و میزان تغییرات چرخه‌های میلانکوویچ در بخش‌های متفاوتی از طول بخش بالایی سازند زاکین شد؛ بر اساس توان‌های طیفی مشاهده‌شده

طیف‌نگار تبدیل سریع فوری برای نگاره‌های چاه 2SK-1 در این بخش با استفاده از طیف‌نگار تبدیل سریع فوری (که هینوف آن را بازیابی کرده است) از روش‌های تحلیل طیفی تحولی، تأثیرگذاری چرخه‌های میلانکوویچ بر بخش بالایی سازند مدنظر را در دو چاه 2SK-1 و 2SKD-1 میدان‌گازی سلمان بررسی می‌کنیم. گفتنی است تبدیل سریع فوری، بسامدها و دامنه‌های سینوسی‌ای را برآورد می‌کند که می‌تواند برای بازسازی سری‌های زمانی استفاده شوند؛ در نتیجه، سری‌های زمانی را در دوره‌های «مؤلفه» خود تجزیه می‌کند

داشت و از داده نگاره چگالی (RHOB) به شکل داده شاهد استفاده شد، از طریق توان‌های طیفی مشاهده شده معلوم شد رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SK-1 به طور خاصی تحت تأثیر چرخه‌های ۴۰۵ هزارساله (E) بوده است؛ زیرا بیشترین توان‌های طیفی مشاهده شده در طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه به این چرخه مربوط بودند؛ ولی دیگر چرخه‌ها نیز از جمله چرخه‌های ۱۰۰ هزارساله (e) یا ۳۴/۴ هزارساله (O) نیز با شدت تأثیرگذاری کمتر بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین اثر داشته‌اند (شکل ۴، B). در آغاز عمق ۴۶۰۵، تأثیرگذاری چرخه‌های e و O نسبتاً بیشتر بوده است که گویای تغییرات شدید احتمالی در میزان رسوب‌گذاری این بخش از سازند (در این بازه) است.

در طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه رسم شده برای نگاره SGR در چاه 2SK-1، نوسان‌ها و فراوانی چرخه‌های حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E)، حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت زمین (e)، حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) و حرکت تقدیمی محور زمین (P) و در طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه رسم شده برای نگاره RHOB در همین چاه، تغییرات و گستره چرخه‌های حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E)، حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت زمین (e) و حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) شناسایی شدند (شکل ۴، B). همان‌طور که گفته شد و باتوجه به اینکه در بررسی حاضر، داده نگاره گامای طیفی (SGR) برای بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای در اولویت قرار



شکل ۴- A. دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم شده برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1. B. دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) رسم شده برای نگاره RHOB در چاه 2SKD-1

SGR و RHOB این چاه، فراوانی و میزان تغییرات چرخه‌های حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E)، حرکت گریز از

طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه برای نگاره‌های چاه 2SKD-1 در طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه رسم شده برای نگاره‌های

در این چاه رسم شدند؛ این بازه‌ها اصلی‌ترین تغییرات تدریجی احتمالی در سنگ‌شناسی سازند زاکین (در این چاه) را نشان می‌دهند (شکل ۷).

#### اعمال نمایش و ارائه تبدیل موجک برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1

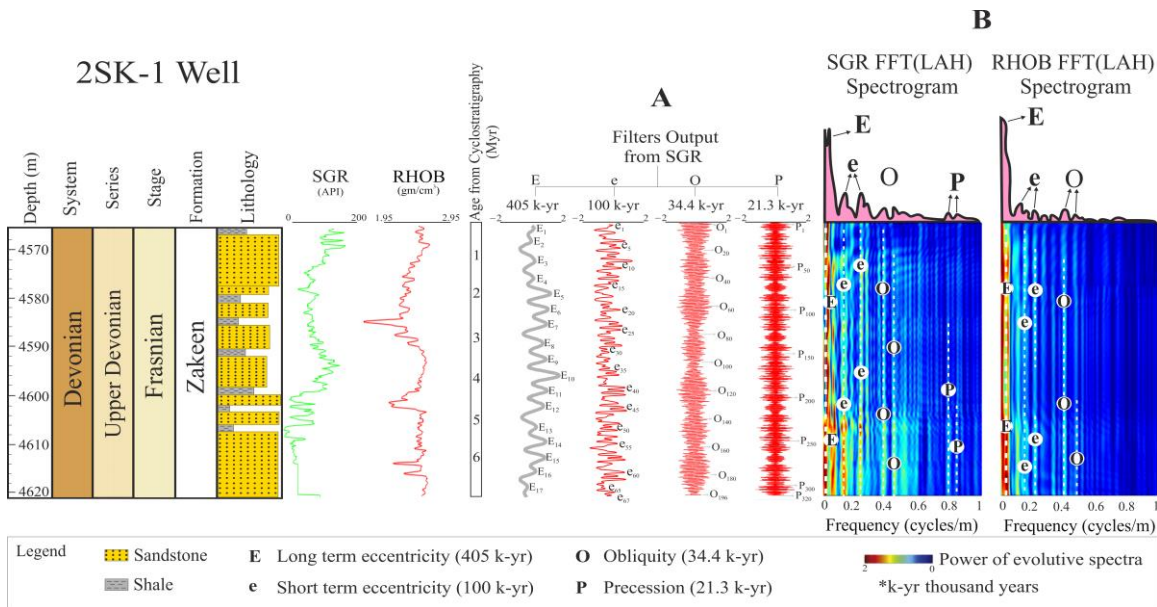
نمایش و ارائه تبدیل موجک برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1 اعمال شد و چرخه‌های ۴۰۵ هزارساله (E)، ۱۰۰ هزارساله (e)، ۳۴/۴ هزارساله (O) و ۲۱/۳ هزارساله (P) روی آن مشخص شدند و خطوط انطباق برای اجزای دوره‌ای مشاهده شده در برابر فیلترهای چرخه‌های E، e، O و P رسم شدند؛ این بازه‌ها اصلی‌ترین تغییرات تدریجی احتمالی در سنگ‌شناسی بخش بالایی سازند زاکین (در این چاه) را نشان می‌دهند (شکل ۸).

با انجام روش‌های دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) و طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه (که هیئوف آن را بازبینی کرده است) و نمایش و ارائه تبدیل موجک به ترتیب چرخه‌های میلانکوویچ شناسایی شدند، تأثیرگذاری این چرخه‌ها بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین و میزان فراوانی آنها در این بخش از سازند و در بخش‌های متفاوتی از طول بخش بالایی سازند زاکین در چاه‌های مطالعه شده بررسی و مقایسه پهنه‌های دارای اهمیت آماری زیاد بین سری‌های زمانی و انطباق آنها در برابر فیلترهای چرخه‌های E، e، O و P برای یافتن احتمالی اصلی‌ترین تغییرات سنگ‌شناسی انجام شد و در نهایت از این طریق، چینه‌نگاری چرخه‌ای در دو چاه مطالعه شده بررسی شد. همان‌طور که گفته شد پس از بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای می‌توان میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در دو چاه 2SKD-1 و 2SK-1 را برآورد کرد؛ به این منظور، در نرم‌افزار Acycle با اعمال طیف‌نگارهای ضریب همبستگی و سطوح معنادار تحولی از روش‌های تحلیل طیفی برای نگاره SGR در هر دو چاه استفاده شد (Li et al. 2018a; Chen et al. 2019a).

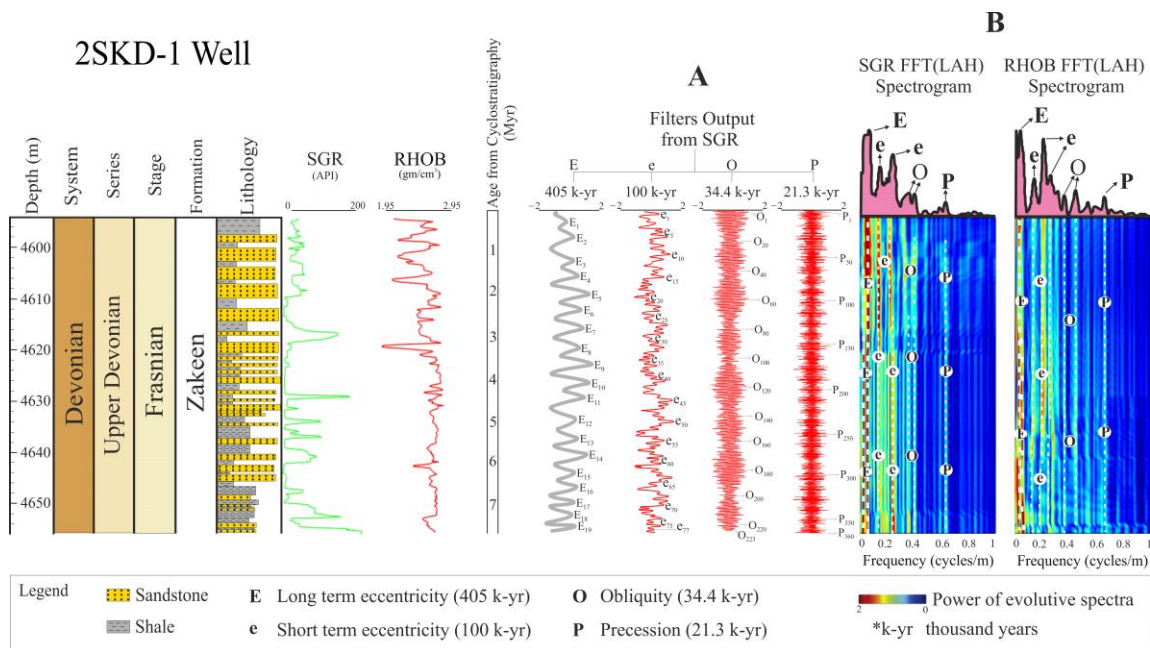
مرکز کوتاه‌مدت زمین (e)، حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) و حرکت تقدیمی محور زمین (P) بر اساس توان‌های طیفی ردیابی شده شناسایی شدند. در این چاه نیز باتوجه به توان‌های طیفی بسیار بالا، بیشترین تأثیرگذاری چرخه‌ای در رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین از طریق چرخه حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E) انجام شده است (شکل ۵، B)؛ به علاوه بر پایه توان‌های طیفی مشاهده شده، چرخه‌های حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت زمین (e)، حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) و حرکت تقدیمی محور زمین (P) با دامنه‌های بسیار پایین‌تر بر رسوب‌گذاری این بخش از سازند تأثیر گذاشته‌اند (شکل ۵، B). در ادامه، این موضوع از طریق طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی به‌طور دقیق‌تر در هر دو چاه بررسی می‌شود.

#### اعمال نمایش و ارائه تبدیل موجک برای نگاره SGR در چاه 2SK-1

در نوار فهرست انتخاب نرم‌افزار Acycle با انتخاب گزینه سری‌های زمانی و سپس تبدیل موجک و با اصلاح فراسنجه‌های لازم (آغاز محدوده زمانی تا نقطه پایان محدوده زمانی)، نمایش و ارائه تبدیل موجک برای نگاره SGR این چاه رسم شد و طی آن، باتوجه به توان‌های طیفی بالای مشاهده شده (رنگ‌های قرمز پررنگ، کم‌رنگ، نارنجی و زرد)، چرخه‌های حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E)، حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت زمین (e)، حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) و حرکت تقدیمی محور زمین (P) روی نمایش و ارائه مشخص شدند و سپس به منظور مقایسه دقیق این چرخه‌ها، اجزای دوره‌ای مشاهده شده با فیلترهای استخراج شده از همین نگاره انطباق داده شدند (شکل ۷)؛ با این عمل، پهنه‌های دارای اهمیت آماری زیاد بین سری‌های زمانی با چرخه‌های استخراج شده از طریق فیلترها مقایسه و خطوط انطباق لازم برای نهشته‌های بخش بالایی سازند زاکین



شکل ۵- A. فیلترهای خروجی چرخه‌های میلانکوویچ استخراج شده از نگاره SGR در چاه 2SK-1 که هر کدام چرخه‌های میلانکوویچ مربوطه را نمایش می‌دهند و یک ستون زمانی که از طریق مدت زمان و شمارش تعداد چرخه‌های میلانکوویچ حاصل شده است. B. طیف‌نگارهای تبدیل سریع فوریه (که هینوف آن را بازیابی کرده است) رسم شده برای نگاره‌های SGR و RHOB که با دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) به منظور نشان دادن فراوانی و تغییرات چرخه‌های میلانکوویچ و تأثیرگذاری آنها در عمق‌های متفاوت روی رسوب گذاری بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SK-1 ترکیب شده‌اند؛ بر اساس توان‌های طیفی مشاهده شده، آشکار شد چرخه‌های E، e و O تأثیرگذاری بیشتری در رسوب گذاری این بخش از سازند زاکین داشته‌اند.



شکل ۶- A. فیلترهای خروجی چرخه‌های میلانکوویچ استخراج شده از نگاره SGR در چاه 2SKD-1 که هر کدام چرخه‌های میلانکوویچ مربوطه را نمایش می‌دهند و یک ستون زمانی که از طریق مدت زمان و شمارش تعداد چرخه‌های میلانکوویچ حاصل شده است. B. طیف‌نگارهای تبدیل سریع فوریه (که هینوف آن را بازیابی کرده است) رسم شده برای نگاره‌های SGR و RHOB که با دوره‌نگار روش چندکاهنده (MTM) به منظور نشان دادن فراوانی و تغییرات چرخه‌های میلانکوویچ و تأثیرگذاری آنها در عمق‌های متفاوت روی رسوب گذاری بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SKD-1 ترکیب شده‌اند؛ بر پایه توان‌های طیفی مشاهده شده، آشکار شد همه چرخه‌های میلانکوویچ (E، e، O و P) رسوب گذاری بخش بالایی سازند زاکین در این چاه را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

## اعمال طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی و سطوح معنادار تحولی برای نگاره‌های SGR در چاه‌های 2SKD-1 و 2SKD-1

۱  
طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی با ارزیابی ضریب همبستگی بین توان‌های طیفی و سری‌های زمانی داده استفاده شده، میزان انباشت رسوب را برآورد (Li et al. 2018) و با ارزیابی تفاوت‌های بین بسامد چرخه‌های میلانکوویچ (همان توان‌های طیفی قابل مشاهده)، برآورد تغییرات در میزان انباشت رسوب را امکان‌پذیر می‌کند (Li et al. 2016 & 2018a & 2019a). در طیف‌نگار سطوح معنادار تحولی و در چارچوب فرضیه صفر<sup>۱</sup> ( $H_0$ )، وجود بسامد چرخه‌های میلانکوویچ در نظر گرفته نمی‌شود (Li et al. 2018a)؛ این طیف‌نگار مقادیر ضریب همبستگی (توان‌های طیفی مشاهده شده) را نمایش می‌دهد که می‌توانند به‌طور تصادفی رخ داده باشند (Li et al. 2018a).

تغییرات میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در هر دو چاه را با به‌کاربردن طیف‌نگارهای یادشده مقایسه می‌کنیم. بر پایه مقیاس زمان نجومی<sup>۲</sup> ایجادشده از طریق شمارش چرخه‌ها و احتساب مدت زمان آنها (ستون زمانی موجود در شکل‌های ۵ و ۶) در پژوهش حاضر برای چاه 2SKD-1، رسوب‌گذاری سازند زاکین در این چاه طی مدت زمان ۶/۷ میلیون سال انجام شده است؛ زمانی که با استفاده از مدت زمان‌های شناخته‌شده فراسنجه‌های نجومی (چرخه‌های میلانکوویچ) حاصل شده است و ارتباط بسیار تنگاتنگی با میزان انباشت رسوب در حوضه رسوبی مربوطه دارد (Hinnov and Ogg 2007; Kodama and Hinnov 2015). باتوجه به اینکه ضخامت بخش بالایی سازند زاکین در این چاه (در مطالعه حاضر) ۵۳/۹۵ متر (از عمق ۴۵۶۶/۰۵۶ تا ۴۶۲۰/۰۵۶ متر؛ نقطه آغاز و پایان داده نگاره SGR) است، انباشت رسوب آن ۸/۰۵ متر در هر میلیون سال یا به بیان دیگر، تقریباً ۰/۸ سانتی‌متر در هر هزار سال پیش‌بینی می‌شود. در چاه 2SKD-1 نیز بر پایه مقیاس زمان نجومی ایجادشده از طریق بررسی

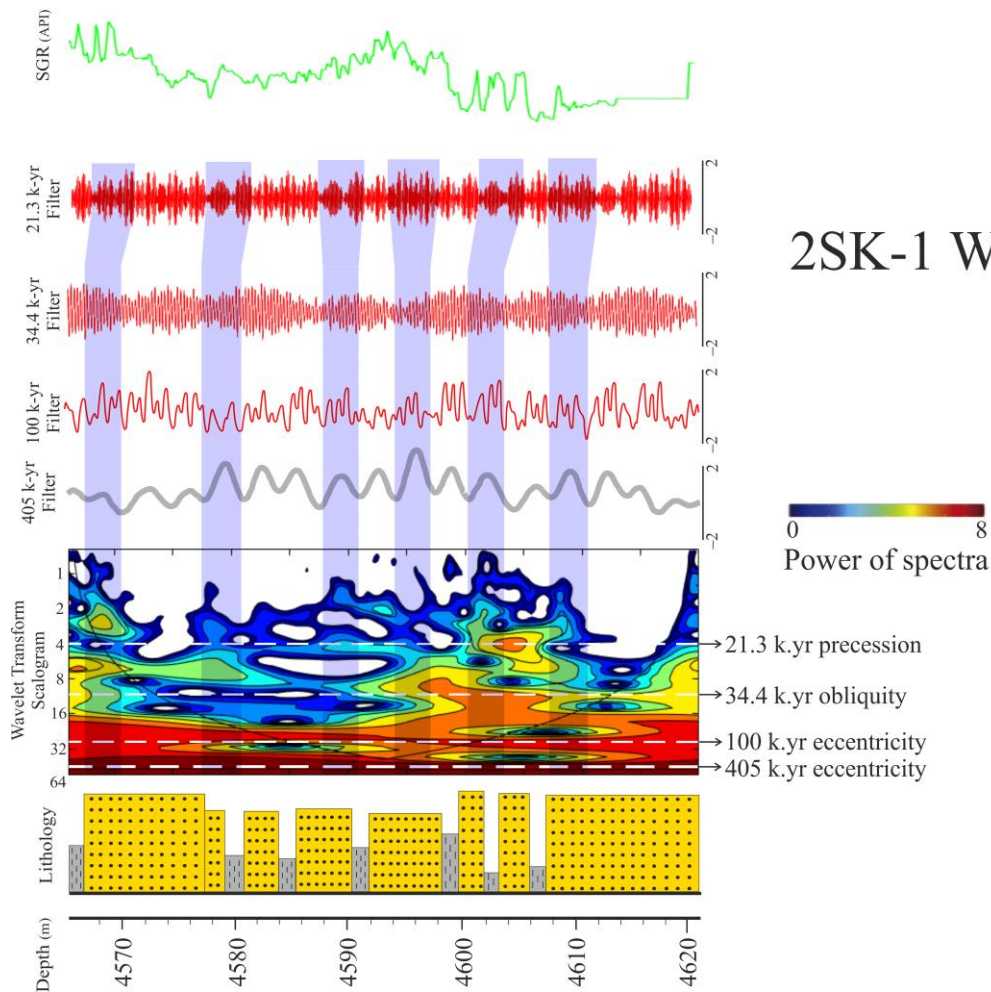
چینه‌نگاری چرخه‌ای (شکل ۵)، مدت زمان رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین در این چاه ۷/۷ میلیون سال بوده است. باتوجه به اینکه ضخامت بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SKD-1 (در مطالعه حاضر) ۶۱/۸۷ متر (از عمق ۴۵۹۴/۰۹۸ تا ۴۶۵۵/۹۷۲؛ نقطه آغاز و پایان داده نگاره SGR) است و بر اساس زمان رسوب‌گذاری و ضخامت این بخش از سازند در مطالعه حاضر، میزان انباشت رسوب آن ۸/۰۳ متر در هر میلیون سال یا به عبارتی، تقریباً ۰/۸ سانتی‌متر در هر هزار سال پیش‌بینی می‌شود. در فراسنجه‌های لازم نرم‌افزار Acycle برای ترسیم طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی و سطوح معنادار تحولی برای نگاره SGR این چاه نیز از میزان‌های انباشت یادشده استفاده شد. میزان انباشت در هر دو چاه بسیار نزدیک به هم بود، ولی طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی و سطوح معنادار تحولی منحصر به فرد رسم شده برای نگاره‌های منحصر به فرد SGR هر چاه، میزان‌های انباشت متفاوتی را در عمق‌های مختلف نمایش دادند (شکل‌های ۹ و ۱۰). بر پایه منحنی میزان انباشت رسوب در طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی (شکل ۹، A)، میزان انباشت رسوب در چاه 2SKD-1 ابتدا روند صعودی و سپس روند ثابت و بعد روند نزولی را طی کرده است. در عمق‌های ۴۶۱۰ و ۴۵۸۰ متری، توان‌های طیفی ضعیفی دیده می‌شوند که می‌توان آنها را هیاتوس احتمالی در نظر گرفت و در عمق ۴۵۹۲ متری در طیف‌نگار سطوح معنادار تحولی نیز توان طیفی ضعیفی مشاهده می‌شود که نشان از هیاتوس احتمالی دارد (شکل ۹). بر اساس منحنی میزان انباشت رسوب رسم شده (بر پایه توان‌های طیفی بالای مشاهده شده) روی طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی نگاره SGR 2SKD-1، میزان انباشت رسوب روند تقریباً ثابتی را تجربه کرده است و به علاوه، هیاتوس احتمالی نیز در طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی و سطوح معنادار تحولی مشاهده نمی‌شود؛ زیرا توان‌های طیفی بالا تداوم نسبتاً پایداری دارند و این به میزان انباشت رسوب پایدار اشاره دارد. کمینه میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در چاه‌های 2SKD-1 و 2SKD-1 تقریباً ۰/۲ سانتی‌متر در هر هزار سال برآورد

<sup>1</sup> null hypothesis ( $H_0$ )

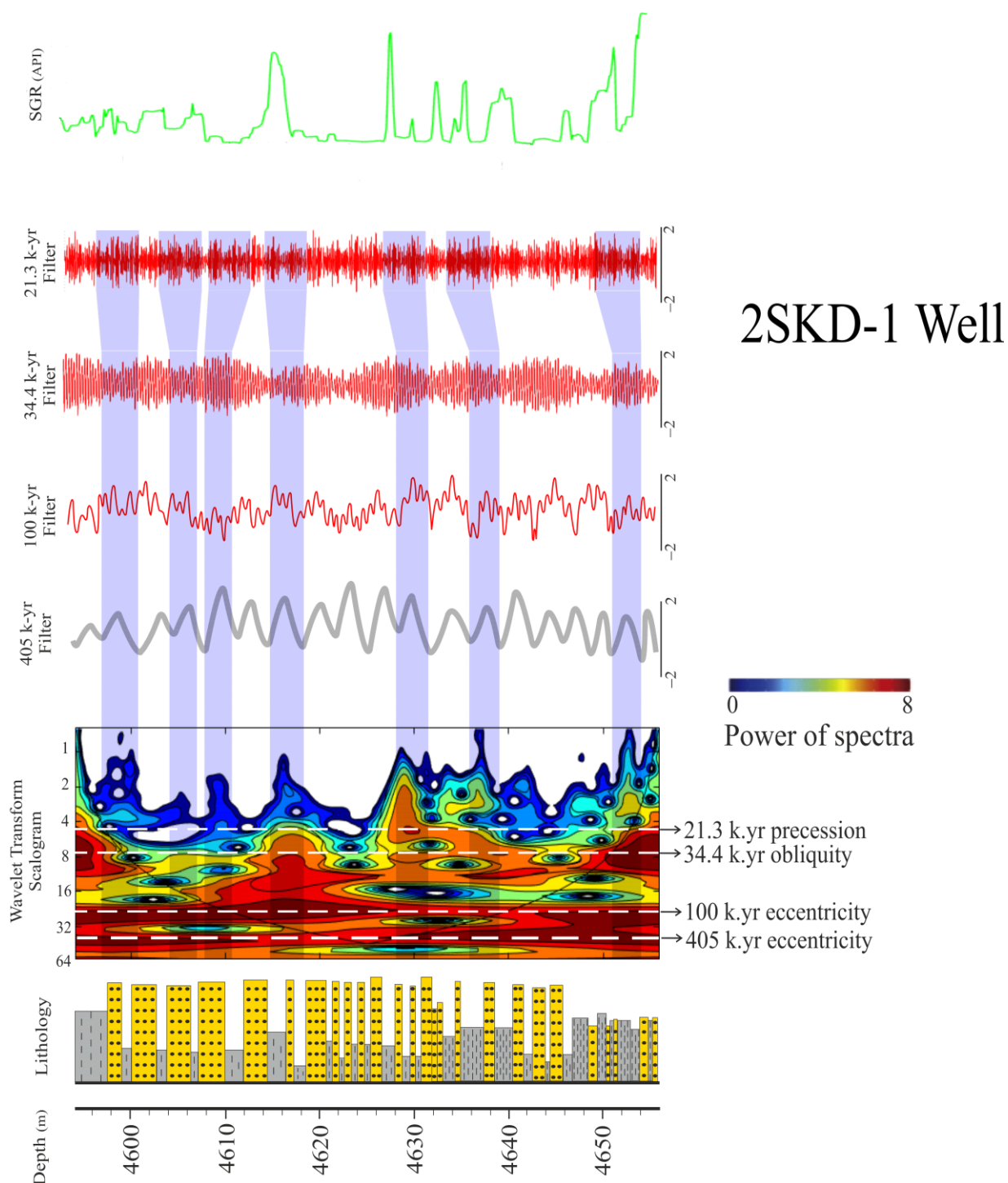
<sup>2</sup> Astronomical Time Scale (ATS)

چرخش زمین (O) کنترل شده است؛ سهم دیگر چرخه‌ها در رسوب‌گذاری چرخه‌ای بخش بالایی سازند زاکین نسبت به این چرخه‌ها ناچیز است. فراسنجه‌های مداری شرکت‌کننده در تأثیرگذاری بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین در هر دو چاه مشابه بوده‌اند و چرخه‌های حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E)، حرکت گریز از مرکز کوتاه‌مدت زمین (e)، حرکت انحرافی محور چرخش زمین (O) و حرکت تقدیمی محور زمین (P) در آن تأثیر داشته‌اند (شکل‌های ۹، C و ۱۰، C) که با توان‌های طیفی مختلف (رنگ‌های قرمز پررنگ تا آبی پررنگ) در طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی ردیابی می‌شوند (شکل‌های ۹، A و ۱۰، A).

می‌شود، اما بیشینه میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SK-1 حدود ۰/۸ و در چاه 2SKD-1 کمتر و نزدیک به ۰/۳ سانتی‌متر در هر هزار سال برآورد می‌شود. بر اساس توان‌های طیفی مشاهده‌شده در طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی، رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SK-1 بیشتر تحت تأثیر چرخه حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E) بوده است و سپس دیگر چرخه‌ها با میزان تأثیرپذیری کمتر در رسوب‌گذاری چرخه‌ای این بخش از سازند ایفای نقش کرده‌اند؛ در مقابل و بر پایه توان‌های طیفی ملاحظه‌شده، رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SKD-1 بیشتر از طریق چرخه‌های حرکت گریز از مرکز طولانی‌مدت زمین (E) و حرکت انحرافی محور



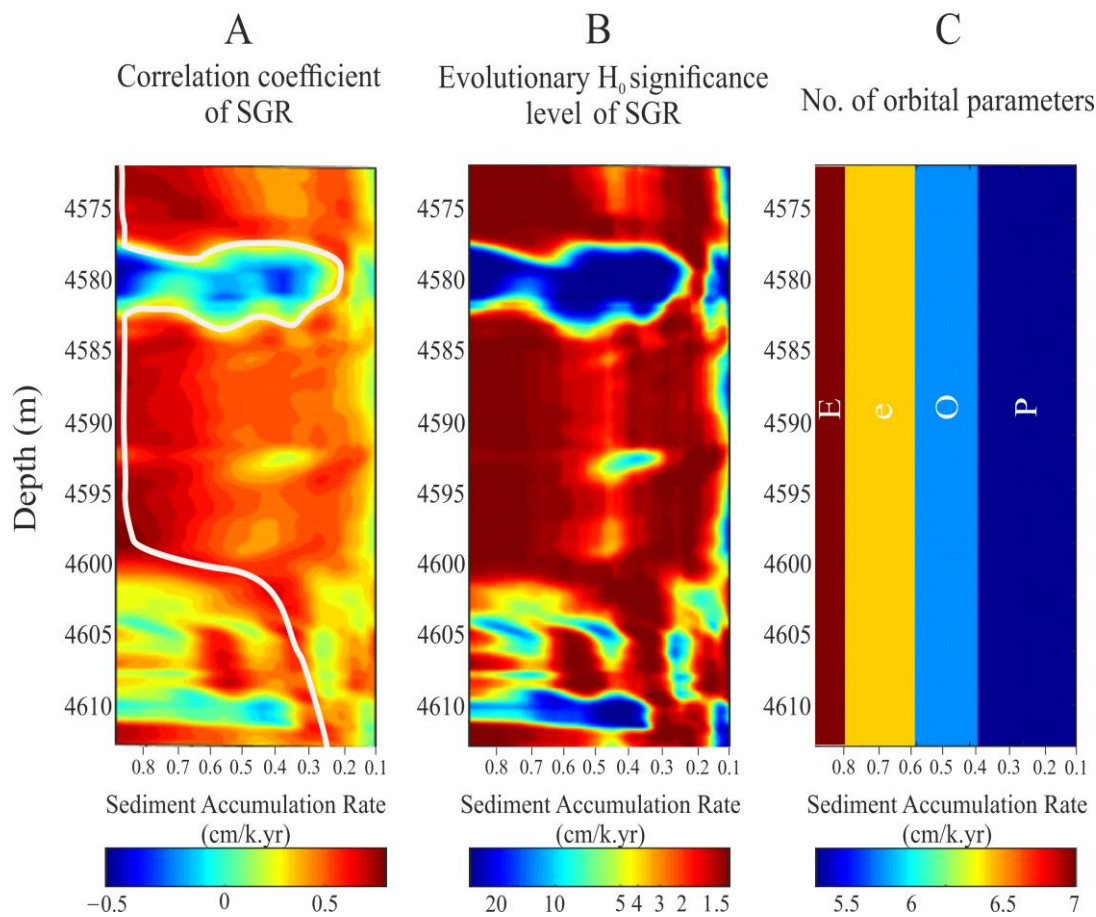
شکل ۷- نمایش و ارائه تبدیل موجک اعمال‌شده برای نگاره SGR در چاه 2SK-1 همراه با خطوط انطباق رسم‌شده در برابر فیلترهای چرخه‌های E، e، O و P. در این نمایش و ارائه، توان‌های طیفی مربوط به چرخه حرکت تقدیمی زمین مشاهده می‌شوند؛ در نتیجه، وجود این چرخه قطعی است.



شکل ۸- نمایش و ارائه تبدیل موجک اعمال شده برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1 همراه با خطوط انطباق رسم شده در برابر فیلترهای چرخه‌های  $P$  و  $O$ ،  $e$ ،  $E$



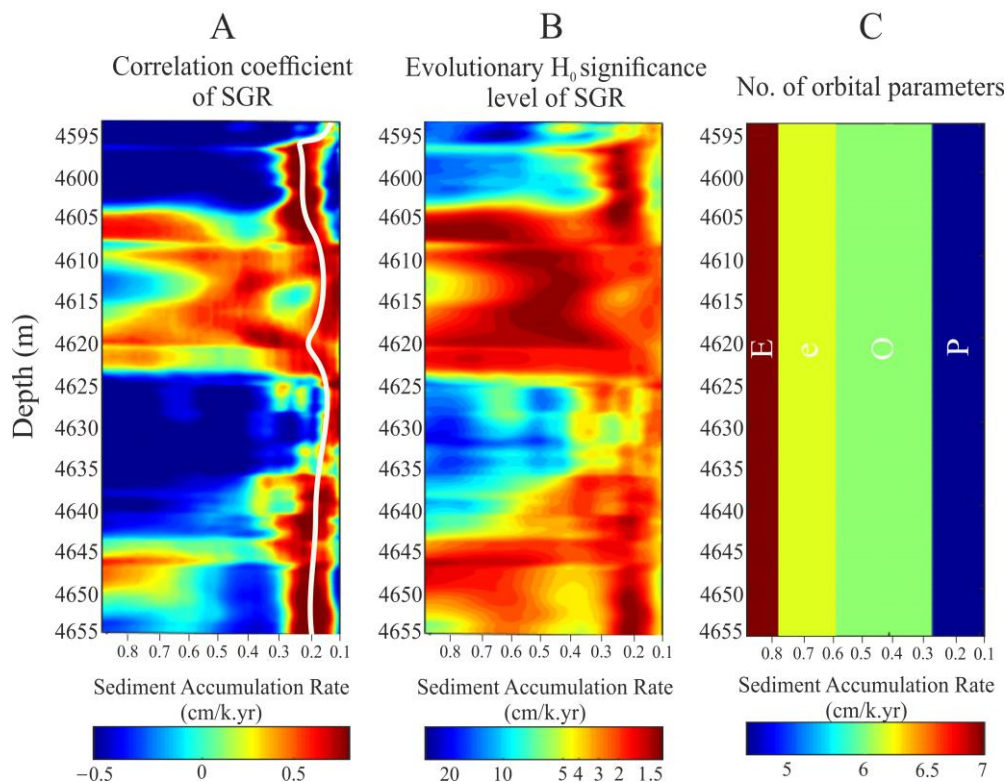
## 2SK-1 Well



شکل ۹- A. طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی رسم‌شده برای نگاره SGR در چاه 2SK-1 و منحنی‌ای که بر پایه بیشترین توان‌های طیفی مشاهده‌شده روی آن ترسیم شده است و منحنی میزان انباشت رسوب نام دارد. B. طیف‌نگار سطوح معنادار تحولی ترسیم‌شده برای نگاره SGR در چاه 2SK-1 که برخلاف طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی، در این طیف‌نگار بر پایه فرضیه صفر ( $H_0$ ) بسامد چرخه‌های میلانکوویچ اتخاذ نمی‌شود. C. در این تصویر، تعداد فراسنجه‌های مداری (چرخه‌های میلانکوویچ) تأثیرگذار بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین (در چاه 2SK-1) نمایش داده شده است (این فراسنجه‌ها با توان‌های طیفی متفاوت در طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی مشاهده می‌شوند).

در چاه 2SK-1 نسبت به چاه 2SKD-1 مشاهده شد که گویای وقوع فرایندهای تأثیرگذار پنهان برای ایجاد این تغییرات است.

## 2SKD-1 Well



شکل ۱۰- A. طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی رسم شده برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1 و منحنی‌ای که بر پایه بیشترین توان‌های طیفی مشاهده شده در روی آن ترسیم شده است و منحنی میزان انباشت رسوب نام دارد. B. طیف‌نگار سطوح معنادار تحولی ترسیم شده برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1. C. در این تصویر، تعداد فراسنجه‌های مداری (چرخه‌های میلانکوویچ) تأثیرگذار بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاگین (در چاه 2SKD-1) نمایش داده شده است (این فراسنجه‌ها با توان‌های طیفی متفاوت در طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی مشاهده می‌شوند).

## نتیجه

چندکاهنده شناسایی شدند؛ نسبت‌های به‌دست‌آمده به نسبت‌های اصلی چرخه‌های میلانکوویچ (۲:۱:۵:۲۰) نزدیک بودند و هر نسبت، یک چرخه میلانکوویچ شناسایی شد؛ سپس با استفاده از فیلترکردن چرخه‌های ۴۰۵ هزارساله، ۱۰۰ هزارساله، ۳۴/۴ هزارساله و ۲۱/۳ هزارساله از نگاره گامای طیفی استخراج شدند؛ با این عمل، مشاهده آنها در دامنه چینه‌ای در کنار داده‌های نگاره‌ها میسر شد؛ سپس با به‌کاربردن طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه (که هینوف آن را بازبینی کرده است)، تأثیرگذاری این چرخه‌ها بر

در پژوهش حاضر با روش‌های تحلیل طیفی تحولی از جمله دوره‌نگار روش چندکاهنده، طیف‌نگار تبدیل سریع فوریه، نمایش و ارائه تبدیل مویک به بررسی چینه‌نگاری چرخه‌ای بخش بالایی سازند زاگین در دو چاه 2SKD-1 و 2SK-1 میدان‌گازی سلمان پرداخته شد؛ همچنین میزان‌های انباشت رسوب سازند زاگین در این دو چاه با طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی و سطوح معنادار تحولی برآورد شدند؛ به این ترتیب که ابتدا چرخه‌های میلانکوویچ با دوره‌نگار روش

سازند زاکین در چاه 2SK-1 نسبت به چاه 2SKD-1 مشاهده شد که گویای وقوع فرایندهای تأثیرگذار پنهان برای ایجاد این تغییرات است.

## References

- Abels H.A. Abdul Aziz H. Krijgsman W. Smeets S.J.B. and Hilgen F.J. 2010. Long-period 400 eccentricity control on sedimentary sequences in the continental Madrid Basin (middle 401 Miocene, Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 289:220-231.
- Aghanabati A. 2004. The Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, p. 586. In Persian.
- Armando A. Scarparo C. Eduardo A. and Koutsoukos M. 2001. Orbital cyclicity in a Turonian sequence of the Cotinguiba Formation, Sergipe Basin, NE Brazil. *Cretaceous Research*, 22: 529-548.
- Bahk J. J. Um I. K. Yi B. Y. and Yoo D.G. 2015. Paleooceanographic implications and cyclostratigraphy of variations in well-log data from the western slope of the Ullung Basin, East Sea. *Quaternary International*, 392:58-68.
- Barthes V. Pozzi J.P. Vibert-Charbonnel P. Thibal J. and Melieres MA. 1999. High-resolution chronostratigraphy from downhole susceptibility logging tuned by palaeoclimatic orbital frequencies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 165:97-116.
- Baumgarten H. and Wonik T. 2015. Cyclostratigraphic studies of sediments from Lake Van (Turkey) based on their uranium contents obtained from downhole logging and paleoclimatic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 104(6): 1639-1654.
- Berger A. and Loutre M.F. 1994. Astronomical forcing through geological time. In: De Boer, P.L., Smith, D.G. (Eds.), *Orbital forcing and cyclic sequences*, 19. Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 15-24.
- Berner R.A. 2006. GEOCARBSULF: a combined model for Phanerozoic atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70:5653-5664.
- Chen D.Z. and Tucker M.E. 2003. The Frasnian-Famennian mass extinction: Insights from high-resolution sequence stratigraphy and cyclostratigraphy in South China: Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 193(1): 87-111.
- Chen G. Gang W. Liu Y. Wang N. Guo Y. Zhu C. and Cao Q. 2019a. High-resolution sediment accumulation rate determined by cyclostratigraphy and its impact on the organic matter abundance of the hydrocarbon source rock in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 103:1-11.

رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین و میزان فراوانی آنها در این سازند در عمق‌های متفاوت دو چاه بررسی شد. بر پایه این تحلیل‌ها مشخص شد سه چرخه E، e و O در چاه 2SK-1 و چهار چرخه E، e، O و P در چاه 2SKD-1 تأثیرگذاری بیشتری در رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین داشته‌اند؛ اما از طریق طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی رسم‌شده برای نگاره SGR در چاه 2SK-1 به‌طور دقیق‌تر اثبات شد تنها چرخه E رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین را تحت تأثیر قرار داده است. در طیف‌نگار ضریب همبستگی تحولی رسم‌شده برای نگاره SGR در چاه 2SKD-1 نیز تأثیر دو چرخه E و O بر رسوب‌گذاری بخش بالایی سازند زاکین اثبات شد و دیگر چرخه‌ها با میزان تأثیرگذاری کم بر رسوب‌گذاری چرخه‌ای این بخش از سازند زاکین در دو چاه نقش داشته‌اند. در نمایش و ارائه تبدیل موجک رسم‌شده برای نگاره‌های منحصربه‌فرد هر دو چاه، پهنه‌های دارای اهمیت آماری زیاد (اجزای دوره‌ای مشاهده‌شده در نمایش و ارائه) بین سری‌های زمانی و انطباق آنها در برابر فیلترهای چرخه‌های E، e، O و P برای یافتن احتمالی اصلی‌ترین تغییرات سنگ‌شناسی بررسی شدند. میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین از طریق زمان به‌وجودآمده از چینه‌نگاری چرخه‌ای و ضخامت بخش بالایی سازند زاکین برای هر دو چاه تقریباً ۰/۸ سانتی‌متر در هر هزار سال تخمین زده شد؛ سپس با بررسی‌های انجام‌شده از طریق طیف‌نگارهای ضریب همبستگی تحولی رسم‌شده برای نگاره‌های SGR، مشخص شد میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SK-1 روندهای صعودی، ثابت و نزولی داشته است، ولی میزان انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SKD-1 دارای روند تقریباً ثابتی بوده است. به‌طورکلی، میزان‌های انباشت رسوب بخش بالایی سازند زاکین در چاه 2SK-1 بیشتر از میزان‌های انباشت رسوب این بخش از سازند در چاه 2SKD-1 برآورد شد؛ به‌علاوه، تغییرات زیادی در میزان انباشت رسوب بخش بالایی

- Iran. Review of Palaeobotany and Palynology 127(3-4):241-268.
- Golovchenko X. O'Connell S.B. and Jarrard R.D. 1990. Sedimentary response to paleoclimate from downhole logs at Site 693, Antarctic continental margin. Proc ODP Sci Results, 113:239-251.
- Gong M.Y. Li B.H. Wang Y.C. and Wu Y. 2001. Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famennian transition in South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 168(3-4):237-248.
- Grinsted A. Moore J.C. and Jevrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. Nonlinear Process. Geophys. 11: 561-566.
- Hinnov L.A. and Ogg J.G. 2007. Cyclostratigraphy and the astronomical time scale. Stratigraphy, 4(2/3): 239-251. figures 1-2, 2007.
- Hinnov L.A. 2013. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences. Geological Society of America Bulletin, 125(11-12):1703-1734.
- Hinnov L.A. 2018. Stratigraphy and Timescales (Chapter One - Cyclostratigraphy and Astrochronology in 2018.) 3:1-80.
- Huang C. and Hinnov L. 2019. Astronomically forced climate evolution in a saline lake record of the middle Eocene to Oligocene, Jiangnan Basin, China. Earth and Planetary Science Letters, 528: 115846.
- Husson D. Thibault T. Galbrun B. Gardin S. Minoletti F. Sageman B. and Huret E. 2014. Lower Maastrichtian cyclostratigraphy of the Bidart section (Basque country, SW France): A remarkable record of precessional forcing. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 395: 176-197.
- Jarrard R.D. and Arthur M.A. 1989. Milankovitch paleoceanographic cycles in geophysical logs from ODP Leg 105, Labrador Sea and Baffin Bay. Proc ODP Sci Results, 105:757-772.
- Ji-Feng YU. Feng-gui SUI. Zeng LI. Hua LIU. and Wang Yu-lin. 2008. Recognition of Milankovitch cycles in the stratigraphic record: application of the CWT and the FFT to well-log data, J China Univ Mining and Technol, 18:594-598.
- Jin S. Cao H. Wang H. Wagreich M. and Richoz S. 2019. Orbital cyclicity in sedimentary sequence and climatic indications of C-O isotopes from Lower Cretaceous in Qingxi Sag, Jiuquan Basin, NW China. Geoscience Frontiers, 10(2): 467-479.
- Kish Petroleum Engineering Company (KPE). 2015. Salman Gas wells Petrophysical and Geological Study, unpublished reports.
- Kodama K.P. and Hinnov L.A. 2015: Rock Magnetic Cyclostratigraphy. Wiley-Blackwell, 276 p.
- Chen G. Gang W. Tang H. Gao G., Wang N. Liu L. Yang S. and Wang Y. 2019b. Astronomical cycles and variations in sediment accumulation rate of the terrestrial lower Cretaceous Xiagou Formation from the Jiuquan Basin, NW China. Cretaceous Research, 109: 104156.
- De Vleeschouwer D. Whalen M.T. Day J.E. and Claeys P. 2012. Cyclostratigraphic calibration of the Frasnian (Late Devonian) timescale (Western Alberta, Canada). Geological Society of America Bulletin.
- De Vleeschouwer D. D. Rakocinski. M. Racki G. Bond D.P.G. Sobien K. and Claeys P. 2013. The astronomical rhythm of Late-Devonian climate change (Kowala section, Holy Cross Mountains, Poland). Earth and Planetary Science Letters. 365:25-37.
- De Vleeschouwer D. Boulvain F. Da Silva A.C. Pas D. Labaye C. and Claeys P. 2014. The astronomical calibration of the Givetian (Middle Devonian) timescale (Dinant Synclinorium, Belgium). Magnetic Susceptibility Application: A window onto ancient environments and climatic variations. Geological Society, London, Special Publications, 414: 245-256.
- De Vleeschouwer D. Da Silva C.A. Sinnesael M. Chen D. James E.D. Whalen T.M. Guo Z. and Claeys P. 2017. Timing and pacing of the Late Devonian mass extinction event regulated by eccentricity and obliquity. Nature Communications, 8: 2268.
- Ellwood B.B. Tomkin J.H. El Hassani A. Bultynck P. Brett C.E. Schindler E. Feist R. and Bartholomew A. 2011 A climate-driven model and development of a floating point time scale for the entire Middle Devonian Givetian Stage: A test using magnetostratigraphic susceptibility as a climate proxy: Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 304(1-2):85-95.
- Fletcher C. 2013. Climate Change - What the Science Tells Us. John Wiley; 1st edition (January 29, 2013), 288 p.
- Friedrich O. Batenburg J.S. Moriya K. Voigt S. Cournède C. Moebius I. Blum P. Bornemann A. Fiebig J. Hasegawa T. Hull M P. Norris D R. Röhl U. Westerhold T. Wilson A P. and the IODP Expedition 342 Scientists. 2016. Maastrichtian carbon isotope stratigraphy and cyclostratigraphy of the Newfoundland Margin (Site U1403, IODP Leg 342). Climate of the Past Discussion.
- Ghavidel-Syooki M. 1999. Investigation on the Upper Paleozoic strata in tange-e-Zakeen, and introducing Zakeen Formation, Kuh-e Faraghan. Geological Survey of Iran. p. 476-478. In Persian.
- Ghavidel-Syooki M. 2003. Palynostratigraphy of Devonian sediments in the Zagros Basin, southern

- Serbian Academy, Section of Mathematical and Natural Sciences, Belgrade, 633 p. (and 1998 reissue in English: Canon of Insolation and the Ice-Age Problem: Belgrade, Serbian Academy of Sciences and Arts, Section of Mathematical and Natural Sciences, 634 p.).
- Mitchell R.N. Bice D.M. Montanari A. Cleaveland L.C. Christianson K.T. Coccioni R and Hinnov L.A. 2008. Ocean anoxic cycles? Prelude to the Livello Bonarelli (OAE 2). *Earth and Planetary Science Letters*, 267: 1-16.
- Molinie A.J. and Ogg J.G. 1990. Sedimentation-rate curves and discontinuities from sliding-window spectral analysis of logs. *Log Anal*, 31:370-374.
- Pas D. Hinnov L. Daye E. J. Kodama K. Sinnesael M. and Liua W. 2018. Cyclostratigraphic calibration of the Famennian stage (Late Devonian, Illinois Basin, USA), *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 102-114.
- Pomar L. and Kendall C. G. St. C. 2008. Architecture of carbonate platforms: A response to hydrodynamics and evolving ecology. In: *Controls on carbonate Platform and Reef Development – J. Lukasik and A. Simo (Eds.)*. SEPM Special Publication, 89:187-216.
- Strasser A. Hilgen F.J. and Heckel P.H. 2006. Cyclostratigraphy - concepts, definitions, and applications. *Newsletters Stratigraphy*, 42: 75-114.
- Su Q. Nie J. Luo Z. Li M. Heermance R. and Garziona C. 2019. Detection of Strong Precession Cycles from the Late Pliocene Sedimentary Records of Northeastern Tibetan Plateau. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20.
- Thomson D.J. 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proc. IEEE*, 70: 1055-1096.
- Waltham D. 2015. Milankovitch period uncertainties and their impact of cyclostratigraphy. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 990-998.
- Weedon G.P. 2003. *Time series analysis and cyclostratigraphy: Examining stratigraphic records of environmental cycles*. Cambridge University Press, 259 p.
- Weedon G. Coe A. and Gallois R. 2004. Cyclostratigraphy, orbital tuning and inferred productivity for the type Kimmeridge Clay (Late Jurassic), Southern England. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 655-666.
- Westerhold T. Röhl U. Wilkens H. R. Gingerich D. P. Clyde C.W. Wing L. S. Bowen J. G. and Kraus J. M. 2018. Synchronizing Early Eocene deep-sea and continental records – cyclostratigraphic age models for the Bighorn Basin Coring Project drill cores. *Climate of the Past*, 14: 303-319.
- Williams T. Kroon D. and Spezzaferri S. 2002. Middle and Upper Miocene cyclostratigraphy of downhole logs and short- to long-term astronomical cycles in
- Lang J. Zhang T. Zhu H. Zeng J. and Liang X. 2018. Cyclostratigraphy under the control of orbital periods: A case study of the Late Ordovician-Early Silurian strata. In: Liu, Z.L. and Mi, C. (Eds.), *Advances in Sustainable Port and Ocean Engineering*. *Journal of Coastal Research, Special*, 83:369-374. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Laskar J. Robutel P. Joutel F. Gastineau M. Correia A.C.M. and Levrard B. 2004. A longterm numerical solution for the insolation quantities of the earth. *Astron. Astrophys*, 428: 261-285.
- Li M.S. Huang C.J. Hinnov L.A. Ogg J. Chen Z.Q. and Zhang Y. 2016. Obliquity-forced climate during the Early Triassic hothouse in China. *Geology*, 44: 623-626.
- Li M. Kump L.R. Hinnov L.A. and Mann M.E. 2018a. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing. *Earth and Planetary Science Letters*, 501:165-179.
- Li M. Hinnov A.L. Huang C. and Ogg G. J. 2018b. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and obliquity forcing. *Nature Communications*, 9:1004.
- Li M. Hinnov L. and Kump L. 2019a. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers and Geosciences*, 127: 12-22.
- Li M. Huang C. Ogg J. Zhang Y. Hinnov L. Wu H. Chen Q.Z. and Zou Z. 2019b. Paleoclimate proxies for cyclostratigraphy: Comparative analysis using a Lower Triassic marine section in South China. *Earth-Science Reviews*, 189: 125-146.
- Mann M.E. and Lees J.M. 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climate Change*, 33(3): 409-445.
- Mayer H. and Appel E. 1999. Milankovitch cyclicity and rock-magnetic signatures of palaeoclimatic change in the Early Cretaceous Biancone Formation of the South-ern Alps, Italy. *Cretac. Res.* 20: 189-214.
- McGhee G.R. 1996. *The Late Devonian Mass Extinction: The Frasnian/Famennian Crisis*. New York, Columbia University Press, 378 p.
- Melnyk D.H. Smith D.G. and Garrousi A. K. 1994. Filtering and Frequency Mapping as Tools in Subsurface Cyclostratigraphy, with Examples from the Wessex Basin, UK. In *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*, Eds: P.L. de Boer and D.G. Smith. International Association of Sedimentologists Special Publication 19. Blackwell, Oxford, pp. 35-46.
- Milankovitch M. 1941. *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal

- carbonate production of the Great Bahama Bank. *Marine Geology*, 185: 75-93.
- Wonik T. 2001. Gamma-ray measurements in the Kirchrode I and II boreholes. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 174:97-105.
- Worthington F. P. 1990. Sediment cyclicity from well logs. Geological Society, London, Special Publications, 48: 123-132.
- Yuan R. Zhu R. Xie S. Hu W. Zhou F. and Yu T. 2019. Utilizing Maximum Entropy Spectral Analysis (MESA) to identify Milankovitch cycles in Lower Member of Miocene Zhujiang Formation in north slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *De Gruyter, Open Geosci.* 11:877-887.
- Zhang T. Zhang C. Fan T. Zhang L. Zhu R. Tao J. and Li M. 2019. Cyclostratigraphy of Lower Triassic terrestrial successions in the Junggar Basin, northwestern China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, S0031-0182(19)30277-9.
- Zheng X.P. and Luo P. 2004. Analysis and application of Milankovitch cycles on Feixianguan Formation, Northeast Sichuan Basin, China. *Natural Gas Exploration and Development*, 3:16-19.
- Zhong M. Chen D. Fan J. Wu H. Fang Q. Shi M. 2019. Cyclostratigraphic Calibration of the Upper Ordovician (Sandbian Katian) Pagoda and Linhsiang formations in the Yichang Area, South China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(supp 1): 177-180.