



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

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches  
E-ISSN: 2423-8007  
Vol. 39, Issue 1, No. 90, Spring 2023, pp 37-54  
Received: 07.03.2023 Accepted: 14.06.2023

#### Research Paper

### 3D organic matter modeling: a novel tool in forward stratigraphic modeling

Mostafa Javid\* 

MSc. in petroleum exploration engineering, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran  
Javidm@ripi.ir

Ziba Zamani

Ph.D. Sedimentology, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran  
zamaniz@ripi.ir

#### Abstract

The source rock characteristics (thickness, quantity and quality) can be varied both in the deposition of time and space. Currently, the distribution map of organic matter is estimated by simplified extrapolate methods using observed data on well location. There is a high degree of uncertainty as a result of using this method especially in the area with a lack of well data. The aim of this study is to introduce a novel tool in DionisosFlow software for three-dimensional (3D) simulation of the distribution of total organic carbon in a source rock. In this method, a stratigraphic modeling approach is used to mimic the production and preservation process of the organic-rich interval. The main parameters in this module will be bathymetry, sedimentation rate, primary production, carbon flux and oxygen condition of the sedimentary environment. In this study, we constructed an artificial model to investigate the efficiency of this process-based algorithm. Furthermore, the 3D simulation result of a real model is illustrated. This study indicates a close relationship between depositional conditions on the one hand and the production and preservation of organic matter on the other hand. Also, simulation results pinpoint which anoxic condition could be one of the main parameters in maintaining and distribution of organic matter.

**Keywords:** Forward stratigraphic modeling, Organic matter modeling, Sedimentary environment, Organic matter production and preservation.

#### Introduction

In exploration, the prediction of hydrocarbon accumulation and quality variations within a prospect, prior to drilling, is of great economic importance. Recently, developed 3D modeling methods are gaining significance concerning volumetric hydrocarbon predictions. Nevertheless, in basin modeling studies, source rocks often have higher uncertain input parameters, even though the source rock is the first prerequisite for a hydrocarbon accumulation. Often a conceptual approach or simple models applying average geochemical values describing source rock properties are used. This often is insufficient, particularly in areas with heterogeneous geological conditions and/or variable depositional environments.

Recently, a novel method is evolved from the needs of the petroleum industry to obtain a better estimation of the

spatial and temporal distribution of source rocks and variability in the basin. This method describes the characterization of source rock as a function of the sedimentation environment and displays a relationship between rich organic layers and accommodation space. The purpose of the approach is a 3D estimation of source rock characterization (Thickness, Total organic carbon (TOC), Hydrogen index (HI)) to utilize in the petroleum system modeling.

#### Material & Methods

The 3D forward stratigraphic modeling is a process-based approach simulating sedimentary and tectonic processes both in carbonate and clastic environments (Granjeon, 2014; Granjeon and Joseph, 1999). The main sedimentary processes considered include: 1) accommodation space through time; 2)

\*Corresponding author

Javid M. and Zamani Z. (2023). 3D organic matter modeling: a novel tool in forward stratigraphic modeling. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 39(1):37-54.

2423-8007 / © 2023 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.2023.137031.1255>



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1402.39.1.3.3>

sediment supply and in situ production in clastic and carbonate sediments, respectively; and 3) sediment transport using Macro-Scale diffusion equations (Csato et al. 2012; Granjeon 2014; Al-Salmi et al. 2018; Hawie et al. 2015, 2021). For each cell of the numerical model, environment properties including a fraction of sediments, thickness, palaeobathymetry, sedimentation rate and energy are estimated. Finally, modeling results are compared with observed data at a well location to validate the constructed model.

The stratigraphic forward modeling approach provides most of the parameters required for organic matter simulation (e.g., water depth, basin morphology, sedimentation rate). New parameters are added into classic forward modeling to simulate all the processes needed for organic matter modeling (Granjeon and Chauveau 2014; Bruneau et al. 2016) as follows: primary productivity, carbon flux, organic matter transport, dissolved oxygen level and burial efficiency (which corresponds to degradation within the topmost meter of burial). All these processes and their parameters are based on empirical equations or observations. The production of organic matter by photosynthesis is called primary productivity because it is the first stage in the marine food chain. After primary production, the organic particles sink to the seafloor. The amount of exported production, which reaches the sediment/water interface, is determined by the Martin equation (Martin et al. 1987). The oxygen level in sediments is one of the most important factors controlling the preservation of organic matter since it determines the nature of respiration of benthic organisms. After sinking from the sea surface and transport at the sediment/water interface, the organic matter is finally buried. The amount of organic matter preserved after the first few meters of burial is called burial efficiency; this parameter is mainly controlled by the sedimentation rate (Betts & Holland 1991) and local redox conditions (Tyson 1995). The Total Organic Carbon (TOC) is eventually determined by the amount of preserved organic matter diluted depending on the sedimentation rate.

In this study, an artificial model is constructed to determine the efficiency of the new method in the simulation of TOC. Defined initial palaeobathymetry varied between 10 to 700 meters. Sediment was assumed to be composed of two main sediment classes: shallow carbonate and deep carbonate sediment. In this study, the primary productivity, the carbon flux and its variation are used by the default of the software.

#### Discussion of Results & Conclusion

The results of the model show the optimal depth for maintaining organic matter in such a way that with the increase of the palaeodepth, first an increase and then a decrease of TOC is observed. One of the reasons is the reduction of carbon flux concerning to depth. The results of this study indicated that the optimal depth of preservation of organic matter is less than 500 meters.


Modeling results demonstrated that there is a rather poor spatial correlation between areas of high marine primary productivity and areas of organic-rich sediment deposition. The absence of correlation is due to the combined influence of the other key factors such as oxygen level. The results indicated that the lowest amount of oxygen is observed in the depth range between 200 and 500 meters and will be increased in much more depth. Because increasing depth leads to a decrease the amount of organic particles and oxygen consumption. Therefore, with the increase in depth, the oxygen level of sea water gradually increases.

The depth corresponding to the highest value of TOC was observed between 200 and 400 meters. The modeling results showed that the effective parameters in the distribution of TOC are the oxygen level and accommodation space variation through time. This study demonstrated that the use of this new tool is a very suitable method in the 3D estimation of source rock characteristics in order to use petroleum system modeling. One of the strengths of this method is the use of close relationship of the sedimentary environment with the value of TOC. Therefore, this tool can be very suitable and practical in modeling deep source rocks or areas with a lack of data.



مقاله پژوهشی

## مدل‌سازی سه‌بعدی ماده آلی: ابزاری نوین در مدل‌سازی چینه‌ای پیشرو

مصطفی جاوید\* ، کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

Javidm@ripi.ir

زیبا زمانی، دکتری رسوب‌شناسی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

zamaniz@ripi.ir

### چکیده

ویژگی‌های سنگ منشأ (ضخامت، کمیت و کیفیت)، هم در طی زمان رسوب‌گذاری و هم به‌صورت مکانی می‌تواند بسیار متغیر باشد. در حال حاضر، این پارامتر در محل‌چاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و سپس با روش‌های برون‌یابی ساده و نقشه‌مقدار کل ماده آلی تهیه می‌شود. این روش عدم قطعیت بالایی دارد، به‌ویژه اگر ناحیه مطالعه‌شده، چاه‌های محدودی داشته باشد. هدف از این مطالعه، معرفی یک ابزار نوین در نرم‌افزار Dionisos Flow برای شبیه‌سازی تغییرات سه‌بعدی مقدار کل ماده آلی یک سنگ منشأ است. در این روش، از مدل‌سازی سه‌بعدی چینه‌ای پیشرو برای بازسازی فرآیندهای لازم برای تولید و حفظ لایه‌های غنی از ماده آلی استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی در این مدل، عمق بستر حوضه، نرخ رسوب‌گذاری، تغییرات بهره‌وری اولیه، شار کربن آلی و میزان اکسیژن محیط رسوبی است. در این مطالعه، از یک مدل فرضی برای بررسی کارایی این روش استفاده شد. همچنین نتیجه یک مدل سه‌بعدی واقعی نیز نمایش داده شده است. نتایج این مدل‌سازی، رابطه نزدیک بین ویژگی‌های محیط رسوبی و تولید و حفظ ماده آلی را نشان می‌دهد. همچنین شرایط آنوکسیک بودن محیط رسوبی نیز، یکی از پارامترهای اصلی در حفظ و توزیع ماده آلی شناخته شد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی چینه‌ای پیشرو، مدل‌سازی ماده آلی، محیط رسوبی، تولید و حفظ ماده آلی.

\*نویسنده مسئول

جاوید، م. و زمانی، ز. (۱۴۰۲). «مدل‌سازی سه‌بعدی ماده آلی: ابزاری نوین در مدل‌سازی چینه‌ای پیشرو». پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۹(۱): ۳۷-۵۴.

۳۷-۵۴



## مقدمه

در اکتشاف نفت، پیش‌بینی وقوع هیدروکربن و تغییرات کیفیت آن در یک هدف اکتشافی جدید، از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردار است. در حال حاضر، استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی حوضه رسوبی به‌منظور پیش‌بینی حجم هیدروکربن تجمع‌یافته، اهمیت زیادی پیدا کرده است. یکی از ورودی‌های اصلی به این مدل، ویژگی‌های سنگ منشأ است. با وجود این، پارامترهای ورودی سنگ‌های منشأ، اغلب بیشترین عدم قطعیت را دارند. این پارامترها بیشتر به‌صورت مفهومی یا مدل‌های ساده با استفاده از مقادیر متوسط داده‌های ژئوشیمیایی اندازه‌گیری‌شده از سنگ منشأ به دست می‌آید. این عدم قطعیت به‌ویژه در مناطقی ملموس‌تر است که شرایط زمین‌شناسی ناهمگن و یا محیط رسوبی پیچیده‌ای دارند؛ از این رو، ایده اصلی برای ایجاد یک برنامه شبیه‌سازی، به‌منظور مدل‌سازی رخساره‌های آلی، از نیازهای صنعت نفت برای دستیابی به برآورد بهتر از مشخصات سنگ منشأ و ناهمگونی آن در مناطق مختلف حوضه رسوبی است.

امروزه تلاش‌های زیادی برای پیش‌بینی مشخصات سنگ منشأ انجام شده است. متخصصان به‌طور گسترده‌ای از محاسبه محتوای کل کربن آلی (TOC) براساس داده‌های چاه‌نگارها (مقاومت، تراکم، اشعه گاما و یا صوت) یا نرم‌افزار Carbolog استفاده می‌کنند (Carpentier et al. 1991). این روش‌ها سریع و آسان است؛ بنابراین معمولاً برای به دست آوردن اولین برآورد، از توزیع مشخصات سنگ منشأ استفاده می‌شود. با این حال، این روش‌ها فقط تخمینی از مشخصات سنگ منشأ را در موقعیت چاه (یک‌بعدی) ارائه می‌دهد. برای به دست آوردن نقشه‌های توزیع کیفیت سنگ منشأ، به استفاده از روش‌های برون‌یابی نیاز است؛ البته این روش در محل‌های خارج از محدوده چاه، اطلاعات دقیقی را در اختیار افراد قرار نمی‌دهد.

امروزه برای ارزیابی بهتر از توزیع مکانی سنگ منشأ و همچنین تغییرات کیفیت آن، درباره نحوه تشکیل سنگ منشأ

در یک چهارچوب چینه‌ای بحث شده است (Wignall 1991)؛

Katz and Pratt 1993; Mann and Zweigel 2008; Pasley et al. 1993; Bessereau et al. 1995; Tyson 1996; Mann and Stein 1997). این روش، تنوع یک سیستم سنگ منشأ را به‌عنوان

تابعی از شرایط رسوبی توصیف می‌کند و رابطه بین تجمع لایه‌های غنی از مواد آلی و سطح دریا را به تصویر می‌کشد.

هنگام بحث درباره توزیع مقدار کل ماده آلی، چینه‌نگاری

سکانسی یک عنصر اصلی در نظر گرفته می‌شود. مطالعات

نشان می‌دهد بین چینه‌نگاری سکانسی و لایه‌های غنی از مواد

آلی، رابطه نزدیکی وجود دارد. مواد آلی دریایی و خشکی

از نظر ژنتیکی، به سیستم ترک‌های یک سکانس مرتبط‌اند

(Mann and Zweigel 2008). هر سیستم ترک در یک توالی

رسوبی، تحت تأثیر موقعیت خط ساحلی و در نتیجه میزان

ورودی رسوبات آواری (مواد رسوبی و آلی) به محیط شلف

قرار می‌گیرد. به‌طور کلی رسوبات آواری در محیط‌های دلتایی

تا دور از دلتا ته‌نشین می‌شوند؛ بنابراین مقادیر نسبتاً زیادی از

مواد آلی خشکی (TOM)، در هنگام پس‌روی به محیط شلف

دریا وارد می‌شود. در این سیستم ترک، مقادیر TOC و

شاخص هیدروژن (HI) بیشتر به‌دلیل آثار رقیق‌شدگی و

حفظ‌شدگی ضعیف، نسبتاً کم‌اند و برعکس، در زمان پیشروی

دریا، به‌طور نسبی مقادیر کمی رسوبات آواری به محیط شلف

منتقل می‌شود؛ بنابراین مقادیر بیشتری از مواد آلی دریایی در

سیستم ترک پیش‌رونده مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در

سیستم ترک پیش‌رونده، رخساره دانه‌ریز غالب و محیط

برای شرایط احیایی مستعدتر است؛ بنابراین حاوی مواد آلی

غنی از هیدروژن بیشتری است (Pasley et al. 1993). تولید

اولیه مواد آلی دریایی، به موقعیت خط ساحلی وابسته است.

در مناطق ساحلی و نزدیک ساحل، میزان تأمین مواد مغذی

بسیار بیشتر از مناطق دریای باز است؛ در نتیجه باعث افزایش

رشد فیتوپلانکتون و افزایش مواد آلی دریایی می‌شود.

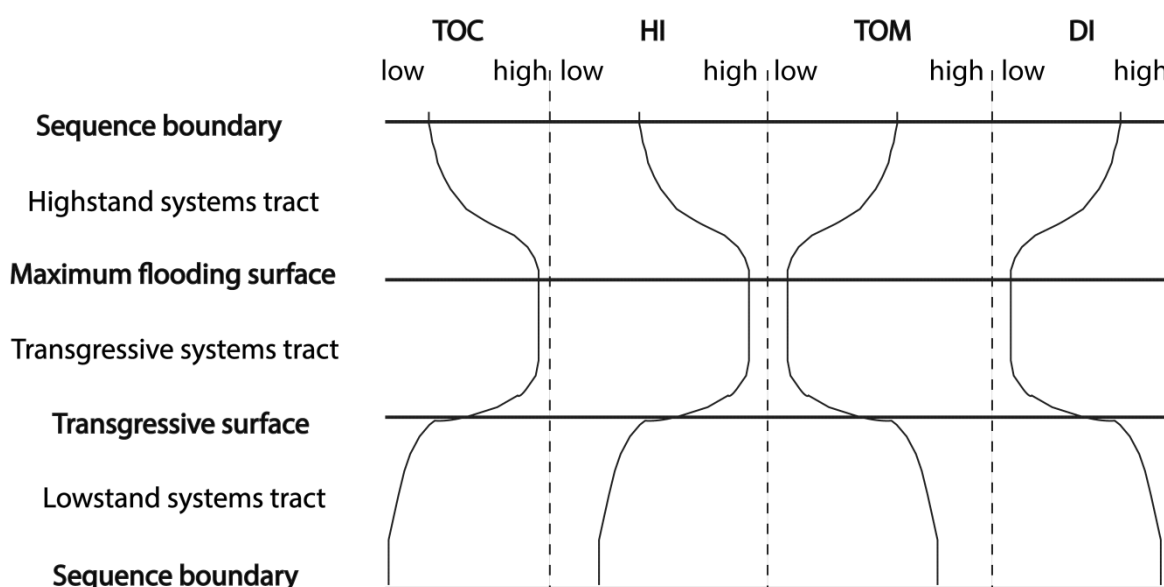
افزایش نرخ رسوب‌گذاری، سبب کوتاه‌شدن زمان

قرارگرفتن مواد آلی در معرض اکسیژن می‌شود و در نتیجه

احتمال حفظ‌شدن مواد آلی دریایی افزایش می‌یابد (Hartnett

رسوبی وجود دارد؛ زیرا نوع و حفظ ماده آلی رسوب‌گذاری شده در حوضه رسوبی، به‌طور مستقیم با عناصر سکانسی مرتبط است (شکل ۱)؛ بنابراین، اگر مدل جامع و کاملی از توزیع رخساره‌های آلی در زمان و مکان مورد نیاز باشد، باید مدل‌سازی سنگ منشأ در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی در نظر گرفته شود.

(1998 et al.). حفظ‌شدگی ضعیف مواد آلی به‌ویژه در مناطق بسیار عمیق، به‌دلیل سرعت رسوب‌گذاری بسیار پایین اتفاق می‌افتد. در مناطقی با ورود میزان رسوب بسیار زیاد، برای مثال در رسوبات دلتایی یا در رسوبات توریدایتی، ممکن است فرآیند رقیق‌شدگی به وجود بیاید و میزان ماده آلی را در رسوب کاهش دهد (Mann and Zweigel 2008). روابط فوق پیوندی قوی بین ماهیت رسوب مواد آلی و سیستم‌های



شکل ۱- رابطه بین خصوصیات ماده آلی و موقعیت در یک توالی رسوبی TOC: کربن آلی کل؛ HI: شاخص هیدروژن؛ TOM: مواد آلی خشکی؛ DI: شاخص تخریب (Mann and Stein 1997).

**Fig 1- Relationship between organic matter characteristics and position within a depositional sequence TOC, total organic carbon; HI, hydrogen index; TOM, terrestrial organic matter; DI, degradation index (Mann and Stein 1997).**

توزیع و کیفیت سنگ منشأ را در نظر بگیرد. نرم‌افزار OF-Mod که در SINTEF Petroleum Research معرفی شد، فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده رسوب کربن آلی و همچنین فعل و انفعالات آنها را در نظر می‌گیرد (Mann and Zweigel 2008). مدل‌سازی سنگ منشأ در این نرم‌افزار به‌صورت دوبعدی انجام می‌شود. علاوه بر آن، قابلیت مدل‌سازی چینه‌ای در داخل نرم‌افزار وجود ندارد و باید مدل ساخته‌شده نرم‌افزارهای دیگر، به این نرم‌افزار وارد شود. به‌تازگی برای ارزیابی بهتر توزیع مکانی و زمانی مقدار کل ماده آلی موجود در سنگ منشأ، روشی نوین در چارچوب

Carpentier et al. 1991 مدلی را منتشر کرد که ترکیبی از رسوبات تبخیری با رسوبات آلی است و آن را در توالی‌های تبخیری حلقوی حوضه Mulhouse اعمال کرد. مدل آنها، یعنی SIMSALT، اولین تلاشی بود که اثر متقابل مدل چینه‌ای (در اینجا توالی‌های تبخیری) و رسوبات آلی را در نظر گرفت. برخی از مدل‌های چینه‌نگاری، به‌طور عمده با استفاده از رویکردی که Schwarzkopf 1993 در مدل خود استفاده کرد، استفاده از مقدار تولید ماده آلی دریایی را آغاز کردند. با این حال، به نظر می‌رسد که این رویکرد به‌اندازه کافی انعطاف‌پذیر نیست تا بتواند فرآیندهای مختلف تأثیرگذار بر

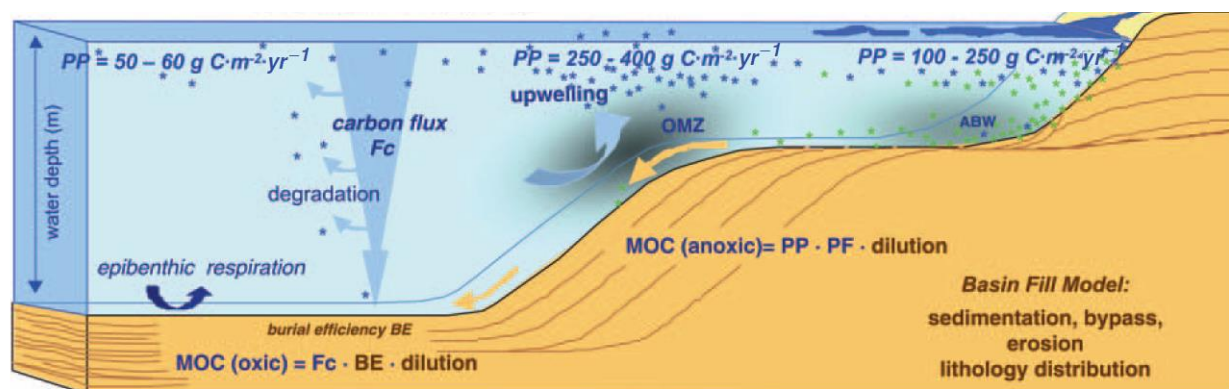
فرآیندمحور است که فرآیندهای اصلی رسوب‌گذاری و تکتونیک را در محیط رسوبی کربناته و آواری، به‌طور هم‌زمان و یا جداگانه شبیه‌سازی می‌کند (Al-Salmi et al. 2018). فرآیندهای اصلی که در این نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود، شامل تغییرات فضای رسوب‌گذاری، ورود رسوبات آواری و یا تولید رسوبات کربناته و جابه‌جایی رسوبات کربناته و آواری اند (Javid et al. 2020).

مدول مدل‌سازی ماده آلی به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای حاکم بر توزیع، تجمع و حفظ مواد آلی دریایی و خشکی، به‌نرم‌افزار Dionisos Flow وارد شده است. فرآیندهای اصلی که در این مدول اضافه شده است، شامل بهره‌وری اولیه، شار کربن، انتقال مواد آلی، سطح اکسیژن و بازده دفن‌اند (Granjeon and Chauveau 2014) (شکل ۲). تمام این فرآیندها و پارامترهای مرتبط با آنها براساس معادلات تجربی یا مشاهدات است.

مدل‌سازی چینه‌ای پیشرو معرفی شده است. این روش، ویژگی‌های سنگ منشأ را به‌عنوان تابعی از شرایط رسوبی توصیف می‌کند و رابطه بین تجمع لایه‌های غنی از مواد آلی و تغییرات فضای رسوب‌گذاری را به تصویر می‌کشد. کاربرد این روش جدید، تخمین توزیع ویژگی‌های یک سنگ منشأ از نظر ضخامت، محتوای TOC و اندیس هیدروژن (HI) به‌منظور استفاده در مطالعات مدل‌سازی سه‌بعدی حوضه رسوبی است (Bou Daher et al. 2023; Bruneau et al. 2016). هدف از این مقاله، آشنایی کامل با معادلات استفاده‌شده در این نرم‌افزار و همچنین بررسی عملکرد این روش با استفاده از یک مدل آزمایشی است.

## روش مطالعه

مدل چینه‌ای پیشرو، یک مدل‌سازی سه‌بعدی با روش



شکل ۲- طرحی شماتیک که پارامترها و فرآیندهای موجود در مدل‌سازی رخساره‌های آلی را نشان می‌دهد: OMZ: منطق G حداقل اکسیژن؛ ABW: شرایط انوکسیک؛ MOC: کربن آلی دریایی؛ TOM: مواد آلی خشکی (Mann and Zweigel 2008).

**Fig 2- Sketch showing parameters and processes included in organic facies modelling: OMZ, oxygen minimum zone; ABW, anoxic bottom water; MOC, marine organic carbon; TOM, terrigenous organic matter (Mann and Zweigel 2008).**

توسط فتوسنتز، بهره‌وری اولیه نامیده می‌شود؛ زیرا اولین مرحله در زنجیره غذایی دریایی است (Bruneau et al. 2016). این فرآیند به قابلیت دسترسی به مواد مغذی و خود به آب و هوا، جریان‌های بالارونده، رواناب، پوشش گیاهی و ریخت‌شناسی منطقه حوضه آبریز بستگی دارد. در این مدول،

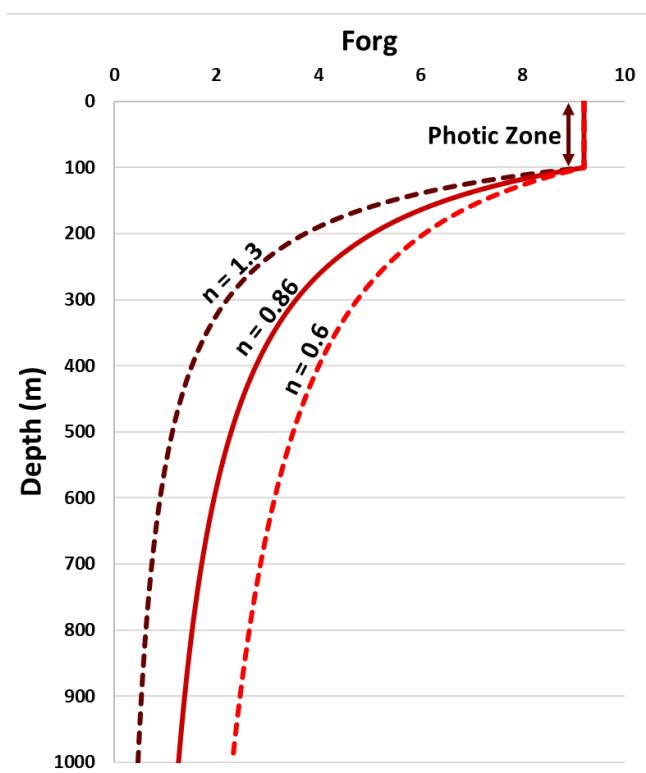
## بهره‌وری اولیه<sup>۱</sup>

فیتوپلانکتون‌ها، باکتری‌ها و آغازیان در منطقه فوتیک، بخش غالب مواد آلی دریایی را تشکیل می‌دهند. تولید این ماده آلی

<sup>1</sup> Primary Productivity

### سطح اکسیژن

سطح اکسیژن در رسوبات، یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده حفظ مواد آلی است؛ زیرا ماهیت تنفس موجودات اعماق دریا را تعیین می‌کند (Bruneau et al. 2016). کاهش اکسیژن یک وضعیت پایدار نیست و اکسیژن ستون آب به‌طور مداوم با انتشار از جو و همچنین جریان‌های اقیانوسی و گردش آب تأمین می‌شود. کاهش اکسیژن به‌طور عمده به دو پدیده مرتبط است: الف) اکسیداسیون شدید مواد آلی با سرعتی بیشتر نسبت به اکسیژن‌رسانی اتفاق بیفتد و ب) جداسازی لایه‌های آب از منطقه اکسیژن‌رسانی (Bruneau et al. 2016).



شکل ۳- روند شار کربن بر طبق معادلهٔ مارتین همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات  $n$  میزان تخریب مواد آلی را کنترل می‌کند عمق بین ۰-۸۰ متر زون نوردار در نظر گرفته و تخریب مواد آلی از انتهای عمق نوردار شروع می‌شود.

**Fig 3-** The trend of carbon flux according to Martin's equation. As seen, changing in "n" coefficient controls the rate of organic matter degradation. The depth between 0-80 meters is considered as the photic zone, and the degradation of organic matter starts from the bellow of the zone.

تولید مواد آلی دریایی به‌عنوان تولید خالص اولیه در سطح دریا تعریف و به مقدار کل کربن تولیدشده توسط فیتوپلانکتون (کربن تبدیل‌شده به ماده آلی)، منهای کربن مورد نیاز برای تنفس و در مقیاس  $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$  بیان مربوط می‌شود (Bruneau et al. 2016). بهره‌وری اولیه از این نظر اهمیت دارد که نوع موجودات و در نتیجه کیفیت ماده آلی حفظ‌شده و همچنین نسبتی از تولید اولیه را تعیین می‌کند که از منطقه فوتیک، به سمت کف حوضه حرکت کرده است (Tyson 1995).

### شار کربن<sup>۲</sup>

پس از بهره‌وری اولیه، ذرات مواد آلی در ستون آب به سمت کف دریا حرکت می‌کنند. چگالی این ذرات نزدیک به آب دریاست؛ بنابراین به‌آرامی در ستون آب ته‌نشین می‌شوند (Bruneau et al. 2016). مکانیسم غالب حمل و نقل مواد آلی معلق دریایی در اقیانوس‌ها، به‌صورت عمودی و عمدتاً شامل توده‌های بزرگ مواد آلی با قطر بزرگ‌تر از ۲۰۰ میکرومتر است (Tyson 1995). شار کربن بخشی از بهره‌وری اولیه است که مصرف نمی‌شود و به کف دریا می‌رسد. مقدار شار کربن از معادلهٔ ۱ محاسبه می‌شود (Martin et al. 1987):

$$\text{Forg (gc. m}^{-2}\text{. a}^{-1}\text{)} = 0.409 \times \text{PP}^{1.41} (\text{Z}/100)^{-n} \quad (1)$$

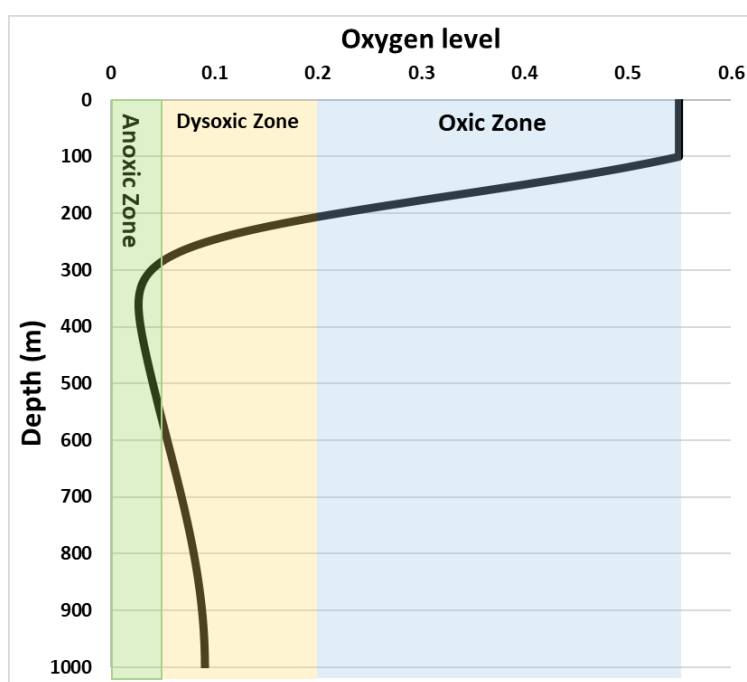
«Forg» شار کربن، «PP» بهره‌وری اولیه و «n» ثابت مارتین نام دارد که بین ۰٫۶-۱٫۳ متغیر است و به‌طور میانگین مقدار ۰٫۸۶ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳). شار کربن با عمق بستر دریا نسبت عکس دارد؛ به‌نحوی که با افزایش عمق حوضه، مقدار ماده آلی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار  $n$ ، تخریب مواد آلی با نرخ سریع‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین مطالعات اخیر نشان داده است که  $n$  احتمالاً به شرایط اکسیژن حوضه حساس است؛ به طوری که با افزایش سطح اکسیژن محیط، مقدار  $n$  نیز افزایش پیدا می‌کند (Berelson 2001).

<sup>2</sup> Carbone flux

در معادله ۲،  $Ox_z(z)$  سطح اکسیژن در کف دریاست؛ سطح اکسیژن در واحد بدون بعد بیان می‌شود که مقادیر از ۰ (محیط کاملاً احیایی) تا ۱ (محیط کاملاً اکسیک) متغیر است،  $A_z(z)$  ضریب سرعت اختلاط،  $Ox_{REF}$  سطح اکسیژن مرجع و  $D_z$  مصرف اکسیژن مرتبط با تخریب مواد آلی توسط ارگانسیم است (Bruneau et al. 2018). با توجه به شکل ۴، مقادیر اکسیژن بیشتر ۰٫۲، زون اکسیک، بین ۰٫۲ - ۰٫۵، زون دی‌اکسیک و مقادیر پایین‌تر از ۰٫۰۵، زون آنوکسیک است.

در مدول ماده آلی، کاهش نسبی اکسیژن از طریق یک معادله تعادل جرم بین تجدید اکسیژن و مصرف اکسیژن محاسبه می‌شود (Mann and Zweigel 2008). این کاهش نسبی، بدون در نظر گرفتن جریان آب تخمین زده می‌شود؛ بنابراین فقط یک بعدی (عمودی) است.

$$\frac{dOx_z(z)}{dt} = A_z(z) \times Ox_{REF} - D_z \times Ox_z(z) \quad (2)$$



شکل ۴- منحنی تغییرات اکسیژن نسبت به عمق

Fig 4- The curve of oxygen level changes versus depth

از معادله ۳ به دست می‌آید (Felix 2014):

$$\log_{10}(BE) = \frac{1.39 \times \log_{10}SR}{\log_{10}(SR + 7.9) + 0.34} \quad (3)$$

در معادله بالا، BE بازده دفن و SR نرخ رسوب گذاری است. در مرحله بعد، نرم‌افزار با اعمال ضریب اکسیژن، میزان بازده تدفین نهایی را محاسبه می‌کند.

### محتوای کل کربن آلی

معادله محاسبه TOC مطابق معادله ۴ است (Felix 2014):

### بازده تدفین<sup>۳</sup>

مواد آلی پس از غرق شدن از سطح دریا و رسیدن به سطح رسوب، در نهایت دفن می‌شوند. مقدار مواد آلی حفظ شده پس از چند متر اول دفن (یعنی در حین دیاژنز اولیه)، بازده تدفین نامیده می‌شود (Bruneau et al. 2018). در این مدول، بازده تدفین با استفاده از میزان رسوب حاصل از مدل چینه‌شناسی پیشرو و سطح اکسیژن، محاسبه می‌شود. معادله بازده تدفین،

<sup>3</sup> Burial efficiency



زمین‌شناسی از حوضه مطالعه شده تهیه شود (شکل ۵). این مدل مفهومی براساس تفسیر داده‌های دوبعدی و سه‌بعدی لرزه‌ای، انطباق داده‌های رخنمون و یا داده‌های چاه به دست می‌آید. بعد از اجرای شبیه‌سازی مدل ساخته شده، برای هر یک از سلول‌های مدل سه‌بعدی، ویژگی‌های مختلف رسوبی همچون درصد حضور رسوبات، ضخامت، عمق بستر رسوبی، نرخ رسوب‌گذاری و انرژی محیط تخمین زده می‌شود (Granjeon 2014). نتایج مدل‌سازی مانند رخصاره، ضخامت سکناس‌ها و مقدار کل ماده آلی، باید با داده‌های موجود در محل چاه‌ها تطابق داشته باشد (Al-Wazzan et al. 2021) (شکل ۵).

$$TOC = \frac{W_{Corg}}{W_{Corg} + W_{inorg}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$= \frac{BE \cdot CF}{BE \cdot CF + \rho \cdot SR} \cdot 100$$

در این معادله  $W_{Corg}$  وزن کربن آلی،  $W_{inorg}$  وزن ماده معدنی،  $BE$  بازده تدفین،  $SR$  نرخ رسوب‌گذاری،  $CF$  شار کربن آلی و  $\rho$  چگالی حجمی خشک است. عدد ۱۰ در مخرج برای به دست آوردن واحدهای یکسان میزان تجمع رسوب ( $\rho \cdot SR$ ) و میزان تجمع کربن آلی ( $BE \cdot CF$ ) است (Felix 2014). نتیجه نهایی این مدل‌سازی، یک بلوک سه‌بعدی از ویژگی‌های محیط رسوبی و محتوای ماده آلی است. بر طبق نمودار گردش کار مدل چینه‌ای، پیشنهاد می‌شود پیش از استفاده از نرم‌افزار DionisoFlow، یک مدل مفهومی



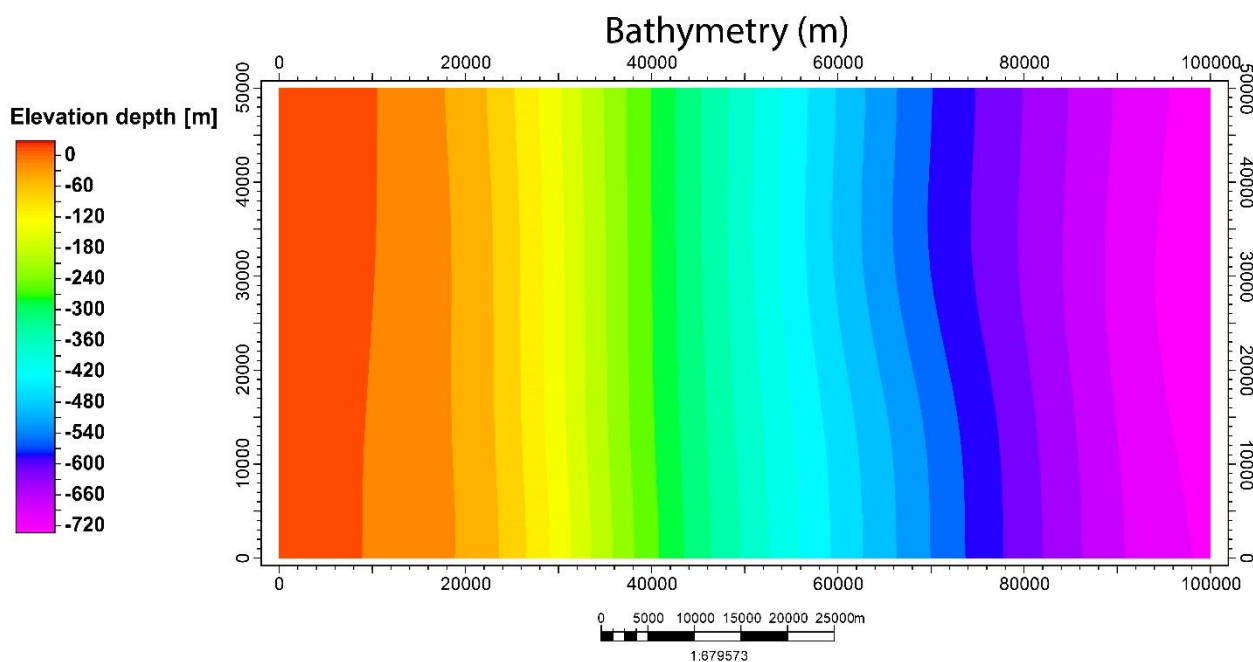
شکل ۵- نمودار گردش کار کلی ساخت مدل چینه‌ای در نرم‌افزار DionisoFlow

Fig 5- Flowchart of stratigraphic modeling in the DionisoFlow.

صرف نظر شده است؛ به این ترتیب فضای رسوب‌گذاری در طی زمان مدل‌سازی ثابت است. دو نوع رسوب کربناته، شامل رسوبات کربناته کم عمق و کربناته عمیق تعریف و حداکثر مقدار تولید این رسوبات، به ترتیب ۴۰ و ۱۵ متر در هر میلیون سال در نظر گرفته شد (شکل ۷).

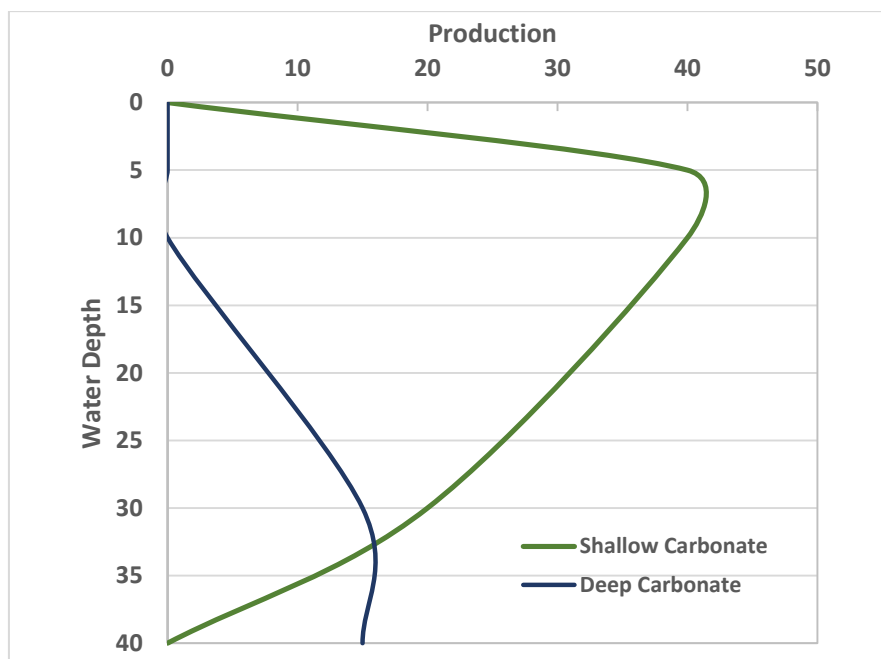
## نتایج

در این مطالعه به منظور بررسی عملکرد این روش، از یک مدل آزمایشی استفاده شد. عمق دیرینه مدل طراحی شده بین ۲۵- تا ۷۰۰ متر با شیب یکنواخت و به سمت شرق است (شکل ۶). در این مدل از تغییرات سطح آب دریا و نرخ فرونشست،



شکل ۶- نقشه عمق دیرینه مدل تهیه شده عمق حوضه از غرب به شرق افزایش می‌یابد و به حداکثر ۷۰۰ متر می‌رسد.

**Fig 6-** Constructed paleo bathymetry map. Depth of basin is increased to maximum 700 meters toward east.

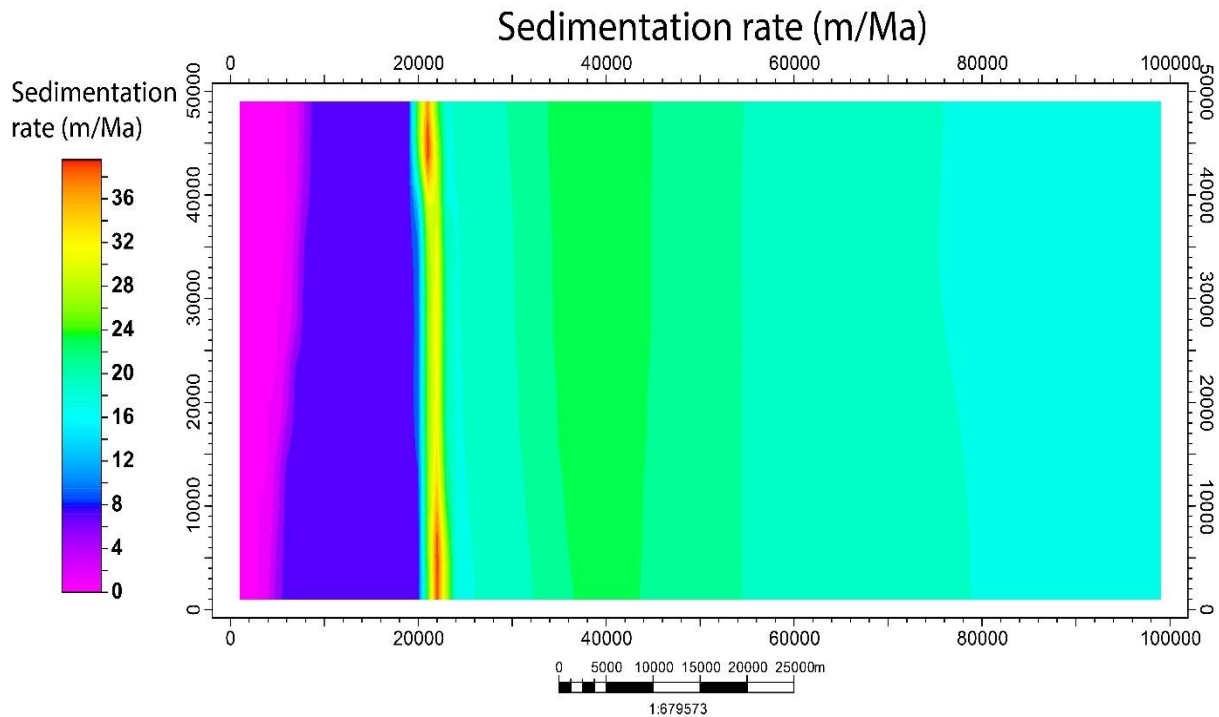


شکل ۷- نرخ تولید رسوبات کربناته نسبت به عمق در این مطالعه، دو نوع رسوب عمیق و کم عمق تعریف شد. رسوبات کربناته کم عمق تا عمق ۴۰ متر تولید می‌شود. در مقابل، رسوبات کربنات عمیق در این عمق، به حداکثر تولید خود می‌رسد.

**Fig 7-** Production rate of the carbonate sediments versus depth. In this study, 2 type sediments including shallow and deep is defined. production depth of shallow carbonate is eliminated at 40 meters, whereas deep carbonate reach to maximum production rate at that depth.

کربنات‌ها در نقاط مختلف حوضه متغیر است و از مقدار ۴۰ تا حدود ۱۵ متر در هر میلیون سال مشاهده می‌شود (شکل ۸). با توجه به پارامترهای ورودی مدل، این نتیجه از توزیع نرخ رسوب‌گذاری، انتظار می‌رفت.

در این مطالعه، بهره‌وری اولیه، مقدار تغییرات شار کربن و سطح اکسیژن از مقادیر پیش فرض نرم‌افزار استفاده شد. همچنین مدل طراحی شده اجرا و نتایج به دست آمده در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نمایش داده شده است. نرخ رسوب‌گذاری

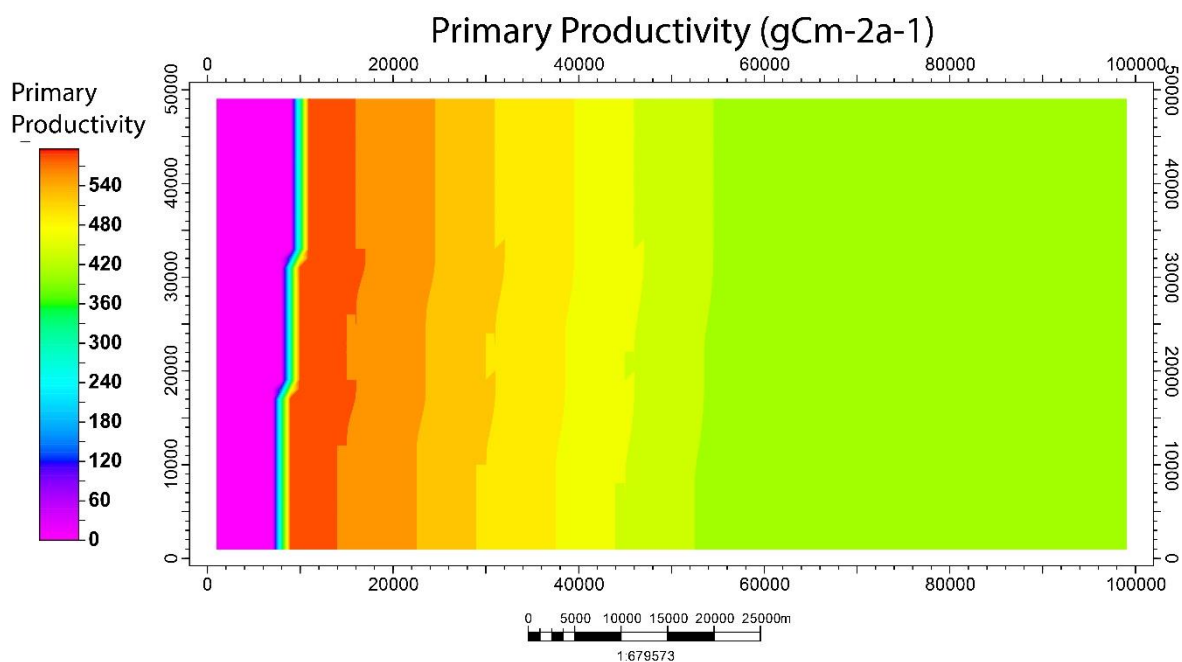


شکل ۸- نقشه نرخ رسوب‌گذاری رسوبات کربناته محاسبه شده در مدل

Fig 8- Estimated total Sediment production rate map.

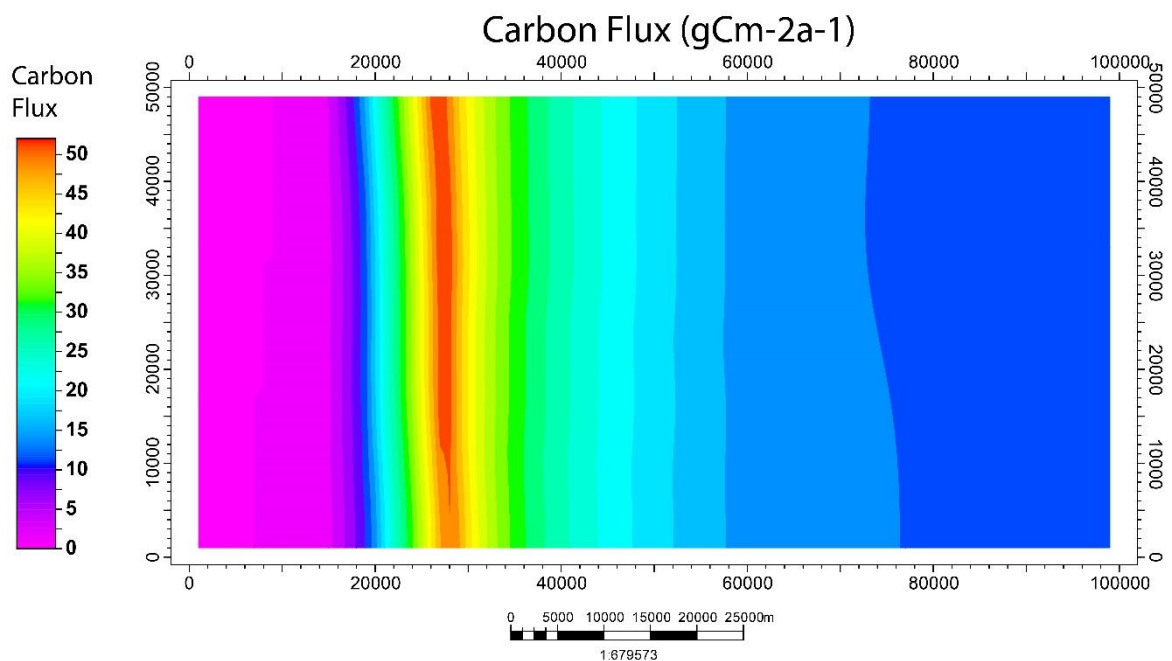
۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات اکسیژن با افزایش عمق، ابتدا کاهش شدیدی پیدا می‌کند و سپس افزایش نسبی سطح اکسیژن، مشاهده می‌شود (شکل ۱۱). با توجه به نتایج مدل، مقدار کل ماده آلی بین مقدار ۰ تا ۱۳ درصد متغیر است و بیشترین مقدار کل ماده آلی در عمق حدود ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر مشاهده می‌شود (شکل ۱۲).

در حاشیه حوضه، بیشترین بهره‌وری اولیه مشاهده می‌شود و با فاصله گرفتن از خط ساحلی، این پارامتر کاهش می‌یابد. مقدار بهره‌وری اولیه از  $700 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$  تا  $300 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$  متغیر است (شکل ۹). نتیجه مربوط به شار کربن نشان می‌دهد بیشترین مقدار شار در عمق حدود ۱۵۰ متر مشاهده می‌شود و با افزایش عمق، این مقدار کاهش می‌یابد (شکل



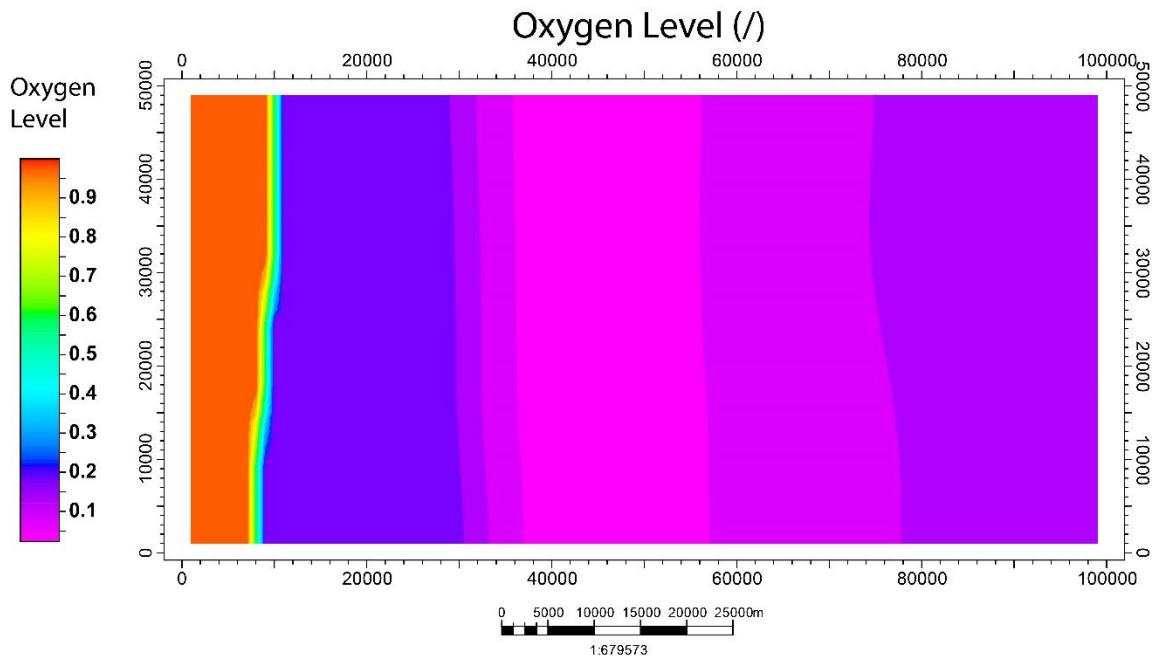
شکل ۹- نقشه بهره‌وری اولیه مواد آلی بهره‌وری اولیه از نواحی ساحلی به سمت مرکز حوضه، با روند خطی تا رسیدن به کمترین مقدار کاهش می‌یابد.

**Fig 9-** Primary production map. PP decrease linearly over the shore to reach minimum value.



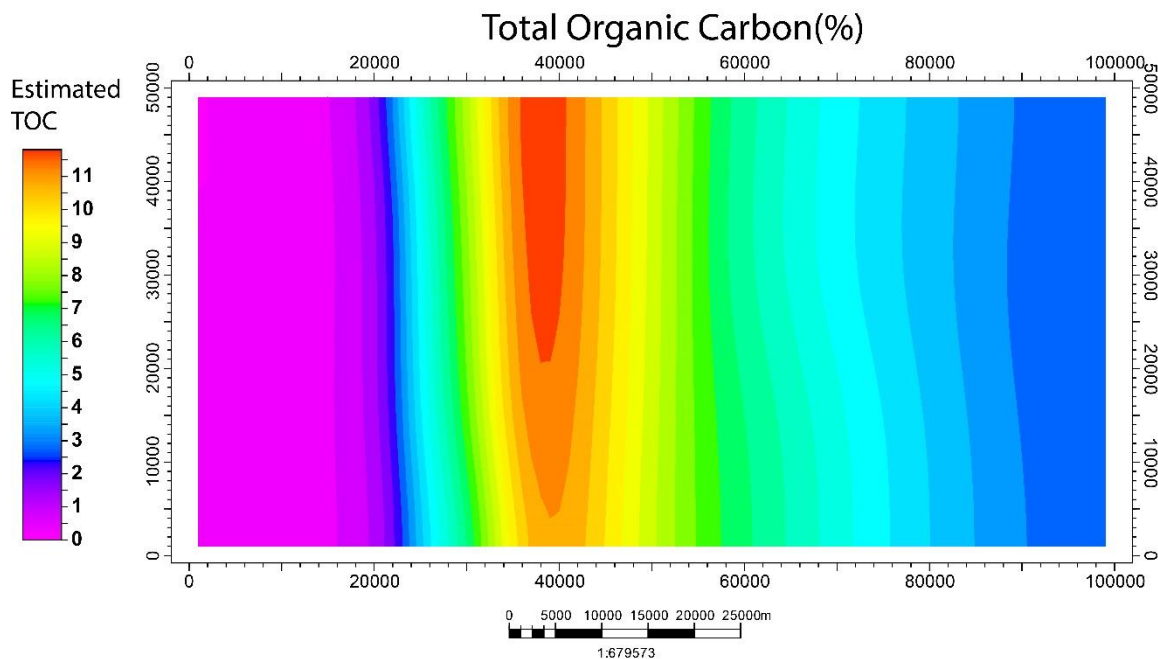
شکل ۱۰- نقشه تغییرات شار کربن این پارامتر در عمق ۱۵۰ متر به حداکثر می‌رسد و با افزایش بیشتر عمق حوضه، کاهش می‌یابد.

**Fig10-** Carbon flux map. Depth of Highest carbon flux is seen about 150 meters. This parameter reduces in greater depth.



شکل ۱۱- نقشه تغییرات سطح اکسیژن کمترین مقدار اکسیژن در عمقی حدوداً بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر مشاهده می‌شود.

**Fig 11-** Oxygen level map. Minimum oxygen level is located at an area with depth between 200 to 500 meters.



شکل ۱۲- نقشه توزیع تغییرات مقدار کل ماده آلی در عمق بهینه مقدار کل ماده آلی در عمق حدود ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر دیده می‌شود.

**Fig 12-** Total organic carbon map. The optimal depth of TOC is between 200 to 400 meters.

شار کربن نسبت به عمق است. بر طبق معادله مارتین و شکل (۳)، افزایش عمق آب، کاهش شار کربن را به دنبال دارد؛ به طوری که تا عمق ۵۰۰ متر حدود ۷۵ درصد و تا عمق ۱۰۰۰ متر، حدود ۹۰٪ از بهره‌وری اولیه اکسید می‌شود؛ بنابراین عمق

بحث

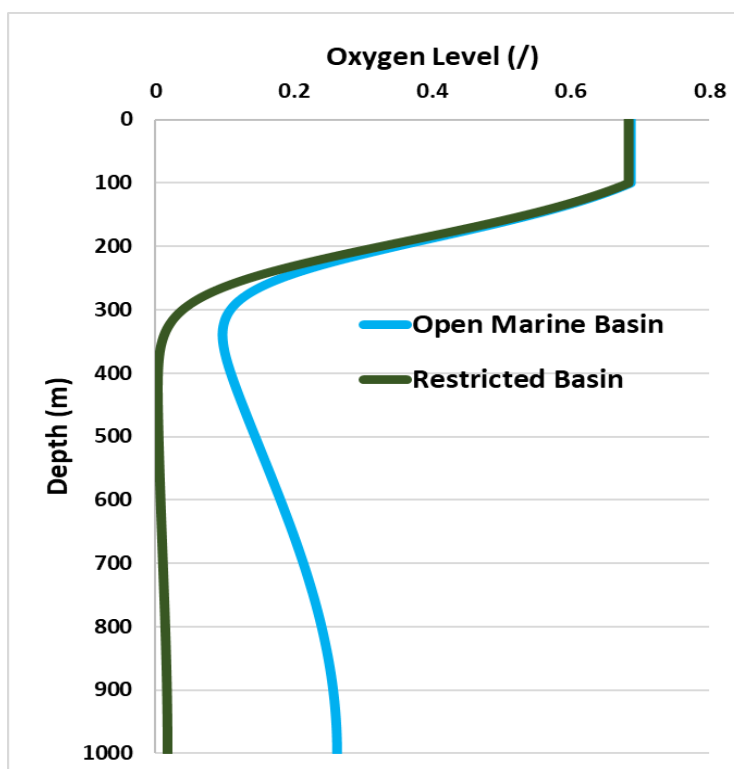
نتایج مدل، عمق بهینه‌ای را برای حفظ ماده آلی نشان می‌دهد؛ به نحوی که با افزایش عمق دیرینه، ابتدا افزایش و سپس کاهش TOC مشاهده می‌شود. یکی از دلایل آن، کاهش مقدار

هم‌بی تأثیر خواهد بود. به تعبیر دیگر، برای تشکیل رسوبات دریایی با مقادیر مناسب TOC، اگر حفظ مواد آلی از طریق وجود شرایط دی اکسی - آنوکسی انجام شود، وجود بهره‌وری اولیه بسیار بالا، ضروری به نظر نمی‌رسد.

در این مطالعه، شرایط محیط دریای باز برای مدل‌کردن تغییرات سطح اکسیژن استفاده شد. در این محیط به دلیل وجود گردش پایدار، افزایش سطح اکسیژن از عمق‌های بیشتر از ۴۰۰ متر مشاهده می‌شود (شکل ۱۳). در مدل ماده آلی، امکان مدل‌سازی محیط محصور با تغییر شرایط اکسیژن محیط فراهم است. چنین حوضه‌هایی با اعمال محدودیت در تجدید اکسیژن حاصل از جریان‌های اقیانوسی، شبیه‌سازی‌شدنی‌اند. در این محیط‌ها به دلیل نبود گردش مناسب آب، سطح اکسیژن در نواحی عمیق حوضه افزایش نمی‌یابد (شکل ۱۳). به این ترتیب این روش، حوضه‌های محصور یا حوضه‌ای با تبخیر زیاد در یک آب و هوای خشک را شبیه‌سازی می‌کند.

بهینه حفظ ماده آلی در عمق آب دیرینه، کمتر از ۵۰۰ متر است. همچنین حفظ کربن آلی بیش از ۱٪، فقط در مناطقی با عمق آب دیرینه کمتر از ۱ کیلومتر رخ می‌دهد.

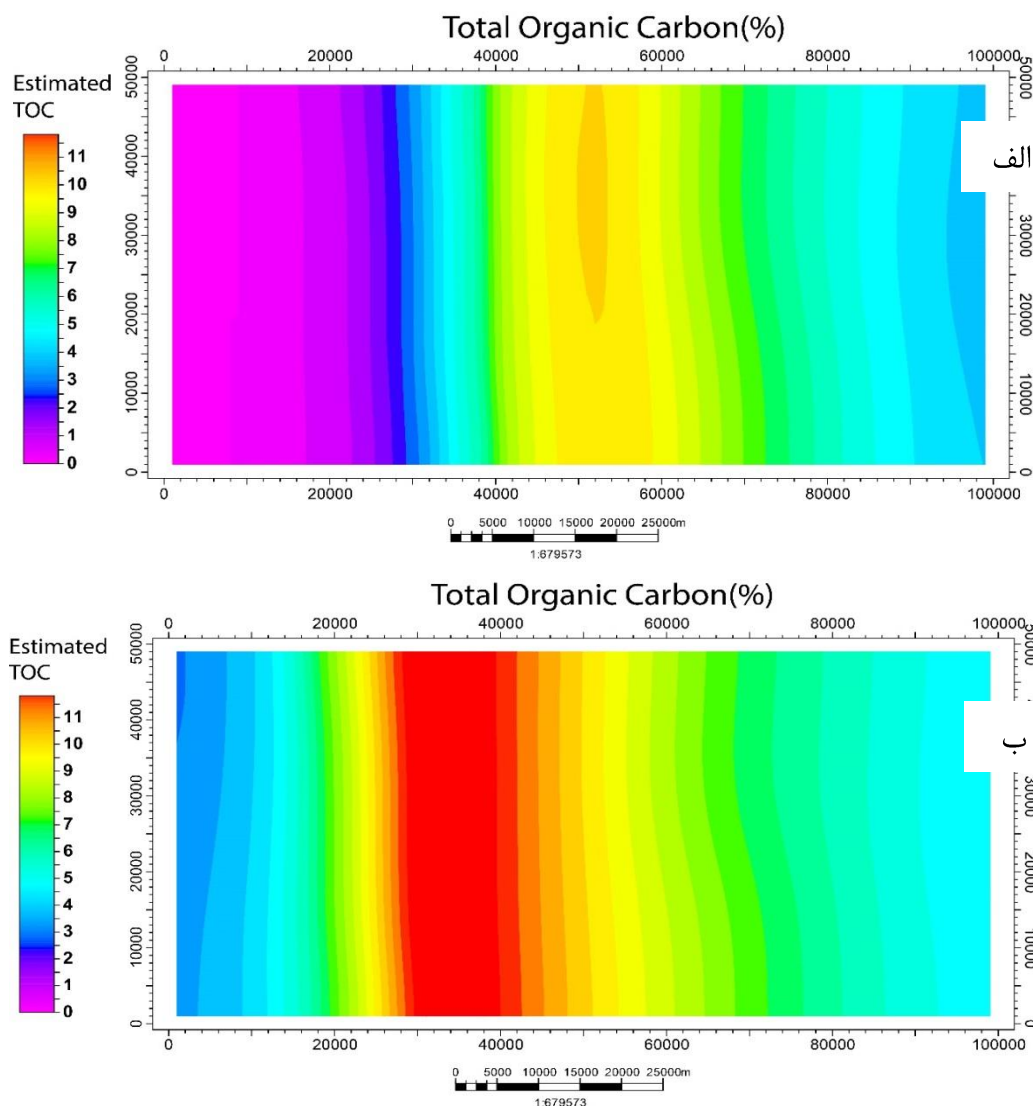
نتایج نشان می‌دهد، کمترین مقدار اکسیژن در بازه عمقی بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر مشاهده می‌شود؛ زیرا اولاً با افزایش عمق و کاهش ذرات آلی، مصرف اکسیژن کاهش می‌یابد و ثانیاً با توجه به اینکه گردش آب اقیانوسی که اکسیژن اعماق اقیانوس را تأمین می‌کند، همواره وجود دارد، بنابراین با افزایش عمق، سطح اکسیژن آب دریا به تدریج افزایش می‌یابد. این مطالعه ثابت کرد یک رابطه مکانی نه چندان قوی بین مناطق با بهره‌وری اولیه بالا و نواحی با رسوبات غنی از مواد آلی وجود دارد. این نبود همبستگی ثابت می‌کند که بهره‌وری اولیه، به خودی خود مهم‌ترین پارامتر کنترل در محتوای کل ماده آلی نبوده است، بلکه عواملی از جمله سطح اکسیژن کف حوضه، در حفظ ماده آلی موثرتر است. اگر محیط رسوبی، محتوای اکسیژن خوبی داشته باشد، وجود بهره‌وری بسیار بالا



شکل ۱۳- منحنی تغییرات سطح اکسیژن نسبت به عمق در دو محیط دریای باز و محصور  
Fig 13- Oxygen level curve in the open marine and restricted basin.

به منظور بررسی تأثیر تغییرات فضای رسوب‌گذاری بر توزیع و مقدار کل ماده آلی، علاوه بر مدل مرجع، دو سناریوی دیگر نیز طراحی شد. در سناریوی اول، سطح آب دریا به تدریج و با یک روند خطی کاهش می‌یابد. در این سناریو فضای رسوب‌گذاری حدود ۲۰۰ متر کاهش دارد. در سناریوی دوم، سطح آب دریا با یک روند خطی افزایش می‌یابد که افزایش بیش از ۲۰۰ متری فضای رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد تغییرات فضای

رسوب‌گذاری علاوه بر مقدار کل ماده آلی، بر توزیع مکانی آن نیز مؤثر است. در سناریوی اول، کاهش مقدار ماده آلی محسوس است. علاوه بر آن، گستردگی ناحیه بهینه ماده آلی کاهش و همچنین این ناحیه به سمت مرکز حوضه حرکت کرده است (شکل ۱۴-الف). سناریوی دوم، عکس سناریوی اول است و افزایش مقدار ماده آلی، گسترش بیشتر ناحیه بهینه و حرکت این ناحیه به حاشیه حوضه را نشان می‌دهد (شکل ۱۴-ب).



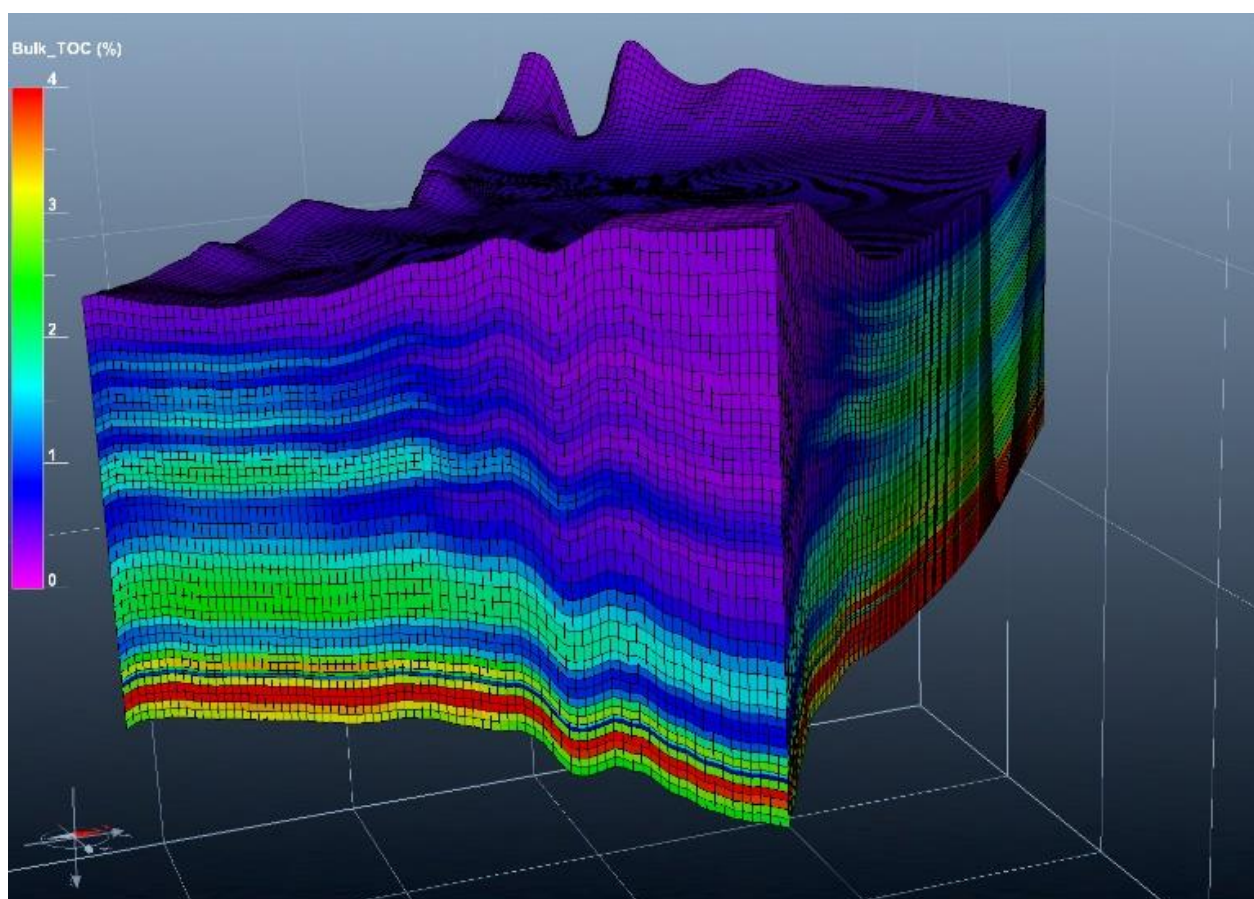
شکل ۱۴- الف) نقشه توزیع مقدار کل ماده آلی در سناریو ۱. در این سناریو کاهش سطح آب دریا به کاهش TOC و وسعت ناحیه بهینه منجر شده است و ب) نقشه توزیع مقدار کل ماده آلی در سناریو ۲. در این سناریو افزایش سطح آب دریا اعمال شد. این افزایش فضای رسوب‌گذاری شرایط برای حفظ ماده آلی را بهتر کرده است.

**Fig 14- A) Estimated TOC map in the scenario 1. sea level drop resulted in reduction of TOC and extension of optimal area. B) estimated TOC map in the scenario 2. Sea level rise eventuated in increase of accommodation space which helps to preservation of organic matter.**

حفظ‌شدگی ضعیف ماده آلی در رسوبات جوان‌تر شده است. همچنین با کم‌عمق‌شدن محیط رسوبی، نرخ رشد رسوبات نیز افزایش پیدا کرده و باعث رقیق‌شدگی ماده آلی شده است. نتایج نشان می‌دهد علاوه بر اکسیژن محیط، فضا و نرخ رسوب‌گذاری نیز در صورت وجود بهره‌وری مناسب، نقش مهمی در حفظ ماده آلی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این روش توانسته است تغییرات جانبی و عمودی مقدار کل ماده آلی را به‌خوبی شبیه‌سازی کند.

به‌منظور نمایش بهتر عملکرد این روش، نتیجه سه‌بعدی مقدار کل ماده آلی در یک حوضه پیچیده‌تر نشان داده شده است (شکل ۱۵).

در این مدل، مقدار بهره‌وری اولیه در طی رسوب‌گذاری ثابت و برابر ۲۵۰ در نظر گرفته شد. در این حوضه رسوبی، فضای رسوب‌گذاری به‌تدریج به‌سمت رسوبات جوان‌تر کاهش می‌یابد. با تغییرات عمق رسوب‌گذاری در طول زمان، با وجود افزایش شار کربن، کاهش شرایط دی‌اکسیک/انوکسیک محیط رسوبی را شاهدیم که باعث



شکل ۱۵ - نمایش سه‌بعدی مدل‌سازی مقدار کل ماده آلی این روش جدید توانسته است توزیع جانبی و قائم مقدار کل ماده آلی را با دقت مناسبی تخمین بزند.

**Fig 15-** 3D view of estimated TOC. the new method is able to estimate vertical and horizontal distribution of TOC with appropriate resolution.



## نتیجه

در این مطالعه، یک مدل چینه‌ای فرضی برای بررسی ابزار مدل‌سازی ماده آلی ساخته شد. در این مدل، حداکثر عمق حوضه رسوبی حدود ۷۰۰ متر در نظر گرفته شد که از قسمت غرب به شرق با شیب ثابت افزایش می‌یابد. نرخ رشد رسوبات نیز بین ۱۵-۴۰ متر در میلیون سال در نظر گرفته شد. پارامترهای اضافه‌شده در این ابزار جدید، بهره‌وری اولیه، شار کربن و شرایط اکسیژن محیط است. عمق مربوط به بیشترین مقدار کل ماده آلی در حدود ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر مشاهده شد. نتیجه مدل‌سازی نشان داد بیشترین مقدار کل ماده آلی در نواحی، با شرایط آنوکسیک و نرخ رشد مناسب مشاهده می‌شود. این مطالعه ثابت کرد پارامترهای مؤثر در توزیع مقدار کل ماده آلی، بهره‌وری اولیه، سطح اکسیژن و تغییرات فضای رسوب‌گذاری است. این مطالعه بیانگر این مطلب است که استفاده از این ابزار جدید، روش بسیار مناسبی در تخمین سه‌بعدی ویژگی‌های سنگ منشأ، به‌منظور استفاده از مدل‌سازی‌های سیستم نفتی است. یکی از نقاط قوت این روش، استفاده از ارتباط بین شرایط محیط رسوبی و مقدار کل ماده آلی است؛ بنابراین این ابزار برای مدل‌سازی سنگ منشأهای عمیق یا نواحی با داده‌های اندک بسیار مناسب و کاربردی است.

## References

- framework: The example of the Lias of the Paris Basin. *Paleogeography, Paleoclimate and Source Rocks*, 40: 273–301.
- Bou Daher S. Chauveau B. Leguerrou E. Jermannaud P. Thebault A. Romero-Sarmiento M. and Marfisi E. 2023. Source Rocks Forward Modelling: Significance and Approach. *Advances in Petroleum Source Rock Characterizations: Integrated Methods and Case Studies. Advances in Science, Technology & Innovation*, 59-79.
- Bruneau B. Chauveau B. Baudin F. and Moretti I. 2018. 3D stratigraphic forward numerical modeling approach for prediction of organic-rich deposits and their heterogeneities. *Marine and Petroleum Geology*, 82:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.01.018>
- Bruneau B. Chauveau B. Duarte L.V. Desaubliaux G. Moretti I. and Baudin F. 2016. 3D numerical modelling of marine organic matter distribution: example of the Early Jurassic sequences of the Lusitanian Basin (Portugal). *Basin Research*, 30:101-123. <https://doi.org/10.1111/bre.12210>
- Bessereau G. Carpentier B. and Huc A.Y. 1991. Wireline logging and source rocks – Estimation of organic carbon content by the Carbolog method. *The Log Analyst*, 32(3): 279–297.
- Felix M. 2014. A comparison of equations commonly used to calculate organic carbon content and marine palaeoproductivity from sediment data. *Marine Geology*, 347: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.10.006>
- Granjeon D. and Chauveau B. 2014. Sedimentary basin development method using stratigraphic simulation coupled with an organic matter production and degradation model. *Brevet US20140163883*, A1: 6-12.
- Granjeon D. 2014. 3D forward modelling of the impact of sediment transport and base level cycles on continental margins and incised valleys. *Depositional systems to sedimentary successions on the Norwegian Continental Margin: International Association of Sedimentologists*, 46: 453–472.
- Grohmann S. Fietz W. Nader F. Romero-Sarmiento M. Baudin F. and Littke R. 2020. Characterization of Late Cretaceous to Miocene source rocks in the Eastern Mediterranean Sea: an integrated numerical approach of stratigraphic forward modeling and petroleum system modeling. *Basin Research*, 33:846–874. <https://doi.org/10.1111/bre.12497>
- Hartnett H.E. and Devol A.H. 2003. Role of a strong oxygen-deficient zone in the preservation and degradation of organic matter: A carbon budget for the continental margins of northwest Mexico and Washington State. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(2): 247-264. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01076-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01076-1)
- Hartnett H.E. Keil R.G. Hedges J.I. and Devol A.H. 1998. Influence of oxygen exposure time on
- Al-Salmi M. John C. M. and Hawie N. 2018. Quantitative controls on the regional geometries and heterogeneities of the Rayda to Shu'aiba formations (Northern Oman) using forward stratigraphic modelling. *Marine and Petroleum Geology*, 99:45-60. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.09.030>
- Al-Wazzan H. A. Hawie N. Al-Haggan H. Al-Mershed M. K. Al-Sahlan G. and Al-Wadi M. 2021. 3D forward stratigraphic modelling of the Lower Jurassic carbonate systems of Kuwait. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104699. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104699>
- Berelson W.M. 2001. The Flux of Particular Organic Carbon into the Ocean Interior: A comparison of Four U.S. JGOFS Regional Studies. *Oceanography*, 14: 59–67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.07>
- Bessereau G. Guillocheau F. and Huc A.Y. 1995. Source rock occurrence in a sequence stratigraphic



- Pasley M.A. Riley G.W. and Nummedal D. 1993. Sequence stratigraphic significance of organic matter variations: Example from the Upper Cretaceous Mancos Shale of the San Juan Basin, New Mexico. In: Source Rocks in a Sequence Stratigraphic Framework (Eds B.J. Katz and L.M. Pratt), Am. Assoc. Petrol. Geol. Stud. Geol. Tulsa. 37: 221–241.
- Schwarzkopf T.A. 1993. Model for prediction of organic carbon content in possible source rocks. *Marine Petroleum Geol.*, 10(5): 478–492. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(93\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0264-8172(93)90049-X)
- Tyson R.V. 1995. Sedimentary Organic Matter: Organic Facies and Palynofacies. Chapman and Hall, London, 615 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0739-6>
- Tyson R.V. 1996. Sequence-stratigraphical interpretation of organic facies variations in marine siliclastic systems: General principles and application to the onshore Kimmeridge Clay Formation, Sequence Stratigraphy in British Geology (Eds S.P. Hesselbo and D.N. Parkinson). Geological Society Special Publication, 103, 75–96.
- Wignall P.B. 1991. Model for transgressive black shales. *Geology*, 19: 167–170. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0167:MFTBS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0167:MFTBS>2.3.CO;2)
- organic carbon preservation in continental margin sediments. *Nature*, 391: 572–575. <https://doi.org/10.1038/35351>
- Javid M. Salehi M. and Beiranvand B. 2020. Reference software dionisos: 3D stratigraphic forward modeling, Setayesh publication, 173 p. In Persian.
- Katz B.J. and Pratt L. M. 1993. Source rocks in a sequence stratigraphic framework. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Stud. Geol.*, 247 p. <https://doi.org/10.1306/St37575>
- Mann U. and Stein R. 1997. Organic facies variations, source rock potential, and sea level changes in Cretaceous black shales of the Quebrada Ocal, Upper Magdalena Valley, Colombia. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 81(4): 556–576. <https://doi.org/10.1306/522B43CF-1727-11D7-8645000102C1865D>
- Mann U. and Zweigel, J. (2008). Modelling source-rock distribution and quality variations: the organic facies modelling approach. *Analogue and Numerical Modelling of Sedimentary Systems: From Understanding to Prediction*; de Boer, P., Postma, G., van der Zwan, K., Burgess, P., Kukla, P., Eds, 239–274. <https://doi.org/10.1002/9781444303131.ch11>
- Martin J.H. Knauer G.A. Karl D.M. and Broenkow W.W. 1987. VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep-Sea Research*, 34(2): 267–285. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90086-0](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90086-0)