



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

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches

E-ISSN: 2423-8007

Vol. 42, Issue 1, No. 102, 2026, 55-79

Received: 23.12.2024

Accepted: 07.06.2025

### Research Paper

## Palaeobiogeographical study of the Late Ordovician brachiopods of Iran based on quantitative analysis

Akbar Sohrabi\* 

Assistant Professor, Department of Geology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.  
ak.sohrabi@tabrizu.ac.ir

### Abstract

Brachiopods, as one of the most important benthic fauna in the Late Ordovician, show a great abundance and diversity in many continents. In this study, a quantitative approach of multivariate analyses was conducted in order to study the palaeobiogeography of the brachiopods of Iran and their relationship with the brachiopods from other parts of the world, such as Baltica, Avalonia, Laurentia, South China, Kazakhstan, France, and Portugal, during the Late Ordovician (early Katian). Based on the results of the cluster analysis (CA), six main clusters and two sub-clusters were distinguished. The results obtained from the principal component analysis (PCA) method indicate the differentiation of seven main groups and show a high similarity with the main clusters obtained from the CA method. Based on the results of CA, the brachiopods of Bojnourd, Iran, are placed in a separate cluster together with the Avalonian brachiopods such as Shropshire, Powys (Wales), Anglesey (Wales), and Meath (Ireland). Based on the PCA scatter plot, the brachiopods of Bojnourd are placed in the same group with the Avalonian brachiopods. They are distinguished from the brachiopods of the Zagros and Anarak regions in central Iran, which form a separate group with the brachiopods of France, Portugal, and Morocco. The results of the PCA method indicate that the brachiopods from intracratonic Laurentian Basin such as New York, Manitoulin Island, Kentucky, and Indiana form a distinct group and are differentiated from brachiopods from continental margin such as the Appalachian Basin, Tyrone (Northern Ireland), and Girvan (Scotland).

**Keywords:** Brachiopods, Late Ordovician, Palaeobiogeography, Multivariate analyses, Katian

### Introduction

During the Late Ordovician, much of Laurentia was covered by a shallow epicontinental sea that created carbonate platforms in the intracontinental basins and pericratonic shelves (Finnegan et al. 2012). This marine transgression event and the creation of carbonate structures likely indicate a greenhouse warming episode in the Late Ordovician. In addition, some sedimentological and geochemical data support the hypothesis of a cooling episode in the Late Ordovician, leading to the cold and glacial climate of the Hirnantian (Page et al. 2007; Trotter et al. 2008; Buggisch et al. 2010). Interpretations of the climate change during the Late Ordovician are controversial and, like the Boda event in the late Katian, have been interpreted as both a warming and a cooling episode (Fortey & Cocks 2005; Chems & Wheeley 2007).

As one of the most important groups of marine invertebrates of the Paleozoic, brachiopods have a high diversity and abundance in the Ordovician and are therefore of great importance in palaeobiogeographic studies. According to Webby (2000), major fossil groups such as brachiopods show three global diversity maximum during the

“Great Ordovician Diversification Event.”. Each palaeocontinent had different brachiopod diversification trajectories during the Ordovician. Based on Harper & Rong (2001), rhynchonelliform brachiopods diversified during the Dapingian and Darriwilian. The Ordovician brachiopods of Baltica show four diversity maxima in the mid-Darriwilian, late Darriwilian, late Sandbian, and late Katian and are different from the brachiopod diversity curves of Avalonia and Gondwana. The brachiopods of Gondwana had one diversity maxima during the late Sandbian (Hints & Harper 2001; Harper & Mac Nicaill 2002; Harper 2006). In South China, brachiopods had three diversity maxima in the early Floian, late Darriwilian, and late Katian (Zhan & Harper 2006).

During the late Darriwilian, the earliest rhynchonellid brachiopods appeared in shallow marine environments of palaeotropical regions, including Laurentia, Siberia, and Kazakhstan (Jin 1996). During the Sandbian and early Katian, the total number of rhynchonellide genera increased from five to fifteen. By the late Katian, rhynchonellide brachiopods became widespread in the epicontinental seas of

\*Corresponding author

Sohrabi A. (2026). Palaeobiogeographical study of the Late Ordovician brachiopods of Iran based on quantitative analysis. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 42(1): 55-79. <https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143712.1304>



2423-8007 / © 2026 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.2025.145497.1315>

Laurentia and some of the genera such as *Hiscobeccus* was endemic to Laurentia (Sohrabi & Jin 2013a).

The controlling mechanism for the major changes in biogeographic patterns is not well understood. Because of the importance of the Katian brachiopods in palaeogeographic interpretations, a quantitative approach was conducted to investigate the Katian brachiopods of Iran and other regions of the world. Measuring the faunal similarity of the Iranian brachiopods with those from other regions of the world can provide a comprehensive interpretation of the palaeoclimatic and palaeogeographic control on the brachiopods' evolution and their changing biogeographic patterns.

### Material & Methods

In this study, the palaeobiogeography of the Late Ordovician brachiopods was investigated. The brachiopod data were compiled from various regions, including Baltica, Avalonia, Laurentia, Australia, Kazakhstan, France, South China, Portugal, Morocco, and Iran. Most of the brachiopod data in the present study are from the formations of the early Katian.

The Laurentian brachiopods data were obtained from various regions of North America, including the Ottawa Valley, Lake Simcoe, northern Rocky Mountains, western Newfoundland, Manitoulin Island, New York, Kentucky, Indiana, Oklahoma, South Dakota, Nevada, California, Mississippi Valley, Champlain Valley, Hudson Valley, Appalachian Valley, Girvan (Scotland), and Tyrone (Northern Ireland). The brachiopods of Baltica are from the eastern Baltic (Estonia and Lithuania) of Keila and Oandu age (Rõõmusoks 2004; Hints 1998, 2010). The brachiopods of southern Norway are from the Oslo-Asker area, which are related to deep-water facies (Hansen 2008). The Late Ordovician brachiopods of Avalonia are from Waterford and Wexford (southeast Ireland), Meath (east Ireland), and Powys and Anglesey (Wales) (Cocks 2008). In Britain and Ireland, the late Sandbian–early Katian strata include Scotland, Shropshire, Wales, and Ireland. The brachiopods of Scotland are from the Caradoc aged formations in the Girvan area including the Craighead Limestone, Myoch Formation, Whitehouse Bay, and Albany Mudstone Formation. The brachiopods of the Shropshire region include the Caradoc aged formations such as the Acton Scott, Onny Shale, Cheney Longville, Spy Wood Grit, Horderley Sandstone, Whittery Shale, Hagley Shale, Whittery Volcanic, Hoar Edge Grit, Woolston, Smeathen Wood Beds, and Cheney Longville formations. The brachiopods of northwest Wales, Anglesey, include Sandbian–early Katian formations such as the Garn Formation, Llanbabo Formation, and Crewyn Formation. In northern Ireland, the brachiopods are from the Tyrone region including the Bardahessiagh Formation of the Burrellian age. The brachiopods of southern and southeastern Ireland are from Meath, Wexford, and Waterford and include the Burrellian age formations of the Duncannon Group, such as the Annewstown Formation, Lower Tramore Volcanic Formation, Grange Hill Formation, Upper Tuffs and Shales of Grangegeeth Volcanic Series, Collon Formation, and Clashford House Formation.

The early Katian brachiopods of Kazakhstan are related to the Chu–Ili, Ishim–Selety, and Boshchekul terrains and include the Anderken and Dolankara formations (Popov et al. 2002; Nikitin et al. 2006).

In South China, the early Katian brachiopods include the Pagoda Formation (Zhan & Jin 2007; Bergström et al. 2009). The early Katian brachiopods of Portugal are related to the Cabeço do Peão and Ferradosa formations (Henry & Romano 1978; Cooper 1980; Romano 1980, 1982, 1991; Young 1985, 1988). In Morocco, the Late Ordovician brachiopods are from the Khabt-el-Hajar Formation (Fortey & Cocks 2005). Most of the Katian rhynchonelliform brachiopods of Gondwana are from the western Mediterranean regions such as France, Spain, and Portugal (Torsvik & Cocks 2011). In Iran, the Late Ordovician brachiopods include the Bojnourd region (Ghelli Formation), the Anarak region in Central Iran (Chah Gonbad Formation), and the Zagros region (Siahu Formation).

**Multivariate analyses:** The data used in this study include a large number of genera in general, as well as a large number of endemic genera from different regions. In this study, multivariate analyses were conducted based on the early Katian brachiopods dataset to investigate the palaeobiogeography of the brachiopods of Iran and their relationships with the other brachiopods from Baltica, Avalonia, Laurentia, Australia, Kazakhstan, France, South China, Portugal, and Morocco.

The dataset was generated based on binary data that includes 261 brachiopod genera of the early Katian from 30 geographical regions. In this dataset, the geographic regions were selected as locations and the brachiopod genera as variables (presence or absence). The dataset was subjected to multivariate analyses using PAST software (Hammer et al. 2001; Hammer & Harper 2006), which was developed for analyzing paleontological data.

In order to distinguish the distribution patterns of the brachiopods in time and space, cluster analysis (CA) and principal component analysis (PCA) methods were employed. To perform cluster analysis (CA), a dendrogram algorithm was generated based on the paired group method by using the Raup-Crick similarity coefficient. The Raup-Crick similarity coefficient shows fully segregated clusters.

The dataset was also subjected to PCA by using the variance-covariance algorithm in PAST software. The result was plotted in the PCA scatterplot, based on principal components 1 (X-axis) and 2 (Y-axis), which correspond to eigenvalues 1 and 2, respectively.

### Discussion of Results & Conclusions

In this study, the results of multivariate analyses of the Late Ordovician (early Katian) brachiopods from 30 geographical regions including Laurentia, Baltica, Avalonia, South China, Kazakhstan, France, Portugal, Morocco, and Iran indicate several palaeogeographic patterns. Based on the results of CA and PCA, several clusters and groups were recognized.

The results of CA indicate several distinct clusters. Based on the CA dendrogram, five main clusters (A–F) and four subclusters (A1 and A2) were identified.

Cluster A consists of two subgroups, clusters A1 and A2. Cluster A1 contains the brachiopods of Lithuania-North Estonia in the East Baltic, which indicate relatively shallow and warm-water carbonate environments during the early Katian. Cluster A2 comprises the brachiopods from Shropshire, Meath (Ireland), Anglesey and Powys in Wales, and Bojnourd in Iran. The cluster of Bojnourd brachiopods with the brachiopods of Shropshire, Meath (Ireland), and



other Welsh regions indicates the close affinity of the Bojnourd brachiopod fauna with those of Avalonia during the early Katian. Cluster B includes western Newfoundland, New York, Kentucky, Indiana, Manitoulin Island, Lake Simcoe, British Columbia, Appalachian Basin, Great Basin, Tyrone (Northern Ireland), and Girvan (Scotland). Western Newfoundland, New York, Kentucky, Indiana, Manitoulin Island, and Lake Simcoe were located on tropical carbonate platforms at mid- to high-latitudes. The Appalachian Basin (from Pennsylvania and Tennessee to Alabama), British Columbia (Advanced Formation), Girvan (Scotland), and Tyrone (Northern Ireland) represent the continental margin of Laurentia during the Late Ordovician. Cluster C includes brachiopods from southeastern Ireland (Wexford and Waterford), South China, and southern Norway (Oslo-Osker), and corresponds to cluster D in the PCA plot. Cluster D in the CA analysis represents the brachiopods from France and Portugal. Cluster E in this dendrogram includes the brachiopods from the Zagros and Anarak regions of Iran.

Cluster F in the dendrogram includes the brachiopod faunas of Kazakhstan terranes such as Chu-II, Boshchekul, and Ishim-Selety and shows low similarity with the brachiopod faunas from other regions. The brachiopod faunas of Morocco are separated from other brachiopod faunas in this dendrogram, which indicates their low similarities with the brachiopod fauna from other areas.

In the PCA method, the brachiopod data were scattered in the PCA plot based on principal components 1 (X-axis) and 2 (Y-axis). According to the PCA scatterplot, seven groups A1, A2, B, C, D, E, and F were distinguished, which are similar to the clusters identified in the CA dendrogram.

Group A1 consists of the brachiopod faunas from the eastern Baltic, Lithuania, and northern Estonia, and shows consistency with cluster A1 in the CA plot. Group A2 includes the brachiopod faunas from Shropshire, Powys (Wales), Anglesey (Wales), Meath (Ireland), and Bojnourd (Iran). It is interesting to note that the brachiopod faunas of the Bojnourd region are located among the Avalonian brachiopods within cluster A2 in the CA diagram.

Group B includes the brachiopod faunas of epicontinental Laurentian such as Lake Simcoe, Manitoulin Island, New York, Kentucky, and Indiana and are located in proximity to the Avalonian regions. The position of the brachiopod faunas of Bojnourd close to the Avalonian and epicontinental Laurentian brachiopod faunas indicates the similarity of the brachiopods from this region of Kopeh-Dagh in northwestern Iran with those of Laurentia and Avalonia during Katian time.

With the onset of the marine transgression over Laurentia during the early Katian, the brachiopod faunas of North America began to show a distinction between pericratonic and intracratonic settings. Scoto-Appalachian brachiopod fauna on the southeastern margin of Laurentia were more closely related to the brachiopod fauna of Avalonian and deep-water Baltica facies than to the intracratonic Laurentian fauna. In contrast, the intracratonic (epicontinental) Laurentian brachiopod fauna was more similar to the Lithuanian-northern Estonian brachiopod fauna than to the Scoto-Appalachian brachiopod fauna on the cratonic Laurentian margin.

Group C, in the right portion of the PCA plot, shows brachiopods from the Appalachian, Girvan (Scotland), and Tyrone (Northern Ireland) regions. This group, which is

clearly separated from the fauna of other regions especially Laurentia, is consistent with the concept of the Scoto-Appalachian fauna that introduced by Jaanusson (1979) and Whittington and Williams (1955). Group D in the PCA diagram corresponds to brachiopod faunas from the Oslo-Oskar area (Norway), South China, and southeastern Ireland (Wexford-Waterford), which corresponds to cluster C in the CA diagram.

Group E includes brachiopods from the Zagros and Anarak regions of Iran, Morocco, France, and Portugal. In the CA diagram, the brachiopod faunas from the Zagros and Anarak regions are grouped in cluster E, and the brachiopod faunas from France and Portugal are grouped in cluster D, which indicates the high similarity of the brachiopods of these regions.

The group F in the PCA plot corresponds to cluster F in the CA diagram and is related to the brachiopods of the Chu-II, Boshchekul, and Ishim-Selety regions of Kazakhstan. According to the results of the CA and PCA, the brachiopods of the Kazakh regions show low similarity to the brachiopods of Laurentia, Baltica, and Avalonia, which could be due to the presence of endemic species in the Kazakh regions and very limited faunal connection with the brachiopods of the other areas during the Katian.

The brachiopod faunas of epicontinental Laurentia from the Ottawa Valley, Lake Simcoe, Ontario, Manitoulin Island, western Newfoundland, New York, Hudson Valley, Champlain Valley, Kentucky, Indiana, Mississippi Valley, and Oklahoma show a higher similarity to the brachiopod faunas of mainly Avalonian origin than to the Scoto-Appalachian brachiopods of pericratonic regions.

The early Katian Scoto-Appalachian brachiopods show a higher affinity to the brachiopods from the western margin of Laurentia such as the northern Rocky Mountains in British Columbia and Great Basin.

The differentiation of Laurentian pericratonic and intracratonic brachiopod fauna during the early Katian has been interpreted as a palaeobiogeographical pattern (Sohrabi & Jin 2013).

Based on the results of this study, the brachiopods of the Bojnourd region of Iran show more similarity with the Avalonian brachiopods rather than with the brachiopod faunas of the Zagros and Central Iran regions, as shown in cluster A2 in CA and Group 2 in the PCA diagram. The high degree of faunal similarity between the brachiopods of the Bojnourd region and the Avalonian brachiopods could be related to similar environmental conditions of these brachiopods during the early Katian.

The close faunal affinity of the brachiopod faunas of the Bojnourd and Kopeh-Dagh regions with those of Avalonia was more likely attributable to the position of Bojnourd region of Iran at relatively lower latitudes which had different environmental conditions than those of the Zagros and Central Iran regions during the early Katian. Also, the low degree of faunal similarity between the Bojnourd brachiopods and the brachiopods of the same age in the Zagros and Central Iran regions could be interpreted as the beginning of brachiopod endemism in the Bojnourd region during the Late Ordovician (early Katian).

During the early Katian, the Kopeh-Dagh region of Iran was more likely part of the microplates (terranes) adjacent to the supercontinent of Gondwana at similar latitudes to Avalonia and separated from the Zagros and Central Iran

regions. The close similarity of the brachiopod faunas of Zagros and Central Iran with the brachiopods of France and Portugal, which were parts of high-latitude Gondwana, indicates their Gondwana palaeogeographical affinity during the Katian.

By collecting more Late Ordovician brachiopods from different regions of Iran and compiling a comprehensive dataset, a better interpretation of the palaeobiogeographic pattern of the brachiopods can be obtained, which could result in a more accurate palaeogeographic positioning of Iran during the Late Ordovician.



## مقاله پژوهشی

## مطالعه دیرین زیست جغرافیای بازوپایان اردویسین پسین ایران با استفاده از آنالیزهای کمی

اکبر سهرابی<sup>۱</sup>؛ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

ak.sohrabi@tabrizu.ac.ir

## چکیده

بازوپایان، یکی از مهم‌ترین فونای بتتیک در اردویسین پسین‌اند که فراوانی و تنوع زیادی را در بسیاری از قاره‌ها نشان می‌دهند. در این مطالعه، از رویکرد کمی تجزیه و تحلیل چند متغیره برای مطالعه دیرینه‌زیست جغرافیای بازوپایان ایران و ارتباط آنها با بازوپایان دیگر نقاط جهان از قبیل بالتیکا، آوالونیا، لورنیشیا، چین جنوبی، قزاقستان، فرانسه و پرتغال در زمان اردویسین پسین (کاتین پیشین) استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده از تحلیل خوشه‌ای (CA)، شش خوشه اصلی و دو زیر خوشه متمایز شد. نتایج به دست آمده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، نشانگر تمایز هفت گروه اصلی‌اند و شباهت بسیار بالایی را با خوشه‌های اصلی حاصل از روش تحلیل خوشه‌ای نشان می‌دهند. براساس نتایج حاصل از تحلیل خوشه‌ای، بازوپایان بجنورد ایران همراه با بازوپایان آوالونیایی از قبیل Powys, Shropshire (ولز)، Anglesey (ولز) و Meath (ایرلند) در یک خوشه قرار می‌گیرند. براساس نمودار پراکندگی PCA، بازوپایان منطقه بجنورد با بازوپایان آوالونیایی در یک گروه قرار می‌گیرند و از بازوپایان مناطق زاگرس و انارک در ایران مرکزی، که یک گروه مجزا را با بازوپایان مناطق فرانسه، پرتغال و مراکش تشکیل می‌دهند، متمایز می‌شوند. نتایج حاصل از روش PCA، نشان‌دهنده قرارگرفتن بازوپایان حوضه درون‌قاره‌ای لورنیشیا از قبیل نیویورک، جزیره مانیتولین، کنتاکی و ایندیانا در یک گروه مجزاست و نسبت به بازوپایان حاشیه قاره‌ای از قبیل حوضه آپالاشیان، Tyrone (ایرلند شمالی) و Girvan (اسکاتلند) تمایز نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بازوپایان، اردویسین پسین، دیرینه‌زیست جغرافیا، آنالیزهای چند متغیره، کاتین.

\* نویسنده مسئول

سهرابی، اکبر. (۱۴۰۵). مطالعه دیرین زیست جغرافیای بازوپایان اردویسین پسین ایران با استفاده از آنالیزهای کمی. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی،

۵۵-۷۹: (۱)۴۲. <https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143712.1304>



## مقدمه

طول داپینگین<sup>۸</sup> و داریویلین<sup>۹</sup> تنوع یافتند (Harper and Rong 2001). تنوع بازوپایان ارتید<sup>۱۰</sup> نشان‌دهنده سه ماکزیمم در داریویلین پسین<sup>۱۱</sup>، سندبین پسین<sup>۱۲</sup> و کاتین پسین<sup>۱۳</sup> است (Harper 2006). بازوپایان آتریپید<sup>۱۴</sup> برای اولین بار در اواخر داریویلین به وجود آمدند، در سندبین و کاتین پیشین<sup>۱۵</sup> تنوع یافتند و در کاتین پسین به بالاترین تنوع رسیدند (Cocks and Rong 2000).

بازوپایان قاره‌های مختلف در زمان اردویسین، مسیر تنوعی متفاوتی داشتند. بازوپایان بالتیکا<sup>۱۶</sup> در طول اردویسین، چهار ماکزیمم تنوع را در داریویلین میانی، داریویلین پسین، سندبین پسین و کاتین پسین نشان می‌دهند و نسبت به روند تنوع بازوپایان آوالونیا<sup>۱۷</sup> و گندوانا<sup>۱۸</sup> تفاوت زیادی را دارند. بازوپایان گندوانا در طول اردویسین، یک اوج تنوع را در سندبین پسین نشان می‌دهند که مشخص‌کننده تأخیر در تنوع بازوپایان گندوانا نسبت به دیگر قاره‌هاست (Hints and Harper 2001; Harper 2006). مطالعات انجام‌یافته بر بازوپایان اردویسین در چین جنوبی، نشان می‌دهد که شروع تنوع بازوپایان در این منطقه زودتر از دیگر مناطق جهان با سه ماکزیمم، اوایل فلوین پیشین<sup>۱۹</sup>، داریویلین پسین و کاتین پسین همراه بوده است (Zhan and Harper 2006).

بازوپایان آمریکای شمالی در اردویسین میانی تا اردویسین پسین (late Darriwilian-early Katian)، پراکندگی نیمه‌جهانی را نشان می‌دهند و با برخی از جنس‌های بازوپایان مناطق بالتیکا، سیبری و دیگر صفحات تکتونیکی مجاور مشترک‌اند (Jin 1996). فونای بازوپایان در اواخر اردویسین پسین، یک شیفت از حالت نیمه‌جهانی به بومی داشتند. در طول کاتین پیشین و میانی، بازوپایان آمریکای شمالی به شدت پراکندگی

براساس سکانس کراتونی Sloss (1963)، بعد از پس‌روی Sauk در اوایل اردویسین، پیشروی Tippecanoe باعث زیر آب قرار گرفتن تدریجی کراتون لورنشیا<sup>۱</sup> در اردویسین میانی تا پسین شد (Sloss 1963; Levin 1996). هم‌زمان با اردویسین پسین (کاتین میانی<sup>۲</sup>)، قسمت زیادی از لورنشیا از طریق یک دریای اپیکانتینتال<sup>۳</sup> کم‌عمق پوشانده و باعث ایجاد سکوه‌های کربناته در حوضه‌های داخل قاره‌ای<sup>۴</sup> و فلات پریکراتونی<sup>۵</sup> شد (Finnegan et al. 2012). این رخداد پیشروی دریایی و ایجاد ساختارهای کربناته به احتمال زیاد، حاکی از وجود یک اپیزود گرمایش گلخانه‌ای<sup>۶</sup> در اردویسین پسین بوده است. علاوه بر این، وجود برخی از داده‌های رسوب‌شناسی و ژئوشیمیایی، فرضیه حضور یک اپیزود سرمایش را در اردویسین پسین قوت بخشیده و به اقلیم سرد و یخبندان Hirnantian منجر شده است (Page et al. 2007; Trotter et al. 2008; Buggisch et al. 2010). تفاسیر مربوط به تغییرات اقلیمی زمان اردویسین پسین بحث‌برانگیز است و همانند رخداد بودا (Boda event) در اواخر کاتین هم به‌عنوان اپیزود گرمایش و هم اپیزود سرمایش، تفسیر شده است (Fortey and Cocks 2005; Cherns and Wheeley 2007).

بازوپایان یکی از مهم‌ترین گروه‌های بی‌مهرگان دریایی پالئوزوئیک است که تنوع و فراوانی زیادی را در اردویسین دارد و در مطالعات دیرینه‌زیست جغرافیا از اهمیت بالایی برخوردارند. براساس مطالعه Webby (2000)، در طی «رخداد تنوع بزرگ اردویسین»<sup>۷</sup>، گروه‌های فسیلی مختلف از قبیل بازوپایان، سه ماکزیمم تنوع جهانی را نشان می‌دهند. داده‌های مربوط به بازوپایان، نشان می‌دهد که بازوپایان به‌طور جهانی در

<sup>11</sup> late Darriwilian

<sup>12</sup> late Sandbian

<sup>13</sup> late Katian

<sup>14</sup> Atrypide

<sup>15</sup> Early Katian

<sup>16</sup> Baltica

<sup>17</sup> Avalonia

<sup>18</sup> Gondwana

<sup>19</sup> early Floian

<sup>1</sup> Laurentia

<sup>2</sup> mid Katian

<sup>3</sup> Epicontinental Sea

<sup>4</sup> intracratonic basins

<sup>5</sup> pericratonic shelves

<sup>6</sup> greenhouse episode

<sup>7</sup> Global Ordovician Biodiversification Event

<sup>8</sup> Dapingian

<sup>9</sup> Darriwilian

<sup>10</sup> orthids



(Jin 2013a). در اواخر کاتین (Ashgill)، بازوپایان رینکونلید به‌طور گسترده در دریا‌های اپیکانتینتال آمریکای شمالی گسترش یافتند و بعضی از این بازوپایان، از قبیل جنس *Hiscobecca*، تا حد زیادی بومی لورنشیا بودند (Sohrabi and Jin 2013a).

مکانیسم کنترل‌کننده برای این تغییرات عمده در الگوهای زیست جغرافیایی به‌خوبی شناخته نشده است. در این مطالعه با توجه به اهمیت بازوپایان کاتین در تفاسیر دیرینه‌جغرافیایی، بازوپایان ایران و دیگر مناطق جهان با استفاده از آنالیزهای کمی بررسی شد. با بررسی سطح تشابه فونای بازوپایان ایران با دیگر مناطق جهان، تفسیر جامع‌تری از کنترل دیرینه اقلیم و دیرینه‌جغرافیا بر تکامل بازوپایان و الگوهای در حال تغییر زیست جغرافیای این گروه عمده از بتوس‌های صدفی در مقیاس جهانی به دست می‌آوریم.

#### موقعیت زمین‌شناسی

در زمان اردوئیسین، چهار صفحهٔ قاره‌ای بزرگ گندوانا، بالتیکا، لورنشیا، و سبیریا<sup>۶</sup> و چند صفحهٔ قاره‌ای کوچک<sup>۷</sup> از قبیل آوالونیا، پرونیکا<sup>۸</sup>، آرموریکا<sup>۹</sup>، چین جنوبی و چین شمالی، که بخشی از ابرقارهٔ گندوانا بودند (شکل ۱)، وجود داشت (Cocks and Fortey 2009; Candela 2006; Percival et al. 2011). صفحهٔ بالتیکا، که پلتفرم روسیه، شرق بالتیک و بخش زیادی از اسکاندیناویا را شامل می‌شد، در اوایل اردوئیسین در عرض‌های جغرافیایی معتدل نیمکرهٔ جنوبی قرار داشت؛ ولی در زمان اردوئیسین پسین به‌سمت مناطق استوایی انتقال یافت (Cocks and Fortey 1982; Cocks 2001; Cocks and Torsvik 2005). صفحهٔ قاره‌ای آوالونیا در طول دورهٔ کامبرین و اوایل اردوئیسین، بخشی از صفحهٔ گندوانا بود و شبه‌جزیرهٔ آوالون (شامل شرق نیوفاندلند<sup>۱۰</sup>)، نیوبرنزویک<sup>۱۱</sup>، قسمتی از شمال آلمان، انگلستان، ولز، جنوب شرقی ایرلند، هلند و بلژیک را در بر می‌گرفت (Cocks et al. 1997; Cocks and Torsvik 2004).

بومی و محلی را نشان می‌دهند (Sheehan and Coorough 1990; Jin 1996). مکانیسم‌های کنترل‌کننده برای این تغییرات در الگوهای زیست جغرافیایی بازوپایان، به‌خوبی شناخته نشده است.

در بین راستهٔ Strophomenida دو بالا خانواده<sup>۱</sup> شامل Strophomenoidea و Plectambonitoidea، برای اولین بار در چین جنوبی در زمان داپینگین پیشین ظاهر شدند و در زمان سندین، به بالاترین اوج تنوعی رسیدند (Jin 1996; Sohrabi and Jin 2013a). بازوپایان Plectambonitoids برای اولین بار در اوایل ترمادوسین<sup>۲</sup> ظاهر شدند و به‌سرعت در آب‌های کم‌عمق و نزدیک به ساحل گسترش یافتند (Cocks and Rong 2000). بازوپایان Strophomenoids کمی دیرتر تنوع یافتند و اولین اوج تنوعی را در سندین نشان دادند. براساس مطالعهٔ Harper (2006)، بازوپایان حاشیهٔ گندوانا مسیر تنوع متفاوتی نسبت به بازوپایان بالتیکا داشتند و در بین بازوپایان رینکونلی<sup>۳</sup>، ارتیدها گسترده‌گی وسیعی در امتداد حاشیهٔ گندوانا داشتند؛ در حالی که بازوپایان استروفومنید<sup>۴</sup> و پتامرید<sup>۵</sup> در محیط‌های کربناته حاشیهٔ لورنشیا پراکنده بودند.

اولین بازوپایان rhynchonellides در اواخر داریویلین ظاهر شدند و در محیط‌های کم‌عمق دریایی صفحه‌های قاره‌ای لورنشیا، قزاقستان، سبیری و دیگر صفحات مناطق گرمسیری گسترش یافتند (Jin 1996). در لورنشیا، اولین rhynchonellides در اواخر داریویلین (Chazyan) ظاهر شدند؛ در حالی که در بالتیکا و آوالونیا، جنس *Rostricellula* که یکی از اولین جنس‌های rhynchonellides شناخته می‌شود، در اواخر داریویلین (Llanvirn) ظاهر شد (Cocks 2008). در مناطق سبیری و دیگر قاره‌ها، اولین rhynchonellides کمی دیرتر ظاهر شدند (Jin 1996). در طول زمان سندین و کاتین پسین، بازوپایان rhynchonellides یک افزایش ناگهانی را در تعداد جنس‌ها، از پنج به ۱۵ نشان می‌دهند (Jin 1996, Sohrabi and

<sup>7</sup> Terrane

<sup>8</sup> Perunica

<sup>9</sup> Armorica

<sup>10</sup> Newfoundland

<sup>11</sup> New Brunswick

<sup>1</sup> superfamily

<sup>2</sup> early Tremadocian

<sup>3</sup> rhynchonelliform

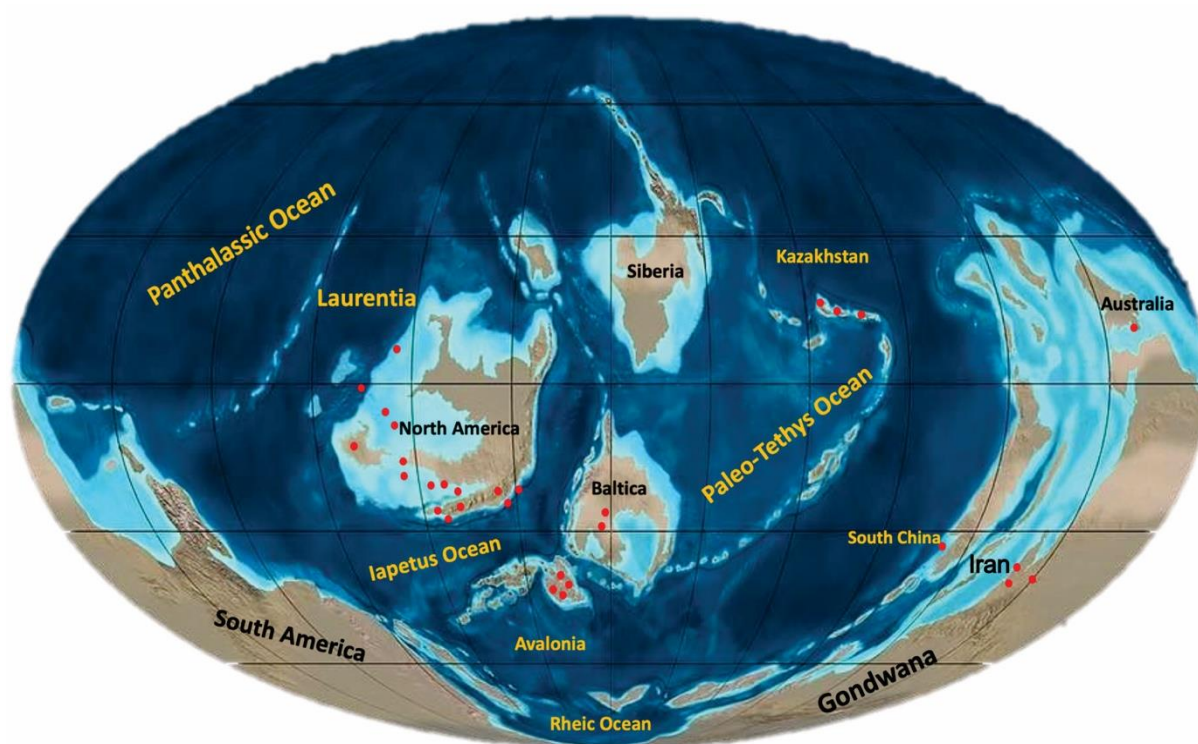
<sup>4</sup> Strophomenides

<sup>5</sup> Pentamerides

<sup>6</sup> Siberia

صفحه‌قاره‌ای کوچک Palaeo-Adria و Armorican terranes به قسمت‌های با عرض جغرافیایی بالاتر گندوانا تعلق داشتند که بعداً از گندوانا جدا شدند (Cocks and Torsvik 2021). اسپانیا، فرانسه، جنوب آلمان، جمهوری چک و جنوب لهستان بخشی از Armorican terranes و ایتالیا بخشی از Palaeo-Adria terrane بودند. در طول دوره اردوئین، صفحه‌قاره‌ای لورنسیا که شامل آمریکا، کانادا، گرینلند، شمال غرب ایرلند، اسپیتسبرگن<sup>۲</sup>، بخشی از نروژ و اسکاتلند بود، در عرض جغرافیایی پایین و منطقه استوایی قرار گرفته بود (Cocks and Fortey 1982; Cocks and Torsvik 2004).

اواسط اردوئین (Darriwilian)، آوالونیا با حرکت به سمت لورنسیا از گندوانا جدا و اقیانوس ریک<sup>۱</sup> بین آنها ایجاد شد (Van Staal et al. 1998; Murphy et al. 2006). در طی اردوئین پسین، گندوانا یک صفحه بسیار بزرگ بود و در نیمکره جنوبی، از نواحی قطبی جنوبی تا خط استوا امتداد داشت. مناطق آفریقا، ماداگاسکار، عربستان و آمریکای جنوبی در بخش غربی این ابرقاره و مناطق قطب جنوب، هند و استرالیا در بخش شرقی این ابرقاره قرار داشتند (Cocks 2001; Fortey and Cocks 2003; Percival et al. 2011). ایران نیز در زمان اردوئین پسین، بخشی از ابرقاره گندوانا را شامل می‌شد. در زمان اردوئین پسین، دو



شکل ۱- نقشه دیرینه‌جغرافیایی اردوئین پسین که مکان‌های تقریبی (نقطه‌های قرمز) بازوپایان کاتین از لورنسیا، بالتیکا، آوالونیا، قزاقستان، چین جنوبی، مراکش، پرتغال، فرانسه و ایران را نشان می‌دهد (Hints and Eriksson 2007; Cocks and Torsvik 2011; Sohrabi and Jin 2013b).

**Fig 1-** The Late Ordovician paleogeographic map showing the approximate locations (red dots) of Katian brachiopods from Laurentia, Baltica, Avalonia, Kazakhstan, South China, Morocco, Portugal, France, and Iran (Hints and Eriksson 2007; Cocks and Torsvik 2011; Sohrabi and Jin 2013b).

<sup>2</sup> Spitsbergen

<sup>1</sup> Rheic Ocean



## مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر به منظور بررسی دیرینه‌زیست جغرافیای بازوپایان اردویسین پسین، داده‌های مربوط به بازوپایان از مناطق مختلف از قبیل بالتیکا، آوالونیا، لورنشیا، استرالیا، قزاقستان، فرانسه، چین جنوبی، پرتغال، مراکش و ایران گردآوری شدند (شکل ۱). داده‌های مربوط به بیشتر بازوپایان در مطالعه حاضر از سازندهای اختصاص داده شده به کاتین پیشین، گردآوری شده‌اند. اطلاعات مربوط به بازوپایان شامل مناطق جغرافیایی، سازند زمین‌شناسی و منابع مربوط به داده‌های فونا در جدول (۱) خلاصه شده است.

در طول اردویسین، صفحه لورنشیا که بعد از گندوانا، دومین صفحه بزرگ شناخته می‌شد، از نظر جغرافیایی در عرض جغرافیای پایین و استوا قرار گرفته بود. با شروع پیشروی دریا در طول اردویسین پسین، بازوپایان کاتین پیشین در آمریکای شمالی گسترش یافتند. بازوپایان مطالعه شده لورنشیا از مناطق مختلف آمریکای شمالی از قبیل دره اتاوا<sup>۱</sup>، دریاچه سیمکو<sup>۲</sup>، کوه‌های راکی شمالی<sup>۳</sup>، غرب نیوفاندلند، جزیره مانیتولین<sup>۴</sup>، نیویورک، کنتاکی، ایندیانا، اوکلاهوما، داکوتای جنوبی، نوادا، کالیفرنیا، دره می‌سی‌سی‌پی<sup>۵</sup>، دره چمپلین<sup>۶</sup>، دره هادسون<sup>۷</sup>، دره آپالچیان<sup>۸</sup>، جیروان<sup>۹</sup> (اسکاتلند) و تایرون<sup>۱۰</sup> (شمال ایرلند) به دست آمدند. صفحه بالتیکا در کاتین پیشین در مجاورت لورنشیا قرار داشت و هر دو صفحه دارای بازوپایان فراوان و متنوع بودند. در این مطالعه، بازوپایان بالتیکا مربوط به مناطق بالتیک شرقی (استونی و لیتوانی) با سن Keila و Oandu هستند (Röömusoks 2004; Hints 1998, 2010). بازوپایان هم سن از جنوب نروژ از ناحیه Oslo-Asker که مربوط به رخساره‌های آب-عمیق بودند، برای این مطالعه در نظر

گرفته شدند (Hansen 2008). بازوپایان اردویسین پسین استفاده شده از آوالونیا مربوط به Waterford و Wexford (جنوب شرق ایرلند)، Meath (شرق ایرلند) و Powys و Anglesey (ولز) هستند (Cocks 2008).

در بریتانیا و ایرلند، لایه‌های سن سندبین پسین - کاتین پیشین (کارادوک پسین<sup>۱۱</sup> - بورلین<sup>۱۲</sup>) مناطق اسکاتلند، Shropshire، Wales، و Ireland را شامل می‌شوند. بازوپایان اسکاتلند از منطقه جیروان اند که در زمان اردویسین بخشی از لورنشیا را شامل می‌شد. بازوپایان منطقه جیروان از سازندهای با سن کارادوک شامل Craighead Limestone، Albany، Myoch Formation، Whitehouse Bay، و Mudstone Formation هستند. بازوپایان منطقه Shropshire، سازندهای سن کارادوک از قبیل Acton Scott Formation، Onny Shale Formation، Cheney، Spy Wood Grit Formation، Longville Formation، Whittery Shale، Horderley Sandstone Formation، Whittery، Hagley Shale Formation، Volcanic Formation، Woolston، Hoar Edge Grit، و Cheney Longville Formation، و Smearthen Wood Beds را شامل می‌شوند.

بازوپایان شمال غرب ولز، Anglesey، شامل سازندهای سندبین - کاتین پیشین از قبیل Llanbabo، Garn Formation، و Crewyn Formation هستند. بازوپایان شمال ایرلند در این مطالعه از منطقه تایرون اند که در زمان اردویسین بخشی از لورنشیا را در بر می‌گرفت و شامل سازند Bardahessiagh با سن بورلین است. بازوپایان مربوط به جنوب و جنوب شرق ایرلند از قبیل Wexford، Meath، و Waterford شامل سازندهای با سن بورلین مربوط به گروه دونکلنون<sup>۱۳</sup> از قبیل Annestown Formation، Lower

<sup>8</sup> Appalachian Valley

<sup>9</sup> Girvan

<sup>10</sup> Tyrone

<sup>11</sup> Late Caradoc

<sup>12</sup> Burrellian

<sup>13</sup> Duncannon Group

<sup>1</sup> Ottawa Valley

<sup>2</sup> Simcoe Lake

<sup>3</sup> Northern Rocky Mountains

<sup>4</sup> Manitoulin Island

<sup>5</sup> Mississippi Valley

<sup>6</sup> Champlain Valley

<sup>7</sup> Hudson Valley



Clashford و Collon Formation, Volcanic Series Grange Hill, Tramore Volcanic Formation  
House Formation هستند. Upper Tuffs and Shales of Grangegeeth Formation

جدول ۱- اطلاعات مربوط به ۳۰ منطقه جغرافیایی بازویپایان استفاده شده در این مطالعه شامل منطقه (region)، ناحیه (area)، واحد چینه‌شناسی (stratigraphic units) و منابع مربوط (references)

**Table 1- The information on 30 geographic localities of the brachiopods used in this study including region, area, stratigraphic units, and references.**

Region	Area	Stratigraphic Units	References
Newfoundland	Port au Port Peninsula	Long Point Formation	Cooper 1956; Weerasinghe 1970; Bergstrom 1971a
New York	western New York	Trenton Group; Napanee, Kings Falls, Denley, Steuben, and Hillier formations	Kay 1937; Titus and Cameron 1976; Titus 1986
Simcoe, Ontario	Lake Simcoe, Carden Quarry	Babcoyanand Verulam	Sinclair et al. 1989; and Sohrabi and Jin 2013b
Manitoulin Island Region, Ontario	Manitoulin Island, Goat Island	Cloche Island and Verulam formations	Liberty 1969; Cooper 1956; Copper and Long 1993
Appalachian Valley	Pennsylvania, Alabama, Georgia, Tennessee, and Virginia	Ben Hur, Cane Creek, Nealmont, Collierstown, Edinburg, Eggleston, Hardy Creek, Mengersburg, Jacksonburg, Martinsburg, Moccasin, Oranda, Selona formations	Cooper 1956
Kentucky and Tennessee	central basin of Tennessee, Hig Bridge, Kentucky	Carters, Kimmswick, Tyrone formations	Cooper 1956
Indiana	disturbed area at Kentland	Division 8 of Trentonian age	Cooper 1956
Great Basin	Nevada and California	Dark Shale with <i>Reuschella</i>	Cooper 1956
British Columbia	Northern Rocky Mountain	Advance Formation	Jin and Norford 1996
Shropshire	Horderley, Woolston, Shelve Inlier, Clunbury	Acton Scott, OnnyShale, Cheney Longville, Spy Wood Grit, HorderleySandstone, WhitteryShale, Hagley Shale, Hour Edge, Cooston, AddressShale, Alternata, HarrageShale, Glenburrell, Smeathen Wood Beds	Cocks 2008
Scotland	Strathclyde, Girvan	Craighead Limestone, Myoch, Albany Mudstone	Cocks 2008
Central Wales	Powys	LlanfawrMudstone, All-yr-Anker, Bryn Siltstone	Cocks 2008
North-west Wales	Anglesey	Garn, Llanbabo, and Crewyn formations	Cocks 2008
South-east Ireland	Wexford, and Waterford	Duncannon Group, Annetstown, TramoreVolcanic, and Grange Hill formations	Cocks 2008
Ireland	Meath	GrangegeethVolcanic Series, Collon, and Clashford House formations	Cocks 2008
Northern Ireland	Tyrone	Bardahessiagh Formation	Cocks 2008
Chu-Ili	Kazakhstan	Anderken Formation	Popov et al. 2000; Popov et al. 2002
Chu-Ili	Kazakhstan	Dulankara Formation	Popov et al. 2000
Boshchekul Terrane	Kazakhstan	Angrensoy Formation	Nikitin et al. 2006
Ishim-Seley Terrane	Kazakhstan	Tauken Formation	Nikitin et al. 2006
Keila Stage	northern Estonia	Kahulaand Vasalemmatormations	Hints and Meidla 1997
Oandu Stage	northern Estonia	Vasalemmaand Hirnuseformations	Männiland Rõõmusoka 1984; Hints 1998
South China	Yangtze Platform	Pagoda Formation	Zhan and Jin 2007; Bergström et al. 2009
Southern Norway	Oslo-Asker district	upper ArnestadFormation	Harper et al. 1984; Hansen 2008
Iran	Zagros Mountains	Soyahouy Formation	Ghavidel et al. 2014
Iran	south of Bojnourd	Ghelli Formation	Yazarloo 1996; Yazarloo et al. 2010; Ghavidel and Hosseini 1995
Iran	south east Anarak-Isfahan	Chah Gonbad Formation	Popov et al. 2015
Morocco	eastern Anti-Atlas, Morocco	Khabt-el-Hajar Formation, Tiourine Formation, Klacoua Formation	Colmenar et al. 2013
France	Montagne Noire, southern France	Glauzy Formation	Colmenar et al. 2014, 2017
Portugal	Penacova-Vila Nova de Poiaresand Domesregião, Central Portugal	Cabepodo Peãoand Ferradosaformations	Colmenar and Alvaro 2014; Colmenar and Alvaro 2015; Villas and Colmenar 2022

کاتین، در این مطالعه از آنها استفاده شده است (برای مثال Candela 2006). بازویپایان کاتین پیشین استفاده شده از چین جنوبی، سازند پاگودا<sup>۳</sup> را شامل می‌شوند که عمدتاً از سنگ‌های آهکی تشکیل شده‌اند (Zhan and Jin 2007; Bergström et al. 2009).

بازویپایان منطقه پرتغال مربوط به سازندهای کابیسو دو

سازندهای کاتین پیشین، حاوی بازویپایان در منطقه قزاقستان مربوط به صفحات Chu-Ili, Ishim-Seley و Boshchekul هستند (Popov et al. 2002; Nikitin et al. 2006). برای صفحه Chu-Ili، بازویپایان از سازند اندرکن<sup>۱</sup> با سن سندین پسین‌اند که اندکی مسن‌تر از لایه‌های دولانکارا<sup>۲</sup> هستند؛ ولی به دلیل شباهت آنها با دیگر بازویپایان قزاقستان و استفاده در مطالعات قبلی دیرینه‌زیست جغرافیای بازویپایان

<sup>3</sup> Pagoda Formation

<sup>1</sup> Anderken Formation

<sup>2</sup> Dulankara



بیشتر داده‌های به دست آمده از بازوپایان rhynchonelliform اردویسین پسین (کاتین) گندوانا، که در عرض جغرافیایی معتدله و بالا قرار داشت، مربوط به مناطق غربی مدیترانه از قبیل فرانسه، اسپانیا و پرتغال است (Torsvik and Cocks 2011). حضور پیوسته فونای اردویسین پسین در آنتی اطلس، مراکش، با حضورنداشتن بازوپایان هم‌سن در دیگر مناطق شمالی آفریقا و شبه‌جزیره عربستان در تضاد است (Havlíček 1971).

داده‌های مربوط به بازوپایان ایران در این مطالعه، شامل بازوپایان اردویسین پسین منطقه بجنورد (سازند قلی)، منطقه انارک در ایران مرکزی (سازند چاه گنبد) و منطقه زاگرس (سازند سیاهو) هستند. بازوپایان منطقه بجنورد ایران مربوط به لایه‌های شیلی و آهکی منطقه جنوب بجنورد هستند که (Yazarlu et al. 2012) آنها را معرفی کرده است و سن اردویسین پسین را نشان می‌دهند. مطالعات انجام گرفته بر پالینومرف‌های اردویسین در جنوب غرب شاهرود نشان می‌دهد که نمونه‌های آکریتارش رسوبات اردویسین این منطقه شباهت بالایی را با گونه‌های رسوبات اردویسین دیگر نقاط ایران (زاگرس، کپه‌داغ، البرز، و ایران مرکزی) و مناطق لیبی، الجزایر، مراکش، چین، فرانسه و شبه‌جزیره عربستان نشان می‌دهند (Ghavidel-Syooki 2006). در مطالعه انجام یافته به وسیله Ghavidel-Syooki and Khandabi (2013) پالینومرف‌های رسوبات اردویسین در شمال غرب شاهرود، ۱۱ بیوزون تجمعی براساس گونه‌های پالینومورف در سازندهای لشکرک و قلی معرفی شدند. بر این اساس، سن اردویسین پیشین (ترمادوسین-فلوین) را برای سازند لشکرک و سن اردویسین میانی و پسین (داریولین-کاتین) را برای سازند قلی پیشنهاد کردند که در محیط دریایی کم‌عمق انباشته شده‌اند. براساس نتایج به دست آمده از مطالعات بازوپایان به وسیله Zadeh (2015) و Kebria-ee و Zadeh et al. (2015)، که بر توالی‌های رسوبی اردویسین

پیو<sup>۱</sup> و فرادوسا<sup>۲</sup> هستند. سازند کاییسو دو پیو در مرکز پرتغال حاوی بازوپایان با سن اردویسین پسین (کاتین پیشین K1) هستند (Henry and Romano 1978; Cooper 1980; Romano 1980, 1982, 1991; Young 1985, 1988). بازوپایان این سازند شامل *Drabovinia*، *Drabovinella* و *Hirnantia* هستند که (Colmenar et al. 2013) آنها را معرفی کرد. سازند فرادوسا در منطقه پناکوا (مرکز پرتغال) مربوط به زون ایبری مرکزی<sup>۳</sup> است و سن upper Berounian-Kralodvorian را نشان می‌دهد که معادل کاتین میانی تا بالایی (K2-K4) است (Young 1985, 1988).

در این مطالعه، بازوپایان اردویسین پسین مراکش برای بررسی دیرینه‌زیست جغرافیا، مقایسه و تجزیه و تحلیل شدند. در زمان اردویسین پسین، مراکش بخشی از مناطق با عرض جغرافیایی بالاتر گندوانا را شامل می‌شد (Fortey and Cocks 2005). در منطقه مراکش، بازوپایان اردویسین پسین سازند خبط الحجار<sup>۴</sup> امکان انطباق چینه‌شناسی این واحد آنتی اطلس<sup>۵</sup> شرقی مراکش را با دیگر سازندهای اردویسین پسین جنوب غرب اروپا و بقیه مناطق آنتی اطلس فراهم می‌کند (Villas and Colmenar 2018). این سازند شامل مجموعه گونه‌های *Streptis?* sp.، *Paucicrura catalanica* و *Drabovia* sp. است. در این بین، گونه *P. catalanica* فراوان‌ترین در بین مجموعه گونه‌هاست و تاکنون از رشته‌کوه‌های ساحلی کاتالانیکا<sup>۶</sup> در شمال شرق اسپانیا شناخته شده است. این جنس به اواسط تا اواخر کاتین (Ka2-Ka4) تعیین سن و در لایه‌های سازند لامورا اسلیت<sup>۷</sup> یافت شده است که با لایه‌های هم‌سن از مناطق Iberia، Sardinia و Montagne Noire فرانسه منطبق است (Villas and Colmenar 2018). سازند تیوریرین<sup>۸</sup> که بر سازند خبط الحجار قرار می‌گیرند، دارای مجموعه بازوپایان *Kiaeromena*، *Chouberti* و *Rostricellula termieri* با سن کاتین میانی (Ka2) است (Villas and Colmenar 2018).

<sup>5</sup> Anti-Atlas

<sup>6</sup> Catalanian Coastal Ranges

<sup>7</sup> La Mora Slates Formation

<sup>8</sup> Tiourine Formation

<sup>1</sup> Cabeço do Peão

<sup>2</sup> Ferradosa

<sup>3</sup> Central Iberian Zone

<sup>4</sup> Khabt-el-Hajar Formation



چاه‌گنبد، سن کاتین پیشین برای این سازند پیشنهاد شده است (Popov et al. 2015). این گونه که در رسوبات کاتین زیرین مناطق مدیترانه‌ای گندوانا نسبتاً رایج است، دارای محدوده چینه‌شناسی نسبتاً طولانی است و در بین سازندهای Vince تا Bohdalec در حوضه پراگ (Prague Basin) در بوهمیا، گسترده‌گی نشان می‌دهد (Havliček and Vanek 1966). گونه *Rostricellula ambigena* را (Villas 1985) از اسپانیا نیز گزارش کرده است؛ در حالی که در آنتی اطلس مراکش، این گونه در بالاترین سازندهای کتاوا پایینی<sup>۱</sup> و تیوریرین بالایی<sup>۲</sup> گزارش شده است (Colmenar and Álvaro 2014). حضور گونه *Hindella prima* در سازند چاه‌گنبد همراه با *Rostricellula cf. ambigena* و گونه تریلوبیت *Vietnamia cf. teichmulleri* که از بخش‌های مدیترانه، شمال آفریقا و بخش‌های عربی گندوانا یافت شده‌اند، نمایانگر فونای آب سرد (cold water fauna) در زمان کاتین‌اند (Hamman and Leone 1997; Popov et al. 2015). براساس مطالعه (Torsvik and Cocks 2011)، رشته‌کوه زاگرس برای مدت‌زمان زیادی از فانروزویک، بخش جدایی‌ناپذیری از هسته کراتون گندوانا بوده است. براساس مطالعات (Ghavidel-Syooki et al. 2014)، بازوپایان اردویسین پسین کوه‌های فراقان در منطقه زاگرس، از طریق زیست چینه‌نگاری کیتینوزوا بین رنج *Acanthochitina barbata* و *Armoricochitina nigerica* قرار دارد و شباهت بالایی را با بازوپایان هم سن از اسپانیا، فرانسه، ساردینیا، کوه‌های آلپ کارنیک و مراکش نشان می‌دهند. سازند سیاهو که دارای سن اردویسین زیرین-پسین است، دارای بازوپایان کاتین است. پایین‌ترین بستر رسی بخش فراقان دارای بازوپایان رینکونلی اردویسین پسین است که شامل مجموعه بازوپایان با تنوع کم است و *Tafilaltia dargazensis* sp. گونه غالب این مجموعه است. براساس مطالعه (Ghavidel-Syooki et al. 2014)، سن کاتین پیشین برای بازوپایان بومی این منطقه از طریق حضور کیتونوزوا *Acanthochitina*

سازند لشکرک در البرز انجام شد، سن اردویسین پیشین تا میانی برای این سازند پیشنهاد شد. همچنین براساس این مطالعات، بازوپایان سازند لشکرک تشابه بالایی با بازوپایان چین جنوبی داشتند؛ در حالی که آنها با بازوپایان بالتیک تشابه کمتری را نشان می‌دادند. براساس مطالعات Kebria- (Zadeh 2015)، منطقه البرز بخشی از کوچک قاره (terrane) البرز در زمان اردویسین بوده و در عرض‌های جغرافیایی معتدل، بین چین جنوبی و حاشیه غربی گندوانا قرار داشته است.

در این مطالعه، بازوپایان استفاده‌شده از منطقه انارک ایران مربوط به لایه‌های اردویسین در قسمت جنوب شرق شهر انارک از استان اصفهان‌اند و از بخش فوقانی سازند چاه‌گنبد با سن اردویسین پسین (کاتین) گزارش شده‌اند (جدول ۱). سازند چاه‌گنبد با یک ناپیوستگی از سازند پل خاوند مجزا می‌شود و تماس پیوسته را با لایه‌های سیلورین در بالا، نشان می‌دهد (Hairapertian et al. 2015; Popov et al. 2015). براساس مطالعات انجام‌یافته قبلی، واحدهای بالایی سازند چاه‌گنبد دارای بازوپایان سن کاتین است و با بازوپایان مناطق بوهمیا و مراکش شباهت نشان می‌دهد. در مطالعه انجام‌یافته به‌وسیله (Popov et al. 2015)، براساس حضور جنس *Yangtzeella*، سن داریولین برای سازند چاه‌گنبد پیشنهاد شده است و نشانگر ارتباط ایران مرکزی با شرق گندواناست. این جنس از چین جنوبی (Rong et al. 2005)، ریزصفحه البرز (Ghobadi Pour et al. 2011)، Taurides ترکیه (Cocks and Fortey 1988) و Chu-Ili و Terrane قزاقستان (Nikitina et al. 2006) نیز شناخته شده است. حضور جنس‌های *Camerella* و *Phragmorthis* که از بازوپایان عرض‌هایی جغرافیایی پایین‌اند، در سازند چاه‌گنبد به‌عنوان حضور فونای بازوپایان در ایران مرکزی، در طی اپیزود گرمایش زمین در اواخر داریولین تفسیر شده است (Popov et al. 2015). براساس حضور گونه *Rostricellula cf. ambigena* Havliček 1961 در سازند

<sup>2</sup> upper Tiouririne<sup>1</sup> Lower Ktaoua

میانی و سازند تیوریرین از آنتی اطلس مراکش گزارش شده است (Havlíček 1967). این گونه همچنین از سازند Bancos Mixtos، از مرکز اسپانیا شناخته شده است و با سازند Bohdalec بوهمایا انطباق نشان می‌دهد (Villas 1995). گونهٔ *Svobodaina havliceki* از سازند Fombuena از رشته کوه‌های آیرین<sup>۱</sup> و لایه‌های بالایی سازند Bancos Mixtos از زون ایبریان مرکزی اسپانیا، سازند Bedian Shale از Taurides ترکیه، سازند Portixeddu از ساردینیا، سازند Porto de Santa Ana از پرتغال و سازند Glauzy از Montagne Noire جنوب فرانسه گزارش شده است (Villas 1985; Villas 1995; Leone et al. 1991; Colmenar et al. 2013, 2014). گونه‌های *Onnizetina aff. carinata* و *Kozlowskites cf. ichnusae*، شباهت بالایی با گونه‌های گزارش‌شده از کاتیان میانی ساردینیا را دارند و *Kozlowskites cf. ichnusae* به‌وسیلهٔ Villas (1985) از قسمت بالایی سازند Bancos Mixtos گزارش شده است (Havlíček et al. 1987). گونه‌های *Iberomena sardoa* و *Triplesia cymbula* در فرانسه (Armorican Massif)، اسپانیا و ساردینیا در قسمت پایینی زون *Iberomena sardoa* گسترده‌گی دارند (Villas 1985). *Svobodaina havliceki* در ارتفاع ۱۹۵ متری تا ۲۵۰ متری سازند سیاهو در بخش فراقان نشان‌دهندهٔ انطباق خوب این گونه با سازند Bancos Mixtos در اسپانیا و با بخش پایینی سازند Bohdalec از بوهمایاست. مجموعهٔ *Aegiromena-Hedstroemina* در سازند سیاهو که در پایین‌ترین قسمت زون *Armorochitina nigerica* ظاهر می‌شود، با قسمت بالایی سازند Bohdalec از بوهمایا و بالاترین قسمت سازند Bancos Mixtos از اسپانیا انطباق دارد. جنس *Protomendacella* که قبلاً در خارج از مراکش و فرانسه ناشناخته بود، در قسمت بالایی سازند کتائو در آنتی اطلس مراکش و سازند گابین<sup>۲</sup> در Montagne Noire فرانسه حضور دارد (Havlíček 1971, 1981). با توجه به داده‌های به دست آمده توسط Ghavidel-Syooki et al. (2014)، فونای

*barbata* تعیین شده است. گونهٔ دیگر در این سازند 1971 *Drabovia cf. tenuiseptata* Havlíček است که شباهت بالایی را با *D. tenuiseptata* از سازند کتائو از آنتی اطلس مراکش نشان می‌دهد (Havlíček 1971). لایهٔ دیگر در این سازند دارای گونه‌های *Eostropheodonta? sp.* و *Heterorthis sp. Tafilaltia seyahouensis sp. nov.* است. گونهٔ *Heterorthis sp.* شباهت بالایی با 1975 *Heterorthis morgatensis* Melou نشان می‌دهد که از عضو Alpatir سازند Castillejo با سن سندبین در اسپانیا و سازند Postolonnec Shale در فرانسه یافت شده است (Melou 1975). براساس مطالعهٔ Ghavidel-Syooki et al. (2014)، جنس *Heterorthis sp.* در سنگ‌های کاتین میانی رخ می‌دهد؛ زیرا در بالای قاعدهٔ زون *Acanthochitina barbata* حضور دارد. در لایهٔ بالاتر، گونه‌های دیگر شامل اند. لایهٔ پرفسیلی بعدی شامل گونه‌های *Drabovia Svobodaina havliceki T. seyahouensis elegans sp. Hibernodonta bonehensis sp.* و Villas 1985 *Aegiromena descendens Hibernodonta bonehensis Iberomena sardoa* (Vinassa 1927) (Havlíček 1952) *Svobodaina havliceki Protomendacella multicostata Paracraniops sp. Hedstroemina zakeenensis Kozlowskites cf. Iberomena sardoa* (Vinassa 1927) *ichnusae* (Vinassa 1927) *Triplesia cymbula* (Havlíček 1981) *Jezercia faraghani Dalmanella sp. Onnizetina aff. carinata Protomendacella multicostata* هستند. سازند سیاهو در ضخامت حدود ۲۰۰ متر، سه مجموعهٔ بازوپایان شامل مجموعهٔ *Svobodaina havliceki*، مجموعهٔ *Hibernodonta bonehensis* و مجموعهٔ *Aegiromena-Hedstroemina* را شامل می‌شود و نشان‌دهندهٔ لایه‌های ته‌نشین‌شدهٔ دور از ساحل اند که با حضور زون کیتینوزوا *Armorochitina nigerica* و بالآمدن پیشروی سطح آب دریا هم‌زمان‌اند. گونهٔ *Aegiromena descendens* از سازند بوهدالک (Bohdalec Formation) بوهمایا با سن کاتین

<sup>2</sup> Gabian Formation<sup>1</sup> Iberian Chains

### آنالیزهای چند متغیره

داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه، شامل تعداد زیادی جنس به‌طور کلی و همچنین تعداد زیادی جنس بومی از مناطق مختلف‌اند. در این مطالعه برای بررسی دیرینه‌زیست جغرافیای بازوپایان ایران و ارتباط آنها با دیگر بازوپایان مناطق بالیتیکا، آوالونیا، لورنسیا، استرالیا، قزاقستان، فرانسه، چین جنوبی، پرتغال و مراکش، یک مجموعه داده<sup>۱</sup> (به جدول ۱ در پیوست رجوع شود) مربوط به بازوپایان، از طریق آنالیزهای چند متغیره<sup>۲</sup> مطالعه شد. مجموعه داده<sup>۳</sup> استفاده‌شده براساس یک داده<sup>۳</sup> دوتایی ایجاد شد که شامل ۲۶۱ جنس از فونای بازوپایان کاتین پیشین مربوط به ۳۰ منطقه جغرافیایی (رجوع شود به جدول ۱) است. برای مشخص کردن الگوهای توزیع بازوپایان در زمان و مکان، مجموعه داده<sup>۴</sup> ایجاد شده با روش‌های تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) و مؤلفه‌های اصلی (PCA) بررسی شد.

در این مجموعه داده، مناطق جغرافیایی به‌عنوان محل و جنس بازوپایان به‌عنوان متغیر انتخاب شد. متغیرها براساس حضور و حضورنداشتن جنس بازوپایان در نظر گرفته شدند. برای انجام تجزیه و تحلیل‌های چند متغیره، از نرم‌افزار PAST (Hammer et al. 2001; Hammer and Harper 2006) استفاده شد که برای تجزیه و تحلیل داده‌های دیرینه‌شناسی توسعه یافته است. برای انجام تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA)، الگوریتم دندروگرام خوشه‌ای براساس روش گروه دوتایی<sup>۴</sup> و با استفاده از ضریب تشابه Raup-Crick ایجاد شد. ضریب تشابه Raup-Crick خوشه‌های کاملاً تفکیک‌شده را نشان می‌دهد.

برای تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی PCA، از الگوریتم واریانس-کوواریانس برای مجموعه داده<sup>۵</sup> دوتایی در نرم‌افزار PAST استفاده شد. در روش PCA، با یافتن بردارهای ویژه<sup>۶</sup> و مقادیر ویژه<sup>۶</sup>، ماتریس کوواریانس جهت‌های حداکثر واریانس را جست‌وجو می‌کند. بردارهای ویژه، جهت‌ها

بازوپایان اردویسین پسین یافت‌شده در سازند سیاهو با فونای بازوپایان مناطق معتدله و عرض جغرافیایی بالا، که مشخصه مناطق غربی مدیترانه از گندوانا هستند، قرابت نشان می‌دهند. جنس‌های بازوپایان کاتین از قبیل *Jezeracia*، *Iberomena*، *Onnizetina*، *Protomendacella*، *Svobodaina* و *Tafilaltia* مشخصه مناطق عرض جغرافیایی بالا و معتدل گندوانا مانند اسپانیا، ساردینیا، شمال آفریقا، Armorican Massif، و Taurides ترکیه‌اند. اگرچه جنس‌های *Drabovia* و *Hedstroemina* در آوالونیا و بالیتیکا حضور دارند، هر دو مشخصه مناطق غربی مدیترانه گندوانا شناخته می‌شوند.

ازدیاد جنس *Hibernodonta*، که از لایه‌های کاتین ایرلند شناخته شده است، با ازدیاد جنس *Svobodaina* هم‌زمان است (Harper et al. 1985). با توجه به مطالعه Ghavidel-Syooki et al. (2014)، فراوانی گونه‌های *Hibernodonta* *bonehensis* و *Svobodaina havliceki* احتمالاً نشانگر یک دوره آب و هوای خنک بوده است. ازدیاد مجموعه<sup>۷</sup> *Svobodaina havliceki* در زاگرس در زمان پایین‌بودن سطح دریا با بالاترین زون *Acanthochitina barbata* منطبق و احتمالاً با یک فاز پس‌روی از توالی اردویسین پسین در آنتی اطلس از مراکش هم‌زمان است که در سازند تیوریرین ثبت شده است (Loi et al. 2010; Ghavidel-Syooki et al. 2014). توسعه<sup>۸</sup> مجموعه<sup>۸</sup> *Aegiromena-Hedstroemina* هم‌زمان با رخداد پیش‌رونده‌ای است که قاعده<sup>۹</sup> زون *Armorochitina nigerica* را مشخص می‌کند و احتمالاً با ازدیاد مجموعه<sup>۹</sup> *Nicolella* در منطقه<sup>۹</sup> مدیترانه‌ای گندوانا در اواخر کاتین هم‌زمان بوده است (Colmenar et al. 2013, 2014). با وجود گونه‌های رایج *Iberomena sardoa* cf. *Kozlowskites* و *Triplexia cymbula* در منطقه<sup>۱۰</sup> زاگرس، جنس *Nicolella* در فونای کاتین بازوپایان زاگرس وجود ندارد.

<sup>4</sup> Paired group

<sup>5</sup> Eigenvectors

<sup>6</sup> Eigenvalues

<sup>1</sup> Dataset

<sup>2</sup> Multivariate Analysis

<sup>3</sup> Binary



ایندیانا، جزیره مانتولین، دریاچ سیمکو، بریتیش کلمبیا، حوض آپالاجیان، Great Basin، Tyrone (ایرلند شمالی) و Girvan (اسکاتلند) است (شکل ۲). مناطق غرب نیوفاندلند، نیویورک، کتساک، ایندیانا، جزیره مانتولین، و دریاچه سیمکو، که در اردویسین پسین بخشی از لورنیشیا را شامل می‌شوند، در فلات یا سکوه‌های کربلته گرمسیری در عرض‌های جغرافیایی حدواسط تا بالا قرار داشتند. در این خوشه، حوضه آپالاجیا (از پنسیلوانیا، تنسی، تا آلاباما)، بریتیش کلمبیا (Advanced Formation)، Girvan (اسکاتلند)، و Tyrone (ایرلند شمالی) نشان‌دهنده مناطق حاشیه قاره‌ای و جزیره‌ای دور از سواحل لورنیشیا در زمان اردویسین پسین‌اند.

خوشه C در این دندروگرام، بازوپایان مناطق جنوب شرقی ایرلند (Wexford و Waterford)، چین جنوبی و جنوب نروژ (اسلو-آسکر) را شامل می‌شود و با گروه D در نمودار PCA همخوانی دارد (شکل ۲). خوشه D در آنالیز CA، بازوپایان مربوط به مناطق فرانسه و پرتغال را نشان می‌دهد. خوشه E در این دندروگرام که در کنار خوشه D قرار گرفته است که مربوط به بازوپایان مناطق زاگرس و انارک در ایران‌اند (شکل ۲). خوشه F در دندروگرام شامل بازوپایان منطقه قزاقستان از قبیل Chu-II، Boshchekul، و Ishim-Selety است و یک ناحیه فونای بازوپایان مجزا را تشکیل می‌دهند که نشانگر تشابه کم بازوپایان این منطقه با بازوپایان دیگر مناطق است. تقسیم‌شدن فونای قزاقستان به دو زیرشاخه در نمودار CA (خوشه F)، به علت تفاوت سنی بین لایه‌های دولانکارا و اندرکن است؛ زیرا فونای اندرکن مسن‌ترند. بازوپایان منطقه مراکش در این دندروگرام در کنار بازوپایان منطقه قزاقستان و به صورت مجزا قرار گرفته‌اند و ارتباط کمتری با بازوپایان دیگر نشان می‌دهند.

### نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

در این مطالعه، مجموعه داده مربوط به فونای بازوپایان از

مؤلفه‌های اصلی) را نشان می‌دهند و مقادیر ویژه، نشان‌دهنده بزرگی واریانس در امتداد این جهت‌ها هستند. در نمودار پراکندگی PCA، نتیجه به صورت مؤلفه‌های اصلی ۱ (محور X) و ۲ (محور Y) رسم شد که به ترتیب مربوط به مقادیر ویژه ۱ و ۲ هستند.

### نتایج تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA)

نتایج تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) نشان‌دهنده چندین خوشه<sup>۱</sup> مجزاست. براساس نتایج دندروگرام<sup>۲</sup>، پنج خوشه اصلی (A, B, C, D, E, F) و چهار زیرخوشه (A1 و A2) مجزا شدند (شکل ۲).

خوشه A شامل دو زیر گروه، خوشه‌های A1 و A2 است. خوشه A1 شامل بازوپایان لیتوانیا-شمال استونی، شرق بالتیک در زمان Keila و Oandu است که نشانگر محیط‌های رسوبی کربناته آب گرم نسبتاً کم عمق اوایل کاتین است.

خوشه A2 شامل بازوپایان از Meath، Shropshire (ایرلند)، محلات ولزی Anglesey و Powys و همچنین بجنورد ایران است (شکل ۲). قرارگرفتن این مناطق در یک خوشه به دلیل شباهت بازوپایان آوالونیایی است. قرارگرفتن منطقه بجنورد از ایران در این خوشه و در میان مناطق Meath، Shropshire (ایرلند) و دیگر مناطق ولزی حائز اهمیت است و قرابت فونای بازوپایان ایران با بازوپایان آوالونیا در زمان کاتین پیشین را نشان می‌دهد (شکل ۲). بازوپایان کاتین پیشین در منطقه بجنورد شامل جنس‌های *Leptaena*، *Hindella*، *Diceromyonia*، *Dalmanella*، *Triplesia*، *Thaerodonta*، *Quondongia*، *Platystrophia*، *Zygospira* است و در این میان جنس‌های *Dalmanella*، *Triplesia*، *Platystrophia*، *Leptaena* و *Zygospira* در منطقه بجنورد با مناطق Meath، Shropshire (ایرلند)، Anglesey و Powys مشترک است. خوشه B در این دندروگرام، شامل غرب نیوفاندلند، نیویورک، کتساک،

<sup>2</sup> Dendrogram

<sup>1</sup> Cluster

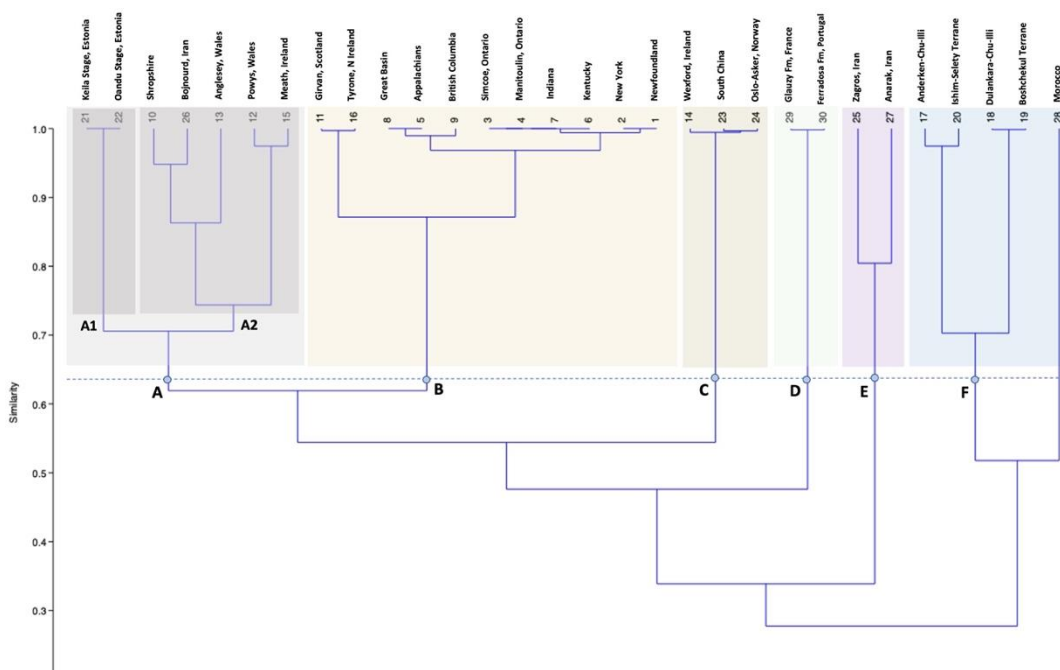


در میان بازوپایان آوالونیایی است که در نمودار CA نیز در داخل خوشه A2 قرار می‌گیرد.

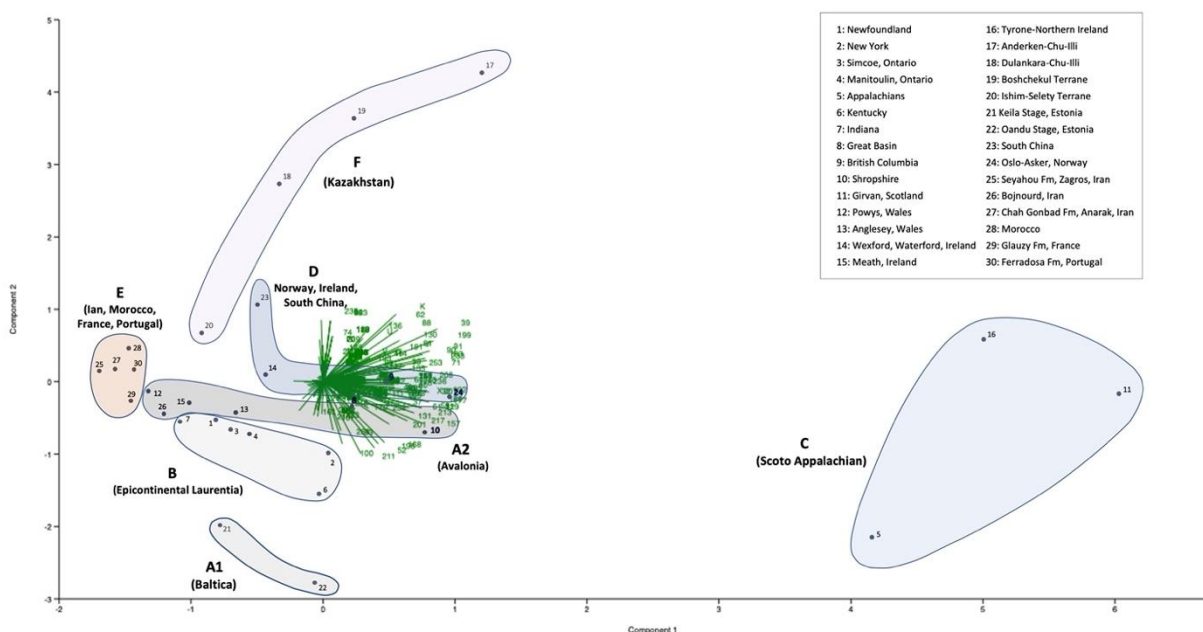
گروه B بازوپایان اپیکانتینتال لورنشیا از قبیل مناطق نیویورک، دریاچه سیمکو و جزیره مانیتولین انتاریو، کنتاکی و ایندیانا را شامل می‌شود. این مناطق که مربوط به سکوهایی کربناته گرمسیری در عرض‌های جغرافیایی حدواسط تا بالای لورنشیا هستند، با مناطق آوالونیا نزدیکی نشان می‌دهند. قرار گرفتن منطقه بجنورد ایران در کنار مناطق آوالونیا و اپیکانتینتال لورنشیا، نشانگر شباهت بازوپایان این منطقه از کپه‌داغ در شمال‌غرب ایران با بازوپایان لورنشیا و آوالونیا در زمان کاتین است.

۳۰ منطقه جغرافیایی، با تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) بررسی شد. در این روش، داده‌های مربوط به بازوپایان در نمودار PCA براساس مؤلفه‌های اصلی ۱ (محور X) و ۲ (محور Y) پراکنده شدند (شکل ۳). در نمودار پراکنده‌گی ۲ و ۳.

گروه A1 متشکل از بازوپایان مناطق شرق بالتیک، لیتوانیا-شمال استونی مربوط به لایه‌های رسوبی سن Keila و Oandu است و با خوشه A1 در نمودار CA همخوانی دارد. گروه A2 مربوط به بازوپایان Shropshire، Powys، Anglesey (ولز)، Meath (ایرلند) و بجنورد ایران است. نقطه درخور توجه، قرار گرفتن بازوپایان منطقه بجنورد



شکل ۲- نمودار CA مربوط به بازوپایان کاتین از ۳۰ منطقه مطالعه‌شده  
Fig 2- CA diagram of the Katian brachiopods from 30 study areas



شکل ۳- نمودار PCA مربوط به بازوپایان کاتین از ۳۰ منطقه مطالعه شده

Fig 3- PCA diagram of the Katian brachionods from 30 study areas

شرقی ایرلند (Waxford-Waterford) است که با خوشهٔ C در نمودار CA همخوانی دارد (اشکال ۲ و ۳).

گروه E بازوپایان مناطق زاگرس و انارک ایران، مراکش، فرانسه و پرتغال را شامل می‌شود. در نمودار CA، بازوپایان مناطق زاگرس و انارک در خوشهٔ E و بازوپایان فرانسه و پرتغال در خوشهٔ D در کنار هم قرار گرفته‌اند که با وجود قرارگرفتن در خوشه‌های مجزا، شباهت بالای بازوپایان این مناطق را نشان می‌دهد.

گروه F در نمودار PCA با خوشهٔ F در نمودار CA همخوانی دارد و مربوط به بازوپایان مناطق Chu-II، Boshchekul، و Ishim-Selety قزاقستان است. با توجه به نتایج نمودار CA و PCA، بازوپایان مناطق قزاقستان شباهت کمتری با بازوپایان لورنشیا، بالتیکا و آوالونیا نشان می‌دهند که این به علت وجود گونه‌های بومی در مناطق قزاقستان و اشتراک کم آنها با جنس‌های دیگر مناطق است.

### بحث

با استفاده از تجزیه و تحلیل چند متغیره، براساس ماتریکس

با آغاز پیشروی دریا بر لورنشیا در اوایل کاتین، فونای بازوپایان آمریکای شمالی شروع به نشان‌دادن تمایز بین مناطق پریکراتونی و اینتراکراتونی کردند. بازوپایان اسکوتو-آپالاجیا در حاشیهٔ جنوب شرقی لورنشیا، نسبت به فونای اینتراکراتونی لورنشیا، به فونای آوالونیا و رخساره‌های آب‌های عمیق بالتیکا نزدیکی بیشتری داشتند؛ در حالی که فونای بازوپایان اینتراکراتونی (اپیکانتینتال) لورنشیا در مقایسه با بازوپایان اسکوتو-آپالاجیا در حاشیهٔ کراتونی لورنشیا، شباهت بیشتری با بازوپایان لیتوانی-شمال استونی داشتند.

گروه C در نمودار PCA، شامل بازوپایان مناطق آپالاجین، Girvan (اسکاتلند) و Tyrone (شمال ایرلند) را نشان می‌دهد. این گروه که به وضوح در نمودار PCA در سمت چپ نمودار از فونای دیگر مناطق به خصوص لورنشیا مجزا می‌شود، با مفهوم فونای اسکوتو-آپالاجین<sup>۱</sup>، که Whittington and Williams (1955) و Jaanusson (1979) معرفی کردند، انطباق دارد. گروه D در نمودار PCA مربوط به بازوپایان ناحیهٔ اسلو-آسکر (نروژ)، چین جنوبی و جنوب

<sup>1</sup> Scoto-Appalachian

محیط‌های رسوبی کربناته کم‌عمق با آب گرم، مشابه دریا‌های اپیریک<sup>۴</sup> لورنیشیا و بالتیکا بوده است.

در این مطالعه، نتایج تجزیه و تحلیل چند متغیره بازوپایان کاتین لورنیشیا، آوالونیا، بالتیکا، قزاقستان، چین جنوبی، فرانسه، پرتغال و ایران چند الگوی دیرینه‌زیست جغرافیایی را نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، فونای بازوپایان در اردویسین پسین (اوایل کاتین) درجه نسبتاً بالایی از ناحیه‌گرایی یا پرونشالیسم<sup>۵</sup> را نشان می‌دهند. فونای بازوپایان اوایل کاتین در بیشتر مناطق لورنیشیا (به‌استثنای فونای اسکوتو-آپالاجین)، ارتباط بیشتری را با فونای آوالونیا، نسبت به بالتیکا و جنوب چین، نشان می‌دهند. بازوپایان اوایل کاتین آپالاجیا در مقایسه با بازوپایان شرق دریای اپیکانتینتال لورنیشیا، شباهت دیرینه‌جغرافیایی بالایی را با بازوپایان جیروان (جنوب اسکاتلند) و تیرون (شمال ایرلند) نشان می‌دهند و فونای اسکوتو-آپالاجین شناخته می‌شوند (Sohrabi and Jin 2013b). تمایز فونای بازوپایان اسکوتو-آپالاجین از بازوپایان دیگر مناطق، به‌وضوح در نمودار PCA نمایان می‌شود. با وجود درجه بالای شباهت میان بازوپایان کاتین مناطق آپالاجین، جیروان و شمال ایرلند و همچنین تمایز این بازوپایان با بازوپایان مناطق مجاور از قبیل غرب نیوفوندلند، غرب ایالت نیویورک، کنتاکی و اوکلاهوما، عوامل کنترل‌کننده دیرینه‌جغرافیایی برای تمایز این موجودات به‌خوبی شناخته نشده است (Williams 1962, 1969; Tripp 1962, 1965, 1967; Jaanusson 1973a). بازوپایان بالتیک (لیتوانی-استونی) قبل از کاتین پیشین با بازوپایان اسکوتو-آپالاجین، شباهت بالایی را نشان می‌دادند؛ ولی همان‌طور که در نمودار PCA مشخص شده است، در زمان کاتین پیشین بیشتر با بازوپایان اپیکانتینتال لورنیشیا شباهت نشان می‌دهند (شکل ۳). وجود رسوبات کربناته پلتي<sup>۶</sup> آپالاجین در زمان سندبین و فقدان

حضور و حضورنداشتن بازوپایان اردویسین پسین، ارتباط بازوپایان ایران با دیگر بازوپایان جهان بررسی شد. نتایج به دست آمده از این تجزیه و تحلیل، روند دیرینه‌جغرافیایی بازوپایان ایران را نسبت به بازوپایان دیگر مناطق از قبیل بازوپایان حاشیه مدیترانه‌ای گندوانا و صفحه‌های بالتیکا، آوالونیا و لورنیشیا در زمان اردویسین پسین (کاتین پیشین) نشان می‌دهد. همچنین نتایج به دست آمده از این تجزیه و تحلیل، تطابق نزدیکی را با نتایج حاصل از آخرین نقشه دیرینه‌جغرافیایی بازسازی‌شده اردویسین پسین نشان می‌دهد (Harper et al. 2013).

در اواخر اردویسین پسین، لورنیشیا در مناطق گرمسیری قرار گرفته و دریا‌های کم‌عمق اپیکانتینتال آن را پوشش داده بود که به ایجاد سکوه‌های کربناته بزرگ در حوضه‌های اینتراکراتونی و فلات پریکراتونی و همچنین ایجاد زیستگاه‌های جدید برای تکامل موجودات دریایی منجر شد (Cocks and Torsvik 2004; Cocks and Torsvik 2011; Finnegan et al. 2012). براساس مطالعه Jin (1996) در اواخر اردویسین میانی و اوایل اردویسین پسین (دارویلین پسین-کاتین پیشین)، بازوپایان لورنیشیا که گستردگی شبه‌جهانی<sup>۱</sup> داشتند، شباهت‌هایی با بازوپایان مناطق سیبری، بالتیکا و دیگر صفحات تکتونیکی بزرگ و کوچک نشان دادند. با این حال در طی پیشروی دریایی کاتین پیشین، تمایز بین بازوپایان مناطق پریکراتونی و اینتراکراتونی لورنیشیا آشکار می‌شود و در کاتین میانی و پسین، بازوپایان لورنیشیا بومی‌گرایی (endemism) را نشان می‌دهند (Sheehan and Coorough 1990; Jin 1996). این انزوا احتمالاً به دلیل آغاز تمایز بین جانوران پریکراتونیک (حاشیه قاره‌ای) و اینتراکراتونیک (دریای داخلی) لورنیشیا بود که تحت تأثیر کوهزایی تاکنونیک<sup>۲</sup> و ورود مکرر آب‌های خنک در امتداد حوضه فورلند آپالاجین<sup>۳</sup> قرار داشت (Sohrabi and Jin 2013a, b). این الگوی دیرینه‌جغرافیا احتمالاً منعکس‌کننده

<sup>4</sup> Epeiric sea

<sup>5</sup> provincialism

<sup>6</sup> Pelletal limestone

<sup>1</sup> semi-cosmopolitan

<sup>2</sup> Taconic Orogeny

<sup>3</sup> Appalachian Foreland Basin



بازوپایان کاتین میانی تا پسین (K2-K4) منطقه مراکش در سازند خبطالحجر در قسمت شرقی آنتی اطلس، با دیگر بازوپایان آنتی اطلس، ایبریا، ساردینیا و Noire Montagne فرانسه تطابق نشان می‌دهند.

به‌طور کلی، فونای بازوپایان گندوانا در عرض جغرافیایی بالا با فونای بازوپایان گرمسیری لورنیشیا در دوره اردویسین، اشتراک کمی داشتند؛ ولی با بازوپایان آوالونیا شباهت نزدیکی نشان می‌دهند. در مطالعه انجام‌یافته به‌وسیله Villas et al. (2015) بر بازوپایان اردویسین پسین (سندبین) منطقه پرو، آنها روابط دیرینه‌زیست جغرافیایی بین گندوانا و آوالونیا را در زمان اردویسین پسین بررسی کردند. در مطالعه آنها، که بر بازوپایان سازند Calapuja در شمال غرب دریای Titicaca در پرو انجام شد، قرابت بین بازوپایان حاشیه Proto-Andean گندوانا با بازوپایان آوالونیا بررسی شد. نتایج این مطالعه با بازسازی دیرینه‌جغرافیایی قبلی، که آوالونیا را نزدیک بالتیکا و دور از گندوانا قرار داده بود، مطابقت نشان می‌دهد. شباهت فونای بازوپایان اردویسین میانی و پسین آمریکای جنوبی و آوالونیا برای مناطق مرکزی حوضه آند (Andean Basin) از قبیله بولیویا، پرو و آرژانتین شناخته‌شده است (Havlicek and Branisa 1980, Hughes et al. 1980, Gutiérrez-Marco and Villas 2007, Benedetto Villas 1998a, 2003a; Benedetto et al. 2009). نتایج مطالعه Villas et al. (2015) بر بازوپایان حاشیه Proto-Andean گندوانا (مانند پرو، بولیوی و آرژانتین)، نشان‌دهنده قرابت بازوپایان حاشیه Proto-Andean گندوانا با بازوپایان آوالونیایی و قرارگرفتن در عرض‌های جغرافیایی متوسط و نیمه‌گرمسیری است. در مطالعه آنها، وجود جزایر میانی اقیانوسی در اقیانوس ریک، عامل احتمالی مهاجرت بازوپایان بین دیرینه‌قاره‌ها در نظر گرفته شده است (Villas et al. 2015).

با توجه به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل چند متغیره در این مطالعه، قرارگرفتن بازوپایان منطقه بجنورد ایران در میان بازوپایان آوالونیا بسیار مهم است و باید با احتیاط تفسیر و بررسی شود. وجود تشابه در فونای بازوپایان منطقه

پلوئید<sup>۱</sup> و اووید<sup>۲</sup> در رسوبات بالتیکی، حاکی از وجود یک محیط گرم در مناطق گرمسیری تا نیمه‌گرمسیری برای بازوپایان اسکوتو-آپالچین بوده است؛ در حالی که کربنات‌های بالتیکی نشانگر رسوبات آب‌های نسبتاً سرد در یک اقلیم معتدله-گرم‌اند (Jaanusson 1973b; Jaanusson and Bergström 1980). شباهت بالای بازوپایان بالتیکا و بازوپایان اپیکانتینتال لورنیشیا در کاتین پیشین حاکی از قرارگرفتن منطقه بالتیکا در آب و هوای گرمسیری بعد از سندبین بوده است که با روند حرکتی بالتیکا در نقشه دیرینه‌جغرافیای بازسازی‌شده به‌وسیله Cocks and Torsvik (2005) همخوانی دارد.

تمایز فونای بازوپایان مناطق پریکراتونی (حاشیه قاره‌ای) و اینترکراتونی (حوضه دریای درون‌قاره‌ای) در لورنیشیا در اوایل کاتین، یک الگوی زیست جغرافیایی تفسیر می‌شود. در زمان کاتین میانی و پسین، بازوپایان مناطق پریکراتونی، ارتباط نسبتاً محدودی با بازوپایان مناطق بالتیکا و آوالونیا داشتند؛ ولی بازوپایان اینترکراتونی از بازوپایان صفحات تکتونیکی مجاور از قبیل بالتیکا، سبیری و آوالونیا و همچنین بازوپایان پریکراتونی در لورنیشیا مجزا بودند (Jin et al. 2008; Jin and Zhan 2007). علت تمایز فونای بازوپایان آپالچیا از فونای بازوپایان اپیکانتینتال لورنیشیا، تحت تأثیر عوامل دیرینه محیطی از قبیل تأثیر پلیت تکتونیک بر مسیر مهاجرت، عرض‌های جغرافیای دیرینه، عمق آب، دمای آب و نوع لایه بستر حوضه (substrate) است (Jin et al. 2007; Sohrabi and Jin 2013b).

بازوپایان منطقه مراکش در آنالیز CA، شباهت کمتری با دیگر بازوپایان نشان می‌دهند؛ در حالی که در آنالیز PCA بازوپایان مراکش در کنار بازوپایان زاگرس، لنارک در ایران مرکزی، فرانسه و پرتغال در یک گروه قرار می‌گیرند. در زمان اردویسین پسین، مراکش بخشی از مناطق با عرض جغرافیایی بالاتر گندوانا را شامل می‌شد (Fortey and Cocks 2005). براساس مطالعات (Villas and Colmenar 2022)،

<sup>2</sup> ooids<sup>1</sup> peloids

پریکراتونیک و ایتراکراتونیک لورنسیا در زمان کاتین پیشین، یک الگوی زیست‌جغرافیایی تفسیر شده است (Sohrabi and Jin 2013b). نکته درخور توجه در آنالیزهای چند متغیره، قرارگرفتن بازوپایان منطقه بجنورد در منطقه کپه داغ ایران در میان دیگر بازوپایان آوالونیایی است (خوشه A2 در نمودار CA). این ارتباط نزدیک بین فونای بازوپایان منطقه بجنورد در منطقه کپه داغ ایران و فونای بازوپایان آوالونیایی، مربوط به قرارگرفتن بازوپایان این مناطق در عرض‌های جغرافیایی و شرایط محیطی مشابه در زمان کاتین است. شباهت بالای بازوپایان منطقه بجنورد ایران با بازوپایان آوالونیا نسبت به بازوپایان مناطق زاگرس و ایران مرکزی، به قرارگرفتن منطقه بجنورد و کپه‌داغ ایران در عرض‌های جغرافیایی نسبتاً پایین‌تر و شرایط محیطی متفاوت نسبت به مناطق زاگرس و ایران مرکزی مربوط است. همچنین ارتباط کم بازوپایان منطقه بجنورد و کپه‌داغ ایران با بازوپایان هم‌سن در مناطق زاگرس و ایران مرکزی، نشانگر آغاز بومی‌گرایی بازوپایان منطقه بجنورد و کپه‌داغ ایران، مانند بازوپایان لورنسیا در زمان کاتین است. با در نظر گرفتن این شرایط، قسمت کپه‌داغ ایران در زمان کاتین احتمالاً بخشی از ریزصفحات (terrane) مجاور ابرقاره گندوانا در عرض‌های جغرافیایی مشابه با آوالونیا و جدا از مناطق زاگرس و ایران مرکزی بوده است. حضور بازوپایان مناطق زاگرس و لنارک ایران مرکزی در کنار بازوپایان فرانسه و پرتغال، نشانگر اشتراک این بازوپایان در زمان اردویسین پسین است که در مناطق با عرض‌های جغرافیایی بالای گندوانا قرار داشتند.

با مطالعه و گردآوری داده‌های بیشتر از بازوپایان اردویسین پسین از مناطق مختلف ایران، تفسیر جامع‌تری درباره الگوی دیرینه‌زیست جغرافیایی بازوپایان ایران و ارتباط آنها با دیگر مناطق جهان به دست می‌آید و موقعیت دقیق‌تری از ایران در نقشه پالئوجغرافیایی اردویسین پسین ترسیم می‌شود.

بجنورد ایران با بازوپایان آوالونیا، که در مناطق استوایی و گرمسیری قرار گرفته بود، نشانگر قرارگرفتن این بخش از ایران در عرض‌های جغرافیایی پایین و شرایط گرمسیری است. نمونه درخور توجه در این مطالعه مربوط به تشابه کمتر بازوپایان مناطق زاگرس و ایران مرکزی با مناطق آوالونیاست که مانند بازوپایان دیگر مناطق مدیترانه‌ای گندوانا در نتیجه قرارگرفتن در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و شرایط نیمه‌گرمسیری است. تشابه بالای فونای بازوپایان مناطق زاگرس و ایران مرکزی با فونای بازوپایان فرانسه و پرتغال و مراکش حاکی از نزدیکی فونای ایران با دیگر مناطق مدیترانه‌ای گندواناست.

### نتیجه

در این مطالعه با بررسی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل چند متغیره بازوپایان اردویسین پسین (کاتین پیشین) مربوط به ۳۰ منطقه جغرافیایی شامل لورنسیا، بالتیکا، آوالونیا، چین جنوبی، قزاقستان، فرانسه، پرتغال، مراکش و ایران، چندین الگوی دیرینه‌زیست جغرافیایی تعیین شد. براساس نتایج CA و PCA چندین خوشه و گروه از هم مجزا شد. هم‌زمان با پیشروی دریایی در اردویسین پسین، بازوپایان لورنسیا در مناطق ایتراکراتونی از بازوپایان مناطق پریکراتونیک تمایز یافتند. بازوپایان اپیکانتینتال لورنسیا از قبیل دره اتاوا، دریاچه سیمکو انتاریو، جزیره مانیتولین انتاریو، غرب نیوفاندلند، نیویورک، دره هادسون، دره چمپلین، کتاک، ایندیانا، دره می‌سی‌سی‌پی و اوکلاهما که در زمان اردویسین پسین در عرض‌های جغرافیایی حدواسط تا بالا قرار داشتند، نسبت به بازوپایان اسکوتو-آپالچین در مناطق پریکراتونیک، با بازوپایان منشأ آوالونیایی مانند Powys و Anglesey (ولز)، Wexford و Waterford (جنوب شرق ایرلند) و Meath (ایرلند) تشابه بالایی نشان می‌دهند. بازوپایان کاتین پیشین اسکوتو-آپالچین نزدیکی بیشتری با بازوپایان حاشیه غربی لورنسیا از قبیل Great Basin و شمال کوه‌های راکی در بریتیش کلمبیا نشان می‌دهند. این تمایز بازوپایان

## References

- Benedetto J.L. 1998a. Early Paleozoic brachiopods and associated shelly faunas from western Gondwana: their bearing on the geodynamic history of the pre-Andean margin. In: Pankhurst R.J. and Rapela C.W. (Eds.), *The Proto-Andean Margin of Gondwana*. Geological Society of London, Special Publication 1: 57–83. [10.1144/gsl.sp.1998.142.01.04](https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1998.142.01.04)
- Benedetto J.L. 2003a. Paleobiogeography. In: Benedetto J.L. (Ed.), *Ordovician Fossils of Argentina*, 91–109. Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, 91–109.
- Benedetto J.L. Vaccari N.E. Waisfeld B.G. Sánchez T.M. and Foglia R.D. 2009. Cambrian and Ordovician biogeography of South American margin of Gondwana and accreted terranes. In: Bassett M.G. (Ed.), *Early Palaeozoic Peri-Gondwana Terranes: New Insights from Tectonics and Biogeography*. Geological Society, London, Special Publications, 325: 201–232. <https://doi.org/10.1144/SP325.1>
- Bergström S.M. 1971a. Conodont biostratigraphy of the Middle and Upper Ordovician of Europe and Eastern North America. In: Sweet W.C. and Bergström S.M. (Eds.), *Symposium on Conodont biostratigraphy*, Geological Society of America, Memoir, 127. <https://doi.org/10.1130/MEM127-p83>
- Bergström S.M. Chen X. Schmitz B. Young S. Rong J.Y. and Saltzman M.R. 2009. First documentation of the Ordovician Guttenberg  $\delta^{13}\text{C}$  excursion (GICE) in Asia: Chemostratigraphy of the Pagoda and Yanwashan formations in southeastern China. *Geological Magazine*, 146: 1–11. [doi:10.1017/S0016756808005748](https://doi.org/10.1017/S0016756808005748)
- Buggisch W. Joachimski M.M. Lehnert O. Bergström S.M. Repetski J.E. and Webers G.F. 2010. Did intense volcanism trigger the first Late Ordovician icehouse? *Geology*, 38(4): 327–330. <https://doi.org/10.1130/G30577.1>
- Candela Y. 2006. Statistical comparisons of late Caradoc (Ordovician) brachiopod faunas around the Iapetus Ocean, and terranes located around Australia, Kazakhstan and China. *Geodiversitas*, 28(3): 433–446.
- Cherns L. and Wheeley J.R. 2007. A pre-Hirnantian (Late Ordovician) interval of global cooling — the Boda event re-assessed. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 251(3-4): 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.04.010>
- Cocks L.R.M. McKerrow W.S. and Van Staal C.R. 1997. The margins of Avalonia. *Geological Magazine*, 134: 627–636. [doi:10.1017/S0016756897007425](https://doi.org/10.1017/S0016756897007425)
- Cocks L.R.M. 2001. Ordovician and Silurian global geography. *Journal of the Geological Society of London*, 158: 197–210. <https://doi.org/10.1144/jgs.158.2.197>
- Cocks L.R.M. 2008. A revised review of British Lower Palaeozoic brachiopods. *Monograph of the Palaeontographical Society*, London, 161: 1–276. <https://doi.org/10.1080/25761900.2022.12131809>
- Cocks L.R.M. Fortey R.A. 1982. Faunal evidence for oceanic separations in the Palaeozoic of Britain. *Journal of the Geological Society of London*, 139: 465–478. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.139.4.0465>
- Cocks L.R.M. and Fortey R.A. 1988. Lower Palaeozoic facies and faunas around Gondwana. In: Audley-Charles M. G. and Hallam A. (Eds.), *Gondwana and Tethys*. Geological Society, London, Special Publication, 37: 183–200. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1988.037.01.10>
- Cocks L.R.M. and Fortey R.A. 2009. Avalonia: a long-lived terrane in the Lower Palaeozoic? *Geological Society, London, Special Publication*, 325: 141–155. <https://doi.org/10.1144/SP325.7>
- Cocks L.R.M. and Rong J.Y. 2000. Strophomenida. In: Kaesler, R.L. (Ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part H. Brachiopoda revised*. The Geological Society of America and the University of Kansas Press, Lawrence, 2: 216–348.
- Cocks L.R.M. and Torsvik T.H. 2004. Major Terranes in the Ordovician. In: Webby B.D. Droser M.L. Paris F. Percival I.G. (Eds.), *The Great Ordovician Biodiversification Event*. Columbia University Press, New York, pp. 61–67. [10.7312/webb12678-006](https://doi.org/10.7312/webb12678-006)
- Cocks L.R.M. and Torsvik T.H. 2005. Baltica from the late Precambrian to mid-Palaeozoic times: The gain and loss of a terrane's identity. *Earth Science Reviews*, 72(1–2): 39–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.04.001>
- Cocks L.R.M. and Torsvik T.H. 2011. The Palaeozoic geography of Laurentia and western Laurussia: a stable craton with mobile margins. *Earth-Science Reviews*, 106: 1–51. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.007>
- Cocks L. R. M. and Torsvik T. H. 2021. Ordovician palaeogeography and climate change. *Gondwana Research*, 100: 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.09.008>
- Colmenar J. and Álvaro J.J. 2015. Integrated brachiopod-based bioevents and sequence-stratigraphic framework for a Late Ordovician subpolar platform, eastern Anti-Atlas, Morocco. *Geological Magazine*, 152(04): 603–620. [doi:10.1017/S0016756814000533](https://doi.org/10.1017/S0016756814000533)
- Colmenar J. Villas E. and Vizcaïno D. 2013. Upper Ordovician brachiopods from the Montagne Noire (France): endemic Gondwanan predecessors of Pre-hirnantian lowlatitude immigrants. *Bulletin of Geosciences*, 88: 153–174.
- Colmenar J. Harper D.A.T. and Villas E. 2014. Morphofunctional analysis of *Svobodaina* species (Brachiopoda, Heterorthidae) from southwestern Europe. *Palaeontology*, 57: 193–214. <https://doi.org/10.1111/pala.12061>



- Colmenar J. Pereira S. SÃ A.A. da Silva C.M. and Young T.P. 2017. A Kralodvorian (upper Katian, Upper Ordovician) benthic association from the Ferradosa Formation (Central Portugal) and its significance for the redefinition and subdivision of the Kralodvorian Stage. *Bulletin of Geosciences*, 92(4): 443-464. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1643>
- Cooper G.A. 1956. Chazyan and related brachiopods. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 127: 1–1245. <http://hdl.handle.net/10088/23769>
- Cooper A.H. 1980. The stratigraphy and palaeontology of the Ordovician to Devonian rocks of the area north of Dornes (near Figueiro´ dos Vinhos), central Portugal. Unpublished Ph.D. thesis, University of Sheffield, 430 pp.
- Copper P. and Long D.G.F. 1993. Upper Ordovician–Early Silurian geology of the Manitoulin Island area, Ontario (Caradoc–Llandoverly). *Canadian Paleontology Conference Field Trip Guidebook*, Department of Geology, Laurentian University, Sudbury, 36 p.
- Finnegan F. Heim N.A. Peters S.E. and Fischer W.W. 2012. Climate change and the selective signature of the Late Ordovician mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109: 6829–6834. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117039109>
- Fortey R.A. and Cocks L.R.M. 2003. Palaeontological evidence bearing on global Ordovician–Silurian continental reconstructions. *Earth-Science Reviews*, 61: 245–307. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00115-0)
- Fortey R.A. and Cocks L.R.M. 2005. Late Ordovician warming - the Boda event. *Geolog* 33: 405–408. <https://doi.org/10.1130/G21180.1>
- Ghavidel-Syooki M. 2006. Palynostratigraphy and palaeogeography of the Cambro–Ordovician strata in southwest of Shahrud city (Kuh-e-Kharbash, near Deh-Molla), Central Alborz Range, Northern Iran. *Review of Palaeobotany and Palynology* 139: 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2005.07.006>
- Ghavidel-Syooki and M. Khandabi M. 2013. Palinostratigraphy and palaeogeography of the Lashkarak and Ghelli formations in Abarsaj area, northwest of Shahrud. *Journal of Stratigraphic Researches*, 28: 35–58 [in Persian]. [20.1001.1.20087888.1391.28.4.3.2](https://doi.org/10.1001.1.20087888.1391.28.4.3.2)
- Ghavidel-Syooki M. Popov L.E. Álvaro J.J. Ghoadi Pour M. Tolmacheva T.Y. and Ehsani M.H. 2014. Dapingian–lower Darriwilian (Ordovician) stratigraphic gap in the Faraghan Mountains, Zagros ranges, south-eastern Iran. *Bulletin of Geosciences*, 89: 679–706. [10.3140/BULL.GEOSCI.1453](https://doi.org/10.3140/BULL.GEOSCI.1453)
- Ghobadi Pour M. Popov L.E. Kebria-ee Zadeh M.R. and Baars C. 2011. Middle Ordovician (Darriwilian) brachiopods associated with the Neseuretus biofacies, eastern Alborz Mountains, Iran. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, 42: 263–283.
- Gutiérrez–Marco J.C. and Villas E. 2007. Brachiopods from the uppermost Lower Ordovician of Peru and their palaeogeographical significance. *Acta Palaeontologica Polonica*, 52 (3): 547–562.
- Hammann W. and Leone F. 1997. Trilobites of the post–Sardic (Upper Ordovician) sequence of southern Sardinia. Part 1. *Beringeria*, 20: 1–217.
- Hairapetian V. Ghobadi Pour M. Popov L.E. Hejazi S.H. Holmer L.E. Evans D. and Sharafi A. 2015. Ordovician of the Anarak Region: implications in understanding Early Palaeozoic history of Central Iran. *Stratigraphy*, 12: 22–30.
- Hansen J. 2008. Upper Ordovician brachiopods from the Arnestad and Frognerkilen formations in the Oslo–Asker District, Norway. *Palaeontos*, 13: 99 p.
- Hammer Ø. Harper D.A.T. and Ryan P.D. 2001. PAST: palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1): 9 pp.
- Hammer Ø. and Harper D.A.T. 2006. *Paleontological data analysis*. Blackwell Publishing, Malden, Massachussettes, 351 pp.
- Harper D. A. T. Mitchell W.I. Owen A. W. and Romano M. 1985. Upper Ordovician brachiopods and trilobites from the Clashford House Formation, near Herbertstown, Co. Meath, Ireland. *Bulletin of the British Museum (Natural History), Geology*, 38: 287–308.
- Harper D.A.T. 2006. The Ordovician biodiversification: Setting an agenda for marine life. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 232: 148–166. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.07.010>
- Harper D.A.T. and Rong J.Y. 2001. Palaeozoic brachiopod extinctions, survival and recovery: patterns within the Rhynchonelliformeans. *Geological Journal*, 36: 317–328. <https://doi.org/10.1002/gj.897>
- Harper D.A.T. Cocks L.R.M. Popov L.E. Sheehan P.M. Bassett M.G. Copper P. Holmer L.E. Jin J. and Rong J.Y. 2004. Brachiopods. In: Webby B.D. Droser M.L. Paris F. and Percival I.G. (Eds.). *The Great Ordovician Biodiversification Event*. Columbia University Press, New York, pp. 157–178.
- Harper D.A.T. Rasmussen C.M.Ø. Liljeroth M. Blodgett R.B. Candela Y. Jin J. Percival I.G. Rong J.Y. Villas E. and Zhan R.B. 2013. Biodiversity, biogeography and phylogeography of Ordovician rhynchonelliform brachiopods. In *Early Palaeozoic Biogeography and Palaeogeography* (eds D.A.T Harper and T. Servais), Geological Society of London, Memoir no. 38, pp. 127–44.
- Havlíček V. 1952. On the Ordovician representatives of the family Plectambonitidae (Brachiopoda), *Sbornik Ústředního ústavu geologického*, 19: 397–428.
- Havlíček V. 1961. Rhynchonelloidea des böhmischenälteren Paläozoikums (Brachiopoda). *Rozpravy Ústředního ústavu geologického*, 27: 1–211.

- Havlíček V. 1967. Brachiopoda of the suborder Strophomenidina in Czechoslovakia. *Rozpravy Ustredniho ustavu geologickeho*, 33: 1–235, pls 1–52.
- Havlíček V. 1971. Brachiopodes de l'Ordovicien du Maroc. *Notes et Memoires du Service Geologique du Maroc*, 230: 1–135.
- Havlíček V. 1981. Upper Ordovician brachiopods from the Montagne Noire. *Palaeontographica (Abt. A)* 176: 1–34.
- Havlíček V. and Branisa L. 1980. Ordovician brachiopods of Bolivia (Succession of assemblages, climate control, affinity to Anglo-French and Bohemian provinces). *Rozpravy Ceskoslovenske Akademie Ved. Rada Matematickych a Prirodnich Ved. Academia Praha, Prague, Czechoslovakia*, 90(1):1-54.
- Havlíček V. and Vanek J. 1966. The biostratigraphy of the Ordovician of Bohemia. *Sbornik Geologických Ved, Paleontologie*, 8: 7–68.
- Havlíček V. Kříž J. and Serpagli E. 1987. Upper Ordovician brachiopod assemblages of the Carnic Alps, Middle Carinthia and Sardinia. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 25: 277-311.
- Henry J.L. and Romano M. 1978. Le genre *Dionide* Barrande, 1847 (Trilobite) dans l'Ordovicien du Massif Armoricaïn et du Portugal. *Geobios*, 11(3): 327–343. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(78\)80034-5](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(78)80034-5)
- Hints L. 1998. Oandu Stage (Caradoc) in central North Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*, 47(3): 158–172.
- Hints L. 2010. A new glyptorthid species (Brachiopoda: Orthida) from the Upper Ordovician of Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 59: 189–194.
- Hints L. and Meidla T. 1997. Keila Stage. In: Raukas A. and Teedumäe A. (Eds.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*, Estonian Academy Publishers, Tallinn, pp. 74–76.
- Hints O. and Eriksson M.E. 2007. Diversification and biogeography of scolecodontbearing polychaetes in the Ordovician. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 245: 95–114. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.02.029>
- Hints L. and Harper D.A.T. 2001. Review of the Ordovician rhynchonelliformean brachiopoda of the East Baltic: their distribution and biofacies. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 50: 29–43. [10.37570/bgssd-2003-50-02](https://doi.org/10.37570/bgssd-2003-50-02)
- Hughes C.P. Rickards R.B. and Williams A. 1980. The Ordovician fauna from the Contaya Formation of eastern Peru. *Geological Magazine*, 117 (1): 1–21. [doi:10.1017/S0016756800033057](https://doi.org/10.1017/S0016756800033057)
- Jaanusson V. 1973a. Ordovician articulate brachiopods. In: Hallam. A. (Ed.). *Atlas of Palaeobio- geography*. Elsevier, Amsterdam, pp. 19–26.
- Jaanusson V. 1973b. Aspects of carbonate sedimentation in the Ordovician of Baltoscandia. *Lethaia*, 6:11–34. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1973.tb00871.x>
- Jaanusson V. 1979. Ordovician. In: Robison R.A. and Teichert C. (eds.). *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part A, Introduction, Biogeography and Biostratigraphy*. University of Kansas Press, pp. A136–A166.
- Jaanusson V. and Bergström S.M. 1980. Middle Ordovician faunal spatial differentiation in Baltoscandia and the Appalachians. *Alcheringa*, 4: 89–110. <https://doi.org/10.1080/03115518008619641>
- Jin J. 1996. Ordovician (Llanvirn–Ashgill) rhynchonellid brachiopod biogeography. In: Copper P. and Jin J. (Eds.), *Brachiopods*. Balkema, Rotterdam, pp. 123–132.
- Jin J. and Norford B.S. 1996. Upper Middle Ordovician (Caradoc) brachiopods from the Advance Formation, northern Rocky Mountains, British Columbia. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 491: 20–77.
- Jin J. Copper P. and Zhan R. 2007. Species-level response of tropical brachiopods to environmental crises during the Late Ordovician mass extinction. *Acta Palaeontologica Sinica*, 46: 194–200.
- Jin J. and Zhan R. 2008. Late Ordovician orthide and billingsellide brachiopods from Anticosti Island, eastern Canada: diversity change through mass extinctions. *NRC Research Press, Ottawa*, 159 p.
- Kay G.M. 1937. Stratigraphy of the Trenton Group. *Geological Society of America Bulletin*, 48: 233–302.
- Kebria-ee Zadeh M.R. 2015. Alborz paleogeography in the Ordovician based on brachiopods. 10th National Geology Conference of PNU papers [in Persian].
- Kebria-ee Zadeh M.R. Ghobadi Pour M. Popov L.E. Baars C. and Jahangir H. 2015. First record of the Ordovician fauna in Mila-Kuh, eastern Alborz, northern Iran. *Estonian Journal of Earth Sciences* 64: 121–139. [10.3176/earth.2015.22](https://doi.org/10.3176/earth.2015.22)
- Leone F. Hammann W. Serpagli E. and Villas E. 1991. Lithostratigraphic units and biostratigraphy of the post-Sardic Ordovician sequence in southwest Sardinia. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 30: 201–35.
- Liberty B.A. 1969. Paleozoic geology of the Lake Simcoe area. *Geological Survey of Canada, Memoir*, 355: 201 pp.
- Levin H.L. 1996. *The Earth Through Time*, 5th edition: Saunders College Publishing, Fort Worth, 607 pp.
- Loi A. Ghienne J.F. Dabard M.P. Paris F. Botquelen A. Christ N. Elaouad-Debbaj Z. Gorini A. Vidal M. Videt B. and Destombes J. 2010. The Late Ordovician glacio-eustatic record from a high-latitude storm-dominated shelf succession: the Bou Ingarf section (Anti-Atlas, Southern Morocco). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 296: 332–58. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.01.018>
- Männil R. and Rõõmusoks A. 1984. A revision of the

- lithostratigraphic subdivision of the Ordovician of North Estonia. In: Männil R.M. Mens K.M. (Eds). Stratigraphy of Early Palaeozoic deposits of the East Baltic. Tallinn, pp. 52–62. (In Russian).
- Melou M. 1975. Le genre *Heterorthina* (Brachiopoda, Orthida) dans la formation des Schistes de Postolonnec (Ordovicien), Finistere, France. *Geobios*, 8: 191–208. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(75\)80038-6](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(75)80038-6)
- Murphy J.B. Gutierrez-Alonso G. and Nance R.D. 2006. Origin of the Rheic Ocean: rifting along a Neoproterozoic suture? *Geology*, 34: 325–328. <https://doi.org/10.1130/G22068.1>
- Nikitin I.F. Popov L.E. and Bassett M.G. 2006. Late Ordovician rhynchonelliformean brachiopods of north-eastern Central Kazakhstan. *National Museum of Wales Geological Series*, 25: 223–294.
- Page A. Zalasiewicz J.A. Williams M. and Popov L.E. 2007. Were transgressive black shales a negative feed back modulating glacioeustasy in the Early Palaeozoic Icehouse? in *Deep-Time Perspectives on Climate Change: Marrying the Signal from Computer Models and Biological Proxies*, edited by M. Williams et al., pp. 123–156, The Micropalaeontological Soc., Spec. Publ., The Geolog. Soc., London, U.K.
- Percival I.G. Popov L.E. Zhan R.B. and Ghobadi Pour M. 2011. Patterns of origination and dispersal of Middle to Late Ordovician brachiopods: examples from South China, East Gondwana, and Kazakh terranes. In: Gutiérrez- Marco J.C. Rábano I. and García-Bellido D. (Eds.). *Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero*, 14. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 413–419.
- Popov L.E. Nikitin I.N. and Cocks L.R.M. 2000. Late Ordovician brachiopods from the Otar Member of the Chu-Ili Range, South Kazakhstan. *Palaeontology*, 43: 833–870. <https://doi.org/10.1111/1475-4983.00152>
- Popov L.E. Cocks L.R.M. and Nikitin I.F. 2002. Upper Ordovician brachiopods from the Anderken Formation, Kazakhstan: their ecology and systematics. *Bulletin of the Natural History Museum, Geology Series*, 58: 13–79.
- Popov L.E. Hairapetian V. Evans D.H. Ghobadi Pour M. Holmer L.E. and Baars C. 2015. Review of the Ordovician stratigraphy and fauna of the Anarak Region in Central Iran. *Acta Geologica Polonica*, 65: 403–435.
- Romano M. 1980. The trilobite *Eccoptychile* from Ordovician of Northern Portugal. *Palaeontology*, 23(3): 605–616.
- Romano M. 1982. The Ordovician biostratigraphy of Portugal—a review with new data and re-appraisal. *Geological Journal*, 17: 89–110.
- Romano M. 1991. Trilobites from the Ordovician of Portugal. *Palaeontology*, 34: 329–355.
- Rong J. Harper D.A.T. Zhan R. Huang Y. and Cheng J. 2005. Silicified rhynchonelliform brachiopods from the Kuniutan Formation (Darriwilian: Middle Ordovician), Guiyang, South China. *Palaeontology*, 48: 1211–1240. DOI: [10.1111/j.1475-4983.2005.00506.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2005.00506.x)
- Rõõmusoks A. 2004. Ordovician strophomenoid brachiopods of northern Estonia. *Fossilia Baltica* 3, 151 p.
- Sepkoski J.J. 1995. The Ordovician Radiations: diversification and extinction shown by global genus-level taxonomic data. In: Cooper J.D. Droser M.L. and Finney S.C. (Eds.). *Ordovician odyssey: short papers for the Seventh International Symposium on the Ordovician System*. Pacific Section of the Society for Sedimentary Geology, Fullerton, California, pp. 393–396.
- Sheehan P.M. and Coorough P.J. 1990. Brachiopod zoogeography across the Ordovician–Silurian extinction event. In: McKerrow W.S. Scotese C.R. (Eds.), *Paleozoic Paleogeography and Biogeography: Geological Society Memoir*, 12:181–187.
- Shen S. and Shi G.R. 2000. Wuchiapingian (early Lopingian, Permian) global brachiopod palaeobiogeography: a quantitative approach. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 162: 299–318. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00133-4)
- Sinclair G.W. Copeland M.J. and Bolton T.E. 1969. Ordovician fossils from Lakefield Quarry. In: Hewitt D.F. (Ed.), *Geology and scenery; Peterborough, Bancroft and Madoc area. Geological Guide Book*, 3: 113 pp.
- Sloss L.L. 1963. Sequences in the Cratonic Interior of North America. *Geological Society of America*, 74: 93–114. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[93:SITCIO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[93:SITCIO]2.0.CO;2)
- Sohrabi A. and Jin J. 2013a. Evolution of the Rhynchotrema–Hiscoibeccus lineage: implications for the diversification of the Late Ordovician epicontinental brachiopod fauna of Laurentia. *Lethaia*, 46(2): 188–210. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2012.00333.x>
- Sohrabi A. and Jin J. 2013b. Global palaeobiogeography of brachiopod faunas during the early Katian (Late Ordovician) greenhouse episode. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 389: 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.02.027>
- Titus R. and Cameron B. 1976. Fossil communities of the Lower Trenton Group (Middle Ordovician) of central and northwestern New York State. *Journal of Paleontology*, 50:1209–1225. <https://www.jstor.org/stable/1303563>
- Titus R. 1986. Fossil Communities of the Upper Trenton Group (Ordovician) of New York State. *Journal of Paleontology*, 60(4): 805–824. <http://www.jstor.org/stable/1305071>
- Tripp R.P. 1962. Trilobites from the confinis Flags



- (Ordovician) of the Giman district, Ayrshire. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 65: 1–40. doi:10.1017/S0080456800012291
- Tripp R.P. 1965. Trilobites from the Albany Division (Ordovician) of the Girvan district, Ayrshire. *Palaeontology*, 8: 577–603.
- Tripp R.P. 1967. Trilobites from the upper Stinchar Limestone (Ordovician) of the Girvan district, Ayrshire. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 67(3): 43–93. doi:10.1017/S0080456800023899
- Torsvik T.H. and Cocks L.R.M. 2011. The Palaeozoic palaeogeography of central Gondwana. In: Van Hinsbergen D.J.J. Buitert S.J.H. Torsvik T.H. Gaina C. and Webb S.J. (Eds) *The Formation and Evolution of Africa: A Synopsis of 3.8 Ga of Earth History*. Geological Society, London, Special Publications 357, 137–66. <https://doi.org/10.1144/SP357.8>
- Trotter J.A. Williams I.S. Barnes C.R. Lécuyer C. and Nicoll R.S. 2008. Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry, *Science*, 321: 550–554. [10.1126/science.1155814](https://doi.org/10.1126/science.1155814)
- Van Staal C.R. Dewey J.F. MacNiocaill C. and McKerrow W.S. 1998. The Cambrian–Silurian tectonic evolution of the northern Appalachians and British Caledonides: history of a complex, west and southwest Pacific-type segment of Iapetus. *Geological Society (London) Special Publication*, 143: 199–242. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.143.01.17>
- Villas E. 1985. Braquiópodos del Ordovícico Medio y Superior de las Cadenas Ibéricas Orientales. *Memorias del Museo Paleontológico de la Universidad de Zaragoza*, 1(1–2): 1–22.
- Villas E. 1995. Caradoc through Early Ashgill Brachiopods from the Central-Iberian zone (Central Spain). *Geobios*, 28: 49–84. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(95\)80204-5](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(95)80204-5)
- Villas E. Colmenar J. and Gutiérrez-Marco J.C. 2015. Late Ordovician brachiopods from Peru and their palaeobiogeographical relationships. *Palaeontology*, 58(3): 455–487. <https://doi.org/10.1111/pala.12152>
- Villas E. and Colmenar J. 2018. Brachiopods from the Upper Ordovician of Erfoud (eastern Anti-Atlas, Morocco) and the stratigraphic correlation of the bryozoan-rich Khabt-el Hajar Formation. *Geological Society, London, Special Publications*, 485 p.
- Villas E. and Colmenar J. 2022. Brachiopods from the Upper Ordovician of Erfoud (eastern Anti-Atlas, Morocco) and the stratigraphic correlation of the bryozoan-rich Khabt-el Hajar Formation. *Geological Society, London, Special Publications*, 485: 165–176. <https://doi.org/10.1144/sp485.2>
- Vinassa P. 1927. Fossili ordoviciani sardi. *Memorie Reale Accademia dei Lincei, Rome (series 6a)*, 2(16): 437–96.
- Webby B.D. 2000. In search of triggering mechanisms for the great Ordovician biodiversification event. *Palaeontology Down Under 2000*, Geological Society of Australia, Abstracts, 61: 129–130.
- Webby B.D. Paris F. Droser M.L. and Percival I.G. 2004a. *The Great Ordovician Biodiversification Event*. Columbia University Press, New York, 484 p. <https://doi.org/10.7312/webb12678>
- Weerasinghe A. 1970. Stratigraphy and paleontology of the Ordovician Long Point Formation, Port au Port Peninsula, Newfoundland. M.Sc. thesis, Memorial University of St. John's, Newfoundland.
- Whittington H.B. and Williams A. 1955. The fauna of the Derfel Limestone of the Arenig District, North Wales. *Philos. Trans. London (B)*, 238: 397–430.
- Williams A. 1962. The Barr and Ardmillan Series (Caradoc) of the Girvan District, south-west Ayrshire, with descriptions of the brachiopods. *Memoirs of the Geological Society of London*, 3: 1–267.
- Williams A. 1969. Ordovician faunal provinces with reference to brachiopod distribution. In: Wood A. (Ed.). *The Precambrian and Lower Palaeozoic rocks of Wales*. University of Wales Press, Cardiff, pp. 117–154.
- Williams D.A. and Telford P.G. 1986. Paleozoic geology of the Ottawa area. *Geological Association of Canada, Fieldtrip Guidebook*, 8: 25 p.
- Yazarlu M.A. Ashouri A. Ahmadzadeh Heravi and M. Ghaderi A. 2012. Introducing a new species of brachiopods, *Triplesia bojnourdiansis* n. sp. (Late Ordovician) at south of Bojnourd for the first time from Iran. *Sedimentary Facies*, 4 (2): 220–229 [In Persian]. [10.22067/SED.FACIES.V4I2.9617](https://doi.org/10.22067/SED.FACIES.V4I2.9617)
- Young T.P. 1985. The stratigraphy of the Upper Ordovician of central Portugal. PhD thesis, University of Sheffield.
- Young T.P. 1988. The lithostratigraphy of the Upper Ordovician of central Portugal. *Journal of the Geological Society, London*, 145, 377–392.
- Zhan R. and Harper D. 2006. Biotic diachroneity during the Ordovician Radiation: evidence from South China. *Lethaia*, 39: 211–226. <https://doi.org/10.1080/00241160600799770>
- Zhan R. and Jin J. 2007. Ordovician–Early Silurian (Llandovery) stratigraphy and palaeontology of the Upper Yangtze Platform, South China. *Science Press, Beijing*, 169 p.