https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en
Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches
E-ISSN: 2423-8007
Vol. 41, Issue 2, No. 99, 2025, pp79-99
Received: 28.10.2024 Accepted: 03.03.2025

Research Paper

An artificial intelligence approach to palaeogeographic studies: a case study of the Late Ordovician brachiopods of Laurentia

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

Abstract
According to the earliest hypothesis which was based on qualitative studies of the Late Ordovician brachiopod fauna, the younger and larger species of *Hiscobeccus*, which was one of the epicontinental brachiopod fauna of North America, evolved from the older and smaller species of *Rhynchotrema*, which lived in precratonic regions. The results of quantitative studies and multivariate analyses based on the morphological characteristics of the brachiopods support this hypothesis. In this study, an artificial intelligence model based on neural networks was conducted in order to determine the relationship between the morphological characteristics of the Late Ordovician brachiopods of the Laurentia and their geographical localities. This neural network model estimates the palaeogeographic localities of the brachiopods by generating a mathematical formula between the morphometric characteristics of brachiopods and their geographical distribution. Based on the results of this study, the neural network can estimate the geographical localities of the test samples of brachiopod with a high accuracy of 82%. By creating a more comprehensive dataset based on the morphometric parameters of the brachiopods of Laurentia and other regions of the world and using the neural network model, the palaeogeographic localities of brachiopods can be estimated with high accuracy.
Keywords: Brachiopods, Neural network, Morphometrics, Palaeogeography, Late Ordovician

Introduction

Traditionally, paleontology has been a descriptive science, and much of the previous research has been based on qualitative approaches. In recent years, more quantitative methods have been used by paleontologists, in order to have a more comprehensive understanding of the relationships between fossils and their palaeogeography, palaeoecology, palaeobiology, and evolutionary history. Based on the previous studies, which have been largely qualitative, *Hiscobeccus* evolved from *Rhynchotrema*, probably in the late Chatfieldian (middle Caradoc), and developed into a large, spherical, and highly lamellated shell (Amsden 1983; Jin 2001). Despite these early studies, there are still many questions regarding the evolutionary lineage of *Rhynchotrema-Hiscobeccus*. For example, what was the rate of morphological transformation from *Rhynchotrema* to *Hiscobeccus*? Did morphological changes occur similarly in different regions with different palaeoenvironments on the Laurentian plate? What was the palaeoecological position of different species of the *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage in different palaeogeographic environments? How did sea-level changes affect the evolution of the *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage?

In a study by Sohrabi and Jin (2013), a dataset was conducted based on morphological features of *Rhynchotrema* and *Hiscobeccus* specimens from North America and they used multivariate analysis to distinguish morphological trends from *Rhynchotrema* to *Hiscobeccus*. Based on the primary measurements, they extracted secondary parameters in order to examine morphological changes (e.g. increase in shell size, lamellosity, and globosity) from *Rhynchotrema* to *Hiscobeccus*. Based on these secondary parameters such as shell size index (SSI), shell convexity index (SCI), shell lamellosity index (SLI), and shell lamella density (SLD), they studied the differences between younger and older forms of *Rhynchotrema* and early forms of *Hiscobeccus* during the Late Ordovician time. In their study, based on the morphological changes, the relationships between different forms of *Rhynchotrema* and *Hiscobeccus* in different regions and with different palaeogeographic distribution patterns of

*Corresponding author
Sohrabi A. (2025). An artificial intelligence approach to palaeogeographic studies: a case study of the Late Ordovician brachiopods of Laurentia. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 41(2): 79-99. https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

2423-8007 / © 2025 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.2025.143190.1300

species were investigated.

In previous studies, the Late Ordovician brachiopods from different regions of North America have been qualitatively and quantitatively examined, and also a detailed dataset related to the morphological characteristics of brachiopod fossils from different regions of North America has been previously collected. Therefore, a dataset based on the North American brachiopods was used in this study. The fact that most of the studies on the Late Ordovician brachiopods from different regions of Iran have been qualitative, and also the quantitative data related to the morphological characteristics of Iranian brachiopods are very limited, the Late Ordovician brachiopods of Iran were not used in this study.

For the present study, an artificial intelligence approach was used to investigate and analyze the palaeogeography and evolutionary process of the *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage during the Late Ordovician in North America (Laurentia). Artificial intelligence has the ability to learn from any pattern between a set of input and output data and involves various techniques including neural networks. In this study, a neural network method was used to estimate the location of the *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage and also their palaeogeographical analysis. The use of neural network-based artificial intelligence allows paleontologists to have a better and more comprehensive understanding of the palaeogeographic distribution of the brachiopods. By adding more brachiopods data from other geographical locations around the world to the current dataset, a more inclusive dataset can be created for future studies, which would enhance the predictivity power of the neural network model to cover wider geographic locations.

Materials & Methods

The data used in this study are based on a morphometric dataset of *Rhynchotrema* and *Hiscobeccus* specimens collected by previous studies (see Sohrabi and Jin 2013). This dataset includes biometric measurements of the Upper Ordovician (upper Sandbian–upper Katian) rhynchonellid brachiopods from nine localities in North America (Brett et al. 2004; Bergstrom 1971; Mitchell & Bergstrom 1991) (Figs. 1 and 3). The *Rhynchotrema* specimens in this study are as follows: Mn-10 from the Platteville Formation, Upper Sandbian, Minnesota; W (NAPC-9) from the Lexington Formation, lower Katian, Kentucky; Mara-1 (0–2) from the Verulam Formation, lower Katian, Lake Simcoe Region, Ontario; Ottawa-1 from the Verulam Formation, lower Katian, Ottawa Region; GSC Loc. 1603 specimens from the Verulam Formation, lower Katian, Bay of Quinte, southern Ontario.

The specimens of *Hiscobeccus* in this study are as follows: GSC Loc. 205924 from the Advance Formation, Trentonian age, northern Rocky Mountains, British Columbia; GSC Loc. 113531 from the Amadjuak Formation, Edenian–Maysvilian age, Baffin Island; GSC Loc. C-205929 from the Stony Mountain Formation, Richmondian age, southern Manitoba; W (C-7a-77) specimens from the Waynesville and Liberty formations, Richmondian age, Ohio (Figs. 1 and 2).

Discussion of Results & Conclusions

In this study, a neural network model was developed based on palaeogeography and evolutionary analysis of brachiopods in North America, and a back-propagation neural network model was created to estimate the location of the *Rhynchotrema* and *Hiscobeccus* specimens, based on a set of nine morphometric data (Nouri-Taleghani et al. 2015; Abdizadeh et al. 2017; Farzi et al. 2017) (Fig. 4). In this method, after entering the dataset, an artificial intelligence model learns the morphological features of brachiopods related to each geographical region and then estimates the geographical location of the brachiopods for new specimens. The neural network tries to relate these morphometric data to their location in order to predict their initial location by providing new morphometric measures to the neural network model. If the initial location of the brachiopods has been displaced by various factors, neural networks can estimate the initial location of those brachiopods with high accuracy. In this method, the input (morphometric data) and output (brachiopod location) are divided into a training set (to learn the input and output patterns), a validation set (for overtraining prevention), and a test set (for reliability measurement of the neural network).

Localities identified based on laboratory measurements of *Rhynchotrema-Hiscobeccus* brachiopods are: 15862 (Baffin); 0–104507 (Baffin); 0–104517 (Baffin); GSC 113531–113541 (Baffin); GSC 205924 (Advance Formation, Rocky Mountains), GSC 1603 (Bay of Quinte, Ontario), NAPC-Pre Stop 1B (Bromley Member, Lexington limestone, Kentucky), Ottawa-1 (Ottawa), Mara 1(0–2) (Lake Simcoe area, Ontario), MN-10 (Minnesota), GSC Loc. C-205929 (Stony Mountain, Manitoba), C-7a- 77 (Waynesville and Liberty, Ohio).

Codes 1 to 12 were assigned to the 12 locations, in order to be identified by the neural network program in MATLAB software. Two-thirds of the data were used for training and one-third of the data were used for validating and testing in the neural network model. From a total of 160 brachiopod samples, 52 samples (33%) were randomly selected as test samples, and 108 samples were used for training the neural network model. The morphometric data including L, L1, W, W1, W2, T, T1, AA and LN were used as the input data (Fig. 3). The matrix diagram indicates the interrelationships of morphometric data measured on 160 brachiopod samples and there is a good correlation between the input data of the neural network model (Figs. 4 and 5). Twelve neurons in the input layer, and one neuron in the output layer were used.

Figure (6) shows the TANSIG and PURLIN transfer functions which were considered from layers one to two and from layers two to three. In order to measure the reliability of the neural network model, the mean square error performance function was used. For training the neural network model, the Bayesian training function (trainbr) was used. Based on the training algorithm and after 146 periods, the training error decreased, but the validation error increased (Fig. 7). The optimized weights and bias values were obtained when the network training was stopped when a period was at 146. The graphical images showing the gradient, mu, Gamk, ssX, and validation failure of the neural network model (Fig. 8).

The comparison between the actual and estimated locations of the *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage in the training and testing datasets of the neural network model is shown (Figs 9 and 10). The correspondence of the neural network model training samples and their associated locations for the real samples (left graph) and the training

samples (right graph) are shown (Fig. 9). There is a good correspondence between the real locations (left graph) and the estimated locations (right graph) of the brachiopods using the back-propagation neural network model. Figure (10) shows the correspondence of the neural network model for the testing samples and their associated locations for the actual samples (left graph) and the training samples (right graph). There is a very high correspondence between the left graph (real localities) and the right graph (estimated localities). Among 52 locations in the testing dataset, the neural network predicted 46 locations correctly with an accuracy of 82%.

Based on morphometric analysis of *Rhynchotrema* and *Hiscobeccus* specimens from nine geographic localities in North America, *Hiscobeccus* diversified during the Late Katian (Richmondian and Maysvillian) by developing a larger, more spherical, and more strongly lamellose shell in the epicontinental seas of Laurentia. In contrast to *Hiscobeccus*, which was common in the palaeo-equatorial epicontinental seas, *Rhynchotrema* species were common and diverse in the continental margins and platforms of the pericratonic region of Laurentia. The increase in shell sphericity can be interpreted as an adaptation of brachiopods to high-energy tropical environments such as the Cincinnati region during the Late Ordovician (Richmondian) (Jin 2001; Sohrabi & Jin 2013).

Assuming that there are some reworked brachiopods that have moved from their original location, the neural network is able to identify the original location of the brachiopods. Since the neural network has not seen the brachiopod locations in the test samples, it is able to predict the locations of the test samples based on the pattern learned in the training dataset. If there is an area with a poor fossil record and no reliable data, artificial intelligence methods can be used to identify mathematical relationships between the morphometric data of the fossils and their geographical distribution.

The dataset used in this study and the developed models are freely available to other researchers around the world, so that with the addition of more data, a more comprehensive dataset can be provided for the future studies. By completing the dataset used in this study, the capabilities of the neural network models can be increased to estimate the original location of the fossils. The model can be updated by adding more fossil samples from other geographical regions around the world, such as Iran and other regions of Gondwana, and accordingly, the neural network model can be retrained to include a wider range of localities. By increasing fossil data from other parts of the world and creating a more complete dataset, this AI model can have a larger test dataset to learn from and, as a result, be used with much higher accuracy in predicting the geographical locations of fossils and other palaeogeographic studies.

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی
سال چهل و یکم، شماره پیاپی ۹۹، شماره دوم ۱٤۰٤، ص۷۹-۹۹
تاریخ وصول: ۱٤۰۳/۰۸/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۱۲/۱۳

مقاله پژوهشی

رویکرد هوش مصنوعی در مطالعات دیرینه جغرافیایی: مطالعهٔ موردی بر بازوپایان اردویسین پسین لورنشیا

اکبر سهرابی *، استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔ علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
ak.sohrabi@tabrizu.ac.ir

چکیده

طبق فرضیهٔ قبلی که براساس مطالعات کیفی بر فونای بازوپایان اردویسین پسین انجام یافته است، گونه‌های جوان‌تر و بزرگ‌تر *Hiscobeccus*، که از فونای بازوپایان اپیکانتینتال آمریکای شمالی بود، از گونه‌های قدیمی‌تر و کوچک‌تر *Rhynchotrema*، که در مناطق پریکراتونی زندگی می‌کرد، تکامل یافته‌اند. نتایج مطالعات کمی و آنالیزهای چند متغیره، که براساس ویژگی‌های مورفولوژیکی بازوپایان اردوویسین پسین انجام یافته است، درستی این فرضیه را تأیید می‌کنند. در این مطالعه برای تعیین ارتباط ویژگی‌های مورفولوژیکی بازوپایان اردویسین پسین لورنشیا با موقعیت جغرافیایی آنها، از یک مدل هوش مصنوعی مبتنی بر شبکه‌های عصبی استفاده شد. این مدل شبکهٔ عصبی ازطریق ایجاد یک فرمول ریاضی بین ویژگی‌های مورفومتریک بازوپایان و گستردگی جغرافیایی آنها، موقعیت دیرینه جغرافیای بازوپایان را تخمین و شناسایی می‌کند. براساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، شبکهٔ عصبی در تخمین موقعیت جغرافیایی نمونه‌های آزمایشی بازوپایان، با دقت بالای ۸۲٪ عمل می‌کند. با ایجاد یک مجموعه دادهٔ جامع‌تر از پارامترهای مورفومتریکی بازوپایان لورنشیا و دیگر مناطق جهان و با استفاده از مدل شبکهٔ عصبی، موقعیت دیرینه جغرافیایی بازوپایان با ضریب اطمینان بالایی تخمین و ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: بازوپایان، شبکهٔ عصبی، مورفومتریک، دیرینه جغرافیا، اردویسین پسین.

* نویسنده مسئول

سهرابی، اکبر. ۱٤۰٤). رویکرد هوش مصنوعی در مطالعات دیرینه جغرافیایی: مطالعهٔ موردی بر بازوپایان اردویسین پسین لورنشیا. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ٤۱(۲): ۷۹-۹۹. https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

2423-8007 / © 2025 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.2025.143190.1300

مقدمه

جنس *Rhynchotrema* که یکی از جنس‌های مهم راسته Rhynchonellida در اردویسین پسین (Sandbian) شناخته می‌شود، دارای اندازهٔ کوچک تا متوسط، صدف مجدبی، چین‌خوردگی در قسمت پشتی و سالکوس برجسته در قسمت شکمی است. این جنس از بازوپایان rhynchonellide مانند *Rostricellula* در زمان Sandbian تکامل یافت و در سراسر اردویسین پسین در کراتون آمریکای شمالی (Laurentia)، به فراوانی و تنوع رسید (Jin 2001; Sohrabi and Jin 2013).

جنس *Hiscobeccus*، که یکی از اجزای مهم جانوران بنتیک دریای کم‌عمق درون‌قاره‌ای (اپیکانتینتال[1]) لورنشیا در اواخر کاتین پسین[2] شناخته می‌شود، از *Rhynchotrema* در زمان کاتین پیشین (Chatfieldian) تکامل یافت (Jin 2001; Sohrabi and Jin, 2013).

گونه‌های مختلفی از *Rhynchotrema* از بسیاری از صفحات تکتونیکی و صفحات کوچک (ترینز[3]) گزارش شده است که توزیع جهانی آن را نشان می‌دهد. این گونه‌ها از آمریکای شمالی (Titus 1986; Rice 1987; Jin 1989; Jin and Lenz 1992)، شمال اروپا (Hints and Roomusoks 1997; Hints and Harper 2003)، شمال آفریقا (Havlıcek and Massa 1973; Havlıcek 1989)، سیبری (Nikiforova and Andreeva 1961; Yadrenkina 1984, 1989)، قزاقستان (Nikitin et al. 2003, 2006)، قرقیزستان (Misius 1986; Popov et al. 2002) و استرالیا (Laurie 1991; Percival 1991; Webby 1992; Percival and Webby 1996; Savage et al. 2002) گزارش شده‌اند.

نتایج مطالعات قبلی که عمدتاً کیفی بوده‌اند، نشان می‌دهد که *Hiscobeccus* از *Rhynchotrema*، احتمالاً در اواخر زمان کاتین پیشین (Chatfieldian-middle Caradoc) تکامل یافت و به شکل یک صدف بزرگ، کروی و به‌شدت لایه‌ای (لاملوز[4]) توسعه پیدا کرد (Amsden 1983; Jin 2001).

دیرینه‌شناسی به‌طور سنتی بیشتر یک علم توصیفی و بیشتر تحقیقات پیشین مبتنی بر رویکردهای کیفی بوده است. در سال‌های اخیر، دیرینه‌شناسان از تکنیک‌های کمی بیشتری استفاده کرده‌اند که باعث شده است شناخت بهتر و جامع‌تری از روابط بین فسیل‌ها و دیرینه جغرافیا، دیرینه بوم‌شناسی، زیست‌شناسی دیرینه و روند تکاملی آنها داشته باشیم.

با وجود مطالعات اولیه، سؤالات متعددی در رابطه با اصل و نسب تکاملی *Rhynchotrema-Hiscobeccus* وجود داشته است؛ برای مثال سرعت تبدیل مورفولوژیکی از *Rhynchotrema* به *Hiscobeccus* به چه صورت بوده است؟ آیا تغییرات در اندازهٔ صدف، شکل و لایه‌بندی صدف به‌تدریج رخ داده و یا در مدت‌زمان کم اتفاق افتاده است؟ آیا در صفحهٔ تکتونیکی بزرگ لورنشیا، تغییرات مورفولوژیکی در نواحی مختلف با محیط‌های دیرینهٔ متفاوت، به‌طور مشابه رخ داده است؟ موقعیت دیرین بوم‌شناختی برای گونه‌های مختلف دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* در محیط‌های دیرینه جغرافیای مختلف چگونه بوده است؟ تغییرات سطح دریا بر تکامل دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus*، چه تأثیری داشته است؟ غول‌پیکری (gigantisim) در بازوپایان رینکونلید در اردویسین پسین، به چه صورت بوده است؟

در مطالعهٔ انجام‌گرفتهٔ Sohrabi and Jin (2013)، یک مجموعه داده[5] براساس ویژگی‌های مورفولوژیکی مربوط به نمونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* از آمریکای شمالی ایجاد شد. در این مطالعه، آنها به‌منظور تمایز در روندهای مورفولوژیکی *Rhynchotrema-Hiscobeccus* در سطح گونه، از روش تجزیه و تحلیل چند متغیره (multivariate analysis) استفاده کردند (Sohrabi and Jin 2013). به‌منظور بررسی تغییرات مورفولوژیکی (برای مثال افزایش در اندازهٔ صدف، کرویت[6] و لایه‌بندی) از *Rhynchotrema* به *Hiscobeccus*، آنها پارامترهای ثانویه را از اندازه‌گیری‌های اولیه استخراج کردند. براساس این پارامترهای ثانویه، مانند شاخص اندازهٔ پوسته[7] (SSI)، شاخص تحدب

[1] epicontinental
[2] late Katian
[3] terranes
[4] lamellose
[5] dataset
[6] globosity
[7] shell size index

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

صدف[1] (SCI)، شاخص لایه‌بندی پوسته[2] (SLI) و تراکم لایهٔ پوسته[3] (SLD)، آنها تفاوت بین اشکال جوان‌تر و قدیمی‌تر *Rhynchotrema* و اشکال اولیه *Hiscobeccus* را در اوایل کاتین مطالعه کردند. همچنین آنها براساس تغییرات مورفولوژیکی، روابط بین اشکال مختلف *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* را در مناطق مختلف و با الگوی توزیع دیرینه‌جغرافیایی گونه‌های متفاوت بررسی کردند.

با توجه به اینکه در مطالعات قبلی، نمونه‌های فسیلی بازوپایان اردویسین پسین مناطق مختلف آمریکای شمالی به‌صورت کیفی و کمی بررسی شده‌اند و همچنین به‌علت اینکه یک مجموعه دادهٔ دقیق مربوط به ویژگی‌های مورفولوژیکی فسیل بازوپایان از بیشتر مناطق مختلف آمریکای شمالی قبلاً گردآوری شده است، درنتیجه در مطالعهٔ حاضر، داده‌های مربوط به بازوپایان آمریکای شمالی برای بررسی و آنالیز استفاده شدند. بیشتر مطالعات انجام‌یافته بر بازوپایان اردویسین پسین مناطق مختلف ایران، که در زمان اردویسین پسین قسمتی از ابرقاره گندوانا را شامل می‌شد، به‌صورت کیفی بوده است و همچنین داده‌های کمی مربوط به ویژگی‌های مورفولوژیکی بازوپایان ایران بسیار محدود و در بعضی مناطق انجام نیافته است؛ بنابراین در این مطالعه بازوپایان اردویسین پسین ایران به کار نرفتند.

در این مطالعه از رویکرد هوش مصنوعی به‌منظور بررسی و تجزیه و تحلیل دیرینه جغرافیا و روند تکاملی دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* در طول اردویسین پسین در آمریکای شمالی (لورنشیا) استفاده شده است. استفاده از هوش مصنوعی مبتنی بر شبکهٔ عصبی، باعث می‌شود تا دیرینه‌شناسان درک بهتر و کامل‌تری از توزیع دیرینه جغرافیایی فسیل بازوپایان و روند تکاملی آنها در فضا و زمان داشته باشند. با افزودن نمونه‌های بیشتری از بازوپایان اردویسین پسین از دیگر مکان‌های جغرافیایی در سراسر جهان، به مجموعه دادهٔ استفاده‌شده در این مطالعه، مجموعه دادهٔ جامع‌تری برای مطالعات آینده ایجاد می‌شود و درنتیجه قدرت پیش‌بینی‌پذیری مدل شبکهٔ عصبی برای پوشش مکان‌های وسیع‌تر افزایش می‌یابد.

از کاربرد روش‌های محاسباتی مبتنی بر نظریهٔ اطلاعات در دیرینه‌شناسی، به مطالعات Tasch (1969) اشاره می‌شود. در دیگر مطالعهٔ انجام‌یافته (Malmgren and Nordlund 1997)، شبکهٔ عصبی برای پیش‌بینی دمای سطحی آب دریا از فراوانی نسبی گونه‌های روزن‌داران پلانکتون در جنوب اقیانوس هند به کار گرفته شد. از کاربرد شبکه‌های عصبی پویا بر کوکولیت‌ها، به مطالعهٔ Beaufort and Dollfus (2004) اشاره می‌شود که نتایج پذیرفتنی به دست آوردند. در مطالعهٔ انجام‌یافتهٔ Anemone et al. (2011)، از شبکهٔ عصبی مصنوعی[4] برای تخمین مکان‌های فسیلی پربار در نهشته‌های پالئوسن و ائوسن استفاده شد.

هوش مصنوعی یک اصطلاح کلی است و برای همهٔ روش‌های محاسباتی به کار می‌رود که توانایی یادگیری از هر الگوی بین مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی را دارد. هوش مصنوعی شامل تکنیک‌های مختلفی از قبیل شبکه‌های عصبی (neural networks)، سیستم‌های فازی (fuzzy systems) و سیستم‌های عصبی فازی ترکیبی (hybrid neuro-fuzzy systems) است. در این مطالعه، از یک شبکهٔ عصبی برای تخمین مکانی دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* و همچنین تجزیه و تحلیل دیرینه جغرافیایی آنها استفاده شد.

یک مدل شبکهٔ عصبی از سه لایه شامل یک لایهٔ ورودی، یک لایهٔ پنهان و یک لایهٔ خروجی تشکیل شده است. هر لایه شامل مجموعه‌ای از متغیرها به نام نورون (neurons) است (Kadkhodaie et al. 2010; Johnson et al. 2018). در مطالعهٔ بازوپایان، داده‌های مورفومتریک به‌عنوان نورون در لایهٔ ورودی قرار می‌گیرند و مکان‌های جغرافیایی مرتبط با آنها در لایهٔ خروجی تنظیم می‌شوند. تعداد نورون‌ها (متغیرها) در لایه‌های پنهان با آزمون و خطا تعیین می‌شود تا زمانی که کمترین خطا به دست آید. انتشار برگشتی (Back-propagation) نوعی شبکهٔ عصبی است که مقادیر ورودی را

[1] shell convexity index
[2] shell lamellosity index
[3] shell lamella density
[4] artificial neural networks

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

ازطریق شبکه به جلو می‌فرستد و سپس تفاوت بین هدف پیش‌بینی‌شده و هدف مدنظر مربوطه را از داده‌های آموزشی محاسبه می‌کند؛ سپس این خطا به‌سمت عقب در مدل منتشر می‌شود و وزن شبکه در طی چند بار تکرار تنظیم می‌شود که به آن دورهٔ (epoch) می‌گویند. یادگیری زمانی متوقف می‌شود که مقادیر هدف محاسبه‌شده به بهترین وجه به مقادیر مدنظر نزدیک شود (Bhatt and Helle 1999).

موقعیت زمین‌شناسی

نمونه‌های بازوپایان در این مطالعه از نه منطقهٔ جغرافیایی در آمریکای شمالی شامل منطقهٔ دریاچهٔ سیمکو[1] (انتاریو)، منطقهٔ اتاوا[2]، خلیج کوئینته[3] (جنوب شرقی انتاریو)، شمال کوه‌های راکی در بریتیش کلمبیا[4]، جنوب منیتوبا[5]، جزیرهٔ بافین[6]، مینه‌سوتا[7] و منطقهٔ سینسیناتی[8] شامل منطقهٔ سه ایالتی اوهایو، کنتاکی و ایندیانا[9] است (شکل ۱) (Brett et al. 2004; Bergstrom 1971; Mitchell and Bergstrom 1991). مجموعه دادهٔ مربوط به این بازوپایان در مطالعات قبلی (Sohrabi and Jin 2013) گردآوری شده است.

شکل (۲) سازندهای زمین‌شناسی مربوط به نمونه‌های بازوپایان از نه منطقهٔ جغرافیایی در آمریکای شمالی را نشان می‌دهد. نمونه‌های بازوپایان مینه‌سوتا از قسمت Member McGregor از سازند Platteville هستند. این عضو پر فسیل است و حاوی توالی‌های کربناتهٔ کم‌عمق دریایی در جنوب شرقی مینه‌سوتا است (Ojakangas and Matsch 1982; Mossler and Bloomgre 1992). نمونه‌های *Rhynchotrema* استفاده‌شده در این مطالعه از منطقهٔ سینسیناتی متعلق به عضو شیلی Bromley از سازند Lexington هستند. در منطقهٔ دریاچهٔ سیمکو، انتاریو، سازند Verulam عمدتاً از سنگ‌آهک و شیل بین لایه‌ای تشکیل شده است و بازوپایان و دیگر فسیل‌های صدفی فراوان‌اند و فسیل *Rhynchotrema* در این سازند رایج و به‌خوبی حفظ شده‌اند (Melchin et al. 1994; Brett and Rudkin 1997). در منطقهٔ اتاوا، سازند Verulam از سنگ‌آهک با شیل‌های بین لایه‌ای مربوط به سن late Chatfielddian تشکیل و حاوی بازوپایان فراوانی ازجمله فسیل‌های *Rhynchotrema* به‌خوبی حفظ شده است (Wilson 1946; Barnes et al. 1981). در خلیج کوئینته، جنوب شرقی انتاریو، نمونهٔ فسیلی *Rhynchotrema* از سازند Verulam هستند که حاوی سنگ‌آهک با شیل‌های بین لایه‌ای است (Carson 1980, 1982). در شمال کوه‌های راکی، بریتیش کلمبیا، *Hiscobeccus mackenziensis*، قدیمی‌ترین نوع *Hiscobeccus* شناخته‌شده، گزارش شده است (Jin and Norford 1996). در جزیرهٔ بافین نمونه‌های *Hiscobeccus* جمع‌آوری‌شده از رسوبات اردویسین بالایی (Edenian–Maysvilian) از سازند Amadjuak هستند که از سنگ‌های آهکی و شیل‌هایی با لایهٔ نازک تا ضخیم تشکیل شده است (Sanford and Grant 2000; Bolton 2000). در منطقهٔ سینسیناتی (سه ایالت اوهایو، ایندیانا و کنتاکی)، لایه‌های با سن Richmondian مانند سازندهای Waynesville و Liberty شامل *Hiscobeccus capax* است که رایج‌ترین نوع *Hiscobeccus* است. لایه‌های انباشته‌شده در منطقهٔ سینسیناتی با یک دریای کم‌عمق درون‌قاره‌ای (اپیکانتینتال) پوشانده شده بود (Holland 1993, 2008). در جنوب منیتوبا، نمونه‌های بازوپایان *H. gigas* از رسوبات کربناتهٔ اردویسین بالایی (Edenian to Gamachian)، که عضو Gunn از سازند Stony Mountain را شامل می‌شود، جمع‌آوری شده‌اند (Elias 1991; Elias and Young 2004).

مواد و روش‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه براساس مجموعهٔ داده‌های مورفومتریک مربوط به نمونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* است که در مطالعات قبلی گردآوری شده است (Sohrabi and Jin 2013). این مجموعه داده شامل اندازه‌گیری

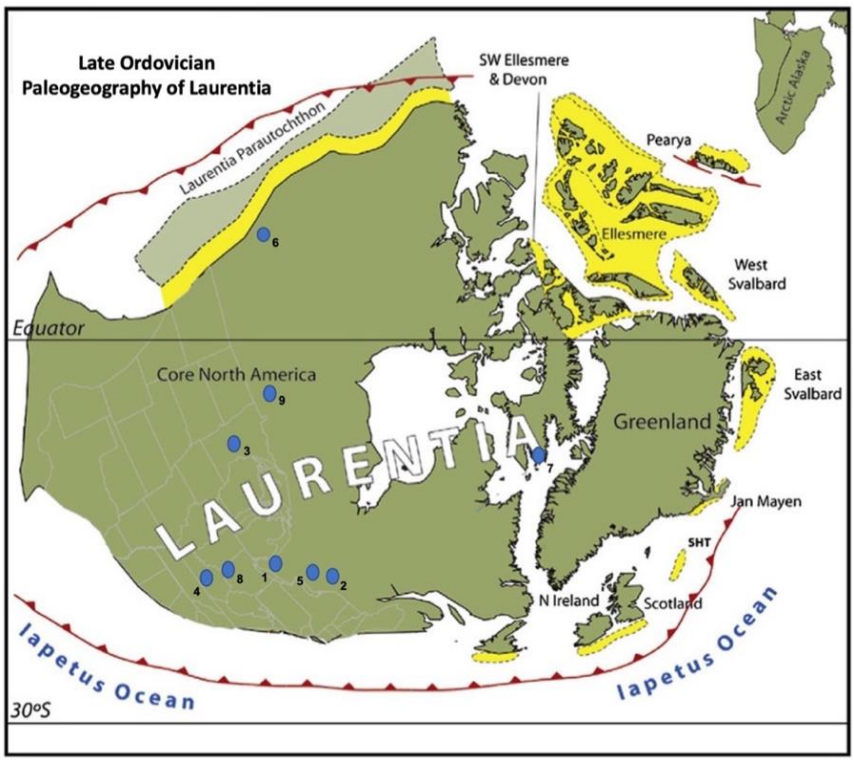
[1] Simcoe Lake
[2] Ottawa area
[3] Bay of Quinte
[4] British Colombia
[5] southern Manitoba
[6] Baffin Island
[7] Minnesota
[8] Cincinnati region
[9] tri-state region of Ohio, Kentucky, and Indiana

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

کاراکترهای بیومتریک (شکل ۳) از نمونه‌های rhynchonellide با سن اردویسین بالایی(upper Sandbian– upper Katian) از نه منطقه در آمریکای شمالی است.

نمونه‌های مربوط به *Rhynchotrema* در این مطالعه به شرح زیر است: نمونه‌های Mn-10 از عضو McGregor سازند Platteville، سن upper Sandbian، مینه‌سوتا؛ نمونه‌های W (NAPC-9) از عضو Bromley، سازند Lexington، سن early Katian، کنتاکی؛ نمونه‌های (0-2) Mara-1 از سازند Verulam، سن early Katian ، منطقه Lake Simcoe، انتاریو؛ نمونه‌های Ottawa-۱ مربوط به سازند Verulam، سن early Katian، منطقهٔ اتاوا؛ نمونه‌های GSC Loc. 1603 از سازند Verulam، سن early Katian ، Bay of Quinte، جنوب انتاریو.

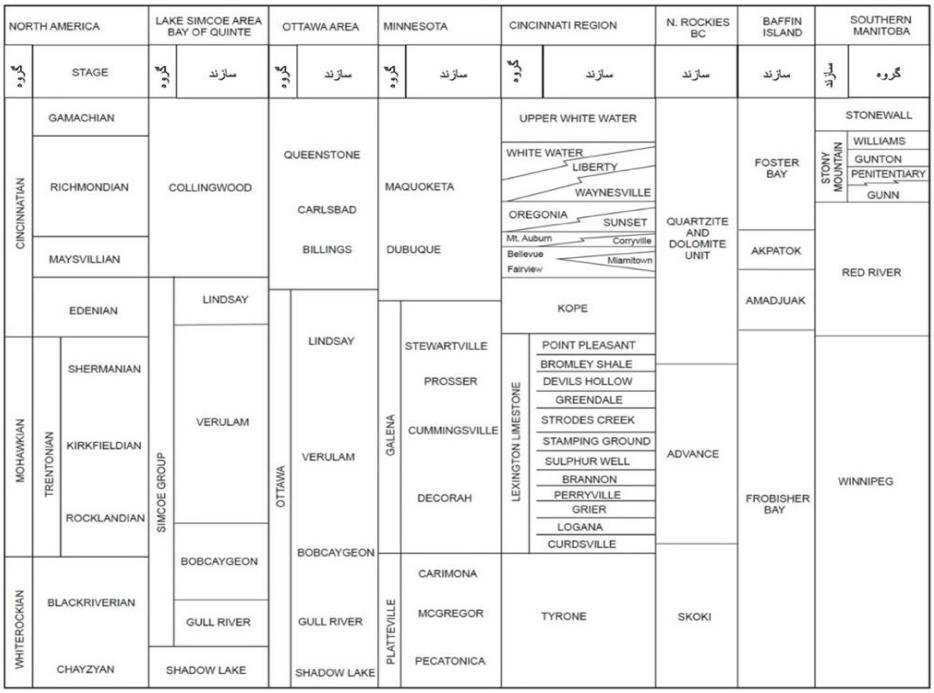
نمونه‌های مربوط به *Hiscobeccus* در این مطالعه، به شرح زیر است: نمونه‌های GSC Loc. 205924 از سازند Advance Formation، سن Trentonian، شمال کوه‌های راکی، بریتیش کلمبیا؛ نمونه‌های GSC Loc. 113531 از سازند Amadjuak، سن Edenian– Maysvilian، جزیرهٔ بافین؛ نمونه‌های GSC Loc. C-205929 از عضو Gunn، سازند Stony Mountain، سن Richmondian، جنوب منیتوبا؛ نمونه‌های W (C-7a-77) از سازندهای Waynesville و Liberty، سن Richmondian، اوهایو.



شکل ۱- بازسازی جغرافیایی دیرینهٔ اردوویسین اواخر آمریکای شمالی (**Laurentia**) نقاط ۱ تا ۹ نشان‌دهندهٔ مکان‌های جمع‌آوری نمونه‌های بازوپایان برای این مطالعه‌اند: ۱: منطقهٔ دریاچهٔ سیمکو، ۲: منطقهٔ اتاوا؛ ۳: مینسوتا؛ ٤: منطقهٔ سینسیناتی؛ ٥: خلیج کوئینت؛ ٦: شمال کوه‌های راکی؛ ۷: جزیرهٔ بافین؛ ۸: اوهایو؛ ۹: مانیتوبا (براساس Cocks and Torsvik 2011; Sohrabi and Jin 2013)

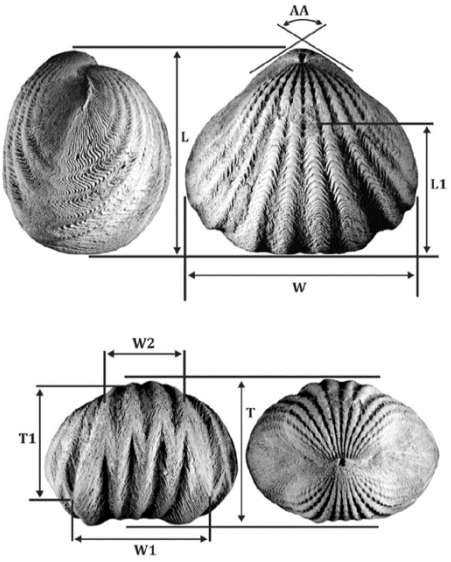
Fig 1- Late Ordovician paleogeographic reconstruction of Laurentia. Numbers 1-9 show the location of the brachiopods samples collected for this study: 1: Lake Simcoe are, 2: Ottawa area, 3: Minnesota, 4: Cincinnati region, 5: Bay of Quinte, 6: Northern Rocky Mountain, 7: Baffin Island, 8: Ohio, 9: Manitoba (after Cocks and Trosvik 2011; Sohrabi and Jin 2013).

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300



شکل ۲- نمودار چینه‌شناسی اردوویسین میانی و پسین مربوط به نه منطقهٔ جغرافیایی در آمریکای شمالی (براساس Barnes et al. 1981; Williams and Telford 1986; Sanford and Grant 2000; Ludvigson et al. 2004; Holland and Patzkowsky 2007; Young et al. 2008)

Fig 2- Middle and Late Ordovician stratigraphic chart of nine localities of North America (after Barnes et al. 1981; Williams and Telford 1986; Sanford and Grant 2000; Ludvigson et al. 2004; Holland and Patzkowsky 2007; Young et al. 2008)



شکل ۳- اندازه‌گیری بیومتریک صدف خارجی بازوپایان رینکونلید (Sohrabi and Jin 2013)

Fig 3- Biometric measurement of external shell of rhynchonellide brachiopods (Sohrabi and Jin 2013)

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

اندازه‌گیری‌های بیومتریک

داده‌های مورفولوژیکی به دست آمده از 160 نمونه بازوپایان برای تجزیه و تحلیل تغییرات مورفولوژیکی و روندهای تکاملی گونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* با استفاده از روش تجزیه و تحلیل چند متغیره (multivariate analysis) استفاده شد. برای ایجاد یک مجموعه داده، ۱۶۰ نمونه از بازوپایان که شامل گونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* مربوط به ۱۲ منطقهٔ جغرافیایی از آمریکای شمالی‌اند، در ستون عمودی جدول داده‌ای و نه متغیر مربوط به اندازه‌گیری بیومتریک مرفولوژی صدف بازوپایان در ستون افقی جدول داده‌ای قرار گرفت.

لندازه‌گیری بیومتریک برای مورفولوژی صدف بازوپایان شامل موارد زیر است:

طول صدف (L): حداکثر فاصلهٔ خطی از رأس صدف تا حاشیهٔ قدامی صدف؛

عرض پوسته (W): حداکثر فاصلهٔ خطی از سمت راست به‌سمت چپ صدف؛

ضخامت صدف (T): اندازه‌گیری خطی بالاترین نقاط دو صدف عمود بر صفحهٔ تقاطع؛

عمق شیار (sulcus) (T1): فاصلهٔ خطی بین تاج چین‌خوردگی و تاج costa، در حاشیهٔ قدامی؛

حداکثر عرض sulcus (W1): فاصلهٔ خطی بین تاج‌های دو costae؛

عرض کف شیار sulcus (W2): فاصلهٔ خطی بین شیارهای بین تاج دو costa؛

زاویهٔ آپیکال (AA): اندازه‌گیری زاویهٔ بیک (beak) شکمی[1] در نمای شکمی؛

طول صدف پوشانده‌شده با لاملا[2] (L1): اندازه‌گیری فاصلهٔ خطی صدف پوشیده‌شده با لاملا از لاملای اول از رأس صدف تا حاشیهٔ قدامی؛

تعداد لاملا (Ln): تعداد کل لاملاهای پوشش‌دهندهٔ صدف خارجی.

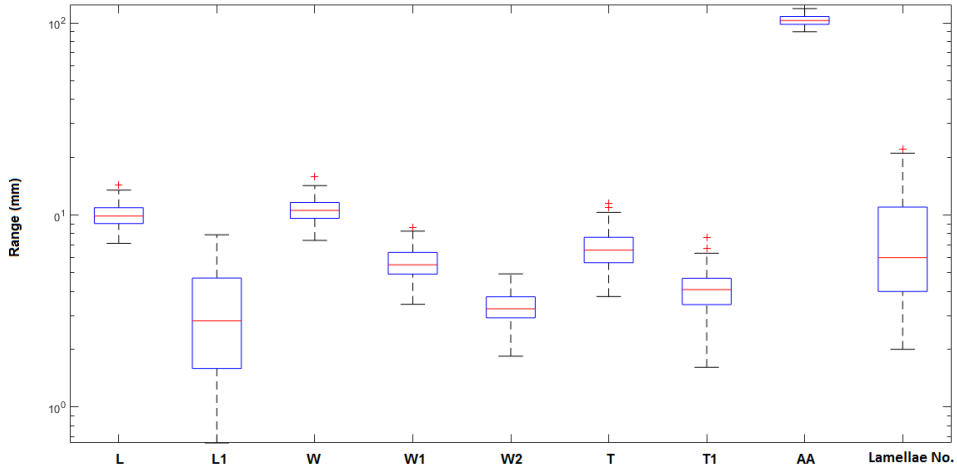
این مجموعه دادهٔ گردآوری‌شده که براساس اندازه‌گیری بیومتریک است، برای بررسی تغییرات مورفولوژیکی، روندهای تکاملی و جغرافیای دیرینه گونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* در Laurentia با روش هوش مصنوعی بررسی شد.

مدل شبکهٔ عصبی

در مطالعهٔ حاضر، یک مدل شبکهٔ عصبی[3] براساس جغرافیای دیرینه و تحلیل روند تکاملی جانوران بازوپایان در آمریکای شمالی توسعه داده شد و یک مدل شبکهٔ عصبی پس انتشار[4] برای تخمین موقعیت بازوپایان *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus*، براساس مجموعه‌ای از نه دادهٔ مورفومتریک ایجاد شد (شکل ٤) (Nouri- Taleghani et al. 2015; Abdizadeh et al. 2017; Farzi et al. 2017). در این روش، بعد از ورود مجموعه داده، یک مدل از هوش مصنوعی ویژگی‌های مورفولوژیکی بازوپایان مربوط به هر منطقهٔ جغرافیایی را یادگیری می‌کند و سپس برای نمونه‌های جدید، موقعیت جغرافیایی بازوپایان را تخمین می‌زند. شبکهٔ عصبی سعی می‌کند این داده‌های مورفومتریک را به مکان آنها مرتبط کند تا در آینده با ارائهٔ اندازه‌های مورفومتریک جدید به مدل شبکهٔ عصبی، موقعیت آن را پیش‌بینی کند. در صورتی که مکان‌های اولیهٔ بازوپایان در اثر عوامل مختلف جابه‌جا شده باشند، شبکه‌های عصبی مکان اولیهٔ آن بازوپایان را با دقت بالا تخمین می‌زنند. در این روش، ورودی (input) (داده‌های مورفومتریک) و خروجی (output) (مکان بازوپایان) به یک مجموعهٔ آموزشی (برای یادگیری الگوهای بین ورودی و خروجی)، یک مجموعهٔ اعتبارسنجی (برای جلوگیری از آموزش بیش از حد) و یک مجموعهٔ آزمایشی (برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکهٔ عصبی) تقسیم می‌شوند.

[1] ventral
[2] lamella
[3] Neural network model
[4] a back-propagation neural network model

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300



شکل ٤- نمودار جعبه‌ای (box plot) نشان‌دهندهٔ محدودهٔ آماری نه پارامتر مورفومتریک دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus*

Fig 4- Box plot showing the statistical range of nine morphometric parameters of *Rhynchotrema-Hiscobessue* lineage

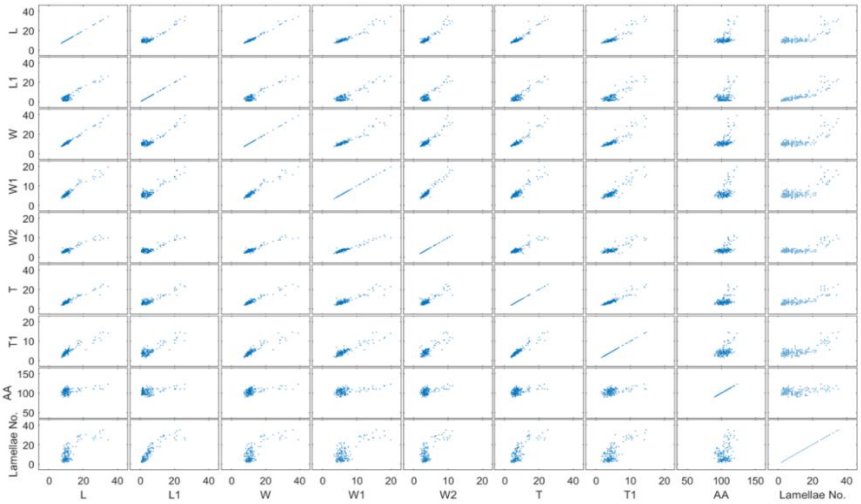
مکان‌های شناسایی‌شده براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بازوپایان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* عبارت‌اند از: 15862 (Baffin)؛ 0–104507 (Baffin)؛ 0–104517 (Baffin)؛ GSC 113531–113541 (Baffin)؛ GSC 205924 (Advance Formation, Rocky Mountains)، GSC 1603 (Bay of Quinte, Ontario)، NAPC-Pre Stop 1B (Bromley Member, Lexington limestone, Kentucky)، Ottawa-1 (Ottawa)، 1(0–2) (Lake Mara area, Ontario)، Simcoe-10 (Minnesota)، GSC Loc. C-205929 (Stony Mountain, Manitoba)، 77 -C-7a (Waynesville and Liberty, Ohio).

کدهای ۱ تا ۱۲ به ترتیب به مکان‌های فوق اختصاص داده شد تا ازطریق برنامهٔ شبکهٔ عصبی در نرم‌افزار متلب شناسایی شوند. شایان ذکر است که در آموزش هر مدل شبکهٔ عصبی، بیشتر نمونه‌ها باید به مجموعه دادهٔ آموزشی اختصاص داده شوند. معمولاً دو سوم داده‌ها برای آموزش و یک سوم برای اعتبارسنجی و آزمایش عملکرد پیش‌بینی مدل شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. نسبت‌ها انعطاف‌پذیرند و گاهی اوقات براساس تجربه به دست می‌آیند تا زمانی که یک مدل هوشمند قوی ایجاد کنیم. برای این منظور، از مجموع ۱۶۰ نمونه بازوپایان، تعداد ۵۲ نمونه (۳۳ درصد) به‌صورت رندم و تصادفی به‌عنوان نمونهٔ آزمایشی در نظر گرفته و ۱۰۸ نمونه هم برای آموزش مدل شبکهٔ عصبی استفاده شد. مجموعه دادهٔ ورودی داده‌های مورفومتریک بازویوپودهای مطالعه‌شده شامل L ، L1، W، W1، W2، T، T1، AA و LN هستند (شکل ۳). محدودهٔ داده‌های مورفومتریک اندازه‌گیری‌شده در شکل (٤) نشان داده شده است. نمودار ماتریس نشان داده شده در شکل (۵) برای به تصویر کشیدن روابط متقابل داده‌های ریخت‌سنجی اندازه‌گیری‌شده بر ۱۶۰ نمونه از بازوپایان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین داده‌های ورودی مدل شبکهٔ عصبی همبستگی خوبی وجود دارد. بر این اساس، ۱۲ نورون در لایهٔ ورودی و یک نورون در لایهٔ خروجی به کار گرفته شد. توابع انتقال TANSIG و PURLIN به ترتیب از لایهٔ یک به دو و از لایهٔ دو به سه در نظر گرفته شدند (شکل ٦). تابع عملکرد میانگین توان خطا (Mean Square Error) برای سنجش قابلیت اطمینان مدل شبکهٔ عصبی استفاده شد. برای آموزش مدل شبکهٔ عصبی از تابع آموزش تنظیم بیزی[1] (trainbr) استفاده شد. الگوریتم آموزشی اجرا شد و همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، پس از ١٤٦ دوره، خطای آموزشی همچنان کاهش می‌یابد؛ اما خطای اعتبارسنجی شروع

[1] Bayesian Regularization training

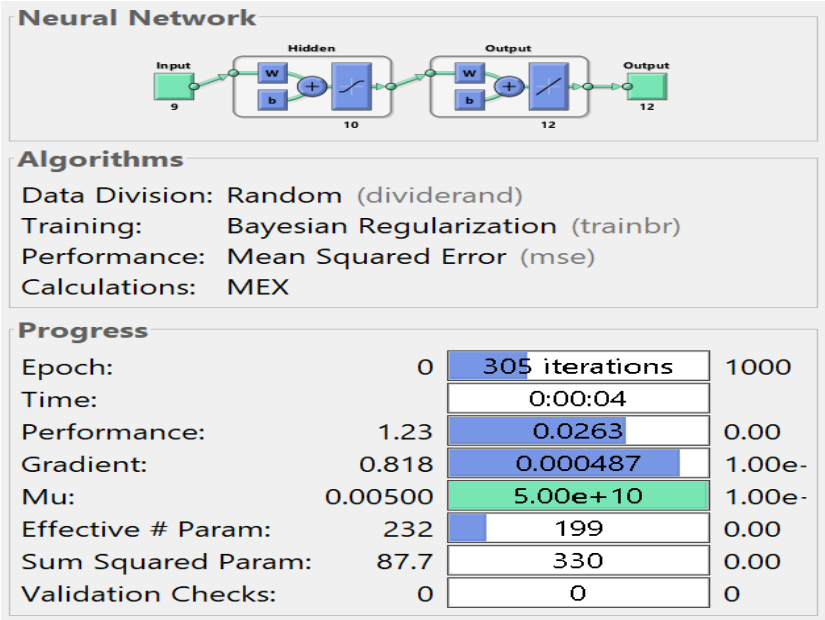
https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

به افزایش می‌کند. بر این اســـاس، آموزش شـــبکه در دوره = ۱٤٦ متوقف شـد و وزن‌ها و مقادیر بایاس بهینه‌سـازی‌شـده به دســـت آمـد. مقـدار تـابع عملکرد، دوره = ۱٤٦، بـه ۰.۰۲٦ می‌رسـد. تصـاویر گرافیکی نشـان‌دهندهٔ گرادیان، mu، Gamk، ssX و اعتبارسـنجی شـکسـت مدل شـبکهٔ عصـبی در شـکل (۸) نشان داده شده است.



شـــکل ۵- ماتریس پلات نشـــان‌دهندهٔ روابط متقابل اندازه‌گیری‌های مورفولوژیکی مختلف دودمان *Rhynchotrema–Hiscobeccus*

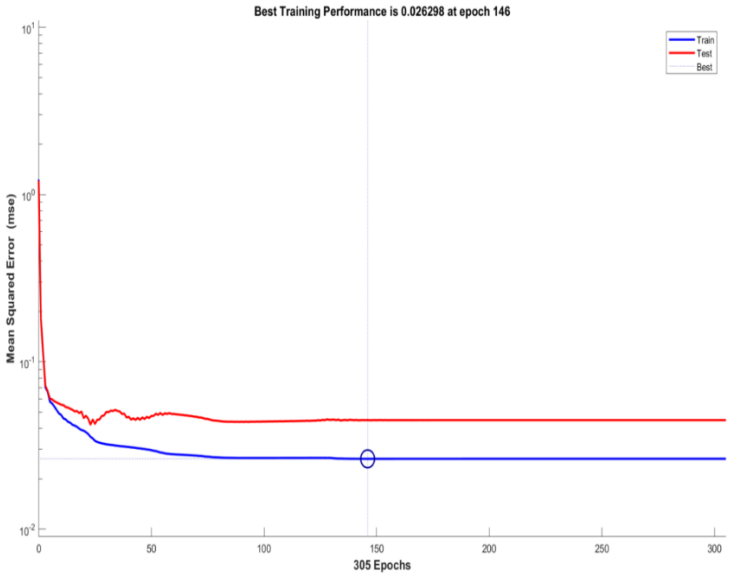
Fig 5- Matrix plot showing the inter relationships of different morphological measurments of *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage



شکل ۶- نمودار نشان‌دهندهٔ ساختار و تنظیمات پارامتر مدل شبکهٔ عصبی طراحی‌شده در این مطالعه برای پیش‌بینی محل فونای *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus*

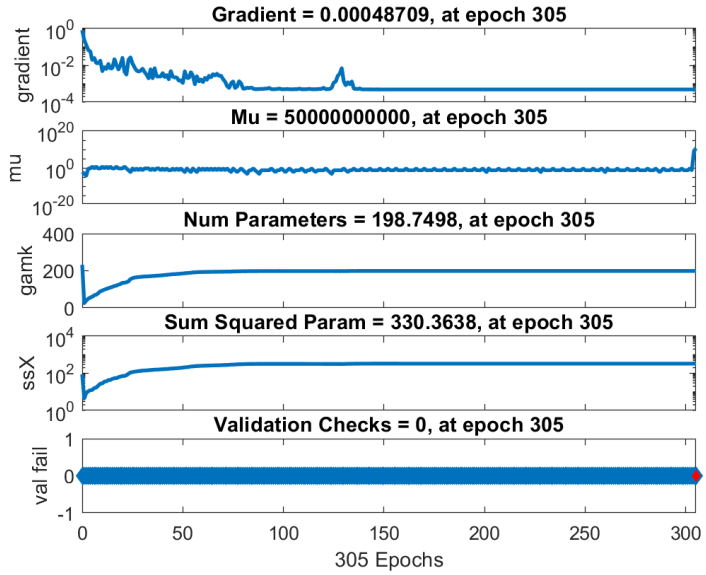
Fig 6- Plot showing the architecture and parameters setting of the neural network model designed in this study in order to predict the localities of *Rhynchotrema* and *Hiscobeccus* fauna

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300



شکل ۷- نمودار نشان‌دهنده عملکرد مدل شبکهٔ عصبی در مقابل دوره‌های آموزشی وزن شبکه و مقادیر بایاس (bias) در دورهٔ (epoch) = ۱٤٦ بهینه شدند؛ جایی که میانگین توان خطا (mean squared error) به ۰.۰۲٦۳ می‌رسد.

Fig 7- Plot shows the performance of neural network model versus training epochs. The network weighs and bias values were optimized at epoch= 146, where mean squared error reaches 0.0263.



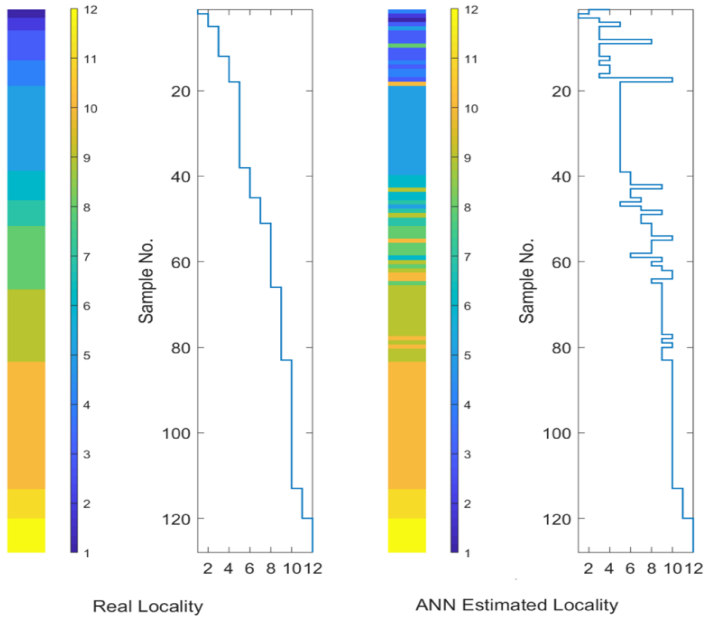
شکل ۸- تصاویر گرافیکی نشان‌دهندهٔ گرادیان mu، gamk، ssX و اعتبارسنجی مدل شبکهٔ عصبی

Fig 8- Graphic illustration showing the gradient, mu, gamk, ssX, and validation fail of the neural network model

مقایسهٔ بین مکان واقعی و تخمینی دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* در مجموعه دادهٔ آموزشی و آزمایشی مدل شبکهٔ عصبی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در شکل (۹) تطابق نمونه‌های آموزشی مدل شبکهٔ عصبی و مکان‌های مرتبط با آنها برای نمونه‌های واقعی (نمودار سمت چپ) و نمونه‌های آموزشی (نمودار سمت

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

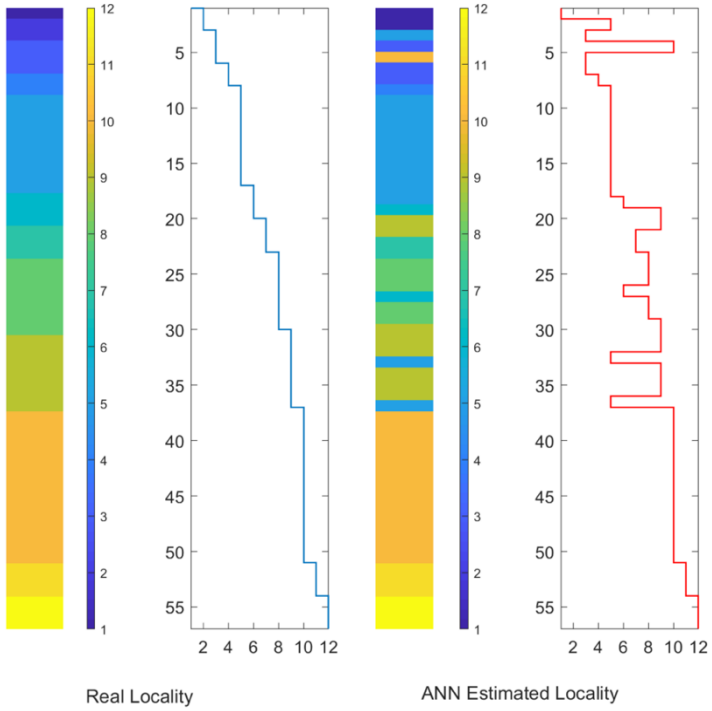
راست) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با استفاده از مدل شبکهٔ عصبی پس انتشار طراحی‌شده در این مطالعه، تطابق خوبی بین مکان‌های واقعی (نمودار سمت چپ) و مکان‌های تخمینی (نمودار سمت راست) بازوپایان وجود دارد. شکل (۱۰) تطابق نمونه‌های آزمایشی مدل شبکهٔ عصبی و مکان‌های مرتبط با آنها را برای نمونه‌های واقعی (نمودار سمت چپ) و نمونه‌های آموزشی (نمودار سمت راست) نشان داده می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، تطابق بسیار بالایی بین نمودار سمت چپ (مناطق واقعی) و نمودار سمت راست (نمونه‌های تخمینی) دیده می‌شود. از ۵۲ مکان موجود در مجموعه دادهٔ آزمایشی، شبکهٔ عصبی با موفقیت ٤٦ مکان را به‌درستی و با دقت ۸۲٪ پیش‌بینی کرد.



شکل ۹- مقایسهٔ بین محل واقعی و تخمینی دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* در مجموعه داده‌های آموزشی مدل شبکهٔ عصبی کدهای رنگی ۱ تا ۱۲ به ترتیب: 15862 (Baffin)؛ 0–104507 (Baffin)؛ 0–104517 (Baffin)؛ GSC 113531–113541 (Baffin)؛ GSC 205924 (Advance Formation, Rocky Mountains)؛ GSC 1603 (Bay of Quinte, Ontario)؛ NAPC-Pre Stop 1B (Bromley Member, Lexington limestone, Kentucky)؛ Ottawa-1 (Ottawa)؛ Mara 1(0–2) (Lake Simcoe area, Ontario)؛ MN-10 (Minnesota)؛ GSC Loc. C-205929 (Stony Mountain, Manitoba)؛ C-7a- 77 (Waynesville and Liberty, Ohio)

Fig 9- a comparison between real and estimated locality of *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage in testing dataset of neural network model. The Color codes 1 to 12: 15862 (Baffin); 0–104507 (Baffin); 0–104517 (Baffin); GSC 113531–113541 (Baffin); GSC 205924 (Advance Formation, Rocky Mountains); GSC 1603 (Bay of Quinte, Ontario); NAPC-Pre Stop 1B (Bromley Member, Lexington limestone, Kentucky); Ottawa-1 (Ottawa); Mara (Lake Simcoe area, Ontario); MN-10 (Minnesota); GSC Loc. C-205929 ((Stony Mountain, Manitoba); C-7a- 77 (Waynesville and Liberty, Ohio)

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300



شـــکل ۱۰- مقایســـهٔ بین موقعیت واقعی و تخمینی دودمان ***Rhynchotrema-Hiscobeccus*** در آزمایش مجموعه دادهٔ مدل شبکهٔ عصبی کدهای رنگی ۱ تا ۱۲ به ترتیب: **15862 (Baffin)؛ 0–104507 (Baffin)؛ 0–104517 (Baffin)؛ GSC 113531–113541 (Baffin)؛ GSC 205924 (Advance Formation, Rocky Mountains)؛ GSC 1603 (Bay of Quinte, Ontario)؛ NAPC-Pre Stop 1B (Bromley Member, Lexington limestone, Kentucky)؛ Ottawa-1 (Ottawa)؛ (Lake Mara 1(0–2)؛ GSC Loc. C-205929 (Stony Mountain, Manitoba)؛ MN-10 (Minnesota)؛ 77- C-7a (Waynesville and Liberty, Ohio)**

Fig 10- a comparison between real and estimated locality of *Rhynchotrema-Hiscobeccus* lineage in testing dataset of neural network model. The Color codes 1 to 12: 15862 (Baffin); 0–104507 (Baffin); 0–104517 (Baffin); GSC 113531–113541 (Baffin); GSC 205924 (Advance Formation, Rocky Mountains); GSC 1603 (Bay of Quinte, Ontario); NAPC-Pre Stop 1B (Bromley Member, Lexington limestone, Kentucky); Ottawa-1 (Ottawa); Mara (Lake Simcoe area, Ontario); MN-10 (Minnesota); GSC Loc. C-205929 ((Stony Mountain, Manitoba); C-7a- 77 (Waynesville and Liberty, Ohio)

بحث

مطالعهٔ حاضر شامل نمونه‌های بازوپایان از نه منطقهٔ جغرافیایی در آمریکای شـــمالی، ازجمله مینه ســوتا، منطقهٔ ســینســیناتی (کنتاکی و اوهایو)، منطقهٔ دریاچهٔ ســـیمکو (انتاریو)، منطقهٔ اتاوا، خلیج کوئینته (جنوب شـــرقی انتاریو)، شـــمال کوه‌های راکی (بریتیش کلمبیا)، جزیرهٔ بافین و جنوب منیتوبا‌ســـت. مجموعـه‌ای از داده‌هـای مورفومتریـک برای بـازوپـایـان از محل‌های ذکرشـــده تهیه شـــد. شـــبکهٔ عصـــبی ســـعی می‌کند داده‌های مورفومتریک مربوط به گونه‌های بازوپایان را به محل جغرافیایی آنها مرتبط کند تا در آینده با ارائهٔ اندازه‌های

مورفومتریک به مدل شبکهٔ عصبی، موقعیت آن را پیش‌بینی کند.

بر فرض اگر بازوپایان از محل اصلی خود به محل دیگر جابه‌جا شده باشند، شبکه‌های عصبی قادرند تا محل اصلی بازوپایان را شناسایی کنند. با توجه به اینکه شبکهٔ عصبی مکان‌های بازوپایان را در نمونه‌های آزمایشی ندیده است؛ درنتیجه براساس الگوی آموخته‌شده در مجموعه داده‌های آموزشی، قادر به پیش‌بینی مکان‌های نمونهٔ آزمایشی است.

مقایسهٔ بین مکان واقعی و تخمینی دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* در آموزش و مجموعه دادهٔ آزمایشی مدل شبکهٔ عصبی در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با استفاده از مدل شبکهٔ عصبی پس انتشار طراحی‌شده در این مطالعه، تطابق خوبی بین مکان‌های واقعی و تخمینی بازوپایان وجود دارد. از ۵۷ مکان جغرافیایی موجود در مجموعه دادهٔ آزمایشی، شبکهٔ عصبی با موفقیت ٤٦ مکان را به‌درستی با دقت 82% پیش‌بینی کرد. در منطقه‌ای با سوابق فسیلی ضعیف و بدون داده‌های مطمئن، تکنیک‌های هوش مصنوعی روشی جایگزین برای پرکردن شکاف است و همچنین به شناسایی روابط ریاضی بین داده‌های مورفومتریک فسیل‌های بازوپایان اردویسین پسین و توزیع جغرافیایی آنها کمک می‌کند.

مجموعه داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه و مدل‌های توسعه‌یافته به‌صورت آزاد در دسترس دیگر محققان در سراسر جهان‌اند تا با اضافه‌شدن داده‌های بیشتر، مجموعه دادهٔ جامع‌تری در مطالعات مربوط به کاربرد هوش مصنوعی در دیرینه‌شناسی فراهم شود. ازطریق تکمیل مجموعه داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه، قابلیت‌های مدل‌های شبکهٔ عصبی برای تخمین مکان‌های بیشتر افزایش می‌یابد. این مدل با افزودن نمونه‌های اردویسین پسین از دیگر سایت‌های جغرافیایی در سراسر جهان، از قبیل ایران و دیگر مناطق گندوانا به‌روز و بر این اساس، مدل شبکهٔ عصبی را برای گنجاندن مکان‌های وسیع‌تری بازآموزی کرد. با افزایش داده‌های فسیلی از دیگر نقاط جهان و ایجاد مجموعه دادهٔ کامل‌تر، این مدل از هوش مصنوعی، مجموعه دادهٔ آزمایشی بیشتری برای یادگیری دارد و درنتیجه با دقت عمل بسیار بالاتر، در پیش‌بینی مکان‌های جغرافیایی فسیل‌ها و دیگر مطالعات دیرینه جغرافیایی به کار می‌رود.

با توجه به شواهد کمی ارائه‌شده Sohrabi and Jin (2013)، تجزیه و تحلیل چند متغیر به دست آمده نشان داد که اولین گونه *Hiscobeccus* از *Rhynchotrema* در زمان کاتین پیشین (Chatfieldian) با ایجاد یک پوستهٔ بزرگ، کروی و با لایه‌بندی (لاملوسیتی) قوی تکامل یافته است. *H. mackenziensis*، که اولین *Hiscobeccus* در آمریکای شمالی بود، ویژگی‌های بینابینی بین *Rhynchotrema* و اشکال معمول *Hiscobeccus* را دارد؛ زیرا صدف *H. mackenziensis* شباهت بیشتری با *Rhynchotrema* نسبت‌به اشکال جوان‌تر *Hiscobeccus* نشان می‌دهد. در اواخر کاتین (Maysvillian-Richmondian)، صدف *Hiscobeccus gigas*، افزایش چشمگیری در اندازهٔ صدف و لایه‌بندی (لاملوسیتی) نشان می‌دهد. *H. gigas* عمدتاً در حوضه‌های خلیج ویلیستون و هادسون[1]، که در موقعیت دیرینهٔ استوایی واقع شده‌اند، ظاهر می‌شود (Macomber 1970; Jin et al. 1997; Jin and Zhan 2001). *H. gigas* و دیگر مجموعه‌های فسیلی که غنی از بازوپایان و مرجان‌ها هستند، نشان‌دهندهٔ یک محیط دریایی نسبتاً باز و کم‌عمق است؛ در حالی که *H. capax*، اشکال قدیمی‌تر *Hiscobeccus*، و دیگر رینکونلیدها (rhynchonellids) در آب‌های نسبتاً عمیق در حاشیهٔ قاره‌ای لورنشیا منشأ گرفته‌اند (Young et al. 2008).

به‌منظور تعیین تغییرات مورفولوژی در بین نمونه‌های بازوپایان *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus*، از سه پارامتر مورفولوژیکی شامل شاخص اندازهٔ پوسته (SSI)، شاخص تحدب صدف (SCI) و شاخص چگالی لاملا صدف (SLDI)

[1] Williston and Hudson Bay basins

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

استفاده شد. در میان نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده، اندازهٔ صدف از اشکال قدیمی‌تر *Rhynchotrema* (late Sandbian and early Katian age) به اشکال جوان‌تر *Hiscobeccus* (mid-late Katian age) افزایش می‌یابد. *Hiscobeccus* با صدف بزرگ در اواخر کاتین (Maysvillian- Richmondian)، در نهشته‌های کربناته دیرینهٔ قارهٔ لورنشیا به‌ویژه در درون پوستهٔ قاره‌ای پایدار (اینتراکراتونی[1]) خلیج ویلیستون و هادسون گسترده شد که در موقعیت دیرینهٔ استوایی واقع شده‌اند.

پارامتر مورفولوژیکی دیگر، SCI، که نسبت ضخامت به عرض صدف (T/W) است، برای توصیف تحدب صدف استفاده شد. در بین تمام نمونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus*، بالاترین شاخص تحدب متعلق به *H. capax* با سن Richmondian از منطقهٔ سینسیناتی و کمترین شاخص تحدب مربوط به *H. mackenziensis* با سن ترنتونین است. نسبت ضخامت/عرض صدف (T/W) به‌عنوان یک پروکسی برای توصیف تحدب پوسته استفاده می‌شود. *H. capax* با سن ریچموندین از منطقهٔ سینسیناتی بیشترین تحدب را در بین انواع *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* نشان می‌دهد.

شاخص SLDI که نشان‌دهندهٔ نسبت سطح صدف پوشیده‌شده با لاملا و چگالی لاملا است، یکی دیگر از پارامترهای مورفولوژیکی استفاده‌شده در مطالعه Sohrabi and Jin (2013) بود. در بین انواع *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus*، بالاترین SLDI متعلق به *H. capax* با سن Richmondian از منطقهٔ سینسیناتی است و کمترین SLDI متعلق به *R. wisconsinense* از مینه سوتا (late Sandbian) و منطقهٔ دریاچهٔ سیمکو است. یک افزایش لاملا از قدیمی‌ترین نوع *Rhynchotrema* تا اشکال اولیه *Hiscobeccus* وجود دارد؛ زیرا در *Rhynchotrema* معمولا کمتر از یک سوم طول صدف ازطریق لاملا پوشانده شده است؛ اما در *Hiscobeccus* بیش از نیمی از صدف با لاملا پوشانده شده است. در میان تمام گونه‌های *Hiscobeccus*، اشکال جدیدتر *Hiscobeccus*، مانند *H. gigas* با سن Richmondian از جنوب منیتوبا، اندازهٔ بزرگ (gigantism) را نشان می‌دهند؛ اما در مقایسه با *H. capax* در منطقهٔ سینسیناتی، *H. gigas* کرویت کمتری دارد. کمترین کرویت متعلق به *H. mackenziensis* با سن Trentonian است.

براساس تجزیه و تحلیل داده‌های مورفومتریک نمونه‌های *Rhynchotrema* و *Hiscobeccus* از نه مکان جغرافیایی در آمریکای شمالی (شکل ۲ و ۳)، *Hiscobeccus* در کاتین پسین (Richmondian و Maysvillian) با ایجاد یک صدف بزرگ‌تر، کروی‌تر و صدف‌های با لایه‌بندی (لاملوسیتی) قوی‌تر در دریاهای درون‌قاره‌ای (اپیکانتینتال) در سراسر آمریکای شمالی متنوع شد. در مقایسه با *Hiscobeccus*، که در دریاهای درون‌قاره‌ای (اپیکانتینتال) دیرینهٔ استوا[2] (مانند حوضهٔ خلیج ویلیستون و هادسون) رایج بود، گونه‌های *Rhynchotrema* در حاشیهٔ فلات قاره و سکوهای نواحی حاشیهٔ پوستهٔ قاره‌ای پایدار (پریکراتونیکی[3]) لورنشیا (مانند جزایی انتیکوستی و کوه‌های مکنزی[4]) بودند. افزایش کرویت در *H. capax*، به احتمال زیاد انطباق با محیط دیرینه با انرژی بالا و طوفان در مناطق بالایی گرمسیری مانند منطقهٔ سینسیناتی در زمان ریچموندین بود. افزایش کرویت در *H. capax* به احتمال زیاد، مربوط به ضخیم‌شدن قسمت خلفی صدف باشد؛ بنابراین صفحات دندانی (dental plates) با دیوارهٔ خلفی صدف متصل شدند (Amsden 1983; Jin and Lenz 1992). یک صدف کروی همراه با یک قسمت خلفی سنگین، پایداری را بهبود می‌بخشد، تا حالت بیک رو به پایین (beak-down)، زندگی خود را در بستر کف دریا حفظ کند (Sohrabi and Jin 2013).

[1] Intracratonic
[2] Paleoequator
[3] Pericratonic
[4] Anticosti Island and Mackenzie

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.143190.1300

نتیجه

در مطالعهٔ حاضر، یک فرمول کمی بین مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های مورفولوژیکی و مکان جغرافیایی بازوپایان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* ساخته شد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی به‌طور رضایت‌بخشی مکان‌های دودمان *Rhynchotrema-Hiscobeccus* را برآورد کردند. دقت مدل شبکهٔ عصبی ایجادشده در 52 داده دیده‌نشده 82درصد است. مدل هوشمند بهینه‌سازی‌شده قادر به پیش‌بینی محل بازوپایان مطالعه‌شده در آمریکای شمالی با در داشتن نه داده بیومتریک است. اولین گونهٔ *Hiscobeccus* از *Rhynchotrema* در زمان کاتین پیشین (Chatfieldian) با ایجاد یک پوستهٔ بزرگ، کروی و به‌شدت لایه‌ای (لاملوز) تکامل یافت. در مقایسه با *Hiscobeccus*، گونه‌های *Rhynchotrema* رایج‌ترین و متنوع‌ترین در حاشیه فلات قاره و سکوهای لورنشیا بودند. افزایش کرویت صدف، انطباق بازوپایان را با محیط‌های گرمسیری با انرژی بالا مانند منطقهٔ سینسیناتی در دورهٔ اردویسین پسین (Richmondian) تفسیر می‌کند. انتظار می‌رود که قدرت تخمین مدل شبکهٔ عصبی ازطریق افزودن داده‌های بیومتریک بازوپایان از مکان‌های بیشتری از سراسر جهان افزایش یابد. بر این اساس، مجموعه داده‌های اندازه‌گیری‌شده و مدل‌های طراحی‌شده، در دسترس محققان آینده قرار می‌گیرد تا مطالعات را برای برداشتن گام‌های جدید به‌سمت دیرینه‌شناسی هوشمند ادامه دهند.

References

Abdizadeh H. Kadkhodaie A. Ahmadi A. and Heidarifard M.H. 2017. Estimation of total organic carbon from well logs and seismic sections via neural network and ant colony optimization approach: A case study from the Mansuri oil field, SW Iran. Geopersia, 7 (2), 255–266. 10.22059/GEOPE.2017.229418.648307.

Anemone R.L. Emerson C. and Conroy G. 2011. Finding fossils in new ways: an artificial neural network approach to predicting the location of productive fossil localities. Evolutionary Anthropology Issues News and Reviews, 20 (5): 169–180. https://doi.org/10.1002/evan.20324

Amsden T.W. 1983. Upper Bromide Formation and Viola Group (Middle and Upper Ordovician) in eastern Oklahoma. Oklahoma Geol. Survey Bull. 132. Welling–Fite–Corbin Range strata, 1–23; 132, the Late Ordovician brachiopod genera *Lepidocyclus* and *Hiscobeccus*, 36–44.

Barnes C.R. Norford B.S. and Skevington D. 1981. The Ordovician System in Canada. Correlation chart and explanatory notes. International Union of Geological Sciences Publication, 8, 27.

Beaufort L. and Dollfus D. 2004. Automatic recognition of coccoliths by dynamical neural networks. Mar. Micropaleontol., 51 (1), 57–73. https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2003.09.003

Bergström S.M. 1971. Conodont biostratigraphy of the Middle and Upper Ordovician of Europe and Eastern North America. Geological Society of America Memoir, 121: 83–1157.

Bhatt A. and Helle H.B. 1999. Porosity, permeability and TOC prediction from well logs using a neural network approach 61 ST EAGE, Conf. (Helsinki, Finland) 1–4.

Bolton T.E. 2000. Ordovician megafauna, southern Baffin Island, Nunavut. Geological Survey of Canada, Bullettin, 557, 39–157. https://doi.org/10.4095/211846

Brett K. and Rudkin D.M. 1997. Ordovician stratigraphy and trilobite faunas of south- Central Ontario. Guidebook for Field Trip 3, 2nd International Trilobite Conference, Brock University, St. Catharines 34 p.

Brett C.E. McLaughlin P.I. Baird G.C. and Cornell S. 2004. Comparative sequence stratigraphy of the Upper Ordovician (Turinian–Edenian) of the Trenton shelf (New York–Ontario) and Lexington Platform (Kentucky, southern Ohio) successions. Implications for improved paleogeographic resolution of eastern Laurentia. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 210, 295–329. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.038

Carson D.M. 1980. Paleozoic geology of the Trenton-Consecon area, southern Ontario; Ontario Geological Survey - Preliminary Map P. 2375, scale 1: 50, 000.

Carson D.M. 1982. Paleozoic geology of Bath-Yorkshire Island area, southern Ontario; Ontario Geological Survey Map P. 2497, scale 1: 50,000.

Cocks L.R.M. and Torsvik T.H. 2011. The Paleozoic geography of Laurentia and western Laurussia: A stable craton with mobile margins. Earth-Science Reviews, 106, 1–51.

Cooper G.A. 1956. Chazyan and related brachiopods. Smithsonian Miscellaneous Collections, 127, 1245 p.

Elias R.J. 1991. Environmental cycles and bioevents in the Upper Ordovician Red River–Stony Mountain solitary rugose coral province of North America. Geol. Surv. Can. Pap. 90-9, 205–211.

(A) 224, 133–158.
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. Caldwell W.G.E. and Norford B.S. 1997. Late Ordovician brachiopods and biostratigraphy of the Hudson Bay Lowlands, northern Manitoba and Ontario. Geological Survey of Canada, Bulletin, 513.
Johnson L.M. Rezaee R. Kadkhodaie A. Smith G. and Yu. H. 2018. Geochemical property modelling of a potential shale reservoir in the Canning Basin (Western Australia), using Artificial Neural Networks and geostatistical tools. Computer and Geoscience, 120, 73–81. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.08.004
Kadkhodaie A. Takahashi Monteiro S. Ramos F. and Hatherly P. 2010. Rock recognition from MWD data: A comparative study of boosting, Neural Networks and Fuzzy Logic. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing Letters (GSRL), 7 (4), 680–684. doi: 10.1109/LGRS.2010.2046312.
Laurie J.R. 1991. Articulate brachiopods from the Ordovician and Lower Silurian of Tasmania. Association of Australasian Palaeontologists Memoir, 11, 1–106.
Ludvigson G.A. Witzke B.J. Gonzalez L.A. Carpenter S.J. Schneider C.L. and Hasiuk F. 2004. Late Ordovician (Turinian- Chatfieldian) carbon isotope excursions and their stratigraphic and paleoceanographic significance. Palaeogeogaphy, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 210, 187–214. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.043
Macomber R.W. 1970. Articulate brachiopods from the Upper Bighorn Formation (Late Ordovician) of Wyoming. Journal of Paleontology, 44: 416–450.
Malmgren A. and Nordlund U. 1997. Application of artificial neural networks to paleoceanographic data, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 136 (1–4), 359–373. https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00031-X
Melchin M.J. Brookfield M.E. Armstrong D.K. and Coniglio M. 1994. Stratigraphy, sedimentology and biostratigraphy of the Ordovician rocks of the Lake Simcoe 53 area, south-Central Ontario. Geological Association of Canada–Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Waterloo, Field Trip A4, Guidebook.
Misius P.P. 1986. Brahiopody ordovika Severnoj Kirgizii, 254 p. Ilim, Frunze.
Mitchell C.E. and Bergstrom S.M. 1991. New graptolite and lithostratigraphic evidence from the Cincinnati region, U.S.A., for the definition and correlation of the base of the Cincinnatian Series (Upper Ordovician). In: Barnes C.R. and Williams S.H. (Eds), Advances in Ordovician Geology, 59–77. Geological Survey of Canada Paper 90–9. Ottawa.
Mossler J.H. and Bloomgren B.A. 1992. Bedrock https://doi.org/10.4095/132189
Elias R.J. and Young G.A. 2004. Laurentian corals. In: Webby B.D. Paris F. Droser M.L. Percival I.G. (Eds.), The Great Ordovician Biodiversification Event. Columbia University Press, New York, 133–141p.
Farzi R. Bolandi V. Kadkhodaie A. Iglauer S. and Hashempour Z. 2017. Simulation of NMR response from micro-CT images using artificial neural networks. J. Natural Gas Sci. Eng. 39, 54–61. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.01.029
Havlıcek V. and Massa D. 1973. Brachiopodes de l'Ordovicien superieur de Lybie occidentale, implications stratigraphiques regionales. Geobios 6, 167–190.
Havlıcek V. 1989. Climatic changes and development of benthic communities through the Mediterranean Ordovician. Sbornık Ustrednıho Ustavu Geologickeho, 44, 79–116.
Hints L. and Harper D.A.T. 2003. Review of the Ordovician rhynchonelliformean brachiopoda of the East Baltic: Their distribution and biofacies. Bulletin of Geological Society of Denmark 50, 29–43. DOI:10.37570/bgsd-2003-50-02
Hints L. and Ro˜o˜musoks A. 1997. Ordovician articulate brachiopods. In: Raukas A. & Teedumae A. (Eds.), Geology and Mineral Resources of Estonia, 226–228. Estonian Academy Publishers, Tallinn.
Holland S.M. 1993. Sequence stratigraphy of a carbonate-clastic ramp: the Cincinnatian Series (Upper Ordovician) in its type area. Geol. Soc. Am. Bull. 105, 306–322. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<0306:SSOACC>2.3.CO;2
Holland S.M. 2008. The type Cincinnatian Series: an overview. In: McLaughlin P.I. Brett C.E. Holland S.M. Storrs G.W. (Eds), Stratigraphic Renaissance in the Cincinnati Arch: Implications for Upper Ordovician Paleontology and Paleoecology, 174–184. Cincinnati Museum Center Scientific Contributions 2, Cincinnati.
Holland S.M. and Patzkowsky M.E. 2007. Gradient ecology of a biotic invasion: Biofacies of the type Cincinnatian series (Upper Ordovician), Cincinnati, Ohio region, USA. Palaios 22, 392–407. https://doi.org/10.2110/palo.2006.p06-066r
Jin J. 1989. Late Ordovician-Early Silurian rhynchonellid brachiopods from Anticosti Island, Quebec. Biostratigraphie du Paleozoique, 10, 127.
Jin J. 2001. Evolution and extinction of the north American Hiscobeccus brachiopod fauna during the late Ordovician. Canadian Journal of Earth Scicence, 38, 143–151. https://doi.org/10.1139/e00-049
Jin J. and Lenz A.C. 1992. An Upper Ordovician Lepidocyclus- Hypsiptycha fauna (rhynchonellid brachiopoda) from the Mackenzie Mountains, Northwest Territories, Canada. Palaeontographica,

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

Sporat C. and Jin J. 2013. Evolution of the Late Ordovician plaesiomyid brachiopod lineage in Laurentia. Canadian Journal of Earth Science, 50: 872–894. https://doi.org/10.1139/cjes-2013-0022

Tasch P. 1969. Information theory for invertebrate fossils. Trans. Kans. Academic Science, 72 (2), 195–202. https://doi.org/10.2307/3627564

Titus R. 1986. Fossil communities of the Upper Trenton Group (Ordovician) of New York State. Journal of Paleontology, 60, 805–824. https://www.jstor.org/stable/1305071

Webby B.D. 1992. Ordovician island biotas. New South Wales record and global implications. Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 125, 51–77. http://biodiversitylibrary.org/page/46208064

Willard B. 1928. The Brachiopods of the Ottosee and Holston formations of Tennessee and Virginia. Bulletin of the Harvard Museum of Comparative Zoology, 48: 255–292, pl. 1–3.

Williams D.A. and Telford P.G. 1986. Paleozoic geology of the Ottawa area. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Ottawa, Ontario, Field Trip 8: Guidebook.

Wilson A.E. 1946. Brachiopoda of the Ottawa Formation of the Ottawa–St. Lawrence Lowland. Geological Survey of Canada Bulletin, 8, 149. https://doi.org/10.4095/101577

Yadrenkina A.G. 1984. Tip Brachiopoda. Institut Geologii i Geofiziki, Akademiya Nauk SSSR, Sibirskoe Otdelenie, Trudy 590, 32 –57.

Yadrenkina A.G. 1989. Opisaniye fauny. Brakhiopody. Institut Geologii i Geofiziki, Akademiya Nauk SSSR, Sibirskoe Otdelenie, Trudy, 751, 65–81.

Young G.A. Elias R.J. Wong S. and Dobrazanski E.P. 2008. Upper Ordovician rocks and fossils in southern Manitoba. Canadian Paleontology Conference, Field Trip Guidebook, 13, 97.

Geology. Geologic Atlas of Ramsey County, Minnesota. Minnesota Geological Survey, County Atlas Series C-7, Plate 2 (1:48,000).

Nikiforova O.I. and Andreeva O.N. 1961. Stratigrafiya ordovika i silura Sibirskoi platform i ee paleontologicheskoe obosnovanie (Brakhiopody). Trudy VSEGEI, Novaya Seriya, 56, 412.

Nikitin I.F. Popov L.E. and Bassett M.G. 2003. Late Ordovician brachiopods from the Selety river basin, north Central Kazakhstan. Acta Palaeontologica Polonica, 48, 39–54.

Nikitin I.F. Popov L.E. and Bassett M.G. 2006. Late Ordovician rhynchonelliformean brachiopods of north-central Kazakhstan. In: Bassett M.G. and Deisler V.K. (Eds.), Studies in Palaeozoic palaeontology, 223–294. National Museum of Wales Geological Series 25, Cardiff.

Nouri-Taleghani M. Kadkhodaie A. and Karimi-Khaledi M. 2015. Determining hydraulic flow units using a hybrid neural network and multi-resolution graph-based clustering method: case study from South Pars Gasfied, Iranian Journal of Petroleum Geology, 38 (2), 177–191.

Ojakangas R.W. and Matsch C.L. 1982. Minnesota's Geology, 255p. University of Minnesota Press, St. Paul.

Percival I.G. 1991. Late Ordovician articulate brachiopods from central New South Wales. Association of Australasian Palaeontologists Memoir, 11, 107–177.

Percival I.G. and Webby B.D. 1996. Island benthic assemblages: with examples from the Late Ordovician of Eastern Australia. Historical Biology, 11, 1–4 and 171–185. https://doi.org/10.1080/10292389609380540

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 58, 13–79. doi:10.1017/S0968046202000025

Rice W.F. 1987. The systematics and biostratigraphy of the brachiopods of the Decorah Shale at St. Paul, Minnesota. Minnesota Geological Survey Report of Investigations, 35, 136–231.

Sanford B.V. and Grant A.C. 2000. Geological framework of the Ordovician system in the southeast Arctic Platform, Nunavut. Geological Survey of Canada, Bulletin, 557, 13–38.

Savage N.M. Mancenido M.O. Owen E.F. Carlson S.J. Grant R.E. Dagys A.S. and Sun D.L. 2002. Rhynchonellida. In: Kaesler R.L. (Ed.), Treatise on invertebrate paleontology. Part H, brachiopoda, Vol. 4 (revised), H1027–H1376. Geological Society of America, Boulder, and University of Kansas Press, Lawrence.

Sohrabi A. and Jin J. 2013. Evolution of the Rhynchotrema – Hiscobeccus lineage: implications