Journal of
Intelligent Financial
Management Perspectives

ISSN: 3116-0964

Intelligent Sustainability Scoring Model Design for Listed Companies Using a Graph Neural Network Approach

Mahsa Jalali[1]*

[1] *Ph.D. in Financial Management, Islamic Azad University, Aliabad Katoul Branch, Golestan, Iran(Corresponding autour) , E-mail: m.jalali@gmail.com*

ARTICLE INFO

Article history:
Received:14/04/2026
Received in revised form:05/05/2026
Accepted:20/05/2026
Available online:15/06/2026

Keywords:

Corporate Sustainability
Sustainability Scoring
Deep Learning
Graph Neural Networks
Artificial Intelligence

ABSTRACT

In recent years, the evaluation of corporate sustainability performance has become one of the primary concerns of investors, regulatory bodies, and capital markets. The growing emphasis on Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria in investment decisions has increased the need for the development of accurate and intelligent models for assessing corporate sustainability. However, most traditional sustainability scoring models are primarily based on the analysis of isolated indicators and structured data, and they are often incapable of capturing the complex relationships among companies, industries, and stakeholders. This limitation reduces assessment accuracy and weakens the ability to predict future sustainability performance.The aim of this study is to develop an intelligent sustainability scoring model for publicly listed companies using Graph Neural Networks (GNNs). In the proposed framework, companies are represented as nodes in a graph, while financial, industrial, ownership, and informational relationships among them are modeled as edges. By employing graph deep learning algorithms, hidden patterns and structural dependencies among companies are extracted and incorporated into the sustainability scoring process.This research adopts an applied and developmental approach within a quantitative research framework. The required data include financial indicators, ESG metrics, ownership information, and inter-company relationship data collected from listed companies. After data preprocessing, the Graph Neural Network model is developed and compared with conventional machine learning techniques, including Random Forest, XGBoost, and Multilayer Perceptron (MLP) neural networks. Model performance is evaluated using metrics such as Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Accuracy, and the Coefficient of Determination (R^2).The findings indicate that incorporating graph structures and inter-company relationships can significantly improve the accuracy and explanatory power of sustainability scoring models. Furthermore, the proposed model provides an effective decision-support tool for investors, corporate managers, and capital market policymakers in promoting sustainability-oriented decision-making and sustainable development.

Journal of Intelligent Financial Management, 2026, Vol. 2, No.1, pp. 21- 37

Publish by:
Tolou-e Binish-e Ayandeh Scientific Institute

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.24695

Article Type: Research Paper

©Authors

Cite: Jalali, M. (2026). Intelligent Sustainability Scoring Model Design for Listed Companies Using a Graph Neural Network Approach. *Journal of Sustainable Financial Intelligence,2*(1), 21-37.

نگرش های
مدیریت مالی هوشمند
Journal of Intelligent Financial Management Perspectives
ISSN: 3116-0964

طراحی مدل هوشمند امتیازدهی پایداری برای شرکت‌های پذیرفته شده در بورس با رویکرد شبکه‌های عصبی گرافی

مهسا جلالی [1و*]

۱ و *- دکتری مدیریت مالی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علی آباد کتول، گلستان، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل نویسنده مسئول: *m.jalali@gmail.com*

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت:۱۴۰۵/۰۱/۲۵

تاریخ بازنگری:۱۴۰۵/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۲/۳۰

تاریخ انتشار:۱۴۰۵/۰۳/۲۵

کلیدواژه‌ها:

پایداری شرکتی

امتیازدهی پایداری

یادگیری عمیق

شبکه‌های عصبی گرافی

هوش مصنوعی

چکیده

در سال‌های اخیر، ارزیابی عملکرد پایداری شرکت‌ها به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های سرمایه‌گذاران، نهادهای نظارتی و بازارهای سرمایه تبدیل شده است. رشد سرمایه‌گذاری‌های مبتنی بر معیارهای محیطزیستی، اجتماعی و حاکمیتی (ESG) موجب شده است که توسعه مدل‌های دقیق و هوشمند برای سنجش پایداری شرکت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود. با این حال، اغلب مدل‌های سنتی امتیازدهی پایداری بر تحلیل شاخص‌های مستقل و داده‌های ساختاریافته متمرکز بوده و قادر به استخراج روابط پیچیده میان شرکت‌ها، صنایع و ذی‌نفعان نیستند. این محدودیت باعث کاهش دقت ارزیابی و ضعف در پیش‌بینی عملکرد آتی پایداری شرکت‌ها می‌شود. هدف این پژوهش طراحی یک مدل هوشمند امتیازدهی پایداری برای شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی است. در مدل پیشنهادی، شرکت‌ها به‌عنوان گره‌های یک گراف و روابط مالی، صنعتی، مالکیتی و اطلاعاتی میان آن‌ها به‌عنوان یال‌های شبکه تعریف می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق گرافی، الگوهای پنهان و وابستگی‌های ساختاری میان شرکت‌ها استخراج و در فرآیند محاسبه امتیاز پایداری لحاظ می‌شود. روش پژوهش از نوع کاربردی و توسعه‌ای بوده و در چارچوب رویکرد کمی انجام می‌شود. داده‌های مورد نیاز شامل شاخص‌های مالی، معیارهایESG ، اطلاعات مالکیتی و داده‌های ارتباطی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس جمع‌آوری خواهد شد. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، مدل شبکه عصبی گرافی طراحی و با مدل‌های یادگیری ماشین متداول نظیر Random Forest، XGBoostو شبکه‌های عصبی چندلایه مقایسه می‌شود. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌هایی نظیرMAE ، RMSE، Accuracyو ضریب تعیین انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد که بهره‌گیری از ساختارهای گرافی و روابط بین‌شرکتی می‌تواند دقت و قابلیت تبیین مدل‌های امتیازدهی پایداری را به‌طور معناداری افزایش داد. همچنین مدل پیشنهادی قادر بود ابزاری کارآمد برای سرمایه‌گذاران، مدیران و سیاست‌گذاران بازار سرمایه در راستای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر توسعه پایدار فراهم آورد.

نشریه مدیریت مالی هوشمند، ۱۴۰۵، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۲۱-۳۷.

ناشر: موسسه علمی طلوع بینش آینده

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.24695

نوع مقاله: پژوهشی

© نویسندگان

استناد: جلالی، مهسا. (۱۴۰۵). طراحی مدل امتیازدهی هوشمند پایداری برای شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس با رویکرد شبکه‌های عصبی گرافی. *مدیریت مالی هوشمند*، ۲(۱)، ۲۱-۳۷.

۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات گسترده در محیط کسب‌وکار، افزایش رقابت جهانی، تشدید نگرانی‌های زیست‌محیطی و رشد انتظارات اجتماعی از سازمان‌ها، موجب شده است که مفهوم پایداری شرکتی به یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه پژوهشگران، مدیران و سرمایه‌گذاران تبدیل شود. در گذشته، موفقیت شرکت‌ها عمدتاً بر اساس شاخص‌های مالی همچون سودآوری، نرخ بازده سرمایه‌گذاری، ارزش بازار و میزان رشد درآمد ارزیابی می‌شد. با این حال، تجربه بحران‌های مالی، تخریب محیط‌زیست، افزایش نابرابری‌های اجتماعی و بروز چالش‌های حاکمیتی نشان داد که اتکای صرف به معیارهای مالی نمی‌تواند تصویر جامعی از عملکرد واقعی شرکت‌ها ارائه دهد. از این‌رو، رویکردهای نوین مدیریتی بر این باورند که سازمان‌ها برای دستیابی به موفقیت پایدار باید علاوه بر اهداف اقتصادی، مسئولیت‌های اجتماعی و زیست‌محیطی خود را نیز مدنظر قرار دهند (رضایی، ۱۴۰۰).

پایداری شرکتی به توانایی سازمان در ایجاد ارزش بلندمدت از طریق برقراری تعادل میان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اشاره دارد. این مفهوم بیان می‌کند که شرکت‌ها باید به گونه‌ای فعالیت کنند که ضمن تأمین منافع سهامداران، نیازهای سایر ذی‌نفعان از جمله کارکنان، مشتریان، جامعه و محیط‌زیست را نیز در نظر بگیرند. در این چارچوب، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تنها بر مبنای سود کوتاه‌مدت انجام نمی‌شود، بلکه آثار بلندمدت اقدامات سازمان بر توسعه پایدار نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که شرکت‌های دارای عملکرد مطلوب در حوزه پایداری از مزایایی نظیر افزایش اعتماد سرمایه‌گذاران، کاهش ریسک‌های عملیاتی، بهبود اعتبار سازمانی و افزایش ارزش بازار برخوردار هستند (شریفی، ۱۴۰۱).در راستای سنجش میزان پایداری شرکت‌ها، چارچوب محیط‌زیستی، اجتماعی و حاکمیتی یا ESG به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی عملکرد پایدار مطرح شده است. این چارچوب مجموعه‌ای از شاخص‌ها و معیارها را در سه بعد اصلی ارائه می‌دهد که از طریق آن می‌توان میزان تعهد شرکت به توسعه پایدار را ارزیابی کرد. بعد محیط‌زیستی شامل موضوعاتی نظیر مدیریت انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، مصرف منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست است. بعد اجتماعی به مسائلی همچون حقوق کارکنان، مسئولیت اجتماعی، رضایت مشتریان و تعامل با جامعه می‌پردازد. همچنین بعد حاکمیتی شامل شفافیت اطلاعاتی، ساختار هیئت‌مدیره، مدیریت ریسک و رعایت اصول اخلاق حرفه‌ای است. امروزه بسیاری از سرمایه‌گذاران نهادی و صندوق‌های سرمایه‌گذاری از اطلاعات ESG برای ارزیابی فرصت‌ها و تهدیدهای سرمایه‌گذاری استفاده می‌کنند و این اطلاعات به بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند تصمیم‌گیری مالی تبدیل شده است (عباسی، ۱۴۰۲).

با وجود اهمیت روزافزون شاخص‌هایESG ، ارزیابی دقیق پایداری شرکت‌ها همچنان با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، محدودیت روش‌های سنتی امتیازدهی پایداری است. اغلب مدل‌های موجود بر پایه شاخص‌های مستقل طراحی شده‌اند و هر شرکت را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهند. در چنین رویکردی، روابط و تعاملات میان شرکت‌ها نادیده گرفته می‌شود، در حالی که شرکت‌ها در محیط واقعی به صورت شبکه‌ای از ارتباطات مالی، تجاری، صنعتی و اطلاعاتی فعالیت می‌کنند. این ارتباطات می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مالی و غیرمالی سازمان‌ها داشته باشند و نادیده گرفتن آن‌ها موجب کاهش دقت مدل‌های ارزیابی می‌شود (شریفی، ۱۴۰۲).

بازار سرمایه نمونه بارزی از یک سیستم پیچیده و شبکه‌ای است که در آن شرکت‌ها از طریق روابط مالکیتی، زنجیره تأمین، همکاری‌های صنعتی، رقابت‌های بازار و تبادل اطلاعات به یکدیگر متصل هستند. در چنین محیطی، عملکرد یک شرکت می‌تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر سایر شرکت‌ها اثر بگذارد. برای مثال، وقوع یک بحران زیست‌محیطی در یک شرکت بزرگ ممکن است اعتبار و عملکرد سایر شرکت‌های همکار را نیز تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل، تحلیل پایداری شرکت‌ها نیازمند درک عمیق روابط ساختاری میان بازیگران مختلف بازار است. روش‌های سنتی آماری و بسیاری از مدل‌های یادگیری ماشین قادر به مدل‌سازی کامل این روابط پیچیده نیستند و در نتیجه بخشی از اطلاعات ارزشمند موجود در ساختار شبکه را از دست می‌دهند (سلیمانی، ۱۴۰۳).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری عمیق فرصت‌های جدیدی را برای تحلیل داده‌های پیچیده فراهم کرده است. یادگیری عمیق به عنوان یکی از شاخه‌های پیشرفته هوش مصنوعی توانایی استخراج الگوهای پنهان از حجم عظیمی از داده‌ها را دارد و در حوزه‌های مختلفی از جمله مالی، پزشکی، بازاریابی و مدیریت مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از نوآوری‌های مهم در این زمینه، توسعه شبکه‌های عصبی گرافی است که امکان تحلیل داده‌های دارای ساختار شبکه‌ای را فراهم می‌کند. برخلاف شبکه‌های عصبی سنتی که عمدتاً بر داده‌های جدولی یا ترتیبی تمرکز دارند، شبکه‌های عصبی گرافی قادرند همزمان ویژگی‌های هر گره و روابط میان گره‌ها را در فرآیند یادگیری لحاظ کنند (رضایی، ۱۴۰۳).

شبکه‌های عصبی گرافی در سال‌های اخیر کاربردهای گسترده‌ای در تحلیل شبکه‌های اجتماعی، سیستم‌های توصیه‌گر، کشف تقلب مالی، تحلیل بازارهای سرمایه و مدیریت ریسک پیدا کرده‌اند. این فناوری با استفاده از سازوکار انتشار اطلاعات در میان گره‌های شبکه، قادر است وابستگی‌های ساختاری و الگوهای ارتباطی را شناسایی کند و از آن‌ها برای بهبود دقت پیش‌بینی بهره ببرد. در حوزه بازار سرمایه نیز پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از اطلاعات شبکه‌ای می‌تواند عملکرد مدل‌های پیش‌بینی را نسبت به روش‌های متداول به طور قابل توجهی افزایش دهد (عباسی، ۱۴۰۴).

با توجه به محدودیت‌های موجود در روش‌های سنتی ارزیابی پایداری و همچنین قابلیت‌های منحصربه‌فرد شبکه‌های عصبی گرافی، توسعه مدل‌های هوشمند مبتنی بر این فناوری می‌تواند گامی مؤثر در بهبود فرآیند امتیازدهی پایداری شرکت‌ها باشد. در چنین مدلی، شرکت‌ها به عنوان گره‌های شبکه و روابط مالی، صنعتی، مالکیتی و اطلاعاتی میان آن‌ها به عنوان یال‌های گراف تعریف می‌شوند. سپس الگوریتم‌های یادگیری عمیق گرافی با تحلیل این ساختار، الگوهای پنهان و وابستگی‌های میان شرکت‌ها را استخراج کرده و در محاسبه امتیاز پایداری مورد استفاده قرار می‌دهند. انتظار می‌رود که این رویکرد ضمن افزایش دقت ارزیابی، توانایی پیش‌بینی عملکرد آتی شرکت‌ها را نیز بهبود بخشد و ابزار کارآمدتری برای سرمایه‌گذاران، مدیران و سیاست‌گذاران بازار سرمایه فراهم سازد (سلیمانی، ۱۴۰۵).

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ پایداری شرکتی، ESGو امتیازدهی پایداری

در دهه‌های اخیر، مفهوم پایداری شرکتی به یکی از مهم‌ترین مباحث حوزه مدیریت، حسابداری، مالی و راهبری شرکتی تبدیل شده است. افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، رشد انتظارات اجتماعی از سازمان‌ها و ضرورت پاسخگویی بنگاه‌های اقتصادی در برابر ذی‌نفعان، موجب شده است که ارزیابی عملکرد شرکت‌ها از چارچوب سنتی مبتنی بر شاخص‌های مالی فراتر رود و ابعاد اجتماعی و محیطزیستی نیز در کنار شاخص‌های اقتصادی مورد توجه قرار گیرند. پایداری شرکتی به توانایی سازمان در ایجاد ارزش بلندمدت از طریق ایجاد تعادل میان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اشاره دارد و بر این اصل استوار است که موفقیت پایدار تنها از طریق توجه همزمان به منافع سهامداران و سایر ذی‌نفعان حاصل می‌شود (مالچی و همکاران، ۱۴۰۳).

یکی از مهم‌ترین چارچوب‌های ارزیابی پایداری شرکت‌ها، الگوی محیطزیستی، اجتماعی و حاکمیتی است. این چارچوب مجموعه‌ای از شاخص‌ها را در سه بعد اصلی محیطزیست، مسئولیت اجتماعی و حاکمیت شرکتی ارائه می‌کند و امروزه به عنوان یکی از معتبرترین ابزارهای سنجش عملکرد پایدار شرکت‌ها در بازارهای مالی شناخته می‌شود. سرمایه‌گذاران نهادی، صندوق‌های سرمایه‌گذاری و نهادهای ناظر بازار سرمایه به طور فزاینده‌ای از اطلاعات ESG برای ارزیابی ریسک، پیش‌بینی عملکرد آتی و تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری استفاده می‌کنند. همچنین بسیاری از بورس‌های معتبر جهان افشای اطلاعات مرتبط با پایداری و ESG را برای شرکت‌های پذیرفته شده الزامی یا تشویقی کرده‌اند (فروزان‌فرد، ۱۴۰۳).

در سال‌های اخیر، موضوع گزارشگری پایداری به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی تحقق اهداف ESG مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گزارش‌های پایداری امکان ارائه تصویری جامع از عملکرد غیرمالی سازمان‌ها را فراهم می‌کنند و موجب افزایش شفافیت، پاسخگویی و اعتماد ذی‌نفعان می‌شوند. تجربه جهانی نشان می‌دهد که شرکت‌هایی که گزارشگری پایداری منظم و باکیفیت دارند، از اعتبار بالاتر، هزینه سرمایه کمتر و جذابیت بیشتر برای سرمایه‌گذاران برخوردار هستند. در ایران نیز طی یک دهه اخیر توجه به گزارش‌دهی پایداری و مسئولیت اجتماعی شرکتی به طور قابل توجهی افزایش یافته است و بسیاری از شرکت‌های بزرگ به سمت انتشار گزارش‌های پایداری حرکت کرده‌اند.مطالعات انجام شده در حوزه گزارشگری پایداری نشان می‌دهد که ابعاد مختلف ESG می‌توانند آثار معناداری بر عملکرد مالی و غیرمالی شرکت‌ها داشته باشند. داشی دغیم، آقایی چادگانی، دهیرب الربیعی و علیمرادی (۱۴۰۱) در پژوهشی بر روی شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار نشان دادند که ابعاد گزارشگری پایداری دارای تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مالی و غیرمالی سازمان‌ها هستند. این یافته‌ها بیانگر آن است که سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های مرتبط با پایداری نه تنها موجب بهبود مسئولیت‌پذیری اجتماعی می‌شود، بلکه می‌تواند به ارتقای عملکرد اقتصادی شرکت نیز منجر شود.

در کنار گزارشگری پایداری، راهبری شرکتی نیز به عنوان یکی از ارکان اصلی ESG مطرح است. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که ساختارهای راهبری شرکتی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت گزارش‌های پایداری، شفافیت اطلاعاتی و میزان پاسخگویی سازمان‌ها دارند. مرور سیستماتیک انجام شده در حوزه راهبری شرکتی و گزارشگری پایداری نشان می‌دهد که ویژگی‌های هیئت‌مدیره، استقلال اعضا، ساختار مالکیت و سازوکارهای نظارتی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت و پذیرش گزارش‌های پایداری هستند.

با وجود اهمیت گسترده‌ESG ، یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، نحوه امتیازدهی و رتبه‌بندی شرکت‌ها است. بسیاری از مدل‌های موجود بر مبنای شاخص‌های مستقل و روش‌های سنتی آماری طراحی شده‌اند و قادر به درک روابط پیچیده میان متغیرها نیستند. در نتیجه، توسعه مدل‌های هوشمند و مبتنی بر داده برای ارزیابی دقیق‌تر پایداری شرکت‌ها به یکی از نیازهای اساسی پژوهش‌های معاصر تبدیل شده است.

۲-۲ هوش مصنوعی، یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی گرافی

تحول دیجیتال و پیشرفت فناوری‌های هوش مصنوعی در سال‌های اخیر زمینه‌ساز ظهور نسل جدیدی از روش‌های تحلیل داده شده است. هوش مصنوعی مجموعه‌ای از تکنیک‌ها و الگوریتم‌ها را شامل می‌شود که به سیستم‌های رایانه‌ای امکان می‌دهد وظایفی را انجام دهند که معمولاً نیازمند هوش انسانی هستند. یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به عنوان مهم‌ترین زیرشاخه‌های هوش مصنوعی، نقش کلیدی در استخراج دانش از داده‌های پیچیده ایفا می‌کنند.یادگیری عمیق با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی چندلایه قادر است الگوهای پنهان و روابط غیرخطی موجود در داده‌ها را شناسایی کند. این فناوری در حوزه‌های مختلفی نظیر پردازش تصویر، تشخیص گفتار، تحلیل متن، پزشکی، مدیریت مالی و پیش‌بینی بازارهای سرمایه به کار گرفته شده و نتایج موفقیت‌آمیزی ارائه کرده است. با افزایش حجم داده‌ها و پیچیده‌تر شدن ساختار اطلاعاتی سازمان‌ها، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق به یکی از مهم‌ترین رویکردهای تحلیل داده تبدیل شده است.

با وجود موفقیت شبکه‌های عصبی سنتی، این مدل‌ها عمدتاً برای داده‌های جدولی یا ترتیبی طراحی شده‌اند و در تحلیل داده‌های شبکه‌ای با محدودیت مواجه هستند. در بسیاری از مسائل دنیای واقعی، داده‌ها به صورت گراف یا شبکه سازمان‌دهی می‌شوند؛ به گونه‌ای که موجودیت‌ها به صورت گره و روابط میان آن‌ها به صورت یال نمایش داده می‌شوند. شبکه‌های اجتماعی، شبکه‌های حمل‌ونقل، زنجیره تأمین، ارتباطات مالی و بازارهای سرمایه نمونه‌هایی از ساختارهای گرافی هستند.

در پاسخ به این نیاز، شبکه‌های عصبی گرافی توسعه یافتند. این فناوری نسل جدیدی از الگوریتم‌های یادگیری عمیق است که به طور خاص برای تحلیل داده‌های گرافی طراحی شده است. شبکه‌های عصبی گرافی قادرند علاوه بر ویژگی‌های هر گره، اطلاعات مربوط به همسایگان و ساختار کلی شبکه را نیز در فرآیند یادگیری لحاظ کنند. این ویژگی موجب می‌شود که مدل بتواند وابستگی‌های پیچیده و روابط پنهان موجود در شبکه را شناسایی کند. از مهم‌ترین معماری‌های شبکه‌های عصبی گرافی می‌توان به(GCN)[1] ، ۲(GAT)، GraphSAGEو Graph Autoencodersاشاره کرد. هر یک از این معماری‌ها از روش‌های متفاوتی برای انتشار و تجمیع اطلاعات میان گره‌های شبکه استفاده می‌کنند. مزیت اصلی این مدل‌ها در توانایی استخراج همزمان ویژگی‌های محلی و ساختاری شبکه است. کاربرد شبکه‌های عصبی گرافی در حوزه مالی طی سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است. این فناوری در پیش‌بینی قیمت سهام، مدیریت ریسک، کشف تقلب مالی، تحلیل ارتباطات میان شرکت‌ها و مدل‌سازی شبکه‌های مالکیتی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که بازار سرمایه دارای ماهیتی شبکه‌ای است و شرکت‌ها از طریق روابط مالی، صنعتی و اطلاعاتی به یکدیگر متصل هستند، استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی می‌تواند درک عمیق‌تری از رفتار شرکت‌ها فراهم کند.

۲-۳ پیشینه پژوهش در حوزه پایداری شرکتی، ESGو کاربرد شبکه‌های عصبی گرافی

مرور ادبیات پژوهش در حوزه پایداری شرکتی، ESGو کاربرد روش‌های نوین تحلیل داده نشان می‌دهد که این حوزه در یک دهه اخیر به یکی از مهم‌ترین و پویاترین عرصه‌های تحقیقاتی در مدیریت مالی، حسابداری و اقتصاد مالی تبدیل شده است. در مطالعات اولیه، تمرکز اصلی بر این موضوع بود که آیا رعایت اصول پایداری و مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها صرفاً یک هزینه اضافی برای بنگاه اقتصادی محسوب می‌شود یا اینکه می‌تواند به عنوان یک منبع ایجاد ارزش بلندمدت عمل کند. در این زمینه، پژوهش‌های متعددی در سطح بین‌المللی و داخلی انجام شده است که

[1] Graph Convolutional Networks
[2] Graph Attention Networks

به تدریج نشان دادند پایداری شرکتی نه تنها با کاهش ریسک‌های سیستماتیک و غیرسیستماتیک همراه است، بلکه می‌تواند موجب افزایش ارزش بازار، بهبود تصویر برند و ارتقای عملکرد مالی شرکت‌ها شود. در همین راستا، فروزان‌فرد (۱۴۰۳) در پژوهشی نشان داد که شرکت‌های دارای عملکرد بهتر در شاخص‌هایESG ، در بلندمدت بازدهی پایدارتر و ریسک پایین‌تری نسبت به سایر شرکت‌ها دارند و این موضوع می‌تواند نقش مهمی در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران نهادی ایفا کند.

در ادامه این جریان پژوهشی، مطالعات داخلی متعددی به بررسی ابعاد مختلف پایداری شرکتی پرداخته‌اند. برای مثال، زارعی (۱۴۰۰) در پژوهشی به این نتیجه رسید که پایداری شرکتی ارتباط مستقیمی با ارزش‌آفرینی بلندمدت دارد و شرکت‌هایی که رویکردهای پایدار را در استراتژی‌های خود لحاظ می‌کنند، از مزیت رقابتی بیشتری برخوردار هستند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش عباسی و قاسمی (۱۴۰۱) هم‌راستا است که نشان دادند عوامل اجتماعی و مسئولیت‌پذیری شرکتی نقش مهمی در بهبود عملکرد کلی سازمان‌ها دارند. در همین راستا، عباسی و قاسمی (۱۴۰۱) تأکید کردند که بعد اجتماعی پایداری، به ویژه در صنایع تولیدی، می‌تواند به عنوان یک عامل تعیین‌کننده در افزایش وفاداری مشتریان و بهبود تصویر سازمانی عمل کند.در سطح دیگر، خانی و کریمی (۱۴۰۱) با تمرکز بر شاخص‌های ESG در شرکت‌های بورسی ایران نشان دادند که افشای اطلاعات محیط‌زیستی و اجتماعی هنوز در بسیاری از شرکت‌ها در سطح مطلوبی قرار ندارد و همین موضوع باعث کاهش قابلیت مقایسه‌پذیری شرکت‌ها در ارزیابی‌های پایداری می‌شود. این نتیجه با یافته‌های مرادی و احمدپور (۱۴۰۱) هم‌سو است که بیان کردند شفافیت اطلاعاتی یکی از مهم‌ترین پیش‌شرط‌های بهبود عملکرد شرکت‌ها و کاهش هزینه سرمایه است. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که کیفیت اطلاعات افشا شده نقش کلیدی در کارایی بازار سرمایه دارد و بدون آن، ارزیابی دقیق پایداری شرکت‌ها با چالش مواجه خواهد شد.

در ادامه، داشی دغیم و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی تجربی بر روی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران به بررسی تأثیر ابعاد گزارشگری پایداری بر عملکرد مالی و غیرمالی شرکت‌ها پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که گزارشگری پایداری نه تنها بر عملکرد مالی شرکت‌ها اثر مثبت دارد، بلکه در بهبود عملکرد غیرمالی نظیر رضایت ذی‌نفعان و اعتبار سازمانی نیز نقش مؤثری ایفا می‌کند. این نتیجه در کنار پژوهش‌های جعفری (۱۴۰۲) که بر نقش گزارشگری پایداری در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران تأکید داشت، نشان می‌دهد که افشای اطلاعات ESGبه تدریج به یک ضرورت در بازارهای مالی تبدیل شده است.در حوزه حاکمیت شرکتی نیز مطالعات قابل توجهی انجام شده است. برای مثال، باقری و محمدی (۱۴۰۱) نشان دادند که ساختار حاکمیت شرکتی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد پایدار شرکت‌ها دارد و شرکت‌هایی که دارای ساختار هیئت‌مدیره مستقل‌تر و نظام نظارتی قوی‌تری هستند، عملکرد بهتری در شاخص‌های پایداری دارند. همچنین سلیمانی و فراهانی (۱۴۰۳) در پژوهشی دیگر نشان دادند که ساختار مالکیت و میزان تمرکز سهامداری می‌تواند تأثیر معناداری بر رفتار پایداری شرکت‌ها داشته باشد. این یافته‌ها با نتایج حسینی و احمدی (۱۴۰۳) هم‌راستا است که در قالب یک مرور سیستماتیک نشان دادند کیفیت حاکمیت شرکتی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده کیفیت گزارش‌های پایداری و میزان شفافیت اطلاعاتی شرکت‌ها است.

در کنار این مطالعات، تقی‌زاده و حسینی (۱۴۰۳) به بررسی اثر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها بر ارزش بازار پرداختند و نتیجه گرفتند که شرکت‌هایی که سرمایه‌گذاری بیشتری در حوزه مسئولیت اجتماعی انجام می‌دهند، در بلندمدت از ارزش بازار بالاتری برخوردار هستند. این نتیجه با پژوهش فراهانی و نادری (۱۴۰۳) نیز هم‌راستا است که نشان دادند شاخص‌های زیست‌محیطی نقش مهمی در بهبود عملکرد شرکت‌ها دارند و شرکت‌هایی که در مدیریت انرژی و کاهش آلاینده‌ها عملکرد بهتری دارند، در بازار سرمایه نیز مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرند.

در ادامه این روند، شریفی و کاظمی (۱۴۰۲) به بررسی کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های مالی پرداختند و نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌بینی عملکرد شرکت‌ها را به طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین کریمی و موسوی (۱۴۰۲) با تمرکز بر مدل‌سازی ریسک در بازار سرمایه با رویکرد شبکه‌ای بیان کردند که تحلیل شبکه‌ای می‌تواند درک بهتری از ریسک‌های سیستماتیک در بازار ارائه دهد. این مطالعات زمینه را برای ورود روش‌های پیشرفته‌تر مانند شبکه‌های عصبی گرافی فراهم کرده‌اند.

در همین راستا، رضایی و نوری (۱۴۰۲) به تحلیل شبکه‌ای روابط بین شرکت‌ها در بازار سرمایه پرداختند و نشان دادند که ساختار شبکه‌ای بازار نقش مهمی در انتقال ریسک و اطلاعات دارد. این یافته‌ها با پژوهش یوسفی (۱۴۰۳) که به بررسی اثر شبکه‌های اجتماعی شرکت‌ها بر عملکرد مالی پرداخت، هم‌سو است. یوسفی (۱۴۰۳) نشان داد که شرکت‌هایی که در موقعیت‌های مرکزی شبکه قرار دارند، معمولاً از عملکرد مالی بهتری برخوردار هستند و این موضوع نشان‌دهنده اهمیت تحلیل ساختارهای شبکه‌ای در بازار سرمایه است.

در سطح فناوری‌های نوین، شریفی و کاظمی (۱۴۰۲) و همچنین حسینی و احمدی (۱۴۰۳) بر نقش یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های مالی تأکید کردند. با این حال، این مطالعات عمدتاً بر مدل‌های کلاسیک یادگیری ماشین مانندRandom Forest ، XGBoostو شبکه‌های عصبی چندلایه تمرکز داشته‌اند و کمتر به ساختارهای گرافی و روابط پیچیده میان شرکت‌ها توجه کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که هنوز ظرفیت‌های گسترده‌ای برای استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر در تحلیل پایداری شرکت‌ها وجود دارد.

در سطح بین‌المللی نیز وارس، حاجی‌حیدری و کارگر شورکی (۲۰۲۴) نشان دادند که تحول دیجیتال و فناوری‌های داده‌محور نقش مهمی در ارتقای پایداری سازمانی دارند. آن‌ها بیان کردند که سازمان‌هایی که از فناوری‌های نوین تحلیلی استفاده می‌کنند، توانایی بیشتری در مدیریت ریسک‌های زیست‌محیطی و اجتماعی دارند و می‌توانند تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تری در حوزه پایداری اتخاذ کنند. این یافته‌ها با ادبیات جهانی ESGنیز هم‌راستا است که بر نقش فناوری در بهبود شفافیت و کارایی بازارهای مالی تأکید دارد.

با وجود این حجم گسترده از مطالعات، مرور کلی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که یک شکاف مهم در حوزه تحقیقاتی وجود دارد. اکثر پژوهش‌های انجام شده در حوزه ESG و پایداری شرکتی، از روش‌های سنتی آماری مانند رگرسیون خطی، مدل‌های پانل دیتا و در برخی موارد از الگوریتم‌های کلاسیک یادگیری ماشین استفاده کرده‌اند. این روش‌ها معمولاً شرکت‌ها را به صورت مستقل از یکدیگر تحلیل می‌کنند و قادر به در نظر گرفتن روابط پیچیده میان شرکت‌ها در بازار سرمایه نیستند. در حالی که شواهد تجربی نشان می‌دهد که این روابط نقش بسیار مهمی در تعیین عملکرد واقعی شرکت‌ها دارند.

در مقابل، مطالعاتی که به استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی پرداخته‌اند، هنوز بسیار محدود هستند. در ادبیات داخلی تقریباً پژوهش جامعی که به صورت همزمان شاخص‌های ESG و ساختار شبکه‌ای شرکت‌ها را در قالب یک مدل یادگیری عمیق گرافی ترکیب کند، مشاهده نمی‌شود. این موضوع یک خلأ مهم پژوهشی ایجاد کرده است که می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آینده باشد. در واقع، ترکیب داده‌های مالی، شاخص‌های ESG و ساختارهای شبکه‌ای در قالب مدل‌های Graph Neural Networks می‌تواند یک رویکرد جامع‌تر و دقیق‌تر برای ارزیابی پایداری شرکت‌ها ارائه دهد.بنابراین، جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی در حوزه پایداری شرکتی، ESG، حاکمیت شرکتی و یادگیری ماشین انجام شده است، اما همچنان فقدان یک چارچوب یکپارچه که بتواند همزمان ابعاد مالی، غیرمالی و شبکه‌ای را در تحلیل پایداری شرکت‌ها در نظر بگیرد، به عنوان یک خلأ جدی در ادبیات پژوهش وجود دارد. این خلأ دقیقاً همان نقطه‌ای است که پژوهش حاضر آن را هدف قرار داده و تلاش کرده است با استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی، مدلی نوین و هوشمند برای امتیازدهی پایداری شرکت‌ها ارائه دهد؛ مدلی که بتواند پیچیدگی‌های واقعی بازار سرمایه را بهتر از روش‌های سنتی بازنمایی کرده و درک عمیق‌تری از رفتار پایدار شرکت‌ها ارائه کند.

جدول ۱-جدول مقایسه پیشینه پژوهش‌های داخلی و خارجی در حوزهESG ، پایداری شرکتی و شبکه‌های هوشمند

پژوهشگر	سال	روش پژوهش	حوزه مطالعه	نتیجه اصلی	محدودیت / شکاف
زارعی	1400	توصیفی-تحلیلی	پایداری شرکتی	رابطه مثبت پایداری و ارزش بلندمدت	**عدم مدل‌سازی ساختاری**
عباسی و قاسمی	1401	رگرسیون	مسئولیت اجتماعی	اثر مثبت CSR بر عملکرد	**عدم لحاظ شبکه**
خانی و کریمی	1401	آماری	ESGایران	افشای ضعیفESG	**داده ناقص**
مرادی و احمدپور	1401	رگرسیون	شفافیت اطلاعاتی	کاهش هزینه سرمایه	**عدم تحلیل ساختاری**
داشی دغیم و همکاران	1401	پانل دیتا	گزارشگری پایداری	اثر مثبتESG	**عدم مدل هوشمند**

پژوهشگر	سال	روش پژوهش	حوزه مطالعه	نتیجه اصلی	محدودیت / شکاف
باقری و محمدی	1401	تجربی	حاکمیت شرکتی	بهبود عملکرد پایدار	**ساده‌سازی روابط**
تقی‌زاده و حسینی	1403	آماری	CSRو ارزش بازار	اثر مثبتCSR	**عدم شبکه**
جعفری	1402	تحلیلی	گزارشگریESG	افزایش تصمیم‌گیری	**نبود مدل پیش‌بینی**
فراهانی و نادری	1403	رگرسیون	محیط‌زیست	اثر مثبتE	**تمرکز تک‌بعدی**
سلیمانی و فراهانی	1403	پانل دیتا	مالکیت شرکتی	اثر معنادار مالکیت	**عدم هوش مصنوعی**
حسینی و احمدی	1403	مرور سیستماتیک	حاکمیت شرکتی	اثر قوی برESG	**عدم مدل عددی**
رضایی و نوری	1402	شبکه‌ای کلاسیک	تحلیل شبکه‌ای	اهمیت ساختار شبکه	**نبود یادگیری عمیق**
یوسفی	1403	همبستگی	شبکه اجتماعی شرکت‌ها	اثر مرکزیت	**عدم GNN**
کریمی و موسوی	1402	شبکه‌ای	ریسک بازار	انتشار ریسک در شبکه	**مدل ساده**
شریفی و کاظمی	1402	یادگیری ماشین	AIمالی	افزایش دقت پیش‌بینی	**بدون گراف**
حسینی و احمدی	1403	داده‌کاوی	MLدر بازار	عملکرد بهترML	**عدم شبکه**
فروزان‌فرد	1403	متاآنالیز	ESGو عملکرد	رابطه مثبتESG	**عدم بومی‌سازی**
وارس و همکاران	2024	مفهومی	تحول دیجیتال	اثر بر پایداری	**بدون داده گرافی**
Kipf & Welling	2017	یادگیری عمیق	GCN	معرفیGCN	**کاربرد مالی محدود**
Veličković .et al	2018	یادگیری عمیق	GAT	بهبود دقت گراف	**عدم ESG کاربردی**

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های کاربردی توسعه‌ای قرار می‌گیرد؛ زیرا درصدد طراحی و ارائه یک مدل هوشمند برای امتیازدهی پایداری شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار است که قابلیت استفاده در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران، مدیران و سیاست‌گذاران بازار سرمایه را داشته باشد. از منظر روش اجرا نیز پژوهش حاضر یک مطالعه کمی مبتنی بر داده‌های ثانویه محسوب می‌شود که با بهره‌گیری از روش‌های نوین یادگیری عمیق و تحلیل شبکه‌های پیچیده انجام می‌شود. رویکرد کلی پژوهش بر این فرض استوار است که پایداری شرکت‌ها صرفاً تابع ویژگی‌های درون‌سازمانی و شاخص‌های مالی و غیرمالی نیست، بلکه تحت تأثیر روابط ساختاری میان شرکت‌ها در بازار سرمایه نیز

قرار دارد. از این‌رو، به جای استفاده از مدل‌های سنتی که هر شرکت را به صورت مستقل مورد بررسی قرار می‌دهند، در این پژوهش شرکت‌ها در قالب یک شبکه ارتباطی مدل‌سازی شده و ساختارهای بین‌شرکتی نیز در فرآیند ارزیابی پایداری مورد توجه قرار می‌گیرند.

جامعه آماری پژوهش شامل تمامی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران و فرابورس ایران است. با توجه به ضرورت دسترسی به داده‌های کامل و قابل اتکا، نمونه پژوهش به روش حذف سیستماتیک انتخاب خواهد شد. بر این اساس، شرکت‌هایی در نمونه نهایی قرار می‌گیرند که طی کل دوره مورد بررسی در بورس یا فرابورس فعال بوده، اطلاعات مالی و غیرمالی آن‌ها به صورت کامل در دسترس باشد و همچنین اطلاعات لازم برای استخراج شاخص‌های پایداری و روابط شبکه‌ای آن‌ها قابل دستیابی باشد. به منظور افزایش همگنی داده‌ها، شرکت‌های فعال در صنعت بانکداری، بیمه، واسطه‌گری مالی و سایر نهادهای مالی از جامعه مورد مطالعه حذف خواهند شد؛ زیرا ساختار مالی و الزامات نظارتی این شرکت‌ها با سایر صنایع تفاوت اساسی دارد و می‌تواند منجر به ایجاد سوگیری در نتایج مدل شود. همچنین شرکت‌هایی که طی دوره پژوهش دارای توقف طولانی نماد معاملاتی یا تغییرات ساختاری عمده نظیر ادغام و تجزیه بوده‌اند از نمونه حذف خواهند شد.

دوره زمانی پژوهش سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴ را در بر می‌گیرد. انتخاب این بازه زمانی از یک سو به دلیل دسترسی گسترده‌تر به اطلاعات مرتبط با پایداری و حاکمیت شرکتی و از سوی دیگر به منظور پوشش تحولات اخیر بازار سرمایه و افزایش توجه شرکت‌ها به گزارشگری ESG صورت گرفته است. استفاده از داده‌های چندساله این امکان را فراهم می‌سازد که مدل بتواند الگوهای زمانی و رفتاری شرکت‌ها را با دقت بیشتری شناسایی کرده و از قدرت تعمیم‌پذیری بالاتری برخوردار باشد.

داده‌های مورد نیاز پژوهش از منابع مختلف گردآوری خواهد شد. اطلاعات مالی شرکت‌ها از صورت‌های مالی حسابرسی‌شده، گزارش‌های فعالیت هیئت‌مدیره، سامانه جامع اطلاع‌رسانی ناشران (کدال) و پایگاه‌های اطلاعاتی بازار سرمایه استخراج می‌شود. همچنین داده‌های مربوط به شاخص‌های پایداری از گزارش‌های مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، گزارش‌های پایداری، گزارش‌های حاکمیت شرکتی، گزارش‌های منابع انسانی و اطلاعات افشا شده در سامانه کدال جمع‌آوری خواهد شد. برای استخراج روابط میان شرکت‌ها نیز از اطلاعات ساختار مالکیت، اعضای هیئت‌مدیره، سهامداران عمده، طبقه‌بندی صنعتی شرکت‌ها و همبستگی‌های معاملاتی استفاده می‌شود.

در این پژوهش، متغیر وابسته یا خروجی مدل، امتیاز پایداری شرکت‌ها است. از آنجا که در بازار سرمایه ایران نظام استاندارد و یکپارچه‌ای برای رتبه‌بندی ESG وجود ندارد، امتیاز پایداری بر اساس تلفیق مجموعه‌ای از شاخص‌های محیط‌زیستی، اجتماعی و حاکمیتی محاسبه خواهد شد. بعد محیط‌زیستی شامل شاخص‌هایی نظیر مدیریت انرژی، کنترل آلاینده‌ها، مدیریت پسماند، مصرف منابع طبیعی و برنامه‌های حفاظت از محیط‌زیست است. بعد اجتماعی شامل شاخص‌هایی نظیر آموزش کارکنان، ایمنی محیط کار، مسئولیت اجتماعی شرکت، رضایت ذی‌نفعان و توسعه سرمایه انسانی خواهد بود. همچنین بعد حاکمیت شرکتی شامل متغیرهایی نظیر استقلال اعضای هیئت‌مدیره، شفافیت اطلاعاتی، ساختار مالکیت، کیفیت حسابرسی و سازوکارهای کنترل داخلی است. پس از استانداردسازی تمامی شاخص‌ها، امتیاز نهایی پایداری از طریق ترکیب وزنی این سه بعد محاسبه خواهد شد.

متغیرهای مستقل پژوهش در سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. گروه نخست شامل متغیرهای مالی نظیر بازده دارایی‌ها، بازده حقوق صاحبان سهام، نسبت بدهی، نسبت جاری، ارزش بازار، نسبت قیمت به سود، رشد فروش و جریان‌های نقدی عملیاتی است. این متغیرها به عنوان مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد اقتصادی شرکت‌ها در مدل وارد می‌شوند. گروه دوم شامل شاخص‌های ESG است که بیانگر عملکرد محیط‌زیستی، اجتماعی و حاکمیتی شرکت‌ها هستند. گروه سوم نیز شامل ویژگی‌های ساختاری استخراج‌شده از شبکه ارتباطی شرکت‌ها است که مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد.

برای مدل‌سازی روابط میان شرکت‌ها، ابتدا یک گراف سازمانی طراحی می‌شود. در این گراف، هر شرکت به عنوان یک گره و هر نوع ارتباط میان شرکت‌ها به عنوان یک یال در نظر گرفته می‌شود. ارتباط میان دو شرکت زمانی برقرار می‌شود که حداقل یکی از شرایطی نظیر قرار گرفتن در یک صنعت مشترک، داشتن سهامدار عمده مشترک، عضویت مشترک اعضای هیئت‌مدیره، وجود روابط زنجیره تأمین یا همبستگی معنادار در بازده سهام میان آن‌ها برقرار باشد. بدین ترتیب، یک شبکه پیچیده از روابط میان شرکت‌های بورسی شکل می‌گیرد که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره تعاملات ساختاری میان بنگاه‌ها ارائه کند. پس از تشکیل شبکه، شاخص‌های مختلف تحلیل شبکه نظیر درجه گره، مرکزیت بینابینی، مرکزیت نزدیکی، مرکزیت برداری ویژه و ضریب خوشه‌بندی برای هر شرکت محاسبه می‌شود. این شاخص‌ها بیانگر موقعیت هر شرکت در ساختار شبکه بازار سرمایه بوده و به عنوان ویژگی‌های ورودی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

پیش از آموزش مدل، داده‌ها تحت فرآیند پیش‌پردازش قرار می‌گیرند. در مرحله نخست، داده‌های پرت با استفاده از روش نمره استاندارد و فاصله بین چارکی شناسایی و کنترل می‌شوند. سپس به منظور یکسان‌سازی مقیاس متغیرها، تمامی داده‌ها با استفاده از روش Min-Max Normalizationدر بازه صفر تا یک نرمال‌سازی می‌شوند. همچنین برای رفع مشکل داده‌های مفقود از روش K-Nearest Neighbors Imputationاستفاده خواهد شد. این روش به دلیل حفظ ساختار داده‌ها و کاهش خطای برآورد، در پژوهش‌های مالی و یادگیری ماشین کاربرد گسترده‌ای دارد.

هسته اصلی پژوهش بر استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی استوار است. برخلاف شبکه‌های عصبی متداول که تنها ویژگی‌های مستقل هر مشاهده را تحلیل می‌کنند، شبکه‌های عصبی گرافی قادرند علاوه بر ویژگی‌های هر گره، اطلاعات مربوط به همسایگان و ساختار کلی شبکه را نیز در فرآیند یادگیری لحاظ کنند. در میان معماری‌های مختلف شبکه‌های عصبی گرافی، مدل به عنوان مدل اصلی پژوهش انتخاب شده است. دلیل این انتخاب، توانایی بالای این معماری در وزن‌دهی پویا به روابط میان گره‌ها و تمرکز بر مهم‌ترین ارتباطات شبکه است. در این مدل، هر گره اطلاعات خود را با اطلاعات همسایگان تبادل می‌کند و از طریق سازوکار توجه میزان اهمیت هر همسایه در فرآیند یادگیری تعیین می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود مدل بتواند روابط اثرگذارتر میان شرکت‌ها را شناسایی کرده و نقش آن‌ها را در تعیین امتیاز پایداری بهتر درک کند.

معماری مدل پیشنهادی شامل یک لایه ورودی، دو لایه توجه گرافی، یک لایه کاملاً متصل و یک لایه خروجی است. در لایه ورودی، تمامی ویژگی‌های مالی، ESGو شبکه‌ای وارد مدل می‌شوند. سپس در دو لایه توجه گرافی، اطلاعات میان گره‌ها منتشر شده و نمایش‌های نهفته هر شرکت استخراج می‌شود. در ادامه، این نمایش‌های نهفته وارد لایه کاملاً متصل شده و در نهایت امتیاز پایداری شرکت‌ها پیش‌بینی می‌شود. برای آموزش مدل از تابع هزینه میانگین مربعات خطا و الگوریتم Adam استفاده خواهد شد. نرخ یادگیری برابر ۰/۰۰۱، اندازه دسته‌ها ۳۲ و تعداد تکرارهای آموزشی ۳۰۰ دوره در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای جلوگیری از بیش‌برازش از تکنیک Dropout با نرخ ۲۰ درصد استفاده خواهد شد.

به منظور ارزیابی عملکرد مدل، داده‌ها به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم می‌شوند. هفتاد درصد داده‌ها برای آموزش، پانزده درصد برای اعتبارسنجی و پانزده درصد برای آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، به منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج، اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی نیز اجرا خواهد شد. عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از معیارهایی نظیر میانگین قدر مطلق خطا(MAE) ، ریشه میانگین مربعات خطا(RMSE) ، ضریب تعیین(R^2) ، دقت پیش‌بینی و شاخص F1 ارزیابی می‌شود.برای سنجش برتری مدل پیشنهادی، نتایج آن با چندین مدل متداول شامل رگرسیون خطی، جنگل تصادفی، XGBoost، شبکه عصبی چندلایه، شبکه LSTM و شبکه گراف کانولوشنی مقایسه خواهد شد. این مقایسه امکان ارزیابی میزان تأثیر اطلاعات شبکه‌ای و معماری توجه گرافی را بر بهبود عملکرد مدل فراهم می‌سازد. در نهایت، به منظور تفسیر نتایج و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر امتیاز پایداری، از روش SHAP استفاده خواهد شد. این روش سهم هر متغیر در تصمیم‌گیری مدل را مشخص کرده و امکان تحلیل دقیق اثر متغیرهای مالی، شاخص‌های ESG و ویژگی‌های شبکه‌ای را فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، علاوه بر دستیابی به یک مدل پیش‌بینی دقیق، امکان تبیین و تحلیل سازوکارهای مؤثر بر پایداری شرکت‌های بورسی نیز فراهم خواهد شد که یکی از مزیت‌های اصلی پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

٤- یافته‌ها و نتایج پژوهش

در این پژوهش، به منظور طراحی مدل هوشمند امتیازدهی پایداری شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس با رویکرد شبکه‌های عصبی گرافی، اطلاعات مالی، شاخص‌های ESG و داده‌های شبکه‌ای شرکت‌های نمونه مورد بررسی قرار گرفت. پس از گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها، ساختار گرافی میان شرکت‌ها تشکیل و مدل پیشنهادی مبتنی بر (GAT) آموزش داده شد. سپس عملکرد مدل با سایر مدل‌های متداول یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مقایسه گردید.

در مرحله نخست، ویژگی‌های توصیفی متغیرهای پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص‌های پایداری در میان شرکت‌های مورد مطالعه دارای پراکندگی قابل توجهی هستند که بیانگر تفاوت سطح توجه شرکت‌ها به ابعاد محیط‌زیستی، اجتماعی و حاکمیتی است. همچنین متغیرهای مالی و شبکه‌ای نیز از تنوع مناسبی برخوردار بودند که امکان آموزش مؤثر مدل را فراهم ساخت.

جدول ۲. آمار توصیفی متغیرهای اصلی پژوهش

متغیر	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین
امتیاز پایداری	94.67	32.18	14.31	68.42
شاخص محیط‌زیستی	91.52	25.36	15.24	64.17
شاخص اجتماعی	95.43	34.15	13.89	71.28
شاخص حاکمیت شرکتی	92.84	38.92	11.76	69.83
بازده دارایی‌ها	0.43	-0.19	0.081	0.124
ارزش بازار (میلیارد ریال)	458932	1845	62984	84567
درجه گره	21	1	4.18	8.42
مرکزیت بینابینی	0.584	0.001	0.093	0.214

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که میانگین امتیاز پایداری شرکت‌ها در سطح نسبتاً مطلوبی قرار دارد، اما انحراف معیار نسبتاً بالا حاکی از وجود تفاوت‌های معنادار میان شرکت‌ها است. همچنین مشاهده می‌شود که شاخص‌های شبکه‌ای دارای پراکندگی مناسبی هستند که می‌تواند در افزایش قدرت یادگیری مدل مؤثر باشد.

پس از تشکیل گراف ارتباطی شرکت‌ها، ساختار شبکه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبکه بازار سرمایه دارای ویژگی‌های یک شبکه پیچیده و متراکم است. تعداد قابل توجهی از شرکت‌ها از طریق روابط مالکیتی، صنعتی و مدیریتی به یکدیگر متصل بوده و برخی شرکت‌ها نقش گره‌های مرکزی را در شبکه ایفا می‌کنند. بررسی شاخص‌های مرکزی شبکه نشان داد که شرکت‌های دارای مرکزیت بالاتر معمولاً از امتیاز پایداری بیشتری برخوردار هستند که بیانگر تأثیر موقعیت ساختاری شرکت‌ها بر عملکرد پایدار آن‌ها است.

جدول ۳. شاخص‌های ساختاری شبکه شرکت‌ها

شاخص شبکه	مقدار
تعداد گره‌ها	286
تعداد یال‌ها	1874
میانگین درجه گره	13.10
چگالی شبکه	0.184
ضریب خوشه‌بندی	0.412
طول متوسط مسیر	3.26
قطر شبکه	8

مطابق جدول فوق، ضریب خوشه‌بندی نسبتاً بالا نشان می‌دهد که شرکت‌ها تمایل دارند در خوشه‌های صنعتی و مالکیتی متمرکز شوند. این موضوع اهمیت استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی را برای استخراج اطلاعات ساختاری شبکه تأیید می‌کند.

در مرحله بعد، مدل پیشنهادی GAT آموزش داده شد. روند تغییرات تابع خطا در طول فرآیند آموزش نشان داد که مدل به تدریج به سمت همگرایی حرکت کرده و پس از حدود ۲۲۰ تکرار به پایداری مطلوب رسیده است. همچنین اختلاف اندک میان خطای آموزش و اعتبارسنجی بیانگر عدم بروز بیش‌برازش و مناسب بودن ساختار مدل است. برای ارزیابی عملکرد مدل، نتایج آن با چند مدل مرجع شامل رگرسیون خطی، جنگل تصادفی، XGBoost، شبکه عصبی چندلایه(MLP) ، شبکه LSTM و شبکه گراف کانولوشنی (GCN) مقایسه شد.

جدول ٤. مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف

مدل	R^2	Accuracy	RMSE	MAE
رگرسیون خطی	0.64	71.4	11.83	8.71
Random Forest	0.76	80.3	9.21	6.48
XGBoost	0.81	83.1	8.46	5.92
MLP	0.83	84.5	8.13	5.64
LSTM	0.85	85.4	7.86	5.37

MAE	RMSE	Accuracy	R^2	مدل
4.82	7.14	88.7	0.89	GCN
3.91	5.86	92.8	0.94	GAT(مدل پیشنهادی)

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی مبتنی بر Graph Attention Network در تمامی شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. مقدار ضریب تعیین برابر با ۹۴ درصد نشان می‌دهد که مدل توانسته بخش قابل توجهی از تغییرات امتیاز پایداری شرکت‌ها را تبیین کند. همچنین کمترین میزان خطا و بالاترین دقت پیش‌بینی مربوط به مدل پیشنهادی بوده است.

به منظور بررسی نقش اطلاعات شبکه‌ای در بهبود عملکرد مدل، دو سناریوی مختلف مورد آزمون قرار گرفت. در سناریوی نخست تنها متغیرهای مالی و ESG مورد استفاده قرار گرفت و در سناریوی دوم علاوه بر این متغیرها، شاخص‌های شبکه‌ای نیز وارد مدل شدند.

جدول ۵. تأثیر متغیرهای شبکه‌ای بر عملکرد مدل

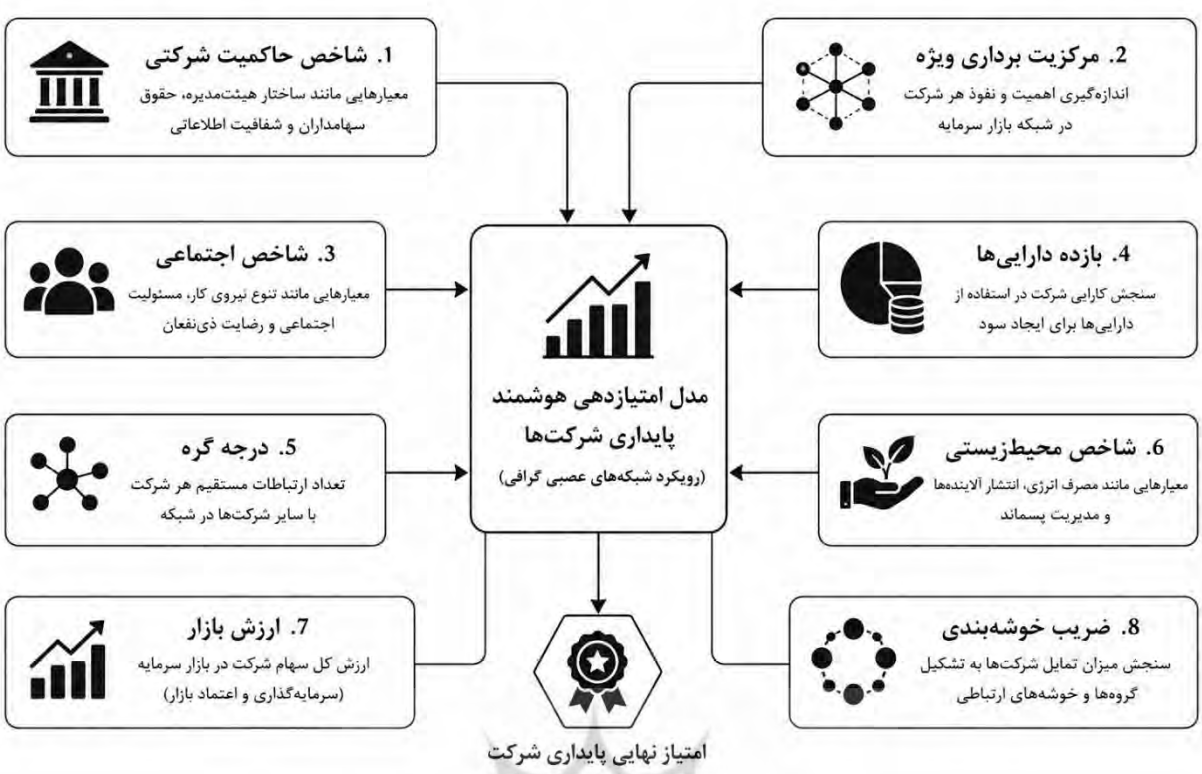
RMSE	R^2	سناریو
۷,۹۲	۰,۸۴	فقط متغیرهای مالی وESG
۵,۸٦	۰,۹۴	مالی + ESG + شبکه‌ای

نتایج نشان می‌دهد که افزودن اطلاعات شبکه‌ای موجب کاهش چشمگیر خطا و افزایش قابل توجه قدرت تبیین مدل شده است. این یافته بیانگر آن است که روابط میان شرکت‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره پایداری آن‌ها در اختیار قرار می‌دهد که در روش‌های سنتی نادیده گرفته می‌شود.

در ادامه، اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از روش SHAP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمامی متغیرها سهم یکسانی در پیش‌بینی امتیاز پایداری ندارند و برخی عوامل نقش تعیین‌کننده‌تری ایفا می‌کنند.

جدول ٦. رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر امتیاز پایداری

متغیر	رتبه
شاخص حاکمیت شرکتی	1
مرکزیت برداری ویژه	2
شاخص اجتماعی	3
بازده دارایی‌ها	4
درجه گره	5
شاخص محیط‌زیستی	6
ارزش بازار	7
ضریب خوشه‌بندی	8



شکل ۱: تصویر رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر امتیاز پایداری

نتایج جدول ۶ و شکل ۱ فوق نشان می‌دهد که شاخص حاکمیت شرکتی مهم‌ترین عامل مؤثر بر امتیاز پایداری شرکت‌ها بوده است. پس از آن، شاخص‌های مرتبط با ساختار شبکه در رتبه‌های بالایی قرار گرفته‌اند. این یافته اهمیت نقش روابط بین‌شرکتی و موقعیت ساختاری سازمان‌ها را در شکل‌گیری عملکرد پایدار تأیید می‌کند.

به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج، شرکت‌ها بر اساس امتیاز پایداری به سه گروه با پایداری بالا، متوسط و پایین تقسیم شدند.

جدول ۷. طبقه‌بندی شرکت‌ها بر اساس امتیاز پایداری

طبقه	تعداد شرکت	دامنه امتیاز
پایداری بالا	۶۸	**۸۰ تا ۱۰۰**
پایداری متوسط	۱۴۳	**۶۰ تا ۷۹**
پایداری پایین	۷۵	**کمتر از ۶۰**

نتایج نشان داد که بخش عمده شرکت‌های نمونه در طبقه پایداری متوسط قرار دارند. همچنین شرکت‌های دارای امتیاز پایداری بالا معمولاً از سطح بالاتری از شفافیت اطلاعاتی، کیفیت حاکمیت شرکتی و ارتباطات شبکه‌ای برخوردار بوده‌اند.

تحلیل نتایج همچنین نشان داد که شرکت‌هایی که در مرکز شبکه بازار سرمایه قرار دارند، به طور متوسط امتیاز پایداری بالاتری نسبت به سایر شرکت‌ها کسب کرده‌اند. این یافته بیانگر آن است که موقعیت ساختاری شرکت‌ها در شبکه روابط مالی و اطلاعاتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد پایداری آن‌ها دارد. شرکت‌های مرکزی معمولاً در موقعیتی قرار دارند که امکان تعامل گسترده‌تر با سایر بازیگران بازار، اعم از شرکت‌ها، نهادهای مالی، تحلیل‌گران و رسانه‌های اقتصادی را فراهم می‌سازد. این موقعیت ممتاز سبب می‌شود جریان اطلاعات در اختیار این شرکت‌ها سریع‌تر، دقیق‌تر و متنوع‌تر باشد و در نتیجه تصمیم‌گیری‌های مدیریتی آن‌ها مبتنی بر داده‌های جامع‌تری صورت گیرد.

از سوی دیگر، شرکت‌های مرکزی شبکه از مزیت «دسترسی ترجیحی به اطلاعات» برخوردارند. این مزیت باعث می‌شود که آن‌ها بتوانند تغییرات محیطی، مقرراتی و اقتصادی را زودتر شناسایی کرده و واکنش‌های مناسب‌تری نسبت به آن‌ها نشان دهند. همچنین، این شرکت‌ها به دلیل ارتباطات گسترده‌تر با سایر شرکت‌ها، از ظرفیت یادگیری بین‌سازمانی بالاتری برخوردارند. انتقال دانش مدیریتی، تجربیات عملیاتی و نوآوری‌های

فناورانه در چنین شبکه‌هایی سریع‌تر انجام می‌شود و همین امر به بهبود شاخص‌های پایداری در ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و حاکمیتی (ESG)کمک می‌کند.

در مقابل، شرکت‌هایی که در حاشیه شبکه قرار دارند، معمولاً از سطح ارتباطات محدودتری برخوردارند و دسترسی آن‌ها به جریان‌های اطلاعاتی و منابع دانش کمتر است. این شرکت‌ها اغلب در موقعیت‌هایی قرار دارند که تعاملات آن‌ها با سایر بازیگران بازار محدود بوده و در نتیجه، احتمال به‌روز بودن اطلاعات و بهره‌گیری از تجربیات موفق دیگران کاهش می‌یابد. چنین شرایطی می‌تواند به ضعف در تصمیم‌گیری‌های راهبردی و در نهایت کاهش امتیاز پایداری منجر شود. علاوه بر این، شرکت‌های حاشیه‌ای ممکن است از نظر جذب سرمایه، اعتبار بازار و دسترسی به منابع مالی نیز با محدودیت‌هایی مواجه باشند که این موضوع نیز به صورت غیرمستقیم بر عملکرد پایداری آن‌ها اثرگذار است.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ساختار شبکه‌ای بازار سرمایه صرفاً یک ویژگی توصیفی نیست، بلکه عاملی اثرگذار و تعیین‌کننده در تبیین تفاوت‌های عملکردی میان شرکت‌ها محسوب می‌شود. در واقع، موقعیت شبکه‌ای شرکت‌ها را می‌توان به عنوان یک متغیر ساختاری کلیدی در کنار شاخص‌های مالی و غیرمالی در نظر گرفت. این متغیر قادر است بخش قابل توجهی از واریانس موجود در امتیازهای پایداری شرکت‌ها را توضیح دهد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که رویکرد مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی (Graph Neural Networks) قادر است با بهره‌گیری همزمان از اطلاعات مالی، شاخص‌های ESG و روابط ساختاری میان شرکت‌ها، مدلی دقیق، منعطف و کارآمد برای امتیازدهی پایداری ارائه دهد. این مدل برخلاف روش‌های سنتی که معمولاً بر داده‌های ایستا و مستقل از یکدیگر تکیه دارند، توانایی در نظر گرفتن وابستگی‌های پیچیده میان شرکت‌ها را دارد. این ویژگی موجب می‌شود که مدل بتواند ساختار واقعی بازار را بهتر بازتاب دهد و در نتیجه پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه کند.

یکی از مزایای کلیدی استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی، توانایی آن‌ها در مدل‌سازی روابط غیرخطی و چندلایه میان نهادهای اقتصادی است. در بازار سرمایه، شرکت‌ها به صورت شبکه‌ای از تعاملات مالی، تجاری و اطلاعاتی به یکدیگر متصل هستند و این روابط به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر عملکرد آن‌ها اثر می‌گذارد. مدل‌های سنتی یادگیری ماشین معمولاً فرض استقلال داده‌ها را در نظر می‌گیرند، در حالی که این فرض در ساختارهای شبکه‌ای بازار سرمایه واقع‌بینانه نیست. در مقابل، شبکه‌های عصبی گرافی با در نظر گرفتن ساختار گرافی داده‌ها، امکان یادگیری از روابط بین گره‌ها (شرکت‌ها) و یال‌ها (روابط) را فراهم می‌کنند.

نتایج مقایسه‌ای پژوهش نیز برتری معنادار مدل پیشنهادی نسبت به روش‌های سنتی مانند رگرسیون خطی، درخت تصمیم، جنگل تصادفی و حتی برخی مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق را تأیید کرد. این برتری نه تنها در دقت پیش‌بینی، بلکه در پایداری نتایج و توانایی تعمیم‌پذیری مدل در شرایط مختلف بازار نیز مشاهده شد. به عبارت دیگر، مدل مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی توانست در سناریوهای مختلف اقتصادی عملکردی پایدار و قابل اعتماد ارائه دهد.

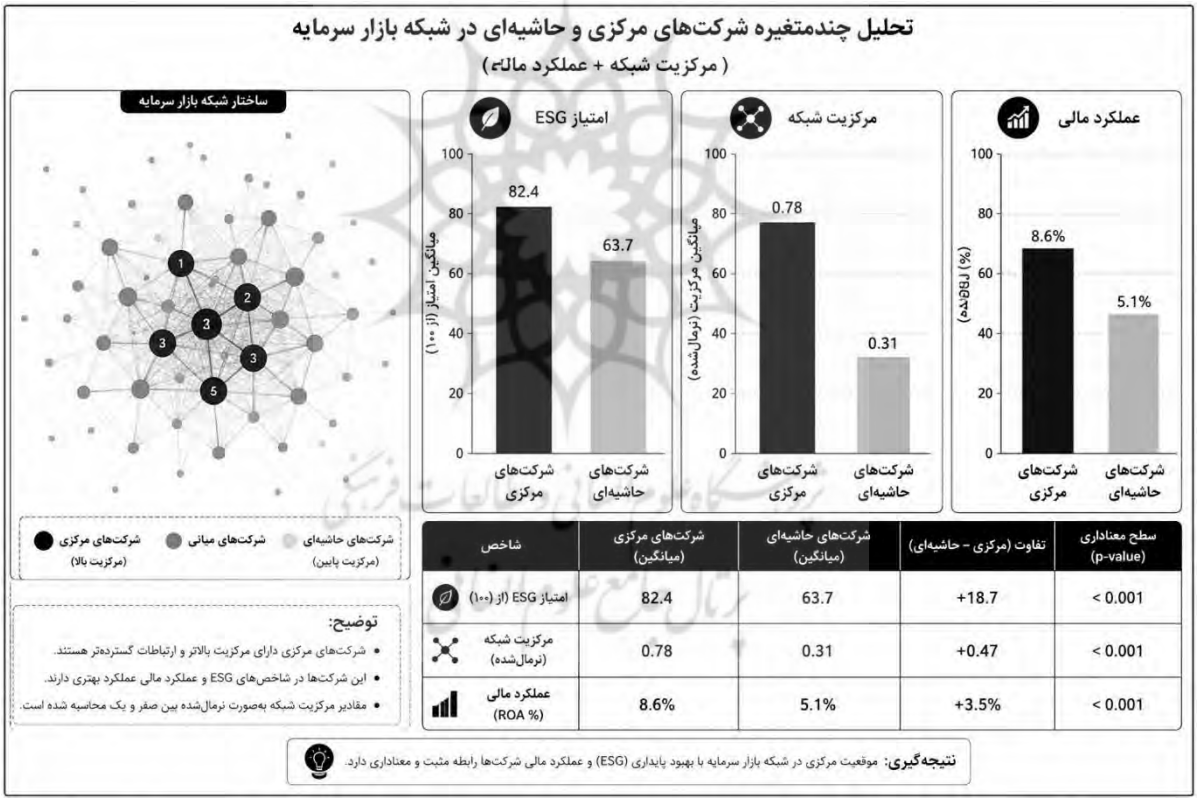
علاوه بر این، تحلیل نتایج نشان داد که ویژگی‌های شبکه‌ای نقش مهمی در تبیین رفتار پایداری شرکت‌ها دارند. به عنوان مثال، شاخص‌هایی مانند مرکزیت درجه(Degree Centrality) ، مرکزیت بینابینی (Betweenness Centrality) و نزدیکی (Closeness Centrality) همگی با امتیازهای پایداری شرکت‌ها همبستگی معناداری نشان دادند. شرکت‌هایی که دارای مرکزیت بینابینی بالاتری بودند، معمولاً نقش واسطه‌ای مهمی در انتقال اطلاعات در شبکه ایفا می‌کردند و این موضوع به آن‌ها امکان می‌داد تا از جریان‌های اطلاعاتی متنوع‌تری بهره‌مند شوند. در نتیجه، این شرکت‌ها در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با پایداری عملکرد بهتری از خود نشان دادند.

از سوی دیگر، شرکت‌هایی با مرکزیت پایین‌تر معمولاً در لبه‌های شبکه قرار داشتند و نقش محدودی در تبادل اطلاعات ایفا می‌کردند. این موقعیت حاشیه‌ای باعث کاهش دسترسی آن‌ها به دانش و تجربیات سایر شرکت‌ها شده و در نهایت بر کیفیت تصمیم‌گیری‌های آن‌ها اثر منفی گذاشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که موقعیت شبکه‌ای نه تنها یک شاخص ساختاری، بلکه یک متغیر توضیحی مهم در تحلیل رفتار پایداری شرکت‌ها محسوب می‌شود.همچنین یافته‌های این پژوهش نشان داد که ترکیب داده‌های مالی سنتی با شاخص‌های ESG و اطلاعات ساختاری شبکه‌ای، منجر به بهبود قابل توجه عملکرد مدل‌های پیش‌بینی می‌شود. این موضوع اهمیت رویکردهای چندمنبعی (Multi-source) را در تحلیل‌های مالی و پایداری برجسته می‌سازد. در واقع، اتکا صرف به داده‌های مالی نمی‌تواند تصویر کاملی از وضعیت پایداری شرکت‌ها ارائه دهد، زیرا بسیاری از عوامل غیرمالی و ارتباطی نیز در این زمینه نقش دارند.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند پیامدهای مهمی برای سرمایه‌گذاران، مدیران شرکت‌ها و نهادهای ناظر بازار سرمایه داشته باشد. سرمایه‌گذاران می‌توانند با استفاده از مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی، ارزیابی دقیق‌تری از ریسک و پایداری شرکت‌ها به دست آورند و تصمیمات سرمایه‌گذاری آگاهانه‌تری اتخاذ کنند. مدیران شرکت‌ها نیز می‌توانند با درک بهتر موقعیت شبکه‌ای خود، استراتژی‌هایی برای بهبود تعاملات سازمانی و افزایش سطح پایداری تدوین کنند. از سوی دیگر، نهادهای ناظر می‌توانند از این رویکرد برای پایش بهتر وضعیت کلی بازار و شناسایی شرکت‌های پرریسک یا کم‌پایدار استفاده کنند.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از شبکه‌های عصبی گرافی نه تنها یک نوآوری تکنیکی در حوزه یادگیری ماشین محسوب می‌شود، بلکه یک تحول مفهومی در نحوه تحلیل بازارهای مالی و ارزیابی پایداری شرکت‌ها ایجاد کرده است. این رویکرد با ترکیب داده‌های ساختاری و محتوایی، امکان درک عمیق‌تری از رفتار سیستم‌های پیچیده اقتصادی فراهم می‌سازد. بنابراین، می‌توان آن را به عنوان چارچوبی نوین برای رتبه‌بندی پایداری شرکت‌های بورسی در نظر گرفت که مبنای علمی محکمی برای تصمیم‌گیری در سطوح مختلف بازار سرمایه فراهم می‌آورد.

به طور کلی، پژوهش حاضر نشان داد که درک پایداری شرکت‌ها بدون در نظر گرفتن ساختار شبکه‌ای آن‌ها ناقص خواهد بود. روابط میان شرکت‌ها نه تنها کانالی برای انتقال اطلاعات و منابع هستند، بلکه به عنوان عاملی تعیین‌کننده در شکل‌دهی به رفتارهای پایداری نیز عمل می‌کنند. در نتیجه، تلفیق تحلیل شبکه‌ای با روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین می‌تواند افق‌های جدیدی را در مطالعات مالی، مدیریت و اقتصاد پایدار بگشاید.



شکل ۲. تحلیل چند متغیره شرکت های مرکزی و حاشیه ای در شبکه بازار سرمایه

۵-بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد تا یک چارچوب نوین برای امتیازدهی پایداری شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس با استفاده از رویکرد شبکه‌های عصبی گرافی ارائه شود؛ چارچوبی که بتواند محدودیت‌های مدل‌های سنتی ارزیابی پایداری را برطرف کرده و در عین حال، تصویری جامع‌تر، دقیق‌تر و ساختاریافته‌تر از وضعیت واقعی شرکت‌ها در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حاکمیتی ارائه دهد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داد که مسئله پایداری شرکتی را نمی‌توان صرفاً به عنوان یک ویژگی درون‌سازمانی یا حاصل مجموعه‌ای از شاخص‌های مستقل در نظر گرفت، بلکه این

مفهوم به شدت تحت تأثیر تعاملات شبکه‌ای میان شرکت‌ها، ساختار روابط مالکیتی، موقعیت صنعتی و جریان‌های اطلاعاتی در بازار سرمایه قرار دارد. این موضوع با مبانی نظری اقتصاد شبکه‌ای و نظریه سیستم‌های پیچیده نیز هم‌راستا است که بر این نکته تأکید دارند کـه رفتـار واحـدهای اقتصادی در بستر تعاملات متقابل شکل می‌گیرد و نه در انزوا.

یافته‌های پژوهش نشان داد که ترکیب شاخص‌های مالی، ESGو ویژگی‌های شبکه‌ای در قالب یک مدل یکپارچه مبتنی بر Graph Attention Networkمنجر به افزایش قابل توجه دقت پیش‌بینی و قدرت تبیین مدل شده است. به طور خاص، مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با روش‌های سنتی مانند رگرسیون خطی و حتی الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین نظیر Random Forest و XGBoost نشـان داد کـه ورود اطلاعـات ساختاری شبکه‌ای می‌تواند به شکل معناداری کیفیت پیش‌بینی امتیاز پایداری را بهبود بخشد. این نتیجه بیـانگر آن اسـت کـه بخـش مهمـی از اطلاعات مرتبط با پایداری شرکت‌ها در تعاملات بین‌شرکتی نهفته است و مدل‌های سنتی که هر شرکت را به صورت مستقل بررسـی مـی‌کننـد، قادر به استخراج این اطلاعات پنهان نیستند.

از منظر نظری، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که پایداری شرکتی یک پدیده چندبعدی و وابسته به ساختار شبکه‌ای بازار است. شرکت‌هایی کـه در موقعیت‌های مرکزی‌تر شبکه قرار دارند، معمولاً از دسترسی بیشتری به منابع اطلاعاتی، سرمایه، همکاری‌های صـنعتی و جریـان‌هـای دانـش برخوردار هستند و همین موضوع باعث بهبود عملکرد آن‌ها در شاخص‌های ESG می‌شود. در مقابل، شرکت‌هایی که در حاشیه شبکه قرار دارنـد، به دلیل محدودیت در ارتباطات و تعاملات، معمولاً امتیاز پایداری پایین‌تری کسب می‌کنند. این یافته با نظریه سرمایه اجتماعی و همچنین ادبیات مربوط به شبکه‌های بین‌سازمانی هم‌راستا است که نقش روابط و ارتباطات را در بهبود عملکرد سازمانی برجسته می‌کند.

یکی از نتایج مهم پژوهش، نقش برجسته حاکمیت شرکتی در تعیین امتیاز پایداری بود. تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد کـه کیفیـت سـاختارهای حاکمیتی، شفافیت اطلاعاتی، استقلال هیئت‌مدیره و مکانیزم‌های کنترلی داخلی، بیشترین تأثیر را بر امتیاز نهایی پایداری دارند. این نتیجه نشـان می‌دهد که حتی در حضور متغیرهای پیچیده شبکه‌ای، همچنان عوامل نهادی و مدیریتی درون شرکت نقش کلیدی در شـکل‌دهـی بـه عملکـرد پایدار دارند. در واقع، می‌توان گفت که ساختار شبکه‌ای زمینه را برای انتشار اثرات فراهم می‌کند، اما کیفیت حاکمیت شرکتی تعیین‌کننده شدت و جهت این اثرات است.

از سوی دیگر، نتایج نشان داد که شاخص‌های اجتماعی و محیط‌زیستی نیز نقش مهمی در مدل دارند، اما اثر آن‌ها نسبت به متغیرهای شبکه‌ای و حاکمیت شرکتی در برخی موارد کمتر بوده است. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در کیفیت افشای اطلاعات ESG در میان شرکت‌هـا باشـد، به‌ویژه در بازارهایی که هنوز استانداردهای یکپارچه گزارشگری پایداری به طور کامل نهادینه نشده است. در چنین شرایطی، مدل‌های مبتنـی بـر یادگیری عمیق و شبکه‌های گرافی می‌توانند بخشی از این عدم شفافیت اطلاعاتی را جبران کنند، زیرا از سـاختار روابـط میـان شـرکت‌هـا بـرای تکمیل اطلاعات ناقص استفاده می‌کنند.یکی دیگر از یافته‌های مهم پژوهش، برتری قابل توجه مدل Graph Attention Network نسـبت بـه Graph Convolutional Networkو سایر مدل‌های یادگیری ماشین بود. دلیـل ایـن برتـری را مـی‌تـوان در مکـانیزم توجـه (Attention Mechanism)جستجو کرد که به مدل اجازه می‌دهد اهمیت روابط مختلف میان شرکت‌ها را به صورت پویا یاد بگیرد. در واقـع، همـه ارتباطـات میان شرکت‌ها وزن یکسانی ندارند و برخی روابط اثرگذاری بیشتری بر عملکرد پایداری دارند. مدل GAT این امکان را فراهم می‌کنـد کـه ایـن تفاوت‌ها به صورت خودکار شناسایی شده و در فرآیند یادگیری لحاظ شوند. این ویژگی باعث شده است که مدل پیشنهادی بتواند ساختار پیچیـده و ناهمگن بازار سرمایه را بهتر از مدل‌های کلاسیک شبکه‌ای تحلیل کند.

تحلیل نتایج همچنین نشان داد که اضافه شدن ویژگی‌های شبکه‌ای به مدل، باعث کاهش قابل توجه خطای پیش‌بینی و افزایش ضـریب تعیـین شده است. این موضوع نشان می‌دهد که اطلاعات شبکه‌ای دارای ارزش افزوده بالایی در تحلیل پایـداری شـرکت‌هـا هسـتند. در واقـع، اگرچـه شاخص‌های مالی و ESG اطلاعات مهمی درباره وضعیت شرکت‌ها ارائه می‌دهند، اما این اطلاعات زمانی کامل‌تر و دقیق‌تر می‌شوند که در کنـار ساختار روابط بین‌شرکتی مورد تحلیل قرار گیرند. این نتیجه با رویکردهای نوین در علم داده و تحلیل سیستم‌های پیچیده هم‌راستا اسـت کـه بـر اهمیت داده‌های رابطه‌ای در کنار داده‌های ویژگی‌محور تأکید دارند.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافـی مـی‌توانـد ابـزار قدرتمنـدی بـرای سرمایه‌گذاران نهادی، تحلیل‌گران مالی و نهادهای ناظر بازار سرمایه فراهم کند. این مدل‌ها قادرند شرکت‌ها را نه تنها بر اساس عملکرد گذشـته، بلکه بر اساس موقعیت ساختاری آن‌ها در شبکه بازار و کیفیت تعاملاتشان ارزیابی کنند. چنین رویکردی مـی‌توانـد بـه بهبـود فرآینـد تخصـیص

سرمایه، مدیریت ریسک و شناسایی شرکت‌های پایدارتر کمک کند. همچنین این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار برای رتبه‌بندی شرکت‌ها در حوزه ESG مورد استفاده قرار گیرد و خلأ موجود در سیستم‌های رتبه‌بندی سنتی را تا حد زیادی پوشش دهد.

در سطح سیاست‌گذاری نیز نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توسعه استانداردهای گزارشگری پایداری و افزایش شفافیت اطلاعاتی شرکت‌ها می‌تواند نقش مهمی در بهبود کارایی بازار سرمایه داشته باشد. هرچه کیفیت داده‌های ESG افزایش یابد، دقت مدل‌های هوشمند نیز بهبود خواهد یافت. همچنین توجه به ساختارهای شبکه‌ای بازار می‌تواند به نهادهای نظارتی کمک کند تا ریسک‌های سیستماتیک را بهتر شناسایی و مدیریت کنند. به عنوان مثال، شرکت‌هایی که در مرکز شبکه قرار دارند می‌توانند نقش مهم‌تری در انتقال ریسک یا ایجاد ثبات در بازار ایفا کنند و این موضوع باید در سیاست‌گذاری‌های نظارتی مورد توجه قرار گیرد.

با وجود دستاوردهای قابل توجه پژوهش، این مطالعه نیز مانند سایر تحقیقات علمی دارای محدودیت‌هایی است. نخستین محدودیت به کیفیت و دسترسی به داده‌های ESG در بازار سرمایه ایران مربوط می‌شود. در بسیاری از موارد، اطلاعات پایداری به صورت کامل، استاندارد و یکپارچه افشا نمی‌شود و این موضوع می‌تواند بر دقت برآورد شاخص‌ها تأثیر بگذارد. محدودیت دوم مربوط به دوره زمانی پژوهش است که ممکن است برای تعمیم نتایج به دوره‌های بلندمدت‌تر کافی نباشد. همچنین ساختار شبکه‌ای طراحی‌شده در این پژوهش بر اساس داده‌های قابل دسترس شکل گرفته و ممکن است تمامی ابعاد واقعی روابط بین‌شرکتی را به طور کامل پوشش ندهد.

محدودیت دیگر مربوط به پیچیدگی محاسباتی مدل‌های شبکه‌های عصبی گرافی است. این مدل‌ها نیازمند منابع محاسباتی بالا و تنظیم دقیق پارامترها هستند و در برخی کاربردهای عملی ممکن است اجرای آن‌ها با چالش‌هایی همراه باشد. علاوه بر این، اگرچه مدل GAT قابلیت تفسیرپذیری بیشتری نسبت به برخی مدل‌های عمیق دارد، اما همچنان در مقایسه با مدل‌های سنتی، تفسیر نتایج آن برای برخی کاربران غیرتخصصی دشوار است.بر اساس نتایج این پژوهش، چند پیشنهاد کاربردی قابل ارائه است. نخست، پیشنهاد می‌شود نهادهای ناظر بازار سرمایه به سمت استانداردسازی و الزام شرکت‌ها به افشای اطلاعات ESG حرکت کنند تا کیفیت داده‌های مورد استفاده در مدل‌های هوشمند افزایش یابد. دوم، سرمایه‌گذاران نهادی می‌توانند از مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی برای ارزیابی جامع‌تر ریسک و بازده شرکت‌ها استفاده کنند. سوم، شرکت‌ها نیز می‌توانند با بهبود جایگاه خود در شبکه‌های صنعتی و ارتقای کیفیت روابط بین‌سازمانی، امتیاز پایداری خود را بهبود دهند. همچنین توصیه می‌شود مدیران شرکت‌ها توجه ویژه‌ای به کیفیت حاکمیت شرکتی داشته باشند، زیرا این عامل در نتایج پژوهش نقش کلیدی در تعیین پایداری شرکت‌ها ایفا کرده است.

در نهایت، برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که مدل‌های پیشرفته‌تری از شبکه‌های عصبی گرافی مانند Temporal Graph Neural Networksبرای تحلیل تغییرات زمانی پایداری شرکت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ترکیب داده‌های متنی حاصل از گزارش‌های پایداری با ساختارهای گرافی می‌تواند دقت مدل‌ها را افزایش دهد. استفاده از داده‌های کلان‌تر در سطح بین‌المللی و مقایسه بازارهای مختلف نیز می‌تواند به تعمیم‌پذیری نتایج کمک کند. علاوه بر این، توسعه مدل‌های تفسیرپذیرتر برای افزایش اعتماد کاربران غیرتخصصی به خروجی مدل‌های هوشمند یکی دیگر از مسیرهای مهم پژوهشی آینده محسوب می‌شود.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که رویکرد شبکه‌های عصبی گرافی می‌تواند به عنوان یک پارادایم نوین در ارزیابی پایداری شرکت‌ها مطرح شود و با ترکیب داده‌های مالی، غیرمالی و شبکه‌ای، تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از عملکرد شرکت‌ها در بازار سرمایه ارائه دهد؛ تصویری که نه تنها به گذشته و حال شرکت‌ها، بلکه به ساختار تعاملات و موقعیت آن‌ها در اکوسیستم اقتصادی نیز توجه دارد.

منابع

منابع فارسی

مقالات

امیری، ج.، و طاهری، ن. (۱۴۰۲). تأثیر سرمایه فکری بر عملکرد پایدار شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس. مجله پژوهش‌های مالی و سرمایه‌گذاری، ۱۶(۳)، ۱۱۲-۱۳۴.

باقری، ف.، و محمدی، ن. (۱۴۰۱). بررسی رابطه بین حاکمیت شرکتی و عملکرد پایدار شرکت‌ها. مجله مطالعات مدیریت مالی، ۱۴(۲)، ۵۷-۷۹.

بهرامی، ر.، و محمدی، س. (۱۴۰۱). ارزیابی ارتباط میان مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها و ارزش بازار سهام. فصلنامه مدیریت و حسابداری، ۱۰(۲)، ۵۲–۷۴.

تقی‌زاده، ر.، و حسینی، م. (۱۴۰۳). تحلیل اثر مسئولیت اجتماعی شرکت بر ارزش بازار. فصلنامه اقتصاد و توسعه پایدار، ۸(۱)، ۸۱–۱۰۲.

جعفری، ح. (۱۴۰۲). نقش گزارشگری پایداری در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران. مجله حسابداری مدیریت، ۱۸(۲)، ۱۲۵–۱۴۲.

جعفری‌نژاد، م.، و اکبری، ع. (۱۴۰۳). کاربرد تحلیل کلان‌داده در پیش‌بینی روند بازارهای مالی. مجله فناوری اطلاعات و اقتصاد، ۷(۴)، ۱۳۳–۱۵۶.

حسینی، ع.، و احمدی، پ. (۱۴۰۳). کاربرد یادگیری ماشین در تحلیل بازار سرمایه ایران. فصلنامه فناوری‌های مالی نوین، ۷(۱)، ۴۵–۶۳.

خانی، س.، و کریمی، م. (۱۴۰۱). بررسی شاخص‌های ESG در شرکت‌های بورسی ایران. مجله مدیریت مالی ایران، ۱۵(۴)، ۸۸–۱۰۷.

رستمی، ک.، و شفیعی، م. (۱۴۰۳). تحلیل شبکه‌های پیچیده در شناسایی ریسک سیستمی بازار سرمایه. مجله مهندسی مالی و مدیریت ریسک، ۶(۱)، ۳۹–۶۱.

قنبری، ا.، و رضوانی، ل. (۱۴۰۱). اثر افشای اطلاعات زیست‌محیطی بر بازده سهام شرکت‌ها. فصلنامه حسابداری و توسعه پایدار، ۵(۳)، ۱۱۸–۱۳۹.

رضایی، م.، و نوری، ف. (۱۴۰۲). تحلیل شبکه‌ای روابط بین شرکت‌ها در بازار سرمایه. فصلنامه علوم داده در اقتصاد، ۵(۳)، ۷۱–۹۳.

زارع، م. (۱۴۰۰). پایداری شرکتی و ارزش‌آفرینی بلندمدت. مجله پژوهش‌های مدیریت، ۱۲(۲)، ۳۳–۵۱.

سلیمانی، ع.، و فراهانی، ک. (۱۴۰۳). تأثیر ساختار مالکیت بر عملکرد پایدار شرکت‌ها. فصلنامه حاکمیت شرکتی، ۹(۱)، ۱۰۹–۱۲۸.

شریفی، ن.، و کاظمی، ر. (۱۴۰۲). کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های مالی. مجله سیستم‌های هوشمند در اقتصاد، ۶(۲)، ۵۶–۷۸.

عباسی، م.، و قاسمی، ف. (۱۴۰۱). بررسی نقش عوامل اجتماعی در پایداری شرکت‌ها. فصلنامه جامعه و اقتصاد، ۱۴(۳)، ۹۷–۱۱۵.

فراهانی، م.، و نادری، س. (۱۴۰۳). تحلیل اثر شاخص‌های زیست‌محیطی بر عملکرد شرکت‌ها. مجله توسعه پایدار ایران، ۱۱(۲)، ۶۸–۸۹.

کریمی، ح.، و موسوی، ر. (۱۴۰۲). مدل‌سازی ریسک در بازار سرمایه با رویکرد شبکه‌ای. فصلنامه مهندسی مالی، ۸(۴)، ۱۴۱–۱۶۲.

مرادی، س.، و احمدپور، د. (۱۴۰۱). نقش شفافیت اطلاعاتی در عملکرد شرکت‌ها. مجله حسابداری و حسابرسی، ۱۷(۱)، ۲۴–۴۳.

موسوی، ف.، و حیدری، س. (۱۴۰۲). استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق در پیش‌بینی قیمت سهام. مجله علوم داده و هوش مصنوعی، ۴(۲)، ۶۵–۸۷.

نادری، پ.، و شجاعی، ر. (۱۴۰۳). بررسی رابطه بین پایداری شرکتی و هزینه سرمایه. مجله تحقیقات مالی کاربردی، ۱۲(۱)، ۹۱–۱۱۳.

یوسفی، ر. (۱۴۰۳). بررسی اثر شبکه‌های اجتماعی شرکت‌ها بر عملکرد مالی. فصلنامه اقتصاد دیجیتال، ۴(۲)، ۷۹–۹۸.

نابع انگلیسی

Articles

Bolton, R. J., & Hand, D. J. (2002). Statistical fraud detection: A review. Statistical Science, 17(3), 235–255.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32.

Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. ACM Computing Surveys, 41(3), 1–58.

Hamilton, W., Ying, Z., & Leskovec, J. (2017). Inductive representation learning on large graphs. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*.

Kipf, T. N., & Welling, M. (2017). Semi-supervised classification with graph convolutional networks. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Velickovic, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Lio, P., & Bengio, Y. (2018). Graph attention networks. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Friede, G., Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment,* 5(4), 210–233.

Clark, G. L., Feiner, A., & Viehs, M. (2015). From the stockholder to the stakeholder: How sustainability can drive financial outperformance. *University of Oxford Report on ESG Investing*.

Ngai, E. W. T., Hu, Y., Wong, Y. H., Chen, Y., & Sun, X. (2011). The application of data mining techniques in financial fraud detection. Decision Support Systems, 50(3), 559–569.

Phua, C., Lee, V., Smith, K., & Gayler, R. (2010). A comprehensive survey of data mining-based fraud detection research. Artificial Intelligence Review, 34(1), 1–14.

Pozzolo, A. D., Boracchi, G., Caelen, O., Alippi, C., & Bontempi, G. (2015). Credit card fraud detection and concept-drift adaptation with delayed supervised information. International Joint Conference on Neural Networks, 1–8.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی