Journal of
Intelligent Financial
Management Perspectives

ISSN: 3116-0964

Development of an Asset Pricing Model Inspired by Graph Neural Networks

Ehsan Hashemi[1]*, Sara Sharifi[2], Mohammad Mahdi Norouzi[3]

[1] *Ph.D. in Financial Management, Razi University, Kermanshah, Iran (Coresponding autour), Email:e.hashemi@razi.ac.ir*

[2] *M.Sc. in Financial Management, Razi University, Kermanshah, Iran*

[3] *Ph.D. Candidate in Financial Management, Razi University, Kermanshah, Iran*

ARTICLE INFO

Article history:
Received:06/07/2026
Received in revised form:21/07/2026
Accepted:09/08/2026
Available online:11/09/2026

Keywords:

Asset Pricing
Graph Neural Networks (GNNs)
Deep Learning
Capital Market
Expected Return

ABSTRACT

Accurate asset pricing remains one of the fundamental challenges in finance and investment analysis. Traditional asset pricing models, including the Capital Asset Pricing Model (CAPM) and multifactor models, are primarily based on linear assumptions and static relationships among variables, which limits their ability to capture the complex and interconnected nature of financial markets. Recent advances in deep learning, particularly Graph Neural Networks (GNNs), have provided powerful tools for modeling nonlinear dependencies and structural interactions within complex systems. This study aims to develop a novel asset pricing framework inspired by Graph Neural Networks. In the proposed approach, financial assets and their interrelationships are represented as a graph structure, enabling the model to incorporate information propagation and interaction effects among assets when estimating expected returns. The proposed model is trained using capital market data, and its performance is evaluated against conventional asset pricing models and alternative machine learning techniques using standard prediction and pricing metrics.

The primary contribution of this research lies in exploiting the network structure of financial markets and uncovering hidden relationships among assets to enhance pricing accuracy. Furthermore, the proposed framework enables the integration of fundamental, trading, and inter-firm relationship data within a unified graph-based architecture. To evaluate the effectiveness of the model, several performance measures, including forecasting error, explanatory power, and risk assessment indicators, will be employed. It is expected that the graph-based framework will improve return forecasting accuracy, enhance risk factor identification, and increase the explanatory power of asset pricing models. In addition, the proposed approach can support portfolio management, optimal asset allocation, and intelligent investment strategy design. The findings of this study may contribute significantly to the advancement of artificial intelligence-driven financial modeling and the emerging field of network-based asset pricing.

Article Type: Research Paper

Journal of Intelligent Financial Management, 2026, Vol. 2, No.2, pp. 76- 93

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

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.21387

©Authors

Cite: Hashemi,E , Sharifi,S and Norouzi,M M . (2026). Development of an Asset Pricing Model Inspired by Graph Neural Networks. . *Journal of Intelligent Financial Management*, 2*(2)*, 76-93.

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

توسعه مدل قیمت‌گذاری دارایی‌ها با الهام از شبکه‌های عصبی گراف

احسان هاشمی [۱و*]، سارا شریفی [۲]،محمد مهدی نوروزی [۳]

۱ و *- دکتری مدیریت مالی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل نویسنده مسئول:e.hashemi@razi.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد مدیریت مالی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
۳- دانشجوی دکتری مدیریت مالی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت:۱۴۰۵/۰۴/۱۵
تاریخ بازنگری:۱۴۰۵/۰۴/۳۰
تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۵/۱۸
تاریخ انتشار:۱۴۰۵/۰۶/۲۰

کلیدواژه‌ها:
قیمت‌گذاری دارایی‌ها
شبکه‌های عصبی گراف
یادگیری عمیق
بازار سرمایه
بازده مورد انتظار

چکیده

قیمت‌گذاری صحیح دارایی‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌های حوزه مالی و سرمایه‌گذاری محسوب می‌شود. مدل‌های سنتی قیمت‌گذاری دارایی، نظیر مدل قیمت‌گذاری دارایی‌های سرمایه‌ای و مدل های عاملی، عمدتاً بر فرضیات خطی و روابط ایستا میان متغیرها استوار هستند و در تبیین پیچیدگی‌ها و وابستگی‌های ساختاری موجود در بازارهای مالی با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های حاصل در حوزه یادگیری عمیق و به‌ویژه شبکه‌های عصبی گراف، امکان مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان اجزای یک سیستم را فراهم کرده است. پژوهش حاضر با هدف توسعه یک مدل نوین قیمت‌گذاری دارایی‌ها مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف انجام شده است. در این پژوهش، دارایی‌ها و ارتباطات میان آن‌ها در قالب یک گراف مالی مدل‌سازی شده و با بهره‌گیری از سازوکار انتشار اطلاعات در شبکه‌های عصبی گراف، اثرات متقابل میان دارایی‌ها در فرآیند پیش‌بینی بازده مورد انتظار لحاظ می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های بازار سرمایه آموزش داده شده و عملکرد آن از طریق معیارهای متداول پیش‌بینی و قیمت‌گذاری با مدل‌های کلاسیک و سایر روش‌های یادگیری ماشین مقایسه می‌شود.امکان تلفیق اطلاعات بنیادی، معاملاتی و ارتباطات بین‌شرکتی در قالب یک چارچوب گرافی فراهم می‌شود که می‌تواند درک جامع‌تری از رفتار بازار ارائه دهد. برای ارزیابی مدل، از شاخص‌هایی نظیر خطای پیش‌بینی، توان تبیین بازده و معیارهای سنجش ریسک استفاده خواهد شد. انتظار می‌رود نتایج پژوهش نشان دهد که بهره‌گیری از ساختارهای گرافی موجب بهبود دقت پیش‌بینی بازده، شناسایی بهتر عوامل ریسک و افزایش توان تبیینی مدل‌های قیمت‌گذاری دارایی خواهد شد. علاوه بر این، مدل پیشنهادی می‌تواند در مدیریت پرتفوی، تخصیص بهینه دارایی‌ها و طراحی راهبردهای سرمایه‌گذاری هوشمند مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش افق‌های جدیدی را در توسعه مدل‌های مالی مبتنی بر هوش مصنوعی و تحلیل شبکه‌های مالی فراهم خواهد ساخت.

نشریه مدیریت مالی هوشمند، ۱۴۰۵، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۷۶-۹۳.

ناشر: موسسه علمی طلوع بینش آینده

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563. 21387

نوع مقاله: پژوهشی

© نویسندگان

استناد: هاشمی,احسان , شریفی,سارا و نوروزی,محمد مهدی . (۱۴۰۵). توسعه مدل قیمت‌گذاری دارایی‌ها با الهام از شبکه‌های عصبی گراف. *مدیریت مالی هوشمند*, ۲(۲), ۷۶-۹۳.

ISSN: 3116-0964

۱-مقدمه

قیمت‌گذاری دارایی‌ها یکی از بنیادی‌ترین موضوعات در حوزه مالی و اقتصاد محسوب می‌شود و همواره در کانون توجه پژوهشگران، سرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران قرار داشته است. هدف اصلی مدل‌های قیمت‌گذاری دارایی، تبیین نحوه تعیین بازده مورد انتظار دارایی‌ها بر اساس میزان ریسک آن‌ها و سایر عوامل اثرگذار بر بازار است. از زمان ارائه مدل قیمت‌گذاری دارایی‌های سرمایه‌ای(CAPM) ، تلاش‌های گسترده‌ای برای توسعه مدل‌هایی صورت گرفته است که بتوانند رفتار پیچیده بازارهای مالی را با دقت بیشتری تبیین کنند (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). با وجود موفقیت نسبی این مدل‌ها، تحولات سریع بازارهای مالی، افزایش حجم داده‌ها و پیچیده‌تر شدن روابط میان دارایی‌ها موجب شده است که بسیاری از مفروضات سنتی مدل‌های مالی با چالش مواجه شوند.

مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی عمدتاً بر پایه روابط خطی و فروض ساده‌کننده بنا شده‌اند. این مدل‌ها معمولاً فرض می‌کنند که رابطه میان بازده و عوامل ریسک ثابت و قابل نمایش از طریق توابع خطی است. در حالی که شواهد تجربی نشان می‌دهد رفتار بازارهای مالی به شدت غیرخطی، پویا و متأثر از تعاملات پیچیده میان شرکت‌ها، صنایع و سرمایه‌گذاران است (رضایی و محمدی، ۱۳۹۹). در چنین شرایطی، استفاده از رویکردهای سنتی ممکن است به کاهش دقت پیش‌بینی و ضعف در شناسایی عوامل واقعی مؤثر بر قیمت‌گذاری دارایی‌ها منجر شود.در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری اطلاعات و توسعه ابزارهای پردازش داده، زمینه ورود روش‌های نوین یادگیری ماشین و هوش مصنوعی به حوزه مالی را فراهم کرده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی بالا در استخراج الگوهای پنهان از داده‌های حجیم و پیچیده، مورد توجه گسترده پژوهشگران مالی قرار گرفته‌اند (کریمی و همکاران، ۱۴۰۱). این روش‌ها برخلاف مدل‌های سنتی، نیازمند فروض محدودکننده کمتری هستند و قادرند روابط غیرخطی میان متغیرها را شناسایی کنند.در میان روش‌های نوین هوش مصنوعی، یادگیری عمیق به عنوان یکی از موفق‌ترین رویکردها شناخته می‌شود. شبکه‌های عصبی عمیق توانسته‌اند در حوزه‌هایی نظیر پردازش تصویر، پردازش زبان طبیعی و تحلیل داده‌های پیچیده عملکرد بسیار مطلوبی از خود نشان دهند (حسینی و نادری، ۱۴۰۰). در حوزه مالی نیز پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق می‌توانند دقت پیش‌بینی بازده سهام، مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری را بهبود بخشند (قاسمی و همکاران، ۱۴۰۲).

با وجود مزایای قابل توجه شبکه‌های عصبی سنتی، این مدل‌ها عمدتاً برای داده‌هایی طراحی شده‌اند که ساختار منظمی دارند. در مقابل، بسیاری از داده‌های مالی دارای ماهیتی شبکه‌ای هستند. شرکت‌ها از طریق زنجیره تأمین، مالکیت متقابل، همبستگی بازده، ارتباطات صنعتی و جریان اطلاعات با یکدیگر در تعامل هستند. بنابراین، نادیده گرفتن این روابط شبکه‌ای می‌تواند بخشی از اطلاعات ارزشمند موجود در بازار را حذف کند (محمدی و کریمی، ۱۴۰۱).در سال‌های اخیر، مفهوم شبکه‌های مالی به یکی از موضوعات مهم پژوهشی تبدیل شده است. شبکه مالی مجموعه‌ای از گره‌ها و ارتباطات است که در آن هر گره می‌تواند نماینده یک شرکت، صنعت یا دارایی مالی باشد و یال‌ها بیانگر نوعی رابطه میان آن‌ها هستند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ساختار شبکه‌ای بازار می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره انتقال ریسک، انتشار شوک‌ها و رفتار سرمایه‌گذاران ارائه دهد (جعفری و همکاران، ۱۴۰۰).

ظهور شبکه‌های عصبی گراف، افق جدیدی را در تحلیل داده‌های شبکه‌ای گشوده است. شبکه‌های عصبی گراف نوعی از معماری‌های یادگیری عمیق هستند که برای تحلیل داده‌های ساختاریافته در قالب گراف طراحی شده‌اند. این شبکه‌ها قادرند ویژگی‌های هر گره و همچنین روابط میان گره‌ها را به صورت هم‌زمان پردازش کنند و نمایش غنی‌تری از داده‌ها ارائه دهند (صادقی و همکاران، ۱۴۰۲). توانایی مدل‌سازی وابستگی‌های پیچیده میان اجزای یک سیستم، شبکه‌های عصبی گراف را به ابزاری قدرتمند برای کاربردهای مالی تبدیل کرده است.بازار سرمایه نمونه بارزی از یک سیستم پیچیده و شبکه‌ای محسوب می‌شود. عملکرد یک شرکت نه تنها تحت تأثیر ویژگی‌های داخلی آن، بلکه متأثر از وضعیت سایر شرکت‌ها، صنایع مرتبط و شرایط کلان اقتصادی است. به عنوان مثال، وقوع یک شوک اقتصادی در یک صنعت می‌تواند از طریق ارتباطات میان شرکت‌ها به سایر بخش‌های بازار منتقل شود. چنین پدیده‌هایی نشان می‌دهد که قیمت‌گذاری دارایی‌ها باید فراتر از تحلیل مستقل هر دارایی انجام شود و تعاملات میان آن‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد (زارعی و همکاران، ۱۴۰۱).

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های مدل‌های متعارف قیمت‌گذاری دارایی، ناتوانی در بهره‌گیری مؤثر از اطلاعات ساختاری بازار است. در بسیاری از مدل‌ها، هر دارایی به صورت مستقل بررسی می‌شود و روابط میان دارایی‌ها تنها از طریق چند متغیر خلاصه می‌گردد. در حالی که شبکه‌های عصبی گراف امکان مدل‌سازی مستقیم این روابط را فراهم می‌کنند و می‌توانند اطلاعات نهفته در ساختار شبکه را استخراج نمایند (امیری و همکاران، ۱۴۰۲).

کاربرد شبکه‌های عصبی گراف در حوزه مالی طی سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. این مدل‌ها در پیش‌بینی قیمت سهام، رتبه‌بندی اعتباری، کشف تقلب مالی، مدیریت ریسک و تحلیل شبکه‌های بانکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر گراف در مقایسه با روش‌های سنتی و حتی سایر الگوریتم‌های یادگیری عمیق عملکرد بهتری ارائه می‌دهند. یکی از دلایل اصلی موفقیت شبکه‌های عصبی گراف، قابلیت انتشار اطلاعات میان گره‌های مرتبط است. در این فرآیند، هر گره علاوه بر ویژگی‌های خود، اطلاعات گره‌های همسایه را نیز دریافت می‌کند. این ویژگی سبب می‌شود که مدل بتواند تأثیرات متقابل میان دارایی‌ها را بهتر درک کند و الگوهای پنهان موجود در بازار را شناسایی نماید (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۲).در بازارهای مالی نوین، حجم داده‌ها به طور مداوم در حال افزایش است. اطلاعات مالی شرکت‌ها، داده‌های معاملاتی، اخبار اقتصادی، گزارش‌های تحلیلی و شبکه‌های اجتماعی همگی منابعی ارزشمند برای تحلیل بازار محسوب می‌شوند. تلفیق این داده‌ها در قالب مدل‌های سنتی بسیار دشوار است، اما شبکه‌های عصبی گراف امکان ترکیب انواع مختلف داده‌ها را در یک چارچوب یکپارچه فراهم می‌کنند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۱).از منظر نظری، استفاده از شبکه‌های عصبی گراف در قیمت‌گذاری دارایی‌ها می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از مدل‌های مالی منجر شود که در آن‌ها روابط ساختاری بازار به عنوان بخشی از عوامل تعیین‌کننده بازده مورد انتظار در نظر گرفته می‌شوند. چنین رویکردی می‌تواند شکاف میان نظریه‌های مالی کلاسیک و فناوری‌های نوین هوش مصنوعی را کاهش دهد و چارچوبی جامع‌تر برای تحلیل بازارهای مالی ارائه کند (بهرامی و همکاران، ۱۴۰۳).

علاوه بر اهمیت نظری، این موضوع از منظر عملی نیز دارای اهمیت فراوان است. سرمایه‌گذاران، مدیران پرتفوی و نهادهای مالی همواره به دنبال مدل‌هایی هستند که بتوانند بازده آتی دارایی‌ها را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند. هرگونه بهبود در دقت پیش‌بینی می‌تواند به تخصیص بهینه منابع، کاهش ریسک و افزایش کارایی بازار منجر شود (نجفی و همکاران، ۱۴۰۰).بازار سرمایه ایران نیز در سال‌های اخیر با رشد قابل توجهی در حجم معاملات و تعداد سرمایه‌گذاران مواجه بوده است. افزایش پیچیدگی تعاملات میان شرکت‌های بورسی و تأثیرپذیری بازار از عوامل متعدد اقتصادی و سیاسی، ضرورت استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیلی را بیش از پیش نمایان ساخته است. با این حال، بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده در کشور همچنان بر مدل‌های سنتی یا روش‌های متعارف یادگیری ماشین متمرکز بوده‌اند و استفاده از شبکه‌های عصبی گراف در حوزه قیمت‌گذاری دارایی‌ها هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد (اکبری و همکاران، ۱۴۰۲).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک مدل قیمت‌گذاری دارایی مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف طراحی شده است. در این مدل، هر دارایی به عنوان یک گره در شبکه مالی در نظر گرفته شده و ارتباطات میان دارایی‌ها از طریق معیارهایی نظیر همبستگی بازده، وابستگی صنعتی یا روابط اقتصادی مدل‌سازی می‌شود. سپس با بهره‌گیری از معماری شبکه‌های عصبی گراف، اطلاعات موجود در ساختار شبکه استخراج شده و برای برآورد بازده مورد انتظار دارایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.انتظار می‌رود مدل پیشنهادی بتواند ضمن افزایش دقت پیش‌بینی، درک بهتری از سازوکار انتقال اطلاعات و ریسک در بازار ارائه دهد. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند زمینه توسعه مدل‌های نوین قیمت‌گذاری دارایی مبتنی بر هوش مصنوعی را فراهم کرده و به ارتقای ادبیات مالی محاسباتی در کشور کمک کند. در نهایت، این پژوهش تلاش می‌کند با ترکیب مفاهیم مالی، نظریه شبکه و یادگیری عمیق، چارچوبی نوآورانه برای تحلیل رفتار دارایی‌ها در بازارهای مالی ارائه دهد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱نظریه قیمت‌گذاری دارایی‌ها

نظریه قیمت‌گذاری دارایی‌ها یکی از بنیادی‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین حوزه‌های مالی مدرن است که تلاش می‌کند رابطه میان ریسک و بازده مورد انتظار دارایی‌های مالی را تبیین کند. در این چارچوب، این پرسش اساسی مطرح می‌شود که چرا دارایی‌های مختلف در بازارهای مالی بازده‌های متفاوتی ایجاد می‌کنند و چگونه می‌توان ارزش منصفانه آن‌ها را بر اساس ویژگی‌های ریسک‌پذیری، شرایط بازار و رفتار سرمایه‌گذاران تعیین کرد. اهمیت این حوزه از آن جهت است که تقریباً تمام تصمیمات سرمایه‌گذاری، مدیریت پرتفوی و ارزیابی اوراق بهادار به نوعی به نتایج آن وابسته است. به بیان دیگر، نظریه قیمت‌گذاری دارایی‌ها تلاش دارد یک چارچوب نظری و تجربی ارائه دهد که بتواند رفتار قیمت‌ها را در بازارهای مالی توضیح داده و تا حد امکان پیش‌بینی‌پذیر کند.نقطه آغاز رسمی نظریه‌های مدرن در این حوزه، مدل قیمت‌گذاری دارایی‌های سرمایه‌ای یا CAPM است که توسط شارپ، لینتنر و موسین ارائه شد. این مدل یکی از نخستین تلاش‌های منسجم برای ساده‌سازی رابطه میان ریسک و بازده بود و بر این فرض استوار است که سرمایه‌گذاران عقلایی عمل می‌کنند، بازارها کارا هستند و تمامی سرمایه‌گذاران دارای انتظارات

همگن هستند. در چارچوبCAPM ، تنها ریسک سیستماتیک یا ریسکی که قابل حذف از طریق تنوع‌سازی نیست، بر بازده مورد انتظار دارایی اثر می‌گذارد. این ریسک با شاخص بتا اندازه‌گیری می‌شود و نشان‌دهنده میزان حساسیت بازده دارایی نسبت به تغییرات بازار است (Sharpe, 1964). در مقابل، ریسک غیرسیستماتیک که مربوط به ویژگی‌های خاص هر شرکت یا دارایی است، از طریق تشکیل پرتفوی متنوع قابل حذف در نظر گرفته می‌شود و بنابراین در قیمت‌گذاری دارایی نقش ندارد.

با وجود اهمیت تاریخی و جایگاه بنیادی CAPM در ادبیات مالی، شواهد تجربی متعدد نشان دادند که این مدل قادر به توضیح کامل رفتار بازده دارایی‌ها در دنیای واقعی نیست. مطالعات تجربی نشان دادند که دارایی‌هایی با سطح ریسک سیستماتیک مشابه می‌توانند بازده‌های کاملاً متفاوتی داشته باشند، امری که با پیش‌بینی‌های CAPM سازگار نیست(Fama & French, 1992). این شکاف میان نظریه و واقعیت باعث شد پژوهشگران به دنبال توسعه مدل‌هایی باشند که بتوانند عوامل بیشتری را در فرآیند قیمت‌گذاری دارایی‌ها لحاظ کنند.

در پاسخ به این محدودیت‌ها، مدل‌های چندعاملی توسعه یافتند که مهم‌ترین آن‌ها مدل فاما و فرنچ است. این مدل علاوه بر ریسک بازار، دو عامل مهم دیگر یعنی اندازه شرکت و نسبت ارزش دفتری به ارزش بازار را نیز وارد تحلیل می‌کند. نتایج تجربی نشان داد که این عوامل می‌توانند بخش قابل توجهی از تفاوت بازده دارایی‌ها را توضیح دهند و قدرت توضیح‌دهندگی مدل را نسبت به CAPM به‌طور معناداری افزایش دهند (Fama & French, 1993) .در ادامه، این مدل نیز توسعه یافت و نسخه پنج‌عاملی آن شامل سودآوری و سرمایه‌گذاری شرکت‌ها نیز معرفی شد که تلاش می‌کرد ابعاد بنیادی‌تری از ریسک و بازده را پوشش دهد.

با این حال، حتی مدل‌های چندعاملی نیز نتوانستند تمام ناهنجاری‌های بازار سرمایه را به‌طور کامل توضیح دهند. پدیده‌هایی مانند مومنتوم، بازگشت میانگین، واکنش بیش‌ازحد یا کم‌واکنشی قیمت‌ها به اطلاعات جدید و اثرات رفتاری سرمایه‌گذاران نشان دادند که رفتار بازار صرفاً قابل تقلیل به چند عامل خطی نیست. در واقع، پیچیدگی‌های موجود در تعامل میان سرمایه‌گذاران، ساختار اطلاعاتی بازار و وابستگی‌های پنهان میان دارایی‌ها باعث شده است که مدل‌های سنتی با محدودیت‌های جدی مواجه شوند.در سال‌های اخیر، با پیشرفت علوم داده و هوش مصنوعی، رویکردهای جدیدی برای مدل‌سازی قیمت‌گذاری دارایی‌ها مطرح شده‌اند که تلاش می‌کنند از ظرفیت داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای استخراج الگوهای پیچیده استفاده کنند. در این میان، استفاده از مدل‌های غیرخطی مانند شبکه‌های عصبی نشان داد که روابط میان متغیرهای مالی بسیار پیچیده‌تر از آن چیزی است که مدل‌های خطی سنتی فرض می‌کنند. این رویکردها توانسته‌اند بخشی از ناهنجاری‌های تجربی را بهتر توضیح دهند، هرچند همچنان درک ساختار واقعی بازار نیازمند مدل‌هایی پیشرفته‌تر است.

در همین راستا، ایده مدل‌سازی بازار به‌صورت یک شبکه به‌هم‌پیوسته مطرح شده است. در این دیدگاه، هر دارایی به‌عنوان یک گره در شبکه در نظر گرفته می‌شود و ارتباط میان دارایی‌ها بیانگر میزان همبستگی، وابستگی یا تعامل اقتصادی میان آن‌هاست. این نگاه شبکه‌ای باعث می‌شود که قیمت‌گذاری دارایی‌ها نه به‌صورت مستقل، بلکه در بستر یک سیستم پیچیده و تعاملی مورد تحلیل قرار گیرد. چنین رویکردی زمینه را برای استفاده از مدل‌های شبکه‌های عصبی گراف فراهم کرده است که می‌توانند به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های فردی دارایی‌ها و ساختار ارتباطی میان آن‌ها را در فرآیند یادگیری لحاظ کنند.

۲-۲ توسعه مدل‌های چندعاملی

مدل‌های چندعاملی در واقع تلاشی نظام‌مند برای رفع محدودیت‌های مدل قیمت‌گذاری دارایی‌های سرمایه‌ای بودند و با هدف افزایش توان توضیح‌دهندگی بازده دارایی‌ها توسعه یافتند. ایده اصلی این مدل‌ها بر این فرض استوار بود که بازده دارایی‌ها تنها توسط یک عامل سیستماتیک (ریسک بازار) تعیین نمی‌شود، بلکه مجموعه‌ای از عوامل بنیادی و ساختاری نیز در شکل‌گیری آن نقش دارند. در این میان، مدل سه‌عاملی فاما و فرنچ یکی از مهم‌ترین و اثرگذارترین چارچوب‌های توسعه‌یافته محسوب می‌شود که با افزودن دو عامل اندازه شرکت و نسبت ارزش دفتری به ارزش بازار، توانست بخشی از ناهنجاری‌های تجربی مشاهده‌شده در CAPM را توضیح دهد.

در مدل فاما و فرنچ، عامل اندازه شرکت بیان می‌کند که شرکت‌های کوچک به‌طور میانگین بازده بالاتری نسبت به شرکت‌های بزرگ دارند. این پدیده که به «اثر اندازه» معروف است، نشان می‌دهد که ریسک یا ویژگی‌های ساختاری شرکت‌های کوچک‌تر به‌گونه‌ای است که سرمایه‌گذاران برای پذیرش آن بازده بیشتری مطالبه می‌کنند. از سوی دیگر، نسبت ارزش دفتری به ارزش بازار که به‌عنوان شاخصی از ارزش‌گذاری نسبی شرکت‌ها استفاده می‌شود، نشان می‌دهد شرکت‌هایی که ارزش دفتری بالاتر نسبت به ارزش بازار دارند (معمولاً شرکت‌های ارزشی)، بازده

بیشتری نسبت به شرکت‌های رشد دارند. ترکیب این دو عامل در کنار ریسک بازار، توانست بخش قابل توجهی از تغییرات بازده دارایی‌ها را در مقایسه با CAPM توضیح دهد(Fama & French, 1993) .

با این حال، توسعه نظریه‌ها در این نقطه متوقف نشد و پژوهش‌های بعدی نشان دادند که حتی مدل سه‌عاملی نیز قادر به پوشش کامل الگوهای تجربی بازار نیست. به همین دلیل، مدل پنج‌عاملی فاما و فرنچ معرفی شد که در آن دو عامل جدید شامل سودآوری شرکت‌ها و میزان سرمایه‌گذاری نیز اضافه گردید. این توسعه بر این ایده استوار بود که شرکت‌هایی با سودآوری بالاتر و سیاست‌های سرمایه‌گذاری محافظه‌کارانه‌تر، بازده متفاوتی نسبت به سایر شرکت‌ها دارند. در نتیجه، مدل پنج‌عاملی تلاش کرد تا ابعاد بیشتری از رفتار بنیادی شرکت‌ها را در فرآیند قیمت‌گذاری دارایی‌ها لحاظ کند.با وجود این پیشرفت‌ها، یک ویژگی مشترک در تمامی مدل‌های چندعاملی کلاسیک وجود دارد و آن، اتکای این مدل‌ها بر ساختار خطی است. در این چارچوب، فرض می‌شود که تأثیر هر عامل بر بازده دارایی‌ها به‌صورت مستقل و جمع‌پذیر عمل می‌کند؛ به این معنا که اثر نهایی بازده، حاصل جمع وزن‌دار عوامل مختلف است و تعامل پیچیده‌ای میان عوامل در نظر گرفته نمی‌شود. این فرض اگرچه از نظر ریاضی باعث سادگی و قابلیت تفسیر مدل می‌شود، اما از منظر واقعیت‌های بازارهای مالی، یک ساده‌سازی قابل توجه محسوب می‌شود.

در بازارهای واقعی، عوامل مختلف اقتصادی، مالی و رفتاری به‌صورت هم‌زمان و در تعامل با یکدیگر بر قیمت دارایی‌ها اثر می‌گذارند. به عنوان مثال، اثر اندازه شرکت ممکن است در شرایط خاص اقتصادی تشدید یا تضعیف شود، یا تأثیر نسبت ارزش دفتری به بازار ممکن است در صنایع مختلف یا دوره‌های زمانی متفاوت، رفتار غیرثابتی داشته باشد. این نوع وابستگی‌های متقابل و اثرات شرطی میان عوامل، در ساختار خطی مدل‌های چندعاملی به‌خوبی قابل نمایش نیست.

علاوه بر این، روابط میان عوامل نیز می‌توانند غیرخطی باشند؛ به این معنا که تغییرات کوچک در یک عامل ممکن است در حضور مقدار خاصی از عامل دیگر، اثرات بزرگ یا غیرمنتظره‌ای بر بازده ایجاد کند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده وجود تعاملات پیچیده در ساختار بازار است که در چارچوب مدل‌های خطی به‌طور کامل نادیده گرفته می‌شوند. در نتیجه، اگرچه مدل‌های چندعاملی نسبت به CAPM گامی رو به جلو محسوب می‌شوند، اما همچنان در سطحی از انتزاع قرار دارند که قادر به بازنمایی کامل پیچیدگی‌های واقعی بازار نیستند.این محدودیت‌ها باعث شده است که در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به سمت مدل‌های غیرخطی و داده‌محور معطوف شود؛ مدل‌هایی که بتوانند تعامل میان عوامل مختلف را به‌صورت پویا و وابسته به شرایط بازار در نظر بگیرند. در این میان، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و به‌ویژه شبکه‌های عصبی، امکان مدل‌سازی این روابط پیچیده را فراهم کرده‌اند. با این حال، حتی این رویکردها نیز در صورتی که ساختار داده به‌درستی در مدل لحاظ نشود، ممکن است بخشی از اطلاعات ساختاری بازار را از دست بدهند.

۲-۳نقدهای وارد بر مدل‌های کلاسیک

یکی از مهم‌ترین نقدهای وارد بر مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی، ساده‌سازی قابل توجه آن‌ها در توصیف ساختار واقعی بازارهای مالی است. این مدل‌ها عموماً بر مجموعه‌ای از فروض ایده‌آل‌گرایانه استوار هستند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به خطی بودن روابط، ثبات پارامترها در طول زمان و ایستایی ساختار بازار اشاره کرد. در چنین چارچوبی، فرض می‌شود که رابطه میان متغیرهای مالی از یک الگوی پایدار و قابل پیش‌بینی پیروی می‌کند و اثر هر عامل بر بازده دارایی‌ها مستقل از شرایط زمانی و ساختار کلان بازار است. با این حال، شواهد تجربی گسترده نشان می‌دهد که این فروض در بسیاری از موارد با واقعیت‌های بازارهای مالی همخوانی ندارند.

بازارهای مالی در ذات خود سیستم‌هایی پیچیده، پویا و به‌شدت غیرخطی هستند که در آن‌ها تعامل میان بازیگران مختلف، جریان اطلاعات و واکنش‌های رفتاری سرمایه‌گذاران به‌صورت مداوم در حال تغییر است. برخلاف فرض ایستایی در مدل‌های کلاسیک، روابط میان دارایی‌ها در طول زمان ثابت نیست و تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل کلان اقتصادی، سیاست‌های پولی و مالی، شرایط ژئوپولیتیک و حتی تغییرات در انتظارات و رفتار روانی سرمایه‌گذاران دچار نوسان و بازآرایی می‌شود. برای مثال، یک دارایی ممکن است در یک دوره زمانی خاص همبستگی بالایی با گروهی از دارایی‌ها داشته باشد، اما در دوره‌ای دیگر این ارتباط تضعیف شده یا حتی معکوس شود.

مطالعات تجربی در حوزه اقتصاد مالی نشان داده‌اند که ساختار وابستگی میان دارایی‌ها به‌شدت وابسته به رژیم‌های مختلف بازار است و این ساختار در واکنش به شوک‌های اقتصادی یا مالی می‌تواند به‌طور ناگهانی تغییر کند. به عنوان نمونه، در دوره‌های بحران مالی، معمولاً همبستگی میان دارایی‌ها افزایش می‌یابد و پدیده‌ای به نام «همگرایی ریسک» یا سرایت ریسک مشاهده می‌شود که در آن کاهش ارزش یک بخش از بازار

به‌سرعت به سایر بخش‌ها منتقل می‌شود (Kothari et al., 2015). این نوع رفتار شبکه‌ای نشان می‌دهد که بازار نه مجموعه‌ای از دارایی‌های مستقل، بلکه یک سیستم به‌هم‌پیوسته با کانال‌های انتقال ریسک است.

علاوه بر سرایت ریسک، پدیده‌های دیگری مانند رفتار توده‌وار سرمایه‌گذاران، حباب‌های قیمتی و واکنش‌های بیش‌ازحد یا کم‌واکنشی به اطلاعات جدید نیز بیانگر وجود ساختارهای پیچیده و غیرخطی در بازارهای مالی هستند. در رفتار توده‌وار، سرمایه‌گذاران به‌جای اتکا به اطلاعات بنیادی، تصمیمات خود را بر اساس رفتار سایر فعالان بازار اتخاذ می‌کنند که این امر می‌تواند منجر به انحراف قیمت‌ها از ارزش‌های بنیادی شود. همچنین، شکل‌گیری حباب‌های قیمتی نشان می‌دهد که قیمت دارایی‌ها می‌تواند برای دوره‌ای طولانی از ارزش ذاتی خود فاصله بگیرد و سپس به‌صورت ناگهانی اصلاح شود؛ پدیده‌ای که در چارچوب مدل‌های خطی کلاسیک به‌سختی قابل توضیح است.

در کنار این مسائل، یکی دیگر از محدودیت‌های اساسی مدل‌های سنتی، نگاه مستقل به دارایی‌ها است. در بسیاری از مدل‌های کلاسیک، هر دارایی به‌صورت مجزا و بر اساس ویژگی‌های فردی خود تحلیل می‌شود و تعاملات میان دارایی‌ها یا به‌طور کامل نادیده گرفته می‌شود یا در قالب همبستگی‌های ساده و ایستا خلاصه می‌گردد. این در حالی است که در واقعیت، دارایی‌ها در یک شبکه پیچیده از روابط اقتصادی، مالی و اطلاعاتی به یکدیگر متصل هستند. این روابط می‌تواند ناشی از هم‌صنعت بودن شرکت‌ها، زنجیره‌های تأمین، ساختار مالکیت، یا حتی شباهت در رفتار سرمایه‌گذاران باشد(Kothari et al., 2015).

نادیده گرفتن این ساختار شبکه‌ای باعث می‌شود که مدل‌های کلاسیک نتوانند بسیاری از اثرات انتقالی در بازار را به‌درستی شبیه‌سازی کنند. برای مثال، یک شوک اقتصادی در یک صنعت خاص ممکن است از طریق روابط تجاری یا مالی به سایر صنایع منتقل شود و اثرات گسترده‌ای در سطح کل بازار ایجاد کند. در حالی که مدل‌های سنتی به دلیل فرض استقلال دارایی‌ها، توانایی بازنمایی این نوع سرایت ساختاری را ندارند.

۲-٤ظهور روش‌های داده‌محور در مالی

با رشد چشمگیر حجم داده‌های مالی در بازارهای سرمایه و افزایش توان محاسباتی در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های داده‌محور در تحلیل بازارهای مالی به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته است. این تحول عمدتاً ناشی از این واقعیت است که ساختار داده‌های مالی پیچیده‌تر از گذشته شده و دیگر نمی‌توان آن‌ها را صرفاً با مدل‌های خطی و ساده اقتصادسنجی تحلیل کرد. در چنین شرایطی، یادگیری ماشین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل داده، امکان استخراج الگوهای پنهان و روابط غیرخطی میان متغیرهای مالی را فراهم کرده است.

در این میان، الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و گرادیان بوستینگ در بسیاری از مسائل مالی از جمله پیش‌بینی بازده سهام، تحلیل ریسک و رتبه‌بندی دارایی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، در مقایسه با مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. دلیل اصلی این برتری آن است که این روش‌ها برخلاف مدل‌های سنتی، وابسته به فروض محدودکننده‌ای مانند خطی بودن روابط یا ایستایی کامل داده‌ها نیستند و می‌توانند ساختارهای پیچیده موجود در داده‌های مالی را بهتر شناسایی کنند(حسن زاده ،۱۳۹۹).

با این حال، با وجود موفقیت‌های قابل توجه روش‌های یادگیری ماشین، این مدل‌ها نیز با یک محدودیت اساسی مواجه هستند. در اغلب این روش‌ها، هر دارایی به‌صورت مستقل در نظر گرفته می‌شود و تعامل میان دارایی‌ها به‌طور مستقیم در ساختار مدل لحاظ نمی‌گردد. در نتیجه، روابط بین دارایی‌ها که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بازارهای مالی است، تنها به‌صورت غیرمستقیم و از طریق ویژگی‌های ورودی مدل منعکس می‌شود.

این در حالی است که مطالعات جدید نشان می‌دهد بازارهای مالی دارای ساختاری شبکه‌ای هستند و دارایی‌ها از طریق مجموعه‌ای از روابط اقتصادی، اطلاعاتی و رفتاری به یکدیگر متصل‌اند. نادیده گرفتن این ساختار شبکه‌ای می‌تواند منجر به از دست رفتن بخش مهمی از اطلاعات سیستماتیک بازار شود. از این منظر، اگرچه روش‌های یادگیری ماشین نسبت به مدل‌های کلاسیک پیشرفت قابل توجهی ایجاد کرده‌اند، اما همچنان در بازنمایی کامل ساختار وابستگی میان دارایی‌ها محدودیت دارند(Zhang, Y., & Zhao, H,2021).

به همین دلیل، در سال‌های اخیر رویکردهای جدیدی مبتنی بر مدل‌های گرافی و شبکه‌های عصبی گراف مطرح شده‌اند که تلاش می‌کنند هم‌زمان ویژگی‌های فردی دارایی‌ها و روابط میان آن‌ها را در فرآیند یادگیری لحاظ کنند و تصویر دقیق‌تری از ساختار واقعی بازار ارائه دهند.

۲-۵ ورود یادگیری عمیق به تحلیل مالی

یادگیری عمیق به‌عنوان یکی از شاخه‌های پیشرفته یادگیری ماشین، نقش مهمی در تحول تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی ایفا کرده است. این رویکرد با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی چندلایه، قادر است ویژگی‌های سطح بالا را به‌صورت خودکار از داده‌های خام استخراج کند، بدون آنکه نیاز به مهندسی ویژگی‌های دستی و از پیش‌تعریف‌شده باشد. همین ویژگی باعث شده است که یادگیری عمیق در بسیاری از حوزه‌ها از جمله پردازش تصویر، پردازش زبان طبیعی و تحلیل داده‌های زمانی عملکردی فراتر از روش‌های سنتی ارائه دهد.

در حوزه مالی نیز استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق به‌طور قابل توجهی گسترش یافته است. به‌ویژه شبکه‌های عصبی بازگشتی و معماری‌های مبتنی بر آن مانند ال‌اس‌تی‌ام و همچنین شبکه‌های کانولوشنی، برای تحلیل سری‌های زمانی مالی و پیش‌بینی قیمت سهام مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها به دلیل توانایی در درک وابستگی‌های زمانی و استخراج الگوهای غیرخطی در داده‌های تاریخی، توانسته‌اند در بسیاری از مطالعات تجربی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های اقتصادسنجی سنتی و حتی برخی روش‌های یادگیری ماشین کلاسیک ارائه دهند (فیشر و کراوس، ۲۰۱۸). به عنوان مثال، شبکه‌های ال‌اس‌تی‌ام با قابلیت حفظ حافظه بلندمدت، قادرند وابستگی‌های زمانی پیچیده در داده‌های مالی را مدل‌سازی کنند که در روش‌های خطی به‌سختی قابل شناسایی است.

با وجود این پیشرفت‌ها، مدل‌های یادگیری عمیق نیز همچنان با محدودیت‌های مهمی مواجه هستند. یکی از اساسی‌ترین این محدودیت‌ها مربوط به نحوه درک ساختار داده‌های مالی است. در اغلب کاربردهای یادگیری عمیق، داده‌ها یا به‌صورت مستقل (در مدل‌های پیش‌بینی نقطه‌ای) و یا به‌صورت ترتیبی (در سری‌های زمانی) پردازش می‌شوند. در نتیجه، روابط میان دارایی‌های مختلف و ساختار وابستگی شبکه‌ای میان آن‌ها به‌طور صریح در معماری مدل لحاظ نمی‌شود.این در حالی است که در بازارهای مالی، دارایی‌ها در یک شبکه پیچیده از تعاملات اقتصادی، اطلاعاتی و رفتاری قرار دارند و تغییرات یک دارایی می‌تواند از طریق این شبکه به سایر دارایی‌ها منتقل شود. نادیده گرفتن این ساختار شبکه‌ای باعث می‌شود که حتی مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق نیز تنها بخشی از اطلاعات موجود در بازار را استخراج کنند و نتوانند تصویر کاملی از پویایی سیستم مالی ارائه دهند. از این منظر، ضرورت استفاده از مدل‌هایی که بتوانند هم‌زمان وابستگی‌های زمانی و ساختاری را در نظر بگیرند، بیش از پیش احساس می‌شود؛ مسئله‌ای که زمینه‌ساز توسعه رویکردهای مبتنی بر گراف در تحلیل داده‌های مالی شده است.

۲-۶مفهوم شبکه‌های مالی

یکی از رویکردهای نوین در تحلیل بازارهای مالی، نگاه شبکه‌ای به ساختار بازار است. در این دیدگاه، بازار سرمایه نه به‌عنوان مجموعه‌ای از دارایی‌های مستقل، بلکه به‌صورت یک سیستم به‌هم‌پیوسته و شبکه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن هر دارایی به‌عنوان یک گره در شبکه تعریف شده و روابط میان دارایی‌ها نقش یال‌های این شبکه را ایفا می‌کنند. این تغییر نگرش باعث شده است تحلیل‌گران مالی بتوانند به جای تمرکز صرف بر ویژگی‌های فردی دارایی‌ها، به بررسی الگوهای تعامل و وابستگی میان آن‌ها بپردازند.

روابط میان دارایی‌ها در این چارچوب می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. از جمله مهم‌ترین این روابط می‌توان به همبستگی بازده‌ها اشاره کرد که نشان‌دهنده میزان هم‌حرکتی قیمت دارایی‌ها در طول زمان است. علاوه بر آن، روابط صنعتی نیز نقش مهمی در شکل‌دهی به ساختار شبکه‌ای بازار دارند؛ به این معنا که شرکت‌های فعال در یک صنعت مشترک معمولاً تحت تأثیر عوامل مشابهی قرار می‌گیرند و رفتار قیمتی آن‌ها به‌طور طبیعی به یکدیگر نزدیک‌تر است. همچنین، زنجیره‌های تأمین و ارتباطات تجاری میان شرکت‌ها می‌توانند کانال‌های مهمی برای انتقال شوک‌های اقتصادی باشند. حتی ارتباطات اطلاعاتی و جریان اخبار نیز می‌تواند موجب ایجاد پیوندهای پنهان میان دارایی‌ها شود که در رفتار بازار منعکس می‌گردد.

مطالعات تجربی در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که این ساختار شبکه‌ای نقش بسیار مهمی در فرآیند انتقال ریسک و شکل‌گیری قیمت‌ها در بازارهای مالی دارد (بونانو و همکاران، ۲۰۱۸). در واقع، ریسک در بازار به‌صورت یکنواخت توزیع نمی‌شود، بلکه از طریق مسیرهای شبکه‌ای خاصی در میان دارایی‌ها منتشر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که برخی دارایی‌ها یا گروه‌های خاصی از دارایی‌ها می‌توانند نقش واسطه یا انتقال‌دهنده ریسک را ایفا کنند و در نتیجه تأثیر بیشتری بر پویایی کلی بازار داشته باشند.برای مثال، شرکت‌هایی که در مرکز شبکه قرار دارند و دارای تعداد بیشتری ارتباط با سایر دارایی‌ها هستند، معمولاً نقش کلیدی‌تری در تعیین رفتار کلی بازار ایفا می‌کنند. این دارایی‌های مرکزی نه تنها تحت تأثیر تغییرات سایر بخش‌های بازار قرار می‌گیرند، بلکه خود نیز می‌توانند محرک اصلی انتشار شوک‌های اقتصادی در سطح سیستم باشند.

به همین دلیل، در دوره‌های بحران یا نوسانات شدید اقتصادی، تغییرات قیمتی در این گره‌های مرکزی می‌تواند به سرعت در کل شبکه منتشر شود و منجر به افزایش همبستگی میان دارایی‌ها گردد.در مقابل، دارایی‌هایی که در حاشیه شبکه قرار دارند و ارتباطات محدودتری با سایر بخش‌های بازار دارند، معمولاً تأثیر کمتری بر ساختار کلی بازار می‌گذارند و بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی و اختصاصی خود قرار می‌گیرند. این تفاوت ساختاری میان دارایی‌های مرکزی و حاشیه‌ای یکی از ویژگی‌های مهم بازارهای مالی است که در مدل‌های سنتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۷ اهمیت روابط ساختاری در قیمت‌گذاری دارایی‌ها

درک ساختار روابط میان دارایی‌ها می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود مدل‌های قیمت‌گذاری دارایی‌ها ایفا کند. در واقع، بازده یک دارایی صرفاً تابع ویژگی‌های درونی آن مانند سودآوری، اندازه شرکت یا نسبت‌های مالی نیست، بلکه به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر وضعیت و رفتار دارایی‌های مرتبط در شبکه بازار نیز قرار دارد. این وابستگی‌های متقابل باعث می‌شود که تغییرات قیمتی در یک بخش از بازار بتواند به سایر بخش‌ها منتقل شود و در نهایت بر قیمت‌گذاری کل سیستم اثر بگذارد.

برای نمونه، تغییر در قیمت نفت تنها یک متغیر کلان اقتصادی ساده نیست، بلکه یک شوک ساختاری محسوب می‌شود که می‌تواند به‌صورت زنجیره‌ای بر صنایع و شرکت‌های مختلف اثرگذار باشد. افزایش یا کاهش قیمت نفت می‌تواند به‌طور مستقیم بر شرکت‌های فعال در حوزه انرژی اثر بگذارد، اما اثرات آن به همین‌جا محدود نمی‌شود. شرکت‌های حمل‌ونقل به دلیل وابستگی به هزینه سوخت، شرکت‌های پتروشیمی به دلیل ارتباط با خوراک اولیه و حتی برخی صنایع تولیدی به‌صورت غیرمستقیم تحت تأثیر این تغییر قرار می‌گیرند. این نوع سرایت قیمتی نشان می‌دهد که دارایی‌ها در یک ساختار کاملاً مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه در یک شبکه پیچیده از وابستگی‌ها به یکدیگر متصل هستند.

از این منظر، تحلیل صرفاً مستقل دارایی‌ها نمی‌تواند تصویر دقیقی از واقعیت بازار ارائه دهد، زیرا چنین رویکردی تعاملات میان دارایی‌ها و اثرات سرایتی را نادیده می‌گیرد. در حالی که این تعاملات دقیقاً همان بخشی از اطلاعات هستند که می‌توانند در پیش‌بینی بازده و ارزیابی ریسک نقش اساسی داشته باشند. بنابراین، در نظر گرفتن ساختار شبکه‌ای بازار و مدل‌سازی روابط میان دارایی‌ها، گامی ضروری در جهت توسعه مدل‌های دقیق‌تر قیمت‌گذاری دارایی‌ها محسوب می‌شود.

۲-۸ شبکه‌های عصبی گراف: مبانی نظری پیشرفته

شبکه‌های عصبی گراف [1] به عنوان یکی از جدیدترین و مهم‌ترین پیشرفت‌ها در حوزه یادگیری عمیق، برای مدل‌سازی داده‌های غیرساخت‌یافته و دارای روابط پیچیده توسعه یافته‌اند. برخلاف شبکه‌های عصبی سنتی که بر داده‌های برداری یا شبکه‌های کانولوشنی که بر داده‌های شبکه‌ای منظم (مانند تصویر) تمرکز دارند، GNNها برای پردازش داده‌هایی طراحی شده‌اند که ساختار گرافی دارند.

در یک گراف، داده‌ها از دو جزء اصلی تشکیل شده‌اند: گره‌ها و یال‌ها . هر گره نماینده یک موجودیت (در اینجا یک دارایی مالی) و هر یال نشان‌دهنده رابطه میان دو موجودیت است. در شبکه‌های عصبی گراف، هر گره از طریق مکانیزم پیام‌رسانی اطلاعات خود را با گره‌های همسایه به اشتراک می‌گذارد و به این ترتیب، نمایش غنی‌تری از ساختار کلی شبکه شکل می‌گیرد (اسکال و همکاران، ۲۰۱۷).ایده اصلی این است که ویژگی هر گره تنها به ویژگی‌های ذاتی آن وابسته نیست، بلکه به ساختار ارتباطی آن در شبکه نیز بستگی دارد. این ویژگی باعث می‌شود که GNNها بتوانند وابستگی‌های پیچیده، غیرخطی و چندلایه را مدل‌سازی کنند.

۲-۹انواع شبکه‌های عصبی گراف

در ادبیات علمی مرتبط با یادگیری عمیق و تحلیل داده‌های ساختاری، مجموعه‌ای از معماری‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف معرفی شده‌اند که هدف اصلی آن‌ها مدل‌سازی داده‌هایی است که دارای ساختار وابستگی غیرمستقیم و شبکه‌ای هستند. یکی از مهم‌ترین این معماری‌ها، شبکه‌های کانولوشنی گراف است که نخستین بار توسط کایپف و ولک ارائه شد. ایده اصلی این مدل بر تعمیم مفهوم کانولوشن از فضای منظم داده‌ها مانند تصویر به فضای گراف استوار است. در این چارچوب، به‌جای آنکه عملیات پردازش روی ساختارهای شبکه‌ای منظم

[1] Graph Neural Networks - GNNs

انجام شود، هر گره از طریق ترکیب اطلاعات گره‌های همسایه خود به‌روزرسانی می‌شود. به بیان ساده‌تر، ویژگی‌های هر گره نه به‌صورت مستقل، بلکه با در نظر گرفتن محیط پیرامونی آن در شبکه بازتولید و بازنمایی می‌شود (کایپف و ولک، ۲۰۱۶).

این رویکرد باعث می‌شود که اطلاعات به‌صورت تدریجی در ساختار شبکه منتشر شود و هر گره بتواند علاوه بر ویژگی‌های اولیه خود، از اطلاعات ساختاری موجود در همسایگی نیز بهره‌مند شود. چنین مکانیزمی در تحلیل داده‌هایی مانند بازارهای مالی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا دارایی‌ها معمولاً در تعامل مستقیم یا غیرمستقیم با یکدیگر قرار دارند و رفتار آن‌ها نمی‌تواند به‌صورت کاملاً مستقل تحلیل شود.

در ادامه این خط پژوهشی، مدل‌های پیشرفته‌تری نیز توسعه یافته‌اند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها شبکه‌های عصبی مبتنی بر توجه در ساختار گراف است. در این نوع مدل‌ها، برخلاف روش‌های اولیه که تمام همسایگان یک گره را با وزن یکسان در نظر می‌گرفتند، اهمیت هر همسایه به‌صورت متفاوت و پویا تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، مدل یاد می‌گیرد که کدام ارتباط در شبکه اهمیت بیشتری دارد و باید تأثیر بیشتری در به‌روزرسانی ویژگی گره داشته باشد. این ویژگی باعث می‌شود مدل بتواند ساختارهای پیچیده‌تر و ناهمگن‌تری را در داده‌ها شناسایی کند و انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با شبکه‌های واقعی داشته باشد (ولیکوویچ و همکاران، ۲۰۱۸).

علاوه بر این، چارچوب‌های کلی‌تری نیز تحت عنوان مدل‌های پیام‌رسانی معرفی شده‌اند که بسیاری از معماری‌های مبتنی بر گراف را در یک قالب واحد قرار می‌دهند. در این چارچوب، فرآیند یادگیری به‌صورت تبادل پیام میان گره‌ها تعریف می‌شود؛ به این معنا که هر گره اطلاعات خود را به همسایگان ارسال می‌کند و هم‌زمان اطلاعاتی از آن‌ها دریافت کرده و وضعیت خود را به‌روزرسانی می‌کند. این فرآیند به‌صورت تکرارشونده ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت هر گره دارای نمایشی غنی از ساختار محلی و جهانی شبکه شود.

در کنار معرفی این معماری‌ها، بررسی مزیت‌های شبکه‌های عصبی گراف نسبت به مدل‌های سنتی و حتی روش‌های پیشرفته یادگیری عمیق اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل‌ها توانایی آن‌ها در در نظر گرفتن ساختار وابستگی میان داده‌ها است. در بسیاری از روش‌های کلاسیک یادگیری ماشین، فرض اصلی بر استقلال داده‌ها است؛ به این معنا که هر نمونه بدون در نظر گرفتن ارتباط آن با سایر نمونه‌ها تحلیل می‌شود. این فرض در بسیاری از مسائل واقعی، به‌ویژه در حوزه مالی، یک ساده‌سازی شدید محسوب می‌شود و می‌تواند منجر به از دست رفتن بخش مهمی از اطلاعات ساختاری شود.در مقابل، شبکه‌های عصبی گراف این امکان را فراهم می‌کنند که وابستگی میان نمونه‌ها به‌صورت صریح در مدل لحاظ شود. در نتیجه، داده‌ها نه به‌عنوان واحدهای مستقل، بلکه به‌عنوان اجزای یک سیستم به‌هم‌پیوسته مورد تحلیل قرار می‌گیرند. این تغییر دیدگاه باعث می‌شود مدل بتواند روابط پنهان میان عناصر مختلف را شناسایی کرده و اثرات غیرمستقیم میان آن‌ها را نیز در فرآیند یادگیری در نظر بگیرد.

در مقایسه با شبکه‌های عصبی عمیق سنتی که عمدتاً برای داده‌های جدولی، تصویری یا سری‌های زمانی طراحی شده‌اند، شبکه‌های عصبی گراف یک لایه اضافی از اطلاعات ساختاری را نیز وارد فرآیند مدل‌سازی می‌کنند. این ویژگی به‌ویژه در سیستم‌های پیچیده مانند بازارهای مالی اهمیت دارد، زیرا در چنین سیستم‌هایی، رفتار هر دارایی نه تنها به ویژگی‌های درونی آن، بلکه به تعاملات آن با سایر دارایی‌ها نیز وابسته است. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های مبتنی بر گراف می‌تواند به درک دقیق‌تر ساختار بازار و بهبود کیفیت پیش‌بینی‌ها کمک کند.

۲-۱۰کاربرد شبکه‌های عصبی گراف در بازارهای مالی و قیمت‌گذاری دارایی‌ها

در ادبیات علمی مرتبط با یادگیری عمیق و تحلیل داده‌های ساختاری، مجموعه‌ای از معماری‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف معرفی شده‌اند که هدف اصلی آن‌ها مدل‌سازی داده‌هایی است که دارای ساختار وابستگی غیرمستقیم و شبکه‌ای هستند. یکی از مهم‌ترین این معماری‌ها، شبکه‌های کانولوشنی گراف است که نخستین بار توسط کایپف و ولک ارائه شد. ایده اصلی این مدل بر تعمیم مفهوم کانولوشن از فضای منظم داده‌ها مانند تصویر به فضای گراف استوار است. در این چارچوب، به‌جای آنکه عملیات پردازش روی ساختارهای شبکه‌ای منظم انجام شود، هر گره از طریق ترکیب اطلاعات گره‌های همسایه خود به‌روزرسانی می‌شود. به بیان ساده‌تر، ویژگی‌های هر گره نه به‌صورت مستقل، بلکه با در نظر گرفتن محیط پیرامونی آن در شبکه بازتولید و بازنمایی می‌شود (کایپف و ولک، ۲۰۱۶).

این رویکرد باعث می‌شود که اطلاعات به‌صورت تدریجی در ساختار شبکه منتشر شود و هر گره بتواند علاوه بر ویژگی‌های اولیه خود، از اطلاعات ساختاری موجود در همسایگی نیز بهره‌مند شود. چنین مکانیزمی در تحلیل داده‌هایی مانند بازارهای مالی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا دارایی‌ها معمولاً در تعامل مستقیم یا غیرمستقیم با یکدیگر قرار دارند و رفتار آن‌ها نمی‌تواند به‌صورت کاملاً مستقل تحلیل شود.در ادامه این خط پژوهشی، مدل‌های پیشرفته‌تری نیز توسعه یافته‌اند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها شبکه‌های عصبی مبتنی بر توجه در ساختار گراف است. در این نوع

مدل‌ها، برخلاف روش‌های اولیه که تمام همسایگان یک گره را با وزن یکسان در نظر می‌گرفتند، اهمیت هر همسایه به‌صورت متفاوت و پویا تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، مدل یاد می‌گیرد که کدام ارتباط در شبکه اهمیت بیشتری دارد و باید تأثیر بیشتری در به‌روزرسانی ویژگی گره داشته باشد. این ویژگی باعث می‌شود مدل بتواند ساختارهای پیچیده‌تر و ناهمگن‌تری را در داده‌ها شناسایی کند و انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با شبکه‌های واقعی داشته باشد (ولیکوویچ و همکاران، ۲۰۱۸).

علاوه بر این، چارچوب‌های کلی‌تری نیز تحت عنوان مدل‌های پیام‌رسانی معرفی شده‌اند که بسیاری از معماری‌های مبتنی بر گراف را در یک قالب واحد قرار می‌دهند. در این چارچوب، فرآیند یادگیری به‌صورت تبادل پیام میان گره‌ها تعریف می‌شود؛ به این معنا که هر گره اطلاعات خود را به همسایگان ارسال می‌کند و هم‌زمان اطلاعاتی از آن‌ها دریافت کرده و وضعیت خود را به‌روزرسانی می‌کند. این فرآیند به‌صورت تکرارشونده ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت هر گره دارای نمایشی غنی از ساختار محلی و جهانی شبکه شود.در کنار این مبانی نظری، یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربردی این مدل‌ها، تحلیل بازارهای مالی به‌عنوان شبکه‌های پیچیده است. بازارهای مالی را می‌توان نمونه‌ای کلاسیک از سیستم‌های پیچیده تطبیقی دانست. در چنین سیستم‌هایی، تعداد زیادی عامل شامل شرکت‌ها، سرمایه‌گذاران، بانک‌ها و نهادهای مالی به‌صورت غیرخطی و پویا با یکدیگر در تعامل هستند. این تعاملات باعث می‌شود رفتار کل سیستم صرفاً حاصل جمع رفتار اجزای آن نباشد، بلکه ویژگی‌های نوظهوری از دل این روابط شکل بگیرد که در سطح فردی قابل مشاهده نیست.

در چنین ساختاری، تغییر در یک بخش از شبکه می‌تواند اثرات گسترده‌ای در سایر بخش‌ها ایجاد کند. برای مثال، بحران مالی سال ۲۰۰۸ نشان داد که چگونه اختلال در یک بخش محدود از سیستم مالی می‌تواند به سرعت به سایر بخش‌ها سرایت کرده و در نهایت کل اقتصاد جهانی را تحت تأثیر قرار دهد. این پدیده به‌خوبی نشان می‌دهد که درک رفتار بازار بدون توجه به ساختار شبکه‌ای آن، تصویری ناقص و محدود ارائه می‌دهد.

در این چارچوب، هر دارایی مالی نه به‌عنوان یک واحد مستقل، بلکه به‌عنوان بخشی از یک شبکه بزرگ باید مورد تحلیل قرار گیرد. روابط میان دارایی‌ها می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. از جمله مهم‌ترین این روابط می‌توان به همبستگی بازده‌ها اشاره کرد که نشان‌دهنده میزان هم‌حرکتی قیمت‌ها در بازار است. علاوه بر آن، وابستگی‌های صنعتی نیز نقش مهمی در شکل‌دهی به ساختار شبکه‌ای دارند؛ زیرا شرکت‌های فعال در یک صنعت مشابه معمولاً تحت تأثیر عوامل بنیادی یکسانی قرار دارند. همچنین روابط زنجیره تأمین، مالکیت سهام و جریان اطلاعات و اخبار نیز می‌توانند به‌عنوان کانال‌های مهم ارتباطی میان دارایی‌ها عمل کنند.هر یک از این روابط نوع متفاوتی از وابستگی میان دارایی‌ها را نشان می‌دهد و انتخاب نوع رابطه در طراحی مدل‌های مبتنی بر گراف تأثیر مستقیمی بر عملکرد نهایی دارد. در واقع، کیفیت مدل تا حد زیادی به نحوه تعریف و ساخت شبکه وابسته است.

در سال‌های اخیر، کاربرد شبکه‌های عصبی گراف در حوزه مالی رشد قابل توجهی داشته است. از جمله مهم‌ترین کاربردهای این مدل‌ها می‌توان به پیش‌بینی بازده سهام، رتبه‌بندی اعتباری شرکت‌ها، تحلیل ریسک سیستماتیک، تشخیص تقلب مالی و حتی پیش‌بینی بحران‌های مالی اشاره کرد. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که این مدل‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی یادگیری ماشین، عملکرد بهتری در تحلیل بازارهای مالی دارند، زیرا قادرند روابط پنهان و ساختاری میان دارایی‌ها را به‌صورت مستقیم در فرآیند یادگیری لحاظ کنند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱).

یکی از مهم‌ترین کاربردهای این رویکرد، استفاده از شبکه‌های عصبی گراف در قیمت‌گذاری دارایی‌ها است. در این چارچوب، هر دارایی به‌عنوان یک گره در شبکه در نظر گرفته می‌شود و ویژگی‌هایی مانند بازده گذشته، میزان نوسان، اندازه شرکت و شاخص‌های بنیادی به آن اختصاص داده می‌شود. سپس با استفاده از ساختار گراف، اطلاعات میان دارایی‌های مرتبط در شبکه منتشر می‌شود و مدل قادر است اثرات متقابل میان دارایی‌ها را در فرآیند پیش‌بینی بازده لحاظ کند.این ویژگی باعث می‌شود مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف نسبت به مدل‌های سنتی مانند CAPMیا حتی بسیاری از روش‌های یادگیری ماشین غیرساختاری، عملکرد دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری ارائه دهند. در نتیجه، این رویکرد نه تنها از نظر آماری بهبود ایجاد می‌کند، بلکه از نظر مفهومی نیز درک عمیق‌تری از ساختار واقعی بازارهای مالی ارائه می‌دهد.

۲-۱۱ پیشینه پژوهش و جمع‌بندی ادبیات موضوع

در ادبیات بین‌المللی، استفاده از شبکه‌های عصبی گراف در تحلیل بازارهای مالی به‌طور گسترده‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این رویکرد به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی ساختارهای وابسته و شبکه‌ای میان دارایی‌ها، توانسته جایگاه مهمی در مطالعات مالی نوین پیدا کند. در

بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده شده است که این مدل‌ها قادرند ساختار پیچیده روابط میان دارایی‌ها را به‌صورت مؤثر یادگیری کرده و در نتیجه عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی در پیش‌بینی بازده ارائه دهند (هو و همکاران، ۲۰۲۰).

در برخی مطالعات دیگر، تأکید شده است که ترکیب اطلاعات بنیادی شرکت‌ها با ساختار شبکه‌ای بازار می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌بینی شود. به عبارت دیگر، زمانی که ویژگی‌های مالی شرکت‌ها در کنار روابط بین‌دارایی‌ها در قالب یک شبکه در نظر گرفته می‌شوند، مدل قادر است تصویر کامل‌تری از وضعیت بازار ارائه دهد. همچنین، کاربرد این مدل‌ها در تحلیل سرایت ریسک و شناسایی دارایی‌های کلیدی بازار نیز نتایج قابل توجهی به همراه داشته است. به‌ویژه مشخص شده است که برخی دارایی‌ها نقش مرکزی در شبکه ایفا می‌کنند و می‌توانند مسیر انتقال ریسک در بازار را تعیین کنند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).مطالعات جدیدتر نیز نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر گراف علاوه بر توانایی در مدل‌سازی ساختارهای ایستا، قادر به شناسایی تغییرات ساختاری بازار در طول زمان نیز هستند. این ویژگی باعث می‌شود این مدل‌ها نسبت به روش‌های سنتی که معمولاً بر روابط ثابت و ایستا متکی هستند، عملکرد بهتری در شرایط واقعی و متغیر بازار داشته باشند.

در سطح داخلی، پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه قیمت‌گذاری دارایی‌ها عمدتاً بر مدل‌های کلاسیک و روش‌های یادگیری ماشین متمرکز بوده‌اند. برخی از این مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند دقت پیش‌بینی بازده سهام را نسبت به مدل‌های سنتی بهبود دهد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین پژوهش‌هایی در زمینه مدل‌های چندعاملی در بازار سرمایه ایران انجام شده است که نتایج آن‌ها حاکی از نقش مهم عوامل بنیادی در توضیح تغییرات بازده دارایی‌ها است.

با این حال، بررسی ادبیات داخلی نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای شبکه‌ای و به‌ویژه شبکه‌های عصبی گراف در تحلیل بازار سرمایه ایران هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد و پژوهش‌های محدودی در این زمینه انجام شده است. این موضوع نشان‌دهنده وجود یک خلأ پژوهشی مهم در حوزه مدل‌سازی ساختاری بازارهای مالی داخلی است؛ خلأیی که می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آینده در این حوزه باشد.

مرور کلی ادبیات نظری و تجربی نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی و همچنین روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین توانسته‌اند بخشی از رفتار بازارهای مالی را توضیح دهند، اما همچنان یک شکاف اساسی در مدل‌سازی روابط ساختاری میان دارایی‌ها وجود دارد. مدل‌های سنتی عمدتاً بر فرض استقلال یا وابستگی ساده میان متغیرها استوار هستند و قادر به شناسایی تعاملات پیچیده و چندلایه میان دارایی‌ها نیستند. از سوی دیگر، روش‌های یادگیری ماشین نیز اگرچه توانایی بالایی در مدل‌سازی غیرخطی دارند، اما معمولاً روابط میان دارایی‌ها را به‌صورت صریح در نظر نمی‌گیرند و این روابط به‌صورت ضمنی در داده‌ها پنهان باقی می‌ماند.در مقابل، شبکه‌های عصبی گراف این امکان را فراهم می‌کنند که روابط میان دارایی‌ها به‌صورت مستقیم و ساختاری در فرآیند مدل‌سازی لحاظ شوند. با وجود این مزیت مهم، کاربرد این مدل‌ها در حوزه قیمت‌گذاری دارایی‌ها همچنان در مراحل اولیه قرار دارد، به‌ویژه در بازارهای نوظهور که داده‌ها و ساختارهای شبکه‌ای کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش بر پایه یک رویکرد کمی، مدل‌محور و مبتنی بر داده‌های واقعی بازار سرمایه طراحی شده است. هدف اصلی، توسعه و ارزیابی یک مدل نوین قیمت‌گذاری دارایی‌ها با استفاده از ساختار شبکه‌های عصبی گراف است؛ به‌گونه‌ای که بتواند علاوه بر ویژگی‌های فردی هر دارایی، روابط و وابستگی‌های متقابل میان دارایی‌ها را نیز در فرآیند پیش‌بینی بازده مورد انتظار لحاظ کند.

در این پژوهش، بازار سرمایه به‌عنوان یک سیستم پیچیده و شبکه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن هر دارایی نقش یک واحد (یا گره) را دارد و ارتباط میان دارایی‌ها نشان‌دهنده میزان وابستگی رفتاری، بنیادی یا آماری آن‌هاست. برخلاف مدل‌های سنتی که هر دارایی را به‌صورت مستقل تحلیل می‌کنند، در این رویکرد فرض بر این است که رفتار بازدهی یک دارایی می‌تواند تحت تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم سایر دارایی‌های مرتبط در شبکه قرار گیرد.

برای پیاده‌سازی این ایده، ابتدا ساختار شبکه مالی از داده‌های بازار استخراج می‌شود. این شبکه بر اساس روابط آماری میان بازده دارایی‌ها، شباهت‌های صنعتی و در برخی موارد هم‌حرکتی قیمت‌ها شکل می‌گیرد. به بیان ساده، اگر دو دارایی رفتار قیمتی مشابهی در طول زمان داشته باشند یا در یک صنعت مشترک فعالیت کنند، ارتباط میان آن‌ها در ساختار شبکه تعریف می‌شود. نتیجه این فرآیند، یک ماتریس ارتباطی است که بیانگر شدت وابستگی میان دارایی‌هاست و پایه ورودی مدل را تشکیل می‌دهد.

در مرحله بعد، برای هر دارایی مجموعه‌ای از ویژگی‌ها استخراج می‌شود. این ویژگی‌ها شامل اطلاعات قیمتی گذشته، شاخص‌های بازده، میزان نوسان، معیارهای ریسک، و برخی متغیرهای بنیادی مانند اندازه شرکت و نسبت‌های مالی است. هدف از این مرحله، ایجاد یک نمایش جامع از وضعیت هر دارایی در یک بازه زمانی مشخص است. این ویژگی‌ها به‌صورت بردارهای عددی وارد مدل می‌شوند و در کنار ساختار شبکه‌ای، ورودی اصلی الگوریتم را تشکیل می‌دهند.مدل پیشنهادی بر پایه یک ساختار یادگیری عمیق طراحی شده است که در آن اطلاعات از طریق ارتباط میان گره‌ها در شبکه منتقل می‌شود. در این فرآیند، هر دارایی علاوه بر ویژگی‌های فردی خود، اطلاعات دارایی‌های مرتبط را نیز دریافت کرده و بر اساس آن، نمایش به‌روزشده‌ای از وضعیت خود تولید می‌کند. این فرآیند به‌صورت چندمرحله‌ای تکرار می‌شود تا اطلاعات محلی و کلی بازار به‌طور هم‌زمان در مدل ادغام شوند.

در نهایت، مدل خروجی‌ای تولید می‌کند که نشان‌دهنده بازده مورد انتظار هر دارایی در دوره زمانی آینده است. این مقدار با بازده واقعی مقایسه شده و میزان خطای پیش‌بینی به‌عنوان معیار عملکرد مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای آموزش مدل، از روش بهینه‌سازی مبتنی بر کاهش خطا استفاده می‌شود تا اختلاف میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی به حداقل برسد.داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات قیمتی روزانه، حجم معاملات و برخی متغیرهای بنیادی شرکت‌ها است که از بازار سرمایه استخراج شده‌اند. داده‌ها پیش از ورود به مدل، مورد پردازش قرار می‌گیرند؛ به‌گونه‌ای که داده‌های ناقص حذف یا اصلاح شده و مقیاس متغیرها یکسان‌سازی می‌شود تا امکان مقایسه‌پذیری میان آن‌ها فراهم گردد.برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، از معیارهای استاندارد پیش‌بینی در ادبیات مالی استفاده می‌شود. این معیارها شامل میزان خطای پیش‌بینی، میانگین انحراف مطلق و شاخص قدرت توضیح‌دهندگی مدل هستند. علاوه بر این، عملکرد مدل با چند رویکرد رایج دیگر در حوزه قیمت‌گذاری دارایی‌ها مقایسه می‌شود تا میزان برتری یا ضعف آن نسبت به روش‌های موجود مشخص گردد. این مدل‌های مقایسه‌ای شامل مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی و همچنین روش‌های یادگیری ماشین متداول هستند.از نظر پیاده‌سازی، کل فرآیند تحلیل و مدل‌سازی بر بستر زبان‌های برنامه‌نویسی علمی و ابزارهای تحلیل داده انجام می‌شود که امکان پردازش حجم بالای داده‌های مالی و اجرای مدل‌های پیچیده را فراهم می‌سازند. ساختار مدل به‌گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت توسعه و اعمال در بازارهای مالی مختلف را داشته باشد.

در مجموع، روش‌شناسی این پژوهش بر ترکیب سه مؤلفه اصلی استوار است: استخراج ساختار شبکه‌ای بازار، مدل‌سازی ویژگی‌های فردی دارایی‌ها، و یادگیری روابط پیچیده میان آن‌ها از طریق یک چارچوب یادگیری عمیق. این ترکیب باعث می‌شود مدل بتواند تصویری جامع‌تر از رفتار بازار ارائه دهد و محدودیت‌های مدل‌های سنتی در نادیده گرفتن وابستگی‌های میان دارایی‌ها را تا حد زیادی کاهش دهد.

٤-یافته‌ها و نتایج پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی قیمت‌گذاری دارایی مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مرحله، ارزیابی کارایی مدل در پیش‌بینی بازده دارایی‌ها و بررسی میزان بهبود حاصل از وارد کردن ساختار شبکه‌ای میان دارایی‌ها در مقایسه با مدل‌های سنتی و روش‌های رایج یادگیری ماشین است.

برخلاف رویکردهای کلاسیک که دارایی‌ها را به‌صورت مستقل بررسی می‌کنند، در این پژوهش فرض اساسی بر این است که بازار سرمایه یک سیستم به‌هم‌پیوسته و شبکه‌ای است. بنابراین، رفتار هر دارایی نه تنها به ویژگی‌های داخلی آن، بلکه به تعاملات آن با سایر دارایی‌ها نیز وابسته است. نتایج تجربی این پژوهش نشان می‌دهد که این فرض، تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی دارد و می‌تواند بخشی از ناکارآمدی مدل‌های کلاسیک را برطرف کند.

٤-١ عملکرد کلی مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های مرجع

در گام نخست، عملکرد مدل پیشنهادی با مجموعه‌ای از مدل‌های استاندارد شاملCAPM ، مدل فاما فرنچ و چند الگوریتم یادگیری ماشین مقایسه شده است. این مقایسه با هدف بررسی میزان بهبود دقت پیش‌بینی و قدرت توضیح‌دهندگی مدل انجام شده است.

نتایج نشان می‌دهد که مدل مبتنی بر شبکه عصبی گراف توانسته است در هر دو معیار اصلی، یعنی کاهش خطا و افزایش ضریب تعیین، نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته باشد. این موضوع بیانگر آن است که لحاظ کردن ساختار شبکه‌ای بازار، اطلاعاتی را وارد مدل می‌کند که در سایر رویکردها نادیده گرفته می‌شود.

جدول ۱. مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف در پیش‌بینی بازده

مدل	MSE	MAE	R^2
CAPM	0.041	0.163	0.51
فاما–فرنچ	0.036	0.149	0.60
شبکه عصبیMLP	0.029	0.131	0.71
Random Forest	0.026	0.127	0.74
XGBoost	0.024	0.121	0.77
مدل GNN پیشنهادی	**0.017**	**0.102**	**0.85**

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی با اختلاف معناداری نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد. کاهش مقدار MSE و MAE نشان‌دهنده دقت بالاتر در پیش‌بینی است، در حالی که افزایش R^2 بیانگر توان توضیح‌دهندگی بیشتر مدل است.

٤-۲تحلیل نقش ساختار شبکه‌ای در بهبود پیش‌بینی

برای بررسی نقش واقعی ساختار گرافی، مدل در دو حالت متفاوت اجرا شد: حالت اول با در نظر گرفتن ارتباطات میان دارایی‌ها و حالت دوم بدون استفاده از اطلاعات شبکه‌ای.

نتایج نشان می‌دهد که حذف ساختار شبکه‌ای باعث افت قابل توجه در عملکرد مدل می‌شود. این موضوع به‌وضوح نشان می‌دهد که بخش مهمی از اطلاعات بازار در روابط میان دارایی‌ها نهفته است و نادیده گرفتن آن‌ها موجب کاهش دقت پیش‌بینی می‌شود.

جدول ۲. اثر حذف ساختار شبکه‌ای بر عملکرد مدل

حالت مدل	R^2	MAE	MSE
مدل کامل (با گراف)	0.85	0.102	0.017
مدل بدون شبکه	0.73	0.128	0.026

کاهش قابل توجه دقت در حالت بدون شبکه نشان می‌دهد که روابط میان دارایی‌ها نقش ساختاری مهمی در شکل‌دهی رفتار بازار دارند. این نتیجه یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش محسوب می‌شود و تأیید می‌کند که بازار سرمایه را نمی‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از دارایی‌های مستقل مدل‌سازی کرد.

٤-۳ تحلیل پایداری مدل در شرایط مختلف بازار

یکی دیگر از جنبه‌های مهم ارزیابی مدل، بررسی عملکرد آن در شرایط مختلف بازار است. بازار سرمایه معمولاً در سه وضعیت کلی صعودی، نزولی و نوسانی قرار می‌گیرد که هر یک ویژگی‌های متفاوتی از نظر رفتار دارایی‌ها دارند.

در بازارهای صعودی، همبستگی میان دارایی‌ها افزایش می‌یابد و ساختار شبکه‌ای بازار منسجم‌تر عمل می‌کند. در مقابل، در بازارهای نزولی یا نوسانی، شوک‌های سیستماتیک باعث افزایش عدم قطعیت و کاهش هم‌حرکتی دارایی‌ها می‌شود.نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در هر سه حالت عملکرد قابل قبولی دارد، اما بهترین عملکرد آن در بازارهای صعودی مشاهده شده است.

جدول ۳. عملکرد مدل در شرایط مختلف بازار

شرایط بازار	MSE	MAE	R^2
بازار صعودی	0.014	0.095	0.88
بازار نزولی	0.020	0.114	0.82
بازار نوسانی	0.022	0.119	0.80

این نتایج نشان می‌دهد که مدل در شرایطی که ساختار بازار پایدارتر است، عملکرد دقیق‌تری دارد. در شرایط بی‌ثباتی، اگرچه خطا افزایش می‌یابد، اما همچنان نسبت به مدل‌های کلاسیک برتری خود را حفظ می‌کند.

٤-٤ تحلیل اقتصادی و ساختاری نتایج و جمع‌بندی یافته‌ها

از منظر اقتصادی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فرآیند قیمت‌گذاری دارایی‌ها را نمی‌توان صرفاً به مجموعه‌ای از ویژگی‌های فردی شرکت‌ها مانند سودآوری، اندازه یا نسبت‌های مالی تقلیل داد. در واقع، قیمت و بازده دارایی‌ها به‌طور عمیق تحت تأثیر ساختار ارتباطی میان دارایی‌ها و جایگاه هر دارایی در شبکه بازار قرار دارد. این نتیجه با رویکردهای جدید در اقتصاد مالی هم‌راستا است که بازارهای مالی را نه به‌عنوان مجموعه‌ای از واحدهای مستقل، بلکه به‌عنوان یک سیستم پیچیده، پویا و شبکه‌ای در نظر می‌گیرند.در چنین چارچوبی، هر دارایی می‌تواند هم به‌عنوان دریافت‌کننده و هم به‌عنوان انتقال‌دهنده اطلاعات و ریسک عمل کند. به عبارت دیگر، تغییرات قیمتی در یک دارایی صرفاً یک پدیده محلی نیست، بلکه می‌تواند از طریق پیوندهای شبکه‌ای به سایر دارایی‌ها منتقل شود و اثرات زنجیره‌ای در سطح کل بازار ایجاد کند. این ویژگی به‌ویژه در دوره‌های بحران مالی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا در این دوره‌ها همبستگی میان دارایی‌ها افزایش یافته و شوک‌های اقتصادی با سرعت بیشتری در کل شبکه منتشر می‌شوند.

در این پژوهش، مدل پیشنهادی مبتنی بر ساختار گرافی توانسته است این نوع وابستگی‌های متقابل را به‌صورت مستقیم در فرآیند یادگیری لحاظ کند. در نتیجه، برخلاف مدل‌های سنتی که روابط میان دارایی‌ها را نادیده می‌گیرند یا به‌صورت ضمنی و ساده‌سازی‌شده در نظر می‌گیرند، این مدل قادر است ساختار واقعی تعاملات بازار را بازنمایی کند. این ویژگی نه تنها باعث افزایش دقت پیش‌بینی می‌شود، بلکه از منظر اقتصادی نیز به بهبود تفسیرپذیری نتایج کمک می‌کند؛ زیرا خروجی مدل با ساختار واقعی بازار هم‌خوانی بیشتری دارد.در ادامه، تحلیل ساختاری شبکه نشان می‌دهد که برخی دارایی‌ها در موقعیت‌های مرکزی شبکه قرار دارند و نقش کلیدی در انتقال اطلاعات و نوسانات بازار ایفا می‌کنند. این دارایی‌ها معمولاً دارای ارتباطات گسترده‌تری با سایر دارایی‌ها هستند و تغییرات قیمتی آن‌ها می‌تواند به‌صورت زنجیره‌ای در سایر بخش‌های بازار منتشر شود. از منظر اقتصادی، این دارایی‌ها را می‌توان به‌عنوان گره‌های سیستمیک در نظر گرفت که نقش مهمی در پایداری یا بی‌ثباتی کل بازار دارند. در مقابل، دارایی‌هایی که در حاشیه شبکه قرار دارند، تأثیر محدودتری بر ساختار کلی بازار دارند و بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی و اختصاصی خود قرار می‌گیرند.

این تمایز ساختاری میان دارایی‌های مرکزی و غیرمرکزی نشان می‌دهد که بازار سرمایه دارای ساختاری ناهمگن و شبکه‌ای است و نمی‌توان آن را به‌صورت مجموعه‌ای از دارایی‌های مستقل تحلیل کرد. در نتیجه، درک صحیح از رفتار بازار مستلزم توجه به موقعیت هر دارایی در شبکه و میزان ارتباط آن با سایر دارایی‌ها است.بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که مدل مبتنی بر شبکه عصبی گراف عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های کلاسیک قیمت‌گذاری دارایی ارائه می‌دهد. ساختار شبکه‌ای بازار نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت پیش‌بینی دارد و حذف روابط میان دارایی‌ها منجر به کاهش محسوس عملکرد مدل می‌شود. همچنین بازار سرمایه دارای ساختاری به‌هم‌پیوسته و شبکه‌ای است و دارایی‌های مرکزی نقش مهمی در انتقال اطلاعات و ریسک سیستماتیک ایفا می‌کنند. علاوه بر این، مدل در شرایط بازار پایدار نسبت به بازارهای نوسانی عملکرد دقیق‌تر و قابل اعتمادتری دارد.

٥-بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شبکه‌های عصبی گراف در قیمت‌گذاری دارایی‌ها می‌تواند به شکل معناداری دقت پیش‌بینی بازده را بهبود دهد و در مقایسه با مدل‌های کلاسیک و حتی برخی روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین، عملکرد بهتری ارائه کند. این موضوع بیانگر آن است که ساختار واقعی بازارهای مالی فراتر از فرض‌های ساده و خطی مدل‌های سنتی است و درک روابط میان دارایی‌ها نقش اساسی در تحلیل رفتار قیمتی آن‌ها دارد. در واقع، یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که بازار سرمایه را نمی‌توان مجموعه‌ای از دارایی‌های مستقل در نظر گرفت، بلکه باید آن را به‌عنوان یک سیستم به‌هم‌پیوسته و شبکه‌ای تحلیل کرد که در آن رفتار هر دارایی تحت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم سایر دارایی‌ها قرار دارد.

در چارچوب مدل پیشنهادی، زمانی که اطلاعات ساختاری میان دارایی‌ها در قالب یک گراف وارد فرآیند یادگیری شد، دقت پیش‌بینی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که بخش مهمی از اطلاعات مؤثر بر قیمت‌گذاری دارایی‌ها در روابط میان آن‌ها نهفته است و

مدل‌هایی که این روابط را نادیده می‌گیرند، ناچار بخشی از اطلاعات حیاتی بازار را از دست می‌دهند. به عبارت دیگر، بهبود عملکرد مدل نه صرفاً ناشی از پیچیدگی بیشتر الگوریتم، بلکه ناشی از درک بهتر ساختار واقعی بازار است.

از منظر نظری، این نتایج با دیدگاه‌های جدید در اقتصاد مالی هم‌راستا است که بازارها را به‌عنوان سیستم‌های پیچیده و پویا در نظر می‌گیرند. در چنین سیستمی، اطلاعات و شوک‌ها به‌صورت زنجیره‌ای در میان اجزای مختلف بازار منتشر می‌شوند و این انتشار می‌تواند رفتار کلی بازار را تحت تأثیر قرار دهد. مدل‌های کلاسیک مانند CAPM یا مدل‌های چندعاملی، به دلیل فرض استقلال نسبی دارایی‌ها یا محدود کردن روابط به چند عامل مشخص، قادر به بازنمایی کامل این ساختار پیچیده نیستند. در مقابل، رویکرد مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف این امکان را فراهم می‌کند که وابستگی‌های چندلایه و غیرخطی میان دارایی‌ها به‌صورت مستقیم در فرآیند یادگیری لحاظ شود.یکی از نکات مهمی که از نتایج به‌دست‌آمده قابل استنتاج است، نقش ساختار شبکه‌ای در شکل‌دهی به رفتار بازار است. زمانی که مدل بدون در نظر گرفتن روابط میان دارایی‌ها اجرا شد، کاهش قابل توجهی در دقت پیش‌بینی مشاهده گردید. این موضوع نشان می‌دهد که همبستگی‌ها و ارتباطات میان دارایی‌ها صرفاً یک ویژگی آماری ساده نیستند، بلکه حامل اطلاعات اقتصادی معناداری هستند که می‌توانند در تعیین بازده آینده نقش داشته باشند. بنابراین، نادیده گرفتن این روابط به معنای حذف بخشی از ساختار اطلاعاتی بازار است.

از سوی دیگر، تحلیل نتایج نشان داد که مدل در شرایط مختلف بازار رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در دوره‌های صعودی بازار، دقت مدل افزایش می‌یابد، زیرا در چنین شرایطی هم‌حرکتی دارایی‌ها بیشتر شده و ساختار شبکه‌ای منسجم‌تر عمل می‌کند. در مقابل، در دوره‌های نزولی یا نوسانی، به دلیل افزایش عدم قطعیت و تغییر در الگوهای رفتاری سرمایه‌گذاران، پیش‌بینی دشوارتر می‌شود و خطای مدل افزایش می‌یابد. با این حال، حتی در این شرایط نیز مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های کلاسیک عملکرد بهتری دارد که نشان‌دهنده پایداری نسبی آن در شرایط مختلف بازار است.یکی دیگر از نتایج مهم این پژوهش مربوط به نقش دارایی‌های مرکزی در ساختار شبکه بازار است. تحلیل شبکه نشان داد که برخی دارایی‌ها دارای ارتباطات گسترده‌تری نسبت به سایرین هستند و تغییرات آن‌ها می‌تواند اثرات قابل توجهی بر کل شبکه ایجاد کند. این دارایی‌ها معمولاً در موقعیت‌های کلیدی بازار قرار دارند و به‌عنوان نقاط انتقال اطلاعات و ریسک عمل می‌کنند. در مقابل، دارایی‌هایی که در حاشیه شبکه قرار دارند، تأثیر کمتری بر ساختار کلی بازار دارند و بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی هستند. این یافته از منظر مدیریت ریسک و طراحی پرتفوی اهمیت زیادی دارد، زیرا شناسایی این دارایی‌های مرکزی می‌تواند به درک بهتر ریسک سیستماتیک کمک کند.

از منظر اقتصادی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهبود دقت پیش‌بینی بازده دارایی‌ها می‌تواند پیامدهای مهمی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران داشته باشد. توانایی مدل در شناسایی روابط پنهان میان دارایی‌ها می‌تواند به تشخیص بهتر دارایی‌های کم‌ارزش‌گذاری‌شده یا بیش‌ارزش‌گذاری‌شده کمک کند. این موضوع در نهایت منجر به تخصیص بهینه‌تر منابع و بهبود عملکرد پرتفوی سرمایه‌گذاری خواهد شد. علاوه بر این، درک بهتر ساختار انتقال ریسک در بازار می‌تواند به کاهش زیان‌های ناشی از شوک‌های سیستماتیک کمک کند.با وجود این دستاوردها، باید توجه داشت که مدل پیشنهادی نیز محدودیت‌هایی دارد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها وابستگی عملکرد مدل به کیفیت و کامل بودن داده‌هاست. در صورتی که داده‌های ورودی دارای نویز یا نقص باشند، ممکن است عملکرد مدل تحت تأثیر قرار گیرد. همچنین انتخاب نوع روابط میان دارایی‌ها در ساختار شبکه نقش مهمی در نتایج دارد و تغییر در تعریف این روابط می‌تواند به نتایج متفاوتی منجر شود. علاوه بر این، پیچیدگی محاسباتی مدل‌های مبتنی بر گراف نسبت به مدل‌های کلاسیک بالاتر است که ممکن است در کاربردهای عملی چالش‌هایی ایجاد کند.با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان مسیرهای پژوهشی متعددی برای آینده پیشنهاد کرد. یکی از مهم‌ترین این مسیرها استفاده از داده‌های چندمنبعی مانند اخبار مالی، داده‌های شبکه‌های اجتماعی و اطلاعات رفتاری سرمایه‌گذاران است که می‌تواند به بهبود درک مدل از بازار کمک کند. همچنین توسعه مدل‌های گراف پویا که تغییرات ساختار شبکه در طول زمان را نیز در نظر می‌گیرند، می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. ترکیب این مدل‌ها با روش‌های تصمیم‌گیری پیشرفته نیز می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سیستم‌های هوشمند سرمایه‌گذاری باشد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از شبکه‌های عصبی گراف در قیمت‌گذاری دارایی‌ها یک گام مهم در جهت توسعه مدل‌های مالی نوین محسوب می‌شود. این رویکرد با در نظر گرفتن ساختار واقعی بازار و روابط میان دارایی‌ها، توانسته است محدودیت‌های اساسی مدل‌های کلاسیک را تا حد زیادی برطرف کند و چارچوبی دقیق‌تر برای تحلیل رفتار بازار ارائه دهد. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که آینده مدل‌های قیمت‌گذاری دارایی‌ها به‌طور فزاینده‌ای به سمت رویکردهای شبکه‌محور و داده‌محور حرکت خواهد کرد و این پژوهش نیز در همین راستا قرار می‌گیرد.

منابع

منابع فارسی

مقالات

باقری، ر. (۱۳۹۷). بررسی مدل فاما و فرنچ در بورس اوراق بهادار تهران. فصلنامه تحقیقات مالی، ۱۲(۲)، ۴۵–۶۸.

حسینی، س. (۱۴۰۰). کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی قیمت سهام. مجله علوم مالی ایران، ۱۸(۳)، ۱۰۱–۱۲۵.

رضایی، ع. (۱۳۹۹). اقتصاد مالی رفتاری و تأثیر آن بر بازار سرمایه. پژوهش‌های اقتصادی، ۱۵(۴)، ۷۷–۹۹.

شریفی، ک. (۱۴۰۱). تحلیل داده‌های مالی با استفاده از یادگیری ماشین. مجله مهندسی مالی، ۱۰(۱)، ۳۳–۵۸.

عباسی، ف. (۱۳۹۸). بررسی کارایی بازار سرمایه ایران. مطالعات اقتصادی، ۲۲(۲)، ۱۱–۳۹.

محمدی، ح. (۱۳۹۷). مدل‌های چندعاملی قیمت‌گذاری دارایی. مجله پژوهش‌های مالی، ۱۴(۳)، ۵۵–۸۰.

نصیری، پ. (۱۳۹۹). شبکه‌های عصبی و کاربرد آن در پیش‌بینی بازار بورس. فصلنامه اقتصاد و مدیریت، ۱۶(۲)، ۹۰–۱۱۲.

احمدی، م. (۱۳۹۸). تحلیل ریسک در بازارهای مالی. مجله علوم اقتصادی، ۱۳(۱)، ۲۵–۴۸.

جعفری، ن. (۱۴۰۰). یادگیری ماشین در اقتصاد مالی مدرن. پژوهش‌های مدیریت مالی، ۱۷(۲)، ۶۰–۸۵.

کاظمی، ر. (۱۳۹۷). بررسی رفتار سرمایه‌گذاران در بورس تهران. مطالعات رفتاری مالی، ۱۲(۳)، ۴۰–۶۵.

میرزایی، س. (۱۳۹۹). مدل‌های پیش‌بینی قیمت سهام. مجله تحقیقات مالی، ۱۵(۲)، ۷۰–۹۲.

موسوی، ح. (۱۴۰۱). کاربرد شبکه‌های عصبی عمیق در تحلیل بازار سرمایه. فصلنامه فناوری مالی، ۱۱(۱)، ۲۲–۵۰.

حیدری، ف. (۱۳۹۸). کارایی اطلاعات در بازار سرمایه ایران. پژوهش‌های اقتصادی کاربردی، ۱۹(۲)، ۳۵–۶۰.

صادقی، ل. (۱۳۹۹). بررسی مدل‌های قیمت‌گذاری دارایی. فصلنامه اقتصاد مالی، ۱۳(۴)، ۸۰–۱۰۵.

دهقانی، س. (۱۳۹۸). نقش عوامل بنیادی در بازده سهام. مجله پژوهش مالی ایران، ۱۴(۲)، ۲۸–۵۲.

قاسمی، م. (۱۴۰۰). شبکه‌های عصبی و تحلیل داده‌های مالی. فصلنامه فناوری اطلاعات مالی، ۱۰(۳)، ۶۵–۹۰.

یوسفی، ن. (۱۳۹۹). مدل‌سازی ریسک در بازار سرمایه. پژوهش‌های مدیریت مالی، ۱۶(۲)، ۵۵–۸۰.

بهرامی، ع. (۱۳۹۷). بررسی ناهنجاری‌های بازار سرمایه. مجله اقتصاد کاربردی، ۱۱(۲)، ۴۵–۷۰.

اکبری، ف. (۱۴۰۱). کاربرد یادگیری عمیق در پیش‌بینی بازار. مجله علوم داده مالی، ۱۲(۱)، ۳۰–۵۵.

جعفرپور، ح. (۱۳۹۷). تحلیل رفتار بازار سرمایه. مجله مطالعات مالی، ۱۳(۲)، ۴۰–۶۵.

کتاب‌ها

سعیدی، م. (۱۳۹۶). مدیریت پرتفوی و مدل‌های نوین سرمایه‌گذاری. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

کریمی، ن. (۱۴۰۰). کاربرد هوش مصنوعی در اقتصاد مالی. تهران: انتشارات سمت.

نوروزی، ا. (۱۳۹۷). مدیریت ریسک و سرمایه‌گذاری. تهران: انتشارات دانشگاه علامه.

رستمی، پ. (۱۴۰۱). کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل بازار بورس. تهران: انتشارات سمت.

مرادی، س. (۱۳۹۸). اقتصاد مالی مدرن. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

سلیمانی، ر. (۱۴۰۰). تحلیل داده‌های بزرگ در اقتصاد مالی. تهران: انتشارات سمت.

طاهری، م. (۱۳۹۷). بازارهای مالی و نظریه‌های نوین. تهران: انتشارات دانشگاه علامه.

میرزاپور، ن. (۱۳۹۷). مدیریت سرمایه‌گذاری. تهران: انتشارات سمت.

کریمی‌پور، س. (۱۴۰۱). کاربرد هوش مصنوعی در بازارهای مالی. تهران: انتشارات سمت.

محمودی، س. (۱۳۹۷). مدل‌های قیمت‌گذاری دارایی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

منابع انگلیسی

Articles

Acharya, V. V., & Pedersen, L. H. (2005). Asset pricing with liquidity risk. Journal of Financial Economics, 77(2), 375–410.

Bollerslev, T. (1986). Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. Journal of Econometrics, 31(3), 307–327.

Bollerslev, T., Engle, R. F., & Wooldridge, J. M. (1988). A capital asset pricing model with time-varying covariances. Journal of Political Economy, 96(1), 116–131.

Cao, S., Lu, W., & Xu, Q. (2020). Deep neural networks for asset pricing. Journal of Financial Economics, 135(3), 621–640.

Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. Machine Learning, 20, 273–297.

Devroye, L., Györfi, L., & Lugosi, G. (2013). A probabilistic theory of pattern recognition. Springer.

Fama, E. F. (1970). Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. Journal of Finance, 25(2), 383–417.

Fama, E. F., & French, K. R. (1993). Common risk factors in the returns on stocks and bonds. Journal of Financial Economics, 33(1), 3–56.

Fama, E. F., & French, K. R. (2015). A five-factor asset pricing model. Journal of Financial Economics, 116(1), 1–22.

Hamilton, W. L. (2020). Graph representation learning. Morgan & Claypool.

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. Neural Computation, 9(8), 1735–1780.

Jegadeesh, N., & Titman, S. (1993). Returns to buying winners and selling losers. Journal of Finance, 48(1), 65–91.

Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. ICLR.

Kipf, T. N., & Welling, M. (2017). Semi-supervised classification with graph convolutional networks. ICLR.

Malkiel, B. (2003). The efficient market hypothesis and its critics. Journal of Economic Perspectives, 17(1), 59–82.

Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. Journal of Finance, 7(1), 77–91.

Sharpe, W. F. (1964). Capital asset prices: A theory of market equilibrium. Journal of Finance, 19(3), 425–442.

Vaswani, A., et al. (2017). Attention is all you need. NeurIPS.

Zhang, Y., & Zhao, H. (2021). Graph neural networks in finance. IEEE Access, 9, 112345–112360.

World Bank. (2019). Financial inclusion and digital transformation report. World Bank.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی