Journal of
Intelligent Financial
Management Perspectives

Development of an AI-Based Sustainable Finance Framework for Evaluating Green Investments

Maryam Kiani[1]*, Elaheh Eskandari[2], Fatemeh Sadat Jamshidi[3]

[1] *Ph.D. Candidate in Economics, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran(Coresponding autour), Email: m.kiani@srbiau.ac.ir*
[2] *M.A. in Economics, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran*
[3] *M.A. in Economics, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Article history:
Received:09/04/2025
Received in revised form:30/04/2025
Accepted:11/05/2025
Available online:15/06/2025

Keywords:

Sustainable Finance
Artificial Intelligence
Green Investment
Machine Learning
Sustainable Development

ABSTRACT

The growing global concerns regarding climate change, natural resource depletion, and environmental risks have made green investments one of the fundamental pillars of modern economic and financial policymaking. However, accurately evaluating the sustainability and economic effectiveness of green projects remains a significant challenge. Traditional investment evaluation methods mainly focus on short-term financial indicators and have limited capability in simultaneously analyzing economic, environmental, and social variables. This study aims to develop an AI-based sustainable finance framework for evaluating green investments. In this research, machine learning algorithms, multidimensional data analysis, and intelligent forecasting models were integrated to design a sustainable evaluation system. The dataset consists of information from 1,250 green investment projects in renewable energy, clean transportation, smart buildings, and resource management sectors during the period 2018–2025, collected from international financial and environmental databases. After preprocessing, feature extraction, and data normalization, the proposed model based on deep neural networks and XGBoost was developed and compared with traditional financial evaluation methods. The results indicate that the proposed framework outperforms conventional models in predicting financial sustainability, assessing environmental risks, and analyzing long-term investment returns. Furthermore, the AI model demonstrated a superior capability in identifying complex relationships among ESG indicators, economic returns, and investment risks. The findings suggest that AI-based frameworks can play a critical role in developing sustainable financial systems, improving investors' decision-making processes, and directing financial resources toward environmentally sustainable projects.

Article Type: Research Paper

©Authors

Journal of Intelligent Financial Management, 2025, Vol. 1, No.1, pp. 58- 74

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

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.21687

Cite: Kiani,M. , Eskandari,E. and Jamshidi,F. S. (2025). Development of an AI-Based Sustainable Finance Framework for Evaluating Green Investments. *Journal of Intelligent Financial Management,1*(1),58-74

نگرش های
مدیریت مالی هوشمند
Journal of Intelligent Financial Management Perspectives

توسعه چارچوب مالی پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز

مریم کیانی [۱و*]، الهه اسکندری [۲]،فاطمه سادات جمشیدی [۳]

۱ و *–دانشجوی دکتری اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل نویسنده مسئول:M.Kiani@srbiau.ac.ir

۲–کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

۳–کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ بازنگری:۱۴۰۴/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ انتشار:۱۴۰۴/۰۷/۲۵

کلیدواژه‌ها:

مالی پایدار

هوش مصنوعی

سرمایه‌گذاری سبز

یادگیری ماشین

توسعه پایدار

چکیده

افزایش نگرانی‌های جهانی پیرامون تغییرات اقلیمی، کاهش منابع طبیعی و تشدید مخاطرات زیست‌محیطی، موجب شده است که سرمایه‌گذاری‌های سبز به یکی از ارکان اصلی سیاست‌گذاری اقتصادی و مالی در جهان تبدیل شوند. با این حال، ارزیابی دقیق پایداری و اثربخشی اقتصادی پروژه‌های سبز همچنان با چالش‌های متعددی همراه است. روش‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری عمدتاً بر شاخص‌های مالی کوتاه‌مدت متمرکز بوده و توانایی محدودی در تحلیل هم‌زمان متغیرهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی دارند. پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب مالی پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز انجام شده است. در این پژوهش، از ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل داده‌های چندبعدی و مدل‌های پیش‌بینی هوشمند برای طراحی یک سیستم ارزیابی پایدار استفاده شد. داده‌های پژوهش شامل اطلاعات ۱۲۵۰ پروژه سرمایه‌گذاری سبز در حوزه‌های انرژی تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک، ساختمان‌های هوشمند و مدیریت منابع طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ است که از پایگاه‌های بین‌المللی مالی و زیست‌محیطی گردآوری شده‌اند. پس از مرحله پیش‌پردازش، استخراج ویژگی و نرمال‌سازی داده‌ها، مدل پیشنهادی مبتنی بر شبکه‌های عصبی عمیق و الگوریتم XGBoost طراحی و با روش‌های سنتی ارزیابی مالی مقایسه شد. نتایج پژوهش نشان داد چارچوب پیشنهادی در پیش‌بینی پایداری مالی پروژه‌ها، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و تحلیل بازده بلندمدت عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های کلاسیک دارد. همچنین مدل هوش مصنوعی توانست روابط پیچیده میان شاخص‌های ESG، بازده اقتصادی و ریسک سرمایه‌گذاری را با دقت بالاتری تحلیل کند. یافته‌ها نشان می‌دهد استفاده از چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در توسعه نظام مالی پایدار، بهبود تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران و هدایت منابع مالی به سمت پروژه‌های سازگار با محیط زیست ایفا کند.

نشریه مدیریت مالی هوشمند، ۱۴۰۴، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۵۸-۷۴.

ناشر: موسسه علمی طلوع بینش آینده

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.21687

نوع مقاله: پژوهشی

© نویسندگان

استناد: کیانی,مریم , اسکندری,الهه و جمشیدی,فاطمه سادات . (۱۴۰۴). توسعه چارچوب مالی پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز ..*مدیریت مالی هوشمند* ، (۱)۱،۵۸-۷۴.

۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر، تشدید بحران‌های زیست‌محیطی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش منابع طبیعی و رشد نگرانی‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی، توجه دولت‌ها، نهادهای مالی و سرمایه‌گذاران را به سمت مفهوم توسعه پایدار معطوف کرده است (IPCC, 2023; United Nations, 2015) .در این چارچوب، سرمایه‌گذاری سبز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحقق اقتصاد پایدار مطرح شده و نقش کلیدی در هدایت منابع مالی به سمت پروژه‌های سازگار با محیط زیست ایفا می‌کند (OECD, 2020; World Bank, 2022) .سرمایه‌گذاری‌های سبز شامل طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها نظیر انرژی‌های تجدیدپذیر، زیرساخت‌های کم‌کربن، حمل‌ونقل پاک، فناوری‌های کاهش آلایندگی و پروژه‌های مدیریت پایدار منابع طبیعی است که هدف اصلی آن‌ها کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی در کنار ایجاد ارزش اقتصادی بلندمدت است (UNEP, 2019).اما با وجود رشد قابل توجه بازارهای مالی سبز در سطح جهانی، ارزیابی اثربخشی و پایداری این سرمایه‌گذاری‌ها همچنان با چالش‌های جدی مواجه است (Flammer, 2021) .روش‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری عمدتاً مبتنی بر شاخص‌های مالی کلاسیک نظیر ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت سرمایه هستند که بیشتر بر سودآوری کوتاه‌مدت تمرکز دارند (Brealey, Myers & Allen, 2020) . این رویکردها معمولاً قادر به تحلیل هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پروژه‌ها نیستند و در نتیجه بخشی از ارزش واقعی سرمایه‌گذاری‌های سبز نادیده گرفته می‌شود (Hahn, 2013) .علاوه بر این، پیچیدگی تعاملات میان متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی موجب شده است که مدل‌های سنتی در تحلیل ریسک و پیش‌بینی عملکرد بلندمدت پروژه‌های سبز با محدودیت مواجه شوند (Eccles, Ioannou & Serafeim, 2014).

در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های داده‌محور و پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه هوش مصنوعی، فرصت‌های جدیدی برای تحول در نظام ارزیابی مالی ایجاد کرده است (Brynjolfsson & McAfee, 2017) .الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق قادرند حجم عظیمی از داده‌های مالی، زیست‌محیطی و رفتاری را تحلیل کرده و الگوهای پنهان میان متغیرها را شناسایی کنند (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016) .این قابلیت موجب شده است که استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت ریسک، تحلیل سرمایه‌گذاری و ارزیابی پایداری به یکی از مهم‌ترین روندهای نوین در صنعت مالی تبدیل شود (Bousdekis et al., 2020). به‌ویژه در حوزه سرمایه‌گذاری سبز، تحلیل هم‌زمان شاخص‌هایESG ، ریسک اقلیمی و بازده مالی نیازمند مدل‌هایی است که بتوانند وابستگی‌های پیچیده و غیرخطی میان داده‌ها را استخراج کنند (Friede, Busch & Bassen, 2015).

در ادبیات جدید مالی پایدار، شاخص‌های ESG شامل معیارهای زیست‌محیطی، اجتماعی و حاکمیتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی پایداری شرکت‌ها و پروژه‌ها مطرح شده‌اند (Sustainalytics, 2021) .سرمایه‌گذاران نهادی و صندوق‌های سرمایه‌گذاری بین‌المللی به‌طور فزاینده‌ای از این شاخص‌ها برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند .با این حال، یکی از مشکلات اساسی در ارزیابیESG ، ناهمگونی داده‌ها، پیچیدگی روابط میان شاخص‌ها و دشواری پیش‌بینی اثرات بلندمدت آن‌ها بر عملکرد مالی است (Eccles & Klimenko, 2019) .در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی می‌تواند موجب افزایش دقت تحلیل و کاهش عدم‌قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری شود.

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های مالی و پیش‌بینی ریسک عملکرد مطلوبی دارند (Feng et al., 2018) .مدل‌هایی مانندRandom Forest ، XGBoostو شبکه‌های عصبی عمیق توانسته‌اند در مسائل پیش‌بینی مالی، مدیریت پرتفوی و تحلیل ریسک، دقت بالاتری نسبت به روش‌های آماری سنتی ارائه دهند (Chen & Guestrin, 2016; Breiman, 2001) .با این حال، بخش قابل توجهی از مطالعات موجود بر بازارهای مالی کلاسیک متمرکز بوده و پژوهش‌های محدودی به توسعه چارچوب‌های هوشمند برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز پرداخته‌اند(Khan et al., 2021) .

در ایران نیز هم‌زمان با افزایش توجه به توسعه پایدار و اقتصاد سبز، ضرورت طراحی ابزارهای نوین ارزیابی سرمایه‌گذاری بیش از گذشته احساس می‌شود (Iran Ministry of Energy, 2022) .توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌های صنعتی نیازمند جذب سرمایه‌گذاری‌های گسترده است و این امر بدون وجود چارچوب‌های دقیق ارزیابی مالی امکان‌پذیر نخواهد بود . با این حال، در ادبیات داخلی هنوز استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز بسیار محدود است و بیشتر مطالعات بر رویکردهای سنتی مالی متمرکز بوده‌اند(Ahmadi & Karimi, 2020).

پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب مالی پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز انجام شده است. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب شاخص‌های مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی در قالب یک مدل هوشمند یادگیری ماشین است که قادر است ریسک، بازده و پایداری پروژه‌های سبز را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کند (Zhou et al., 2020). انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند علاوه بر توسعه ادبیات نظری مالی پایدار، کاربردهای مهمی برای سرمایه‌گذاران، بانک‌ها، صندوق‌های سرمایه‌گذاری و سیاست‌گذاران اقتصادی فراهم سازد .

۲-مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱مالی پایدار و سرمایه‌گذاری سبز

تحولات گسترده اقتصادی، صنعتی و فناورانه طی دهه‌های اخیر اگرچه موجب افزایش رشد اقتصادی جهانی شده‌اند، اما هم‌زمان پیامدهای گسترده‌ای برای محیط زیست و منابع طبیعی به همراه داشته‌اند. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تشدید تغییرات اقلیمی، آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش تنوع زیستی و تخریب منابع طبیعی موجب شده است که مفهوم توسعه پایدار به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های نظام اقتصادی و مالی جهان تبدیل شود. در این چارچوب، مالی پایدار به‌عنوان رویکردی نوین در نظام مالی شکل گرفته است که تلاش می‌کند میان اهداف اقتصادی، الزامات زیست‌محیطی و مسئولیت‌های اجتماعی تعادل ایجاد کند. برخلاف نظام مالی سنتی که تمرکز اصلی آن بر حداکثرسازی سود کوتاه‌مدت است، مالی پایدار بر خلق ارزش بلندمدت و کاهش ریسک‌های ناشی از ناپایداری‌های زیست‌محیطی و اجتماعی تأکید دارد (Schoenmaker & Schramade, 2019).در ادبیات اقتصادی، مالی پایدار بخشی از فرآیند گذار از اقتصاد مبتنی بر استخراج بی‌رویه منابع به اقتصاد کم‌کربن و سبز محسوب می‌شود. این مفهوم بیانگر آن است که تصمیمات مالی نباید صرفاً بر اساس معیارهای سودآوری کوتاه‌مدت اتخاذ شوند، بلکه آثار بلندمدت آن‌ها بر محیط زیست، جامعه و نسل‌های آینده نیز باید در نظر گرفته شود. از این منظر، سرمایه‌گذاری تنها زمانی پایدار تلقی می‌شود که علاوه بر بازده اقتصادی، به کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و ارتقای رفاه اجتماعی نیز کمک کند (UNEP, 2021) .این تحول مفهومی موجب شده است که معیارهای سنتی ارزیابی مالی به‌تدریج جای خود را به مدل‌های چندبعدی بدهند که در آن‌ها متغیرهای غیرمالی نیز در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ می‌شوند.سرمایه‌گذاری سبز یکی از مهم‌ترین اجزای مالی پایدار است که در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. سرمایه‌گذاری سبز به تخصیص منابع مالی به پروژه‌ها و فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که موجب بهبود عملکرد زیست‌محیطی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش بهره‌وری منابع می‌شوند. این نوع سرمایه‌گذاری طیف وسیعی از فعالیت‌ها از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک، مدیریت پسماند، ساختمان‌های هوشمند، فناوری‌های کاهش کربن و پروژه‌های حفاظت از منابع طبیعی را در بر می‌گیرد (OECD, 2020) .هدف اصلی سرمایه‌گذاری سبز آن است که رشد اقتصادی با حفاظت از محیط زیست و کاهش فشار بر منابع طبیعی همراه شود.گسترش سرمایه‌گذاری سبز تا حد زیادی تحت تأثیر توافق‌های بین‌المللی مرتبط با تغییرات اقلیمی بوده است. توافق پاریس در سال ۲۰۱۵ نقطه عطفی در توسعه نظام مالی سبز محسوب می‌شود، زیرا کشورها متعهد شدند برای محدودسازی افزایش دمای جهانی، منابع مالی گسترده‌ای به سمت پروژه‌های کم‌کربن هدایت کنند. در نتیجه، بانک‌ها، صندوق‌های سرمایه‌گذاری و نهادهای مالی بین‌المللی به‌تدریج معیارهای پایداری را وارد فرآیندهای تصمیم‌گیری خود کردند (Krueger et al., 2020) .این روند موجب رشد سریع بازار اوراق قرضه سبز، صندوق‌های سرمایه‌گذاری پایدار و ابزارهای تأمین مالی سبز در سطح جهانی شده است.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سرمایه‌گذاری سبز، ماهیت بلندمدت آن است. برخلاف بسیاری از سرمایه‌گذاری‌های سنتی که بر سودآوری سریع تمرکز دارند، پروژه‌های سبز معمولاً نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بالا و دوره بازگشت طولانی‌تر هستند. به همین دلیل، ارزیابی این پروژه‌ها صرفاً بر اساس شاخص‌های مالی کلاسیک نمی‌تواند تصویر دقیقی از ارزش واقعی آن‌ها ارائه دهد. برای مثال، یک پروژه انرژی تجدیدپذیر ممکن است در کوتاه‌مدت بازده مالی پایین‌تری نسبت به پروژه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی داشته باشد، اما در بلندمدت موجب کاهش ریسک‌های اقلیمی، کاهش هزینه‌های اجتماعی و افزایش پایداری اقتصادی شود(Friede et al., 2015) .همچنین مالی پایدار ریشه در نظریه ذی‌نفعان دارد. بر اساس این نظریه، شرکت‌ها و نهادهای اقتصادی تنها در برابر سهامداران مسئول نیستند، بلکه باید منافع تمامی ذی‌نفعان شامل کارکنان، جامعه، دولت و محیط زیست را نیز در نظر بگیرند (Freeman, 1984). این دیدگاه موجب شده است که مفهوم مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها به یکی از

عناصر کلیدی ارزیابی عملکرد اقتصادی تبدیل شود. در این چارچوب، سرمایه‌گذاری سبز نه‌تنها ابزاری برای کسب سود اقتصادی، بلکه سازوکاری برای تحقق مسئولیت اجتماعی و پایداری بلندمدت تلقی می‌شود.

از سوی دیگر، نظریه ریسک اقلیمی نیز نقش مهمی در توسعه مالی پایدار ایفا کرده است. این نظریه بیان می‌کند که تغییرات اقلیمی می‌تواند ریسک‌های مالی گسترده‌ای برای شرکت‌ها و نظام بانکی ایجاد کند. افزایش وقوع بلایای طبیعی، تغییر سیاست‌های زیست‌محیطی و تحولات فناوری‌های انرژی موجب شده است که بسیاری از دارایی‌های سنتی با خطر کاهش ارزش مواجه شوند. در نتیجه، سرمایه‌گذاران به‌تدریج به سمت پروژه‌هایی حرکت کرده‌اند که از پایداری بیشتری برخوردارند و در برابر شوک‌های اقلیمی آسیب‌پذیری کمتری دارند(Bolton et al., 2020) .در سال‌های اخیر، مفهوم ESG نیز به یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های پایدار تبدیل شده است. سرمایه‌گذاران نهادی، بانک‌ها و صندوق‌های سرمایه‌گذاری از شاخص‌های ESG برای سنجش پایداری شرکت‌ها استفاده می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که شرکت‌هایی با عملکرد ESG قوی‌تر معمولاً از ریسک کمتر، ثبات مالی بالاتر و عملکرد بلندمدت بهتری برخوردارند (Eccles et al., 2014) .این موضوع موجب شده است که سرمایه‌گذاری پایدار به‌تدریج از یک رویکرد اخلاقی به یک ضرورت اقتصادی و مدیریتی تبدیل شود.با وجود رشد سریع بازارهای مالی سبز، چالش‌های متعددی همچنان در مسیر توسعه آن‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، دشواری ارزیابی دقیق پایداری پروژه‌ها است. داده‌های زیست‌محیطی معمولاً ناهمگون، پیچیده و چندبعدی هستند و روابط میان متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی اغلب غیرخطی و پویا هستند. به همین دلیل، روش‌های سنتی تحلیل مالی در بسیاری از موارد قادر به مدل‌سازی دقیق این روابط نیستند (Bassen et al., 2019).این مسئله زمینه را برای استفاده از فناوری‌های پیشرفته داده‌محور و هوش مصنوعی فراهم کرده است.

در اقتصادهای در حال توسعه نیز مالی پایدار اهمیت فزاینده‌ای یافته است. کشورهایی مانند ایران که با چالش‌هایی نظیر آلودگی هوا، بحران آب و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی مواجه هستند، برای تحقق توسعه پایدار نیازمند جذب سرمایه‌گذاری در حوزه‌های سبز هستند. با این حال، محدودیت زیرساخت‌های مالی و نبود چارچوب‌های دقیق ارزیابی ریسک موجب شده است که توسعه سرمایه‌گذاری‌های سبز با سرعت مطلوبی پیش نرود. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های هوشمند ارزیابی سرمایه‌گذاری می‌تواند به افزایش شفافیت، کاهش عدم‌قطعیت و بهبود تصمیم‌گیری مالی کمک کند.

۲-۲هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری مالی

هوش مصنوعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تحول‌آفرین قرن بیست‌ویکم، نقش فزاینده‌ای در تغییر ساختار تصمیم‌گیری اقتصادی و مالی ایفا کرده است. پیشرفت‌های سریع در قدرت پردازش داده‌ها، توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین و افزایش حجم داده‌های دیجیتال موجب شده است که بسیاری از فعالیت‌های مالی سنتی به سمت سیستم‌های هوشمند و داده‌محور حرکت کنند. در این میان، صنعت مالی یکی از حوزه‌هایی است که بیشترین تأثیر را از توسعه هوش مصنوعی پذیرفته است. بانک‌ها، مؤسسات سرمایه‌گذاری، صندوق‌های مالی و شرکت‌های بیمه به‌طور گسترده از الگوریتم‌های هوشمند برای تحلیل داده‌ها، پیش‌بینی ریسک، مدیریت دارایی و بهینه‌سازی تصمیمات استفاده می‌کنند (Goodfellow et al., 2016). در ادبیات مالی، تصمیم‌گیری همواره با عدم‌قطعیت، پیچیدگی و ریسک همراه بوده است. بازارهای مالی تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر سیاست‌های اقتصادی، تحولات ژئوپلیتیکی، رفتار سرمایه‌گذاران و شوک‌های محیطی قرار دارند و همین مسئله موجب می‌شود که روابط میان متغیرهای مالی اغلب غیرخطی و پویا باشند. روش‌های سنتی تحلیل مالی عمدتاً مبتنی بر مدل‌های آماری کلاسیک هستند که در بسیاری از موارد فرض می‌کنند داده‌ها دارای توزیع نرمال و روابط خطی هستند. این فرض‌ها در محیط‌های پیچیده مالی همواره برقرار نیست و در نتیجه، مدل‌های سنتی در پیش‌بینی رفتار بازار و مدیریت ریسک با محدودیت مواجه می‌شوند(Fama, 1970). هوش مصنوعی با ارائه رویکردهای یادگیری داده‌محور، امکان تحلیل الگوهای پیچیده و استخراج روابط پنهان میان متغیرها را فراهم کرده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند بدون نیاز به تعریف صریح قواعد، از داده‌های گذشته الگو یاد بگیرند و بر اساس آن‌ها پیش‌بینی انجام دهند. این ویژگی موجب شده است که مدل‌های هوش مصنوعی در بسیاری از مسائل مالی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهند. برای مثال، در حوزه مدیریت ریسک، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند رفتارهای غیرعادی و الگوهای پرریسک را شناسایی کنند و احتمال وقوع بحران‌های مالی را پیش‌بینی نمایند(Bishop, 2006) .

یکی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه سرمایه‌گذاری است. سرمایه‌گذاری مالی همواره مستلزم تحلیل حجم عظیمی از اطلاعات و پیش‌بینی روندهای آینده است. سرمایه‌گذاران باید بتوانند میان فرصت‌های سودآور و پروژه‌های پرریسک تمایز قائل شوند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین با تحلیل داده‌های تاریخی، متغیرهای اقتصادی و رفتار بازار، قادرند الگوهایی را استخراج کنند که برای تحلیلگران انسانی قابل مشاهده نیستند. به همین دلیل، بسیاری از صندوق‌های سرمایه‌گذاری و شرکت‌های مدیریت دارایی از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای مدیریت پرتفوی و بهینه‌سازی تصمیمات استفاده می‌کنند(Heaton et al., 2017) .در سال‌های اخیر، استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق در تحلیل مالی رشد قابل توجهی داشته است. شبکه‌های عصبی عمیق به دلیل توانایی در استخراج روابط غیرخطی و پیچیده، در پیش‌بینی بازارهای مالی، تحلیل رفتار سرمایه‌گذاران و ارزیابی ریسک عملکرد بسیار مطلوبی نشان داده‌اند. برخلاف مدل‌های سنتی که نیازمند استخراج دستی ویژگی‌ها هستند، شبکه‌های عصبی قادرند به‌صورت خودکار نمایش‌های پیچیده‌ای از داده‌ها ایجاد کنند و الگوهای پنهان را شناسایی نمایند (LeCun et al., . (2015یکی دیگر از ویژگی‌های مهم هوش مصنوعی، توانایی تحلیل داده‌های چندمنبعی است. در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های پایدار، داده‌ها صرفاً محدود به اطلاعات مالی نیستند، بلکه متغیرهای زیست‌محیطی، اجتماعی و حاکمیتی نیز باید مورد تحلیل قرار گیرند. این داده‌ها معمولاً ساختارهای متفاوتی دارند و تحلیل هم‌زمان آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند داده‌های ناهمگون را ترکیب کرده و روابط میان آن‌ها را مدل‌سازی کنند. این قابلیت به‌ویژه در تحلیل شاخص‌های ESG اهمیت زیادی دارد.

با وجود مزایای متعدد، استفاده از هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری مالی با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، مسئله شفافیت و قابلیت تفسیر مدل‌ها است. بسیاری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق به‌عنوان «جعبه سیاه» شناخته می‌شوند، زیرا مشخص نیست چگونه به نتایج نهایی می‌رسند. این موضوع در حوزه مالی که تصمیمات باید از منظر نظارتی و حقوقی قابل توضیح باشند، اهمیت ویژه‌ای دارد(Rudin, 2019) . به همین دلیل، در سال‌های اخیر توجه زیادی به توسعه مدل‌های Explainable AI معطوف شده است.چالش دیگر، کیفیت و سوگیری داده‌ها است. مدل‌های هوش مصنوعی به‌شدت وابسته به داده‌های آموزشی هستند و اگر داده‌ها دارای سوگیری یا خطا باشند، نتایج مدل نیز دچار انحراف خواهد شد. در حوزه سرمایه‌گذاری سبز، این مسئله اهمیت بیشتری دارد زیرا داده‌های ESG در بسیاری از موارد استاندارد و یکپارچه نیستند و تفاوت‌های قابل توجهی میان پایگاه‌های اطلاعاتی وجود دارد(Berg et al., 2022) .

با وجود این محدودیت‌ها، روندهای جهانی نشان می‌دهد که نقش هوش مصنوعی در نظام مالی به‌طور مداوم در حال افزایش است. توسعه کلان‌داده‌ها، اینترنت اشیا، پردازش ابری و فناوری‌های مالی نوین موجب شده است که مدل‌های هوشمند به بخش جدایی‌ناپذیر فرآیندهای مالی تبدیل شوند. در این میان، استفاده از هوش مصنوعی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز می‌تواند به بهبود شفافیت، کاهش ریسک و افزایش کارایی تخصیص منابع کمک کند.

۲-۳ شاخص‌های ESG

شاخص‌های ESG یکی از مهم‌ترین چارچوب‌های ارزیابی پایداری در نظام مالی مدرن محسوب می‌شوند که طی دو دهه اخیر نقش فزاینده‌ای در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران و نهادهای مالی یافته‌اند ESG .مخفف سه بعد اصلی محیط زیست ، مسئولیت اجتماعی و حاکمیت شرکتی است و هدف آن ارزیابی عملکرد شرکت‌ها و پروژه‌ها فراتر از معیارهای صرفاً مالی است. در رویکرد سنتی، ارزیابی عملکرد اقتصادی عمدتاً بر شاخص‌هایی مانند سودآوری، بازده سرمایه و ارزش بازار متمرکز بود، اما در چارچوب ESG تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی نیز به‌عنوان بخشی از ارزش واقعی سازمان در نظر گرفته می‌شوند(Eccles et al., 2014) .بعد محیط زیستی ESG بر نحوه تعامل شرکت‌ها با محیط زیست تمرکز دارد و شامل شاخص‌هایی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی، مدیریت منابع طبیعی، بازیافت پسماند و میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. افزایش نگرانی‌های جهانی درباره تغییرات اقلیمی موجب شده است که عملکرد زیست‌محیطی شرکت‌ها به یکی از عوامل کلیدی ارزیابی ریسک سرمایه‌گذاری تبدیل شود. شرکت‌هایی که وابستگی بالایی به سوخت‌های فسیلی دارند یا آلایندگی زیادی ایجاد می‌کنند، در معرض ریسک‌های نظارتی و اقتصادی بیشتری قرار دارند(Bolton et al., 2020) .بعد اجتماعی ESG بر روابط شرکت با کارکنان، مشتریان و جامعه تمرکز دارد. این بخش شامل متغیرهایی مانند حقوق کارکنان، تنوع نیروی انسانی، ایمنی محیط کار، مسئولیت اجتماعی و رضایت مشتریان است. مطالعات نشان داده‌اند که شرکت‌هایی با عملکرد اجتماعی بهتر معمولاً از ثبات سازمانی و اعتبار بالاتری برخوردارند و در بلندمدت عملکرد مالی مطلوب‌تری دارند(Friede et al., 2015). بعد حاکمیت شرکتی نیز به ساختار مدیریتی، شفافیت، کنترل داخلی و کیفیت تصمیم‌گیری

سازمان مربوط می‌شود. وجود ساختارهای حاکمیتی قوی می‌تواند احتمال فساد، سوءمدیریت و رفتارهای پرریسک را کاهش دهد. سرمایه‌گذاران نهادی معمولاً شرکت‌هایی را ترجیح می‌دهند که از شفافیت اطلاعاتی و ساختارهای مدیریتی پایدار برخوردار باشند.

در سال‌های اخیر، شاخص‌های ESG به یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های پایدار تبدیل شده‌اند و بسیاری از صندوق‌های سرمایه‌گذاری جهانی از آن‌ها در انتخاب پروژه‌ها استفاده می‌کنند. با این حال، ارزیابی ESG همچنان با چالش‌هایی مانند ناهمگونی داده‌ها، نبود استانداردهای یکپارچه و دشواری تحلیل روابط پیچیده میان متغیرها مواجه است. این مسئله موجب شده است که استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های ESG اهمیت فزاینده‌ای پیدا کند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد، زیرا هدف اصلی آن ارائه یک چارچوب عملی و هوشمند برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز در بستر مالی پایدار است. از منظر روش، پژوهش دارای رویکرد کمی، تحلیلی و داده‌محور بوده و مبتنی بر استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است. منطق اصلی پژوهش بر این فرض استوار است که رفتار مالی پروژه‌های سبز و میزان پایداری آن‌ها را نمی‌توان صرفاً با شاخص‌های سنتی مالی تحلیل کرد، بلکه لازم است متغیرهای زیست‌محیطی، ریسک‌های اقلیمی، شاخص‌های ESG و الگوهای غیرخطی میان متغیرها نیز به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. در همین راستا، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با ترکیب روش‌های تحلیلی هوش مصنوعی و داده‌های مالی-زیست‌محیطی، مدلی جامع برای تحلیل کارایی و پایداری سرمایه‌گذاری‌های سبز ارائه دهد.

چارچوب نظری روش‌شناسی پژوهش مبتنی بر تلفیق نظریه مالی پایدار، نظریه مدیریت ریسک و رویکردهای نوین اقتصاد داده‌محور است. در مدل‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری، تمرکز اصلی بر شاخص‌هایی نظیر نرخ بازده، جریان نقدی و ریسک مالی قرار داشت، اما در سال‌های اخیر مشخص شده است که این شاخص‌ها به‌تنهایی قادر به تبیین پایداری بلندمدت پروژه‌ها نیستند. بحران‌های زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی، مقررات سخت‌گیرانه کربنی و افزایش حساسیت سرمایه‌گذاران نسبت به مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها موجب شده است که ارزیابی پروژه‌ها نیازمند چارچوبی چندبعدی باشد. بنابراین، پژوهش حاضر از منظر مفهومی در امتداد تحول پارادایم مالی کلاسیک به سمت مالی پایدار قرار می‌گیرد؛ پارادایمی که در آن سودآوری اقتصادی در کنار پایداری محیط زیست و مسئولیت اجتماعی معنا پیدا می‌کند(Friede et al., 2015).

داده‌های پژوهش شامل اطلاعات ۱۲۵۰ پروژه سرمایه‌گذاری سبز طی دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ است که از پایگاه‌های معتبر بین‌المللی شامل Bloomberg ESG، Refinitiv Eikon , World Bank Dataگردآوری شده‌اند. پروژه‌های مورد بررسی شامل سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک، زیرساخت‌های سبز، مدیریت منابع آب، ساختمان‌های کم‌مصرف و فناوری‌های کاهش انتشار کربن هستند. انتخاب این بازه زمانی به دلیل رشد سریع بازارهای سرمایه‌گذاری پایدار پس از توافق‌نامه پاریس و افزایش توجه جهانی به تأمین مالی سبز صورت گرفته است. داده‌های جمع‌آوری‌شده شامل متغیرهای مالی، زیست‌محیطی و حاکمیتی بوده و ساختار آن‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان تحلیل روابط پویا و پیچیده میان شاخص‌های مختلف فراهم شود.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های روش‌شناختی در این پژوهش، ماهیت چندبعدی و ناهمگن داده‌ها بود. داده‌های ESG معمولاً از منابع مختلف گردآوری می‌شوند و دارای مقیاس‌ها و استانداردهای متفاوتی هستند. علاوه بر این، بسیاری از شاخص‌های زیست‌محیطی ماهیت غیرخطی و پویا دارند و رفتار آن‌ها در طول زمان تغییر می‌کند. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های آماری کلاسیک نمی‌توانست پیچیدگی روابط میان متغیرها را به‌طور کامل توضیح دهد. در نتیجه، پژوهش حاضر از رویکرد ترکیبی مبتنی بر XGBoost و شبکه عصبی عمیق استفاده کرده است تا هم روابط ساختاری و هم وابستگی‌های غیرخطی میان متغیرها تحلیل شود.از منظر آماری، پژوهش حاضر از نوع مطالعات پانلی و مبتنی بر داده‌های طولی محسوب می‌شود، زیرا پروژه‌های مورد بررسی در بازه زمانی چندساله تحلیل شده‌اند. این ویژگی امکان بررسی تغییرات زمانی در شاخص‌های ESGو رفتار مالی پروژه‌ها را فراهم می‌کند. علاوه بر این، استفاده از داده‌های چندمنبعی موجب افزایش اعتبار بیرونی پژوهش شده است. برای کاهش خطاهای احتمالی ناشی از تفاوت استانداردهای گزارش‌دهی، داده‌ها پیش از ورود به مدل یکپارچه‌سازی و نرمال‌سازی شدند.در این پژوهش، فرآیند تحلیل داده‌ها در چند مرحله اصلی انجام شد. در مرحله نخست، داده‌های خام از پایگاه‌های اطلاعاتی استخراج و یکپارچه شدند. در مرحله دوم، عملیات پیش‌پردازش شامل حذف داده‌های ناقص، تعدیل داده‌های پرت و اصلاح عدم توازن داده‌ها صورت گرفت. در مرحله سوم،

ویژگی‌های کلیدی استخراج و وارد مدل‌های یادگیری ماشین شدند. در نهایت، عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های استاندارد ارزیابی شاملAccuracy ، Precision، Recall، F1-Scoreو ROC-AUC مورد سنجش قرار گرفت.از منظر طراحی تجربی، پژوهش حاضر مبتنی بر یادگیری نظارت‌شده است؛ به این معنا که مدل با استفاده از داده‌های دارای برچسب آموزش داده شد تا بتواند پروژه‌های دارای پایداری مالی بالا را از پروژه‌های پرریسک تفکیک کند. در این چارچوب، متغیر وابسته پژوهش «سطح موفقیت سرمایه‌گذاری سبز» تعریف شد که بر اساس ترکیبی از بازده مالی، ثبات عملکرد و رتبه پایداری پروژه‌ها اندازه‌گیری گردید. متغیرهای مستقل نیز شامل شاخص‌های مالی و ESG بودند که در ادامه تشریح می‌شوند.از نظر زیرساخت محاسباتی، آموزش مدل‌ها با استفاده از محیط پایتون و کتابخانه‌هایTensorFlow ، Scikit-learnو XGBoostانجام شد. برای افزایش سرعت پردازش و جلوگیری از محدودیت‌های محاسباتی، از پردازش موازی مبتنی بر GPU استفاده گردید. همچنین به‌منظور افزایش قابلیت تعمیم مدل، فرآیند اعتبارسنجی متقاطع پنج‌مرحله‌ای ۵ مورد استفاده قرار گرفت تا عملکرد مدل در داده‌های مختلف ارزیابی شود.

یکی دیگر از ابعاد مهم روش‌شناسی پژوهش، توجه به مسئله تفسیرپذیری مدل‌های هوش مصنوعی است. یکی از انتقادهای اصلی به مدل‌های یادگیری عمیق، ماهیت جعبه‌سیاه آن‌هاست که می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری مالی را با چالش مواجه کند. برای رفع این مسئله، در پژوهش حاضر از روش SHAP Values جهت تحلیل اهمیت متغیرها استفاده شد تا مشخص شود کدام شاخص‌ها بیشترین تأثیر را بر ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز دارند. این موضوع علاوه بر افزایش شفافیت مدل، امکان تحلیل اقتصادی نتایج را نیز فراهم می‌کند.به‌طور کلی، روش‌شناسی پژوهش حاضر مبتنی بر ترکیب رویکردهای اقتصاد مالی، تحلیل داده و هوش مصنوعی است و تلاش می‌کند با عبور از محدودیت‌های مدل‌های سنتی، چارچوبی جامع و هوشمند برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز ارائه دهد. انتظار می‌رود این چارچوب بتواند علاوه بر توسعه ادبیات مالی پایدار، کاربردهای عملی مهمی برای بانک‌ها، صندوق‌های سرمایه‌گذاری، نهادهای نظارتی و سیاست‌گذاران اقتصادی فراهم سازد.

۳-۱متغیرهای پژوهش

در پژوهش حاضر، انتخاب متغیرها بر مبنای ادبیات نظری مالی پایدار، مدل‌های ارزیابی ریسک سرمایه‌گذاری و مطالعات مرتبط با شاخص‌های ESGانجام شده است. هدف اصلی از انتخاب این متغیرها، طراحی چارچوبی جامع برای تحلیل هم‌زمان ابعاد مالی، زیست‌محیطی و ریسک‌های ساختاری پروژه‌های سبز بوده است. برخلاف مدل‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری که عمدتاً بر متغیرهای مالی تمرکز دارند، در این پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از متغیرهای چندبعدی، تصویر دقیق‌تری از پایداری و کارایی پروژه‌ها ارائه شود. انتخاب این متغیرها مبتنی بر این فرض است که موفقیت سرمایه‌گذاری سبز نه‌تنها تابع بازده مالی، بلکه وابسته به عملکرد محیط زیستی، کیفیت حاکمیت شرکتی و میزان تاب‌آوری پروژه در برابر ریسک‌های اقلیمی است.یکی از مهم‌ترین متغیرهای پژوهش، بازده سرمایه‌گذاری است که به‌عنوان شاخص اصلی عملکرد مالی پروژه‌ها در نظر گرفته شده است. این متغیر بیانگر میزان سودآوری پروژه‌های سبز در طول دوره سرمایه‌گذاری است و نقش کلیدی در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران دارد. در ادبیات مالی کلاسیک، بازده مهم‌ترین معیار ارزیابی پروژه‌ها محسوب می‌شود، اما در چارچوب مالی پایدار، بازده صرفاً یکی از ابعاد ارزیابی است و باید در کنار پایداری محیط زیستی تحلیل شود (Markowitz, 1952) .در این پژوهش، بازده سرمایه‌گذاری به‌صورت نرخ بازده سالانه تعدیل‌شده بر اساس ریسک محاسبه شده است تا امکان مقایسه پروژه‌ها فراهم شود.

متغیر دوم، شدت انتشار کربن است که یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد زیست‌محیطی پروژه‌ها محسوب می‌شود. این متغیر نشان‌دهنده میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به ازای واحد فعالیت اقتصادی است و نقش مهمی در سنجش میزان سازگاری پروژه با اهداف توسعه پایدار دارد. در سال‌های اخیر، مقررات جهانی مرتبط با کاهش انتشار کربن موجب شده است که این شاخص به یکی از معیارهای کلیدی ارزیابی سرمایه‌گذاری تبدیل شود. پروژه‌هایی که شدت انتشار کربن پایین‌تری دارند، معمولاً از منظر ریسک‌های مقرراتی و هزینه‌های زیست‌محیطی در وضعیت مطلوب‌تری قرار می‌گیرند(Stern, 2007) .

شاخص مصرف انرژی نیز به‌عنوان یکی دیگر از متغیرهای کلیدی وارد مدل شده است. این متغیر نشان می‌دهد که پروژه تا چه میزان از منابع انرژی به‌صورت کارآمد استفاده می‌کند. بهره‌وری انرژی یکی از مهم‌ترین ابعاد پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی محسوب می‌شود، زیرا کاهش مصرف انرژی علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، موجب کاهش فشار بر منابع طبیعی و کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. در این پژوهش، شاخص مصرف انرژی بر اساس نسبت انرژی مصرفی به خروجی اقتصادی پروژه اندازه‌گیری شده است.

رتبه ESG یکی دیگر از متغیرهای اصلی پژوهش است که بیانگر عملکرد کلی پروژه در سه بعد محیط زیست، مسئولیت اجتماعی و حاکمیت شرکتی است. این شاخص در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین معیارهای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران نهادی تبدیل شده است. مطالعات نشان داده‌اند که شرکت‌ها و پروژه‌هایی که رتبه ESG بالاتری دارند، معمولاً از ثبات مالی بیشتر، ریسک کمتر و عملکرد بلندمدت مطلوب‌تری برخوردارند (Eccles et al., 2014) در این پژوهش، رتبه ESG به‌عنوان متغیری ترکیبی وارد مدل شده تا اثر هم‌زمان ابعاد مختلف پایداری بر موفقیت سرمایه‌گذاری تحلیل شود.

متغیر نوسانات مالی نیز برای سنجش میزان بی‌ثباتی عملکرد اقتصادی پروژه‌ها در نظر گرفته شده است. این متغیر نشان‌دهنده میزان تغییرپذیری بازده پروژه در طول زمان است و یکی از شاخص‌های اصلی ریسک مالی محسوب می‌شود. در چارچوب نظریه مدرن پرتفوی، نوسان بازده به‌عنوان نماینده ریسک سرمایه‌گذاری شناخته می‌شود و سرمایه‌گذاران معمولاً تمایل دارند پروژه‌هایی با نوسان کمتر و ثبات بیشتر انتخاب کنند (Sharpe, 1964).در پژوهش حاضر، انحراف معیار بازده به‌عنوان شاخص نوسانات مالی مورد استفاده قرار گرفته است.ریسک اقلیمی یکی دیگر از متغیرهای کلیدی پژوهش است که اهمیت آن در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این متغیر بیانگر میزان آسیب‌پذیری پروژه در برابر تغییرات اقلیمی، بلایای طبیعی و سیاست‌های زیست‌محیطی است. افزایش دمای جهانی، تغییر الگوهای آب‌وهوایی و سیاست‌های کاهش انتشار کربن موجب شده‌اند که ریسک اقلیمی به یکی از عوامل تعیین‌کننده در ارزش‌گذاری پروژه‌ها تبدیل شود (TCFD, 2021) در این پژوهش، ریسک اقلیمی بر اساس شاخص‌های ترکیبی مرتبط با آسیب‌پذیری زیست‌محیطی اندازه‌گیری شده است.نسبت بدهی نیز به‌عنوان شاخصی از ساختار مالی پروژه‌ها در مدل وارد شده است. این متغیر نشان‌دهنده میزان وابستگی پروژه به منابع مالی بدهی‌محور است و نقش مهمی در ارزیابی ریسک مالی دارد. پروژه‌هایی که نسبت بدهی بالاتری دارند، معمولاً در برابر شوک‌های اقتصادی و افزایش نرخ بهره آسیب‌پذیرتر هستند. از سوی دیگر، در پروژه‌های سبز، ساختار تأمین مالی می‌تواند بر میزان پایداری بلندمدت پروژه اثرگذار باشد.

در نهایت، شاخص پایداری مالی به‌عنوان متغیر ترکیبی نهایی در نظر گرفته شده است. این شاخص با ترکیب ابعاد مالی، زیست‌محیطی و ریسک‌های ساختاری طراحی شده و هدف آن ارائه تصویری جامع از میزان تاب‌آوری و پایداری پروژه‌ها است. این متغیر نقش محوری در مدل پیشنهادی دارد و مبنای اصلی طبقه‌بندی پروژه‌ها به پروژه‌های پایدار و پرریسک محسوب می‌شود.در مجموع، ساختار متغیرهای پژوهش به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتواند پیچیدگی سرمایه‌گذاری‌های سبز را در چارچوب مالی پایدار بازنمایی کند. این متغیرها علاوه بر پوشش ابعاد اقتصادی، به ریسک‌های اقلیمی، مسئولیت اجتماعی و پایداری محیط زیستی نیز توجه دارند و از این منظر، چارچوب پژوهش حاضر نسبت به مدل‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری جامع‌تر و واقع‌گرایانه‌تر محسوب می‌شود.

۳-۲پیش‌پردازش داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل در پژوهش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین محسوب می‌شود، زیرا کیفیت داده‌های ورودی تأثیر مستقیمی بر دقت، پایداری و قابلیت تعمیم مدل دارد. در حوزه مالی پایدار و ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز، این اهمیت دوچندان می‌شود، زیرا داده‌ها معمولاً از منابع متنوعی گردآوری می‌شوند و دارای ساختارهای ناهمگون، مقیاس‌های متفاوت و سطحی از نویز و عدم قطعیت هستند. در پژوهش حاضر، داده‌های مورد استفاده از پایگاه‌هایBloomberg ESG ، Refinitivو World Bank استخراج شدند که هر یک دارای استانداردهای متفاوتی در گزارش‌دهی شاخص‌های مالی و زیست‌محیطی هستند. بنابراین، پیش از ورود داده‌ها به مدل‌های یادگیری ماشین، لازم بود مجموعه‌ای از عملیات پیش‌پردازش جهت پاک‌سازی، استانداردسازی و آماده‌سازی داده‌ها انجام شود تا کیفیت نهایی داده‌ها برای آموزش مدل به سطح مطلوب برسد.

در نخستین مرحله، داده‌های ناقص و دارای مقادیر گمشده مورد بررسی قرار گرفتند. وجود داده‌های ناقص یکی از رایج‌ترین مشکلات در داده‌های مالی و ESG است، زیرا بسیاری از شرکت‌ها یا پروژه‌ها تمامی شاخص‌های پایداری خود را به‌صورت کامل افشا نمی‌کنند. این مسئله می‌تواند منجر به ایجاد سوگیری در فرآیند یادگیری مدل شود و اعتبار نتایج را کاهش دهد. در پژوهش حاضر، ابتدا میزان داده‌های گمشده برای هر متغیر محاسبه شد. متغیرهایی که بیش از ۳۰ درصد داده‌های آن‌ها ناقص بود از مجموعه داده حذف شدند، زیرا حفظ چنین متغیرهایی می‌توانست موجب کاهش پایداری مدل شود. در ادامه، رکوردهایی که دارای مقادیر ناقص در متغیرهای کلیدی بودند نیز حذف شدند تا انسجام ساختار داده‌ها حفظ گردد. انتخاب روش حذف داده‌های ناقص به این دلیل انجام شد که در داده‌هایESG ، جایگزینی مصنوعی مقادیر گمشده ممکن است

موجب تحریف روابط واقعی میان متغیرها شود. علاوه بر این، حجم بالای داده‌ها باعث شد که حذف بخشی از رکوردها تأثیر منفی معناداری بر توان یادگیری مدل نداشته باشد.

پس از حذف داده‌های ناقص، مرحله نرمال‌سازی ویژگی‌ها انجام شد. داده‌های پژوهش شامل متغیرهایی با مقیاس‌های بسیار متفاوت بودند؛ برای مثال، شدت انتشار کربن در مقیاس‌های چند هزار واحدی اندازه‌گیری می‌شد، در حالی که شاخصESG در بازه صفر تا صد قرار داشت. اگر داده‌ها بدون نرمال‌سازی وارد مدل می‌شدند، متغیرهایی با دامنه بزرگ‌تر می‌توانستند وزن بیشتری در فرآیند یادگیری پیدا کنند و موجب سوگیری مدل شوند. برای رفع این مشکل، از روش Min-Max Normalization استفاده شد تا تمامی ویژگی‌ها در بازه صفر تا یک مقیاس‌بندی شوند. فرآیند نرمال‌سازی باعث شد که مدل بتواند تمامی متغیرها را با اهمیت نسبی متعادل تحلیل کند و فرآیند همگرایی شبکه عصبی نیز سریع‌تر و پایدارتر انجام شود. علاوه بر این، نرمال‌سازی موجب کاهش حساسیت مدل نسبت به تغییرات شدید در دامنه داده‌ها گردید که این موضوع در تحلیل داده‌های مالی اهمیت زیادی دارد.در مرحله بعد، داده‌های پرت شناسایی و تعدیل شدند. وجود داده‌های پرت در تحلیل‌های مالی امری رایج است، زیرا برخی پروژه‌ها ممکن است دارای بازده یا شدت انتشار کربن بسیار متفاوتی نسبت به سایر نمونه‌ها باشند. با این حال، اگر این داده‌ها بدون کنترل وارد مدل شوند، می‌توانند موجب انحراف فرآیند یادگیری و کاهش دقت پیش‌بینی شوند. در پژوهش حاضر، برای شناسایی داده‌های پرت از روش فاصله بین چارکی یا IQR استفاده شد. در این روش، ابتدا چارک اول و سوم هر متغیر محاسبه شد و سپس فاصله بین چارکی به‌دست آمد. داده‌هایی که خارج از بازه استاندارد قرار داشتند به‌عنوان داده پرت شناسایی شدند. با این حال، به‌جای حذف کامل این داده‌ها، از روش Winsorization برای تعدیل آن‌ها استفاده شد تا ساختار کلی توزیع داده‌ها حفظ شود. این رویکرد موجب شد که اطلاعات ارزشمند موجود در داده‌های افراطی از بین نرود و در عین حال، اثر مخرب آن‌ها بر عملکرد مدل کاهش یابد.یکی دیگر از چالش‌های اساسی در پژوهش حاضر، مسئله عدم توازن داده‌ها بود. در مجموعه داده‌های مالی پایدار، تعداد پروژه‌های موفق و پایدار معمولاً بسیار بیشتر از پروژه‌های ناموفق یا پرریسک است. این عدم توازن می‌تواند موجب شود که مدل در فرآیند یادگیری به سمت کلاس اکثریت متمایل شود و توانایی کافی در شناسایی نمونه‌های اقلیت نداشته باشد. در چنین شرایطی، معیار دقت به‌تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد مدل باشد، زیرا ممکن است مدل با پیش‌بینی همیشگی کلاس اکثریت، دقت ظاهری بالایی کسب کند اما در شناسایی پروژه‌های پرریسک ناکارآمد باشد.برای رفع این مشکل، در پژوهش حاضر از تکنیک Technique استفاده شد. این روش یکی از پرکاربردترین تکنیک‌ها برای اصلاح عدم توازن داده‌ها در مسائل طبقه‌بندی محسوب می‌شود. این فرآیند موجب می‌شود که مدل بتواند الگوهای مربوط به کلاس اقلیت را بهتر یاد بگیرد و دچار بیش‌برازش نسبت به داده‌های تکراری نشود. استفاده از SMOTE در پژوهش حاضر باعث شد که توزیع داده‌ها متعادل‌تر شود و عملکرد مدل در شناسایی پروژه‌های دارای ریسک پایداری بهبود یابد.پس از انجام مراحل پاک‌سازی و متعادل‌سازی داده‌ها، فرآیند استخراج ویژگی نیز انجام شد. در این مرحله، برخی ویژگی‌های ترکیبی جدید بر اساس متغیرهای خام ایجاد شدند تا قدرت تحلیلی مدل افزایش یابد. برای مثال، شاخص ترکیبی پایداری مالی از ترکیب متغیرهای بازده، شدت انتشار کربن و رتبه ESG استخراج شد. همچنین شاخص ریسک اقلیمی تعدیل‌شده نیز بر اساس ترکیب نوسانات مالی و شدت آسیب‌پذیری زیست‌محیطی محاسبه گردید. هدف از این مرحله، افزایش توان مدل در شناسایی روابط پیچیده و پنهان میان متغیرها بود.در پایان مرحله پیش‌پردازش، داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای آزمون در نظر گرفته شد. علاوه بر این، برای افزایش قابلیت تعمیم مدل، فرآیند اعتبارسنجی متقاطع پنج‌مرحله‌ای نیز اجرا شد تا عملکرد مدل در نمونه‌های مختلف داده ارزیابی شود. این رویکرد موجب شد که نتایج پژوهش از پایداری آماری بیشتری برخوردار باشند و احتمال بیش‌برازش مدل کاهش یابد.به‌طور کلی، مرحله پیش‌پردازش داده‌ها در پژوهش حاضر نه‌تنها یک مرحله فنی، بلکه بخشی اساسی از فرآیند طراحی مدل محسوب می‌شود. کیفیت بالای داده‌های ورودی موجب شد که مدل پیشنهادی بتواند روابط پیچیده میان شاخص‌های مالی و زیست‌محیطی را با دقت بیشتری یاد بگیرد و عملکرد پایدارتری در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز ارائه دهد. این موضوع نشان می‌دهد که در پژوهش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، موفقیت مدل‌ها تا حد زیادی وابسته به کیفیت و ساختار داده‌های پیش‌پردازش‌شده است.

۳-۳طراحی مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی پژوهش حاضر با هدف طراحی یک چارچوب هوشمند برای ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز و تحلیل پایداری مالی پروژه‌ها توسعه یافته است. این چارچوب بر پایه ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق طراحی شده و تلاش می‌کند مزایای هر دو رویکرد را در

قالب یک ساختار ترکیبی به کار گیرد. انتخاب رویکرد ترکیبی به این دلیل انجام شد که داده‌های مالی پایدار دارای ماهیتی پیچیده، غیرخطی و چندبعدی هستند و استفاده از یک مدل منفرد نمی‌تواند تمامی ابعاد رفتاری این داده‌ها را به‌صورت کامل تحلیل کند. در این پژوهش، چارچوب پیشنهادی شامل دو بخش اصلی است: مدل XGBoost برای تحلیل ویژگی‌های ساختاری و شبکه عصبی عمیق برای تحلیل روابط غیرخطی میان شاخص‌های ESG و بازده مالی.در پژوهش حاضر، مدل XGBoost وظیفه تحلیل ویژگی‌های ساختاری پروژه‌ها را بر عهده داشت. متغیرهایی مانند نسبت بدهی، شدت انتشار کربن، شاخص مصرف انرژی و رتبه ESG وارد این بخش از مدل شدند تا الگوهای اولیه پایداری مالی استخراج شود. بخش دوم چارچوب پیشنهادی، شبکه عصبی عمیق بود که برای تحلیل روابط پیچیده و غیرخطی میان شاخص‌های ESG و بازده مالی طراحی شد. دلیل استفاده از شبکه عصبی عمیق آن است که بسیاری از روابط موجود در داده‌های مالی پایدار دارای ساختاری غیرخطی و پویا هستند و مدل‌های سنتی توانایی کافی برای استخراج این الگوها را ندارند. شبکه‌های عصبی عمیق به دلیل ساختار چندلایه خود قادرند نمایش‌های پیچیده‌ای از داده‌ها ایجاد کنند و وابستگی‌های پنهان میان متغیرها را شناسایی نمایند(Goodfellow et al., 2016) .معماری شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش شامل چهار لایه مخفی بود. انتخاب تعداد لایه‌ها بر اساس آزمون‌های تجربی و تحلیل عملکرد مدل انجام شد. افزایش تعداد لایه‌ها موجب افزایش توان مدل در استخراج ویژگی‌های پیچیده می‌شود، اما در عین حال خطر بیش‌برازش را نیز افزایش می‌دهد. در پژوهش حاضر، چهار لایه مخفی به‌عنوان ساختاری متعادل انتخاب شد تا هم قدرت یادگیری مدل حفظ شود و هم پایداری عملکرد آن تضمین گردد.برای تمامی لایه‌های مخفی از تابع فعال‌سازی واحد یکسو شده خطی استفاده شد. این تابع یکی از پرکاربردترین توابع فعال‌سازی در یادگیری عمیق است و به دلیل سادگی محاسباتی و توانایی جلوگیری از مشکل ناپدید شدن گرادیان، عملکرد بسیار مناسبی در شبکه‌های عمیق دارد. استفاده از تابع فعال‌سازی واحد یکسو شده خطی موجب شد که فرآیند یادگیری مدل سریع‌تر انجام شود و شبکه بتواند الگوهای غیرخطی را با دقت بیشتری استخراج کند.

به‌منظور جلوگیری از بیش‌برازش مدل، از تکنیک Dropout با نرخ ۰,۳ استفاده شد. در این روش، بخشی از نورون‌ها در هر مرحله آموزش به‌صورت تصادفی غیرفعال می‌شوند تا مدل بیش از حد به داده‌های آموزشی وابسته نشود. این تکنیک باعث افزایش قابلیت تعمیم مدل و بهبود عملکرد آن در داده‌های آزمون شد.نرخ یادگیری مدل برابر با ۰,۰۰۱ تنظیم شد که بر اساس تحلیل تجربی، مناسب‌ترین مقدار برای جلوگیری از نوسانات شدید در فرآیند آموزش بود.فرآیند آموزش مدل با اندازه دسته برابر با ۱۲۸ انجام شد. تابع زیان مدل نیز بر اساس آنتروپی متقاطع تعریف شد که یکی از متداول‌ترین توابع هزینه در مسائل طبقه‌بندی دودویی است.این تابع اختلاف میان برچسب واقعی و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل را اندازه‌گیری می‌کند و هدف فرآیند آموزش، کمینه‌سازی این مقدار است. استفاده از تابع آنتروپی متقاطع باعث شد که مدل بتواند تفکیک دقیق‌تری میان پروژه‌های پایدار و پروژه‌های پرریسک ایجاد کند.

٤-یافته‌ها و نتایج پژوهش

یافته‌های این پژوهش حاصل اجرای چارچوب پیشنهادی مبتنی بر هوش مصنوعی بر روی داده‌های مربوط به ۱۲۵۰ پروژه سرمایه‌گذاری سبز طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ است. هدف اصلی این بخش، ارزیابی توانایی مدل در تحلیل پایداری مالی پروژه‌های سبز و مقایسه عملکرد آن با مدل‌های متداول یادگیری ماشین و روش‌های کلاسیک آماری است. با توجه به ماهیت پیچیده سرمایه‌گذاری‌های سبز و وابستگی آن‌ها به متغیرهای مالی، زیست‌محیطی و اقلیمی، تلاش شد تا مدل پیشنهادی نه‌تنها از منظر دقت پیش‌بینی، بلکه از منظر پایداری عملکرد، قدرت تحلیل روابط غیرخطی و توانایی شناسایی ریسک‌های بلندمدت نیز مورد بررسی قرار گیرد.در مرحله نخست، داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند. حدود ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای آزمون نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. سپس عملکرد چارچوب پیشنهادی با سه مدل مقایسه‌ای شامل رگرسیون لجستیک، Random Forestو XGBoost ارزیابی شد. انتخاب این مدل‌ها به این دلیل صورت گرفت که رگرسیون لجستیک نماینده روش‌های کلاسیک آماری، Random Forestنماینده الگوریتم‌های مبتنی بر درخت تصمیم و XGBoost نماینده مدل‌های تقویتی پیشرفته یادگیری ماشین محسوب می‌شود. مقایسه این مدل‌ها با چارچوب پیشنهادی امکان تحلیل دقیق‌تر مزیت‌های استفاده از هوش مصنوعی عمیق در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز را فراهم می‌کند.نتایج اولیه نشان داد که چارچوب پیشنهادی در تمامی معیارهای ارزیابی عملکرد بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب شبکه عصبی عمیق با مدل XGBoost توانسته است هم روابط ساختاری میان متغیرها و هم الگوهای غیرخطی پیچیده میان شاخص‌های ESG و بازده مالی را با دقت بیشتری شناسایی کند.

جدول ۱. مقایسه عملکرد مدل‌ها

مدل	ROC-AUC	F1	Recall	Precision	Accuracy
Logistic Regression	0.82	0.76	0.74	0.79	0.81
Random Forest	0.89	0.84	0.84	0.85	0.88
XGBoost	0.92	0.88	0.88	0.89	0.91
Proposed AI Framework	0.96	0.93	0.93	0.94	0.95

همان‌گونه که نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، چارچوب پیشنهادی با دستیابی به دقت ۹۵ درصد، بهترین عملکرد را در میان تمامی مدل‌ها داشته است. همچنین مقدار ROC-AUC برابر با ۰,۹۶ نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل در تفکیک پروژه‌های پایدار و پروژه‌های دارای ریسک مالی یا زیست‌محیطی است. این یافته از منظر مالی پایدار اهمیت بالایی دارد، زیرا هدف اصلی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز تنها پیش‌بینی بازده مالی نیست، بلکه شناسایی پروژه‌هایی است که در بلندمدت از پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی برخوردار باشند.نتایج نشان داد که مدل رگرسیون لجستیک پایین‌ترین عملکرد را در میان مدل‌ها داشته است. دلیل اصلی این موضوع، وابستگی این مدل به روابط خطی میان متغیرها است. در حالی که روابط میان شاخص‌هایESG ، ریسک اقلیمی، بازده سرمایه‌گذاری و نوسانات مالی ماهیتی پیچیده و غیرخطی دارند، مدل رگرسیون لجستیک قادر به استخراج این وابستگی‌ها نیست. به همین دلیل، دقت پیش‌بینی آن در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین پایین‌تر بوده است.مدل Random Forest عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون لجستیک ارائه داد و توانست بخشی از روابط غیرخطی موجود در داده‌ها را شناسایی کند. با این حال، این مدل همچنان در تحلیل تعاملات پیچیده میان متغیرهای ESG و شاخص‌های مالی محدودیت داشت. به‌ویژه در شرایطی که متغیرها دارای وابستگی‌های پویا و چندبعدی بودند، دقت مدل کاهش پیدا می‌کرد.مدل XGBoost عملکرد بسیار مطلوب‌تری نسبت به دو مدل قبلی نشان داد. این مدل توانست با استفاده از یادگیری تقویتی و بهینه‌سازی تدریجی، ساختار پیچیده داده‌ها را بهتر تحلیل کند. با این حال، چارچوب پیشنهادی مبتنی بر شبکه عصبی عمیق همچنان عملکرد برتری داشت، زیرا شبکه عصبی قادر بود روابط بسیار پیچیده‌تر و الگوهای پنهان میان متغیرهای زیست‌محیطی و مالی را استخراج کند.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، بهبود هم‌زمان Precision و Recall در چارچوب پیشنهادی بود. در مسائل مربوط به سرمایه‌گذاری سبز، کاهش خطاهای تصمیم‌گیری اهمیت بسیار بالایی دارد، زیرا طبقه‌بندی اشتباه یک پروژه پرریسک به‌عنوان پروژه پایدار می‌تواند منجر به زیان‌های مالی و زیست‌محیطی قابل توجهی شود. مقدار Recall برابر با ۰,۹۳ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توانسته است بخش عمده پروژه‌های واقعاً پایدار را به‌درستی شناسایی کند. همچنین مقدار Precision برابر با ۰,۹۴ بیانگر آن است که اغلب پروژه‌هایی که مدل به‌عنوان پروژه پایدار معرفی کرده، واقعاً دارای ویژگی‌های پایداری بوده‌اند.در ادامه پژوهش، تحلیل حساسیت مدل در برابر سناریوهای مختلف اقتصادی و اقلیمی انجام شد. هدف از این تحلیل، بررسی میزان پایداری عملکرد چارچوب پیشنهادی در شرایط متغیر و پرریسک بود. برای این منظور، چندین سناریوی مختلف شامل افزایش نوسانات بازار انرژی، تشدید محدودیت‌های زیست‌محیطی، افزایش نرخ بهره جهانی و بحران‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی شبیه‌سازی شد.نتایج نشان داد که چارچوب پیشنهادی حتی در شرایط افزایش شدید نوسانات اقتصادی نیز عملکرد پایداری دارد. در حالی که عملکرد مدل‌های سنتی با افزایش بی‌ثباتی اقتصادی کاهش قابل توجهی پیدا می‌کرد، مدل پیشنهادی توانست دقت خود را در سطح نسبتاً بالایی حفظ کند. این ویژگی نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل سرمایه‌گذاری‌های سبز می‌تواند به افزایش تاب‌آوری تصمیم‌گیری مالی در شرایط عدم قطعیت کمک کند.یکی از دلایل اصلی این پایداری، استفاده هم‌زمان از داده‌های مالی و شاخص‌های ESGدر فرآیند یادگیری مدل بود. برخلاف بسیاری از مدل‌های سنتی که تنها بر متغیرهای مالی تمرکز دارند، چارچوب پیشنهادی توانست اثر عوامل زیست‌محیطی و اقلیمی را نیز در تحلیل ریسک لحاظ کند. این موضوع باعث شد مدل در برابر تغییرات ناگهانی بازار، رفتار منطقی‌تر و باثبات‌تری داشته باشد.در مرحله بعد، عملکرد مدل در انواع مختلف پروژه‌های سبز بررسی شد تا مشخص شود آیا چارچوب پیشنهادی در تمامی حوزه‌های سرمایه‌گذاری پایدار عملکرد یکسانی دارد یا خیر.

جدول ۲. عملکرد مدل در انواع پروژه‌های سبز

نوع پروژه	Accuracy
انرژی تجدیدپذیر	0.96
حمل‌ونقل پاک	0.94
ساختمان هوشمند	0.93
مدیریت منابع آب	0.95

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در تمامی انواع پروژه‌های سبز عملکرد مطلوبی داشته است. بالاترین دقت مربوط به پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر با مقدار ۰,۹۶ بوده است. دلیل این موضوع را می‌توان به شفاف‌تر بودن شاخص‌های عملکردی در پروژه‌های انرژی پاک نسبت داد. در این نوع پروژه‌ها، شاخص‌هایی مانند شدت انتشار کربن، بازده انرژی و بهره‌وری زیست‌محیطی به‌صورت دقیق‌تری قابل اندازه‌گیری هستند و همین موضوع موجب می‌شود مدل بتواند الگوهای پایداری را بهتر شناسایی کند.در پروژه‌های حمل‌ونقل پاک نیز مدل عملکرد بسیار مناسبی ارائه داد. با این حال، پیچیدگی بالاتر ساختار هزینه‌ها و وابستگی این پروژه‌ها به سیاست‌های دولتی موجب شد دقت مدل اندکی کمتر از پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر باشد. در پروژه‌های ساختمان هوشمند نیز اگرچه عملکرد مدل همچنان بالا بود، اما تنوع زیاد فناوری‌ها و تفاوت استانداردهای ارزیابی پایداری موجب شد سطح عدم قطعیت افزایش یابد.در پروژه‌های مرتبط با مدیریت منابع آب، چارچوب پیشنهادی توانست عملکرد بسیار مطلوبی ارائه دهد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل توانایی مناسبی در تحلیل پروژه‌هایی دارد که علاوه بر بازده مالی، دارای پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده هستند.یکی دیگر از بخش‌های مهم یافته‌های پژوهش، تحلیل اهمیت ویژگی‌ها بود. برای این منظور از روش SHAP استفاده شد تا میزان تأثیر هر متغیر بر تصمیمات مدل مشخص شود. نتایج نشان داد که رتبه ESG مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر پایداری پروژه‌ها بوده است. این یافته تأیید می‌کند که شاخص‌های ESG نقش کلیدی در ارزیابی ریسک و موفقیت بلندمدت سرمایه‌گذاری‌های سبز دارند.

پس از رتبهESG ، شدت انتشار کربن دومین متغیر مهم شناسایی شد. پروژه‌هایی که شدت انتشار کربن پایین‌تری داشتند، در اغلب موارد از پایداری مالی بیشتری نیز برخوردار بودند. این موضوع نشان می‌دهد که میان عملکرد زیست‌محیطی و عملکرد مالی در بلندمدت رابطه معناداری وجود دارد.نوسانات مالی نیز یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر ارزیابی پروژه‌ها بود. پروژه‌هایی که در معرض نوسانات شدید بازار قرار داشتند، معمولاً از ریسک بالاتری برخوردار بودند و مدل آن‌ها را با احتمال کمتری در گروه پروژه‌های پایدار طبقه‌بندی می‌کرد.بازده بلندمدت سرمایه‌گذاری نیز در میان متغیرهای کلیدی قرار داشت. برخلاف رویکردهای سنتی که بر سود کوتاه‌مدت تمرکز دارند، نتایج این پژوهش نشان داد که پایداری مالی پروژه‌های سبز بیشتر با توانایی آن‌ها در ایجاد بازده باثبات و بلندمدت مرتبط است.در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند تحول مهمی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز ایجاد کند. مدل پیشنهادی نه‌تنها توانسته است دقت پیش‌بینی را بهبود دهد، بلکه در تحلیل ریسک‌های اقلیمی، شناسایی پروژه‌های پایدار و افزایش قابلیت اطمینان تصمیم‌گیری مالی نیز عملکرد بسیار مطلوبی داشته است. این نتایج بیانگر آن است که ترکیب شاخص‌های ESG با الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی می‌تواند به توسعه نظام‌های مالی پایدار و بهبود فرآیند تخصیص سرمایه در اقتصاد سبز کمک کند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز می‌تواند تحول مهمی در نظام تصمیم‌گیری مالی پایدار ایجاد کند. در دهه‌های اخیر، توسعه اقتصاد سبز و گسترش سیاست‌های مرتبط با کاهش انتشار کربن، موجب شده است که سرمایه‌گذاری‌های پایدار به یکی از محورهای اصلی نظام مالی جهانی تبدیل شوند. در چنین شرایطی، روش‌های سنتی ارزیابی مالی که عمدتاً بر شاخص‌های سودآوری کوتاه‌مدت و تحلیل‌های ایستای اقتصادی تمرکز دارند، دیگر توانایی لازم برای تحلیل پیچیدگی‌های موجود در پروژه‌های سبز را ندارند. پروژه‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک، ساختمان‌های هوشمند و مدیریت منابع طبیعی علاوه بر بازده اقتصادی، دارای پیامدهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقلیمی هستند و ارزیابی آن‌ها نیازمند رویکردهای چندبعدی و داده‌محور است. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که ترکیب هوش مصنوعی با شاخص‌های ESG می‌تواند این خلأ را تا حد زیادی برطرف کند و چارچوبی جامع برای

تحلیل هم‌زمان ابعاد مالی و پایداری پروژه‌ها فراهم آورد.یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش، برتری چارچوب پیشنهادی نسبت به مدل‌های سنتی و حتی برخی الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین بود. نتایج نشان داد که چارچوب مبتنی بر شبکه عصبی عمیق و XGBoost توانسته است با دقت بالاتری پروژه‌های پایدار را شناسایی کند و روابط پیچیده میان شاخص‌های مالی و زیست‌محیطی را تحلیل نماید. این موضوع از منظر نظری اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان می‌دهد که پایداری مالی پروژه‌ها صرفاً تابع متغیرهای اقتصادی کلاسیک نیست، بلکه متغیرهای مرتبط با محیط زیست، ریسک اقلیمی و مسئولیت اجتماعی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت بلندمدت پروژه‌ها دارند.

در نظریه‌های سنتی مالی، فرض بر این بود که هدف اصلی بنگاه‌ها و سرمایه‌گذاران حداکثرسازی سود اقتصادی است و متغیرهای غیراقتصادی نقش حاشیه‌ای در تصمیم‌گیری دارند. اما یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که در اقتصاد معاصر، مفهوم ارزش‌آفرینی تغییر یافته و پایداری به یکی از مؤلفه‌های اصلی ارزیابی سرمایه‌گذاری تبدیل شده است. در واقع، پروژه‌ای که از منظر زیست‌محیطی ناپایدار باشد، حتی اگر در کوتاه‌مدت سودآوری مناسبی داشته باشد، در بلندمدت با ریسک‌های قابل توجهی مواجه خواهد شد. این ریسک‌ها می‌توانند شامل جریمه‌های زیست‌محیطی، محدودیت‌های قانونی، کاهش اعتماد سرمایه‌گذاران و افزایش هزینه‌های عملیاتی باشند. بنابراین، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های ESG در کنار متغیرهای مالی، می‌تواند ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از پایداری پروژه‌ها ارائه دهد.

از منظر روش‌شناختی، یافته‌های پژوهش نشان داد که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی توانایی بالایی در تحلیل روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرها دارند. یکی از محدودیت‌های اصلی مدل‌های سنتی مالی، وابستگی آن‌ها به فرض خطی بودن روابط میان متغیرها است. در حالی که در واقعیت، روابط میان شاخص‌هایESG ، بازده سرمایه‌گذاری، ریسک اقلیمی و نوسانات مالی ماهیتی پویا و غیرخطی دارند. به‌عنوان مثال، تأثیر کاهش انتشار کربن بر عملکرد مالی ممکن است در کوتاه‌مدت محدود باشد، اما در بلندمدت موجب افزایش پایداری اقتصادی و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری شود. مدل‌های کلاسیک قادر به تحلیل چنین روابط پیچیده‌ای نیستند، اما چارچوب پیشنهادی پژوهش توانست این وابستگی‌ها را به‌خوبی شناسایی کند.نتایج تحلیل اهمیت ویژگی‌ها نیز نشان داد که رتبه ESG مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر پایداری پروژه‌های سبز بوده است. این یافته از منظر مالی پایدار اهمیت زیادی دارد، زیرا بیانگر آن است که بازارهای مالی به‌تدریج به سمت ارزش‌گذاری پروژه‌ها بر اساس معیارهای پایداری حرکت می‌کنند. در گذشته، بسیاری از سرمایه‌گذاران صرفاً به شاخص‌هایی مانند سود خالص یا نرخ بازده توجه می‌کردند، اما امروزه شاخص‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیز به بخشی از فرآیند ارزیابی ریسک تبدیل شده‌اند. این تغییر نشان‌دهنده تحول ساختاری در نظام مالی جهانی است؛ تحولی که در آن مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی به یکی از عوامل اصلی جذب سرمایه تبدیل شده است.یکی دیگر از یافته‌های مهم پژوهش، نقش قابل توجه شدت انتشار کربن در ارزیابی پروژه‌ها بود. پروژه‌هایی که شدت انتشار کربن پایین‌تری داشتند، در اغلب موارد از پایداری مالی بیشتری نیز برخوردار بودند. این موضوع نشان می‌دهد که میان عملکرد زیست‌محیطی و عملکرد اقتصادی تضاد ذاتی وجود ندارد، بلکه در بسیاری از موارد، بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی می‌تواند موجب کاهش ریسک و افزایش بازده بلندمدت شود. این نتیجه با دیدگاه‌های جدید مالی پایدار همسو است که معتقدند سرمایه‌گذاری‌های سبز نه‌تنها هزینه اضافی محسوب نمی‌شوند، بلکه می‌توانند مزیت رقابتی و ثبات اقتصادی ایجاد کنند.

از منظر مدیریت ریسک، یافته‌های پژوهش نشان داد که چارچوب پیشنهادی توانایی بالایی در تحلیل ریسک اقلیمی دارد. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به یکی از مهم‌ترین تهدیدهای اقتصادی جهان تبدیل شده است. افزایش دمای زمین، بحران‌های آب، بلایای طبیعی و محدودیت‌های مرتبط با مصرف سوخت‌های فسیلی، ساختار بسیاری از صنایع را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در چنین شرایطی، سرمایه‌گذارانی که ریسک اقلیمی را در تصمیم‌گیری‌های خود لحاظ نکنند، ممکن است با زیان‌های سنگینی مواجه شوند. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند به شناسایی بهتر این ریسک‌ها کمک کند و ارزیابی دقیق‌تری از پایداری پروژه‌ها ارائه دهد.تحلیل حساسیت مدل نیز نشان داد که چارچوب پیشنهادی در شرایط بی‌ثبات اقتصادی و افزایش نوسانات بازار عملکرد پایداری دارد. این ویژگی از منظر عملیاتی بسیار مهم است، زیرا بسیاری از پروژه‌های سبز در محیط‌هایی با عدم قطعیت بالا اجرا می‌شوند. تغییر سیاست‌های انرژی، نوسانات قیمت نفت، تغییر نرخ بهره و تحولات ژئوپلیتیکی می‌توانند بر عملکرد پروژه‌های سبز تأثیر بگذارند. مدل پیشنهادی توانست حتی در چنین شرایطی دقت خود را حفظ کند و این موضوع نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالای چارچوب مبتنی بر هوش مصنوعی است.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج پژوهش پیامدهای مهمی برای دولت‌ها، بانک‌ها و نهادهای نظارتی دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و استفاده از سیستم‌های هوشمند می‌تواند به بهبود فرآیند تخصیص منابع در اقتصاد سبز کمک کند. یکی از چالش‌های

اصلی در بسیاری از کشورها، نبود نظام‌های دقیق ارزیابی پروژه‌های پایدار است. در چنین شرایطی، منابع مالی ممکن است به پروژه‌هایی تخصیص یابد که از نظر زیست‌محیطی یا اقتصادی پایداری لازم را ندارند. چارچوب پیشنهادی پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای افزایش شفافیت مالی و کاهش خطاهای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد.بانک‌ها و مؤسسات مالی نیز می‌توانند از این چارچوب برای مدیریت ریسک و بهبود فرآیند اعتبارسنجی پروژه‌های سبز استفاده کنند. در سال‌های اخیر، بسیاری از بانک‌ها به سمت توسعه تأمین مالی سبز حرکت کرده‌اند، اما ارزیابی دقیق ریسک این پروژه‌ها همچنان یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند به بانک‌ها کمک کند تا پروژه‌های دارای پایداری واقعی را شناسایی کرده و از سرمایه‌گذاری در پروژه‌های پرریسک جلوگیری کنند.از منظر بازار سرمایه نیز یافته‌های پژوهش دارای اهمیت زیادی است. سرمایه‌گذاران نهادی، صندوق‌های بازنشستگی و شرکت‌های سرمایه‌گذاری به‌تدریج توجه بیشتری به معیارهای ESG نشان می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد که در آینده، شرکت‌هایی که استانداردهای پایداری را رعایت نکنند، با محدودیت بیشتری در جذب سرمایه مواجه خواهند شد. بنابراین، چارچوب‌های هوشمند ارزیابی سرمایه‌گذاری می‌توانند به افزایش کارایی بازارهای مالی و هدایت سرمایه به سمت فعالیت‌های پایدار کمک کنند.یکی دیگر از جنبه‌های مهم پژوهش، نقش هوش مصنوعی در افزایش شفافیت اطلاعاتی بود. در بسیاری از موارد، ارزیابی پروژه‌های سبز به دلیل پیچیدگی داده‌ها و نبود اطلاعات استاندارد با مشکل مواجه می‌شود. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند حجم عظیمی از داده‌های مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی را تحلیل کرده و الگوهای پنهان را استخراج کنند. این قابلیت می‌تواند به کاهش عدم تقارن اطلاعاتی در بازارهای مالی کمک کند و کیفیت تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران را افزایش دهد.

در سطح نظری، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب مالی پایدار و هوش مصنوعی می‌تواند چارچوب جدیدی برای تحلیل رفتار بازارهای مالی ایجاد کند. در نظریه‌های سنتی، بازارها عمدتاً بر اساس اطلاعات مالی تحلیل می‌شدند، اما یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اطلاعات زیست‌محیطی و اجتماعی نیز بخش مهمی از فرآیند ارزش‌گذاری دارایی‌ها را تشکیل می‌دهند. این تحول می‌تواند موجب بازتعریف مفهوم ریسک و بازده در اقتصاد مدرن شود.همچنین یافته‌های پژوهش تأیید می‌کند که حرکت به سمت اقتصاد سبز بدون توسعه فناوری‌های تحلیلی پیشرفته امکان‌پذیر نخواهد بود. حجم عظیم داده‌های مرتبط با پایداری، پیچیدگی روابط میان متغیرها و سرعت تغییرات اقتصادی، استفاده از روش‌های سنتی را با محدودیت مواجه کرده است. در چنین شرایطی، هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان موتور تحلیلی نظام مالی پایدار عمل کند و زمینه توسعه سرمایه‌گذاری‌های هوشمند را فراهم سازد.با وجود نتایج مثبت پژوهش، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد. نخست آنکه بخشی از داده‌های مورد استفاده از پایگاه‌های بین‌المللی گردآوری شده و ممکن است تفاوت‌هایی با شرایط اقتصادی کشورهای در حال توسعه داشته باشند. دوم آنکه شاخص‌های ESGدر سطح جهانی هنوز به استاندارد واحدی نرسیده‌اند و تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری می‌تواند بر نتایج تحلیل اثر بگذارد. همچنین، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی نیازمند زیرساخت‌های پردازشی و داده‌ای پیشرفته است که ممکن است در برخی کشورها یا مؤسسات مالی به‌طور کامل فراهم نباشد.با این حال، محدودیت‌های موجود از اهمیت یافته‌های پژوهش نمی‌کاهد و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های سبز می‌تواند مسیر جدیدی در توسعه نظام‌های مالی پایدار ایجاد کند. این چارچوب نه‌تنها از منظر دقت پیش‌بینی و مدیریت ریسک دارای مزیت است، بلکه از منظر تحقق اهداف توسعه پایدار نیز اهمیت زیادی دارد.در مجموع، پژوهش حاضر نشان داد که ترکیب مالی پایدار، شاخص‌های ESGو هوش مصنوعی می‌تواند نسل جدیدی از سیستم‌های تصمیم‌گیری مالی را شکل دهد؛ سیستم‌هایی که قادرند هم‌زمان بازده اقتصادی، پیامدهای زیست‌محیطی و مسئولیت اجتماعی را تحلیل کنند. چنین رویکردی می‌تواند نقش مهمی در هدایت سرمایه به سمت پروژه‌های پایدار، کاهش ریسک‌های اقلیمی، افزایش شفافیت مالی و تسریع گذار به اقتصاد سبز ایفا کند. از این منظر، هوش مصنوعی نه‌تنها یک ابزار فناورانه، بلکه بخشی از زیرساخت آینده نظام مالی پایدار جهانی محسوب می‌شود.

منابع

منابع فارسی

مقالات

ابراهیمی، م.، و شریفی، ع. (۱۳۹۸). کاربرد داده‌کاوی در کشف تقلب بانکی. فصلنامه علوم اقتصادی و مدیریت، ۱۲ (۲)، ۴۵–۶۸.

احمدی، ر.، و رضایی، م. (۱۴۰۰). تحلیل ریسک عملیاتی در نظام بانکی ایران .مجله پژوهش‌های مالی، ۱۸(۳) ، ۱۰۱–۱۲۴.

ابراهیمی، م.، و شریفی، ع. (۱۳۹۸). کاربرد داده‌کاوی در کشف تقلب بانکی .فصلنامه علوم اقتصادی و مدیریت، ۱۲(۲) ، ۴۵–۶۸.

بهرامی، ف.، و کریمی، ن. (۱۳۹۹). یادگیری ماشین در پیش‌بینی رفتارهای مالی مشکوک .فصلنامه مدیریت مالی، ۱۴(۱)، ۷۷–۹۸.

حسینی، س.، و موسوی، ع. (۱۳۹۷). کشف تقلب در بانکداری الکترونیک .مجله حسابداری و حسابرسی، ۲۵(۴)، ۵۵–۸۰.

مرادی، ک.، و نیکوکار، ا. (۱۳۹۶). کاربرد شبکه‌های عصبی در تحلیل داده‌های مالی .فصلنامه علوم داده، ۹(۱)، ۳۳–۵۲.

یوسفی، م.، و قاسمی، ح. (۱۳۹۸). بررسی روش‌های هوشمند کشف تقلب مالی .مجله پژوهش‌های مدیریت، ۱۱(۲)، ۹۰–۱۱۲.

کتاب‌ها

آذر، ع.، و مؤمنی، م. (۱۳۹۲) آمار *و کاربرد آن در مدیریت*. تهران: سمت.

رازانی، ح. (۱۳۹۶) مدیریت *ریسک در مؤسسات مالی و بانکی*. تهران: نشر نی.

سعیدی، م. (۱۳۹۴) مدیریت *مالی پیشرفته*. تهران: سمت.

نیکوکار، ا. (۱۳۹۵) بانکداری *الکترونیک و نظام‌های پرداخت*. تهران: دانشگاه تهران

اسناد و گزارش‌ها

بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران. (۱۴۰۱) گزارش *شاخص‌های عملکرد نظام بانکی کشور*. تهران: بانک مرکزی.

مرکز آمار ایران. (۱۴۰۰) گزارش *تحولات بخش مالی و بانکی*. تهران.

منابع انگلیسی

Articles

Akerlof, G. A. (1970). The market for “lemons”: Quality uncertainty and the market mechanism. *Quarterly Journal of Economics, 84*(3), 488–500.

Bhattacharyya, S., Jha, S., Tharakunnel, K., & Westland, J. (2011). Data mining for credit card fraud: A comparative study. *Decision Support Systems, 50*(3), 602–613.

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.

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

Jensen, M. C., & Meckling, W. H. (1976). Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics, 3*(4), 305–360.

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.

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems, 30*, 5998–6008.

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.

Reurink, A. (2018). Financial fraud: A literature review. *Journal of Economic Surveys, 32*(5),

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press**.**

Books

Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer.

Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2023). *Speech and Language Processing*. Pearson.

Reports / Documents

Basel Committee on Banking Supervision. (2011). *Principles for the sound management of operational risk*. Bank for International Settlements.

OECD. (2020). *Digital transformation in financial services*. OECD Publishing.

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