

توسعه مدل هوشمند ترکیبی رگرسیون و شبکه عصبی برای تحلیل کارایی شرکت‌های داروسازی در بورس اوراق بهادار تهران

آزیتا بهبهانی‌نیا^۱، مهیا سیاسر^۲

۱- استادیار گروه محیط زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

az.bebahaninia@iau.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، رودهن، ایران.

m.siasar_ie@iau.ac.ir

چکیده

صنعت داروسازی در ایران به عنوان یکی از ارکان حیاتی نظام سلامت، همواره تحت تأثیر نوسان‌های متغیرهای کلان و فشارهای ساختاری قرار دارد. پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از حیث ماهیت توصیفی - همبستگی و از نوع پس‌روپدادی است که با هدف ارائه مدلی هوشمند برای تحلیل و پیش‌بینی کارایی واقعی شرکت‌های داروسازی انجام شده است. رویکرد تحلیلی این مطالعه مبتنی بر یک الگوریتم دو مرحله‌ای است؛ بدین صورت که ابتدا از تحلیل رگرسیونی برای تبیین ساختار خطی روابط و سپس از شبکه عصبی مصنوعی برای کشف الگوهای غیرخطی پنهان در باقیمانده‌های مدل اولیه استفاده می‌شود. جامعه آماری پژوهش شامل کلیه شرکت‌های داروسازی پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران در قلمرو زمانی ۱۴ ساله است که با کاربست روش حذفی سامان‌مند و بر اساس کفایت داده‌های مالی و تداوم فعالیت شرکت‌ها تعداد ۲۸ شرکت به عنوان نمونه نهایی انتخاب گردید پس از آماده‌سازی داده‌ها در محیط اکسل، تحلیل استنتاجی طی دو مرحله انجام پذیرفت. نخست، جهت تبیین روابط خطی میان متغیرهای کلان و درون‌شرکتی با درآمد فروش، از نرم‌افزار استاتا استفاده می‌شود. با انتقال باقیمانده‌های مدل خطی به محیط پایتون الگوریتم شبکه عصبی پس‌انتشار خطا (با لایه پنهان هفت‌نرونی) جهت مدل‌سازی الگوهای غیرخطی اجرا می‌شود. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی خطی به تنهایی قادر به تبیین کامل نوسان‌های فروش نیست و متغیر نرخ ارز تأثیر معناداری بر عملکرد فروش نداشته است. در مقابل، مدل هوشمند ترکیبی با شناسایی الگوهای پیچیده و غیرخطی منجر به کاهش قابل توجه خطای پیش‌بینی و ارتقای ضریب تعیین می‌شود. این نتایج مؤید برتری رویکرد ترکیبی نسبت به مدل‌های کلاسیک در محیط‌های پرنوسان اقتصادی است.

کلمات کلیدی: مدل هوشمند ترکیبی، رگرسیون چندمتغیره، شبکه عصبی مصنوعی، کارایی مالی.

۱. مقدمه

صنعت داروسازی ایران در دهه‌های اخیر، یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های اقتصادی و اجتماعی کشور بوده است؛ صنعتی که همزمان بار مسئولیت سلامت جامعه و پایداری اقتصادی را بر دوش دارد. داروسازی بخش مهمی از زنجیره سلامت ملی است و از منظر اشتغال، صادرات و ارزش افزوده نیز سهم قابل توجهی در ساختار تولید ایران دارد. امروزه چالش وابستگی شدید به مواد اولیه وارداتی، بسامدهای نرخ ارز و چالش‌های زنجیره تأمین جهانی، به شبکه فشار دائمی بر عملکرد مالی و عملیاتی شرکت‌های دارویی تبدیل شده است. این وضعیت، ضرورت نگاه علمی و داده‌محور را برای مدیریت و تصمیم‌سازی در این صنعت دوجندان می‌کند. از دیدگاه مهندسی صنایع، داروسازی یکی از پیچیده‌ترین صنایع از نظر ساختار درهم‌تنیده‌ی مواد، محصول، علم، پیچیدگی تولید، اطلاعات و تصمیم‌گیری است. این حوزه با رویکرد سامان‌مند خود می‌کوشد بین سه بعد اصلی ساختار فرایند تولید، زنجیره تأمین و بازده اقتصادی^۱ ارتباطی روشن و قابل تحلیل برقرار کند. همان‌گونه که مایرسون^۲ (۲۰۱۵) اشاره دارد، پایداری زنجیره‌های دارویی زمانی امکان‌پذیر است که طراحی فنی، کنترل کیفی و سیاست‌های اقتصادی در قالب یک چارچوب مشترک و قابل اندازه‌گیری تنظیم شوند. در واقع مهندسی صنایع در صنعت دارو به بهره‌وری تولید نگاه می‌کند و شبکه جریان‌های اطلاعات و سرمایه را نیز به‌عنوان بخشی از عملکرد سیستم در نظر می‌گیرد. پژوهش‌های بین‌المللی در سال‌های اخیر این پیوند میان مهندسی صنایع و داروسازی را تقویت کرده‌اند. آمنده^۳ (۲۰۱۹) بر نقش مهندسی شیمی و صنایع در بازآفرینی رویکردهای کنترلی، طراحی فرایند و کاهش هزینه‌های تولید تأکید می‌کند. او نشان می‌دهد که ماهیت فرایندهای داروسازی، نیازمند است سیستم‌های تولید و مالی به صورت هم‌زمان پایش شوند تا تصمیمات بهینه بر مبنای داده واقعی اتخاذ گردد. در واقع، این دیدگاه موجب انتقال صنعت از الگوی «پاسخ به چالش»^۴ به الگوی «پیش‌بینی و کنترل هوشمند»^۵ می‌شود؛ تحولی که کاملاً با فلسفه مهندسی صنایع هم‌راستا است.

از سوی دیگر، مفهوم «فرآیندهای پیچیده و چندمتغیره»^۶ در داروسازی که به‌درستی توسط تروپ^۷ (۲۰۱۳) بیان شده است، به ماهیت پویای رفتار سیستم‌های دارویی اشاره دارد. او تأکید دارد که تحلیل این فرایندها نیازمند مدل‌هایی است که بتوانند داده‌های متغیر را در مرور زمان تفسیر کنند؛ زیرا داروسازی نوعی صنعت با وابستگی بالا به شرایط محیطی و پارامترهای کیفی است. چنین برداشتی، محور اصلی مهندسی صنایع در حوزه دارو را شکل می‌دهد یعنی برخورد با هر کارخانه داروسازی به‌عنوان یک «سامانه‌ی پیچیده‌ی تولید و تصمیم‌گیری».

در همین راستا، لیما و جورجاکیس^۸ (۲۰۱۲) با تأکید بر طراحی مدل‌های قابل کنترل برای سیستم‌های چندورودی-چندخروجی به لزوم پایداری مدل‌های تصمیم‌گیر در برابر تغییرهای محیطی اشاره دارند. آن‌ها بیان می‌کنند که نظام‌های تولیدی، مالی و کنترلی باید در قالب مدلی میان‌رشته‌ای طراحی شوند تا از انعطاف

¹ Economic return² Myerson.³ Amende.⁴ Reactive approach.⁵ Predictive and intelligent control.⁶ Complex and multivariate processes.⁷ Troup.⁸ Lima and Georgakis.

و پایداری بیشتری برخوردار باشند؛ اصل بنیادینی که در مهندسی صنایع و تحلیل سیستم‌های دارویی نقش محوری ایفا می‌کند؛ بنابراین، انتظار می‌رود این رویکرد همان نیاز شرکت‌های داروسازی ایران برای مدیریت در شرایط ناپایدار اقتصادی و ارزی باشد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند کاربرت مدل‌های داده‌محور، نه تنها در درک رفتار مالی شرکت‌ها مؤثر است، بلکه به تحلیل سازمانی و تصمیم‌سازی مهندسی نیز معنا می‌بخشد. بر پایه همین اندیشه، لی یوچینگ^۱ (۲۰۲۵) الگوی ترکیبی رگرسیون^۲ و شبکه عصبی^۳ را برای پیش‌بینی عملکرد شرکت‌ها معرفی می‌کند؛ مدلی که فراتر از یک ابزار آماری به منزله سامانه یادگیرنده برای تحلیل رفتار پیچیده کسب‌وکارها عمل می‌کند. چنین تفکری با زیرساخت مفهومی مهندسی صنایع در طراحی سیستم‌های تصمیم‌گیر هوشمند هماهنگ است جایی که مدل تنها محاسبه نمی‌کند چون یادگیری و تطبیق با محیط را بر عهده دارد. از تلفیق این دیدگاه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مهندسی صنایع پلی میان جهان فنی داروسازی و جهان اقتصادی آن است. این رشته ظرفیت دارد تا داده‌های گسترده‌ی مالی، تولیدی و محیطی را در قالب یک سامانه‌ی هوشمند و نظام‌مند تفسیر کند و از این راه تصویری واقعی از کارایی سازمانی نشان دهد. در شرایط کنونی بورس اوراق بهادار تهران، تحلیل چنین رویکردهایی یکی از ضرورت‌های تصمیم‌گیری برای شرکت‌های داروسازی محسوب می‌شود؛ زیرا می‌تواند ترکیب درستی از عوامل فنی، مالی و مدیریتی را همان‌گونه که پیش از این بیان شد را برای حفظ پایداری اقتصادی ارائه نماید.

در دهه‌های اخیر تحولات ناشی از صنعت چهارم^۴ به‌عنوان یک انقلاب فناورانه و به‌منزله دگرگونی پارادایمی در ساختار تفکر صنعتی تلقی می‌شود؛ دگرگونی که محور آن گذار از تولید کلاسیک به سیستم‌های سایبری فیزیکی^۵ و از تحلیل توصیفی به تصمیم‌سازی خودآموز و هوشمند است. این دگرگونی در صنعت داروسازی اهمیت دوچندان دارد؛ زیرا داروسازی در ذات خود صنعتی داده‌محور است که در تقاطع علم مواد، زیست‌فناوری، اقتصاد و سیاست قرار می‌گیرد. بر اساس دیدگاه شاه و همکاران^۶ (۲۰۲۱) ساختار بهینه داروسازی آینده باید بر پایه ادغام هوش مصنوعی، نظارت بلادرنگ^۷ و مدل‌سازی شبکه‌ای شکل گیرد تا تمامی اجزای تولید، کنترل و تصمیم‌سازی در یک ماتریس اطلاعاتی هم‌زمان قابل ارزیابی باشند.

در این نگاه، سامانه‌ها باید از منطق پاسخ به بحران به منطق پیش‌بینی، کنترل و سازگاری هوشمند حرکت کنند؛ یعنی از تحلیل گذشته‌نگر به تحلیل آینده‌نگر برسند. این تحول مفهومی باعث ظهور الگوهای شده که پویایی اقتصادی و کیفیت فنی را می‌سنجند و ظرفیت تطبیق سیستم با تلاطم‌های محیطی و سازمانی را نیز محاسبه می‌کنند. در چنین چارچوبی مهندسی صنایع به مثابه زبان مشترک میان فرایند، مدل و تصمیم عمل می‌کند؛ زبانی که می‌تواند ساختارهای چندپارامتری و چندمتغیره را در یک فضای بهینه تصمیم‌گیری تلفیقی مدل‌سازی نماید و داروسازی را از یک صنعت واکنشی به صنعتی استقرایی و پیش‌بینانه تبدیل کند.

در این پژوهش انتخاب صنعت داروسازی به‌عنوان بستر آزمون این مدل ترکیبی و همچنین یک تصمیم تحلیلی پاسخی هوشمندانه به واقعیت‌های پیچیده‌ی اقتصاد و سلامت در ایران است.

¹ Li Yuqing.² Regression.³ Neural Network.⁴ Industry 4.0.⁵ Cyber-Physical Systems.⁶ Shah et al.⁷ Real-Time Monitoring.

والگرن و همکاران^۱ (۲۰۲۰) در مطالعه پایداری نظام‌های سلامت نشان می‌دهند پایداری واقعی در صنعت داروسازی تنها زمانی محقق می‌شود که تصمیمات در مقیاس سازمانی از سطح مالی و حسابداری فراتر رفته و به سطح منطقه‌ای و ملی در ارزیابی اثر سیاست‌ها بر تولید و عرضه پیوند بخورد. در ایران، صنعت داروسازی حامل رسالت بهداشتی و یکی از بازوان سرمایه‌گذاری و اشتغال در بورس اوراق بهادار تهران است؛ جایی که بسامدهای نرخ ارز، محدودیت‌های واردات مواد اولیه و تغییرات قوانین عرضه، رفتار مالی این شرکت‌ها را با پارامترهای متنوع زیست‌محیطی، فناورانه و بازاری گره می‌زند. در چنین بستری مدل پیشنهادی این پژوهش مدل هوشمند ترکیبی رگرسیون و شبکه عصبی^۲ بنا دارد پیوندی میان دو قلمرو سنتی تحلیل آماری و هوش محاسباتی برقرار سازد. بخش رگرسیون خطی چندگانه^۳ به استخراج روابط کمی میان متغیرهای بازار و شاخص‌های عملکرد مالی می‌پردازد در حالی که شبکه عصبی پس‌انتشار خطا^۴ رفتار غیرخطی و تعاملات پیچیده‌ی برگرفته از دینامیک بازار و سیاست‌های تولید را به مدل تبدیل می‌کند. ترکیب این دو سازوکار پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد شرکت‌ها را ممکن می‌سازد و بستری برای تحلیل هم‌زمان کارایی سازمانی، کیفیت تصمیم‌سازی و پایداری استراتژیک^۵ فراهم می‌آورد. این پژوهش با الهام از مدل پایه لی یوچینگ و کتاب‌شناسی مهندسی فرایندهای دارویی^۶ قصد دارد الگویی ایجاد کند که بتواند در چارچوب تحلیل فرایندهای پیچیده و چندمتغیره رفتار اقتصادی و صنعتی داروسازی ایران را تبیین نماید. انتظار می‌رود حاصل آن مدلی باشد که از محدوده صرف تحلیل آماری عبور کرده و به ساحت طراحی سیستم‌های تصمیم‌گیر خودآموز در مهندسی صنایع وارد شود؛ گامی به‌سوی طرح یک بینش آینده‌نگر که صنعت داروسازی را به عنوان ستون هوشمند اقتصاد سلامت ایران معرفی می‌کند. با وجود مطالعات گسترده در حوزه تحلیل عملکرد شرکت‌ها، پژوهش‌های اندکی به‌طور هم‌زمان از معماری ترکیبی رگرسیون-شبکه عصبی با تمرکز بر استخراج الگوهای غیرخطی باقیمانده‌ها در صنعت داروسازی ایران استفاده کرده‌اند؛ شکافی که پژوهش حاضر درصدد پر کردن آن است.

۲. کتاب‌شناسی پژوهش

تحلیل کارایی در صنعت داروسازی ریشه در سیر تحول اندیشه مهندسی سیستم‌ها دارد؛ اندیشه‌ای که از نیمه‌ی قرن بیستم با جنبش «مهندسی صنایع» به‌عنوان تلفیق علم تصمیم‌سازی و مهندسی فرایند آغاز شد. در دهه ۱۹۷۰، مفهوم تحلیل کارایی^۷ در قالب مدل‌های تعیین بهره‌وری در صنایع شیمیایی و تولید انبوه شکل گرفت و سپس در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، با برنامه‌های مبتنی بر کنترل کیفیت آماری، به حوزه‌ی داروسازی نیز نفوذ کرد. در همین دوره، ادبیات جهانی تحت تأثیر گسترش فناوری اطلاعات و پیدایش «مهندسی سیستم‌های هوشمند» قرار گرفت؛ همین جریان علمی بعدها مبنای تحلیل هوش‌محور عملکرد^۸

¹ Wahlgren et al.

² Hybrid Regression-Neural Network Model.

³ Multiple Linear Regression.

⁴ Backpropagation Neural Network.

⁵ Strategic Sustainability.

⁶ Myerson 2015؛ Amende 2019؛ Troup & Georgakis 2012؛ Láinez & Reklaitis 2012.

⁷ Efficiency Analysis.

⁸ Intelligent Performance Analysis.

سازمان‌ها شد که امروزه محور اصلی مطالعات مهندسی صنایع در صنایع حساس از جمله داروسازی، محسوب می‌گردد. پژوهش‌های کلاسیک مانند تروپ و جورجاکیس^۱ (۲۰۱۳) در صنعت داروسازی و مایرسون (۲۰۱۵) در پیوند مهندسی کنترل و تولید دارو، نشان دادند که کارایی سامانه‌های دارویی تابع متغیرهای فیزیکی و تابع جریان‌های اطلاعات و کیفیت تصمیم‌های درون‌سیستمی است. از همین‌جا بذریع تحول رویکردهای کلاسیک مهندسی صنایع که «مبتنی بر کنترل خطی» بودند به سوی سیستم‌های پیش‌بینی‌محور هوشمند کاشته شد. در این تحول، علوم رایانه و آمار با مهندسی فرایند ترکیب گردیدند و جریان تازه‌ای از پژوهش‌ها حول مدل‌های ترکیبی^۲ شکل گرفت که هدفش شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار پیچیده سیستم‌های اقتصادی عملیاتی بود. در ادامه‌ی این تحول مفهوم تحلیل تصمیم‌گیری داده‌محور^۳ به تدریج جایگزین تحلیل ساختاری سنتی در ارزیابی عملکرد شد. این گذار مفهومی توسط پروژه‌های کلان صنعت چهارم و مطالعاتی مانند آسیولی و همکاران^۴ (۲۰۲۱) و رینهارت و همکاران^۵ (۲۰۲۰) تقویت گردید که زمینه‌ی همگرایی فناوری، مهندسی و اقتصاد در صنایع داروسازی را فراهم کردند. چنین رویکردی ادبیات علمی را از دامنه صرف فرایندهای تولید به قلمرو سنجش کارایی بر مبنای رفتار داده‌ای سوق داد و از همین نقطه ضرورت کاربست مدل‌های ترکیبی رگرسیون شبکه عصبی به عنوان ابزار تحلیلی بین‌رشته‌ای مطرح شد. در دهه گذشته، ادبیات پژوهشی در حوزه هوشمندسازی صنعت داروسازی مسیر تازه‌ای را پیموده است که در آن مرز میان مهندسی صنایع و تحلیل داده‌های مالی عملیاتی به‌طور جدی بازتعریف شده است. همانگونه که لاینز و رکلایتس^۶ (۲۰۱۲) در پژوهش خود نشان می‌دهند که پیچیدگی تصمیم‌ها در زنجیره ارزش دارویی، لزوم ساخت مدل‌هایی چندلایه برای مدیریت عدم قطعیت‌ها و پیش‌بینی رفتار سیستم را اجتناب‌ناپذیر کرده است. از منظر مهندسی صنایع، این تغییر پارادایم موجب ظهور ساختارهایی شد که در آن تصمیمات راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی باید در یک چارچوب تحلیلی منسجم تلفیق شوند.

از سوی دیگر تروپ و جورجاکیس (۲۰۱۳) با ارائه دیدگاهی جامع در «کاربرد ابزارهای مهندسی سامانه‌های فرایندی در صنعت داروسازی» تأکید کردند که مدل‌های ایستا دیگر برای کنترل چرخه تولید و کیفیت کافی نیستند و باید با الگوریتم‌هایی جایگزین شوند که قابلیت یادگیری و اصلاح خود را از داده‌های فرایند دارند. در دهه اخیر، مسیر تکامل نظریه کارایی در صنعت داروسازی به مرحله‌ای رسیده است که دیگر نمی‌توان آن را صرفاً امتداد مهندسی سنتی دانست؛ بلکه باید آن را محصول هم‌زیستی سه جریان؛ داده‌کاوی چندمقیاسی^۷، کنترل هوشمند فرایند و تحلیل رفتارهای مالی پیچیده در نظر گرفت. در این میان، دیدگاه‌های نوین مایرسون (۲۰۱۵) در خصوص مهندسی کنترل پیوسته و آمند^۸ (۲۰۱۹) در زمینه‌ی کنترل فرایندهای پویا، بنیان نظری تازه‌ای را برای درک کارایی سامانه‌های دارویی بنا نهادند؛ جایی که کیفیت تولید و پایداری سازمانی دیگر تابع ایستایی عملیاتی نیست، بلکه حاصل توان یادگیری و انطباق سیستم در برابر اغتشاش‌های داده‌ای و اقتصادی است. از این تحول، مفهوم «کارایی تطبیقی»^۸ رو به تکامل گذاشت؛

¹ Troup and Georgakis.

² Hybrid Modeling.

³ Data-Driven Decision Making.

⁴ Acioli et al.

⁵ Reinhardt et al.

⁶ Lainez and Reklaitis.

⁷ Multiscale Data Mining.

⁸ Adaptive Efficiency.

دیدگاهی که در مطالعات رینهارت (۲۰۲۰) و لاکنر^۱ (۲۰۱۹) با تأکید بر رابطه میان پایداری داده‌ای و تاب‌آوری صنعتی^۲، ساختارهای تصمیم‌سازی را متوجه تحلیل الگوریتمی رفتار بازار و زنجیره ارزش دارویی کرد. این دیدگاه بعدها در چارچوب داروسازی صنعت چهارم دوباره تفسیر شد و ادبیات علمی بر آن متمرکز گردید که چگونه هوشمندسازی فرایندهای تولید، کنترل کیفیت و تحلیل داده‌های مالی می‌تواند به نتایج هم‌افزا در سنجش کارایی بیانجامد. در همین چارچوب، پژوهش‌های بنچ^۳ (۲۰۲۰) و آسیولی (۲۰۲۱) نشان دادند که گذار از مدل‌های خطی به مدل‌های یادگیرنده یک تحول فناورانه و دگرگونی فلسفی در شیوهی فهم پویایی عملکرد سازمان است.

ادبیات تحلیلی نوین به‌ویژه در آثار هنستاک^۴ (۲۰۲۰) و سیلوا^۵ (۲۰۲۰) بر این نکته تأکید دارد که سامانه‌های دارویی دیگر بر پایه زنجیره‌های خطی مواد و اطلاعات عمل نمی‌کنند؛ آن‌ها در قالب شبکه‌هایی چندلایه از وابستگی‌های متقابل و بازخوردهای هوشمند تکامل می‌یابند. این شبکه‌های سایبر فیزیکی امکان تنظیم بلادرنگ فرایندهای تولید را فراهم می‌کنند تا خطاهای عملیاتی و دگرگونی‌های محیطی پیش از آن‌که کارایی را مختل سازند، با کمک الگوریتم‌های پیش‌بینی کننده اصلاح شوند. چنین سازوکاری مفهوم کلاسیک کارایی را که آن را صرفاً «نسبت بازده به ورودی» محاسبه می‌کرد کنار گذاشته و آن را در قالب پویایی سازمان یادگیرنده بازتعریف کرده است. در سطح کلان، این دگرگونی مفهومی به پیدایش نسل تازه‌ای از مدل‌های تحلیل عملکرد انجامیده که میان مهندسی صنایع، حسابداری تحلیلی و علم داده پلی میان رشته‌ای برقرار می‌کنند. پژوهش‌های لاینز و رکلیتیس (۲۰۱۲) در حوزه‌ی بهینه‌سازی سازمانی نشان می‌دهد که تصمیم‌های چندسطحی از راهبردی تا عملیاتی تنها زمانی واقعا کارا هستند که در چارچوبی داده‌محور و هوشمند به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی شوند. این نگرش نقطه‌ی عطف اندیشه معاصر در مهندسی صنایع داروسازی است؛ جایی که تحلیل خطی کلاسیک جای خود را به مدل‌سازی تحلیلی ترکیبی می‌دهد و محور سامانه‌ها بر پویایی، یادگیری و اصلاح بلادرنگ استوار می‌شود، نه تثبیت پارامترهای ایستا. در این افق نو کارایی همچون سامانه‌ای پویا درک می‌شود که به‌طور پیوسته میان جریان‌های فنی، مالی و اقتصادی تعادل ایجاد می‌کند. این دیدگاه، شالوده‌ی شکل‌گیری مدل هوشمند ترکیبی در پژوهش حاضر است مدلی که با تلفیق دقت ریاضی، رگرسیون خطی و قدرت یادگیری شبکه‌های عصبی، تصویری پویا از رفتار کارایی شرکت‌های داروسازی فعال در بورس اوراق بهادار تهران ترسیم می‌کند؛ تصویری که در آن کارایی فقط مقدار ثابتی نیست و بازتابی از شناخت، تطبیق و پیش‌بینی هوشمند در سامانه‌ی اقتصادی دارویی است. برآیند این مطالعات نشان می‌دهد که گذار از مدل‌های خطی ایستا به چارچوب‌های یادگیرنده و ترکیبی، یک ضرورت تحلیلی در صنایع پیچیده‌ای مانند داروسازی است؛ ضرورتی که مبنای طراحی مدل مفهومی پژوهش حاضر قرار گرفته است.

¹ Lakner.

² Industrial Resilience.

³ Benach.

⁴ Henstock.

⁵ Silva.

۳. مسئله پژوهش

صنعت داروسازی ایران به عنوان یکی از ستون‌های راهبردی در تأمین امنیت سلامت و پایداری اقتصادی کشور، در بستری از تعاملات پیچیده و چندلایه عمل می‌کند. این صنعت از یک سو با فشارهای برآمده از نوسانات ارزی، وابستگی به زنجیره‌های تأمین جهانی و تغییرات سیاستی روبروست و از سوی دیگر، با ماهیت ذاتی خود یعنی پیچیدگی فرایندهای تولید، کنترل کیفیت دقیق و جریان‌های اطلاعاتی درهم‌تنیده تعریف می‌شود. در چنین فضایی، ابزارهای سنتی ارزیابی عملکرد که بر شاخص‌های مالی گذشته‌نگر و روابط خطی استوارند، در تبیین رفتار واقعی و پیش‌بینی آینده شرکت‌ها با نارسایی جدی مواجه‌اند. پرسمان بنیادین پژوهش حاضر از همین نقطه آغاز می‌شود یعنی شکاف میان پیچیدگی ذاتی یک صنعت دانش‌بنیان و محدودیت مدل‌های تحلیلی کلاسیک. این پژوهش در صدد پاسخ به این پرسش غایی است که چگونه می‌توان مدلی هوشمند و یکپارچه طراحی کرد که توانمند باشد با عبور از تحلیل‌های ایستا، به صورت هم‌زمان تأثیر متغیرهای فنی-تولیدی، مالی-اقتصادی و کلان محیطی را بر کارایی شرکت‌های داروسازی تبیین نماید.

انبوه داده‌های تولیدی، عملیاتی و مالی که از فعالیت شرکت‌های داروسازی در بازار سرمایه تولید می‌شود شامل قیمت سهام، گزارش‌های ماهانه و فصلی تولید و فروش، صورت‌های مالی فصلی و دوره‌ای؛ ترکیب آن‌ها با متغیرهای کلان اقتصادی در نگاه نخست، نمایی جامع از عملکرد آن‌ها به دست می‌دهد. با این حال این سیگنال‌های مالی در حقیقت برآیند پیچیده‌ای از دینامیک‌های پنهان در سطوح فنی، عملیاتی و راهبردی هستند؛ پویایی‌هایی که رفتار آن‌ها به ندرت از الگوهای خطی پیروی می‌کند. مدل‌های کلاسیک رگرسیون خطی، هرچند در شناسایی اولیه و تبیین شدت روابط میان برخی متغیرهای مستقل و وابسته کارآمدی خود را نشان داده‌اند؛ اما در برابر تفسیر اثرات غیرخطی، آستانه‌ای و متقابلی که ذات این صنعت را شکل می‌دهد، از درک کامل این پویایی‌ها باز می‌مانند. برای مثال، رابطه میان سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و بازدهی نهایی شرکت یا تأثیر یک اختلال در زنجیره تأمین بر اعتماد سرمایه‌گذاران؛ پدیده‌هایی هستند که نمی‌توان آن‌ها را در چارچوب یک معادله خطی ساده مدل‌سازی کرد. از این رو، گذار از تحلیل‌های تک‌بعدی به یک معماری تحلیلی نوین که قادر به مدل‌سازی هم‌زمان این روابط تودرتو باشد، به یک ضرورت انکارناپذیر در این پژوهش بدل می‌گردد. بنابراین مسئله اصلی این پژوهش ناتوانی مدل‌های خطی کلاسیک در تبیین و پیش‌بینی رفتار غیرخطی درآمد فروش شرکت‌های داروسازی در بستر ناپایدار اقتصادی ایران است.

در پاسخ به این ضرورت تحلیلی و به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های ذاتی روش‌های تک‌بعدی، این پژوهش با کاربست منطق محاسباتی لی یوچینگ (۲۰۲۵) بومی‌سازی آن برای زیست‌بوم صنعت داروسازی ایران، رویکردی ترکیبی و تکاملی را اتخاذ نموده است. در این چارچوب پیشنهادی، ابتدا از مدل «رگرسیون خطی چندگانه» به منظور تبیین ساختار خطی حاکم بر داده‌ها و شناسایی همبستگی‌های اولیه میان شاخص‌های عملکردی و متغیرهای تأثیرگذار همچون نوسانات نرخ ارز، تورم تولیدکننده و شاخص‌های نقدینگی بازار بهره گرفته می‌شود. با این حال، از آنجا که پویایی‌های بازار سرمایه و فرایندهای صنعتی در بورس اوراق بهادار تهران رفتاری شدیداً غیرخطی و آشوب‌ناک از خود نشان می‌دهند، مدل خطی تنها به‌عنوان یک فیلتر مقدماتی عمل می‌کند. برای تکمیل این فرایند و شکار الگوهای پنهان، پیچیده و تعاملات درهم‌تنیده که از نگاه ابزارهای آماری کلاسیک پنهان می‌مانند، خروجی‌های مرحله نخست به یک «شبکه عصبی پس‌انتشار خطا» وارد می‌شود. این هم‌افزایی الگوریتمی، پژوهش حاضر را قادر می‌سازد تا با تلفیق دقت استنتاجی آمار

و قدرت یادگیری ماشینی، مدلی هوشمند برای تحلیل و پیش بینی «کارایی تطبیقی» شرکت های داروسازی ارائه دهد که در برابر شوک های محیطی و عدم قطعیت های اقتصادی، روایی و پایایی بالاتری دارد. بر مبنای چارچوب مفهومی ترسیم شده و به منظور صورت بندی ریاضیاتی روابط میان مؤلفه های کلان اقتصادی و شاخص های خرد عملیاتی، مرحله نخست این الگوریتم ترکیبی بر پایه یک ساختار رگرسیونی چندمتغیره بنا شده است. این مدل که وظیفه غربالگری خطی و شناسایی ضرایب اهمیت اولیه را بر عهده دارد، کوشش می کند تا تغییرات عملکردی شرکت های دارویی را تابعی از نوسانات محیطی و راندمان درونی بنگاه تعریف نماید. صورت عمومی این مدل پایه در مدل (۱) ارائه شده است:

مدل (۱):

$$SR_{it} = \alpha_0 + \beta_1(EX_t) + \beta_2(INF_t) + \beta_3(FC_{it}) + \beta_4(TA_{it}) + \beta_5(CR_{it}) + \epsilon_{it}$$

که در آن:

SR_{it} : متغیر وابسته^۱؛ نشان دهنده کل درآمد عملیاتی حاصل از فروش محصولات دارویی شرکت i در دوره زمانی t است که مستقیم از صورت سود و زیان شرکت ها استخراج می شود.

EX_t : متغیر مستقل نرخ ارز بازار آزاد یا سامانه نیما از بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران؛ میانگین نرخ دلار آمریکا بر حسب ریال در دوره ی مورد نظر که از رابطه (۱) حاصل می شود:

رابطه (۱):

$$EX_t = \frac{\sum_{d=1}^{D_t} ER_d}{D_t}$$

که در آن:

ER_d : نرخ دلار بازار آزاد در روز d

D_t : تعداد روزهای معاملاتی

INF_t : نرخ تورم که از رابطه (۲) اندازه گیری می شود:

رابطه (۲):

$$INF_t = \frac{CPI_t - CPI_{t-1}}{CPI_{t-1}} \times 100$$

که در آن:

CPI_t : شاخص بهای مصرف کننده در سال t

FC_{it} : هزینه های مالی شرکت i در سال t که مستقیم از سود و زیان هر شرکت استخراج می شود.

TA_{it} : کل دارایی های شرکت i در سال t که مستقیم از صورت وضعیت مالی هر شرکت استخراج می شود.

می شود.

CR_{it} : نسبت جاری که با رابطه (۳) محاسبه می شود:

^۱ درآمد فروش به عنوان نماینده ای عملیاتی از کارایی مالی شرکت انتخاب شده است؛ زیرا هم زمان بازتاب دهنده ظرفیت تولید، موفقیت بازار و کارآمدی تصمیم های مدیریتی است.

رابطه (۳):

$$CR_{it} = \frac{CA_{it}}{CL_{it}}$$

که در آن:

 CA_{it} : دارایی‌های جاری شرکت i در سال t CL_{it} : بدهی‌های جاری شرکت i در سال t

هدف از این مدل، شناسایی اثرات مستقیم متغیرهای اقتصادی و مالی بر درآمد شرکت‌ها و تبیین هم‌زمان اثرات بیرونی و درونی بر عملکرد مالی است. این مرحله اساس تحلیل خطی و کمی پژوهش را شکل می‌دهد؛ اما از آن‌جا که روابط اقتصادی صنعت داروسازی اغلب غیر خطی، پویا و بین‌متغیر هستند مدل خطی به‌تنهایی قادر به نمایش همه‌ی پویایی‌های واقعی نیست در مرحله دوم تحلیل، برای برطرف کردن محدودیت‌های مدل خطی و شناسایی روابط پیچیده‌تر میان متغیرهای مالی و اقتصادی از چارچوب مدل هوشمند ترکیبی رگرسیون و شبکه عصبی استفاده می‌شود. این مدل بر پایه مدل‌سازی کار لی یوچینگ (۲۰۲۵) شامل دو لایه تحلیلی متوالی است. لایه خطی مدل رگرسیون چندمتغیره همان مدل (۱) معرفی شده و لایه غیر خطی باقی‌مانده‌های مدل خطی ϵ_{it} به‌عنوان ورودی شبکه عصبی پس‌انتشار خطا استفاده می‌شود تا الگوهای پنهان و غیر خطی میان متغیرها را فراگیرد:

مدل (۲):

$$\widehat{\epsilon_{it}^{(NN)}} = f_{NN}(SR_{it-1}, EX_t, INF_t, FC_{it}, TA_{it}, CR_{it})$$

سپس مقدار نهایی فروش پیش‌بینی شده از ترکیب نتیجه دو لایه حاصل می‌گردد:

مدل (۳):

$$SR_{it}^{Hybrid} = SR_{it}^{(Linear)} + \widehat{\epsilon_{it}^{(NN)}}$$

در این ساختار ریاضی، مدل (۳) تنها یک جمع جبری ساده نیست نشان‌دهنده هم‌افزایی دو منطق تحلیلی ناهمسان برای حل یک مسئله پیچیده صنعتی است. در واقع، جمله اول $SR_{it}^{(Linear)}$ سهم «روابط ساختاری و بنیادین» اقتصاد را نشان می‌دهد؛ جایی که تئوری‌های کلاسیک مالی حکم می‌کنند افزایش دارایی یا بهبود نسبت جاری باید به‌صورت خطی منجر به افزایش درآمد شود. واقعیت صنعت داروسازی ایران به‌ویژه در شرایط تحریم و نوسانات ارزی همیشه از این منطق خطی پیروی نمی‌کند. این جاست که نقش جمله دوم $\epsilon_{it}^{(NN)}$ برجسته می‌شود. در مدل‌های سنتی، باقی‌مانده‌ها به‌عنوان «خطا» یا «نویز سفید» نادیده گرفته می‌شوند؛ اما در این پژوهش فرض بر این است که این باقی‌مانده‌ها حاوی اطلاعات پنهان و غیر خطی هستند؛ اطلاعاتی که ناشی از شوک‌های ناگهانی نرخ ارز، تغییرات لحظه‌ای در زنجیره تأمین و رفتارهای هیجانی بازار است. شبکه عصبی با یادگیری الگوی این خطاها در واقع «انحرافات سیستم از تئوری» را مدل‌سازی می‌کند. بنابراین، مدل نهایی یک سیستم اصلاح‌گر هوشمند است. ابتدا یک برآورد استاندارد ارائه می‌دهد و سپس با کاربست هوش مصنوعی خطای خود را بر اساس شرایط محیطی اصلاح می‌کند. این رویکرد گامی عملیاتی به سوی تحقق مفهوم «داروسازی نسل چهارم» در سطح مهندسی مالی است؛ جایی که تصمیم‌گیری بر مبنای الگوریتم‌های یادگیرنده و تطبیق‌پذیر صورت می‌گیرد.

با توجه به شکاف موجود در روش‌های تحلیل سنتی و نیاز مبرم مدیران صنعت دارو به ابزارهای دقیق‌تر برای پیش‌بینی جریان درآمدی در دوران تلاطم اقتصادی، ضرورت این پژوهش در گذار از «تفسیر گذشته» به «پیش‌بینی آینده» نمایان می‌شود. مدل‌سازی خطی در محیطی که متغیرهایی نظیر نرخ ارز و تورم رفتاری جهشی دارند منجر به تصمیم‌گیری‌های همراه با ریسک بالا خواهد شد. لذا توسعه این مدل ترکیبی کوششی برای کاهش عدم قطعیت و ارائه تصویری شفاف‌تر از کارایی شرکت‌هاست.

پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به پرسش‌های کلیدی زیر است که پایه فرضیه‌های پژوهش هستند و مسیر تحلیل‌های آماری و هوشمند فصول آینده را ترسیم می‌کند:

۱. متغیرهای کلان اقتصادی (نرخ ارز و تورم) و شاخص‌های درون‌شرکتی (هزینه‌های مالی، دارایی‌ها و نسبت جاری) چه تأثیر معناداری بر درآمد فروش شرکت‌های داروسازی پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران دارند؟

۲. آیا کاربست مدل هوشمند ترکیبی (رگرسیون-شبکه عصبی) منجر به کاهش معنادار خطای پیش‌بینی نسبت به مدل‌های رگرسیونی کلاسیک می‌شود؟

۳. الگوی یادگیری شبکه عصبی تا چه میزان قادر است نوسانات غیرخطی و رفتار پویای درآمد فروش را که توسط مدل خطی تبیین نشده است، شناسایی و اصلاح نماید؟

۴. آزمون فرضیه‌ها

فرضیه‌های پژوهش:

فرضیه اول. متغیرهای کلان اقتصادی (نرخ ارز و تورم) و شاخص‌های درون‌شرکتی (هزینه‌های مالی، دارایی‌ها و نسبت جاری) تأثیر معناداری بر درآمد فروش شرکت‌های داروسازی پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران دارند.

فرضیه دوم. کاربست مدل هوشمند ترکیبی (رگرسیون-شبکه عصبی) منجر به کاهش معنادار خطای پیش‌بینی نسبت به مدل‌های رگرسیونی کلاسیک می‌شود؟

فرضیه سوم. الگوی یادگیری شبکه عصبی نوسانات غیرخطی و رفتار پویای درآمد فروش را که توسط مدل خطی تبیین نشده است شناسایی و اصلاح می‌کند.

آزمون فرضیه اول

در آزمون فرضیه اول که به بررسی تأثیر متغیرهای کلان اقتصادی و شاخص‌های درون‌شرکتی بر درآمد فروش می‌پردازد، ملاک قضاوت بر اساس برآورد ضرایب رگرسیونی (β) در مدل خطی چندمتغیره تعیین می‌شود. در این آزمون وضعیت هر یک از متغیرها شامل نرخ ارز، نرخ تورم، هزینه‌های مالی، دارایی‌ها و نسبت جاری از طریق آماره تی‌استیودنت و سطح معناداری متناظر با آن سنجیده می‌شود؛ به‌طوری‌که اگر مقدار احتمال برای ضریب هر متغیر کمتر از سطح خطای پنج درصد باشد فرض صفر مبنی بر بی‌تأثیر بودن آن متغیر رد شده و وجود رابطه معنادار تأیید می‌گردد. همچنین علامت ضریب برآوردی (مثبت و منفی) نشان‌دهنده جهت تأثیرگذاری است؛ به این معنا که ضریب مثبت بیانگر رابطه مستقیم و ضریب منفی

نشان دهنده رابطه معکوس میان متغیر مستقل و درآمد فروش خواهد بود. بنابراین تأیید نهایی این فرضیه منوط به این است که شواهد آماری کافی مبنی بر معناداری ضرایب متغیرهای مورد مطالعه (به ویژه متغیرهای کلیدی مانند نرخ ارز و تورم) وجود داشته باشد و در صورت عدم معناداری ضرایب در سطح اطمینان ۹۵ درصد، فرضیه مبنی بر اثرگذاری آن متغیر خاص رد خواهد شد.

آزمون فرضیه دوم

آزمون فرضیه دوم بر مبنای مقایسه عملکرد پیش‌بینی مدل‌ها استوار است و شرط تأیید یا رد آن، مقدار خطای محاسباتی در دو رویکرد رگرسیون کلاسیک و مدل هوشمند ترکیبی است. در این مرحله پس از برازش هر دو مدل بر روی مجموعه داده‌های یکسان، معیارهای ارزیابی عملکرد نظیر میانگین مربعات خطا (MSE) یا ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر دو مدل محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. ملاک تصمیم‌گیری در این فرضیه وجود اختلاف معنادار در کاهش خطا است؛ بدین صورت که اگر مقدار خطای مدل ترکیبی (رگرسیون - شبکه عصبی) به‌طور عددی کمتر از خطای مدل رگرسیونی خطی باشد و مدل هوشمند بتواند واریانس بیشتری از متغیر وابسته را توضیح دهد، فرضیه دوم تأیید می‌شود. در مقابل چنانچه مدل ترکیبی نتواند خطای پیش‌بینی را نسبت به مدل پایه کاهش دهد یا عملکردی مشابه مدل خطی داشته باشد دلیلی برای برتری مدل پیشنهادی وجود نداشته و این فرضیه رد خواهد شد.

آزمون فرضیه سوم

آزمون فرضیه سوم بر تحلیل ساختار باقیمانده‌ها (جملات خطا) و توانایی شبکه عصبی در کشف الگوهای غیرخطی متمرکز است. در این فرضیه، پیش‌فرض این است که مدل رگرسیون خطی تنها قادر به استخراج روابط خطی میان متغیرهاست و بخشی از اطلاعات مربوط به رفتارهای پیچیده و غیرخطی در جملات خطای مدل باقی می‌ماند. بنابراین آزمون این فرضیه از طریق بررسی عملکرد شبکه عصبی در پردازش باقیمانده‌های مدل خطی انجام می‌شود. اگر شبکه عصبی بتواند با استفاده از ورودی‌های موجود، الگوی معناداری را در باقیمانده‌ها شناسایی کرده و منجر به بهبود برازش کلی مدل شود نشان دهنده وجود روابط غیرخطی و رفتار پویا در درآمد فروش است که توسط مدل خطی نادیده گرفته شده بود و بدین ترتیب فرضیه سوم تأیید می‌گردد. اگر شبکه عصبی نتواند اطلاعات جدیدی از باقیمانده‌ها استخراج کند و خطای نهایی تغییر محسوسی نیابد به این معناست که رفتار متغیر وابسته عمدتاً خطی بوده و فرضیه سوم مبنی بر وجود الگوهای غیرخطی اصلاح‌ناپذیر توسط مدل کلاسیک، رد می‌شود.

۵. روش شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف در رسته کاربردی قرار می‌گیرد زیرا به دنبال ارائه مدلی هوشمند برای تحلیل و پیش‌بینی کارایی واقعی شرکت‌های داروسازی در محیط اقتصادی ایران است. از نظر ماهیت، پژوهش توصیفی - همبستگی و از نوع پس‌رویدادی محسوب می‌شود؛ بدین معنا که داده‌ها از رویدادهای تحقق‌یافته مالی و اقتصادی استخراج شده و پژوهشگر بدون مداخله در متغیرها به بررسی روابط بستگی میان آن‌ها می‌پردازد. رویکرد تحلیلی نیز دو مرحله‌ای است. نخست، تحلیل رگرسیونی برای تبیین ساختار خطی روابط اقتصادی و سپس به‌کارگیری شبکه عصبی برای کشف الگوهای غیرخطی پنهان در خطاهای مدل اولیه. قلمرو مکانی پژوهش شامل کلیه شرکت‌های فعال در صنعت داروسازی پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران است؛ صنعتی که بستر مناسبی برای آزمون مدل‌های پیش‌بینانه محسوب می‌شود. قلمرو زمانی پژوهش نیز دوره‌ای چهارده‌ساله از ابتدای سال ۱۳۹۰ تا پایان سال ۱۴۰۳ را دربرمی‌گیرد که طی آن اطلاعات مالی و اقتصادی شرکت‌ها به‌صورت پیوسته در دسترس بوده است. انتخاب این بازه به‌سبب وقوع جهش‌های کلان اقتصادی و امکان آزمون رفتار تطبیقی مدل در دوره‌های بحرانی و ثبات، صورت گرفته است. برای انتخاب نمونه آماری، از روش حذف سامان‌مند استفاده شده است تا تنها شرکت‌هایی در نمونه قرار گیرند که داده‌های کامل، نماد فعال و ماهیت تولیدی داشته باشند. بر این اساس ابتدا تمامی شرکت‌های دارویی پذیرفته‌شده در بورس شناسایی شدند و آن دسته که پس از سال ۱۳۹۰ پذیرش شده‌اند یا داده‌های ناقص داشتند از فهرست حذف گردیدند. همچنین شرکت‌های سرمایه‌گذاری و هلدینگ‌های دارویی به‌دلیل تفاوت ساختار هزینه‌ای و ماهیت درآمدی کنار گذاشته شدند. پس از انجام مراحل غربالگری، تعداد ۲۸ شرکت داروسازی به‌عنوان نمونه نهایی انتخاب شد که در مجموع، حجم داده‌ای شامل ۴۰۶ مشاهده‌ی سال-شرکت را برای مدل‌سازی فراهم می‌کند؛ حجمی که از نظر آماری برای آموزش شبکه عصبی و برآورد مدل‌های رگرسیونی کفایت دارد. گردآوری داده‌ها به دو شیوه انجام شده است. نخست، استفاده از منابع کتابخانه‌ای و گزارش‌های علمی برای تدوین مبانی نظری و پیشینه مدل و دوم، استخراج داده‌های کمی از اسناد رسمی. داده‌های مالی شرکت‌ها مانند درآمد فروش، دارایی‌ها، هزینه‌های مالی و نسبت‌های نقدینگی، از صورت‌های مالی حسابرسی‌شده در سامانه‌ی جامع اطلاع‌رسانی ناشران (کدال) و نرم‌افزار «ره‌آورد نوین» استخراج شده‌اند. داده‌های کلان اقتصادی شامل نرخ ارز و نرخ تورم نیز از پایگاه بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران و مرکز آمار ایران اخذ گردیده‌اند. تمامی داده‌ها پیش از تحلیل، در محیط اکسل^۱ پاک‌سازی و استانداردسازی شدند تا خطاهای ورود داده و تفاوت مقیاس‌ها بر نتایج مدل تأثیر نگذارند. در مرحله‌ی تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا برای آزمون روابط خطی بین متغیرهای مدل و برآورد ضرایب، از نرم‌افزار آماری استاتا^۲ استفاده شده است؛ این نرم‌افزار قابلیت انجام آزمون‌های مانایی، هم‌خطی و تشخیص نوع داده‌های ترکیبی (با آزمون‌های اف-لیمر^۳ و هاسمن^۴) را فراهم می‌کند و پایه تحلیل رگرسیونی چندمتغیره را تشکیل می‌دهد. پس از این مرحله باقیمانده‌های مدل خطی به‌عنوان داده‌ی ورودی شبکه عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحلیل غیربهمینه خطا و مدل‌سازی الگوهای غیرخطی پنهان با کمک

^۱ Microsoft Excel.^۲ Stata.^۳ F-Limer.^۴ Hausman.

محیط پایتون^۱ و کتابخانه‌های تخصصی^۲ انجام شده است که در آن ساختار شبکه عصبی پس‌انتشار خطا با لایه پنهان شامل هفت نرون، تابع فعال‌سازی^۳، بهینه‌ساز^۴ با نرخ یادگیری ۰/۰۰۰۱ و تابع زیان میانگین مربعات خطا به کار گرفته می‌شود. در مواردی که نیاز به مشاهده رفتار هم‌گرایی و ساختار درونی شبکه وجود داشته باشد از نرم‌افزار متلب^۵ برای ترسیم چارت‌های یادگیری و اعتبارسنجی مدل استفاده می‌گردد. اعتبار مدل‌ها با شاخص‌های استاندارد از جمله ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین تعدیل‌شده ارزیابی می‌گردد تا میزان دقت مدل ترکیبی در پیش‌بینی درآمد فروش شرکت‌های داروسازی نسبت به مدل خطی سنجیده شود. بدین ترتیب روش‌شناسی پژوهش تلفیقی از رویکرد اقتصادسنجی سنتی و یادگیری ماشینی مدرن است که هدف آن ارائه مدلی هوشمند، پایدار و قابل‌تعمیم برای شناسایی و پیش‌بینی رفتار عملکرد مالی در بستر صنعت داروسازی ایران است.

۶. یافته‌ها

پیش از ورود به فرایند آزمون فرضیه‌های پژوهش و برآورد مدل‌های اقتصادسنجی، انجام مجموعه‌ای از بررسی‌های مقدماتی و پیش‌نیازهای آماری ضروری است تا از اعتبار نتایج استنباطی حاصل از مدل‌ها اطمینان حاصل شود. در این راستا، ابتدا با استفاده از آمار توصیفی^۶، ویژگی‌های کلی داده‌ها از نگاه گرایش مرکزی، پراکندگی و دامنه تغییرات متغیرهای پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد تا درک اولیه‌ای از ساختار داده‌های پنهانی حاصل شود. در گام بعد، به منظور اطمینان از قابلیت اتکای برآوردها مفروضات کلاسیک مدل رگرسیون خطی^۷ شامل نرمال بودن توزیع جملات خطا، همسانی واریانس^۸، عدم وجود خودهمبستگی^۹ و فقدان هم‌خطی^{۱۰} شدید میان متغیرهای توضیحی از طریق آزمون‌های آماری متعارف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. افزون بر این، تحلیل ماتریس همبستگی^{۱۱} میان متغیرها انجام می‌شود تا ضمن شناسایی شدت و جهت روابط دومتغیره، از نبود همبستگی‌های مخرب که می‌تواند بر پایداری ضرایب برآوردی اثرگذار باشد، اطمینان حاصل شود. انجام این مراحل به‌طور ماهوی بستر لازم برای تفسیر معتبر نتایج مدل‌های پایه و ترکیبی پژوهش را فراهم ساخته و از بروز استنباط‌های ناپایدار یا گمراه‌کننده جلوگیری می‌کند.

^۱ Python.

^۲ TensorFlow and Scikit-Learn.

^۳ ReLU.

^۴ Adam.

^۵ Matlab.

^۶ Descriptive Statistics.

^۷ Classical Linear Regression Model Assumptions.

^۸ Homoscedasticity.

^۹ Autocorrelation.

^{۱۰} Multicollinearity.

^{۱۱} Correlation Matrix.

جدول آمار توصیفی

جدول ۱- آمار توصیفی متغیرهای پژوهش

متغیر	تعداد مشاهدات (Count)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (Std. Dev)	حداقل (Min)	حداکثر (Max)	چولگی (Skewness)	کشدگی (Kurtosis)
SR	۳۹۲	۱۵	۱.۳	۱۰	۱۸	۰.۲	-۰.۰۰۱
CR	۳۹۱	۱.۶	۰.۷	۰.۷	۶.۵	۴	۲۱
FC	۳۸۵	۵.۲	۰.۷	۱.۳	۷.۱	۱-	۲.۷
TA	۳۹۱	۶.۵	۰.۶	۴.۸	۸.۱	۰	-۰.۰۰۲

آمار توصیفی ارائه شده تصویری ساختارمند از ویژگی‌های توزیعی داده‌های پنلی شرکت‌های داروسازی منتخب فراهم می‌آورد و نقش زیربنایی در ارزیابی کیفیت داده‌ها و قابلیت اتکای تحلیل‌های بعدی ایفا می‌کند. متغیر وابسته پژوهش یعنی لگاریتم فروش دارای میانگین ۱۴.۶۳۷ و انحراف معیار ۱.۲۶۱ است که نشان‌دهنده وجود ناهمگونی قابل توجه در مقیاس عملیاتی شرکت‌هاست؛ امری که در تحلیل‌های مهندسی صنایع بازتاب‌دهنده تفاوت در ظرفیت تولید، گستره بازار و بلوغ فرایندهای عملیاتی بنگاه‌ها تلقی می‌شود. مقادیر پایین چولگی و کشیدگی این متغیر نیز بیانگر توزیعی نزدیک به نرمال است که از منظر برآورد مدل‌های رگرسیونی، شرایط مناسبی را برای تحلیل استنباطی فراهم می‌سازد. در خصوص نسبت جاری میانگین ۱.۵۶۴ نشان می‌دهد که در سطح صنعت شرکت‌ها به‌طور کلی از توانایی مناسبی برای ایفای تعهدات کوتاه‌مدت برخوردار بوده‌اند؛ با این حال چولگی و کشیدگی بسیار بالای این متغیر حاکی از وجود ناهمگونی شدید در سیاست‌های نگهداشت نقدینگی و مدیریت سرمایه در گردش است. از منظر مهندسی صنایع و مالی عملیاتی، این پدیده می‌تواند نشان‌دهنده رفتارهای متفاوت شرکت‌ها در مواجهه با عدم اطمینان‌های محیطی، محدودیت‌های تأمین مالی و شوک‌های نرخ ارز باشد که در ادامه ضرورت کنترل هم‌خطی و بررسی اثرات برون‌زا را توجیه می‌کند.

متغیرهای لگاریتم هزینه‌های مالی و لگاریتم کل دارایی‌ها از توزیعی متقارن برخوردارند و دامنه تغییرات آن‌ها بازتاب‌دهنده تفاوت در ساختار مالی، مقیاس سرمایه‌گذاری و شدت استفاده از اهرم مالی در میان شرکت‌های داروسازی است. از منظر تحلیل سیستم‌های تولید و عملیات این نتایج مؤید آن است که رفتار مالی شرکت‌ها به‌طور با اهمیتی با اندازه بنگاه و سطح پیچیدگی زنجیره تأمین آن‌ها پیوند خورده و بنابراین لحاظ کردن این متغیرها در قالب فرم لگاریتمی، اقدامی کارکردی برای هموارسازی مقیاس‌ها و افزایش پایداری ضرایب برآوردی محسوب می‌شود. نتایج آمار توصیفی نشان می‌دهد که داده‌های مورد استفاده از تنوع ساختاری معناداری برخوردار بوده و در عین حال، پس از اعمال تبدیل‌های مناسب از شرایط اولیه لازم برای ورود به آزمون فروض کلاسیک و برآورد مدل‌های رگرسیونی و ترکیبی پژوهش برخوردارند؛ امری که امکان استخراج یافته‌های قابل اتکا و تفسیرپذیر را در چارچوب تصمیم‌سازی‌های مهندسی صنایع فراهم می‌آورد.

ضرایب همبستگی متغیرها

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون

متغیر	SR	CR	FC	TA
SR	۱	۰.۰۳۶	***۰.۸۷۴	***۰.۹۶۹
CR	۰.۰۳۶	۱	***۰.۱۸۳-	۰.۰۰۵
FC	***۰.۸۷۴	***۰.۱۸۳-	۱	***۰.۸۸۵
TA	***۰.۹۶۹	۰.۰۰۵	***۰.۸۸۵	۱

با توجه به این که متغیرهای اصلی پژوهش در مقیاس لگاریتمی تعریف شده و هدف، ارزیابی شدت و جهت رابطه خطی میان آن‌ها در چارچوب مدل رگرسیون چندمتغیره است، ماتریس همبستگی بر اساس ضریب همبستگی پیرسون^۱ محاسبه شد^۲. نتایج نشان می‌دهد که لگاریتم فروش شرکت‌ها (SR) دارای همبستگی مثبت و بسیار شدید و معنادار آماری با لگاریتم هزینه‌های مالی (FC) و لگاریتم کل دارایی‌ها (TA) است؛ امری که بازتاب‌دهنده پیوند تنگاتنگ میان مقیاس دارایی، شدت استفاده از اهرم مالی و سطح فروش شرکت‌های داروسازی به‌شمار می‌رود. در مقابل نسبت جاری (CR) ارتباط معناداری با فروش و دارایی نشان نمی‌دهد، هرچند همبستگی منفی و معنادار آن با هزینه مالی حکایت از آن دارد که شرکت‌هایی با وضعیت نقدینگی ضعیف‌تر، به‌طور متوسط از اهرم مالی بیشتری بهره گرفته‌اند. از منظر تشخیص هم‌خطی ضرایب همبستگی بالا میان هزینه مالی و دارایی‌ها و همچنین میان فروش و دارایی‌ها ضرورت کنترل دقیق هم‌خطی را در ادامه تحلیل با کاربست آزمون تورم واریانس (VIF) برجسته می‌سازد.

آزمون همخطی تورم واریانس (VIF)

جدول ۳- آزمون همخطی متغیرها

متغیر	VIF
CR	۱.۲
FC	۵.۵
TA	۵.۳

به‌منظور بررسی هم‌خطی چندگانه میان متغیرهای توضیحی از شاخص تورم واریانس^۳ استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مقدار VIF برای متغیر نسبت جاری برابر با ۱.۱۹ است که بیانگر فقدان هم‌خطی قابل‌ملاحظه است. همچنین مقادیر VIF برای متغیرهای هزینه‌های مالی و کل دارایی‌ها به‌صورت لگاریتمی به‌ترتیب برابر

^۱ Pearson Correlation Coefficient.^۲ از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد زیرا متغیرهای پژوهش کمی و پیوسته بوده و با اعمال تبدیل لگاریتمی روابط خطی میان آن‌ها بررسی می‌شود؛ از این‌رو کاربرد این ضریب با چارچوب رگرسیون خطی پژوهش سازگار و از نظر اقتصادسنجی موجه است.^۳ Variance Inflation Factor.

با ۵.۵۱ و ۵.۳۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده عدم هم‌خطی در سطح متوسط میان این دو متغیر است. با توجه به قرار گرفتن تمامی مقادیر VIF پایین‌تر از آستانه بحرانی ۱۰، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌خطی شدید در مدل وجود ندارد و استفاده از متغیرهای توضیحی در برآورد مدل رگرسیونی از اعتبار آماری لازم برخوردار است.

آزمون ناهمسانی واریانس‌ها

جدول ۴- ناهمسانی واریانس‌ها

آماره / مقدار	عدد
<i>LM Statistic</i>	۱۱.۵۸
<i>LM p-value</i>	۰.۰۰۸۹۷
<i>F Statistic</i>	۳.۹۴
<i>F p-value</i>	۰.۰۰۸۶۸

به‌منظور بررسی پایداری واریانس جملات خطا در مدل برآوردی، از آزمون براش - پاکان^۱ استفاده می‌شود. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که مقدار آماره *LM* برابر با ۱۱.۵۸ و مقدار احتمال آماره متناظر با آن برابر با ۰.۰۰۸۹۷ است. همچنین مقدار آماره *F* برابر با ۳.۹۴ و احتمال آماره آن معادل ۰.۰۰۸۶۸ به‌دست آمد. با توجه به این‌که مقادیر پی - ویو کمتر از سطح خطای ۵ درصد هستند فرضیه مبنی بر همسانی واریانس جملات خطا رد می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که در مدل حاضر ناهمسانی واریانس وجود دارد. بر این اساس، در ادامه، برای اطمینان از اعتبار آزمون ضرایب رگرسیونی از انحراف معیارهای مقاوم به ناهمسانی واریانس^۲ استفاده می‌شود.

جدول ۵- پیش‌نیازهای شبکه عصبی (ANN)

پیش‌نیاز	آزمون / روش	نتیجه	توضیح
بررسی داده‌های گم‌شده (<i>Missing Values</i>)	شمارش مقادیر <i>Null</i>	فاقد داده گم‌شده	تمامی متغیرها کامل هستند
نرمال‌سازی داده‌ها (<i>Normalization</i>)	<i>Min-Max Scaling</i>	انجام شد	به‌منظور هم‌مقیاس‌سازی ورودی‌ها
پراکندگی متغیرها (<i>Variance</i>)	محاسبه واریانس	مناسب	واریانس کافی برای یادگیری وجود دارد
هم‌بستگی متغیرها (<i>Correlation Check</i>)	ماتریس پیرسون	قابل قبول	هم‌بستگی‌های شدید حذف شدند
تفکیک داده‌ها (<i>Train-Test Split</i>)	۷۰٪-۳۰٪	انجام شد	برای ارزیابی قدرت پیش‌بینی مدل

از آن‌جا که شبکه عصبی مصنوعی^۳ مبتنی بر فروض کلاسیک اقتصادسنجی نیست پیش‌نیازهای این روش بر آماده‌سازی داده‌ها و تضمین پایداری فرایند یادگیری متمرکز است. بر همین اساس پیش از اجرای مدل داده‌ها از نظر کامل بودن،

^۱ Breusch-Pagan.

^۲ Heteroskedasticity-robust standard errors.

^۳ Artificial Neural Network - ANN.

نرمال سازی، دامنه تغییرات، همبستگی شدید و تفکیک داده های آموزش و آزمون بررسی و اصلاح شدند تا قابلیت تعمیم پذیری مدل تضمین شود.

جدول ۶- تفکیک داده های آموزش و آزمون

بخش داده	تعداد مشاهدات	درصد از کل داده
<i>Training Set</i> (داده های آموزش)	۲۶۹	۷۰٪
<i>Test Set</i> (داده های آزمون)	۱۱۵	۳۰٪
<i>Total</i>	۳۸۴	۱۰۰٪

به منظور ارزیابی قابلیت تعمیم پذیری^۱ مدل شبکه عصبی، داده های پژوهش به صورت تصادفی به دو بخش آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند. این تفکیک امکان بررسی عملکرد مدل بر داده های دیده نشده را فراهم کرده و از بروز بیش برآزش^۲ جلوگیری می کند.

جدول ۷- معماری شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در فرضیه دوم

جزء شبکه	مشخصات	توضیح
نوع شبکه	شبکه عصبی پیش خور (<i>Feedforward Neural Network – FNN</i>)	مناسب برای مسائل پیش بینی و رگرسیونی
لایه ورودی (<i>Input Layer</i>)	۳ نورون	شامل متغیرهای <i>TA</i> , <i>FC</i> , <i>CR</i>
لایه پنهان اول (<i>Hidden Layer 1</i>)	۸ نورون	استخراج الگوهای غیرخطی سطح اول
لایه پنهان دوم (<i>Hidden Layer 2</i>)	۴ نورون	کاهش ابعاد و بهبود تعمیم پذیری
تابع فعال سازی لایه های پنهان	<i>(Unit ReLU (Rectified Linear</i>	افزایش سرعت همگرایی و جلوگیری از ناپدید شدن گرادیان
لایه خروجی (<i>Output Layer</i>)	۱ نورون	پیش بینی متغیر وابسته
تابع فعال سازی خروجی	<i>Linear</i>	مناسب برای متغیر وابسته پیوسته
الگوریتم یادگیری (<i>Optimizer</i>)	<i>Adam</i>	بهینه سازی نرخ یادگیری و تسریع آموزش
تابع خطا (<i>Loss Function</i>)	<i>(MSE) Mean Squared Error</i>	معیار استاندارد برای مدل های رگرسیونی
تعداد دوره های آموزش (<i>Epochs</i>)	۱۰۰	تضمین همگرایی پایدار شبکه
اندازه دسته (<i>Batch Size</i>)	۱۶	تعادل بین سرعت و دقت یادگیری

در این پژوهش به منظور آزمون فرضیه دوم و مدل سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای مالی از شبکه عصبی مصنوعی پیش خور^۳ استفاده می شود. ساختار شبکه شامل یک لایه ورودی با سه نورون متناظر با متغیرهای توضیحی، دو لایه پنهان با تعداد نورون های ۸ و ۴ و یک لایه خروجی با یک نورون برای پیش بینی متغیر وابسته است. در لایه های پنهان از تابع فعال سازی ReLU و در لایه خروجی از تابع خطی استفاده می گردد. به منظور افزایش پایداری فرایند یادگیری و سرعت

¹ Generalization Ability.

² Overfitting.

³ Feedforward Artificial Neural Network – ANN.

همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ادم^۱ و تابع خطای میانگین مربعات خطا به کار گرفته شد. تعداد نوروها و لایه‌ها بر اساس آزمون و خطای تجربی و دستیابی به کمینه خطای پیش‌بینی بدون بیش‌برازش انتخاب شده است.

آزمون فرضیه اول

جدول ۸- آزمون فرضیه اول

متغیر توضیحی	ضریب (β)	Std. Error robust	آماره t	p -value
عرض از مبدأ	۱.۲۹۱۹	۰.۳۰۸۶	۴.۱۸۶۶	۰.۰۰۰۰
نرخ ارز (EX)	۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۱.۶۵۷۶	۰.۰۹۷۴
نرخ تورم (INF)	۰.۰۰۴	۰.۰۰۱۲	۳.۴۰۳۴	۰.۰۰۰۷
هزینه‌های مالی ($lnFC$)	۰.۲۷۱۳	۰.۰۶۸۸	۳.۹۴۳۹	۰.۰۰۰۱
اندازه شرکت ($lnTA$)	۱.۷۶۷	۰.۰۹۰۳	۱۹.۵۷۸۴	۰.۰۰۰۰
نسبت جاری (CR)	۰.۱۲۸۱	۰.۰۶۱	۲.۰۸۵۶	۰.۰۳۷
ضریب تعیین (R -squared): ۰.۹۴۵۹				
ضریب تعیین تعدیل شده ($Adjusted R$ -squared): ۰.۹۴۵۱				
آماره F : ۱۲۱۱.۲۵۶۶				
سطح معناداری آماره (F (Prob(F -statistic))): ۰.۰۰۰۰				
آماره دوربین-واتسون ($Durbin-Watson$): ۰.۷۱۸۶				
تعداد مشاهدات: ۳۸۴				

جدول ۸ نتایج برآورد مدل رگرسیون خطی با به کارگیری انحراف معیارهای مقاوم (HC3) را نشان می‌دهد. هدف مدل بررسی اثر نرخ ارز، نرخ تورم و شاخص‌های مالی درون‌شرکتی شامل هزینه‌های مالی لگاریتمی اندازه شرکت لگاریتمی و نسبت جاری بر درآمد فروش شرکت‌های داروسازی طی دوره زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۳ است. مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.9459$) نشان می‌دهد که مدل توانسته است حدود ۹۵ درصد از تغییرات درآمد فروش شرکت‌ها را توضیح دهد که بیانگر قدرت توضیح‌دهندگی بسیار بالای مدل است. همچنین مقدار آماره F و سطح معناداری نشان می‌دهد که مدل به‌طور کلی معنادار بوده و متغیرهای واردشده به‌صورت مشترک نقش معناداری در تبیین فروش شرکت‌ها دارند. با توجه به وجود خودهمبستگی در ادامه از برآوردهای مقاوم و مدل ترکیبی استفاده شده است تا اثر این نقض فروض بر نتایج نهایی کنترل شود. نتایج برآورد ضرایب نشان می‌دهد که نرخ تورم دارای اثر مثبت و معنادار بر درآمد فروش است که بیانگر هم‌حرکتی رشد سطح عمومی قیمت‌ها با افزایش اسمی درآمد فروش شرکت‌های دارویی است. هزینه‌های مالی و اندازه شرکت اثر مثبت و بسیار معناداری بر فروش دارند به‌ویژه اندازه شرکت قوی‌ترین اثر را نشان

¹ Adam Optimizer.

می‌دهد که حاکی از نقش مقیاس تولید، ظرفیت عملیاتی و سهم بازار در افزایش درآمد فروش است. همچنین نسبت جاری نیز با اثر مثبت و معنادار در سطح خطای ۵ درصد نشان می‌دهد که برخورداری از وضعیت نقدینگی مطلوب، توان عملیاتی و فروش شرکت‌ها را تقویت می‌کند. در مقابل، نرخ ارز با وجود داشتن ضریب مثبت در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار نیست این نتیجه نشان می‌دهد که نوسانات نرخ ارز آزاد در دوره مورد بررسی نتوانسته است به‌طور قابل‌اتکا تغییرات درآمد فروش شرکت‌های داروسازی را توضیح دهد. این یافته با ساختار قیمت‌گذاری دولتی و سازوکارهای کنترلی صنعت دارو سازگار است؛ به‌گونه‌ای که سیاست‌های تنظیم‌گری بخش عمده اثر مستقیم نرخ ارز بر قیمت و فروش را تعدیل می‌کنند. در نتیجه، با توجه به عدم معناداری آماری متغیر نرخ ارز در سطح اطمینان ۹۵ درصد، فرضیه اول تحقیق مبنی بر اثرگذاری معنادار نرخ ارز بر درآمد فروش شرکت‌های داروسازی رد می‌شود. به علت تمرکز اصلی و نوآوری این پژوهش بر نرخ ارز و کنترل بودن سایر متغیرها، عدم معناداری نرخ ارز منجر به رد ادعای اصلی فرضیه می‌شود.

آزمون فرضیه دوم

جدول ۹- مقایسه عملکرد مدل رگرسیون خطی و مدل ترکیبی رگرسیون - ANN

مدل	RMSE	MSE	پیش‌بینی R^2
رگرسیون خطی چندمتغیره	۰.۳۱۲۴	۰.۰۹۷۶	۰.۹۴۵۹
مدل ترکیبی رگرسیون-ANN	۰.۲۳۱۷	۰.۰۵۳۷	۰.۹۶۷۸

به‌منظور آزمون فرضیه دوم عملکرد مدل رگرسیون خطی چندمتغیره و مدل ترکیبی رگرسیون - شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از شاخص‌های خطای پیش‌بینی مقایسه شد. نتایج ارائه‌شده در جدول (۹) نشان می‌دهد که مقادیر $RMSE$ و MSE در مدل ترکیبی رگرسیون ANN به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مدل رگرسیون خطی است و همچنین مقدار ضریب تعیین پیش‌بینی در مدل ANN افزایش یافته است. این یافته‌ها بیانگر دقت بالاتر و قدرت پیش‌بینی بیشتر مدل شبکه عصبی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی است. فرضیه دوم پژوهش مبنی بر برتری مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی درآمد فروش تأیید می‌شود.

آزمون فرضیه سوم

جدول ۱۰- نتایج آزمون‌های تشخیصی باقیمانده‌های مدل رگرسیون

نام آزمون (Test)	نوع آماره (Statistic)	مقدار آماره (Value)	مقدار احتمال (P-value)	نتیجه آزمون (Result)
خودهمبستگی	Durbin-Watson	۰.۷۱۸۶	۰.۰۰۰۰	وجود خودهمبستگی مثبت
ناهمسانی واریانس	Breusch-Pagan (χ^2)	۶.۸۳۲۱	۰.۰۰۹۰	تأیید ناهمسانی واریانس
نرمال بودن	Jarque-Bera (χ^2)	۵.۴۱۷۶	۰.۰۶۶۶	پیروی از توزیع نرمال
تصادفی بودن	Runs Test (Z)	۲.۱۳۴۷-	۰.۰۳۲۸	رد تصادفی بودن

نتایج جدول (۱۰) نشان می‌دهد که باقیمانده‌های مدل رگرسیون خطی چندمتغیره به‌طور کامل از فروض کلاسیک رگرسیون تبعیت نمی‌کنند. مقدار آماره دوربین-واتسون (۰.۷۱۸۶) وجود خودهمبستگی مثبت را تأیید می‌کند و آزمون بروش-پاگان با مقدار احتمال ۰.۰۰۹۰ بیانگر ناهمسانی واریانس در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. اگرچه نتایج آزمون جاک-برا نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها را رد نمی‌کند، اما آزمون دنباله‌ای نشان‌دهنده رد تصادفی بودن کامل باقیمانده‌هاست. بنابراین شواهد آماری بیانگر وجود الگوهای ساختاری و غیرخطی در باقیمانده‌ها بوده و فرضیه سوم پژوهش رد می‌شود. رد فرضیه تصادفی بودن باقیمانده‌ها ضعف مدل خطی را آشکار می‌سازد و توجیه نظری و تجربی لازم برای به‌کارگیری شبکه عصبی در مرحله دوم مدل ترکیبی را فراهم می‌آورد.

آزمون استحکام روش‌ها

با توجه به اینکه در فرضیه سوم مشخص شد داده‌ها دارای خودهمبستگی ($Durbin-Watson=0.7186$) و ناهمسانی واریانس هستند بهترین و استانداردترین آزمون استحکام کاربست برآوردگر $Newey-West (HAC)$ است. این روش ضرایب را تغییر نمی‌دهد، اما خطاهای استاندارد را اصلاح می‌کند تا حتی با وجود خودهمبستگی و ناهمسانی معناداری متغیرها قابل اتکا باشد.

جدول ۱۱- نتایج آزمون استحکام مدل با استفاده از برآوردگر $Newey-West (HAC)$

متغیر (Variable)	نماد (Symbol)	ضریب (Coefficient)	خطای استاندارد (Std Error)	آماره تی (t-Statistic)	مقدار احتمال (Prob)	وضعیت (Result)
عرض از مبدأ	C	۲.۱۴۵	۰.۵۸۴۱	۳.۶۷۲۳	۰.۰۰۰۳	معنادار
هزینه‌های مالی	lnFC	۰.۳۱۲۸	۰.۰۷۴۵	۴.۱۹۸۶	۰.۰۰۰۰	معنادار
کل دارایی‌ها	lnTA	۰.۴۵۶۲	۰.۰۹۲۱	۴.۹۵۳۳	۰.۰۰۰۰	معنادار
نسبت جاری	CR	۰.۱۲۴۵	۰.۰۵۱۲	۲.۴۳۱۶	۰.۰۱۵۴	معنادار
تورم	INF	-۰.۰۸۷۴	۰.۰۴۱	-۲.۱۳۱۷	۰.۰۳۳۶	معنادار
نرخ ارز	EX	۰.۰۴۲۱	۰.۰۲۸۹	۱.۴۵۶۷	۰.۱۴۵۹	غیرمعنادار

به‌منظور اطمینان از اعتبار و تکرارپذیری یافته‌های پژوهش و با توجه به نقض برخی فروض کلاسیک نظیر خودهمبستگی در باقیمانده‌ها (مشاهده‌شده در آزمون فرضیه سوم) مدل نهایی مجدداً با رویکرد برآوردگر نیوی - وست ($Newey-West$) که نسبت به خودهمبستگی و ناهمسانی واریانس مقاوم است (HAC)، آزمون می‌شود. نتایج این بررسی (جدول ۱۱) نشان می‌دهد که تغییر روش برآورد هیچ‌گونه تغییری در جهت و معناداری روابط ایجاد نکرده است؛ به‌گونه‌ای که متغیرهای هزینه‌های مالی، دارایی‌ها و تورم همچنان در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار باقی ماندند و عدم معناداری نرخ ارز (با مقدار احتمال ۰/۱۴۵۹) نیز مجدداً تأیید گردید. این هم‌گرایی نتایج بیانگر آن است که یافته‌ها نسبت به نوسانات و خطاهای احتمالی مدل مقاوم بوده و نتایج به‌دست‌آمده از استحکام و قابلیت اتکای بالایی برای تصمیم‌گیری برخوردارند.

۷. بحث و نتیجه گیری

برآیند تحلیل‌های آماری و هوشمند در این پژوهش پرده از واقعیتی دوگانه در ساختار مالی صنعت داروسازی برداشت. نخست آنکه برخلاف تصور رایج مبنی بر سلطه مطلق نوسانات ارزی بر تمامی ارکان اقتصاد یافته‌های بخش رگرسیونی و آزمون‌های استحکام نشان می‌دهد که درآمد فروش شرکت‌های داروسازی بیش از آنکه تابع تلاطمات نرخ ارز باشد، متأثر از «ظرفیت‌های درون‌سازمانی» و «تورم عمومی» است. عدم معناداری نرخ ارز در تبیین نوسانات فروش گواهی بر وجود یک چتر حمایتی و سیاست‌های تنظیم‌گری دولتی است که این صنعت استراتژیک را تا حد زیادی از شوک‌های مستقیم ارزی ایزوله کرده است. در مقابل نقش برجسته هزینه‌های مالی و اندازه شرکت اثبات کرد که «مقیاس عملیاتی» و «مدیریت نقدینگی» پیشران‌های اصلی خلق درآمد در این اکوسیستم محسوب می‌شوند. در بعد روش‌شناسی، واکاوی باقیمانده‌های مدل خطی آشکار ساخت که رویکردهای کلاسیک اقتصادسنجی به دلیل ناتوانی در درک پیچیدگی‌های غیرخطی دچار نوعی «کوررنگی تحلیلی» در مواجهه با داده‌های مالی هستند. رد شدن فرضیه تصادفی بودن خطاها نشان داد که بخش مهمی از اطلاعات ارزشمند بازار در قالب الگوهای پنهان در دل باقیمانده‌ها نهفته مانده است؛ اطلاعاتی که مدل‌های خطی آن را نویز تلقی می‌کردند؛ اما در واقع سیگنال‌های حیاتی بازار بودند. اینجا بود که مدل ترکیبی با بهره‌گیری از هوش مصنوعی توانست با شناسایی این الگوهای غیرخطی دقت پیش‌بینی را به طرز چشمگیری ارتقا دهد و برتری «یادگیری ماشین» بر «برازش خطی» را در محیط‌های پرنوسان به اثبات رساند. این پژوهش پیام روشنی برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعت دارد. گذار از «مدیریت مبتنی بر شهود» به «تفسیر مبتنی بر الگوریتم». نتایج نشان می‌دهد که در دوران تلاطم اقتصادی، تکیه بر متغیرهای کلان بیرونی (نظیر ارز) برای پیش‌بینی آینده گمراه‌کننده است و راهکار پایدار، تمرکز بر معماری مالی درون‌بنگه‌ای و استفاده از ابزارهای هوشمند ترکیبی است. مدل توسعه‌یافته در این تحقیق ابزار آماری نیست و قطب‌نمایی برای عبور از عدم قطعیت‌هاست که نشان می‌دهد چگونه می‌توان با تلفیق منطق اقتصادی و قدرت محاسباتی، تصویری شفاف‌تر از آینده مالی ترسیم کرد.

از منظر کاربردی این یافته‌ها ضرورت یک چرخش پارادایمی در نظام تصمیم‌گیری مدیران صنعت داروسازی را دیکته می‌کند. مصونیت نسبی جریان درآمدی از نوسانات لحظه‌ای ارز، سیگنالی استراتژیک است تا بنگاه‌ها به جای انفعال در برابر متغیرهای کلان خارج از کنترل تمرکز خود را بر اهرم‌های عملیاتی درون‌زا نظیر بهینه‌سازی ساختار سرمایه و مدیریت هوشمندانه هزینه‌های تأمین مالی استوار سازند. در این راستا جایگزینی مدل‌های سنتی بودجه‌ریزی با سامانه‌های هوشمند ترکیبی، دیگر یک انتخاب خاص نیست یک الزام حیاتی برای کاهش خطای برآورد است. اقدامی که با آشکارسازی ناکارآمدی‌های پنهان و الگوهای غیرخطی بازار قدرت مانور بنگاه را از واکنش‌های تأخیری به کنشگری پیش‌دستانه ارتقا داده و امنیت سرمایه‌گذاری را در اتمسفر تورمی تضمین می‌کند.

قلمرو تعمیم‌پذیری این پژوهش محصور در حصار محدودیت‌های ساختاری است؛ به‌ویژه «گسست تفکیک زمانی» میان نوسانات لحظه‌ای بازار و تواتر فصلی صورت‌های مالی که موجب نوعی «کوررنگی موقت» در شکار شوک‌های آنی و ریزساختارهای ناشی از تحریم شده است. افزون بر این، سرشت جعبه‌سیاه در الگوریتم‌های عصبی اگرچه خطای پیش‌بینی را به حداقل رسانده اما تا حدی شفافیت علی در تبیین وزن‌دهی

درونی سیناپس‌ها را در هاله‌ای از ابهام فرو برده است. از این‌رو افق آتی در گرو گذر از شبکه‌های کم‌عمق به معماری‌های یادگیری عمیق نظیر شبکه‌های بازگشتی برای مدل‌سازی حافظه بلندمدت سری‌های زمانی و همچنین تلفیق آن با پارادایم هوش مصنوعی تفسیرپذیر است؛ رویکردی تکاملی که بتواند دقت الگوریتمی را با منطق شهودی آشتی داده و با گشودن جعبه‌سیاه محاسباتی مدل را برای تصمیم‌گیران استراتژیک به یک اتاق شیشه‌ای تحلیل بدل سازد. از منظر سیاست‌گذاری، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز سیاست‌های حمایتی بر تثبیت هزینه‌های مالی و تسهیل دسترسی به منابع مالی می‌تواند اثرگذاری بیشتری بر عملکرد شرکت‌های داروسازی نسبت به کنترل مستقیم نرخ ارز داشته باشد.

۸. مراجع

1. Acioli, C., Scavarda, A., & Wahl, A. (2021). Industry 4.0 in the pharmaceutical industry: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(24), 13612. <https://doi.org/10.3390/su132413612>
2. Amende, N., Knauer, A., Li, M., & Briesen, H. (2019). Size-independent manufacturing of pharmaceutical granules in a continuous regime. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 14(3), 223–233.
3. Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1979). A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*, 47(5), 1287–1294.
4. Greene, W. H. (2018). *Econometric analysis* (8th ed.). Pearson.
5. Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics* (5th ed.). McGraw-Hill Irwin.
6. Laínez, J. M., & Reklaitis, G. V. (2012). Challenges and opportunities in enterprise-wide optimization in the pharmaceutical industry. *Computers & Chemical Engineering*, 42, 136–155. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.07.002>
7. Li, Y. (2025). Analysis of enterprise economic benefits based on hybrid regression and neural network model. *International Journal of Trade, Economics and Finance*, 16(1), 12–18.
8. Myerson, P. (2015). *Supply chain and logistics management made easy: Methods and applications for planning, operations, integration, control and improvement, and network design*. Pearson Education.
9. Newey, W. K., & West, K. D. (1987). A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix. *Econometrica*, 55(3), 703–708.

10. Reinhardt, H., Rommerskirchen, A., & Gernaey, K. V. (2020). Continuous manufacturing of pharmaceuticals: A review of the current state and future perspectives. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(8), 2055–2068.
11. Shah, N. (2004). Pharmaceutical supply chains: Key issues and strategies for optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 28(11), 929–941.
12. Troup, G. M., & Georgakis, C. (2013). Process systems engineering tools for the pharmaceutical industry. *Computers & Chemical Engineering*, 51, 157–171.
13. Wahlgren, C., Skepu, B., & Vreman, R. (2018). Application of historical data for process understanding and monitoring. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 107(2), 522–530.
14. White, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4), 817–838.
15. Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric analysis of cross section and panel data* (2nd ed.). MIT Press.