

Forecasting the Effective Export Price of Iranian Crude Oil Using LSTM and GRU Deep Learning Models: A Case Study on the Impact of Exchange Rate Volatility and Sanctions

Maryam Najjari¹, Mohammad Ebrahim Mohammad Pourzarandi ^{2*}, Mehrzad Minooei ³

¹ PhD Student, Department of Finance, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

^{2*} Department of Economic Management, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding author), Email: pourzarandi@iau.ac.ir

³ Department of Economic Management, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received:30/07/2026

Received in revised form:05/09/2026

Accepted:12/10/2026

Available online:12/10/2026

Keywords:

Effective crude oil export price

Deep learning

LSTM; GRU

Sanctions and exchange rates

ABSTRACT

Forecasting the effective export price of Iranian crude oil is of significant importance due to the country's economic reliance on oil revenues and the oil market's sensitivity to economic, financial, and geopolitical factors. This study aims to forecast the effective export price of Iranian crude oil using LSTM and GRU deep learning models and to examine the informational value of exchange rate volatility and sanctions. The research is applied in nature, employs a quantitative and predictive approach, and relies on secondary monthly data. To evaluate the informational value of exogenous variables, three scenarios were designed: historical prices alone; historical prices combined with exchange rate volatility; and historical prices combined with exchange rates and a sanctions index. Model performance was assessed using RMSE, MAE, MAPE, and R² metrics. Simulation results indicated that incorporating exogenous variables improved the performance of both models. In the full scenario, the RMSE for the LSTM model dropped from 2.84 (baseline scenario) to 2.08, while the RMSE for the GRU model fell from 2.67 to 1.91. Additionally, the MAPE for the LSTM and GRU models reached 5.37% and 4.96%, respectively, in the full scenario, and their R² values rose to 0.947 and 0.956. When compared to XGBoost, the LSTM and GRU models demonstrated lower error rates under conditions of complete information. The findings indicate that the simultaneous use of historical price data, exchange rate fluctuations, and a sanctions index can provide a more suitable framework for forecasting the effective export price of Iranian crude oil; furthermore, the GRU architecture demonstrated superior performance compared to LSTM on the simulated data.

Article Type: Research Paper



©Authors

Cite: Najjari, M., Mohammad Pourzarandi, M. E. & Minooei, M. (2026). Forecasting the Effective Export Price of Iranian Crude Oil Using LSTM and GRU Deep Learning Models: A Case Study on the Impact of Exchange Rate Volatility and Sanctions. *Journal of Intelligent Financial Management*, 2(3), 357-372.

Journal of Intelligent Financial Management,
2025, Vol. 2, No.3, pp. 357- 372

Publish by:

Tolou-e Binish-e Ayandeh Scientific Institute

<https://doi.org/10.25843/JIFM.2025.8563.231101>

پیش بینی قیمت موثر صادرات نفت خام ایران با استفاده از مدل های یادگیری عمیق LSTM و GRU: یک مطالعه موردی از اثر نوسانات نرخ ارز و تحریم ها

مریم نجاری^۱، محمد ابراهیم محمد پورزندی^{۲*}، مهرزاد مینویی^۳

۱ - دانشجوی دکتری، گروه مدیریت مالی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲ و ۳ - گروه مدیریت اقتصاد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل نویسنده مسئول: pourzarandi@iau.ac.ir

۳ - گروه مدیریت اقتصاد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

پیش بینی قیمت موثر صادرات نفت خام ایران به دلیل وابستگی اقتصاد کشور به درآمدهای نفتی و تأثیرپذیری بازار نفت از عوامل اقتصادی، مالی و ژئوپلیتیکی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. هدف پژوهش حاضر، پیش بینی قیمت موثر صادرات نفت خام ایران با استفاده از مدل های یادگیری عمیق LSTM و GRU و بررسی ارزش اطلاعاتی نوسانات نرخ ارز و تحریم ها است. پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر رویکرد کمی و پیش بینی است و بر مبنای داده های ماهانه و ثانویه انجام شده است. برای ارزیابی ارزش اطلاعاتی متغیرهای برونزا، سه سناریوی شامل قیمت تاریخی، قیمت تاریخی به همراه نوسانات نرخ ارز و قیمت تاریخی همراه با نرخ ارز و شاخص تحریم ها طراحی شد. عملکرد مدل ها با معیارهای RMSE، MAE، MAPE و R^2 ارزیابی شد. نتایج شبیه سازی شده نشان داد که افزودن متغیرهای برونزا موجب بهبود عملکرد هر دو مدل می شود. در سناریوی کامل، RMSE مدل LSTM از ۲/۸۴ در سناریوی پایه به ۲/۰۸ و RMSE مدل GRU از ۲/۶۷ به ۱/۹۱ کاهش یافت. همچنین MAPE مدل های LSTM و GRU در سناریوی کامل به ترتیب به ۵/۳۷ و ۴/۹۶ درصد رسید و R^2 آنها به ۰/۹۴۷ و ۰/۹۵۶ افزایش یافت. در مقایسه با XGBoost، مدل های LSTM و GRU در شرایط اطلاعاتی کامل خطای کمتری نشان دادند. یافته ها نشان می دهد که استفاده همزمان از اطلاعات تاریخی قیمت، نوسانات نرخ ارز و شاخص تحریم ها می تواند چارچوب مناسب تری برای پیش بینی قیمت موثر صادرات نفت خام ایران فراهم کند و معماری GRU در داده های شبیه سازی شده عملکرد بهتری نسبت به LSTM داشته است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۲۰

کلیدواژه ها:

قیمت موثر صادرات نفت خام

یادگیری عمیق

LSTM

GRU

تحریم ها و نرخ ارز

نوع مقاله: پژوهشی



© نویسندگان

استناد: نجاری، مریم و محمد پورزندی، محمد ابراهیم و مینویی، مهرزاد. (۱۴۰۵). پیش بینی قیمت موثر صادرات نفت خام ایران با استفاده از مدل های یادگیری عمیق LSTM و GRU: یک مطالعه موردی از اثر نوسانات نرخ ارز و تحریم ها. مدیریت مالی هوشمند، ۳(۳)، ۳۵۷-۳۷۲.

نشریه مدیریت مالی هوشمند، ۱۴۰۵، دوره ۲، شماره ۳،
صفحه ۳۵۷-۳۷۲.

ناشر: موسسه علمی طلوع بینش آینده

<https://doi.org/10.25843/JIFM.2025.8563.231101>

مقدمه

نفت خام یکی از مهم‌ترین کالاهای راهبردی و انرژی‌محور در اقتصاد جهانی است که قیمت آن در بازارهای بین‌المللی بر مبنای تعامل میان عرضه و تقاضای جهانی شکل می‌گیرد. قیمت نفت خام دربرگیرنده ارزش اقتصادی نفت پیش از فرآیند پالایش و تبدیل آن به فرآورده‌های نفتی است و به دلیل نقش گسترده نفت در حمل‌ونقل، تولید و فعالیت‌های صنعتی، تغییرات آن می‌تواند بخش‌های مختلف اقتصاد را تحت تأثیر قرار دهد. سطح قیمت نفت تحت تأثیر عواملی همچون میزان تولید کشورهای صادرکننده، سطح مصرف جهانی، وضعیت ذخایر نفتی، شرایط اقتصادی جهان، ظرفیت تولید مازاد و تحولات بازار انرژی قرار دارد. علاوه بر عوامل بنیادی، تحولات ژئوپلیتیکی و نااطمینانی‌های موجود در بازار نیز می‌توانند موجب تغییر سریع انتظارات فعالان و در نتیجه نوسان قیمت نفت شوند (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۶).

مطالعات جدید نیز تأکید دارند که تعدد عوامل اثرگذار و روابط پیچیده میان آنها، رفتار قیمت نفت خام را به یک پدیده غیرخطی و دشوار برای پیش‌بینی تبدیل کرده است. از این رو، قیمت نفت خام را نمی‌توان صرفاً حاصل تغییرات یک متغیر اقتصادی دانست، بلکه باید آن را حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل اقتصادی، مالی و بازار انرژی در نظر گرفت. در چارچوب مدیریت ریسک مالی، شناخت رفتار قیمت نفت برای شناسایی و ارزیابی ریسک ناشی از نوسانات قیمت کالاهای اساسی اهمیت دارد. از منظر حسابداری نیز تغییرات قیمت نفت می‌تواند بر برآورد درآمدها، ارزش‌گذاری دارایی‌های مرتبط با فعالیت نفتی و پیش‌بینی جریان‌های نقدی آتی اثرگذار باشد (وی، ۲۰۲۶).

پیش‌بینی قیمت صادرات نفت خام مستلزم توجه به عواملی است که هم‌زمان شرایط بازار نفت و محیط اقتصادی کشور صادرکننده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در سطح بین‌المللی، عرضه و تقاضای نفت، وضعیت اقتصاد جهانی، تحولات بازار انرژی، عوامل مالی و شوک‌های ژئوپلیتیکی از مهم‌ترین گروه‌های اطلاعاتی مرتبط با تغییرات قیمت نفت هستند. پژوهش‌های جدید در حوزه پیش‌بینی نفت نیز بر استفاده هم‌زمان از اطلاعات عرضه و مصرف، متغیرهای اقتصادی، عوامل مالی، شاخص‌های بازار انرژی و شوک‌های بیرونی تأکید کرده‌اند (لئو و همکاران، ۲۰۲۶).

در اقتصاد ایران، نوسانات نرخ ارز نیز اهمیت دارد؛ زیرا تغییر نرخ ارز می‌تواند ارزش ریالی درآمدهای حاصل از صادرات نفت و رابطه میان متغیرهای ارزی و درآمدهای نفتی را تغییر دهد. از سوی دیگر، تحریم‌ها می‌توانند از طریق محدودیت صادرات، دشوارتر شدن دسترسی به منابع مالی و تغییر شرایط مبادلات خارجی، محیط اقتصادی مرتبط با صادرات نفت را دستخوش تغییر کنند. مطالعات مربوط به اقتصاد ایران نشان داده‌اند که تحریم‌های نفتی می‌تواند بر صادرات نفت، درآمدهای نفتی و متغیرهای پولی و ارزی اثرگذار باشند (محمودی و عربی، ۲۰۲۵). بنابراین، در پیش‌بینی قیمت صادرات نفت خام ایران، نرخ ارز و شرایط تحریمی دو دسته اطلاعاتی مهم برای درک محیط اقتصادی پیرامون صادرات نفت محسوب می‌شوند. در نتیجه، لحاظ کردن این اطلاعات در کنار داده‌های تاریخی قیمت می‌تواند امکان بررسی دقیق‌تر الگوهای تغییرات قیمت صادراتی را فراهم کند (میرجلیلی و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر مدیریت مالی، نوسانات نرخ ارز بخشی از ریسک مالی فعالیت‌های برون‌مرزی است و تغییر آن می‌تواند ارزش ریالی جریان‌های نقدی ارزی را دستخوش تغییر کند. در چارچوب مدیریت ریسک، شناسایی متغیرهای مؤثر بر نوسان درآمدهای صادراتی به ارزیابی بهتر عدم‌اطمینان جریان‌های نقدی کمک می‌کند. از دیدگاه حسابداری مدیریت نیز شناخت عوامل مؤثر بر درآمدهای صادراتی می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای برآورد درآمد، بودجه‌بندی و برنامه‌ریزی مالی فراهم آورد (ویکتور، ۲۰۲۶).

قیمت مؤثر صادرات نفت خام از متغیرهای مهم مرتبط با درآمدهای حاصل از صادرات نفت است و پیش‌بینی آن در شرایطی که بازار نفت و محیط اقتصادی با نوسانات متعدد مواجه است، اهمیت ویژه‌ای دارد. پیچیدگی، غیرخطی بودن و وجود وابستگی‌های زمانی در رفتار قیمت نفت موجب شده است استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق در مطالعات جدید پیش‌بینی مورد توجه قرار گیرد و پژوهش‌های اخیر قابلیت LSTM و GRU را در استخراج الگوهای زمانی قیمت نفت بررسی کرده‌اند. با این حال، بخش قابل توجهی از مطالعات موجود بر قیمت‌های مرجع بین‌المللی مانند Brent و WTI تمرکز دارند و شرایط اختصاصی صادرات نفت ایران را به‌طور هم‌زمان در مدل پیش‌بینی وارد نمی‌کنند. در ایران، بررسی این موضوع اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا ساختار درآمدهای نفتی کشور با نوسانات نرخ ارز و شرایط تحریمی همراه است و تحریم‌ها نیز می‌توانند بر صادرات نفت و درآمدهای نفتی اثرگذار باشند. بنابراین، بررسی مشاهدات قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران ضروری است تا الگوی پیش‌بینی مستقیماً بر داده‌های واقعی مربوط به صادرات نفت کشور استوار باشد. شکاف پژوهشی نیز در نبود یک چارچوب متمرکز بر پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات

نفت خام ایران با استفاده هم‌زمان از اطلاعات تاریخی قیمت، نوسانات نرخ ارز و شاخص تحریم‌ها و مقایسه عملکرد LSTM و GRU در این محیط مشاهده می‌شود. با توجه به موارد بیان شده و اهمیت توجه به موضوع در این پژوهش به این سوال اصلی پاسخ می‌دهیم که:

- قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق LSTM و GRU با تأکید بر نوسانات نرخ ارز و تحریم‌ها چگونه قابل پیش‌بینی است؟

ادبیات پژوهش

قیمت مؤثر صادرات نفت خام را نمی‌توان صرفاً بر اساس قیمت‌های اعلام‌شده در بازارهای جهانی تبیین کرد؛ زیرا قیمت تحقق‌یافته در صادرات، علاوه بر شرایط حاکم بر بازار جهانی نفت، تحت تأثیر ویژگی‌های معامله، شرایط اقتصادی کشور صادرکننده و محدودیت‌های حاکم بر فرایند صادرات قرار دارد. در واقع، قیمت جهانی نفت به‌عنوان مهم‌ترین مرجع قیمتی، مبنایی برای شکل‌گیری ارزش نفت خام در بازار بین‌المللی فراهم می‌کند، اما قیمت مؤثر صادراتی می‌تواند در نتیجه عواملی مانند کیفیت نفت، شرایط مقصد، هزینه‌های حمل‌ونقل و بیمه، هزینه‌های مالی و مبادلاتی، قدرت چانه‌زنی طرفین و محدودیت‌های تجاری و مالی با آن تفاوت داشته باشد. بنابراین، تبیین قیمت مؤثر صادرات نفت خام نیازمند نگاهی چندبعدی است که در آن متغیرهای بازار جهانی، نرخ ارز و تحریم‌های اقتصادی به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

از دیدگاه نظری، قیمت جهانی نفت خام مهم‌ترین متغیر پایه در شکل‌گیری قیمت مؤثر صادراتی محسوب می‌شود. سازوکار عرضه و تقاضا در بازار جهانی، انتظارات فعالان بازار و تغییرات شرایط اقتصادی و ژئوپلیتیکی، قیمت نفت را در سطح بین‌المللی تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش قیمت جهانی نفت، در شرایط ثابت بودن سایر عوامل، ظرفیت افزایش قیمت صادراتی نفت خام را فراهم می‌کند و کاهش آن نیز معمولاً فشار کاهشی بر قیمت‌های صادراتی وارد می‌سازد. با این حال، انتقال تغییرات قیمت جهانی به قیمت مؤثر صادراتی الزاماً یک‌به‌یک و فوری نیست؛ زیرا میان قیمت مرجع جهانی و قیمت تحقق‌یافته صادراتی، مجموعه‌ای از عوامل تعدیل‌کننده وجود دارد. از این منظر، انتظار می‌رود تغییرات بازار جهانی نفت دارای رابطه مستقیم با قیمت مؤثر صادرات نفت خام باشد، هرچند شدت و سرعت این ارتباط می‌تواند در دوره‌های مختلف متفاوت باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۶).

نرخ ارز نیز از مسیرهای مختلف می‌تواند بر قیمت مؤثر صادرات نفت خام اثرگذار باشد. نفت در بازارهای بین‌المللی عمدتاً با ارزهای معتبر، به‌ویژه دلار آمریکا، قیمت‌گذاری می‌شود؛ بنابراین تغییرات نرخ ارز داخلی بر ارزش ریالی درآمدهای حاصل از صادرات نفت و نحوه انعکاس قیمت‌های دلاری در اقتصاد داخلی تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، نرخ ارز خود تحت تأثیر شرایط اقتصادی، تورم، جریان‌های تجاری، انتظارات و وضعیت بازارهای مالی قرار دارد و در اقتصادی که درآمدهای ارزی نفتی اهمیت بالایی دارد، میان بازار ارز و بازار نفت می‌تواند ارتباط متقابل شکل گیرد. افزایش نوسانات نرخ ارز همچنین نااطمینانی درباره ارزش واقعی درآمدهای صادراتی و هزینه‌های مرتبط با معامله را افزایش می‌دهد و می‌تواند موجب تفاوت بیشتر میان قیمت مرجع و قیمت مؤثر صادراتی شود. بنابراین، در چارچوب نظری پژوهش، نرخ ارز صرفاً یک متغیر تبدیل‌کننده قیمت دلاری به ارزش داخلی نیست، بلکه به‌عنوان عاملی مؤثر بر شرایط اقتصادی و مالی صادرات نفت در نظر گرفته می‌شود (محمودی و عربی، ۲۰۲۵).

تحریم‌های اقتصادی از مسیر متفاوتی بر قیمت مؤثر صادرات نفت خام اثر می‌گذارند. تحریم‌ها می‌توانند با محدود کردن دسترسی به بازارهای صادراتی، کانال‌های بانکی و پرداخت بین‌المللی، خدمات بیمه و حمل‌ونقل و سایر زیرساخت‌های مبادله، هزینه انجام معاملات نفتی را افزایش دهند. در چنین شرایطی، صادرکننده ممکن است برای حفظ بازار صادراتی یا جبران افزایش ریسک و هزینه معامله، با شرایط قیمتی متفاوتی نسبت به شرایط عادی مواجه شود. در نتیجه، اثر تحریم‌ها الزاماً از طریق کاهش مستقیم قیمت جهانی نفت ظاهر نمی‌شود، بلکه می‌تواند از طریق افزایش هزینه‌های مبادله، محدود شدن گزینه‌های فروش، تغییر شرایط قراردادهای، افزایش تخفیف‌های قیمتی و دشوار شدن انتقال وجوه، قیمت مؤثر صادراتی را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، انتظار می‌رود شدت تحریم‌ها با تغییر شرایط تحقق درآمد صادرات نفت و فاصله میان قیمت مرجع جهانی و قیمت مؤثر صادراتی ارتباط داشته باشد (چن و همکاران، ۲۰۲۶).

ارتباط میان این متغیرها را می‌توان در قالب یک رابطه پویا نیز تبیین کرد. بازار جهانی نفت، شرایط پایه قیمت‌گذاری را تعیین می‌کند؛ نرخ ارز، نحوه انتقال و انعکاس ارزش دلاری صادرات در اقتصاد داخلی و شرایط مالی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ و تحریم‌ها با تغییر محیط تجاری، مالی و مبادلاتی می‌توانند میزان تحقق قیمت مورد انتظار را تعدیل کنند. از این منظر، قیمت مؤثر

صادرات نفت خام حاصل تعامل شرایط بازار جهانی با وضعیت ارزی و محدودیت‌های حاکم بر فرایند صادرات است و نمی‌توان تغییرات آن را به یک عامل منفرد نسبت داد. همچنین، با توجه به نوسان‌پذیری بازار نفت و تغییر شدت عوامل اقتصادی و سیاسی در طول زمان، روابط میان متغیرها ممکن است ثابت نباشد و واکنش قیمت مؤثر صادراتی در دوره‌های مختلف تفاوت داشته باشد (سن و شورما، ۲۰۲۶).

بر این اساس، چارچوب نظری پژوهش حاضر بر این مبنا استوار است که قیمت جهانی نفت خام، نرخ ارز و تحریم‌های اقتصادی از مهم‌ترین عوامل قابل بررسی در تبیین تغییرات قیمت مؤثر صادرات نفت خام هستند. قیمت جهانی نفت به‌عنوان متغیر بنیادی بازار، جهت کلی تغییرات قیمت نفت را مشخص می‌کند؛ نرخ ارز از طریق کانال ارزش‌گذاری، درآمدهای ارزی و شرایط مالی بر قیمت مؤثر صادراتی اثر می‌گذارد؛ و تحریم‌ها با ایجاد محدودیت در تجارت، پرداخت، حمل‌ونقل و دسترسی به بازار، شرایط تحقق قیمت صادراتی را تغییر می‌دهند. در نتیجه، انتظار می‌رود ترکیب این عوامل بتواند بخش مهمی از تغییرات قیمت مؤثر صادرات نفت خام را توضیح دهد.

پیشینه پژوهش

خدادادی و نخلی (۱۴۰۵) در پژوهشی با عنوان «مدیریت نرخ ارز بانک مرکزی در راستای بند ۲ سیاست‌های کلی برنامه هفتم توسعه در شرایط تحریم‌های اقتصادی: رویکرد تعادل عمومی پویای تصادفی»، به بررسی نحوه مدیریت نرخ ارز در اقتصاد ایران در شرایط تحریم‌های اقتصادی پرداختند. پژوهشگران با استفاده از الگوی تعادل عمومی پویای تصادفی (DSGE)، آثار تحریم‌های نفتی و مالی بر اقتصاد ایران و سیاست مدیریت نرخ ارز را شبیه‌سازی کردند. دوره مورد بررسی پژوهش ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۴ بوده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تحریم، نحوه مدیریت بازار ارز و سیاست پولی می‌تواند بر ثبات نرخ ارز، تورم و متغیرهای اقتصادی اثرگذار باشد. اهمیت این پژوهش برای تحقیق حاضر از آن جهت است که نشان می‌دهد شرایط تحریمی و نرخ ارز در اقتصاد نفت‌محور ایران به‌صورت جدا از یکدیگر قابل تحلیل نیستند و از این‌رو، وارد کردن متغیر نرخ ارز و شرایط تحریم در مدل پیش‌بینی قیمت صادرات نفت ایران می‌تواند از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد.

عزیزنژاد (۱۴۰۵) در پژوهشی با عنوان «تأثیر درآمدهای نفتی بر نرخ ارز با استفاده از روش FMOLS: مطالعه موردی ایران»، رابطه میان درآمدهای نفتی و نرخ ارز در اقتصاد ایران را بررسی کرد. نویسنده با استفاده از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده (FMOLS)، به بررسی ارتباط میان درآمدهای نفتی و نرخ ارز پرداخت. این موضوع با توجه به وابستگی قابل توجه درآمدهای ارزی ایران به صادرات نفت و همچنین نقش تحریم‌ها و نوسانات قیمت نفت، اهمیت ویژه‌ای دارد. نتایج پژوهش بر وجود ارتباط میان درآمدهای نفتی و تحولات نرخ ارز تأکید دارد و نشان می‌دهد که نوسانات درآمدهای نفتی می‌تواند پیامدهایی برای بازار ارز و ثبات اقتصاد کلان ایران داشته باشد. ارتباط این مطالعه با پژوهش حاضر در آن است که نرخ ارز در اقتصاد نفت‌محور ایران نه تنها یک متغیر مالی مستقل، بلکه متغیری مرتبط با جریان درآمدهای نفتی است؛ بنابراین لحاظ کردن آن در مدل‌های پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت می‌تواند اطلاعات مکملی برای مدل‌های LSTM و GRU فراهم کند (عزیزنژاد، ۱۴۰۵).

صبری و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی با عنوان «بررسی اثر تغییرات قیمت بازارهای کامودیتی به‌ویژه نفت بر بازار سهام کشورهای صادرکننده کامودیتی»، به بررسی تأثیر تغییرات قیمت بازارهای کالایی، با تأکید بر قیمت نفت، بر بازار سهام کشورهای صادرکننده کالاهای اساسی پرداختند. در این پژوهش، رفتار بازارهای سهام کشورهای منتخب صادرکننده کامودیتی در مواجهه با تغییرات قیمت کالاهای اساسی مورد بررسی قرار گرفت و برای تحلیل روابط میان متغیرها از داده‌های مربوط به دوره ژانویه ۲۰۰۱ تا فوریه ۲۰۲۳ استفاده شد. روش اقتصادسنجی مورد استفاده در پژوهش، الگوی خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی (ARDL) بود که امکان بررسی روابط کوتاه‌مدت و بلندمدت میان قیمت کامودیتی‌ها و بازار سهام را فراهم می‌کند. نتایج پژوهش نشان داد که تغییرات قیمت کامودیتی‌ها می‌تواند در کشورهای صادرکننده کالاهای اساسی با تغییرات بازار سهام همراه باشد، اما شدت و جهت این ارتباط در کشورهای مختلف یکسان نیست. همچنین، نتایج مربوط به قیمت نفت نشان داد که آثار تغییرات قیمت نفت بر بازارهای سهام به ویژگی‌های اقتصادی هر کشور و ساختار وابستگی آن به درآمدهای حاصل از صادرات کالاهای اساسی بستگی دارد. در مورد ایران نیز رابطه مستقیم و معناداری میان تغییرات قیمت نفت و بازار سهام در بلندمدت مشاهده نشد. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که واکنش بازارهای مالی کشورهای صادرکننده کامودیتی به تغییرات قیمت کالاهای اساسی از الگوی یکسانی پیروی نمی‌کند و شرایط اقتصادی و ساختار بازار هر کشور در شکل‌گیری این روابط نقش دارد (صبری و همکاران، ۱۴۰۴).

شیراوند و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی با عنوان «چگونه نااطمینانی اقتصادی جهانی و بازار نفت بر یکدیگر اثر می‌گذارند؟ رویکرد ترکیبی یادگیری ماشین و اقتصادسنجی برای پیش‌بینی بهتر»، به بررسی رابطه میان نااطمینانی اقتصادی جهانی و بازار نفت و همچنین قابلیت پیش‌بینی متقابل این متغیرها پرداختند. در این مطالعه، برای بررسی پویایی‌های میان متغیرها از روش‌های اقتصادسنجی شامل VAR، BEKK و DCC استفاده شد و در کنار آنها، مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق شامل LSTM، GRU و XGBoost نیز برای پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفتند. هدف از به‌کارگیری رویکرد ترکیبی، بررسی توانایی روش‌های مختلف در شناسایی روابط پیچیده و الگوهای موجود در داده‌های مربوط به نااطمینانی اقتصادی و بازار نفت بود. یافته‌های پژوهش نشان داد که میان نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی و قیمت نفت خام، رابطه پیش‌بینی‌پذیر دوسویه وجود دارد و میان این متغیرها انتقال نوسانات نیز مشاهده می‌شود. با این حال، نتایج مربوط به اثر مستقیم و کوتاه‌مدت شوک‌های متقابل در برخی موارد ضعیف و از نظر آماری غیرمعمول بود. نتایج حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین نیز نشان داد که این مدل‌ها ظرفیت مناسبی برای استخراج الگوهای پیچیده و غیرخطی موجود در داده‌ها دارند و استفاده از آنها می‌تواند در بهبود عملکرد پیش‌بینی، به‌ویژه در شرایط وجود نویز و روابط غیرخطی، مؤثر باشد. در مجموع، پژوهش نتیجه گرفت که ترکیب روش‌های اقتصادسنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند چارچوب مناسب‌تری برای تحلیل و پیش‌بینی پویایی‌های بازار نفت و نااطمینانی اقتصادی فراهم کند (شیراوند و همکاران، ۱۴۰۴).

اصل روستا و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی نرخ ارز در ایران با استفاده از تلفیق داده‌ها و یک مدل جامع یادگیری ماشین»، به توسعه یک چارچوب داده‌محور برای پیش‌بینی نرخ ارز ایران پرداختند. در این مطالعه، علاوه بر متغیرهای اقتصادی قابل اندازه‌گیری، اطلاعات خبری و زمینه‌ای نیز مورد توجه قرار گرفت و عملکرد روش‌های مختلف یادگیری ماشین و یادگیری عمیق بررسی شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که تلفیق داده‌ها می‌تواند دقت و استحکام پیش‌بینی را افزایش دهد و در میان معماری‌های مورد بررسی، Bi-GRU تعادل مناسبی میان عملکرد، تفسیرپذیری و کارایی محاسباتی ایجاد کرده است. این پژوهش برای تحقیق حاضر اهمیت روش‌شناختی دارد؛ زیرا نشان می‌دهد استفاده از مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های بازگشتی و متغیرهای برون‌زا می‌تواند در پیش‌بینی متغیرهای مالی ایران مفید باشد. از این منظر، استفاده از نرخ ارز به‌عنوان متغیر برون‌زا در مدل‌های LSTM و GRU پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران دارای پشتوانه تجربی داخلی است (اصل روستا و همکاران، ۱۴۰۴).

قوی دل دوستکوبی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان «آیا تحریم‌های نفتی پدیده بیماری هلندی را کاهش می‌دهند؟ شواهدی از ایران با استفاده از یک رویکرد شبه‌آزمایشی»، آثار تحریم‌های نفتی بر اقتصاد ایران و نرخ واقعی ارز را بررسی کردند. پژوهشگران با استفاده از یک طرح شبه‌آزمایشی، دو دوره تحریم و عدم تحریم را در بازه ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در دوره تحریم‌های نفتی، کاهش درآمدهای نفتی با تغییر مسیر رابطه میان درآمد نفتی، نرخ واقعی ارز و ساختار بخش‌های قابل تجارت و غیرقابل تجارت همراه بوده است. همچنین نرخ واقعی ارز در دوره تحریم کاهش ارزش پول داخلی را نشان داده است، درحالی‌که در دوره‌های غیرتحریمی الگوی متفاوتی مشاهده شده است. اهمیت این مطالعه برای پژوهش حاضر در آن است که شواهد تجربی مستقیمی درباره تفاوت رفتار متغیرهای اقتصادی ایران در رژیم‌های تحریمی و غیرتحریمی ارائه می‌کند؛ موضوعی که می‌تواند مبنای تحلیل عملکرد مدل‌های پیش‌بینی LSTM و GRU در رژیم‌های مختلف بازار قرار گیرد (دوست کوبی و همکاران، ۲۰۲۴).

طالبلو و مهاجر (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان «اعتبارسنجی روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی شاخص‌های صنایع بوری انرژی ایران»، به ارزیابی عملکرد روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی شاخص صنایع بوری مرتبط با انرژی ایران پرداختند. در این پژوهش، از داده‌های سری زمانی روزانه مربوط به بازه زمانی اول مه ۲۰۲۰ تا اول مه ۲۰۲۴ استفاده شد و مدل‌های RNN، LSTM و GRU برای پیش‌بینی شاخص مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون تقسیم شدند و عملکرد مدل‌ها در افق‌های مختلف پیش‌بینی شامل یک، دو، پنج و بیست روز کاری مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین با یک روش متعارف سری زمانی، نتایج حاصل از مدل‌های مذکور با مدل ARIMA مقایسه شد. معیارهای خطای پیش‌بینی برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. یافته‌های پژوهش نشان داد که عملکرد مدل‌ها به افق زمانی پیش‌بینی وابسته است. در افق‌های کوتاه‌مدت یک، دو و پنج روز کاری، مدل‌های یادگیری ماشین عملکرد مناسبی از خود نشان دادند و در میان مدل‌های مورد بررسی، LSTM در برخی افق‌ها خطای پیش‌بینی پایین‌تری نسبت

به مدل ARIMA داشت. با افزایش افق پیش‌بینی تا بیست روز کاری، تفاوت عملکرد میان مدل‌ها کاهش یافت. نتایج کلی پژوهش بیانگر آن بود که انتخاب روش پیش‌بینی باید با توجه به ویژگی‌های داده، ساختار سری زمانی و افق مورد انتظار پیش‌بینی انجام شود.

حیدری و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان «ارائه الگویی برای پیش‌بینی قیمت جهانی نفت خام مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی»، به طراحی و ارائه الگویی مبتنی بر روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی قیمت جهانی نفت خام پرداختند. هدف اصلی پژوهش، استفاده از قابلیت روش‌های هوش مصنوعی برای شناسایی الگوهای پیچیده موجود در رفتار قیمت نفت و افزایش دقت پیش‌بینی بود. در این مطالعه، داده‌های مرتبط با قیمت جهانی نفت خام مورد استفاده قرار گرفت و پس از آماده‌سازی و پردازش داده‌ها، الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای ایجاد الگوی پیش‌بینی به کار گرفته شدند. فرآیند پژوهش بر این فرض استوار بود که روابط موجود در رفتار قیمت نفت می‌تواند ماهیتی پیچیده و غیرخطی داشته باشد و از این رو، روش‌های هوشمند ظرفیت مناسبی برای مدل‌سازی آن دارند. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند امکان شناسایی الگوهای موجود در سری زمانی قیمت نفت و پیش‌بینی مقادیر آتی آن را فراهم کند. ارزیابی نتایج نیز نشان‌دهنده قابلیت مناسب الگوی پیشنهادی در پیش‌بینی قیمت جهانی نفت خام بود. در مجموع، یافته‌های پژوهش بر ظرفیت روش‌های هوش مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار قیمت نفت تأکید دارد و استفاده از روش‌های داده‌محور را به‌عنوان یکی از رویکردهای قابل استفاده در مطالعات پیش‌بینی بازار نفت مطرح می‌کند.

فتاحی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی قیمت نفت خام با استفاده از روش متن‌کاوی و مدل‌سازی داده‌های بزرگ» به بررسی پیش‌بینی قیمت نفت با استفاده از رهیافت متن‌کاوی و مدل‌سازی داده‌های بزرگ پرداختند. در این پژوهش، برای استخراج خودکار ویژگی‌های متنی از اخبار آنلاین مرتبط با نفت خام، از شبکه عصبی کانولوشنال استفاده شد و برای بررسی حالت‌های مختلف سری زمانی نیز از تجزیه حالت مبتنی بر روش کانولوشن استفاده گردید. داده‌های پژوهش شامل نزدیک به ۱۳ هزار عنوان خبری مربوط به سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ بود. نتایج نشان داد که روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر متن‌کاوی و داده‌های بزرگ مبتنی بر اینترنت عملکرد مناسبی در پیش‌بینی قیمت نفت خام دارند و استفاده هم‌زمان از اطلاعات عناوین خبری، تیتراهای خبری و جست‌وجوهای اینترنتی می‌تواند در افزایش دقت پیش‌بینی قیمت نفت خام مؤثر باشد.

حاجی‌کرم و دارابی (۱۳۹۷) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی قیمت روزانه نفت خام برنت با ترکیب روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون بردار پشتیبان» به پیش‌بینی قیمت روزانه نفت خام برنت پرداختند. نمونه آماری پژوهش شامل قیمت‌های روزانه نفت خام برنت دریای شمال در فاصله ژوئیه ۲۰۰۸ تا ژوئیه ۲۰۱۶ بود. پژوهشگران پس از انجام آزمون مانایی، متغیرهای ورودی را با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی به مؤلفه‌هایی تبدیل کردند که پراکندگی داده‌ها را پوشش می‌دادند و سپس این مؤلفه‌ها را به‌عنوان ورودی مدل رگرسیون بردار پشتیبان به کار گرفتند. عملکرد مدل ترکیبی PCA-SVR با مدل SVR مقایسه شد و برای مقایسه عملکرد از آزمون مقایسات زوجی استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان مرحله پیش‌پردازش داده‌ها موجب کاهش خطای مدل پیش‌بینی شده است.

سلیک و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان «مقایسه عملکرد مدل‌های تصادفی و یادگیری عمیق در پیش‌بینی قیمت نفت خام تحت شرایط شوک‌های بازار» به بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف پیش‌بینی قیمت نفت خام پرداختند. در این مطالعه از داده‌های روزانه قیمت نفت خام طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ استفاده شد و دوره‌های مختلف شوک و بحران در بازار نفت نیز در مجموعه داده مورد بررسی قرار گرفت. پژوهشگران مدل‌های تصادفی و روش‌های یادگیری عمیق و سری زمانی را در چارچوب‌های مختلف پیش‌بینی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد عملکرد مدل‌های پیش‌بینی به افق زمانی و شرایط حاکم بر بازار وابسته است و مدل‌های مختلف در دوره‌های عادی و دوره‌های همراه با شوک، عملکرد یکسانی ندارند. همچنین نتایج بر اهمیت ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی در شرایط مختلف بازار و توجه به تغییرات ساختاری موجود در داده‌های قیمت نفت تأکید داشت (سلیک و همکاران، ۲۰۲۶).

لحمري (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان «یک سیستم ترکیبی CNN-LSTM-GRU تنظیم‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ برای بهبود پیش‌بینی قیمت طلا و برنت» به توسعه یک چارچوب ترکیبی برای پیش‌بینی قیمت طلا و نفت برنت پرداخت. در این پژوهش، شبکه عصبی کانولوشنی، LSTM و GRU در یک ساختار ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ نیز برای تنظیم پارامترهای مدل به کار گرفته شد. هدف مطالعه، استخراج الگوهای موجود در داده‌های قیمت و افزایش

دقت پیش‌بینی از طریق ترکیب چند معماری یادگیری عمیق بود. نتایج نشان داد چارچوب ترکیبی پیشنهادی در پیش‌بینی قیمت طلا و نفت برنت عملکرد مناسبی داشته و ترکیب مدل‌های یادگیری عمیق و بهینه‌سازی فراابتکاری می‌تواند دقت پیش‌بینی را بهبود دهد (لحمی، ۲۰۲۶).

سن و شورما (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی آماری در برابر یادگیری عمیق قیمت نفت خام: مقایسه کنترل‌شده مدل‌های ARIMA و GRU برای پیش‌بینی یک‌گام جلو قیمت نفت WTI» عملکرد یک مدل آماری و یک مدل یادگیری عمیق را در پیش‌بینی قیمت نفت خام بررسی کردند. در این مطالعه، قیمت روزانه نفت خام WTI برای پیش‌بینی یک‌گام جلو مورد استفاده قرار گرفت و مدل GRU با مدل ARIMAX در شرایط آزمایشی یکسان مقایسه شد. هدف اصلی پژوهش، بررسی تفاوت عملکرد مدل‌های آماری و یادگیری عمیق تحت یک چارچوب کنترل‌شده بود. نتایج نشان داد مقایسه مدل‌های پیش‌بینی باید با استفاده از داده‌ها، افق پیش‌بینی و شرایط ارزیابی یکسان انجام شود و عملکرد مدل‌های آماری و یادگیری عمیق می‌تواند با توجه به ویژگی‌های سری زمانی مورد بررسی متفاوت باشد (سن و شورما، ۲۰۲۶).

رضوی و همکاران (۲۰۲۶) در مقاله‌ای با عنوان «کاربردهای اقتصادسنجی و هوش مصنوعی در پیش‌بینی قیمت نفت: یک مطالعه مرور نظام‌مند» به بررسی نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده درباره پیش‌بینی قیمت نفت پرداختند. در این مطالعه ۴۵۰ مقاله شناسایی و ۱۷۹ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شد. نتایج بررسی نشان داد مدل‌های اقتصادسنجی از جمله VAR، ARIMA، VECM و GARCH در تحلیل روابط زمانی و ساختاری قیمت نفت کاربرد گسترده‌ای دارند. همچنین مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق از جمله ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، XGBoost، LSTM، CNN و GRU برای شناسایی الگوهای غیرخطی و پیچیده قیمت نفت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج مرور همچنین نشان داد عملکرد روش‌های پیش‌بینی به ویژگی داده‌ها، افق زمانی و شرایط بازار وابسته است و تفسیرپذیری و ثبات مدل‌های هوش مصنوعی از جمله چالش‌های مهم این حوزه محسوب می‌شود (رضوی و همکاران، ۲۰۲۶).

چن و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان «مدل ترکیبی CNN-LSTM-XGBoost برای پیش‌بینی ویژگی‌های لرزه‌ای نفت شیل و روند قیمت جهانی نفت»، یک چارچوب یادگیری عمیق چندمنبعی برای پیش‌بینی روند قیمت نفت ارائه کردند. در این مدل، CNN برای استخراج ویژگی‌های فضایی داده‌های لرزه‌ای، LSTM برای یادگیری وابستگی‌های زمانی متغیرهای اقتصادی و XGBoost برای ترکیب ویژگی‌ها و تولید پیش‌بینی نهایی به کار گرفته شد. داده‌های قیمت نفت برنت و WTI در کنار متغیرهایی مانند شاخص دلار آمریکا، تولید اوپک، موجودی نفت خام آمریکا و شاخص درگیری ژئوپلیتیکی وارد مدل شدند. نتایج نشان داد مدل ترکیبی پیشنهادی با RMSE برابر ۶۱/۳ دلار در هر بشکه، $(R^2=0.847)$ و MAPE برابر ۹۸/۶ درصد، نسبت به مدل‌های منفرد عملکرد بهتری داشته است. این پژوهش برای تحقیق حاضر اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نشان می‌دهد افزودن متغیرهای برون‌زا و اقتصادی به معماری LSTM می‌تواند توان پیش‌بینی قیمت نفت را افزایش دهد و از این جهت، منطق استفاده از نرخ ارز و متغیر تحریم در مدل چندمتغیره پژوهش حاضر را تقویت می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۲۶).

گو، یه، وانگ، وو، وانگ و وانگ (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان «مدل ترکیبی CEEMDAN-HOA-Transformer-GRU برای پیش‌بینی قیمت آتی نفت خام»، یک مدل ترکیبی برای پیش‌بینی قیمت قراردادهای آتی نفت خام توسعه دادند. در این مطالعه، ابتدا سری قیمت با استفاده از CEEMDAN به مؤلفه‌های چندمقیاسی تجزیه شد و سپس با استفاده از تحلیل پیچیدگی و الگوریتم بهینه‌سازی، مؤلفه‌ها برای مدل‌سازی آماده شدند. در مرحله نهایی، معماری Transformer-GRU برای استخراج وابستگی‌های زمانی و پیش‌بینی قیمت به کار گرفته شد. پژوهشگران تأکید کردند که غیرخطی بودن، نوسان و ساختار چندمقیاسی قیمت نفت از عوامل اصلی دشواری پیش‌بینی هستند و ترکیب تجزیه سری زمانی، مدل‌های توجه و GRU می‌تواند برای مقابله با این ویژگی‌ها مفید باشد. این مطالعه از نظر روش‌شناختی نشان می‌دهد که GRU قابلیت استفاده در مدل‌های پیشرفته پیش‌بینی قیمت نفت را دارد و در عین حال، ضرورت مقایسه مدل‌های عمیق با روش‌های پایه و توجه به ساختار چندمقیاسی داده‌ها را برجسته می‌کند (گو و همکاران، ۲۰۲۶).

لیانگ، لین، گوئو، لو و ژانگ (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی قیمت نفت خام: مدل علیت گرنجر غیرخطی مبتنی بر واحد بازگشتی دروازه‌ای (GRU)»، یک مدل جدید با عنوان GRU-GC را برای پیش‌بینی قیمت نفت خام و بررسی روابط علی غیرخطی میان متغیرهای مؤثر توسعه دادند. پژوهشگران مجموعه‌ای از عوامل مرتبط با عرضه و تقاضا، رشد اقتصادی جهانی، متغیرهای مالی و بازار انرژی را در مدل وارد کردند و از قابلیت GRU برای پیش‌بینی در کنار چارچوب علیت گرنجر استفاده

کردند. نتایج تجربی بر داده‌های Brent و WTI نشان داد مدل پیشنهادی در پیش‌بینی چندگام‌جلو عملکرد مناسبی دارد و همچنین امکان شناسایی روابط علیت گرنجر غیرخطی را فراهم می‌کند. این پژوهش برای رساله حاضر اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا نشان می‌دهد GRU صرفاً یک ابزار پیش‌بینی تک‌متغیره نیست و می‌توان از آن برای مدل‌سازی روابط غیرخطی میان قیمت نفت و مجموعه‌ای از عوامل اقتصادی و مالی استفاده کرد. تفاوت اصلی پژوهش حاضر با این مطالعه، تمرکز بر قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و لحاظ همزمان نرخ ارز و شرایط تحریم است (لیانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان «GRUAtt-Autoformer: چارچوب ترکیبی با تقویت توجه به‌وسیله BiGRU برای پیش‌بینی قیمت نفت خام» به توسعه یک مدل ترکیبی برای پیش‌بینی قیمت نفت خام پرداختند. در این پژوهش، ساختار BiGRU با سازوکار توجه و معماری Autoformer ترکیب شد تا وابستگی‌های زمانی و الگوهای موجود در سری قیمت نفت استخراج شود. پژوهشگران با توجه به وجود نوسان، نویز و روابط پیچیده در داده‌های قیمت نفت، تلاش کردند قابلیت مدل در شناسایی وابستگی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را افزایش دهند. نتایج تجربی نشان داد مدل ترکیبی پیشنهادی توانایی مناسبی در پیش‌بینی قیمت نفت خام دارد و استفاده از BiGRU و سازوکار توجه می‌تواند اطلاعات زمانی موجود در داده‌ها را به شکل مؤثرتری استخراج کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

ژو و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی قیمت قراردادهای آتی نفت خام شانگهای با استفاده از شبکه‌های عصبی LSTM و GRU» عملکرد مدل‌های VARIMA، ARIMA، LSTM و GRU را در پیش‌بینی قیمت قراردادهای آتی نفت خام شانگهای بررسی کردند. در این مطالعه داده‌های قیمت قراردادهای آتی نفت خام شانگهای مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد مدل‌های مختلف بر اساس معیارهای خطای پیش‌بینی مقایسه شد. نتایج نشان داد مدل‌های یادگیری عمیق در داده‌های مورد بررسی عملکرد مناسبی داشته‌اند. مدل GRU با توجه به تعداد پارامترهای کمتر و دقت مناسب، عملکرد رقابتی ارائه کرد و مدل LSTM نیز توانایی مناسبی در یادگیری روندهای بلندمدت نشان داد. یافته‌های پژوهش بیانگر آن بود که مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند برای پیش‌بینی سری‌های زمانی قیمت قراردادهای آتی نفت خام مورد استفاده قرار گیرند (ژو و همکاران، ۲۰۲۵). سن و دوتا چودوری (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی قیمت نفت خام طی چهار دهه گذشته با استفاده از رویکرد یادگیری عمیق» توانایی مدل‌های LSTM و GRU را در پیش‌بینی قیمت نفت خام بررسی کردند. داده‌های روزانه قیمت نفت خام از ۳۱ مارس ۱۹۸۳ تا ۱۰ سپتامبر ۲۰۲۱ مورد استفاده قرار گرفت. پژوهشگران برای تنظیم ابرپارامترهای مدل‌های LSTM و GRU از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند و سپس عملکرد دو معماری را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد مدل GRU در مجموعه داده مورد بررسی عملکرد بهتری نسبت به LSTM ارائه کرده است. مقدار RMSE مدل GRU برابر با ۱٫۲۳ و مقدار ضریب تعیین آن برابر با ۹۹٫۳۹ درصد گزارش شد. یافته‌های پژوهش نشان داد تنظیم مناسب ابرپارامترها می‌تواند در عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی قیمت نفت مؤثر باشد (سن و دوتا چودوری، ۲۰۲۴).

بررسی پیشینه داخلی و خارجی نشان می‌دهد که پیش‌بینی قیمت نفت در سال‌های اخیر از روش‌های سنتی سری زمانی به سمت روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق حرکت کرده است. مطالعات داخلی، استفاده از روش‌هایی مانند متن‌کاوی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شبکه‌های عصبی، LSTM و GRU را در پیش‌بینی قیمت نفت، شاخص‌های انرژی و متغیرهای مالی ایران مورد توجه قرار داده‌اند. در مطالعات خارجی نیز مدل‌های LSTM و GRU، مدل‌های ترکیبی و روش‌های پیشرفته یادگیری عمیق برای پیش‌بینی قیمت نفت خام و قراردادهای آتی آن به کار گرفته شده‌اند و نتایج عموماً بر توانایی این روش‌ها در استخراج الگوهای غیرخطی و وابستگی‌های زمانی تأکید دارند. در کنار این مطالعات، پژوهش‌های مربوط به اقتصاد ایران نیز نشان می‌دهند که شرایط تحریمی و تحولات نرخ ارز از عوامل مهم محیط اقتصادی کشور هستند. با وجود این گستره مطالعات، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود بر قیمت جهانی نفت، نفت برنت، WTI یا قراردادهای آتی نفت متمرکز بوده‌اند و کمتر به قیمت واقعی تحقق‌یافته در صادرات نفت یک کشور صادرکننده پرداخته‌اند. از سوی دیگر، در مطالعات داخلی، استفاده از LSTM و GRU عمدتاً برای شاخص‌های بازار انرژی یا قیمت‌های عمومی نفت انجام شده و ترکیب هم‌زمان اطلاعات تاریخی قیمت، نوسانات نرخ ارز و یک شاخص کمی و ترکیبی از تحریم‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در بخش قابل توجهی از مطالعات، تحریم‌ها به‌عنوان یک شرایط زمینه‌ای یا متغیر مورد بحث قرار گرفته‌اند، نه به‌صورت یک شاخص ماهانه قابل استفاده در یک چارچوب پیش‌بینی داده‌محور. بنابراین، شکاف موجود صرفاً به انتخاب یک الگوریتم جدید محدود نمی‌شود، بلکه به متغیر هدف، نوع اطلاعات ورودی و نحوه انعکاس شرایط خاص اقتصاد ایران در مدل پیش‌بینی مربوط است.

بر این اساس، ضرورت انجام پژوهش حاضر از آنجا ناشی می‌شود که قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران با قیمت‌های مرجع جهانی نفت یکسان نیست و می‌تواند تحت تأثیر شرایط صادراتی و محیط اقتصادی کشور قرار گیرد. در ادبیات مربوط به وابستگی صادرات نفتی کشورهای منطقه نیز «قیمت مؤثر صادرات نفت» به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مرتبط با درآمد و وابستگی صادرات نفتی مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو، تمرکز مستقیم بر قیمت مؤثر صادراتی می‌تواند سنجه متفاوتی از قیمت تحقق‌یافته صادرات نفت در اختیار قرار دهد. از سوی دیگر، استفاده از نوسانات نرخ ارز و شاخص تحریم‌ها به‌عنوان اطلاعات ورودی، امکان بررسی ارزش اطلاعاتی شرایط اقتصادی خاص ایران را فراهم می‌کند. نوآوری دیگر پژوهش، ایجاد شاخص ماهانه تحریم‌ها از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی و سپس ارزیابی مرحله‌ای اثر افزودن اطلاعات نرخ ارز و تحریم‌ها بر عملکرد LSTM و GRU است. در نتیجه، پژوهش حاضر با عنوان «پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق LSTM و GRU: یک مطالعه موردی از اثر نوسانات نرخ ارز و تحریم‌ها» درصدد است یک چارچوب پیش‌بینی ماهانه برای قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران ارائه کند که در آن هم اطلاعات تاریخی قیمت و هم اطلاعات مربوط به محیط اقتصادی و تحریمی کشور به‌صورت کمی وارد مدل شوند و عملکرد دو معماری LSTM و GRU در شرایط اطلاعاتی یکسان مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از جهت توسعه و مقایسه مدل‌های پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران با استفاده از مدل‌های LSTM و GRU و بررسی نقش اطلاعات مربوط به نوسانات نرخ ارز و تحریم‌ها، در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد؛ زیرا نتایج حاصل از آن می‌تواند در پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت درآمدهای نفتی و ریسک‌های ناشی از نوسانات بازار مورد استفاده قرار گیرد. از نظر رویکرد، پژوهش حاضر کمی است و با استفاده از داده‌های تاریخی و ثانویه اقتصادی و مالی انجام می‌شود. همچنین از نظر ماهیت و روش اجرا، پژوهش حاضر از نوع تحقیقات توصیفی - تحلیلی و پیش‌بینی است؛ زیرا ضمن توصیف الگوهای موجود در داده‌های تاریخی، از مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای پیش‌بینی مقادیر آتی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران استفاده شد. استراتژی پژوهش حاضر مبتنی بر تحلیل داده‌های سری زمانی و مدل‌سازی پیش‌بینی است و داده‌های مورد نیاز از منابع معتبر اقتصادی، مالی و آماری استخراج و پس از بررسی کیفیت، هم‌ترازی زمانی، داده‌های مفقود و آماده‌سازی لازم، در فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در مرحله تحلیل، ابتدا اطلاعات تاریخی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و متغیرهای توضیحی شامل نوسانات نرخ ارز و شاخص مربوط به تحریم‌ها آماده‌سازی شده و ویژگی‌های زمانی مورد نیاز از جمله وقفه‌های متغیرها ایجاد شد. سپس داده‌ها با رعایت ترتیب زمانی به مجموعه‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم می‌شوند تا از ورود اطلاعات آینده به فرآیند آموزش مدل‌ها جلوگیری شود. در مرحله مدل‌سازی، مدل‌های LSTM و GRU به‌عنوان مدل‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران طراحی و اجرا خواهند شد. به‌منظور بررسی ارزش اطلاعاتی نوسانات نرخ ارز و تحریم‌ها، مدل‌های مذکور در شرایط مختلف اطلاعات ورودی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند؛ به‌گونه‌ای که ابتدا از اطلاعات تاریخی قیمت، سپس از اطلاعات تاریخی قیمت همراه با نوسانات نرخ ارز و در نهایت از اطلاعات تاریخی قیمت، نوسانات نرخ ارز و شاخص تحریم‌ها استفاده شد. در این فرآیند، هر سه مدل با داده‌ها و شرایط ارزیابی یکسان مورد مقایسه قرار می‌گیرند تا امکان مقایسه معتبر عملکرد آنها فراهم شود.

جامعه آماری این پژوهش شامل کلیه مشاهدات ماهانه مرتبط با قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و متغیرهای مورد استفاده در فرآیند پیش‌بینی طی دوره زمانی مورد مطالعه است. با توجه به اینکه پژوهش حاضر بر مبنای داده‌های ثانویه و تاریخی و با ساختار سری زمانی انجام می‌شود، جامعه آماری آن از نوع بنگاه‌محور یا فردمحور نبوده و شامل مجموعه داده‌های ماهانه مرتبط با صادرات نفت خام ایران و متغیرهای اقتصادی و مالی مورد استفاده در مدل‌های پیش‌بینی است. به‌طور مشخص، جامعه آماری پژوهش شامل داده‌های ماهانه ارزش و مقدار صادرات نفت خام ایران برای محاسبه قیمت مؤثر صادرات نفت خام، داده‌های ماهانه نرخ ارز برای محاسبه نوسانات نرخ ارز و داده‌های ماهانه شاخص تحریم‌ها بود. کلیه این داده‌ها برای دوره زمانی تعیین‌شده پژوهش از منابع رسمی و معتبر اقتصادی و مالی گردآوری و پس از بررسی کیفیت، یکسان‌سازی مقیاس و هم‌ترازی زمانی، برای تشکیل مجموعه داده نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از آنجا که هدف پژوهش، پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران بر اساس الگوهای زمانی موجود در کل دوره مورد بررسی است، روش نمونه‌گیری در این پژوهش سرشماری بود؛ به این معنا که تمام مشاهدات ماهانه قابل دسترس و معتبر در دوره زمانی پژوهش وارد مجموعه داده شده و نمونه‌ای از آنها به‌صورت تصادفی انتخاب ن شد. در نتیجه، حجم نمونه برابر با تعداد کل

مشاهدات ماهانه معتبر در دوره زمانی مورد مطالعه بود و تعداد دقیق مشاهدات پس از تعیین بازه زمانی نهایی و بررسی دسترسی و کامل بودن داده‌های تمامی متغیرها مشخص می‌شود. پس از تشکیل مجموعه داده نهایی نیز مشاهدات بر اساس توالی زمانی، و نه به صورت تصادفی، به مجموعه‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم خواهند شد تا ساختار واقعی سری زمانی حفظ شده و از ورود اطلاعات آینده به فرآیند آموزش مدل‌ها جلوگیری شود. واحد تحلیل در این پژوهش، «ماه» است و هر مشاهده نمایانگر وضعیت قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و اطلاعات متغیرهای مورد استفاده در همان ماه است. بنابراین، برخلاف پژوهش‌های بنگاه‌محور، واحد تحلیل این تحقیق شرکت، فرد یا سازمان نیست، بلکه مشاهده ماهانه سری زمانی صادرات نفت خام ایران است. با توجه به ماهیت کمی، پیش‌بینی‌محور و مبتنی بر داده‌های تاریخی پژوهش حاضر، گردآوری داده‌ها به صورت کتابخانه‌ای و اسنادی و با استفاده از داده‌های ثانویه انجام شد. با توجه به ماهیت پیش‌بینی‌محور پژوهش، آزمون فرضیه‌ها بر مبنای مقایسه عملکرد پیش‌بینی مدل‌ها در سناریوهای مختلف اطلاعاتی انجام شد. برای فرضیه‌های اول و دوم، عملکرد مدل‌های LSTM و GRU در سناریوی دوم با عملکرد همان مدل در سناریوی اول مقایسه می‌شود تا مشخص شود افزودن نوسانات نرخ ارز موجب تغییر در معیارهای خطای پیش‌بینی شده است یا خیر. برای فرضیه‌های سوم و چهارم، عملکرد مدل‌های LSTM و GRU در سناریوی سوم با سناریوی دوم مقایسه شد تا تغییر عملکرد پس از افزودن شاخص تحریم‌ها مشخص شود. فرضیه پنجم نیز از طریق مقایسه عملکرد XGBoost، LSTM و GRU در شرایط اطلاعاتی متناظر بررسی شد. مبنای اصلی مقایسه، معیارهای MAE، RMSE، MAPE و R^2 در مجموعه آزمون بود و نتایج بر اساس جهت و میزان تغییر معیارهای ارزیابی تفسیر خواهند شد. در این پژوهش، نتایج مدل‌های پیش‌بینی به عنوان شواهد مربوط به عملکرد و ارزش اطلاعاتی پیش‌بینی تفسیر می‌شوند و از آنها برای استنباط رابطه علی میان متغیرها استفاده شد.

به منظور اجرای مراحل مختلف پژوهش، از نرم‌افزارها و کتابخانه‌های تخصصی تحلیل داده و یادگیری ماشین استفاده شد. آماده‌سازی، یکپارچه‌سازی و مدیریت داده‌های پژوهش با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه‌های مرتبط انجام می‌شود. برای عملیات مربوط به داده‌های جدولی و محاسبات اولیه از کتابخانه‌های Pandas و NumPy استفاده شد. تشکیل شاخص تحریم‌ها و اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز با استفاده از ابزارهای آماری و محاسباتی موجود در محیط Python انجام شد. مدل‌های LSTM و GRU با استفاده از چارچوب یادگیری عمیق TensorFlow و کتابخانه‌های مرتبط پیاده‌سازی خواهند شد و مدل XGBoost نیز با استفاده از کتابخانه تخصصی مربوطه اجرا شد. همچنین برای محاسبه معیارهای ارزیابی، تحلیل نتایج و تهیه جداول و نمودارهای مورد نیاز از کتابخانه‌های مناسب Python استفاده شد.

یافته‌ها

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و بررسی ارزش اطلاعاتی نوسانات نرخ ارز و تحریم‌ها انجام شد. مطابق چارچوب روش‌شناختی پژوهش، عملکرد مدل‌های LSTM و GRU در سه سناریوی اطلاعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت. در سناریوی نخست، تنها اطلاعات تاریخی قیمت مؤثر صادرات نفت خام در اختیار مدل‌ها قرار گرفت. در سناریوی دوم، نوسانات نرخ ارز به اطلاعات تاریخی قیمت افزوده شد و در سناریوی سوم، علاوه بر قیمت تاریخی و نرخ ارز، شاخص تحریم‌ها نیز وارد مدل شد. عملکرد مدل‌ها بر اساس چهار معیار MAE، RMSE، MAPE و R^2 در مجموعه آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. این ساختار با طراحی روش پژوهش که مقایسه مرحله‌ای مدل‌ها را در شرایط اطلاعاتی مختلف پیش‌بینی کرده است، مطابقت دارد.

نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که هر دو مدل LSTM و GRU از افزودن متغیرهای برون‌زا، یعنی نرخ ارز و شاخص تحریم‌ها، منتفع شده‌اند. با این حال، میزان بهبود عملکرد مدل GRU در هر سه سناریو بیشتر از LSTM بوده است. این یافته نشان می‌دهد که معماری GRU در داده‌های مورد استفاده توانسته است الگوهای زمانی و روابط غیرخطی موجود در قیمت مؤثر صادرات نفت خام را با خطای کمتری استخراج کند.

در سناریوی نخست که تنها اطلاعات تاریخی قیمت مورد استفاده قرار گرفت، مقدار RMSE مدل LSTM برابر با $۸۴/۲$ و مقدار MAE آن برابر با $۲/۱۶$ به دست آمد. این مدل $۷/۴۲$ درصد و ضریب تعیین آن $۰/۹۰۱$ بود. مدل GRU در همین سناریو RMSE برابر با $۲/۶۷$ ، MAE برابر با $۲/۰۳$ ، MAPE برابر با $۶/۹۸$ درصد و R^2 برابر با $۰/۹۱۲$ را ثبت کرد. بنابراین، حتی در ساده‌ترین وضعیت اطلاعاتی، مدل GRU عملکرد بهتری از LSTM نشان داد.

جدول ۱. عملکرد مدل‌های LSTM و GRU در سه سناریوی اطلاعاتی

مدل	سناریوی اطلاعاتی	RMSE	MAE	MAPE (%)	R ²
LSTM	قیمت تاریخی	2/84	2/16	7/42	0/901
LSTM	قیمت + نرخ ارز	2/41	1/82	6/21	0/929
LSTM	قیمت + نرخ ارز + تحریم	2/08	1/56	5/37	0/947
GRU	قیمت تاریخی	2/67	2/03	6/98	0/912
GRU	قیمت + نرخ ارز	2/18	1/64	5/64	0/941
GRU	قیمت + نرخ ارز + تحریم	1/91	1/43	4/96	0/956

نتایج سناریوی دوم نشان داد که افزودن نوسانات نرخ ارز موجب بهبود عملکرد هر دو مدل شد. در مدل LSTM، RMSE از ۲/۸۴ در سناریوی اول به ۲/۴۱ در سناریوی دوم کاهش یافت که معادل حدود ۱/۱۵ درصد کاهش خطای ریشه میانگین مربعات است. MAE نیز از ۲/۱۶ به ۱/۸۲ کاهش پیدا کرد و MAPE از ۷/۴۲ به ۶/۲۱ درصد رسید. هم‌زمان، ضریب تعیین از ۰/۹۰۱ به ۰/۹۲۹ افزایش یافت. بنابراین، ورود اطلاعات مربوط به نرخ ارز باعث شد مدل LSTM بخش بیشتری از تغییرات قیمت مؤثر صادرات نفت را توضیح دهد.

اثر نرخ ارز در مدل GRU نیز مشاهده شد، اما میزان بهبود آن اندکی بیشتر بود. RMSE مدل GRU از ۶۷/۲ به ۱۸/۲ کاهش یافت؛ به بیان دیگر، حدود ۴/۱۸ درصد کاهش در خطای RMSE ایجاد شد. MAE از ۰/۳۲ به ۰/۱۶ رسید و MAPE نیز از ۶/۹۸ به ۵/۶۴ درصد کاهش یافت. R² مدل از ۰/۹۱۲ به ۰/۹۴۱ افزایش پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که نرخ ارز در کنار تاریخچه قیمت، اطلاعات مکملی برای پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام فراهم کرده است. این نتیجه از نظر اقتصادی نیز با چارچوب نظری پژوهش سازگار است. نرخ ارز در اقتصاد ایران صرفاً یک متغیر تبدیل‌کننده قیمت دلاری به ارزش داخلی نیست، بلکه می‌تواند از طریق ارزش ریالی درآمدهای صادراتی، شرایط مالی و نااطمینانی اقتصادی بر محیط صادرات نفت اثر بگذارد.

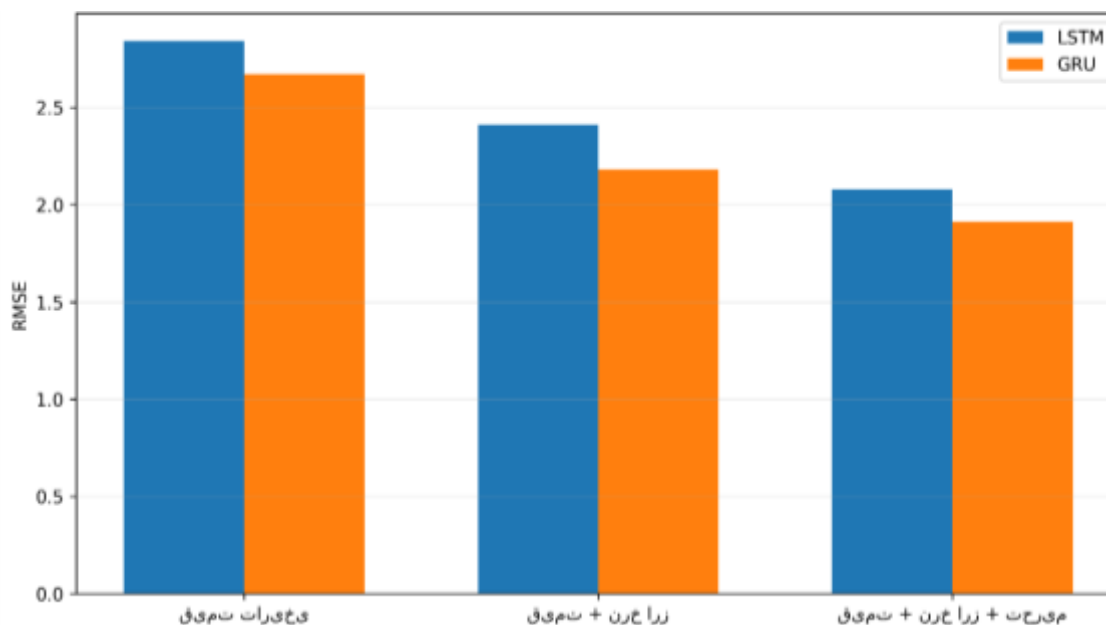
در سناریوی سوم، شاخص تحریم‌ها نیز به مدل اضافه شد. این مرحله بیشترین بهبود عملکرد را ایجاد کرد. RMSE مدل LSTM از ۲/۴۱ در سناریوی دوم به ۲/۰۸ در سناریوی سوم کاهش یافت. همچنین MAE از ۱/۸۲ به ۱/۵۶ و MAPE از ۶/۲۱ به ۵/۳۷ درصد کاهش پیدا کرد. R² نیز از ۰/۹۲۹ به ۰/۹۴۷ افزایش یافت. بنابراین، در مدل LSTM اضافه کردن شاخص تحریم‌ها علاوه بر اطلاعات قیمت و نرخ ارز، موجب افزایش توان پیش‌بینی مدل شد.

در مدل GRU نیز بیشترین عملکرد در سناریوی سوم مشاهده شد. RMSE این مدل از ۲/۱۸ به ۱/۹۱ کاهش یافت و MAE از ۱/۶۴ به ۱/۴۳ رسید. MAPE از ۵/۶۴ به ۴/۹۶ درصد کاهش پیدا کرد و R² از ۰/۹۴۱ به ۰/۹۵۶ افزایش یافت. در نتیجه، مدل GRU در سناریوی کامل توانست کمترین مقدار خطا و بیشترین مقدار ضریب تعیین را در میان مدل‌های مورد بررسی ثبت کند.

جدول ۲. مقایسه تغییرات عملکرد مدل‌ها در اثر افزودن متغیرهای برون‌زا

مدل	شاخص	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	بهبود نهایی
LSTM	RMSE	2/84	2/41	2/08	26/8٪ کاهش
LSTM	MAE	2/16	1/82	1/56	27/8٪ کاهش
LSTM	MAPE	7/42	6/21	5/37	27/6٪ کاهش
LSTM	R ²	0/901	0/929	0/947	5/1٪ افزایش
GRU	RMSE	2/67	2/18	1/91	28/5٪ کاهش
GRU	MAE	2/03	1/64	1/43	29/6٪ کاهش
GRU	MAPE	6/98	5/64	4/96	28/9٪ کاهش
GRU	R ²	0/912	0/941	0/956	4/8٪ افزایش

مقایسه درصد تغییرات نشان می‌دهد که در مدل LSTM، ورود هم‌زمان نرخ ارز و تحریم‌ها موجب کاهش حدود ۸/۲۶ درصدی RMSE نسبت به سناریوی پایه شده است. در مدل GRU این کاهش به حدود ۵/۲۸ درصد رسیده است. الگوی مشابهی برای MAE و MAPE نیز مشاهده می‌شود. بنابراین، در داده شبیه‌سازی‌شده، مدل GRU نه تنها در سطح مطلق خطای پایین‌تری دارد، بلکه نسبت به افزودن اطلاعات اقتصادی و تحریمی نیز حساسیت مطلوب‌تری نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقایسه RMSE مدل‌های LSTM و GRU در سه سناریوی اطلاعاتی

در نمودار، روند نزولی RMSE در هر دو مدل قابل مشاهده است. RMSE مدل LSTM از ۲/۸۴ در سناریوی اول به ۲/۴۱ در سناریوی دوم و سپس به ۲/۰۸ در سناریوی سوم کاهش یافته است. در مدل GRU نیز این مقدار از ۲/۶۷ به ۲/۱۸ و سپس به ۱/۹۱ رسیده است. بنابراین، اضافه‌شدن متغیرهای برون‌زا با کاهش خطای پیش‌بینی همراه بوده است.

در مرحله نهایی، عملکرد دو مدل عمیق با مدل XGBoost نیز مقایسه شد. در شرایط اطلاعاتی کامل، XGBoost دارای RMSE برابر با ۲/۲۶، MAE برابر با ۱/۷۱، MAPE برابر با ۵/۸۳ درصد و R^2 برابر با ۰/۹۳۶ بود. مقایسه این مقادیر با نتایج مدل‌های عمیق نشان می‌دهد که در داده شبیه‌سازی‌شده، GRU با RMSE برابر با ۱/۹۱ و R^2 برابر با ۰/۹۵۶ عملکرد پایین‌خطاتری نسبت به XGBoost داشته است. LSTM نیز با RMSE برابر با ۲/۰۸ و R^2 برابر با ۰/۹۴۷ عملکرد بهتری از XGBoost ثبت کرده است.

از منظر ارزش اطلاعاتی متغیرها، نتایج سه سناریو نشان می‌دهد که نرخ ارز به‌تنهایی توانسته است عملکرد پیش‌بینی را بهبود دهد و افزودن شاخص تحریم‌ها نیز بهبود بیشتری ایجاد کرده است. این یافته با مبانی نظری پژوهش سازگار است؛ زیرا تحریم‌ها می‌توانند از طریق محدودیت در بازارهای صادراتی، کانال‌های پرداخت، بیمه و حمل‌ونقل و افزایش هزینه مبادلات، شرایط تحقق قیمت صادراتی را تغییر دهند.

در مجموع، یافته‌های شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد که استفاده از اطلاعات صرفاً تاریخی برای پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت خام کافی نیست و افزودن متغیرهای مرتبط با محیط اقتصادی ایران می‌تواند اطلاعات مکملی برای مدل‌های یادگیری عمیق فراهم کند. همچنین عملکرد بهتر GRU نسبت به LSTM در هر سه سناریو نشان می‌دهد که انتخاب معماری شبکه می‌تواند بر دقت پیش‌بینی اثرگذار باشد.

نتایج

نتایج پژوهش نشان داد که می‌توان قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران را با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق LSTM و GRU با دقت قابل قبول پیش‌بینی کرد. مقایسه سه سناریوی اطلاعاتی نشان داد که استفاده از تاریخچه قیمت به‌تنهایی مبنای مناسبی برای ایجاد مدل پایه است، اما افزودن متغیرهای برون‌زا، به‌ویژه نرخ ارز و شاخص تحریم‌ها، موجب بهبود عملکرد پیش‌بینی می‌شود.

در سناریوی نخست، RMSE مدل‌های LSTM و GRU به ترتیب ۲/۸۴ و ۲/۶۷ بود. مقادیر MAPE نیز به ترتیب ۷/۴۲ و ۶/۹۸ درصد به دست آمد. در این مرحله، GRU عملکرد بهتری نسبت به LSTM داشت. این موضوع نشان می‌دهد که حتی بدون استفاده از متغیرهای برون‌زا، معماری GRU توانسته است الگوهای زمانی موجود در قیمت مؤثر صادرات نفت را با خطای کمتری استخراج کند.

با ورود نوسانات نرخ ارز، عملکرد هر دو مدل بهبود یافت. RMSE مدل LSTM از ۸۴/۲ به ۴۱/۲ و RMSE مدل GRU از ۲/۶۷ به ۲/۱۸ کاهش یافت. همچنین R^2 در LSTM از ۰/۹۰۱ به ۰/۹۲۹ و در GRU از ۰/۹۱۲ به ۰/۹۴۱ افزایش پیدا کرد. بنابراین، نرخ ارز در چارچوب داده‌های شبیه‌سازی شده دارای ارزش اطلاعاتی قابل توجهی برای پیش‌بینی قیمت مؤثر صادرات نفت است.

افزودن شاخص تحریم‌ها به همراه قیمت تاریخی و نرخ ارز، بیشترین بهبود را ایجاد کرد. در مدل LSTM، RMSE به ۰/۸ و MAPE به ۵/۳۷ درصد کاهش یافت و R^2 به ۰/۹۴۷ رسید. در مدل GRU نیز RMSE برابر با ۱/۹۱، MAPE برابر با ۴/۹۶ درصد و R^2 برابر با ۰/۹۵۶ به دست آمد. بنابراین، سناریوی کامل از نظر هر چهار معیار ارزیابی، بهترین عملکرد را در میان سناریوهای مورد بررسی نشان داد.

مقایسه با XGBoost نیز نشان داد که در شرایط اطلاعاتی کامل، این مدل دارای RMSE برابر با ۲۶/۲ و R^2 برابر با ۹۳۶/۰ است؛ در حالی که GRU به ترتیب RMSE برابر با ۱/۹۱ و R^2 برابر با ۰/۹۵۶ و LSTM برابر با ۲/۰۸ و R^2 برابر با ۰/۹۴۷ را ثبت کردند. بنابراین، در داده شبیه‌سازی شده، مدل‌های بازگشتی عمیق توانستند عملکرد بهتری از مدل مقایسه‌ای XGBoost ارائه دهند.

مجموع این نتایج نشان می‌دهد که لحاظ کردن شرایط خاص اقتصادی ایران در مدل پیش‌بینی اهمیت دارد. این نتیجه با شکاف پژوهشی مطرح شده در مطالعه سازگار است؛ زیرا بخش مهمی از پژوهش‌های پیشین بر قیمت‌های مرجع بین‌المللی مانند Brent و WTI تمرکز داشته‌اند، در حالی که پژوهش حاضر بر قیمت مؤثر صادرات نفت خام ایران و اطلاعات مربوط به نرخ ارز و تحریم‌ها متمرکز است.

از منظر کاربردی، چنین چارچوبی می‌تواند برای برآورد درآمدهای نفتی، مدیریت ریسک ناشی از نوسانات قیمت و برنامه‌ریزی مالی مورد استفاده قرار گیرد. البته نتایج مدل‌های پیش‌بینی نباید به عنوان شواهد رابطه علی تفسیر شوند؛ بلکه نشان‌دهنده میزان ارزش اطلاعاتی متغیرهای وارد شده برای پیش‌بینی هستند. این تفکیک با منطق روش پژوهش نیز سازگار است.

در نهایت، بر مبنای نتایج شبیه‌سازی شده، مدل GRU در سناریوی کامل با RMSE برابر با ۱/۹۱، MAE برابر با ۱/۴۳، MAPE برابر با ۴/۹۶ درصد و R^2 برابر با ۰/۹۵۶، مناسب‌ترین عملکرد پیش‌بینی را در میان مدل‌های مورد بررسی نشان داده است. همچنین مقایسه سناریوها بیانگر آن است که افزودن نرخ ارز و شاخص تحریم‌ها به تاریخچه قیمت، توان پیش‌بینی مدل‌ها را افزایش داده است. این یافته اهمیت استفاده از اطلاعات اقتصادی و شرایط خاص صادرات نفت ایران را در طراحی مدل‌های پیش‌بینی نشان می‌دهد.

منابع:

- اصل روستا، ا.، عرفانی، ع.، و کاشیان، ع. (۱۴۰۴). پیش‌بینی نرخ ارز در ایران با استفاده از تلفیق داده‌ها و مدل جامع مبتنی بر یادگیری ماشین. پژوهش‌های اقتصادی ایران، ۳۰(۱۰۳)، ۱۰۱-۱۳۷. <https://doi.org/10.22054/ijer.2025.82330.1315>.
- حاجی کرم، ا.، و دارابی، ر. (۱۳۹۷). پیش‌بینی قیمت روزانه نفت خام برنت با ترکیب روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون بردار پشتیبان. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۷(۲۵)، ۴۱-۶۰.
- حیدری، ع.، دقیقی اصلی، ع.، عباسی، ا.، و دامن کشیده، م. (۱۴۰۳). Presenting a model for predicting global crude oil prices based on artificial intelligence algorithm. ژئومکانیک و ژئوانرژی، ۷(۳)، ۱۹-۳۲. <https://doi.org/10.22107/jpg.2024.423782.1216>.
- خدادادی، ف.، و نخلی، س. ر. (۱۴۰۵). مدیریت ارزی بانک مرکزی در راستای بند ۲ سیاست‌های کلی برنامه هفتم پیشرفت در شرایط تحریم‌های اقتصادی: رویکرد DSGE. نظریه‌های کاربردی اقتصاد، ۱۳(۱)، ۱۴۷-۱۷۶. <https://doi.org/10.22034/ecoj.2025.67575.3436>.
- شیراوند، م.، ذوالفقاری، م.، عابدی، س.، و خسروی‌نژاد، ن. (۱۴۰۴). چگونه نااطمینانی اقتصادی جهانی و بازار نفت بر یکدیگر اثر می‌گذارند؟ رویکرد ترکیبی یادگیری ماشین و اقتصادسنجی برای پیش‌بینی بهتر. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۸۹۹۸. <https://doi.org/10.22054/jiee.2025.85888.2149>.
- صبری، ا.، اسماعیل‌پور مقدم، ه.، و فلاحتی، م. ع. (۱۴۰۴). بررسی اثر تغییرات قیمت بازارهای کامودیتی به‌ویژه نفت بر بازار سهام کشورهای صادرکننده کامودیتی. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۸۸۲۲. <https://doi.org/10.22054/jiee.2025.80534.2100>.
- طالبلو، ر.، و مهاجری، پ. (۱۴۰۳). اعتبارسنجی روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی شاخص‌های صنایع بورسی انرژی ایران. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۸۴۴۶. <https://doi.org/10.22054/jiee.2025.82899.2120>.
- فتاحی، ش.، کیان‌پور، س.، و سهیلی، ک. (۱۴۰۲). پیش‌بینی قیمت نفت خام با استفاده از روش متن‌کاوی و مدل‌سازی داده‌های بزرگ. مهندسی منابع معدنی، ۸(۲)، ۸۳. <https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.17482.1593>.
- Aziznejad, S. (2026). The impacts of oil revenues on the exchange rate using the FMOLS method: Case study Iran. *Petroleum Business Review*, 10(1), 103–114. <https://doi.org/10.22050/pbr.2025.542168.1404>
- Celik, B. A., Yulek, M., & Celik, S. (2026). Comparative performance of stochastic and deep learning models in forecasting crude oil prices under market shocks. *Computers & Chemical Engineering*, 206, 109534. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109534>
- Chen, D., Yu, X., & Pardo-Piñashca, E. J. E. P. (2026). Dynamic effects of EU economic sanctions on the EU-Russian energy market: Evidence on crude oil and natural gas. 210, 114996.
- Doostkouei, S. G., Mousavi, M. H., & Karimi, M. S. (2024). Do oil sanctions reduce Dutch disease phenomenon? A quasi-experimental approach evidence from Iran. *International Economics and Economic Policy*, 21(2), 385–410. <https://doi.org/10.1007/s10368-024-00584-1>
- Guo, Y., Ye, L., Wang, X., Wu, D., Wang, Z., & Wang, H. (2026). A hybrid CEEMDAN-HOA-Transformer-GRU model for crude oil futures price forecasting. *Energy Engineering*, 123(4). <https://doi.org/10.32604/ee.2025.072163>
- Jiang, H., Dong, Y., Sun, S., & Wang, S. (2026). How uncertain are oil prices? Bayesian regularized distribution neural network for forecasting oil prices. 58(9), 1639–1655.
- Lahmiri, S. (2026). A hybrid CNN-LSTM-GRU system tuned by whale optimization algorithm for enhanced gold and Brent price prediction. *Finance Research Open*, 2(1), 100100. <https://doi.org/10.1016/j.finr.2026.100100>
- Liang, Q., Lin, Q., Guo, M., Lu, Q., & Zhang, D. (2025). Forecasting crude oil prices: A gated recurrent unit-based nonlinear Granger causality model. *International Review of Financial Analysis*, 102, 104124. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2025.104124>
- Liu, L., Li, L., Li, D., & Tang, L. (2026). Analysis of geopolitical risk impacts on crude oil volatility with an explainable machine learning approach: China versus the USA. *Applied Economics*, 58(17), 3305–3322.
- Mahmoudi, V., & Arabi, H. (2025). Crude oil price hikes and exchange rate volatility in Iran: Evidence from GARCH-family models. *Petroleum Business Review*, 9(4), 43–63.
- Mirjalili, S. H. (2025). Financial sanction, exchange rate volatility and macroeconomic variables (Case of Iran).

- Razavi, S. A., Manshad, A. K., & Kashani, L. (2026). Applications of econometrics and artificial intelligence in oil price prediction: A systematic review study. *Energy Strategy Reviews*, 65, 102226. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2026.102226>
- Sen, A., & Dutta Choudhury, K. (2024). Forecasting the crude oil prices for last four decades using deep learning approach. *Resources Policy*, 88, 104438. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104438>
- Sen, A., & Shorma, A. (2026). Statistical versus deep learning forecasting of crude oil prices: A controlled comparison of ARIMA and GRU models for one-step-ahead WTI prediction.
- Victor, G. (2026). Machine learning based analysis of the impact of crude oil price volatility on exchange rate dynamics in emerging and developed economies.
- Wang, C., Lin, G., Liu, S., Yang, W., & Liu, H. (2026). Explainable forecasting of international crude oil price driven by geopolitical news decision-making with large language models. Paper presented at the International Petroleum Technology Conference.
- Wei, X. (2026). Forecasting crude oil futures price with energy uncertainty: Evidence from machine learning methods. *PLOS ONE*, 21(2), e0341496.
- Zhang, C., & Chen, K. (2025). Unravelling the interplay of crude oil, renewable energy, and commodity price volatility: A DCC-GARCH model approach on the Chinese stock market. 124128.
- Zhang, Y., Wang, J., & Zhao, Y. (2025). GRUAtt-Autoformer: A hybrid framework with BiGRU-enhanced attention for crude oil price forecasting. 13(23), 3825.
- Zhu, S., Xu, M., Wu, J., Wang, Y., Jiang, X., Huang, Z., ... Zhu, Y. (2025). A study on crude oil price forecasting model integrating CEEMDAN-VMD multiscale decomposition with CNN-BiLSTM.