



چگونه نااطمینانی اقتصادی جهانی و بازار نفت بر یکدیگر اثر می گذارند؟ رویکرد ترکیبی یادگیری ماشین و اقتصادسنجی برای پیش بینی بهتر

چکیده

این پژوهش به بررسی رابطه میان شاخص نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی و قیمت نفت خام جهانی می پردازد و از ترکیبی از مدل های اقتصادسنجی کلاسیک VAR ، $BEKK$ ، DCC و تکنیک های یادگیری ماشین $LSTM$ ، GRU ، $XGBoost$ بهره می برد. نتایج نشان می دهد که بین $GEPU$ و قیمت نفت رابطه پیش بینی پذیر دوسویه و سرایت نوسانات وجود دارد، این تحقیق به دنبال این است که در بلندمدت و کوتاه مدت از تعاملات این دو متغیر با هم چه رفتاری مشاهده می شود که اثر مستقیم و کوتاه مدت شوک های آن ها بر یکدیگر ضعیف و اغلب بی معنا است. این رابطه بیشتر در سطح همبستگی نوسانات قابل مشاهده بوده و در بلندمدت افزایش قیمت نفت می تواند به افزایش بی ثباتی اقتصادی جهانی منجر شود. علیت گرنجر دوسویه بین دو متغیر تأیید شده است، ولی واکنش های آنی به شوک ها در چارچوب VAR عمدتاً معنادار نبوده اند. مدل های نوسان محور و تحلیل موجک نشان داده اند که نوسانات هم زمان در دوره های بحران افزایش یافته و سرایت نوسانات بین $GEPU$ و قیمت نفت قابل توجه است. استفاده از روش های پیشرفته یادگیری ماشین توانسته است دقت پیش بینی روابط بلندمدت و نوزی میان متغیرها را بهبود بخشد. یافته های پژوهش بر پیچیدگی و چندبعدی بودن تعامل بین نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی و قیمت نفت تأکید می کند.

واژه های کلیدی:

نوسانات قیمت نفت، مدل ترکیبی، تحلیل موجک، شبکه های عصبی عمیق، یادگیری ماشین، نااطمینانی اقتصادی،

JEL : C۳۲، C۴۵، G۱۷، Q۴۱

۱. مقدمه :

در سال‌های اخیر، درک رابطه پیچیده میان نااطمینانی سیاست‌های کلان اقتصادی جهانی و نوسانات قیمت نفت، به‌ویژه در بستر افزایش درهم‌تنیدگی اقتصادها، اهمیتی روزافزون یافته است. این پیوند نه تنها پیامدهایی اساسی برای ثبات اقتصاد جهانی و تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری دارد، بلکه بازارهای انرژی را نیز به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با روند فزاینده جهانی شدن در سال ۲۰۲۴، فهم این پویایی‌ها از همیشه ضروری‌تر به نظر می‌رسد. نفت خام، به عنوان منبعی حیاتی از انرژی، نقش کلیدی در توسعه و ثبات اقتصادی ایفا می‌کند؛ به گونه‌ای که نوسانات قیمتی آن می‌تواند آثار قابل توجهی بر متغیرهای کلان اقتصادی داشته باشد.

شواهد تجربی نشان می‌دهند که در دوره‌هایی از بحران‌های گسترده، همچون همه‌گیری کووید-۱۹، افزایش نااطمینانی اقتصادی موجب افت شدید تقاضای جهانی برای نفت و در نتیجه نوسانات شدید در قیمت آن شده است. (یی و همکاران^۱، ۲۰۲۱) این واقعیت، اهمیت بررسی سازوکارهای پویای میان نااطمینانی سیاستی و نوسانات قیمت نفت را برای تحلیل دقیق‌تر ریسک‌های اقتصاد جهانی و اتخاذ تصمیمات کلان و خرد دوجندان می‌سازد.

رابطه میان قیمت نفت و شاخص نااطمینانی سیاست‌های اقتصادی جهانی (GEPU)، رابطه‌ای پویا و نامتقارن است (اوزسلیبی^۲، ۲۰۲۱). به بیان دیگر، شوک‌های افزایشی و کاهش قیمت نفت، آثار یکسانی بر سطح نااطمینانی اقتصادی جهانی ندارند. این ناهمسانی می‌تواند منجر به تفاوت در ادراک ریسک، واکنش سیاست‌گذاران و رفتار بازارهای مالی شود. افزون بر این، جهت و شدت این رابطه ممکن است بسته به شرایط اقتصادی و ژئوپلیتیکی، در گذر زمان تغییر یابد. پرسش‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- در بلندمدت و کوتاه‌مدت از تعاملات این دو متغیر با هم چه رفتاری مشاهده می‌شود؟
 - چگونه می‌توان با بهره‌گیری از ترکیب روش‌های اقتصادسنجی کلاسیک و تکنیک‌های نوین یادگیری ماشین، این رابطه را به گونه‌ای دقیق‌تر مدل‌سازی و پیش‌بینی کرد؟
- پژوهش حاضر، با اتکا به مدل‌هایی چون VAR، GARCH، تحلیل موجک و شبکه‌های عصبی، برای نخستین بار از رویکردی ترکیبی میان یادگیری ماشین و اقتصادسنجی به منظور تحلیل این رابطه بهره می‌گیرد. ساختار مقاله شامل بخش‌های مرور ادبیات، روش‌شناسی، تحلیل تجربی و نتیجه‌گیری است.

^۱ Yi et al

^۲ Ozcelebi

۲. ادبیات موضوع

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که واکنش اقتصاد به تغییرات قیمت نفت دارای عدم تقارن است. افزایش قیمت نفت معمولاً آثار منفی شدیدتری بر اقتصاد دارد، مانند افزایش هزینه‌های تولید، کاهش قدرت خرید مصرف‌کنندگان، و افت رشد اقتصادی. در مقابل، کاهش قیمت نفت الزاماً موجب بهبود چشمگیر و سریع فعالیت‌های اقتصادی نمی‌شود و تأثیرات آن اغلب محدودتر و تدریجی‌تر است (بالکه و همکاران^۱، ۲۰۰۲؛ حامد^۲، ۲۰۲۴).

افزایش قیمت نفت اغلب با هزینه‌های تعدیل ساختاری و واکنش‌های انقباضی سیاست‌های پولی همراه است که می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری و بی‌ثباتی بازار شود. در مقابل، کاهش قیمت نفت تأثیرات مثبتی چون کاهش هزینه‌های تولید دارد، اما شدت و سرعت اثرگذاری آن معمولاً کمتر است.

شاخص نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی (GEPU) بر اساس روش توسعه یافته توسط بیکر، بلوم و دیویس (۲۰۱۶)^۳ ساخته می‌شود. این شاخص با استفاده از تحلیل فراوانی واژگان خاص مرتبط با سیاست اقتصادی، نااطمینانی و اقتصاد، در مقالات منتشر شده در روزنامه‌های معتبر جهان به دست می‌آید. برای محاسبه GEPU، ابتدا تعداد دفعاتی که ترکیب واژگان مانند "اقتصاد"، "سیاست" و "نااطمینانی" (یا معادل‌های آن‌ها) در هر روزنامه ظاهر شده، شمارش می‌شود. سپس این فراوانی برای هر کشور استانداردسازی شده و میانگین وزنی آن‌ها بر اساس سهم تولید ناخالص داخلی هر کشور گرفته می‌شود تا شاخصی جهانی به دست آید.

برخی مطالعات اخیر نشان داده‌اند که شاخص جهانی نااطمینانی سیاست‌های اقتصادی (GEPU) نقش مهمی در پیش‌بینی نوسانات قیمت نفت دارد و شوک‌های آن می‌توانند مستقیماً قیمت نفت را تحت تأثیر قرار دهند (حامد ۲۰۲۴). همچنین، این شاخص با ایجاد رابطه گرنجر باعث کاهش قیمت نفت از طریق کاهش فعالیت اقتصادی می‌شود (چن و همکاران^۴، ۲۰۱۹).

^۱ Balke, et al

^۲ Hammed

^۳ Baker, S. R., Bloom, N., & Davis, S. J.

^۴ Chen et al.

عوامل متعددی مانند بی ثباتی ژئوپلیتیکی، کندی رشد اقتصادی، سیاست های اوپک و حرکت به سوی انرژی های تجدیدپذیر، احساسات سرمایه گذاران و گمانه زنی های خبری در ایجاد نوسانات نفتی نقش دارند (مارنا و همکاران^۱ ۲۰۱۸؛ نخلی و همکاران^۲ ۲۰۲۳).

شواهد قوی حاکی از رابطه منفی بین GEPU و قیمت نفت خام اوپک وجود دارد که از طریق کاهش تقاضا و افزایش ریسک سرمایه گذاری عمل می کند (دونگ و همکاران^۳ ۲۰۱۹؛ لی و همکاران^۴ ۲۰۲۱؛ مارنا و همکاران^۵ ۲۰۱۸). مطالعاتی نیز به بررسی اثرات نامتقارن این رابطه پرداخته اند و نشان داده اند شوک های منفی تأثیر بیشتری بر نوسانات قیمت دارند (ایمر و لوستا^۶ ۲۰۲۱، ۲۰۲۲).

نااطمینانی سیاست گذاری با کاهش سرمایه گذاری و تولید، بر تقاضای نفت اثرگذار است. همچنین، بر رفتار مصرف کننده اثر می گذارد و ممکن است منجر به کاهش مصرف انرژی شود. یافته ها نشان می دهند بازار نسبت به افزایش نااطمینانی واکنش ضعیف تری نسبت به کاهش آن دارد (فورستر^۷ ۲۰۱۴؛ قانی و قانی^۸ ۲۰۲۴؛ مزفر و مالیک^۹ ۲۰۲۴).

درک این پویایی ها برای تصمیم گیری سیاست گذاران، شرکت ها و سرمایه گذاران در مسیر ثبات اقتصادی و امنیت انرژی در سال های آینده ضروری است.

۳. پیشینه تحقیق

تحقیقات متعددی به بررسی رابطه بین عدم اطمینان سیاست اقتصادی (EPU) و قیمت نفت پرداخته اند

۱۰، ۳ مطالعات خارجی

۱۰، ۳، ۱. هیلیماریم و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی با عنوان "رابطه بین EPU و قیمت نفت در کشورهای GV"، داده های ماهانه طی دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۸ را تحلیل کردند. با بهره گیری از

^۱ Manera et al.

^۲ Nakhli et al.

^۳ Dong et al.

^۴ Le et al.

^۵ Aimer et al

^۶ Foerster

^۷ Ghani and Ghani

^۸ Muzaffar and Malik

مدل‌های اقتصادسنجی، نتیجه گرفتند که در صورت افزایش قیمت نفت ناشی از رشد تقاضای جهانی، اثر EPU بر قیمت نفت منفی است.

۳,۱,۲۰. الیو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل TVP-VAR، تأثیر نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی بر قیمت نفت خام WTI و برنت را بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که در دوره‌های بحران مالی (۲۰۰۷-۲۰۰۹) و بحران بدهی اروپا (۲۰۱۰-۲۰۱۲)، شدت اثر EPU بر نوسانات قیمت نفت افزایش یافته است.

۳,۱,۳۰. ددش و مایترا (۲۰۱۹) با بررسی داده‌های اقتصادی در دوره‌های بحران، نشان دادند که رابطه بین EPU و قیمت نفت در این دوره‌ها تقویت می‌شود.

۳,۱,۴۰. الین و بای (۲۰۲۱) با استفاده از مدل TVP-VAR، این رابطه را از منظر کشورهای صادرکننده و واردکننده نفت بررسی کردند. نتایج نشان داد که نوسانات قیمت نفت در کشورهای صادرکننده تأثیر بیشتری بر EPU دارد.

۳,۱,۵۰. هو و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل TVP-VAR و نوسانات تصادفی، تأثیر متقابل قیمت نفت و EPU را بر صنعت فلزات غیرآهنی چین بررسی کردند. نتایج نشان داد قیمت نفت تأثیری مثبت بر EPU دارد و اثر EPU بر قیمت نفت به تدریج و به‌ویژه پس از بحران مالی جهانی مثبت شده است. این یافته‌ها رابطه‌ای نامتقارن میان این دو متغیر را تأیید می‌کند.

۳,۱,۶۰. چه و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های VAR، نشان دادند که نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی تأثیر قوی‌تر و ماندگارتری بر فعالیت‌های اقتصادی جهانی نسبت به نوسانات قیمت نفت دارد. همچنین، اثر متقابل میان EPU و قیمت نفت مورد تأیید قرار گرفت.

۳,۱,۷۰. گونگ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل سوئیچینگ مارکوف، نشان دادند که رابطه بین EPU جهانی و قیمت نفت خام، غیرخطی و وابسته به شرایط اقتصادی است. این اثر در کوتاه‌مدت منجر به نوسانات شدید و در بلندمدت باعث تأثیرات پایدارتر می‌شود.

۳,۱,۸۰. زانگ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های گارچ و آزمون علیت، دریافتند که افزایش نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی منجر به افزایش نوسانات قیمت نفت می‌شود. شاخص جهانی EPU به‌عنوان ابزار مؤثری برای پیش‌بینی تغییرات بازار نفت معرفی شده است.

۳,۲۰ مطالعات داخلی

۳,۲۱۰ پردل و اسفندیاری (۱۴۰۳) در پژوهشی با مدل پانلی ناپارامتریک، اثر EPU بر قیمت نفت بررسی شد. نتایج نشان داد که EPU اثر مثبت و معناداری بر قیمت نفت دارد. همچنین، انرژی‌های تجدیدپذیر و انتظارات قیمتی از دیگر عوامل مؤثر شناخته شدند.

مطالعات پیشین عمدتاً با روش‌های سنتی و خطی به بررسی رابطه بین نااطمینانی سیاست اقتصادی و قیمت نفت پرداخته‌اند و اغلب به تحلیل‌های کوتاه‌مدت، تک‌بعدی و محدود به دوره‌های بحران اکتفا کرده‌اند. این پژوهش‌ها کمتر به پویایی زمانی، روابط غیرخطی و پیش‌بینی دوسویه توجه داشته‌اند و استفاده از روش‌های نوین مانند یادگیری ماشین در آن‌ها محدود بوده است. مطالعه حاضر با ترکیب روش‌های اقتصادسنجی، تحلیل موجک و شبکه‌های عصبی توانسته است رابطه دوسویه GEPU و قیمت نفت را به طور دقیق‌تر، غیرخطی و در بازه زمانی بلندمدت (۱۹۹۷-۲۰۲۴) مدل‌سازی و پیش‌بینی کند. این نوآوری‌ها شکاف‌های نظری و روش‌شناختی پیشینه را پوشش داده و ابزار تحلیلی کارآمدتری ارائه کرده‌اند.

۴. روش شناسی پژوهش

در این تحقیق متغیرها همگی درون‌زا در نظر گرفته شده‌اند تا رابطه علیت بین متغیرها بررسی شود. متغیرهای تحقیق تحت یک مدل VAR^۱ برای بررسی سیاست مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قلمرو زمانی داده‌های ماهانه از ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۴ است و از کدنویسی در محیط ژوپیتِر نوت‌بوک با زبان پایتون استفاده شده است. استفاده از روش برآورد سنجی در کارهای تجربی بر این فرض استوار است که متغیرهای سری زمانی مورد استفاده ایستا هستند. از طرف دیگر بسیاری از متغیرهای سری زمانی در اقتصاد ایستا نیستند. از این‌رو قبل از استفاده از این متغیرها لازم است نسبت به ایستایی یا عدم ایستایی آن‌ها اطمینان حاصل کرد. برای بررسی مانایی سری زمانی در این مطالعه از آزمون دیکی فولر تعمیم‌یافته استفاده می‌شود؛ زیرا این آزمون نسبت به آزمون دیکی فولر کامل‌تر است. مجموعه‌ای از مدل‌های رگرسیون که می‌تواند به عنوان نوعی پیوند بین

^۱ Vector Autoregression

مدل‌های سری زمانی و مدل‌های معادلات هم‌زمان مورد توجه قرار گیرد، مدل‌های VAR هستند. ساده‌ترین شکل این مدل VAR دو متغیره به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$y_t = c + \sum_{i=1}^p \Phi_i y_{t-i} + \epsilon_t \quad (1)$$

y_t : بردار متغیرهای درون‌زا در زمان t ، c : بردار ثابت Φ_i : ماتریس ضرایب مدل ϵ_t : بردار اختلالات تصادفی با میانگین صفرواریانس ثابت است. این چارچوب تحلیل، امکان بررسی روابط پیچیده و تعاملات میان متغیرهای سری زمانی را فراهم می‌کند. این مدل بر اساس روابط پویای میان متغیرها، برای پیش‌بینی و تحلیل تأثیر تغییرات در یک متغیر بر متغیرهای دیگر استفاده می‌شود. (کیلان و لوتکپول^۱، ۲۰۱۷؛ تسای^۲ ۲۰۱۴)

مدل BEKK^۳ به بررسی ارتباط بین نوسانات دو سری متغیرها می‌پردازد و بررسی می‌کند که آیا نوسانات و شوک از متغیری به متغیر دیگر منتقل می‌شود یا خیر. در این مدل، واریانس شرطی تابع مقدار تأخیری‌های خود و تأخیری‌های پسماندهای خطای خود است. که در آن، ماتریس بالا مثلثی متشکل از اجزا ثابت، ماتریس ضرایب شوک‌ها و ماتریس ضرایب نوسانات است. معنی‌داری عناصر غیرقطری ماتریس‌های و نشان‌دهنده انتقال شوک‌ها و نوسانات بین متغیرها است.

مدل BEKK به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_t = CC' + A' \epsilon_{t-1} \epsilon_{t-1}' A + B' H_{t-1} B \quad (2)$$

که در آن:

^۱ Kilian, L., & Lütkepohl, H.

^۲ Tsay, R. S.

^۳ Baba-Engle-Kraft-Kroner

H_t ماتریس واریانس-کواریانس شرطی در زمان t است. C یک ماتریس بالابالایی از ضرایب ثابت است. A ماتریس ضرایب شوک‌های گذشته ε_{t-1} است. B ماتریس ضرایب نوسانات گذشته است. (سیلونون و تراسویرا ۲۰۰۹)

مدل DCC-GARCH یکی از انواع گارچ چندمتغیره است که به بررسی تغییرات همبستگی شرطی بین متغیرها در طول زمان می‌پردازد. این مدل از دو بخش تشکیل شده است:

۱. بخش GARCH که به مدل‌سازی واریانس‌های شرطی سری‌های زمانی می‌پردازد.

$$h_{i,t} = \omega_i + \alpha_i \varepsilon_{i,t-1}^2 + \beta_i h_{i,t-1} \quad (3)$$

$h_{i,t}$ واریانس شرطی سری i ام در زمان t است. $\omega_i, \alpha_i, \beta_i$ پارامترهای مدل هستند.

۲. بخش DCC که همبستگی شرطی پویا را مدل‌سازی می‌کند.

$$Q_t = (1 - \alpha - \beta) \bar{Q} + \alpha (\varepsilon_{t-1} \varepsilon_{t-1}') + \beta Q_{t-1} \quad (4)$$

که در آن:

Q_t ماتریس همبستگی شرطی غیراستاندارد شده است. $\bar{Q}$ میانگین همبستگی‌های بدون شرط است. α و β پارامترهای غیرمنفی هستند که مجموعشان کمتر از ۱ است. (کاپورین و مک‌آلیر^۳، ۲۰۱۲؛ انگل و کلی^۴، ۲۰۱۲)

مدل CCC-GARCH یک نسخه ساده‌تر از مدل DCC-GARCH است که فرض می‌کند همبستگی شرطی بین متغیرها در طول زمان ثابت باقی می‌ماند. فرم کلی این مدل به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$H_t = D_t R D_t \quad (5)$$

که در آن:

^۱ . Silvennoinen and Teräsvirta

^۲ Dynamic Conditional Correlation

^۳ Caporin and McAleer

^۴ Engle and Kelly

^۵ Constant Conditional Correlation

Dt ماتریس قطری شامل انحراف معیارهای شرطی از مدل های GARCH تک متغیره است. R. یک ماتریس همبستگی ثابت بین متغیرها است. این مدل برای مواقعی که تغییرات همبستگی در طول زمان کم است، کارآمدتر است. (آیلی ۲۰۱۳)^۱

مدل VEC-GARCH^۲ یک روش دیگر در گارچ چندمتغیره است که ساختار هم زمان نوسانات شرطی بین متغیرها را مدل سازی می کند. این مدل اجازه می دهد تا تغییرات واریانس - کوواریانس شرطی به عنوان یک فرایند برداری تخمین زده شود. فرم کلی این مدل به صورت زیر است:

$$\text{vech}(H_t) = c + A\text{vech}(\varepsilon_{t-1}\varepsilon'_{t-1}) + B\text{vech}(H_{t-1}) \quad (۱)$$

که در آن:

$\text{vech}(H_t)$ عملگر بردارگیری از عناصر پایین مثلثی ماتریس است. C. بردار ثابتها
 است. A. ماتریس ضرایب شوک های گذشته است. B. ماتریس ضرایب نوسانات گذشته
 است. (سیلونون و تراسویرا ۲۰۰۹)

برای تحلیل همبستگی شرطی، مقایسه چهار مدل DCC، CCC، VEC و BEKK ضروری است، زیرا هر یک ویژگی ها و محدودیت های خاصی دارند. مدل CCC همبستگی ثابت را فرض می کند، در حالی که DCC، VEC و BEKK تغییرات زمانی را در نظر می گیرند. بسیار انعطاف پذیر ولی محاسباتی پیچیده است؛ VEC پارامترهای زیادی دارد و برآورد آن دشوار است؛ در مقابل، DCC توازنی میان انعطاف پذیری و سادگی برقرار می کند. استفاده مقایسه ای از این مدل ها، با ارزیابی معیارهایی مانند AIC، BIC و MSE، از سوگیری جلوگیری کرده و انتخاب مدل نهایی را مبتنی بر شواهد تجربی و دقیق تر می سازد

تبدیل موجک گسسته (DWT^۳) ابزاری برای تجزیه سیگنال به اجزای مختلف فرکانسی در مقیاس های زمانی گوناگون است. در این تبدیل، سیگنال به دو سطح اصلی شامل سطح های ریز (Fine) و سطح های درشت (Coarse) تقسیم می شود. سطح های ریز شامل فرکانس های بالا هستند و اطلاعات مربوط به نوسانات سریع و جزئیات دقیق سیگنال را ارائه می دهند، در حالی که سطح های درشت شامل فرکانس های پایین اند و روندهای بلندمدت سیگنال را نشان می دهند.

^۱ Aielli

^۲ Vectorized

^۳ Discrete wavelet transform

با استفاده از موجک مادر "db1"، سیگنال اصلی به زیرسری‌های تقریبی (A) و جزئی (Dj) تجزیه می‌شود که هر کدام اطلاعات خاصی از ساختار زمانی سیگنال در سطوح مختلف ارائه می‌کنند. این نوع تحلیل به‌ویژه در مطالعات مالی و اقتصادی کاربرد دارد، زیرا می‌تواند نوسانات پنهان و رفتارهای کوتاه‌مدت یا بلندمدت بازار را آشکار کند. موجک "db1" به دلیل سادگی و دقت بالا، ابزاری پرکاربرد در تحلیل سری‌های زمانی با نوسانات پیچیده محسوب می‌شود. (ناسون^۱، ۲۰۰۸؛ پرسیوال و والدن^۲ ۲۰۰۶)

شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN^۳) خانواده‌ای از مدل‌های یادگیری عمیق هستند که برای پردازش داده‌های ترتیبی طراحی شده‌اند و به‌طور خاص برای پردازش توالی مقادیر $x(1), x(2), \dots, x(n)$ استفاده می‌شوند. ساختار ساده یک RNN در شکل نمایش داده شده است. به‌طور نظری، RNN‌ها باید قادر به مدیریت بهینه محتوای موجود در توالی‌ها و استفاده از آن برای پیش‌بینی‌ها باشند، اما در عمل، RNN‌های سنتی محدودیت‌هایی دارند. این محدودیت‌ها باعث شد که استفاده از RNN‌ها به تأخیر بیفتد تا زمانی که واحدهای حافظه طولانی - کوتاه‌مدت (LSTM^۴) و واحدهای گیت دار بازگشتی (GRU^۵) معرفی شدند. در مقایسه با RNN‌های سنتی، LSTM‌ها و GRU‌ها توانایی پردازش توالی‌های طولانی‌تر را دارند؛ زیرا مکانیزم‌های طراحی شده در آن‌ها به‌طور مؤثر امکان حفظ اطلاعات در طول زمان و پردازش توالی‌های بلند را فراهم می‌کند (گودفیلو و همکاران ۲۰۱۶). در این مطالعه ضمن مقایسه دو شبکه عصبی از LSTM برای خاصیت پیش‌بینی بلندمدت استفاده شده و GRU برای احتمال‌نویزی بودن داده‌ها.

پس از آموزش مدل LSTM/GRU، خطاهای پیش‌بینی با داده‌های واقعی مقایسه و با الگوریتم‌هایی مانند XGBoost تحلیل و اصلاح می‌شوند تا دقت مدل بهبود یابد. انتخاب الگوریتم گروهی (مانند بگینگ^۷، رندوم فارست^۸ یا استکینگ^۱) بر اساس ویژگی‌های داده،

^۱ Nason

^۲ Percival and Walden

^۳ Recurrent Neural Network

^۴ Long short-term memory

^۵ Gated Recurrent Unit

^۶ Goodfellow et al.

^۷ Bagging

^۸ Random Forest

عملکرد مدل‌ها و نیاز به تعادل بین دقت و تعمیم‌دهی انجام می‌شود و بهترین گزینه با آزمایش و ارزیابی تعیین می‌گردد.

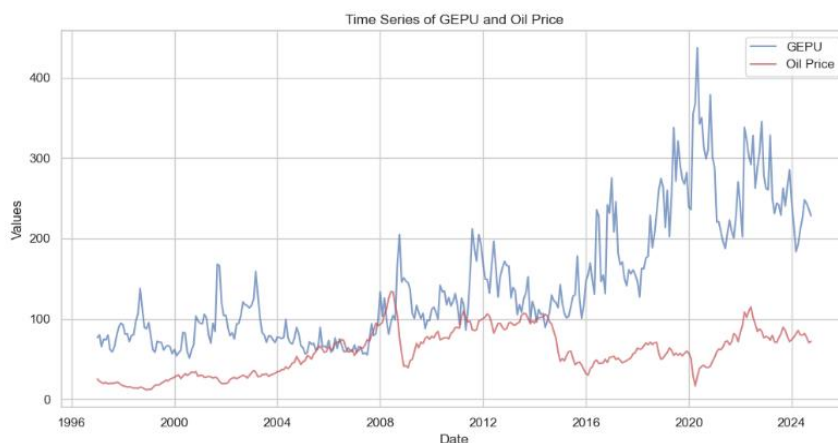
مدل ترکیبی حاصل:

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌های VAR و GARCH به تحلیل روابط علی و نوسانات میان GEPU و قیمت نفت پرداخته و سپس با استفاده از تحلیل موجک و شبکه‌های عصبی LSTM/GRU الگوهای زمانی-فرکانسی و غیرخطی را استخراج کرده است. در نهایت، الگوریتم XGBoost برای بهبود دقت پیش‌بینی و کاهش خطای مدل‌ها به کار گرفته شده است. این مدل ترکیبی که به صورت نوآورانه بر طبق مطالعه (ذوالفقاری و غلامی ۲۰۲۱)^۲ انجام شد، ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های مالی است که دقت پیش‌بینی را افزایش داده و پیچیدگی‌های سری‌های زمانی را بهتر مدل‌سازی می‌کند.

۵. نتایج:

داده‌های مورد استفاده در تحقیق دو سری زمانی الف) نااطمینانی سیاست اقتصاد کلان جهانی که از <https://www.policyuncertainty.com> اخذ شده و ب) قیمت نفت WTI است که از پایگاه داده‌های بانک جهانی اخذ شده است. که از ژانویه ۱۹۹۷ تا پایان ۲۰۲۴ به صورت ماهانه در دسترس هستند (مجموعاً ۳۳۴ داده).

نمودار ۱: مقایسه ی دو سری زمانی



Stacking
Zolfaghari and Gholami

(منبع: یافته‌های پژوهش)

روند شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ نوسانات چشمگیری را نشان می‌دهد که اغلب با رویدادهای اقتصادی و سیاسی جهان مرتبط بوده‌اند. از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵، این شاخص نسبتاً باثبات بود و تغییرات اندکی داشت، که به ثبات نسبی اقتصاد جهانی نسبت داده می‌شود. با آغاز بحران مالی جهانی از سال ۲۰۰۷، این روند تغییر کرد و شاخص در سال ۲۰۰۹ به اوج رسید.

در ادامه، بحران بدهی اروپا در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، کاهش قیمت نفت در سال ۲۰۱۴، تحریم‌های غرب علیه روسیه، و جنگ تجاری آمریکا و چین در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ باعث افزایش نااطمینانی شدند. با شیوع ویروس کرونا در اوایل ۲۰۲۰، شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی به بالاترین سطح تاریخی خود رسید. پس از آن نیز، جنگ روسیه و اوکراین در ۲۰۲۲، بحران انرژی اروپا، و افزایش نرخ بهره توسط بانک‌های مرکزی در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ باعث شد این شاخص همچنان در سطوح بالایی باقی بماند.

قیمت نفت نیز از اوایل دهه ۲۰۰۰ دچار نوسانات زیادی شد. رشد اقتصادی چین باعث افزایش قیمت نفت تا سال ۲۰۰۸ شد، اما بحران مالی باعث سقوط آن به زیر ۴۰ دلار شد. پس از بهبود نسبی در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴، افزایش تولید نفت شیل آمریکا و کاهش رشد اقتصادی چین باعث کاهش شدید قیمت‌ها در ۲۰۱۶ شد. در سال ۲۰۲۰ با همه‌گیری کرونا، قیمت نفت به شدت کاهش یافت و حتی به سطح منفی رسید. در ۲۰۲۲، جنگ اوکراین باعث افزایش شدید قیمت نفت شد، اما تا سال ۲۰۲۴، به واسطه کاهش تقاضا و سیاست‌های انقباضی، قیمت‌ها تعدیل شدند. رابطه بین شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی و قیمت نفت همواره یک‌جهتی یا ثابت نبوده است. در برخی دوره‌ها مانند سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰، افزایش نااطمینانی باعث کاهش قیمت نفت شد. اما در دوره‌هایی دیگر مانند سال ۲۰۲۲، افزایش قیمت نفت خود به افزایش نااطمینانی دامن زد. بنابراین، گرچه این دو متغیر در بسیاری از موارد هم‌راستا هستند، اما شدت و جهت این رابطه به شرایط خاص هر دوره بستگی دارد.

در جدول ۱ با استفاده از آزمون دیکی فولر درجه هم انباشتگی هر کدام از متغیرها یک تشخیص داده شد و در برازش مدل با یک درجه تفاضل گیری به ایستایی رسیدند.

جدول ۱: درجه ایستایی هر کدام از متغیرها

مقدار p	آماره ADF	مرتبه هم جمعی	متغیر
۰	-۶,۶۵	۱	GEPU
۰	-۸,۱۲	۱	Oil_Price

(منبع: یافته‌های پژوهش)

برای بررسی رابطه VAR از آزمون وقفه بهینه معیار AIC استفاده شد و وقفه بهینه این مدل در وقفه ۸ تشخیص داده شد.

جدول ۲: نتایج آزمون علیت گرنجر

F آزمون پارامتری (F, p)	آزمون نسبت درست‌نمایی (χ^2 , p)	آزمون کای دو (χ^2 , p) مبتنی بر SSR	مبتنی F آزمون SSR (F, p)	تعداد وقفه
۰,۳۵۲۹, ۰,۸۶۵۴	۰,۳۵۰۴, ۰,۸۷۲۱	۰,۳۵۰۰, ۰,۸۷۳۳	۰,۳۵۲۹, ۰,۸۶۵۴	۱
۰,۲۸۵۳, ۱,۲۵۹۱	۰,۲۷۹۸, ۲,۵۴۷۱	۰,۲۷۸۵, ۲,۵۵۶۹	۰,۲۸۵۳, ۱,۲۵۹۱	۲
۰,۱۵۴۵, ۱,۷۶۰۷	۰,۱۴۷۷, ۵,۳۵۳۰	۰,۱۴۵۰, ۵,۳۹۶۷	۰,۱۵۴۵, ۱,۷۶۰۷	۳
۰,۱۵۴۷, ۱,۶۷۸۲	۰,۱۴۵۱, ۶,۸۳۰۳	۰,۱۴۱۲, ۶,۹۰۱۷	۰,۱۵۴۷, ۱,۶۷۸۲	۴
۰,۰۴۱۱, ۲,۳۴۶۳	۰,۰۳۵۹, ۱۱,۹۱۹۳	۰,۰۳۲۹, ۱۲,۱۳۸۵	۰,۰۴۱۱, ۲,۳۴۶۳	۵
۰,۰۷۲۳, ۱,۹۵۱۷	۰,۰۶۲۶, ۱۱,۹۷۳۰	۰,۰۵۷۸, ۱۲,۱۹۴۹	۰,۰۷۲۳, ۱,۹۵۱۷	۶
۰,۰۳۶۶, ۲,۱۷۰۵	۰,۰۲۹۶, ۱۵,۵۴۹۳	۰,۰۲۵۸, ۱۵,۹۲۶۱	۰,۰۳۶۶, ۲,۱۷۰۵	۷
۰,۰۰۱۲, ۳,۲۹۹۴	۰,۰۰۰۸, ۲۶,۷۲۲۹	۰,۰۰۰۵, ۲۷,۸۵۲۳	۰,۰۰۱۲, ۳,۲۹۹۴	۸

(مأخذ: یافته‌های پژوهش)

نتایج آزمون گرنجر علیت نشان می‌دهد که با افزایش تعداد وقفه‌ها، رابطه علیت بین متغیرها معنادار می‌شود، به‌ویژه در وقفه‌های ۵، ۷ و ۸ که این موضوع بیانگر کفایت اطلاعات موجود برای تحلیل علیت است؛ بنابراین، افزودن متغیرهای جدید ضرورتی ندارد و انتخاب تعداد وقفه‌های مناسب برای بهبود عملکرد مدل کافی است. سادگی مدل نیز از پیچیدگی و بیش

برازش جلوگیری می کند و باتوجه به پایداری نتایج، می توان نتیجه گرفت که مدل کنونی برای بررسی علیت گرنجری مناسب و قابل اعتماد است. برقراری علیت گرنجر بین شاخص نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت نشان می دهد که این دو متغیر می توانند رفتار آینده یکدیگر را پیش بینی کنند. این رابطه دوسویه حاکی از وجود یک چرخه بازخوردی در اقتصاد جهانی است که در آن شوک های سیاستی می توانند قیمت نفت را دستخوش تغییر کنند و بالعکس، نوسانات نفت نیز سطح نااطمینانی را تحت تأثیر قرار می دهد. از نظر سیاست گذاری و سرمایه گذاری، این یافته به اهمیت رصد توأمان این دو متغیر برای مدیریت ریسک و بهبود مدل های پیش بینی در بازه های زمانی میان مدت اشاره دارد.

در جدول ۳ برازش مدل VAR انجام شد و با ۸ وقفه معناداری ضرایب بررسی شد.

جدول ۳: جدول ضرائب مدل VAR

متغیر	وقفه	ضریب	مقدار p	متغیر	وقفه	ضریب	مقدار p	متغیر	وقفه	ضریب	مقدار p
Const	GEPU	۰٫۸۹	۰٫۵۴	L۳- GEPU	Oil- Price	۰٫۰۱	۰٫۱۲	L۶- GEPU	Oil- Price	۰٫۰۰	۰٫۶۳
Const	Oil- Price	۰٫۱۵	۰٫۶۰	L۳- Oil- Price	GEPU	۰٫۱۹	۰٫۵۲	L۶- Oil- Price	GEPU	۰٫۰۳	۰٫۹۱
L۱- GEPU	GEPU	۰٫۲۸-	۴٫۰۱	L۳- Oil- Price	Oil- Price	۰٫۰۶-	۰٫۲۹	L۶- Oil- Price	Oil- Price	۰٫۱۴-	۰٫۰۲
L۱- GEPU	Oil- Price	۰٫۰۰-	۰٫۴۲	L۴- GEPU	GEPU	۰٫۰۵-	۰٫۳۳	L۷- GEPU	GEPU	۰٫۰۸-	۰٫۱۶
L۱- Oil- Price	GEPU	۰٫۵۶-	۰٫۰۵	L۴- GEPU	Oil- Price	۰٫۰۱-	۰٫۲۸	L۷- GEPU	Oil- Price	۰٫۰۰-	۰٫۵۸
L۱- Oil- Price	Oil- Price	۰٫۳۳	۱٫۱۰	L۴- Oil- Price	GEPU	۰٫۰۲	۰٫۹۲	L۷- Oil- Price	GEPU	۰٫۹۱-	۰٫۰۰
L۲- GEPU	GEPU	۰٫۲۰-	۰٫۰۰	L۴- Oil- Price	Oil- Price	۰٫۰۲-	۰٫۷۱	L۷- Oil- Price	Oil- Price	۰٫۰۰	۰٫۸۷
L۲- GEPU	Oil- Price	۰٫۰۰-	۰٫۷۶	L۵- GEPU	GEPU	۰٫۱۵-	۰٫۰۱	L۸- GEPU	GEPU	۰٫۰۲-	۰٫۷۲
L۲- Oil- Price	GEPU	۰٫۱۶	۰٫۶۰	L۵- Oil- Price	GEPU	۰٫۷۹	۰٫۰۰	L۸- Oil- Price	Oil- Price	۰٫۰۰	۰٫۸۷

							Price				Price
۰,۰۰	۰,۰۹۶	GEPU	L۸- Oil- Price	۰,۰۹۷	۰,۰۰۰	Oil- Price	L۵- Oil- Price	۰,۰۷۵	۰,۰۰۱	Oil- Price	L۲- Oil- Price
۰,۰۸۸	۰,۰۰۰	Oil- Price	L۸- Oil- Price	۰,۰۸۱	۰,۰۰۱	GEPU	L۶- GEPU	۰,۰۰۰	۰,۰۲۲	GEPU	L۳- GEPU

(منبع: یافته‌های پژوهش)

بر اساس نتایج مدل VAR و با در نظر گرفتن معناداری آماری ضرایب، می‌توان چند رابطه مهم را میان شاخص عدم اطمینان اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت استخراج کرد. پیش از هر چیز، مشخص می‌شود که شاخص GEPU تمایل بالایی به تداوم رفتار خود دارد. مقدار این شاخص در دوره قبل تأثیر مثبت و بسیار معناداری بر مقدار فعلی خود دارد. ضریب این تأثیر برابر با ۰,۰۱۴ است و مقدار p آن تقریباً صفر است که نشان‌دهنده اطمینان بسیار بالا از وجود این رابطه است. به بیان ساده‌تر، نوسانات GEPU تمایل زیادی به ماندگاری و استمرار دارند. رفتار قیمت نفت نیز مشابه است؛ قیمت نفت در دوره قبلی خود تأثیر مثبت و معناداری بر مقدار فعلی خود دارد. مقدار ضریب این تأثیر برابر با ۰,۰۱۱ است و مقدار p آن نیز صفر است. بنابراین قیمت نفت نیز مانند GEPU خاصیت خودتداومی قوی دارد. از میان روابط متقاطع بین این دو متغیر، یک نکته مهم توجه را جلب می‌کند. افزایش قیمت نفت در دوره قبل به کاهش معنادار GEPU در دوره فعلی منجر می‌شود. ضریب این رابطه برابر با -۰,۰۵۶ است و مقدار p آن دقیقاً ۰,۰۰۵ است که نشان می‌دهد این رابطه در مرز معناداری قرار دارد. به نظر می‌رسد که افزایش قیمت نفت ممکن است در کوتاه‌مدت به کاهش نااطمینانی اقتصادی جهانی منجر شود یا حداقل همراه با کاهش نگرانی‌های اقتصادی باشد.

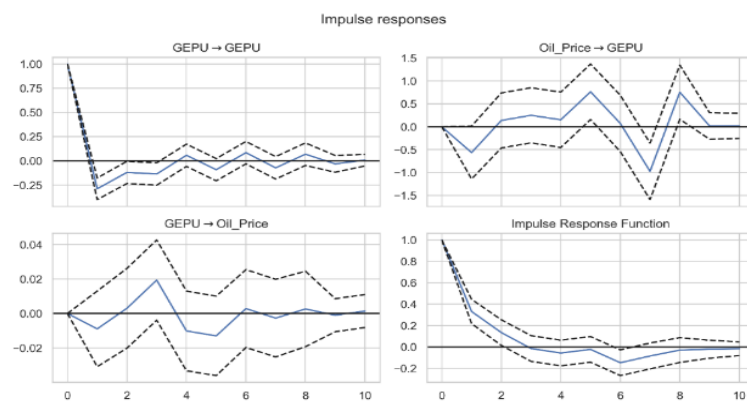
رابطه مهم دیگری که مدل نشان می‌دهد، مربوط به تأثیر بلندمدت GEPU بر قیمت نفت است. افزایش شاخص GEPU در پنج دوره قبل تأثیر مثبت و معناداری بر قیمت فعلی نفت دارد. مقدار این ضریب ۰,۰۷۹ است و مقدار p آن صفر است. این نتیجه می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که افزایش نگرانی‌ها و نااطمینانی اقتصادی جهانی در بازه زمانی بلندمدت با افزایش تقاضا برای نفت یا افزایش قیمت آن همراه می‌شود. سایر ضرایب موجود در مدل، چه مربوط به تأثیر متغیر بر

خودش در تأخیرهای بیشتر و چه اثرات متقاطع، از لحاظ آماری معنادار نیستند و بنابراین نمی‌توان با اطمینان درباره آن‌ها اظهار نظر کرد. در مجموع، یافته‌های این مدل بیشتر بر اهمیت خودتداومی GEPU و قیمت نفت، تأثیر منفی کوتاه‌مدت قیمت نفت بر GEPU و تأثیر مثبت بلندمدت GEPU بر قیمت نفت تأکید دارند.

به عبارت دیگر نتایج مدل نشان می‌دهد که هر دو متغیر شاخص عدم اطمینان اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت دارای خاصیت خود تداوم قوی هستند؛ به این معنا که شوک‌ها و نوسانات در هر یک از آن‌ها تمایل دارند در دوره‌های بعد نیز ادامه پیدا کنند. از نظر روابط متقاطع، افزایش قیمت نفت در کوتاه‌مدت باعث کاهش نااطمینانی اقتصادی می‌شود. این رابطه احتمالاً بازتاب بهبود شرایط اقتصادی جهانی است، زیرا افزایش قیمت نفت معمولاً با افزایش تقاضای انرژی و رونق اقتصادی همراه است که به کاهش نگرانی‌های اقتصادی منجر می‌شود.

در مقابل، افزایش نااطمینانی اقتصادی در بلندمدت باعث افزایش قیمت نفت می‌شود. این می‌تواند به دلیل افزایش تقاضا برای دارایی‌های واقعی مانند نفت در دوره‌های پرریسک باشد یا به علت نگرانی از اختلالات عرضه ناشی از تنش‌های ژئوپلیتیک. در کل، روابط میان GEPU و قیمت نفت زمان وابسته و دوسویه است و اهمیت درک پویایی این اثرات برای سیاست‌گذاری اقتصادی و مدیریت ریسک آشکار می‌شود.

نمودار ۲: نمودار واکنش ضربه



(مأخذ: یافته‌های پژوهش)

تنها شوک GEPU به خودش در دوره اول معنادار است. سایر واکنش‌ها چه GEPU بر نفت و چه نفت بر GEPU عمدتاً از نظر آماری بی‌معنا هستند؛ زیرا فواصل اطمینان آن‌ها خط صفر را شامل می‌شوند؛ بنابراین تأثیرگذاری مستقیم و معنادار بین این دو متغیر ضعیف است و بسیاری از روابط مشاهده‌شده ممکن است ناشی از نویز داده‌ها باشد. این نتیجه تأکید می‌کند که ارتباط GEPU و قیمت نفت، اگرچه وجود دارد، اما بسیار محدود و غیرقابل پیش‌بینی است و به متغیرهای دیگری نیز وابسته است

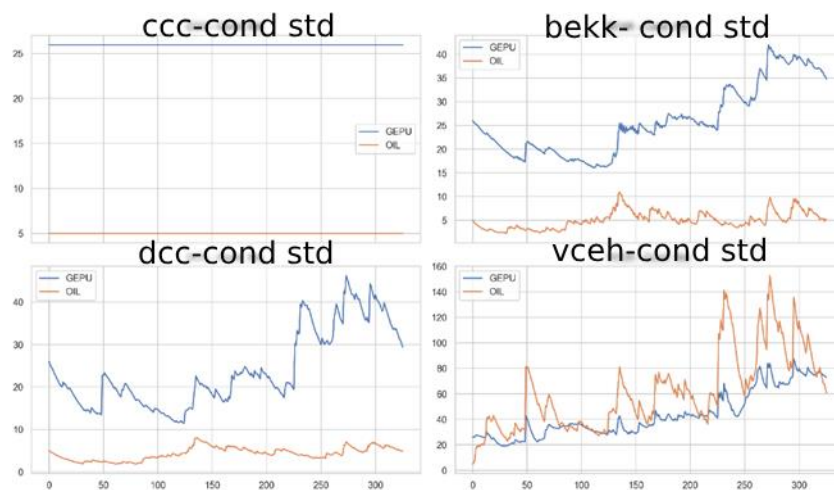
جدول ۴: جدول آزمون اثر آرچ

متغیر	آماره آزمون ARCH	مقدار p
GEPU	۳۴٫۵۱	۰٫۰۰
قیمت نفت	۵۸٫۲۳	۷٫۸۰

(منبع: یافته‌های پژوهش)

هر دو متغیر GEPU و Oil_Price دارای اثر ARCH هستند؛ بنابراین در باقی‌مانده‌های مدل VAR، ناهمگنی واریانس وجود دارد. وجود اثر ARCH در شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت نشان می‌دهد که نوسانات این متغیرها در طول زمان پایدار نیست و به شوک‌ها و رفتارهای گذشته وابسته است این وابستگی به معنای آن است که دوره‌های پرنوسان تمایل دارند با نوسانات بیشتری دنبال شوند از این‌رو، برای تحلیل دقیق ریسک و پیش‌بینی بهتر، باید از مدل‌های پیشرفته‌ای مانند گارچ چندمتغیره استفاده کرد که بتوانند ساختار پویا و وابستگی زمانی نوسانات را به‌درستی شناسایی و مدل‌سازی کنند. در شکل نمودار ۴. چهار مدل گارچ چند متغیره مورد بررسی قرار گرفته است. و در ادامه باهم مقایسه شده است.

نمودار ۴. مقایسه چهار مدل گارچ چند متغیره



(منبع: یافته‌های پژوهش)

در تحلیل نوسانات و همبستگی میان قیمت نفت و شاخص GEPU با استفاده از مدل‌های مختلف CCC، BEKK، DCC و VEC، تفاوت‌های قابل توجهی در دینامیک نوسانات مشاهده می‌شود. مدل CCC فرض همبستگی ثابت دارد و نوسانات را یکنواخت نشان می‌دهد. BEKK، نوسانات و همبستگی‌های متغیر را بهتر نمایش می‌دهد و به شوک‌های اقتصادی حساس‌تر است. مدل DCC نیز همبستگی‌های دینامیک را با پیچیدگی کمتر نسبت به BEKK نشان می‌دهد و در دوره‌های بحران، نوسانات هم‌زمان در GEPU و قیمت نفت را به خوبی آشکار می‌سازد. مدل VEC بیشترین نوسانات را ارائه می‌دهد و برای تحلیل دوره‌های پرتلاطم بسیار مناسب است. این مقایسه نشان می‌دهد که انتخاب مدل مناسب بر اساس ویژگی‌های سری زمانی و اهداف تحلیل اهمیت بالایی دارد.

نمودار ۵. نمودارهای ACF و PACF برای GEPU در مدل‌های مختلف MGARCH



(منبع: یافته‌های پژوهش)

نمودار ۶. نمودارهای ACF و PACF برای قیمت نفت در مدل‌های مختلف MGARCH

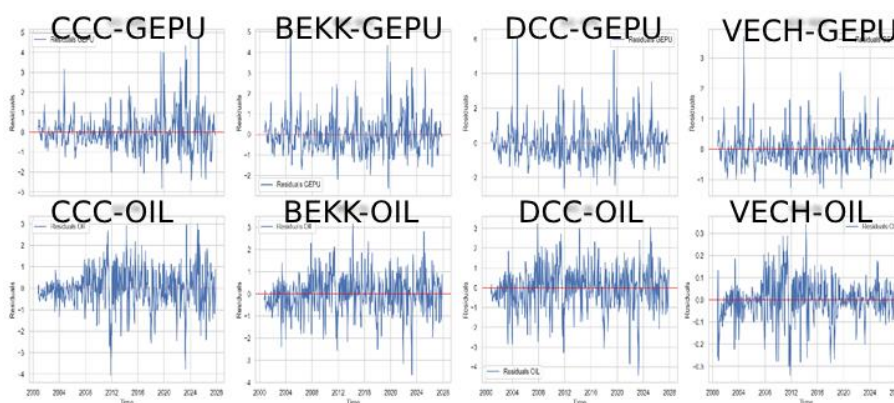


(منبع: یافته‌های پژوهش)

تحلیل نمودارهای ACF و PACF برای مدل‌های مختلف MGARCH در بررسی نوسانات سری‌های زمانی قیمت نفت (WTI) و شاخص نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی (GEPU)، حاکی از آن است که مدل‌های DCC و Vech عملکرد مطلوب‌تری در حذف خودهمبستگی‌های باقی‌مانده و مدل‌سازی وابستگی‌های پویا از خود نشان داده‌اند. در این مدل‌ها، کاهش سریع مقادیر ACF و PACF به‌ویژه در PACF، بیانگر تأثیر محدود شوک‌های گذشته بر مقادیر آینده و دقت بالای مدل در تخمین نوسانات شرطی است. مدل

BEKK نیز عملکرد نسبتاً قابل قبولی ارائه داد، اما در برخی تأخیرها، باقی ماندن مقادیری از خودهمبستگی‌ها نشان داد که این مدل در حذف کامل وابستگی‌های زمانی توفیق کمتری داشته است. در مقابل، مدل CCC که بر فرض همبستگی ثابت بین متغیرها استوار است، نتوانست همبستگی‌های دینامیک و نوسانات متغیرها را به درستی مدل‌سازی کند و در مقایسه با سایر مدل‌ها، ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. به‌طور کلی، مدل DCC به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای مدل‌سازی وابستگی‌های پویا میان GEPU و قیمت نفت شناخته شد، درحالی‌که مدل CCC، به دلیل عدم انعطاف در مواجهه با ساختارهای متغیر همبستگی، از دقت و کارایی کمتری برخوردار بود.

نمودار ۷. باقی‌مانده‌ها برای مدل‌های مختلف M GARCH روی GEPU و OIL



(منبع: یافته‌های پژوهش)

در تحلیل باقی‌مانده‌های استاندارد شده مدل‌های مختلف GARCH، BEKK، DCC، VECH برای سری‌های زمانی GEPU و OIL، مشاهده شد که تمامی مدل‌ها میانگین خطاها را به صفر نزدیک کرده‌اند. مدل DCC بیشترین نوسانات را در سری GEPU نشان داد و دامنه تغییرات آن در برخی دوره‌ها بسیار وسیع بود، درحالی‌که مدل‌های CCC و BEKK نوسانات همگن‌تری داشتند. در سری OIL، مدل‌های CCC و BEKK نوسانات کوچک‌تری داشتند، درحالی‌که DCC نوسانات بیشتری را نشان داد. همچنین، تغییرپذیری واریانس در مدل‌های DCC و VECH مشهودتر بود، به‌ویژه در بازه‌های زمانی خاص که نوسانات ناگهانی افزایش یافتند. مدل DCC عملکرد خوبی داشت، اما تغییرات واریانس بالا در برخی دوره‌ها مشاهده شد. مدل VECH

عملکرد مناسبی داشت با تغییرات کمتر، در حالی که BEKK همچنان نوسانات باقی مانده‌ای داشت. مدل CCC ضعیف‌ترین عملکرد را داشت، زیرا در برخی نقاط نوسانات باقی مانده آن قابل توجه بود.

بر طبق معیارهای AIC و BIC مدل BEKK و مدل DCC بهترین بودند.

مقایسه مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که رفتار همبستگی و نوسانات بین شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت در طول زمان متغیر و وابسته به شرایط اقتصادی است. مدل DCC با انعطاف‌پذیری بالا توانسته تغییرات پویا و هم‌زمان در نوسانات این دو متغیر را به‌ویژه در دوره‌های بحرانی (مانند شوک‌های اقتصادی یا ژئوپلیتیکی) به‌خوبی ثبت کند. این موضوع از منظر اقتصادی حائز اهمیت است، چراکه نشان می‌دهد در زمان‌های بی‌ثباتی، قیمت نفت و سطح نااطمینانی سیاستی به‌شدت با یکدیگر همگرا می‌شوند و بر یکدیگر اثر تشدیدکننده دارند؛ بنابراین، برای تحلیل دقیق ریسک‌های اقتصادی و طراحی ابزارهای پوشش ریسک، استفاده از مدل‌هایی مانند DCC که توانایی ردیابی همبستگی‌های متغیر در زمان را دارند، ضروری است.

آزمون ARCH برای بررسی وجود اثرات ناهمسانی واریانس شرطی (Heteroscedasticity) در باقی مانده‌های استاندارد شده مدل‌های مختلف GARCH اجرا شده است. نتایج آزمون در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۵. آزمون اثر آرج روی باقی مانده‌های مدل‌های گارچ

آزمون p مقدار F)	F آمار	p مقدار	آزمون آمار	مدل
۰.۰۰۰	۳.۷۶۴	۰.۰۰۰	۳۴.۷۲	CCC - GEPU
۰.۰۰۰	۶.۳۷۸	۰.۰۰۰	۵۴.۶۵۵	CCC - OIL
۰.۲۳۵	۱.۲۸۹	۰.۲۳۴	۱۲.۸۱۳	BEKK - GEPU
۰.۶۵۰	۰.۷۷۷	۰.۶۴۲	۷.۸۵۸	BEKK - OIL
۰.۹۵۱	۰.۳۸۷	۰.۹۴۹	۳.۹۶۲	DCC - GEPU
۰.۴۶۵	۰.۹۷۴	۰.۴۵۹	۹.۷۸۵	DCC - OIL
۰.۹۸۸	۰.۲۶۵	۰.۹۸۷	۲.۷۲۴	VECH - GEPU

VECH - OIL	۶۲.۷۶۰	۰.۰۰۰	۷.۵۵۸	۰.۰۰۰
------------	--------	-------	-------	-------

(منبع یافته‌های پژوهش)

نتایج آزمون ARCH نشان‌دهنده این است که مدل CCC برای هر دو سری OIL و GEPU اثر ناهمسانی واریانس قابل توجهی دارد که به معنای وجود نوسانات شرطی است و ممکن است برای مدل‌سازی نوسانات مناسب نباشد. مدل VECH نیز در سری OIL ناهمسانی واریانس شدیدی دارد که می‌تواند نشان‌دهنده عدم تطابق مناسب مدل باشد. در مقابل، مدل‌های BEKK و DCC برای هر دو سری OIL و GEPU اثر ARCH معناداری ندارند که نشان می‌دهد این مدل‌ها نوسانات را به طور صحیح مدل کرده‌اند و برای تحلیل نوسانات این دو متغیر مناسب‌تر هستند؛ بنابراین دو مدل DCC و BEKK در میان مدل‌های گارچ چندمتغیره منتخب هستند. در ادامه به جزئیات بیشتری از نوسانات می‌پردازیم:

انتخاب مدل‌های BEKK و DCC به عنوان بهینه‌ترین مدل‌ها از نظر آماری، از منظر اقتصادی به این معناست که نوسانات قیمت نفت و شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی نه تنها به صورت هم‌زمان بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند، بلکه این تأثیرات در طول زمان تغییر کرده و وابسته به شرایط اقتصادی و شوک‌های بیرونی هستند. برتری این دو مدل نشان می‌دهد که ساختار وابستگی میان این متغیرها پویا، ناهمسان و متغیر در زمان است؛ بنابراین، برای تحلیل دقیق‌تر ریسک، پیش‌بینی نوسانات بازار انرژی، و ارزیابی آثار سیاست‌های اقتصادی، لازم است از ابزارهایی بهره گرفت که توانایی مدل‌سازی چنین روابط پیچیده‌ای را دارند - توانی که مدل‌های ساده‌تری مانند CCC و VECH فاقد آن هستند.

برای بررسی معنای آماری و اهمیت هر پارامتر در مدل BEKK، معمولاً از p -value استفاده می‌شود. اگر p -value کمتر از ۰.۰۵ باشد، به این معنی است که پارامتر مورد نظر به طور معناداری با داده‌ها همبستگی دارد و می‌توان آن را در مدل نگه داشت. حالا با توجه به ماتریس‌های مختلف BEKK هر پارامتر را بررسی می‌کنیم:

جدول ۶: جدول ضرائب مدل BEKK

پارامتر	c_{11}	c_{21}	c_{22}	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	g_{11}	g_{12}	g_{21}	g_{22}
---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

مقدار	۰/۴۰	-	۰/۷۰	۰/۱۳	-	-	-	۰/۹۹	۰/۴۰	-	-
مقدار p	۰/۸۶	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۱۰۰	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۷۸

(منبع: یافته‌های پژوهش)

نتایج ماتریس G در مدل BEKK نشان می‌دهد که هر یک از متغیرها - چه قیمت نفت و چه شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی-(GEPU) بیشتر تحت تأثیر نوسانات گذشته خود قرار دارند تا دیگری. به‌ویژه، قیمت نفت دارای نوساناتی پایدار و خود تقویت‌گر است با ضریب g_{11} نزدیک به ۱، اما این نوسانات تأثیر قابل توجهی بر نوسانات GEPU ندارند. به عبارت دیگر، اگرچه ممکن است قیمت نفت از نظر سطح قیمتی بر اقتصاد جهانی اثرگذار باشد، اما از نظر انتقال نوسانات (Volatility Spillover)، تأثیر آن بر نااطمینانی سیاستی محدود است. این امر بیانگر آن است که بازار نفت و انتظارات سیاست‌گذاران اقتصادی جهانی، هرچند ممکن است به صورت سطحی مرتبط باشند، ولی از نظر پویایی نوسانات رفتاری تا حد زیادی مستقل از هم دارند.

مقادیر برآورد شده برای ضرایب مدل DCC را نشان می‌دهد. در این جدول، برای هر پارامتر، مقدار برآورد شده و مقدار p-value ذکر شده است. مدل DCC برای تحلیل نوسانات و همبستگی‌های شرطی زمان‌دار بین دو سری زمانی استفاده می‌شود.

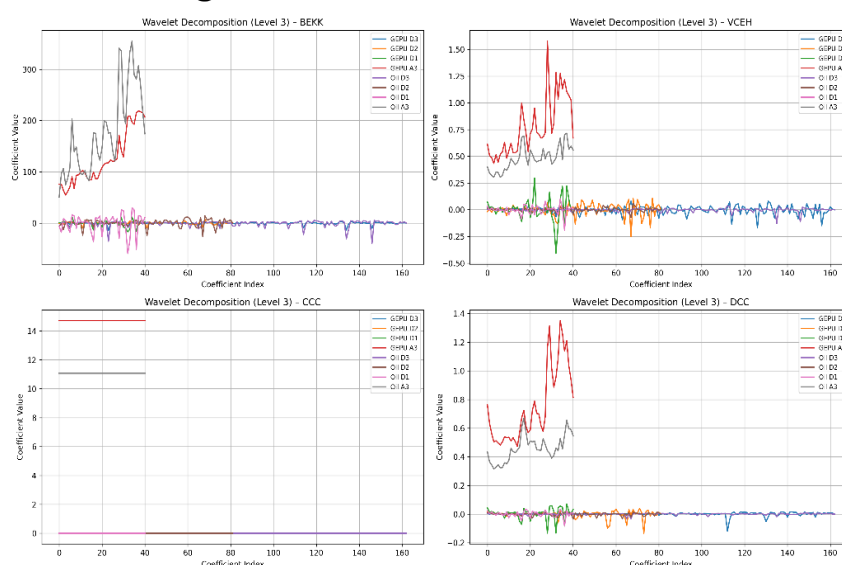
جدول ۷: جدول ضرائب مدل DCC

پارامتر	ω_1	α_1	β_1	ω_2	α_2	β_2	a	b
مقدار	۰,۰۰۰۹	۰/۰۵۱۶	۰/۹۴۸	۰/۰۰۹	۰/۰۶۶۳	۰/۹۱۹	۰/۰۱۰	۰/۹۰
مقدار p	۰/۹۹۲	۰/۶۶۳	۰/۰۰۰	۰/۹۹۲	۰/۵۲۷	۰/۰۰۰	۰/۹۹۱	۰/۳۷

(منبع: یافته‌های پژوهش)

نتایج مدل DCC نشان می‌دهد که نوسانات گذشته در شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت تأثیر پایداری بر نوسانات آینده دارند؛ به عبارت دیگر، بازارها دارای حافظه نوسانی هستند و شوک‌های قبلی در ساختار عدم اطمینان و قیمت انرژی، در دوره‌های بعد نیز اثرگذار باقی می‌مانند. این پایداری در نوسانات می‌تواند نشانه‌ای از رفتار ریسک‌گریز سرمایه‌گذاران یا تداوم نگرانی‌های اقتصادی باشد. در مقابل، برخی از ضرایب مرتبط با سطح و شدت تغییرات همبستگی شرطی، فاقد معنی‌داری آماری بوده‌اند که نشان می‌دهد تغییرات کوتاه‌مدت در ساختار همبستگی لزوماً الگوی مشخصی ندارند. به‌طور کلی، پایداری نوسانات شرطی اهمیت پیش‌بینی و مدیریت ریسک در بازارهای انرژی و سیاست‌گذاری اقتصادی را دوچندان می‌کند.

نمودار ۹. نمودار تجزیه موجک برای چهار مدل مختلف گارچ چند متغیر



(منبع: یافته‌های پژوهش)

نمودارهای بالا تحلیل تجزیه موجک برای واریانس شرطی GEPU را تحت چهار مدل مختلف GARCH چندمتغیره شامل BEKK، DCC و VCEH نشان می‌دهند. در مدل CCC تقریباً هیچ‌گونه تغییر یا جزئیاتی مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده ضعف این مدل در شناسایی دینامیک‌های زمانی متغیر هدف است. مدل BEKK روند افزایشی واضحی را در مؤلفه تقریبی

(Approximation) نمایش می‌دهد که بیانگر حساسیت آن به نوسانات بلندمدت است. مدل DCC نوسانات کوتاه‌مدت بیشتری را در سطوح پایین‌تر از جزئیات به‌ویژه ۱ Detail نشان می‌دهد که از قدرت این مدل در شناسایی دینامیک‌های زمانی با فرکانس بالا حکایت دارد. نهایتاً، مدل VECH بیشترین دامنه تغییرات را در مؤلفه تقریبی دارد و در تمام سطوح جزئیات نیز واکنش‌هایی قابل توجه از خود نشان می‌دهد که حاکی از توان بالای آن در مدل‌سازی پیچیدگی‌های زمانی متغیر GEPU است. نمودارهای تجزیه موزجک نشان می‌دهند که مدل‌های مختلف گارچ چندمتغیره توان متفاوتی در شناسایی نوسانات شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی دارند. مدل CCC به دلیل فرض همبستگی ثابت، نوسانات را یکنواخت و بدون واکنش نسبت به شوک‌ها نشان داده و در نتیجه از تحلیل پویای نااطمینانی ناتوان است. در مقابل، مدل BEKK به خوبی روندهای بلندمدت و تجمع تدریجی نااطمینانی را آشکار کرده و مدل DCC نیز با شناسایی دقیق نوسانات کوتاه‌مدت و واکنش‌های سریع بازار، عملکردی پویا و انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهد. مدل VECH اگرچه دامنه نوسانات بالایی را نشان می‌دهد، اما به دلیل ساختار ضعیف کنترلی، خروجی‌هایی ناپایدار و پراکنده تولید می‌کند.

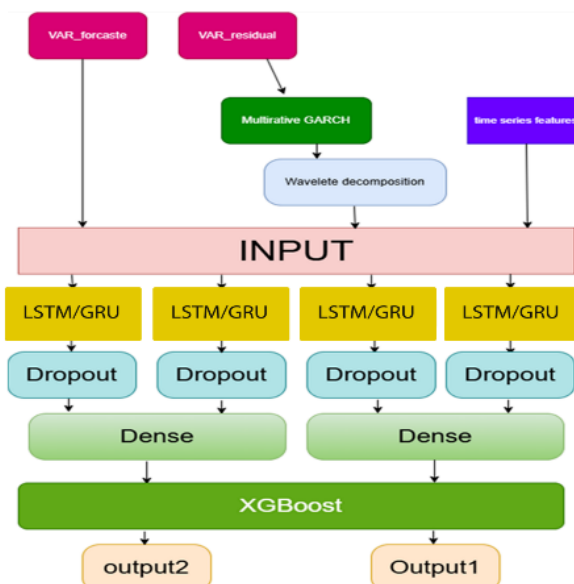
در نمودار BEKK، مؤلفه‌های تقریبی (A3) هر دو متغیر - یعنی شاخص نااطمینانی اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت نفت - از حوالی دوره ۲۰ به شکل محسوسی شروع به افزایش می‌کنند و این روند افزایشی تا حدود دوره ۶۰ ادامه می‌یابد. این الگوی هم‌زمان افزایش در هر دو سری نشان می‌دهد که در بازه زمانی مذکور، وابستگی بلندمدت بین نااطمینانی جهانی و بازار نفت به‌صورت تدریجی و تجمعی تشدید شده است. به بیان دیگر، طی این دوره، افزایش مستمر نااطمینانی اقتصادی جهانی با تحركات هم‌زمان در بازار نفت همراه بوده و این می‌تواند بازتاب‌دهنده رخدادهای ساختاری نظیر بحران‌های اقتصادی جهانی، تنش‌های ژئوپلیتیک در خاورمیانه یا شوک‌های عرضه نفت باشد. افزون بر این، در سطوح جزئی‌تر ۱ (Detail) و ۲ (Detail)، نوساناتی محدود اما معنادار قابل مشاهده است که نشان می‌دهد در کنار روند بلندمدت، بازارها به شوک‌های مقطعی نیز واکنش نشان داده‌اند. اما الگوی کلی همچنان تحت سیطره روند همبستگی صعودی بلندمدت قرار دارد. این یافته‌ها حاکی از آن است که طی این دوره، افزایش تدریجی ریسک جهانی به‌ویژه از طریق کانال نفت به سایر بخش‌های اقتصادی سرایت کرده و این امر لزوم اتخاذ سیاست‌های تثبیتی، تنوع‌بخشی انرژی و مداخلات ساختاری از سوی نهادهای سیاست‌گذار را برجسته می‌سازد.

در نمودار DCC نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که شدت روند صعودی مؤلفه‌های تقریبی اندکی کمتر از BEKK است و در عوض، نوسانات کوتاه‌مدت بسیار پویاتر و پرحادثه‌ترند. به‌ویژه در حوالی دوره‌های ۳۰ تا ۵۰، سطوح ۱ Detail جهش‌های قوی و مقطعی دارند. این رفتار نشان می‌دهد که در مدل DCC، علاوه بر وجود وابستگی بلندمدت بین GEPU و قیمت نفت، تغییرات وابستگی کوتاه‌مدت نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. به عبارت دیگر، بازارها در این بازه‌های زمانی به شدت به شوک‌های ناگهانی یا اخبار جدید واکنش نشان داده‌اند. جهش‌های شدید در ۱ Detail می‌تواند بازتاب‌دهنده رخدادهایی نظیر اعلام تحریم‌های اقتصادی، بحران‌های بانکی، تصمیمات غیرمنتظره در سیاست پولی یا تغییرات ناگهانی در توافقات اوپک باشد؛ بنابراین، نتایج مدل DCC بر لزوم استفاده از ابزارهای مدیریت ریسک سریع‌العمل و انعطاف‌پذیر مانند بازار مشتقات و بیمه‌های مالی دلالت دارد تا سرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران بتوانند به سرعت نسبت به تحولات بازار واکنش نشان دهند.

با توجه به نتایج حاصل از تجزیه موجک در مدل‌های BEKK و DCC، روشن است که هم وابستگی بلندمدت ساختاری و هم نوسانات کوتاه‌مدت مقطعی در رابطه بین GEPU و قیمت نفت اهمیت دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرضیات ساده‌انگارانه‌تر مدل‌های VCEH و CCC که به ترتیب همبستگی ایستا یا همبستگی با تغییرات محدود را مفروض می‌گیرند، نمی‌توانند پویایی‌های واقعی و پیچیده این رابطه را به درستی بازتاب دهند. در مدل VECH، هرچند نوسانات کوتاه‌مدت لحاظ می‌شود، اما قابلیت تطبیق ساختاریافته و انعطاف‌پذیر مدل DCC را ندارد؛ و در مدل CCC نیز همبستگی ایستا و بدون تغییر در زمان، آشکارا با شواهد نوسان‌پذیری کوتاه‌مدت و تغییرپذیری بلندمدت ناسازگار است؛ بنابراین، نتایج BEKK و DCC مبنای معتبرتر و کامل‌تری برای تحلیل اقتصادی وابستگی بین نااطمینانی جهانی و بازار نفت فراهم می‌آورند.

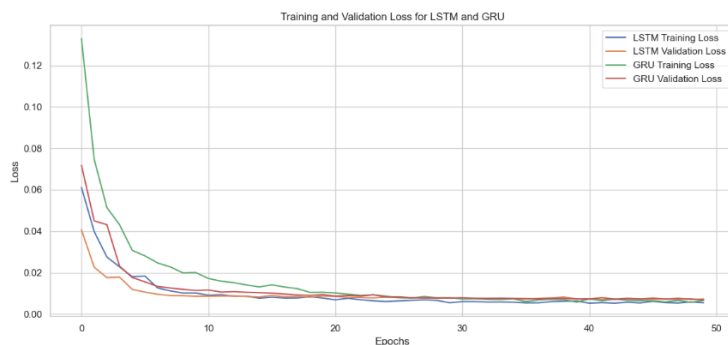
برای درک بهتر این روابط پیچیده، از شبکه‌های عصبی بازگشتی؛ مانند حافظه بلندمدت و واحد دروازه‌دار استفاده شده است. این شبکه‌ها می‌توانند روابط بازخوردی و چرخه‌ای بین متغیرها را بهتر از مدل‌های سنتی شبیه‌سازی کنند. برای مثال، زمانی که افزایش نااطمینانی باعث نوسانات شدید در قیمت نفت شود، این نوسانات نیز می‌توانند نااطمینانی را دوباره تشدید کنند، و شبکه‌های عصبی قادرند این چرخه را به خوبی یاد بگیرند و پیش‌بینی کنند.

شکل ۱. معماری مدل



در (شکل ۱) این مدل شبکه عصبی شامل سه لایه اصلی است. لایه LSTM / GRU وظیفه استخراج وابستگی‌های زمانی موجود در داده‌های ورودی را بر عهده دارد. ورودی این لایه دارای شکل $(None, 28, 1)$ است که در آن ۲۸ ویژگی شامل پیش‌بینی مدل VAR، ویژگی‌های سری‌های زمانی و تجزیه‌های موجک به عنوان ورودی در هر نمونه و یک بازه زمانی برای هر ویژگی در نظر گرفته شده است. این لایه شامل ۵۰ نرون است که هر یک، الگوهای زمانی را در داده‌ها یاد می‌گیرند. لایه Dropout با غیرفعال کردن تصادفی ۲۰٪ از نرون‌ها در طول آموزش، احتمال بیش برآزش (overfitting) را کاهش داده و باعث افزایش تعمیم‌پذیری مدل می‌شود. این لایه خروجی لایه LSTM را بدون تغییر در ابعاد $(None, 50)$ دریافت و پردازش می‌کند. در نهایت، لایه Dense که کاملاً متصل است، خروجی نهایی را تولید می‌کند. این لایه ورودی خود را از Dropout دریافت کرده و خروجی‌ای با شکل $(None, 2)$ تولید می‌کند که دو مقدار پیش‌بینی شده برای GEPU و Oil_Price را ارائه می‌دهد. تعداد نرون‌های خروجی در این لایه متناسب با تعداد متغیرهای هدف انتخاب شده است.

نمودار ۱۰. نمودار مقادیر Training Loss و Validation Loss



(منبع: یافته‌های پژوهش)

بررسی نمودار نشان می‌دهد که خطای آموزش مدل حافظه بلندمدت با سرعت کاهش می‌یابد و پس از حدود ۱۰ دوره به حالت پایداری می‌رسد. خطای اعتبارسنجی این مدل نیز رفتار مشابهی دارد و به مقدار خطای آموزش نزدیک باقی می‌ماند که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل و احتمال پایین بیش برازش است. در مورد مدل واحد بازگشتی دروازه‌دار نیز خطای آموزش با سرعتی بیشتر کاهش می‌یابد و در دوره‌های ابتدایی مقدار کمتری نسبت به مدل قبلی دارد. خطای اعتبارسنجی این مدل نیز در نزدیکی خطای آموزش قرار دارد و بیانگر تعمیم‌پذیری مناسب آن است. در مجموع، هر دو مدل عملکرد خوبی در کاهش خطا داشته‌اند و نزدیکی خطای آموزش و اعتبارسنجی در هر دو نشان می‌دهد که این مدل‌ها با احتمال کمی دچار بیش برازش شده‌اند و از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسبی برخوردارند. در نهایت، نتایج مدل‌سازی با ترکیب مدل‌های برداری ساختاری همراه با تبدیل موجک و شبکه‌های عصبی بازگشتی نشان می‌دهد که پیش‌بینی درون نمونه‌ای بادقت بالایی انجام شده است.

جدول ۸. مقایسه‌ی مدل‌های یادگیری ماشین

مدل	RMSE (BEKK)	MAE (BEKK)	R ² (BEKK)	RMSE (DCC)	MAE (DCC)	R ² (DCC)
LSTM	۴۲.۲۷	۵۰.۱۵	۸۷.۰	۲۲.۲۸	۳۶.۱۵	۸۷.۰
GRU	۴۴.۲۸	۷۸.۱۵	۸۶.۰	۹۱.۲۸	۰۳.۱۶	۸۶.۰
XGBoost	۰۰۱۸.۰	۰۰۱.۰	۰۰.۱	۰۰۳.۰	۰۰۲.۰	۰۰.۱

(منبع: یافته‌های پژوهش)

۶. نتیجه‌گیری:

این پژوهش باهدف تحلیل رابطه میان شاخص نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت جهانی نفت، از ترکیبی از روش‌های سنتی اقتصادسنجی و تکنیک‌های نوین یادگیری ماشین بهره گرفته است.

الف) در کوتاه‌مدت:

یافته‌ها نشان می‌دهند که افزایش قیمت نفت به کاهش سطح نااطمینانی اقتصادی منجر می‌شود. این اثر، اگرچه از نظر آماری در آستانه معناداری قرار دارد، اما از منظر اقتصادی نشانه‌ای از بهبود اعتماد در بازارهاست. افزایش قیمت نفت در چنین بازه‌هایی غالباً ناشی از رونق فعالیت‌های اقتصادی و رشد تقاضای انرژی است که به شکل طبیعی منجر به کاهش ریسک ادراک شده در بازارهای جهانی می‌شود.

ب) در بلندمدت:

روندی متفاوت حاکم است. افزایش پایدار در نااطمینانی اقتصادی جهانی با افزایش قیمت نفت همراه بوده است. این پدیده را می‌توان ناشی از گرایش سرمایه‌گذاران به سمت دارایی‌های امن مانند نفت در شرایط پرریسک دانست، یا به نگرانی‌های مربوط به اختلالات عرضه و ریسک‌های ژئوپلیتیکی نسبت داد. به عبارت دیگر، نفت در شرایطی که عدم اطمینان حاکم است، نقش نوعی "پناهگاه سرمایه" را ایفا می‌کند.

ج) رابطه‌ی علی:

اگرچه رابطه علیت گرنجری بین GEPU و قیمت نفت تأیید شده است، اما بررسی‌های پاسخ ضربه نشان داده‌اند که واکنش‌های آنی میان این دو متغیر عمدتاً بی‌معنا هستند. این مسئله می‌تواند ناشی از پیچیدگی ذاتی این رابطه، نویز بالای داده‌ها، یا ناتوانی مدل‌های خطی در شناسایی الگوهای غیرخطی و وابسته به شرایط باشد. از این رو، مدل‌های BEKK و DCC به کار گرفته شدند تا الگوهای نوسان‌پذیری شرطی را با دقت بیشتری استخراج کنند.

د) نتایج حاصل از مدل‌های گارچ چند متغیره: مدل DCC نشان می‌دهد که در دوره‌های بحرانی، همبستگی میان GEPU و قیمت نفت به شدت افزایش می‌یابد. این یعنی در زمان‌هایی که اقتصاد جهانی با تنش، بحران یا بلاتکلیفی مواجه می‌شود، شوک‌ها در یکی از این متغیرها می‌توانند به سرعت به دیگری منتقل شوند؛ به‌ویژه از طریق کانال‌هایی چون قیمت‌گذاری ریسک یا اختلال در زنجیره‌های عرضه.

ه) تحلیل موجک :

تحلیل موجک نیز نقش اساسی در این پژوهش ایفا کرد. این روش با تجزیه داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف، توانست همبستگی‌های پنهان را حتی در زمان‌هایی که مدل‌های سنتی آن‌ها را رد کرده بودند، شناسایی کند. برخلاف پاسخ ضربه که به شوک‌های مصنوعی و فرضی متکی است، تحلیل موجک به داده‌های واقعی تکیه دارد و نشان داد که در برخی بازه‌ها، نوسانات GEPU و قیمت نفت به صورت هم‌زمان و هماهنگ ظاهر شده‌اند؛ پدیده‌ای که از دید اقتصاد کلان می‌تواند بیانگر سرایت اضطراب‌ها و انتظارات در سطح بازارهای جهانی باشد.

و) شبکه‌های عصبی:

در گام بعد، شبکه‌های عصبی مانند LSTM برای مدل‌سازی روابط بلندمدت به کار گرفته شدند. این مدل توانست وابستگی‌های زمانی میان متغیرها را به خوبی شناسایی کند. GRU نیز در شرایطی که داده‌ها نویزی بودند، عملکرد پایداری از خود نشان داد. در نهایت، مدل XGBoost به عنوان مکملی برای اصلاح خطاهای پیش‌بینی این شبکه‌ها عملکرد و دقت مدل نهایی را افزایش داد.

ترکیب این مدل‌ها نشان داد که رفتار GEPU و قیمت نفت از جنس روابط ساده و قابل پیش‌بینی نیست، بلکه الگوهای زمان وابسته، غیرخطی و حساس به شرایط بیرونی دارد. این بویایی‌های پیچیده، چالشی جدی برای سیاست‌گذاران ایجاد می‌کند، زیرا واکنش‌های سریع و سیاست‌های مقطعی اغلب نمی‌توانند به مدیریت موفق این رابطه کمک کنند. به جای آن، تحلیل گران باید به سراغ طراحی سیاست‌هایی با افق بلندمدت بروند، نظیر استفاده از صندوق‌های تثبیت بودجه، مکانیزم‌های بیمه‌ای، یا ابزارهای مدیریت ریسک مبتنی بر شاخص‌های همبستگی پویا. همچنین، لازم است از مداخلات سطحی در بازار نفت پرهیز شود و ابزارهای تثبیتی فقط زمانی به کار گرفته شوند که همبستگی میان GEPU و نفت به آستانه معینی برسد.

در مجموع، این پژوهش با ارائه مدلی ترکیبی و پیشرفته، نشان می‌دهد که برای تحلیل موفق بویایی‌های بازار جهانی نفت و نااطمینانی اقتصادی، تنها روش‌های سنتی کافی نیستند. بهره‌گیری از هوش مصنوعی، تحلیل موجک و اقتصادسنجی مدرن، راهی برای پیش‌بینی دقیق‌تر و اتخاذ تصمیمات سیاستی کارآمدتر فراهم می‌سازد.

بر پایه یافته‌های به دست آمده از تحلیل تعاملات پویای میان شاخص نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی (GEPU) و قیمت جهانی نفت که با استفاده از ترکیب روش‌های کلاسیک اقتصادسنجی مانند مدل‌های VAR، GARCH چندمتغیره نظیر DCC و BEKK و همچنین تکنیک‌های نوین یادگیری ماشین همچون LSTM، GRU و XGBoost صورت گرفته، مجموعه‌ای از توصیه‌های

سیاستی منسجم و مبتنی بر درک دینامیک متغیرها برای اقتصاد جهانی - به‌ویژه برای کشورهای صادرکننده نفت مانند ایران - قابل‌ارائه است.

نخستین و مهم‌ترین نتیجه این تحلیل، آن است که رابطه میان GEPU و قیمت نفت، رابطه‌ای ساده و خطی نیست، بلکه ساختاری پیچیده، زمان وابسته و چند مقیاسی دارد. به‌طوری‌که در برخی مقاطع زمانی افزایش قیمت نفت با کاهش سطح نااطمینانی همراه است و در دیگر دوره‌ها، به‌ویژه در افق‌های بلندمدت، خود افزایش نااطمینانی عاملی برای جهش قیمت نفت به شمار می‌آید. از سوی دیگر، پاسخ‌های آنی به شوک‌ها - که در چارچوب مدل‌های پاسخ ضربه ارزیابی شده‌اند - اغلب از نظر آماری معنادار نبوده‌اند. باین‌حال، مدل‌های نوسان محور مانند BEKK و DCC و نیز تحلیل موجک نشان داده‌اند که همبستگی پویا و هم‌زمان میان نوسانات این دو متغیر، به‌ویژه در شرایط بحرانی، دارای اهمیت فراوانی است، زیرا نااطمینانی می‌تواند با تقویت انتظارات تورمی و کاهش سرمایه‌گذاری در بخش انرژی، فشار صعودی مضاعفی بر قیمت نفت وارد کند.

در پرتو این یافته‌ها، می‌توان دریافت که اتکا به سیاست‌های واکنشی کوتاه‌مدت، آن‌گونه که در بسیاری از ساختارهای فعلی سیاست‌گذاری مشاهده می‌شود، نمی‌تواند به ثبات اقتصادی پایدار منجر شود. در واقع، ضعف و ناپایداری همبستگی‌های کوتاه‌مدت بین GEPU و قیمت نفت، سیاست‌گذاران را به سمت کنار گذاشتن ابزارهای سطحی و گذرا سوق می‌دهد. در این راستا، طراحی چارچوب‌های تثبیتی میان‌مدت و بلندمدت همچون صندوق‌های ثروت ملی یا صندوق‌های تثبیت بودجه، بر پایه همبستگی‌های بلندمدت شناسایی شده از مدل‌هایی مانند DCC، می‌تواند نقش ضربه‌گیر را در برابر نوسانات ساختاری ناشی از نااطمینانی سیاستی ایفا کند.

درعین‌حال، اتخاذ رویکردی یکسان در اعمال ابزارهای تثبیتی برای همه شرایط، ناکارآمد و گاه زیان‌بار است. به‌جای آن، لازم است از سیاست‌های «رژیم محور» بهره گرفت؛ یعنی ابزارهایی مانند آزادسازی ذخایر استراتژیک، اعمال محدودیت‌های سرمایه یا پوشش ریسک نفت، تنها زمانی به کار گرفته شوند که سطح همبستگی میان GEPU و قیمت نفت از آستانه معینی فراتر رفته باشد. چنین سازوکاری از مداخلات بی‌مورد در زمان‌هایی که وابستگی میان این دو متغیر ضعیف یا ناچیز است، جلوگیری می‌کند و موجب افزایش اثربخشی سیاست‌ها می‌شود.

افزون بر این، رابطه میان سیاست اقتصادی و بازار انرژی رابطه‌ای بازخوردی و چرخه‌ای است که به‌سادگی قابل کنترل نیست. بر همین اساس، لازم است سیاست‌گذاران ابزارهای خود را از سطح واکنشی به سطح پیش‌نگر ارتقا دهند. این مهم از طریق استقرار چارچوب‌های کلان احتیاطی ممکن می‌شود؛ چارچوب‌هایی که بر مبنای الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی بازگشتی مانند LSTM و GRU، قادر به شناسایی الگوهای پنهان و پیش‌بینی روابط پیچیده میان نااطمینانی سیاستی و قیمت نفت هستند. استفاده از چنین زیرساخت‌هایی به‌ویژه در کشورهای

وابسته به نفت، همچون ایران، می‌تواند آسیب‌پذیری نسبت به شوک‌های جهانی را به طور چشمگیری کاهش دهد.

یکی دیگر از ابعاد مهم سیاست‌گذاری در این حوزه، لزوم بازآرایی ساختار سرمایه‌گذاری انرژی باهدف کاهش اثرپذیری از نوسانات ژئوپلیتیکی و سیاستی است. سرمایه‌گذاری در منابع انرژی با نوسانات کمتر، نظیر انرژی‌های تجدیدپذیر، نه تنها پاسخ‌گوی نیازهای زیست‌محیطی قرن حاضر است، بلکه با کاهش اتکا به نفت، نوعی سپر ساختاری در برابر سرریز نوسانات بین‌نااطمینانی و قیمت نفت فراهم می‌سازد. حمایت از فناوری‌های سبز، اصلاح یارانه‌های انرژی، و توسعه زنجیره‌های ارزش در حوزه انرژی‌های پاک، بخشی از این راهبرد است.

در شرایطی که شوک‌های ساختاری نظیر بحران‌های مالی جهانی یا تنش‌های ژئوپلیتیکی می‌توانند هم‌زمان موجب افزایش GEPU و نوسانات بازار نفت شوند، هماهنگی بین‌المللی برای مقابله با این نوسانات، ضرورتی دوچندان می‌یابد. در این زمینه، نهادهای بین‌المللی مانند صندوق بین‌المللی پول، گروه G20 یا اوپک پلاس می‌توانند نقش تسهیل‌کننده را ایفا کنند؛ چه در قالب سیاست‌های مالی هماهنگ و چه از طریق سازوکارهایی مانند آزادسازی هماهنگ ذخایر انرژی یا تأمین مالی اضطراری.

در نهایت، همه این اقدامات نیازمند زیرساخت داده‌ای قوی و شفاف است. سیاست‌گذاران نمی‌توانند در غیاب نظارت مستمر و دقیق بر شاخص‌هایی چون GEPU و قیمت نفت، تصمیمات مناسبی اتخاذ کنند؛ بنابراین، سرمایه‌گذاری در پلتفرم‌های جهانی داده‌محور که به صورت لحظه‌ای و پویا شاخص‌های همبستگی میان GEPU و نفت را منتشر می‌کنند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. این داده‌ها به بازیگران مختلف اقتصادی - از بانک‌های مرکزی و وزارتخانه‌های نفت گرفته تا فعالان بازارهای مالی - کمک می‌کنند تا میان نوسانات گذرا و ساختاری تمایز قائل شوند و تصمیمات خود را بر اساس داده، نه واکنش‌های لحظه‌ای، اتخاذ کنند.

به‌طور کلی، می‌توان گفت که درک دقیق از ساختار پویای ارتباط میان نااطمینانی سیاست اقتصادی جهانی و بازار نفت، مستلزم عبور از الگوهای خطی و ایستا و ورود به عرصه تحلیل‌های غیرخطی، چندمقیاسی و پیش‌نگرانه است. تنها در سایه چنین نگاهی می‌توان به طراحی سیاست‌هایی دست‌یافت که نه تنها در برابر نوسانات جهانی تاب‌آور باشند، بلکه به ثبات پایدار در سطح اقتصاد کلان و بازار انرژی جهانی نیز کمک کنند. برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود اثر عوامل ژئوپلیتیکی، سیاست‌های مالی و پولی، و گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر بر رابطه GEPU و قیمت نفت بررسی شود. استفاده از مدل‌های غیرخطی و چندمقیاسی مانند شبکه‌های عصبی پیشرفته، تحلیل موجک و مدل‌های پانلی می‌تواند درک بهتری از این رابطه پیچیده و پویا ارائه دهد.

همچنین تحلیل‌های منطقه‌ای، بررسی رفتار سرمایه‌گذاران و انتظارات بازار، و شبیه‌سازی بحران‌ها با یادگیری ماشین از مسیرهای نویدبخش برای پژوهش‌های آینده هستند.

منابع

پردل، پروانه و اسفندیاری، مرضیه. (۱۴۰۳). تاثیر نااطمینانی سیاست اقتصادی بر قیمت نفت (مطالعه موردی: کشورهای عضو اوپک). *فصلنامه علمی پژوهشی اقتصاد مقداری*,

Aimer, N., & Lusta, A. (۲۰۲۱). The asymmetric impact of oil price shocks on economic uncertainty: evidence from the asymmetric NARDL model. *OPEC Energy Review*, ۴۹(۴), ۳۹۳-۴۱۳ <https://doi.org/10.1111/opec.12214>

Aimer, N., & Lusta, A. (۲۰۲۲). Asymmetric effects of oil shocks on economic policy uncertainty. *Energy*, ۲۴۱, ۱۲۲۷۱۲ <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122712>

Aielli, G. P. (۲۰۱۳). Dynamic conditional correlation: On properties and estimation. *Journal of Business & Economic Statistics*, ۳۱(۳), ۲۸۲-۲۹۹. <https://doi.org/10.1080/07350015.2013.771027>

Balke, N. S., Brown, S. P., & Yiicel, M. K. (۲۰۰۲). Oil price shocks and the US economy: Where does the asymmetry originate? *The Energy Journal*, ۲۳(۳), ۲۷-۵۲. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-vol23-no3-2>

Baker, S. R., Bloom, N., & Davis, S. J. (۲۰۱۶). Measuring economic policy uncertainty. *Quarterly Journal of Economics*, ۱۳۱(۴) ۱۵۹۳-۱۶۳۶. <https://doi.org/10.1093/qje/qjw.024>

Bauwens, L., Laurent, S., & Rombouts, J. V. K. (۲۰۰۶). Multivariate GARCH models: A survey. *Journal of Applied Econometrics*, ۲۱(۱), ۷۹-۱۰۹. <https://doi.org/10.1002/jae.842>

Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (۲۰۱۶). *Introduction to time series and forecasting* (۳rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29854-2>

Brownlee, J. (۲۰۱۸). *Deep learning for time series forecasting*. Machine Learning Mastery. <https://doi.org/10.1002/9781119618239.ch1>

Brunetti, C., Joëts, M., & Mignon, V. (۲۰۲۴). Reasons Behind Words: OPEC Narratives and the Oil Market <https://doi.org/10.17016/feds.2024.003>

Caporin, M., & McAleer, M. (۲۰۱۲). Do we really need both BEKK and DCC? A tale of two multivariate GARCH models. *Journal of Economic Surveys*, ۲۶(۴), ۷۳۶-۷۵۱. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6419.2011.00683.x>

Che, M., Wang, L., & Li, Y. (۲۰۲۴). Global economic policy uncertainty and oil price uncertainty: Which is more important for global economic activity? *Energy*, ۳۱۰, ۱۳۳۳۰۵

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133300>

Chen, J., Jin, F., Ouyang, G., Ouyang, J., & Wen, F. (2019). Oil price shocks, economic policy uncertainty and industrial economic growth in China. *PloS one*, 14(5), e0210397.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210397>

Dash, S. R., & Maitra, D. (2021). Do Oil and Gas Prices Influence Economic Policy Uncertainty Differently: Multi-Country Evidence Using Time-Frequency Approach. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 81(2).

<https://doi.org/10.1016/j.qref.2021.06.012>

Dong, H., Liu, Y., & Chang, J. (2019). The heterogeneous linkage of economic policy uncertainty and oil return risks. *Green Finance*, 1, 46-66.

<https://doi.org/10.3934/gf.2019.1.46>

Elliott, G., Rothenberg, T. J., & Stock, J. H. (2011). Efficient tests for an autoregressive unit root. *Econometrica*, 79(4), 1133-1156.

<https://doi.org/10.2307/2111847>

Engle, R. F., & Kelly, B. (2012). Dynamic equicorrelation. *Journal of Business & Economic Statistics*, 30(2), 212-228.

<https://doi.org/10.1180/07350010.2011.602048>

Foerster, A. (2014). The asymmetric effects of uncertainty. *Economic Review*, 99, 5-26.

Francq, C., & Zakoian, J.-M. (2019). *GARCH models: Structure, statistical inference, and financial applications*.

Wiley.<https://doi.org/10.1002/9781119470670.007>

Ghani, M., & Ghani, U. (2024). Economic policy uncertainty and emerging stock market volatility. *Asia-Pacific Financial Markets*, 31(1), 160-

181.<https://doi.org/10.1007/s10690-023-9410-1>

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

Press.<https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>

Gong, M., You, Z., Wang, L., & Ruan, D. (2024). Research of the non-linear dynamic relationship between global economic policy uncertainty and crude oil prices. *Journal of Asian Economics*, 90,

101673.<https://doi.org/10.1016/j.asieco.2023.101673>

Hailemariam, A., Smyth, R., & Zhang, X. (2019). Oil prices and economic policy uncertainty: Evidence from a nonparametric panel data model. *Energy Economics*, 83, 40-51.<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.06.010>

Hammed, Y. S. (2024). Global Economic Policy Uncertainties and International Oil Price Volatility Under Alternative Market Conditions. *Energy Research Letters*, 2(Early View).<https://doi.org/10.47004/erl.121264>

Herrera, A. M., Karaki, M. B., & Rangaraju, S. K. (2019). Oil price shocks and US economic activity. *Energy Policy*, 129, 89-

99.<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.011>

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

Hou, F., Tang, W., Wang, H., et al. (2021). Economic policy uncertainty, marketization level, and firm-level inefficient investment: Evidence from Chinese listed firms in energy and power industries. *Energy Economics*, 100(2), 105303.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105303>

Hyndman, R. (2019). *Forecasting: Principles and practice* (3rd ed.). OTexts.
<https://doi.org/10.32614/jrnl.org/1001/cran.package.fpp3>

Gong, M., You, Z., Wang, L., & Ruan, D. (2022). Research of the non-linear dynamic relationship between global economic policy uncertainty and crude oil prices. *Journal of Asian Economics*, 90, 101673.
<https://doi.org/10.1016/j.asieco.2022.101673>

Kilian, L., & Lütkepohl, H. (2017). *Structural vector autoregressive analysis*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108164118>

Kilian, L., & Vigfusson, R. J. (2017). The role of oil price shocks in causing US recessions. *Journal of Money, Credit and Banking*, 49(8), 1747-1776.
<https://doi.org/10.1111/jmcb.12430>

Le, T. H., Le, A. T., & Le, H. C. (2021). The historic oil price fluctuation during the Covid-19 pandemic: What are the causes? *Research in International Business and Finance*, 64, 101489.
<https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2021.101489>

Lim, B., & Zohren, S. (2021). Time series forecasting with deep learning: A survey. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2019), 20200209.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0209>

Lin, B., & Bai, R. (2021). Oil prices and economic policy uncertainty: Evidence from global, oil importers, and exporters' perspective. *Research in International Business and Finance*, 67, 101507.
<https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2020.101507>

Liu, F., Umair, M., & Gao, J. (2023). Assessing oil price volatility co-movement with stock market volatility through quantile regression approach. *Resources Policy*.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103350>

Lyu, Y., Tuo, S., Wei, Y., & Yang, M. (2021). Time-varying effects of global economic policy uncertainty shocks on crude oil price volatility: New evidence. *Resources Policy*, 70, 101943.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101943>

Manera, M., Ahmadi, M., & Sadeghzadeh, M. (2018, April). Investment-Uncertainty Relationship in the Oil and Gas Industry. 20th Scientific Meeting of the Italian Statistical Society.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.316138>

Muzaffar, Z., & Malik, I. R. (2022). Market liquidity and volatility: Does economic policy uncertainty matter? Evidence from Asian emerging economies. *PloS one*, 17(6), e0201097.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201097>

Nakhli, M. S., Mokni, K., & Youssef, M. (2020). Time-varying causality between investor sentiment and oil price: Does uncertainty matter? *International Journal of Finance & Economics*.
<https://doi.org/10.1002/ijfe.2922>

Nason, G. P. (2008). *Wavelet methods in statistics with R*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9111-6>

Percival, D. B., & Walden, A. T. (2006). *Wavelet methods for time series analysis*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511841040.004>

- Presno, I., & Prestipino, A. (۲۰۲۴). Oil Price Shocks and Inflation in a DSGE Model of the Global Economy. <https://doi.org/10.1۷۰1۶/۲۳۸۰-۷۱۷۲,۳۵۷۰>.
- Ravazzolo, F., & Vespignani, J. (۲۰۱۵). A new monthly indicator of global real economic activity. <https://doi.org/10.2۱۳۹/ssrn.۲۵۹۷۹۰۳>
- Rentschler, J. E. (۲۰۱۳). Oil price volatility, economic growth and the hedging role of renewable energy. *World Bank Policy Research Working Paper*, (۶۶۰۶). <https://doi.org/10.10۹۶/۱۸۱۳-۹۴۵۰-۶۶۰۳>
- Silvennoinen, A., & Teräsvirta, T. (۲۰۰۹). Multivariate GARCH models. In *Handbook of financial time series* (pp. ۲۰۱-۲۲۹). Springer. https://doi.org/10.1۰۰۷/۹۷۸-۳-۵۴۰-۷۱۲۹۷-۸_۹
- Tsay, R. S. (۲۰۱۴). *Multivariate time series analysis: With R and financial applications*. Wiley. <https://doi.org/10.1۰۰۲/۹۷۸۱۱۱۸۴۴۵۱۱۲.stat.۳۵۴۵>
- Zhang, Y., He, M., Wang, Y., & Liang, C. (۲۰۲۳). Global economic policy uncertainty aligned: An informative predictor for crude oil market volatility. *International Journal of Forecasting*, ۳۹(۳), ۱۳۱۸-
<https://doi.org/10.1۰۱۶/j.ijforecast.۲۰۲۲.۰۷.۰۰۲۱۳۳۲>.
- Yu, Y., Si, X., Hu, C., & Zhang, J. (۲۰۱۹). A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures. *Neural Computation*, ۳۱(۷), ۱۲۳۵-۱۲۷۰. https://doi.org/10.1۱۶۲/neco_a.۰۱۱۹۹
- Ozcelebi, O. (۲۰۲۱). Assessing the impacts of global economic policy uncertainty and the long-term bond yields on oil prices. *Applied Economic Analysis*. <https://doi.org/10.1۱۰۸/AEA-۰۵-۲۰۲۰-۰۰۴۶>.