

# پیش‌بینی قیمت نفت بر اساس مدل‌های غیرخطی انتقال ملایم و بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

حسین اصغرپور<sup>۱</sup>، علی وفامند<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۰۱

## چکیده

امروزه قیمت نفت نقش مهمی را در اقتصاد جهانی ایفا می‌کند و به عنوان یک عامل مهم و اثرگذار بر برنامه‌های دولت‌ها و بخش‌های تجاری و بازرگانی اهمیت فراوانی دارد. با توجه به اهمیت روز افزون نفت در بازارهای مالی، پیش‌بینی قیمت نفت خام همواره مورد علاقه بسیاری از فعالان بازار و سیاستگذاران بوده است. در این راستا، در این پژوهش، ضمن بررسی و انجام آزمون غیرخطی برای داده‌های ماهانه قیمت نفت خام، به مدل‌سازی و پیش‌بینی قیمت نفت خام در بازارهای جهانی می‌پردازیم. برای این منظور از روش‌شناسی رگرسیون غیرخطی انتقال ملایم<sup>۳</sup> استفاده می‌کنیم. همچنین، به منظور مقایسه عملکرد پیش‌بینی‌های خارج از نمونه، مدل رگرسیون غیرخطی انتقال ملایم بر اساس بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مدل شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> و مدل *ARIMA* را برآورد می‌کنیم. یافته‌های این پژوهش، تأییدکننده رفتار

۱. دانشیار، دانشگاه تبریز، دانشکده اقتصاد؛ asgharpurh@gmail.com

۲. دانشجوی دکترای اقتصاد، دانشگاه تبریز، دانشکده اقتصاد؛ vafamand.ali@gmail.com (نویسنده مسئول)

3. Smooth Transition Regression

4. Artificial Neural Network

غیرخطی قیمت نفت خام و عملکرد بهتر مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل *ARIMA* در پیش‌بینی خارج از نمونه قیمت نفت خام برای افق ۱۲ ماهه بر اساس معیارهای *RMSE* و *MAE* و *DA* است.

**واژگان کلیدی:** قیمت نفت خام، مدل‌های غیرخطی، مدل خودرگرسیون انتقال ملایم، بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مدل شبکه عصبی.

طبقه‌بندی **JEL:** F47، C53.

## ۱. مقدمه

انرژی یک کالای استراتژیک در سطوح بین‌المللی محسوب می‌شود و فعالیت دولت‌ها و سازمان‌ها، مؤثر و وابسته به این کالا و بازارهای مربوط به آن است. اتخاذ هر نوع سیاست توسط دولت‌ها و سازمان‌های بین‌المللی در زمینه انرژی، بحران‌های بازارهای مالی و حتی تغییرات شدید جوی می‌تواند اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر روی عرضه و تقاضای انرژی و در نتیجه، قیمت این کالا بگذارد. هرگونه تغییر در قیمت انرژی، بر روی قیمت کالاهای دیگر و نیز سبد مصرفی خانوارها و در کل رفاه جامعه تأثیرگذار است.<sup>۱</sup> در دنیای صنعتی امروز، نفت به عنوان اصلی‌ترین نوع انرژی، نقش مهمی در تحولات جهان ایفا می‌کند، به طوری که در کشورهای اصلی صادرکننده و واردکننده نفت، بخش عمده‌ای از سیاست‌گذاری‌ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم متأثر از سیاست‌گذاری‌های نفتی است. از سوی دیگر، با توجه به نوسانات قیمت نفت و اثرات اقتصادی حاصل از آن، پیش‌بینی قیمت نفت به روش‌های کارآمدتر می‌تواند از طریق برنامه‌ریزی صحیح اثرات منفی نوسانات قیمت نفت را به حداقل برساند.

تدوین برنامه‌های توسعه اقتصادی و تنظیم بودجه‌های سالانه کشور و اتخاذ سیاست‌های درست از سوی دولتمردان مستلزم شناخت و انجام پیش‌بینی‌های دقیق از میزان تأثیرگذاری نوسان‌های قیمت نفت بر اقتصاد کشورهاست. با توجه به این موضوع که نوسان‌های قیمت نفت تأثیر به‌سزایی در روند حرکتی متغیرهای مهم اقتصادی و جهت‌گیری اقتصادهای متکی به نفت دارد، هدف این پژوهش بررسی رفتار بهای نفت

خام جهانی بر مبنای نظریه‌های غیرخطی و مدل‌سازی مناسب برای پیش‌بینی بهای نفت خام است.

بدین منظور از روش‌شناسی رگرسیون غیرخطی انتقال ملایم، با تابع انتقال لجستیک، مدل‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌کنیم. البته روش‌های دیگری هم وجود دارند که برای پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی به کار گرفته می‌شوند که مدل‌های ARIMA، GARCH و VAR از آن دسته‌اند؛ اما با توجه به وجود ضعف‌هایی در مدل‌سازی و پوشش جهش‌های موجود در روند سری‌های زمانی، اتکا به نتایج پیش‌بینی‌های مدل‌های یادشده چندان مفید نخواهد بود. بنابراین، روش‌های جدیدتری برای رفع این مشکلات ارایه شده‌اند. مدل‌های غیرخطی از جمله این روش‌ها هستند.

برای دستیابی به این هدف، مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است: بخش دوم به ادبیات موضوع، بخش سوم به معرفی الگو، بخش چهارم تبیین داده‌ها و بخش پنجم را به برآورد، تجزیه و تحلیل نتایج الگو اختصاص داده‌ایم. سرانجام نیز در بخش ششم، نتیجه‌گیری را ارائه خواهیم نمود.

## ۲. ادبیات موضوع

### ۲-۱. سیر تاریخی قیمت نفت

در چند سال اخیر بازار جهانی نفت دستخوش تحولات گسترده‌ای شده است. این تحولات ناشی از عوامل متعدد سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و فنی بوده است که موجب تحولات اساسی و ویژه‌ای در بازار نفت خام و به دنبال آن در سیاست‌های جهانی انرژی شده است. در این بین، حوادث و وقایع متعددی موجب شکل‌گیری بحران در این بازار شده که مهم‌ترین این حوادث از قرار زیر است: تحریم نفتی اعراب (۱۹۷۳-۱۹۷۴): این شوک نفتی که حدود یک سال طول کشید، در اثر تحریم صادرات نفت به اسرائیل و کشورهای طرفدار آن از سوی کشورهای عرب حوزه خلیج فارس و به دلیل بروز جنگ بین اعراب و اسرائیل اتفاق افتاد.

- انقلاب اسلامی ایران (۱۹۸۷-۱۹۷۹): این شوک نفتی به دلیل کاهش صدور نفت ایران و به دنبال آن جنگ تحمیلی و نگرانی بازار نفت از به خطر افتادن امنیت عرضه حادث شد.

- تهاجم عراق به کویت (۱۹۸۹-۱۹۹۰): افزایش قیمت نفت در این زمان به علت اشغال کویت توسط عراق صورت گرفت که به خارج شدن نفت دو کشور از بازار منجر شد.
- بحران مالی جنوب آسیا (۱۹۹۷-۱۹۹۸): در این سال‌ها قیمت نفت به دلیل بحران اقتصادی در آسیای جنوب شرقی، کاهش بی‌سابقه‌ای داشت و ارزش اغلب نفت‌های خام یک رقمی شد.
- حادثه یازدهم سپتامبر (۲۰۰۱-۲۰۰۲): در این سال‌ها کاهش بهای نفت به دلیل کاهش تقاضای جهانی نفت به دنبال بروز نشانه‌هایی از رکود اقتصادی در آمریکا به وقوع پیوسته بود که پس از حوادث ۱۱ سپتامبر این کاهش تشدید یافت.
- اشغال عراق توسط آمریکا (۲۰۰۳-۲۰۰۴): با تهاجم آمریکا به عراق در سال ۲۰۰۲ و خارج شدن تولید نفت این کشور از بازار، قیمت نفت به تدریج رو به افزایش گذاشت.
- وقوع بحران مالی آمریکا (۲۰۰۸-۲۰۰۹): در سال ۲۰۰۸ با وقوع بحران مالی در آمریکا و سرایت آن به اقتصاد جهانی، کاهش چشمگیری در قیمت جهانی نفت به وجود آمد، به طوری که قیمت آن از حدود ۱۵۰ دلار به حدود ۳۵ دلار در هر بشکه رسید. در سال ۲۰۰۹ قیمت نفت روند افزایشی به خود گرفت و متوسط قیمت نفت به ۶۰ دلار رسید.
- تحولات سیاسی خاورمیانه و شمال آفریقا (۲۰۱۰-۲۰۱۱): از اواخر سال ۲۰۱۰ و در طول سال ۲۰۱۱ میلادی تحولات سیاسی خاورمیانه و شمال آفریقا، به‌ویژه با بحرانی شدن اوضاع سیاسی لیبی به عنوان یکی از اعضای اوپک و سومین صادرکننده اصلی نفت در قاره آفریقا روند افزایش قیمت نفت ادامه داشت، زیرا نگرانی‌های فعالان بازار نسبت به کاهش تولید و صادرات نفت این کشور سبب شد تا قیمت جهانی نفت نزدیک به ده درصد افزایش یافته و به ۱۲۶ دلار در هر بشکه برسد. در ابتدای سال ۲۰۱۲ نیز تحریم‌های شدید علیه ایران از یک سوی و نیز تهدیدهای ایران به قطع فوری صادرات نفت به اروپا و بستن تنگه هرمز، در صورت تشدید

تحریم‌ها از سوی دیگر، به افزایش قیمت نفت از حدود ۱۱۰ دلار به ۱۲۳ دلار منجر شد.<sup>۱</sup>

## ۲-۲. مروری بر ادبیات موضوع و مطالعات پیشین

پیش‌بینی قیمت در بازار نفت خام از روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی می‌توان روش‌های پیش‌بینی قیمت نفت خام را در دو دسته استفاده از تحلیل‌های تکنیکی بر اساس بررسی‌های آماری و چگونگی همبستگی میان داده‌های تاریخی و استفاده از تحلیل‌های بنیادی و نظریه‌های اقتصادی و چشم‌انداز عرضه و تقاضا در آینده تقسیم‌بندی کرد.

طبق نظریه تکنیکی تمام اطلاعات مربوط به بازار و عرضه و تقاضا در قیمت‌ها و روند آنها مستتر است. در واقع، مبنای تحلیل‌های تکنیکی به نوعی همان عوامل بنیادی (عرضه و تقاضا) هستند و به عبارتی نمودار قیمت‌ها هرگز به تنهایی علت بالا یا پایین آمدن قیمت نیستند و آنها تنها نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری عوامل بنیادین بازار هستند.

باید توجه شود که تحلیلگر تکنیکی به عوامل مؤثر بر تغییرات قیمت و روند حرکتی آن توجهی ندارد، بلکه او توانایی شناسایی به موقع این تغییرات و میزان پایداری آنها را با کمک نمودارها دارد. تحلیلگر تکنیکال عقیده دارد که تغییرات قیمت تنها چیزی است که او نیاز دارد، بداند و دانستن علت این تغییرات، لازم نیست. بنابراین، در تحلیل تکنیکال از روند گذشته قیمت‌ها برای پیش‌بینی قیمت در آینده در بازه‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود.

روش دیگر پیش‌بینی قیمت در بازار جهانی نفت خام استفاده از تحلیل‌های بنیادین (عوامل مؤثر بر عرضه و تقاضا) است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عوامل بسیاری عرضه و تقاضای جهانی نفت خام را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این عوامل توسط تحلیلگران مختلف با عناوین مختلف دسته‌بندی شده که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آنها را در دو بخش کلی عوامل اقتصادی و غیراقتصادی تقسیم نمود. در بخش مربوط به عوامل اقتصادی قیمت نفت خام، مانند قیمت کالاهای دیگر تحت تأثیر عرضه و تقاضای بازار قرار دارد. وضعیت اقتصاد جهانی، روند تغییرات جمعیت و شدت مصرف انرژی از عوامل

۱. عباسی‌نژاد (۱۳۹۲).

مؤثر بر تقاضا و وضعیت حوزه‌های نفتی موجود، پتانسیل کشف حوزه‌های جدید نفتی به‌ویژه در آب‌های عمیق، روند تولید و مصرف منابع نفت غیرمتعارف، انرژی‌های جایگزین، میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تمایل سرمایه‌گذاران به سرمایه‌گذاری در هر یک از موارد یادشده از عوامل مؤثر بر عرضه است. بنابراین، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عوامل متعددی در تعیین قیمت نفت خام در بازار جهانی مؤثرند که همگی آنها در پیش‌بینی قیمت‌ها باید در نظر گرفته شوند. در بخش مربوط به عوامل غیراقتصادی نیز قیمت نفت نه تنها تحت تأثیر عوامل اقتصادی بلکه تابع عوامل غیراقتصادی از جمله مسائل سیاسی و امنیتی، خطرات ژئوپلیتیکی و عوامل روانی بازار قرار دارد. بنابراین، هر تحلیلگر بنیادین با توجه به چگونگی تغییرات هر یک از این عوامل اقدام به پیش‌بینی قیمت نفت خام می‌نماید و میزان تأثیرگذاری هر یک از عوامل را هم از طریق برآورد معادله قیمت به‌دست آورده و تعیین ضرایب هر یک از عوامل یادشده را با استفاده از روش‌های مختلف اقتصادسنجی مشخص می‌نماید.

در بیشتر اقتصادهای متکی به درآمدهای نفتی، عموماً استقرار وضعیت مناسب بخش نفتی، بهره‌برداری مناسب از این ظرفیت و استمرار درآمدهای آن، بر عملکرد بخش‌های دیگر اقتصاد تأثیر به‌سزایی دارد. بدین روی، بررسی قیمت نفت به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر بازار نفت، در جهت تشخیص روند آتی قیمت نفت و اتخاذ سیاست‌ها و راهکارهای اقتصادی بسیار ضروری است. بر این اساس، مدل‌های بسیاری برای پیش‌بینی، برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در بسیاری از کشورها و سازمان‌ها طراحی و استفاده شده که فرضیه بازار کار<sup>۱</sup> (EMH)، مدل‌های اتورگرسیون، فرآیند بازگشت به میانگین،<sup>۲</sup> خانواده مدل‌های ARCH و GARCH و الگوهای غیرخطی و ترکیبی از انواع روش‌های موجود در زمینه پیش‌بینی قیمت و بررسی بی‌ثباتی قیمت نفت است. در جدول ۱ به مطالعات تجربی صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌کنیم.

---

1. Efficient Market Hypothesis (EMH)  
2. mean reverting

جدول ۱. مطالعات تجربی پیش بینی قیمت نفت

نام نویسنده	سال	روش	نتیجه
شمبارا و روسیترا <sup>۱</sup>	۲۰۰۵	شبکه عصبی مصنوعی و میانگین متحرک‌های متناوب	پیش‌بینی درست‌تر قیمت نفت خام در بازارهای آتی بر اساس مدل‌های یادشده
مهرآرا <sup>۲</sup> و همکاران	۲۰۰۸	روش تلفیقی شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک	عایدی حاصل از پیش‌بینی روش تلفیقی مذکور، در دوره‌های مختلف زمانی نسبت به مدل‌های سنتی و خطی به مراتب بیش‌تر است.
خیانگ <sup>۳</sup> و همکاران یو <sup>۴</sup> و همکاران	۲۰۱۲ ۲۰۰۸	الگوی یادگیری جمعی شبکه عصبی	مدل مورد استفاده عملکرد بهتری در پیش‌بینی قیمت نفت بر اساس معیارهای SMAPE و MASE و DA دارند.
هوو <sup>۵</sup> و همکاران	۲۰۱۲	مدل GARCH ناپارامتریک	برتری عملکرد مدل ناپارامتریک در پیش‌بینی بی‌ثباتی قیمت نفت خام برنت و WTI در پیش‌بینی خارج از نمونه نسبت به مدل‌های دیگر پارامتریک GARCH
احمد و شبری	۲۰۱۳	انواع مدل‌های GARCH	برتری مدل GARCH-N را نسبت به سایر مدل‌های GARCH بر اساس معیارهای MAE و MSE
سامپو و همکاران <sup>۶</sup>	۲۰۱۴	نرمالیزه کردن داده‌ها در روش شبکه عصبی	برتری این روش بر روش حداقل مربعات
شبری و سامسودین <sup>۷</sup>	۲۰۱۴	روش شبکه عصبی مصنوعی و روش شبکه عصبی انتقال موجک	که قدرت پیش‌بینی روش شبکه عصبی انتقال موجک در پیش‌بینی قیمت نفت بیشتر از روش شبکه عصبی معمولی است.

1. Shambora and Rossiter
2. Mehrara
3. Xiong
4. Yu
5. Hou
6. sompui
7. samsudin

نام نویسنده	سال	روش	نتیجه
بهرادمهر	۱۳۸۷	تبدیل موجک و شبکه عصبی	کاهش نویز و هموارسازی داده‌ها، عملکرد پیش‌بینی قیمت نفت را بهبود می‌دهد.
پورکاظمی و اسدی شکیبایی و همکاران	۱۳۸۸ ۱۳۸۸	روش شبکه عصبی مصنوعی و روش ARIMA	شبکه‌های عصبی پیش‌بینی‌های بهتری نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی ارائه می‌کنند.
کميجانی و همکاران	۱۳۹۱	انواع مدل‌های GARCH	انتخاب مدل -ARFIMA(1,1) به عنوان بهترین مدل، به دلیل مدل‌سازی و پیش‌بینی نوسانات قیمت نفت خام سنگین ایران

بر اساس پژوهش‌های پیش‌گفته، هریک از این مدل‌ها ضعف‌هایی در خصوص پیش‌بینی قیمت نفت دارند. از جمله این ضعف‌ها می‌توان به ناکارایی و عدم کاربرد این مدل‌ها در حالت نامانا بودن متغیرها و عدم پوشش جهش‌های موجود در روند سری‌های زمانی اشاره کرد، در نتیجه، می‌توان گفت که مدل‌های غیرخطی، از آن‌جا که عوامل بیشتری را در الگوسازی لحاظ می‌کنند، توانایی بالاتر و دقت بیشتری در پیش‌بینی قیمت نفت دارند. در این مطالعه نیز از روش‌شناسی رگرسیون غیرخطی انتقال ملایم، با تابع انتقال لجستیک، مدل‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک و مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی قیمت نفت خام استفاده می‌کنیم.

### ۳. مدل‌های پیش‌بینی سری زمانی

#### ۳-۱. الگوی رگرسیون غیرخطی انتقال ملایم (STR)

مدل رگرسیون انتقال ملایم یک مدل رگرسیونی سری زمانی غیرخطی است که می‌توان آن را به عنوان یک شکل توسعه‌یافته از مدل رگرسیونی تغییر وضعیت که توسط باکون و واتس<sup>۱</sup> (۱۹۷۱) معرفی شد، تلقی کرد. این پژوهشگران دو خط رگرسیونی را در نظر گرفته و به طراحی مدلی پرداختند که در آن گذار از یک خط به خط دیگر به صورت

1. Bacon and Watts



ملایم اتفاق می‌افتد. در متون سری زمانی، گرنجر - تراسویرتا<sup>۱</sup> (۱۹۹۳)، برای نخستین بار به تشریح و پیشنهاد مدل انتقال ملایم در مطالعات خود پرداختند که شکل استاندارد مدل به صورت زیر است:

$$y_t = \alpha + \varphi' z_t + \theta' z_t G(\gamma, C, s_t) + u_t = \alpha + \quad (۱)$$

$$\{\varphi + \theta z_t G(\gamma, C, s_t)\} z_t + U_t$$

تابع انتقال لجستیک عمومی به شکل زیر معرفی می‌شود:

$$G(\gamma, C, S_t) = (1 - \exp\{-\gamma \prod_{k=1}^K (s_t - c_k)\})^{-1}, \quad \gamma > 0 \quad (۲)$$

حال، می‌توان با جایگذاری تابع انتقال (رابطه ۲) در مدل STR، رابطه ۱ را به صورت زیر تصریح کرد:

$$y_t = (\alpha_0 + \varphi' z_t) + (\alpha_1 + \theta' z_t) (1 - \exp\{-\gamma \prod_{k=1}^K (s_t - c_k)\})^{-1} + u_t \quad (۳)$$

که در آن،  $y_t$  متغیر وابسته،  $\alpha$  عرض از مبدأ و  $z_t$  بردار متغیرهای توضیحی است که ضرایب متغیرهای توضیحی، دیگر کمیت ثابتی نبوده و تابعی از متغیرهای  $s_t$  است.  $G(\gamma, C, S_t)$  تابع انتقال،  $C$  پارامتر آستانه‌ای و  $\gamma > 0$  پارامتر انتقال یا شیب و  $s_t$  متغیر گذار (انتقال) نامیده می‌شود که در این مطالعه  $z_t$  دارای یک متغیر قیمت نفت خام بوده که  $s_t$  می‌تواند خود متغیر قیمت نفت خام یا وقفه مربوط به آن و یا متغیری خارج از الگو باشد.

تصریح یادشده بیان می‌کند که الگو می‌تواند به صورت یک تابع خطی با ضرایبی که به‌طور تصادفی در طی زمان تغییر می‌کنند نیز تقسیم شود.<sup>۲</sup>

عمومی‌ترین گزینه برای  $k = 1, 2$  است که برای حالت  $k = 1$ ، ضرایب  $\emptyset + \theta G(\gamma, C, S_t)$  به‌عنوان تابعی از  $s_t$  به صورت یکنواخت از  $\emptyset$  به  $\emptyset + \theta$  تغییر می‌کند (هنگامی که  $s_t$  از  $-\infty$  به  $+\infty$  حرکت می‌کند)؛ اما برای حالت  $k = 2$ ، ضرایب به صورت متقارن حول نقطه میانی  $C \left( \frac{c_1 + c_2}{2} \right)$  از  $\emptyset + \theta$  به  $\emptyset$  تغییر می‌کنند (هنگامی که  $s_t$  از  $C$  به سمت  $\pm\infty$  حرکت می‌کند) یعنی جایی که تابع انتقال کمترین مقدار را به خود می‌گیرد. مدل LSTR برای حالت  $k = 1$  (مدل LSTR۱) دارای قابلیت مدل‌سازی رفتار متقارن متغیرهاست. به‌طور مثال الگوی

1. Granger and Terasvirta

LSTR<sub>۱</sub>، برای توصیف فرآیندهایی که در دوره‌های رونق، رفتاری متفاوت از دوره‌های رکودی دارند و انتقال از یک رژیم به رژیم دیگر به صورت ملایم صورت می‌گیرد، مدل مناسبی است. از سوی دیگر، مدل LSTR(K=۲) برای شرایطی مناسب است که ضرایب یا فرآیند تعدیل پویا در کمترین و بیشترین مقدار  $s_t$  رفتاری مشابه داشته و فقط در مقادیر میانی رفتاری متفاوت از خود نشان دهند.

وقتی پارامتر شیب  $\gamma = 0$  باشد، تابع انتقال  $G(\gamma, c, s_t) = \frac{1}{\gamma}$  خواهد بود و مدل STR تبدیل به یک مدل خطی خواهد شد. اگر  $\gamma \rightarrow \infty$ ، مدل LSTR<sub>۱</sub> به مدل رگرسیونی تغییر وضعیت با دو رژیم تبدیل می‌شود و در این حالت مدل LSTR<sub>۲</sub>، به مدل رگرسیونی تغییر وضعیت با سه رژیم تبدیل می‌شود که رژیم‌های اول و سوم حالت یکسانی داشته و رژیم دوم متفاوت از دو رژیم دیگر خواهد بود. همچنین، شکل تغییر یافته مدل LSTR<sub>۲</sub>، مدل رگرسیونی غیرخطی انتقال ملایم با تابع نمایی<sup>۱</sup> (ESTR) است. انتقال این مدل به صورت زیر است:

$$G_E(\gamma, c, s_t) = 1 - \exp\{-\gamma(s_t - c_1^*)^2\}, \gamma > 0 \quad (۴)$$

گفتنی است که مدل ESTR نیز همانند مدل LSTR<sub>۱</sub>، مدلی با یک حد آستانه‌ای و دو رژیم بوده و برای الگوهایی با تعداد دو رژیم بیشتر کاربرد دارد.

پیش از تصریح و برآورد یک الگوی غیرخطی به صورت STR ابتدا بایستی غیرخطی بودن آن را مورد آزمون قرار دهیم. در صورتی که فرض صفر مبنی بر خطی بودن الگو رد شود، باید از بین مدل‌های غیرخطی بالقوه، به انتخاب نوع مدل غیرخطی (LSTR<sub>۱</sub> یا LSTR<sub>۲</sub>) پرداخته و پارامترهای آن را برآورد کنیم. برای آزمون فرضیه خطی بودن، بایستی محدودیت  $\gamma = 0$  را در الگوی غیرخطی<sup>۳</sup>، آزمون کرد؛ اما در فرضیه  $\gamma = 0$ :  $H_0$ ، ضرایب الگو، قابل شناسایی نیستند. به همین دلیل، برای آزمون یادشده تقریب تابع انتقال<sup>۲</sup> را بر اساس بسط تیلور به صورت زیر می‌نویسیم:

$$y_t = c + \beta'_0 z_t + \sum_{j=1}^3 \beta'_0 z_t s_t^j + u_t^* \quad , \quad t = 1, \dots, T \quad (۵)$$

الگوی خطی بر اساس فرضیه صفر  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ :  $H_0$  مبتنی بر آماره ضریب لاگرانژ یا نسبت F آزمون می‌شود.

1. exponential

در صورت رد فرضیه  $H_0$ ، گام بعدی برای برآورد مدل غیرخطی، انتخاب نوع مدل غیرخطی است. در مدل های STR هیچ نظریه اقتصادی روشنی در زمینه انتخاب نوع مدل وجود ندارد، بنابراین، انتخاب نوع مدل باید بر اساس داده ها و آزمون های آماری باشد. مطابق گرنجر و تراسورتا (۱۹۹۳) و تراسورتا (۱۹۹۴)، فرضیه های زیر را که مبتنی بر رابطه ۵ است، مورد آزمون قرار می دهیم:

$$H_{01}: \beta_{3j} = 0, \quad j = 1, \dots, p, \quad (۶)$$

$$H_{02}: \beta_{2j} = 0 | \beta_{3j} = 0, \quad j = 1, \dots, p, \quad (۷)$$

$$H_{03}: \beta_{1j} = 0 | \beta_{2j} = \beta_{3j} = 0, \quad j = 1, \dots, p, \quad (۸)$$

با رد فرضیه  $H_{01}$  و یا پذیرش  $H_{01}$  و  $H_{02}$  و رد  $H_{03}$  مدل انتخابی  $LSTR_1$  خواهد بود و اگر فرضیه  $H_{01}$  پذیرفته شود و فرضیه  $H_{02}$  رد شود، مدل  $LSTR_2$  انتخاب خواهد شد.

همچنین، قاعده دیگری نیز وجود دارد که تصمیم گیری بر اساس مقدار P-VALUE خواهد بود. اگر فرضیه  $H_{02}$  به قوی ترین شکل رد شود، مدل  $LSTR_2$  است در غیر این صورت، مدل  $LSTR_1$  انتخاب می شود. سرانجام، پس از انتخاب شکل مدل غیرخطی به برآورد مدل و ارزیابی آن می پردازیم. پس از برآورد مدل STR انتخابی از آزمون باقی مانده غیرخطی<sup>۱</sup> استفاده می کنیم تا بررسی شود که مدل برآورد شده دارای ویژگی های رضایت بخشی از غیرخطی بودن است یا خیر. برای انجام این آزمون، خواهیم داشت:

$$y_t = \alpha + \phi' z_t + \theta' z_t G(\gamma_1, c_1, s_{1t}) + \omega z_t H(\gamma_2, c_2, s_{2t}) + u_t \quad (۹)$$

که  $H(\gamma_2, c_2, s_{2t})$  تابع انتقال دیگری از نوع تابع انتقال لجستیک،  $u_t \sim iid$  و  $N(0, \sigma^2)$  است. برای انجام آزمون، بایستی محدودیت  $\gamma = 0$  را در الگوی غیرخطی آزمون کرد. برای انجام این آزمون، تقریب تابع انتقال را بر اساس بسط تیلور به صورت زیر می نویسیم:

$$y_t = c + \beta'_0 z_t + \theta' z_t G(\gamma_1, c_1, s_{1t}) + \sum_{j=1}^3 \beta'_0 z_t s_t^j + u_t^* \quad (۱۰)$$

که  $u_t^* = u_t + \omega' z_t R_3(\gamma_2, c_2, s_{2t})$  و  $R_3$  باقی مانده های تقریب چند جمله ای است. فرضیه صفر بر اساس تقریب یاد شده  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$  است که مبتنی بر آماره ضریب لاگرانژ یا نسبت F آزمون می شود.

## ۲-۳. الگوی رگرسیون غیرخطی انتقال ملایم (STR) با بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (LSTR<sup>۱</sup>-GEN)

الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup>، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین بوده و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است. در دهه ۶۰ میلادی دانشمندی از دانشگاه میشیگان به نام «جان هلند»<sup>۲</sup> ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی‌های مهندسی مطرح کرد. ایده اساسی این الگوریتم انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌هاست. پس از آن، کارهای دی جانگ<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۵ در زمینه بررسی و مقایسه چندین روش الگوریتم ژنتیک پایه‌های نظری بحث را فراهم آورد. این الگوریتم با الهام از طبیعت بر پایه اصل تکاملی «پایداری بهترین‌ها»<sup>۴</sup> استوار است. در الگوریتم ژنتیک هر فرد از جمعیت به صورت یک کروموزوم معرفی می‌شود. کروموزوم‌ها در طول چندین نسل کامل‌تر می‌شوند. در هر نسل، کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شوند و متناسب با ارزش خود امکان بقا و تکثیر می‌یابند. تولید نسل در بحث الگوریتم ژنتیک با عملگرهای همبندی<sup>۵</sup> و جهش<sup>۶</sup> صورت می‌گیرد. والدین برتر بر اساس یک تابع برازندگی انتخاب می‌شوند. در هر مرحله از اجرای الگوریتم ژنتیکی، یک دسته از نقاط فضای جستجو مورد پردازش‌های تصادفی قرار می‌گیرند. به این صورت که به هر نقطه دنباله‌ای از کاراکترها نسبت داده می‌شود و بر روی این دنباله‌ها، عملگرهای ژنتیکی اعمال می‌شود. سپس، دنباله‌های به‌دست آمده دیکد شده تا نقاط جدیدی در فضای جستجو به‌دست آید. در پایان، بر اساس این‌که تابع هدف در هر یک از نقاط چه مقدار باشد، احتمال شرکت نمودن آنها در مرحله بعد تعیین می‌شود. طرح کلی یک الگوریتم به شرح زیر است:

– آغاز: جمعیت  $n$  کروموزومی<sup>۷</sup> به صورت تصادفی ایجاد کنید (راه‌حل‌های مناسب مسأله).

در الگوریتم‌های ژنتیکی، هر کروموزوم نشان‌دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسأله مورد نظر است. خود کروموزوم‌ها (راه‌حل‌ها) از تعداد ثابتی ژن<sup>۱</sup> (متغیر) تشکیل می‌شوند.

۱. مطالب این بخش برگرفته از کتاب معرفی الگوریتم‌های ژنتیک نوشته Mitchell است.

2. John Holland  
3. Dejong  
4. Survival of the fittest  
5. CrossOver  
6. Mutation  
7. Chromosome

- ارزش‌گذاری: برازندگی  $f(x)$  هر کروموزوم  $X$  در جمعیت را ارزیابی کنید. به منظور حل هر مسأله با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی، ابتدا باید یک تابع برازندگی برای آن مسأله ابداع شود. برای هر کروموزوم، این تابع عددی غیرمنفی را برمی‌گرداند که نشان‌دهنده شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است.

- جمعیت جدید: جمعیت جدیدی را تشکیل دهید. مراحل زیر را تکرار کنید تا جمعیت جدید کامل شود:

انتخاب: دو کروموزوم (والدین) را با توجه به برازندگی آنها از میان جمعیت انتخاب کنید. کروموزوم‌های برانزده‌تر شانس بیشتری دارند تا برای تولید مثل انتخاب شوند. از روش‌های انتخاب از جمله چرخ رولت<sup>۲</sup> بر اساس این ایده عمل می‌کنند.

آمیزش (تقاطع): با توجه به احتمال آمیزش<sup>۳</sup>، والدین را برای تشکیل فرزندان<sup>۴</sup> جدید با هم ترکیب کنید. معمولاً احتمال آمیزش برای هر زوج کروموزوم بین ۰/۶ تا ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود که به این عدد نرخ آمیزش<sup>۵</sup> یا احتمال آمیزش گفته می‌شود و با PC نمایش داده می‌شود. در صورتی که بر روی یک زوج کروموزوم عمل آمیزش صورت نگیرد، فرزندان با تکرار نمودن والدین تولید می‌شوند.

جهش: با توجه به احتمال جهش<sup>۶</sup> فرزندان را در هر لوکاس (موقعیت در کروموزوم)<sup>۷</sup> جهش دهید. احتمال انجام عمل جهش بر روی هر کروموزوم را نرخ جهش<sup>۸</sup> یا احتمال جهش می‌گویند و با  $P_m$  نمایش می‌دهند. پس از اتمام عمل جهش، کروموزوم‌های تولیدشده به‌عنوان نسل جدید شناخته شده و برای دور بعد اجرای الگوریتم ارسال می‌شوند.

- پذیرفتن: فرزندان جدید را در جمعیت جدید بگنجانید.

- جایگزینی: جمعیت جدید ایجادشده را برای روند الگوریتم به کار ببرید.

---

1. Gene  
2. roulette-wheel  
3. Probability Crossover  
4. Offspring  
5. Crossover Rate  
6. Probability Mutation  
7. Lockus  
7. Mutation Rate

### ۳-۳. مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی

روش شبکه‌های عصبی به واسطه توانایی در شناخت الگوهای رفتاری، توجه بسیاری از پژوهشگران را در علوم مختلف به خود جلب کرده است. شبکه عصبی مجموعه‌ای از اتصالات بین نرون‌هاست. ساختار یک شبکه، با پارامترهای تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه، تعداد ورودی‌ها و تعداد خروجی‌ها تعیین می‌شود. از جمله کاربردهای این روش، پیش‌بینی متغیرهای مالی و اقتصادی بوده است. چهار ویژگی روش شبکه‌های عصبی آن را روش مناسبی برای پیش‌بینی سری‌های زمانی مالی و اقتصادی می‌کند. نخست آن که شبکه‌های عصبی خود تطبیق<sup>۱</sup> هستند و حداقل فروض پیش‌بینی درباره مسأله مورد مطالعه را دارند. دوم آن که می‌توانند تعمیم‌یافته و برای پیش‌بینی برون نمونه‌ای عملکرد مناسبی از خود نشان دهند. سوم آن که برآوردکننده هر تابعی با هر تقریب دلخواه هستند و چهارم آن که غیرخطی‌اند. در این پژوهش برای مدل‌سازی و پیش‌بینی قیمت نفت خام از شبکه‌های عصبی سه لایه به عنوان یکی از مدل‌های رقیب با مدل پیشنهادی رگرسیون غیرخطی استفاده می‌کنیم.

گفتنی است به منظور ارزیابی و بررسی عملکرد مدل‌های مختلف در پیش‌بینی خارج از نمونه، معیارهای MAE و RMSE و DA<sup>۲</sup> به کار گرفته می‌شوند. از معیار DA<sup>۲</sup> به منظور تعیین درستی برای تغییرات قیمت نفت خام استفاده می‌شود. این معیارها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^h \frac{(\hat{y}_t - y_t)^2}{h}} \quad (11)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^h \frac{|\hat{y}_t - y_t|}{h} \quad (12)$$

$$DA = \sum_{i=1}^h \frac{A_t}{h} \text{if } (y_{t+1} - y_t)(\hat{y}_{t+1} - y_t) \geq 0, A_t = 1, \quad (13)$$

$$\text{Else } A_t = 0$$

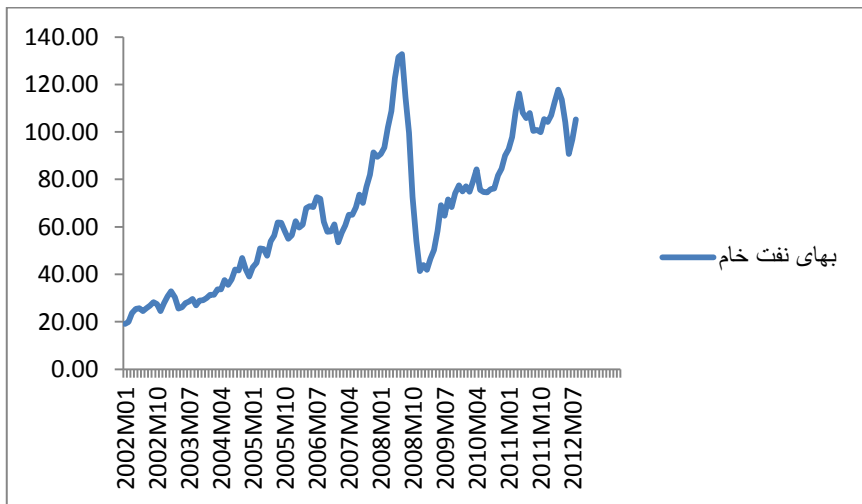
در رابطه‌های بالا،  $h$  طول دوره پیش‌بینی،  $y(t)$  مقدار واقعی و  $\hat{y}(t)$  مقدار پیش‌بینی شده متغیر را نشان می‌دهد و بر اساس این سه معیار معرفی شده عملکرد مدل‌های مختلف در پیش‌بینی خارج از نمونه قیمت نفت خام بررسی می‌شود.

---

1. Self-adaptive  
2. Directional Accuracy

#### ۴. تبیین داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه داده‌های ماهانه متوسط قیمت جهانی نفت خام در بازه زمانی ماه اول ۲۰۰۲ تا ماه هشتم ۲۰۱۳ بوده که از بانک اطلاعات بانک جهانی دریافت شده است. روند زمانی بهای نفت خام در دوره مورد بررسی دارای جهش است. با توجه به اینکه هدف این پژوهش، مدل‌سازی پیش‌بینی رفتار غیرخطی بهای نفت خام بوده، انتخاب نمونه مورد استفاده موجه است. نمودار ۱، تحولات قیمت نفت خام در دوره مورد بررسی را نشان می‌دهد.



نمودار ۱. سری زمانی قیمت نفت خام در دوره ماه اول ۲۰۰۲ تا ماه هشتم ۲۰۱۲

#### ۵. برآورد مدل‌ها و تشریح نتایج

ابتدا نمونه مورد بررسی به دو بخش آموزش و آزمایش تقسیم می‌کنیم. از داده‌های بخش آموزش نمونه‌ها برای انجام آزمون‌ها و برازش مدل‌های مختلف پیش‌بینی و از بخش آزمایش نمونه به منظور برآورد میزان خطای پیش‌بینی خارج از نمونه مدل‌های مختلف برآورد شده، استفاده می‌کنیم. برای سری زمانی قیمت نفت خام از ماه اول ۲۰۰۲ تا ماه هشتم ۲۰۱۲ بخش آموزش و از ماه نهم ۲۰۱۲ تا ماه هشتم ۲۰۱۳ بخش آزمایش نمونه تعیین می‌کنیم.

برای برآورد مدل ARIMA از روش شناسی باکس-جنکینز استفاده می‌کنیم. بر اساس معیار آکائیک و نیز از طریق توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی مدل بهینه (1,1,1) ARIMA را برای قیمت نفت خام انتخاب می‌کنیم.

در ادامه به انجام آزمون غیرخطی بودن، برای تصریح و برآورد مدل غیرخطی STR می‌پردازیم. بر اساس آزمون فرضیه صفر  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$  برای رابطه ۱، با رد فرضیه  $H_0$  مشخص می‌شود که سری زمانی مورد نظر غیرخطی است. در نتیجه، می‌توان از مدل‌های غیرخطی سری زمانی برای مدل‌سازی قیمت نفت خام استفاده کرد. مقدار P-value آماره F را در سطر دوم جدول ۱، ارائه کرده‌ایم.

بر اساس آنچه ذکر شد، پس از رد فرض خطی بودن مدل، به آزمون رابطه‌های ۶، ۷ و ۸، می‌پردازیم که مبتنی بر رابطه ۵ است. با توجه به مقادیر P-value آماره‌های F به دست آمده از آزمون بالا، با ردنشدن فرضیه  $H_0$  و مقدار صفر برای P-value آماره F در فرضیه  $H_0$ ، مدل LSTR<sub>1</sub> را انتخاب می‌کنیم. نتایج را در ستون‌های سوم، چهارم و پنجم جدول ۲، آورده‌ایم.

جدول ۲. مقادیر p-value آزمون خطی مدل به ازای متغیر گذار

فرضیه	$H_0$	$H_{0.1}$	$H_{0.2}$	$H_{0.3}$	نوع مدل غیرخطی
p-value	۰/۰۰۰	۰/۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	LSTR <sub>1</sub>

مأخذ: یافته‌های این پژوهش.

پس از انتخاب نوع مدل، به برآورد مدل غیرخطی انتخابی، LSTR<sub>1</sub> می‌پردازیم. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تمامی ضرایب برآوردی (بجز  $\alpha$ ) هم در بخش خطی و هم در بخش غیرخطی معنادارند.

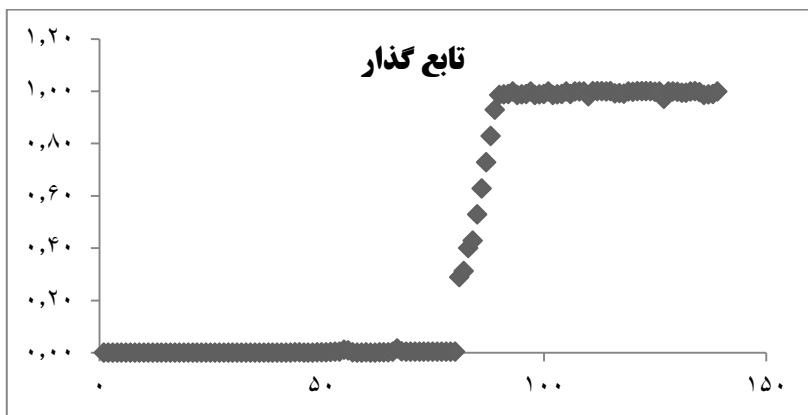
جدول ۳. نتایج برآورد رابطه LSTR<sub>1</sub>

ضرایب	$\alpha$	$\phi$	$\alpha_1$	$\theta$	$\gamma$	$c_1$
مقدار	۱/۵۱	۰/۹۸	۲۵/۴۷	-۰/۲۴	۹/۸۲	۹۳/۱۶
p-value	۰/۴۲	۰/۰۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴۸	۰/۰۰۰

مأخذ: یافته‌های این پژوهش.



نتایج به‌دست‌آمده از برآورد مدل با استفاده از الگوی LSTR<sub>۱</sub> را می‌توان به این صورت بیان کرد که مقادیری از متغیر گذار که در آن گذار از رژیم اول به رژیم دوم اتفاق می‌افتد، برابر با ۹۳/۱۶ است. در حقیقت این مقدار، نقطه عطف سرعت تغییر ضرایب در تابع لجستیک (LSTR<sub>۱</sub>) برای قیمت نفت خام است. حدود آستانه‌ای و گذار بین رژیم‌ها را در نمودار ۲، نشان داده‌ایم. سرعت گذار بین رژیم‌های سری زمانی قیمت نفت خام، با توجه به پارامتر گذار برآوردشده، ۹/۸۲ است.



نمودار ۲. تابع گذار LSTR<sub>۱</sub>

در نمودار ۲، حدود آستانه‌ای مربوط به انتقال رژیم‌ها را نشان داده‌ایم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سری زمانی قیمت نفت خام در دوره مورد بررسی دارای دو رژیم بوده و گذار بین رژیم‌ها با جهش نسبتاً تند همراه است که مقدار  $\gamma$  برآوردی نیز همین موضوع را نشان می‌دهد.

پس از برآورد مدل، آزمون‌های تشخیصی برای بررسی پارامترهای مدل پژوهش و پسماند سری زمانی قیمت نفت خام انجام می‌گیرد. مقادیر p-value ارائه شده در جدول ۴، بیان می‌کند که بر اساس آزمون ثبات پارامترها، فرضیه صفر مبنی بر ثبات پارامترها رد نمی‌شود و پارامترهای مدل برآوردی از جمله  $\gamma$  و  $c$  با ثبات هستند. آزمون ARCH نیز حاکی از عدم ناهمسانی واریانس در پسماندهای قیمت نفت خام در برآورد مدل غیرخطی است. بر اساس مقدار p-value آزمون جاک-برا نیز مشخص می‌شود که فرضیه صفر نرمال بودن باقی‌مانده‌ها رد می‌شود که در مدل‌های غیرخطی منطقی است.

جدول ۴. نتایج آزمون‌های تشخیصی در مدل LSTR<sub>۱</sub>

آزمون جارک- برا	آزمون LM گادفری	آزمون اثر ARCH	آزمون ثبات پارامترها	آزمون‌های تشخیصی متغیر
۰/۰۰۰	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	p-value

مأخذ: یافته‌های این پژوهش.

همچنین، با توجه به ردنشدن فرضیه صفر در آزمون LM گادفری<sup>۱</sup>، آزمون نبود خودهمبستگی در مدل‌های STR، مشخص می‌شود که پسماندهای سری زمانی، همبستگی ندارند.

حال، از آزمون باقی‌مانده غیرخطی<sup>۲</sup> استفاده می‌کنیم تا بررسی شود که مدل برآوردشده دارای ویژگی‌های رضایت بخشی از غیرخطی بودن است یا خیر. مقدار p-value آزمون  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$  در رابطه ۰/۹،۵ به دست می‌آید. بر اساس نتایج بالا، مشخص می‌شود که مسأله غیرخطی بودن در مورد متغیر گذار قیمت نفت خام به‌طور مناسبی مدل‌سازی شده است.

جدول ۵. مقدار p-value آزمون باقیمانده غیرخطی مدل LSTR<sub>۱</sub>

متغیر گذار	فرضیه
۰/۹	$H_0$

مأخذ: یافته‌های این پژوهش.

پس از برآورد پارامترهای مدل‌های ARIMA و STR به برآورد مدل STR بر اساس بهینه‌سازی الگوی الگوریتم ژنتیک می‌پردازیم. بدین منظور رابطه ۱ را بر اساس روش حداقل مربعات خطی و حداقل‌سازی تابع ۱۴، برآورد می‌کنیم.

$$\frac{1}{2} \text{MSE} (y - y^t) = \frac{1}{2} \text{MSE} (e) \quad (14)$$

که در آن،  $y^t$  مقادیر واقعی،  $y$  مقادیر خروجی الگو و MSE میانگین مربعات خطا در بهینه‌سازی الگوی الگوریتم ژنتیک است.

1. Godfrey's LM test  
2. Testing no additive nonlinearity

حال، به انتخاب اندازه جمعیت مناسب برای مسأله مورد بررسی می‌پردازیم. درباره تعیین اندازه جمعیت گلدبرگ با توجه به اینکه عملکرد خوب الگوریتم ژنتیک مستلزم انتخاب احتمال بالای تقاطع، احتمال پایین جهش (به‌طور معکوس نسبت به اندازه جمعیت) و اندازه جمعیت متوسط است، در نخستین اجرای الگوریتم ژنتیک در فصل اجرای رایانه‌ای الگوریتم ژنتیک کتابش از اندازه جمعیت ۳۰، نرخ تقاطع ۰/۶ و نرخ جهش ۰/۳۳۳ استفاده کرد.<sup>۱</sup> در این پژوهش نیز اندازه جمعیت اولیه ۳۰ را در نظر گرفته‌ایم. مرحله بعدی تعریف یک تابع برازندگی یا تابع هدف است که هر کروموزوم در برابر آن از نظر تناسب با محیط مورد نظر آزمون می‌شود. تابع برازندگی در این پژوهش، عبارت است از:

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{2}MSE(e)}{\sum_{i=1}^1 MSE(e)} \quad (15)$$

چهارمین پارامتر الگوریتم ژنتیک، انتخاب است. در رویه انتخاب، دو کروموزوم والد بر مبنای مقادیر برازندگی‌شان انتخاب می‌شوند، به‌طوری که هر چه مقدار برازندگی بالاتر باشد، احتمال انتخاب آن کروموزوم نیز بیشتر خواهد بود. در این پژوهش، استراتژی انتخاب تناسبی یا چرخ رولت را که مشهورترین استراتژی انتخاب تصادفی است، مورد استفاده قرار می‌دهیم. پس از انتخاب دو کروموزوم والد از عملگرهای تقاطع و جهش به منظور ایجاد دو فرزند (که بهترین ویژگی‌های والدینشان را به ارث می‌برند) برای جمعیت جدید را به شرح زیر استفاده می‌کنیم:

وقتی یک جفت از کروموزوم‌ها انتخاب شوند، می‌توان از عملگر تقاطع برای ایجاد فرزند استفاده کرد. اگر احتمال برابر یک باشد، اشاره به این دارد که تمام کروموزوم‌های منتخب در تکثیر باید استفاده شوند.<sup>۲</sup> مجموعه‌ای از نرخ تقاطع‌ها و نرخ جهش‌ها استفاده شد و نرخ تقاطع ۰/۳ و نرخ جهش ۰/۰۱ به عنوان بهترین نرخ تقاطع و نرخ جهش در این مدل انتخاب شد؛ زیرا مقدار برازندگی حاصل از این نرخ‌ها بیشتر از مقدار برازندگی حاصل از نرخ‌های دیگر مورد استفاده است.

۱. مهدوی. (۱۳۸۶).

۲. همان مأخذ.

جدول ۶. نتایج برآورد رابطه LSTR۱ با بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

ضرایب	$\alpha_0$	$\varphi$	$\alpha_1$	$\theta$
مقادیر	۰/۶۳	۱/۰۳	-۱۰/۴۶	۰/۰۳۷
t-student	۰/۴	۱۸/۸	-۱/۹	۲/۰۶

مأخذ: یافته‌های این پژوهش.

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تمام ضرایب برآوردی رابطه بجز  $\alpha$  معنادارند. ضریب  $\varphi$  در سطح یک درصد و ضرایب  $\alpha_1$  در سطح ۱۰ درصد و  $\theta$  در سطح ۵ درصد پذیرفته می‌شوند. همچنین، مقادیر مربوط به سرعت گذار و حد آستانه به ترتیب برابر با ۸/۰۲ و ۹۶ به‌دست می‌آید. گفتنی‌است در این پژوهش به منظور به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار MATLAB استفاده کرده‌ایم.

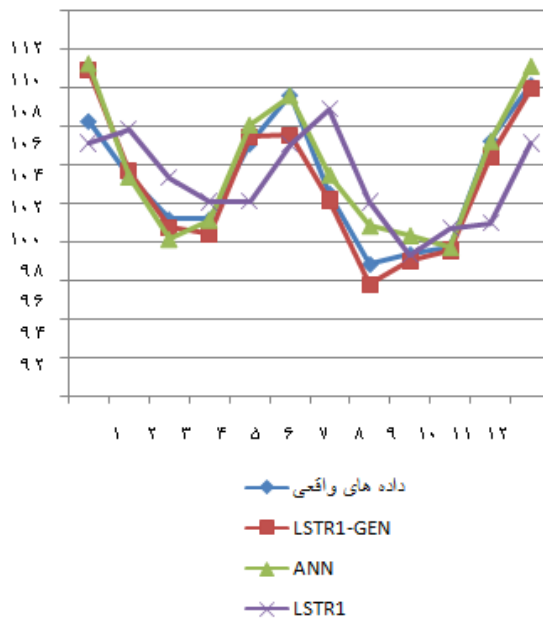
سرانجام پس از برآورد مدل‌های ARIMA و STR و LSTR۱-GEN، مدل شبکه عصبی را به‌عنوان مدل رقیب برای مدل‌های پیشنهادی به‌منظور مدل‌سازی و انجام پیش‌بینی‌های خارج از نمونه برآورد می‌کنیم.

برای سری زمانی قیمت نفت خام، مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی سه لایه را با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انتخاب کرده‌ایم. یک شبکه عصبی مصنوعی سه لایه با دو لایه پنهان و نیز تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان بر پایه آزمون و خطا و بر اساس حداقل‌سازی معیار MSE در فرآیند تعدیل وزن داده‌ها در مرحله آموزش شبکه تعیین شده است. تعداد نرون‌ها در لایه ورودی برابر تعداد وقفه‌های AR در مدل ARIMA انتخاب شده است. تابع فعال‌سازی لایه پنهان اول تابع تانژانت سیگموند و تابع فعال‌سازی لایه پنهان دوم را تابع خطی در نظر گرفته‌ایم. همچنین، نرخ یادگیری برابر ۰/۰۱ است.

نتایج برآورد مدل شبکه عصبی مصنوعی برای سری زمانی قیمت نفت خام، یک شبکه عصبی سه لایه با ۱ نرون در لایه اول و ۴ نرون در لایه‌های پنهان است.

## ۵-۱. ارزیابی مدل‌ها

در این بخش بر اساس مدل‌های ARIMA و LSTR1-GEN و LSTR1 و ANN به پیش‌بینی خارج از نمونه با افق ۱۲ ماه پرداخته‌ایم. در نمودار ۳، پیش‌بینی‌های خارج از نمونه مدل‌های غیرخطی مورد بررسی را نشان داده‌ایم.



نمودار ۳. مقایسه سری زمانی داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده خارج نمونه بر اساس مدل LSTR1 و مدل LSTR1-GEN و مدل ANN

از نمودار ۳ نتیجه می‌شود که مدل LSTR1-GEN و ANN دارای برآزش بهتری در پیش‌بینی خارج از نمونه نسبت به مدل LSTR1 است. حال، بر اساس مقادیر پیش‌بینی، خطای پیش‌بینی مدل‌های مختلف بر اساس معیارهای RMSE و MAE و DA گزارش می‌شود.

در جدول ۷، بر اساس نتایج، مشاهده می‌شود که مدل LSTR1-GEN دارای خطای کمتری در پیش‌بینی خارج از نمونه سری مورد بررسی بر اساس معیارهای RMSE و MAE یادشده بوده و بر اساس معیار DA مدل‌های غیرخطی

ANN، LSTR<sub>1</sub>-GEN و LSTR<sub>1</sub> جهت تغییرات قیمت نفت خام را به درستی پیش‌بینی کرده‌اند و مدل ARIMA در پیش‌بینی جهت تغییرات قیمت نفت خام، خطا دارد.

جدول ۷. مقایسه مدل‌های رقیب بر اساس معیارهای RMSE و MAE و DA

معیار \ مدل	مدل	RMSE	MAE	DA
مدل LSTR <sub>1</sub> -GEN	۱	۱/۰۸	۰/۷۸	۱
مدل ANN	۱	۱/۲۲	۰/۸۳	۱
مدل LSTR <sub>1</sub>	۱	۲/۶۸	۲/۳۴	۱
مدل ARIMA	۰/۴۱	۱۹/۱۸	۱۶/۵۹	۰/۴۱

مأخذ: یافته‌های این پژوهش.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل LSTR<sub>1</sub>-GEN در پیش‌بینی خارج از نمونه نسبت به مدل ANN، LSTR<sub>1</sub> و ARIMA عملکرد بهتری دارد. بر اساس نتایج جدول ۷، می‌توان استدلال کرد که به‌طور کلی مدل‌های غیرخطی در پیش‌بینی خارج از نمونه عملکرد بهتری نسبت به مدل خطی دارند.

## ۶. نتیجه‌گیری

بررسی رفتار قیمت نفت خام و پیش‌بینی آن، موضوع بسیاری از پژوهش‌ها در چند دهه گذشته بوده است. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی ضمن برآورد مدل‌ها، به پیش‌بینی‌های خارج از نمونه برای افق ۱۲ ماهه قیمت نفت خام پرداختیم. بر اساس دو معیار RMSE و MAE در پیش‌بینی‌های خارج از نمونه مشخص می‌شود که مدل LSTR<sub>1</sub>-GEN در مقایسه با مدل ANN، LSTR<sub>1</sub> و ARIMA عملکرد بهتری داشته و بر اساس معیار DA مشخص می‌شود که مدل‌های غیرخطی LSTR<sub>1</sub>-GEN، ANN و LSTR<sub>1</sub> جهت تغییرات قیمت نفت خام را به درستی پیش‌بینی کرده‌اند و الگوی غیرخطی الگوریتم ژنتیک مدلی مناسب‌تر برای بررسی رفتار قیمت نفت خام و پیش‌بینی مقادیر آتی آن است. بنابراین، می‌توان با بهره‌گیری از مدل‌های غیرخطی، پیش‌بینی مطلوبی را در مورد قیمت‌های آتی نفت خام انجام داد و در جهت اتخاذ سیاست‌های درست گام برداشت.

## منابع

- ابریشمی، حمید؛ آریانا، یاسمین و مهرآرا، محسن. (۱۳۸۶). ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی بی‌ثباتی قیمت نفت، مجله تحقیقات اقتصادی، شماره ۷۸، صص ۱-۲۱.
- بهرام‌مهر، نفیسه. (۱۳۸۷). پیش‌بینی قیمت نفت خام با استفاده از هموارسازی موجک و شبکه عصبی مصنوعی. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال پنجم، شماره ۱۸، صص ۸۱-۹۸.
- پور کاظمی، محمدحسین و اسدی، محمدباقر. (۱۳۸۸). پیش‌بینی پویای قیمت نفت خام با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و با به کارگیری ذخیره سازی‌های نفتی کشورهای OECD. تحقیقات اقتصادی، شماره ۴۴ (۸۸)، صص ۲۵-۴۶.
- کمیحانی، اکبر؛ نادری، اسماعیل و گندلی علیخانی، نادیا. (۱۳۹۱). مقایسه انواع مدل‌های واریانس ناهمسان شرطی در مدل‌سازی و پیش‌بینی نوسانات قیمت نفت. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال نهم، شماره ۷، صص ۱۲۱-۱۴۶.
- عباسی نژاد، حسین؛ علیخانی، نادیا و نادری، اسماعیل. (۱۳۹۲). تحلیل و پیش‌بینی اثرات غیرخطی در بازار نفت. فصلنامه برنامه‌ریزی و بودجه، سال هجدهم، شماره ۳، صص ۲۱-۴۸.
- مهدوی، عبدالمحمد. (۱۳۸۶). طراحی مدل ارزیابی کیفیت خدمات سیستم‌های اطلاعاتی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک. ویژه نامه مدیریت، شماره ۲۳۵، صص ۲۹-۲۶۳.
- مهر آرا، محسن و سرخوش، اکبر. (۱۳۸۹). آثار غیرخطی متغیرهای کلان اقتصادی بر رشد اقتصادی با تأکید بر نرخ ارز (مورد ایران). مجله تحقیقات اقتصادی، شماره ۹۳ (۴۵)، صص ۲۰۱-۲۲۸.
- Abosedra, S. (2005). Futures versus Univariate Forecast of Crude Oil Prices. *OPEC Review*, Vol. 29, No. 4, pp. 231-241.
- Ahmed, R. A. & Bin, S. A. (2013). Fitting GARCH Models to Crude Oil Spot Price Data, *Life Science Journal*, Vol.10, No.4, pp. 654-661

- Ahmed, R. A. & Bin, S. A. (2014). Daily Crude Oil Price Forecasting Model Using ARIMA, Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedastic and Support Vector Machines, *American Journal of Applied Sciences*, Vol.11, No.3, pp. 425-432.
- Alquist, R. Kilian, L. & Vigfusson, R. J. (2011). Forecasting the Price of Oil. *International Finance Discussion Papers* 1022, Board of Governors of the Federal Reserve System (U.S.).
- Bopp, A. E. & Lady, G. M. (1991). A Comparison of Petroleum Futures versus Spot Prices as Predictors of Prices in the Future. *Energy Economics*, Vol.13, No.4, pp. 274–282.
- Chernenko, S. Schwarz, K. & Wright. J. H. (2004). The Information Content of Forward and Futures Prices: Market Expectations and the Price of Risk. *FRB International Finance Discussion Paper* 808.
- Day, T. E. & Lewis. C.M. (1993). Forecasting Futures Markets Volatility. *the Journal of Derivatives*, Vol.1, No.2, pp. 33-50.
- Duffie, D. & Gray. S. (1995). Volatility in Energy Prices, Managing Energy Price Risk. *Risk Publications*, London, pp. 39-55.
- Frey, G. Manera, M. Markandya, A. & Scarpa, E. (2009). Econometric Models for Oil Price Forecasting: A Critical Survey. *IFO Institute for Economic Research at the University of Munich*, Vol.10, No. 1, pp. 29-44.
- Hou, A. & Suardi, S. (2012). A Nonparametric GARCH Model of Crude Oil Price Return Volatility. *Energy Economics*, Vol.34, No.2, pp. 618–626.
- Lalonde, R. Zhu, Z. & Demers, F. (2003). Forecasting and Analyzing World Commodity Prices. *Bank of Canada, Working Paper*, 2003–24.
- Luukkonen, R. & Terasvirta, T. (1991). Testing Linearity of Econometric Time Series Against Cyclical Asymmetry. *Annales d'economie et de Statistique*, 20/21, pp.125–142.
- Marzo, M. & Zagaglia, P. (2007). Volatility Forecasting for Crude Oil Futures. *Research Papers in Economics*, 2007:9, Stockholm University, Department of Economics.



- Mehrara, M. Moeini, A. Ahrari, M. & Erfanifard, A. (2009). Investigating the Efficiency in Oil Futures Market Based on GMDH Approach. *Journal of Expert Systems with Applications*, Vol.36, Issue 4, pp. 7337-8712.
- Mitchell, M. (1996). An Introduction to Genetic Algorithms. *MIT Press*, Cambridge, MA.
- Morana, C. (2001). A Semiparametric Approach to Short-term Oil Price Forecasting. *Energy Economics*, Vol.23, Issue3, pp. 325-338.
- Musaddiq, T. (2012). Modeling and Forecasting the Volatility of Oil Futures Using the ARCH Family Models. *The Lahore Journal of Business*, Vol.1, No.1, pp. 79-108.
- Sadorsky, P. (2006). Modeling and Forecasting Petroleum Futures Volatility. *Energy Economics*, Vol.28, Issue4, pp.467-488.
- Schwartz, E. & Smith, J. E. (2000). Short-term Variations and Long-term Dynamics in Commodity Prices. *Management Science*, Vol. 46, No.7, pp. 893-911.
- Shabri, A. & Ruhaidah, S. (2014). Daily Crude Oil Price Forecasting Using Hybridizing Wavelet and Artificial Neural Network Model. *Mathematical Problems in Engineering* 2014, pp.1-10.
- Shambora, W. E. & Rossiter, I. (2007). Are There Exploitable Inefficiencies in the Futures Market for Oil? *Energy Economics*, Vol.29, Issue1, pp.18-27.
- Sompui, M. & Wullapa, W. (2014). Prediction Model for Crude Oil Price Using Artificial Neural Networks. *Applied Mathematical Sciences*, Vol.8, No.80, pp. 3953 - 3965
- Terasvirta, T.(1994). Specification, Estimation, and Evaluation of Smooth Transition Autoregressive Models. *Journal of the American Statistical Association*.Vol.89, Issue 425, pp.208-218.
- Xiong, T. Bao, Y. & Hu, Z. (2013). Beyond One-Step-Ahead Forecasting: Evaluation of Alternative Multi-Step-Ahead Forecasting Models for Crude Oil Prices. *Energy Economics*, Vol.40, Supplement 1, pp.405-415.

- Ye, M. J. Zyren & Shore, J. (2005). A Monthly Crude Oil Spot Price Forecasting Model Using Relative Inventories. *International Journal of Forecasting*, Vol. 21, No.3, pp. 491–501.
- Yu, L. Wang, S. & Lai, k. k. (2008). Forecasting Crude Oil Price with an EMD-Based Neural Networkensemble Learning Paradigm. *Energy Economics*, Vol.30, Issue 5, pp. 2623–2635.