

## Modeling Crude Oil Price Dynamics: Investigation of Jump and Volatility Using Stochastic Volatility Models (Case study: WTI crude oil prices in 2020 and 2021)

Mojtaba Rostami \*

Postdoctoral Researcher, Iran National Science Foundation, Tehran, Iran

Mohammad Nabi Shahiki Tash 

Associate Professor in Economics, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

### Abstract

Due to the strategic role of volatility and instability of crude oil prices and their effects on all countries of the world, different methods of modeling and forecasting are necessary. Over the past two decades, an extensive literature has emerged on various approaches to empirically modeling volatility in the crude oil market. In this research, WTI crude oil price volatility modeling, which is one of the most important types of crude oil in the market of this strategic commodity, is examined with six flexible stochastic volatility (SV) models. Then the experimental performance of these models is compared with each other using Bayesian methods. The findings of this study show that adding one jump in efficiency and leverage effect to the stochastic volatility (SVLJ) model greatly improves its performance compared to other models. According to the findings of this model, the stability of volatility in the WTI market is very high and on average one jump occurs in this market every year. However, this model shows that in 2020, two jumps in WTI returns occurred in April and May, which is a unique event. In addition, the correlation between the return jump component and the volatility jump (Merton correlation jump) is not confirmed in the WTI data. Also, due to the negative leverage effect, negative shocks have stronger volatility effects than positive shocks in the crude oil market.

**Keywords:** Stochastic Volatility, Jump, Bayesian methods, Crude oil, Leverage effect

**JEL Classification:** C58 , G1 , C11


\* Corresponding Author: [mojtabarostami1364@yahoo.com](mailto:mojtabarostami1364@yahoo.com)

How to Cite: Rostami, M., Shahiki Tash, M N. (2020). Modeling Crude Oil price Dynamics: Investigation of Jump and Volatility Using Stochastic Volatility Models (Case study: WTI crude oil prices in 2020 and 2021). Iranian Energy Economics, 37 (10), 37-72.




## مدل سازی دینامیک قیمت های نفت خام: مطالعه پرش و تلاطم با استفاده از مدل های تلاطم تصادفی (مطالعه موردی: قیمت های نفت خام WTI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱)

محقق پسادکتری، صندوق حمایت از پژوهشگران کشور، تهران

مجتبی رستمی \* 

دانشیار دانشکده اقتصاد و مدیریت دانشگاه سیستان و بلوچستان

محمدنبی شهیکی تاش 

### چکیده

به دلیل نقش استراتژیک تلاطم و بی ثباتی قیمت های نفت خام و تأثیرات آن بر همه کشورهای جهان، روش های مختلف مدل سازی و پیش بینی در این مورد ضروری است. در دو دهه گذشته ادبیات گسترده ای در مورد رویکردهای مختلف برای مدل سازی تجربی تلاطم در بازار نفت خام پدید آمده است. در این پژوهش، مدل سازی تلاطم قیمت های نفت خام WTI که در بازار این کالای استراتژیک یکی از مهم ترین انواع نفت خام است با شش مدل «تلاطم تصادفی» انعطاف پذیر بررسی شده است. سپس عملکرد تجربی این مدل ها در مقایسه با یکدیگر با استفاده از روش های بیزی بررسی شده است. یافته های این پژوهش نشان می دهد که افزودن پرش در معادله بازده و «اثر اهرمی به مدل تلاطم تصادفی» عملکرد آن را در مقایسه با سایر مدل ها بسیار بهبود می بخشد. براساس یافته های این مدل، پایداری تلاطم در بازار WTI بسیار بالاست و به طور متوسط هر سال یک پرش در این بازار روی می دهد. با این حال، این مدل نشان می دهد که در سال ۲۰۲۰ دو پرش در بازده WTI در ماه های آوریل و مه روی داده است که رویدادی کم نظیر است. علاوه بر این همبستگی میان مؤلفه پرش در بازده و پرش در تلاطم (پرش همبسته مرتون) در داده های WTI تأیید نمی شود. همچنین، به دلیل اثر اهرمی منفی، شوک های منفی اثرات تلاطمی قوی تری نسبت به شوک های مثبت در بازار نفت خام دارند.

کلیدواژه ها: تلاطم تصادفی، پرش، روش های بیزی، نفت خام، اثر اهرمی

طبقه بندی JEL: C11 , G1 , C58

\* نویسنده مسئول: [mojtabarostami1364@yahoo.com](mailto:mojtabarostami1364@yahoo.com)

\* این مقاله تحت حمایت مالی صندوق ملی حمایت از پژوهشگران کشور قرار گرفته است.



پروپوزیشن گاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

## ۱. مقدمه

نفت خام منبع اصلی انرژی است و تقریباً یک سوم تولید جهانی انرژی را تشکیل می‌دهد (اشمیخ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). تلاطم قیمت‌های نفت و فرآورده‌های نفتی دارای پیامدهای اقتصادی و مالی گسترده‌ای است. برای کشورهای وابسته به درآمد نفت مانند ایران، تغییرپذیری قیمت‌های نفت مستلزم ضرر و زیان زیاد و درآمد کمتر یا ذخایر بیشتر و در نتیجه رسیدن به اهداف توسعه‌ای است (ناکاجیما<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹). همچنین بی‌ثباتی در قیمت‌های نفت خام با تورم و اثر آن بر هزینه‌های کالاهای مصرفی و تولیدات در بخش صنعت نیز مرتبط است. بدیهی است که این امر می‌تواند نظم سیاسی و امنیت ملی اقتصادهای نفت‌خیز را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین با توجه به اهمیت تغییرات قیمت نفت برای اقتصادها (بیشتر برای آنهایی که بودجه و سیاست مالی آنها به تولید و درآمدهای نفتی بستگی دارد) مدل‌سازی تلاطم قیمت یکی از دغدغه‌های اصلی است. علاوه بر این به دلیل آنکه برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های دولت در زمینه توزیع درآمد و یارانه‌ها در بخش‌های انرژی تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر و همچنین در صنعت و کشاورزی تأثیر می‌گذارد، بررسی موضوع تلاطم قیمت نفت خام به طور فزاینده‌ای در بین دانشگاهیان و دولت‌مردان رواج پیدا کرده است.

ضرورت به حداقل رساندن اثرات منفی ناشی از تلاطم قیمت‌های نفت خام باعث ایجاد ادبیات گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی چنین تلاطمی شده است. مدل‌سازی و پیش‌بینی تلاطم قیمت‌های نفت خام اطلاعات ارزشمندی در مورد عدم قطعیت و ریسک موجود در بازار را به بازیگران بازار ارائه می‌دهد و از این طریق کمک می‌کند تا تغییرات احتمالی ناخواسته در زمینه سرمایه‌گذاری‌های ذخایر نفت و تأسیسات تولید و حمل و نقل نفت مدیریت گردد. به طور مرسوم، این تلاطم متغیر در زمان با استفاده از «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی»<sup>۳</sup> مدل‌سازی و اندازه‌گیری می‌شود که تحت آن واریانس شرطی یک تابع قطعی<sup>۴</sup> از پارامترهای مدل و داده‌های گذشته است. با این حال، برخی از پژوهش‌های جدیدتر مدل‌های «تلاطم تصادفی»<sup>۵</sup> را مورد استفاده قرار

1. Śmiech et al.

2. Nakajima

3. Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH)

4. Deterministic Function

5. Stochastic Volatility (SV)

داده‌اند. برخلاف مدل‌های استاندارد یا کلاس «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» در مدل‌های «تلاطم تصادفی» تلاطم یک متغیر پنهان است که از یک فرآیند تصادفی پیروی می‌کند (بروکس و پروکوپچوک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳). این دو دسته از «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» و «مدل‌های تلاطم تصادفی» غیر آشیانه‌ای<sup>۲</sup> هستند و متضمن خواص بسیار متفاوتی می‌باشند. مدل «تلاطم تصادفی» به روشی واقع‌بینانه‌تر و منعطف‌تر تلاطم متغیر در زمان را مدل‌سازی می‌کند، زیرا «تلاطم تصادفی» شامل دو فرآیند اخلاقی، یکی برای مشاهدات و دیگری برای تلاطم پنهان است. برخی پژوهش‌ها در ادبیات مالی همچون کیم<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۸) و یو<sup>۴</sup> (۲۰۰۲) نشان داده‌اند که مدل‌های «تلاطم تصادفی» به طور کلی نسبت به «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» مطلوب‌تر هستند و بهتر است تلاطم به شکل یک فرآیند تصادفی پنهان مدل‌سازی شود تا یک تابع قطعی. یکی از دلایل استفاده رو به گسترش مدل‌های تلاطم تصادفی قابلیت مدل‌سازی شوک‌های بزرگ و گذرا در بازارهای مالی است. منبع این شوک‌ها از تغییرات خارجی مانند همه‌گیری کووید ۱۹ در سال ۲۰۲۰ است که می‌تواند منجر به نوسانات ناگهانی در بازده یا تلاطم دارایی مورد بررسی شود. به منظور ثبت این نوع از ویژگی‌های تجربی، برخی از مؤلفه‌های پرش<sup>۵</sup> در مدل‌های «تلاطم تصادفی» گنجانده شده‌اند تا امکان حرکات بزرگ و گذرا را فراهم کنند. بیتس<sup>۶</sup> (۱۹۹۶) جهش‌های مرتون را در معادله بازده (معادله سیگنال) مدل «تلاطم تصادفی» پیشنهاد شده توسط هستون<sup>۷</sup> (۱۹۹۳) اضافه کرد. ایراکر<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۳) پرش‌های مرتون مرتبط را هم در بازده و هم در تلاطم در مدل‌های «تلاطم تصادفی» اضافه کرد.

به خوبی شناخته شده است که بازارهای نفت در معرض شوک‌های شدید (به نام شوک‌های بزرگ، دورافتاده یا پرش) هستند. برای مثال می‌توان به حمله عراق به کویت در سال ۱۹۹۱، جنگ اول خلیج فارس متعاقب آن، تنش و درگیری نظامی آمریکا با عراق

1. Brooks and Prokopczuk
2. Nonnested
3. Kim et al.
4. Yu
5. Jump
6. Bates
7. Heston
8. Eraker et al.

بر سر عدم همکاری عراق با بازرسان آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۱۹۹۸، بحران مالی جهانی سال ۲۰۰۸ (چارلس و دارنه<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷)، تصمیمات اپک در زمینه تولید نفت اشاره کرد. در واقع، هر تغییر خارجی مانند تغییرات ناگهانی در نرخ بهره<sup>۲</sup> یک کشور صنعتی می‌تواند منجر به نوسانات ناگهانی بازده یا تلاطم نفت خام شود. وقوع همه‌گیری کووید ۱۹ در دو سال اخیر (۲۰۲۰ و ۲۰۲۱) تولید و تقاضای جهانی نفت خام را درگیر تحولانی ناخواسته کرده است. بررسی چگونگی تغییرات در پویایی‌های رفتار بازار نفت خام در چنین شرایطی درک ما را برای کنترل پیامدهای منفی اتفاق‌های از این دست در آینده افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به آنکه انواع مختلفی از پرش‌ها برای به دست آوردن این نوع ویژگی تجربی سری بازده پیشنهاد شده است این شرایط میدانی را برای بررسی این مدل‌ها به صورت تجربی فراهم می‌کند. برای مثال برخی الگوها تنها پرش را در بازده و الگوهای دیگری در بازده و تلاطم به طور همزمان پیشنهاد می‌کنند (ایراکر<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). از آنجا که افزودن مؤلفه پرش یک واقعیت تجربی است، مطالعات تجربی در زمینه بازارهای نفت خام نتیجه قطعی در این زمینه ارائه نکرده‌اند. ویژگی مدل‌های تلاطم تصادفی آن است که به خوبی می‌توانند چنین رفتارهایی که در بازار نفت رایج است مدل‌سازی نمایند.

این پژوهش تحقیقات پیشین را به دو طریق گسترش می‌دهد. ابتدا عملکرد چند مدل تلاطم تصادفی را که در جدول (۱) معرفی شده‌اند را در مدل‌سازی تلاطم قیمت‌های نفت خام WTI<sup>۴</sup> را با استفاده از فاکتور بیزی مورد بررسی قرار می‌دهد. سپس دو نوع مختلف پرش را در تابع تلاطم تصادفی (در معادله سیگنال و در معادله سینگال و معادله حالت همزمان) وارد می‌کند و به تخمین نتایجی از جمله میزان احتمال پرش، زمان پرش و اندازه پرش روی داده می‌پردازد. بدین منظور از داده‌های هفتگی نفت خام WTI در بازه زمانی هفته اول ماه مارس ۱۹۸۷ تا هفته چهارم ماه اکتبر ۲۰۲۱ استفاده شده است.

در ادامه ساختار این پژوهش به صورت زیر خواهد بود:

در بخش دوم مرور ادبیات پژوهشی در این زمینه ارائه می‌شود، بخش سوم تصریح مدل‌ها و نحوه برآوردها را شامل می‌شود، در بخش چهارم یافته‌های تجربی مورد بحث قرار می‌گیرد و در بخش پایانی نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

- 
1. Charles and Darné
  2. Eraker et al.
  3. West Texas Intermediate (WTI)
  4. Yong and Zhang

## ۲. مروری بر ادبیات پژوهشی

در تحقیقات تجربی مالی، یکی از مهم‌ترین حقایق تلطیف<sup>۱</sup> شده این است که تلاطم با زمان متغیر است (مندلبرات<sup>۲</sup>، ۱۹۶۳) و فاما<sup>۳</sup> (۱۹۶۵) این واقعیت را تلاطم خوشه‌ای<sup>۴</sup> نامیدند. در دهه گذشته بسیاری از مدل‌های تلاطم برای توصیف تلاطم مالی در طول زمان ایجاد شده‌اند. مدل‌های رایج تلاطم عبارتند از مدل‌های نوع ناهمسانی واریانس شرطی خود برگشت<sup>۵</sup> (انگل<sup>۶</sup>، ۱۹۸۲) و مدل‌های «تلاطم تصادفی»<sup>۷</sup> (تایلر<sup>۸</sup>، ۱۹۸۶). در مقایسه با مدل‌های نوع ناهمسانی واریانس شرطی خود برگشت، عمدتاً برتری مدل‌های «تلاطم تصادفی» در این است که یک فرآیند نوفه سفید دیگر برای ارزیابی تغییرات در دینامیک تلاطم در معادله تلاطم پنهان (معادله حالت) اضافه می‌شود. فرآیند اخلالی مشاهدات تغییرپذیری در مشاهدات را در نتیجه وجود خطای اندازه‌گیری و خطای نمونه‌گیری نشان می‌دهد، در حالی که فرآیند اخلالی دیگر تغییرپذیری در پویایی تلاطم را ارزیابی می‌کند (شفارد<sup>۹</sup>، ۲۰۰۵). در سال‌های اخیر، مدل‌های «تلاطم تصادفی» به‌طور گسترده در قیمت‌گذاری دارایی و مدیریت ریسک استفاده شده‌اند (برای مثال می‌توان به هانسن<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، وانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، سادورسکی<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۵)، ملینو و ترنبول<sup>۱۳</sup> (۱۹۹۰)، بروتو و رویز<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۴)، کیم<sup>۱۵</sup> و همکاران (۱۹۹۸) و یو<sup>۱۶</sup> (۲۰۰۲) اشاره کرد). از واقعیت‌هایی که به خوبی شناخته شده این است که تغییرات خارجی مانند جابه‌جایی‌های ناگهانی در سری‌های زمانی دارایی‌ها می‌تواند منجر به نوسانات ناگهانی در بازده یا تلاطم دارایی مورد بررسی شود. به منظور ثبت این نوع از ویژگی‌های تجربی، برخی از مؤلفه‌های پرش<sup>۱۷</sup> در مدل‌های «تلاطم

1. Stylized Fact
2. Mandelbrot
3. Fama
4. Volatility Clustering
5. Autoregressive Conditional Heteroskedasticity (ARCH)
6. Engle
7. Stochastic Volatility (SV)
8. Taylor
9. Shephard
10. Hansen, Huang, and Shek
11. Wang
12. Sadorsky
13. Melino and Turnbull
14. Brotoand Ruiz
15. Kim
16. Yu
17. Jump



تصادفی» گنجانده شده‌اند تا امکان حرکات بزرگ و گذرا را فراهم کنند. بیتس<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) جهش‌های مرتون را در معادله بازده (معادله سیگنال) مدل «تلاطم تصادفی» پیشنهاد شده توسط هستون<sup>۲</sup> (۱۹۹۳) اضافه کرد. ایراکر و همکاران (۲۰۰۳) پرش‌های مرتون مرتبط را هم در بازده و هم در تلاطم در مدل‌های «تلاطم تصادفی» اضافه کرد.

تحقیقات بیشتر مشخص کرده است که دینامیک مدل‌های «تلاطم تصادفی» عمدتاً توسط حرکت براونی<sup>۳</sup> هدایت می‌شود، بدین معنا که در این مدل‌ها تلاطم و بازده به تدریج از طریق نمو‌های کوچک توزیع شده نرمال تغییر می‌کنند. در نتیجه، یک تغییر خارجی مانند تغییرات ناگهانی نرخ بهره در یک کشور صنعتی می‌تواند منجر به نوسانات ناگهانی بازده یا تلاطم نفت خام شود. از این رو، انواع مختلفی از پرش‌ها برای به دست آوردن این نوع ویژگی تجربی سری بازده پیشنهاد شده است. برای مثال این پرش می‌تواند در بازده یا در تلاطم و به طور هم‌زمان وارد شود (ایراکر و همکاران، ۲۰۰۳). اما از آنجا که افزودن مؤلفه پرش یک واقعیت تجربی است، مطالعات تجربی در زمینه بازارهای نفت خام نتیجه قطعی در این زمینه ارائه نکرده‌اند. برای مثال چان و گرت<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) نشان می‌دهند که هرچند در مقایسه با کلاس «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی»، مدل‌های تلاطم تصادفی در مدل‌سازی تلاطم قیمت‌های نفت بهتر عمل می‌کنند اما افزودن مؤلفه پرش در مدل «تلاطم تصادفی» منجر به کارایی بیشتر در زمینه مدل‌سازی و پیش‌بینی نمی‌شود. با این حال آنها نشان می‌دهند که هم مؤلفه پرش و هم اخلاط‌های توزیع شده با توزیع  $t$  عملکرد «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» استاندارد را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. به شکل متناقض با این مطالعه، لارسون و نوسمان<sup>۵</sup> (۲۰۱۱) نشان می‌دهند که برای توصیف ویژگی‌های سری زمانی قیمت‌های نفت WTI مؤلفه پرش ضروری است. آنها این یافته خود را در توافق با یافته‌های وو<sup>۶</sup> (۲۰۰۹) می‌دانند که از وجود یک سیستم دو رژیم در سری زمانی طولانی مدت قیمت‌های نفت خام حمایت می‌کند. همچنین یونگ و ژانگ<sup>۷</sup> (۲۰۱۴) شواهدی را ارائه می‌کنند که از

- 
1. Bates
  2. Heston
  3. Brownian Motion
  4. Chan and Grant
  5. Larsson and Nossman
  6. Vo
  7. West Texas Intermediate (WTI)



مدل پرش مرتون<sup>۱</sup> برای مدلسازی تلاطم قیمت‌های نفت خام (WTI) حمایت می‌کند. این موضوعات در مورد افزودن مؤلفه اثر اهرمی<sup>۲</sup> به مدل‌های «تلاطم تصادفی» وجود دارد. برای نمونه در این زمینه می‌توان به مطالعه چن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰) در مورد افزودن اثر اهرمی به مدل‌های تلاطم تصادفی مراجعه کرد.

تعدادی از مهم‌ترین و جدیدترین پژوهش‌هایی که در زمینه مدلسازی تلاطم قیمت‌های نفت خام براساس مدل‌های «تلاطم تصادفی» انجام شده است را در ادامه ارائه کرده‌ایم: شوارتز و ترو<sup>۴</sup> (۲۰۰۹) یک مدل تلاطم تصادفی چند عاملی را برای قیمت‌گذاری در معاملات آتی و اختیارات مربوط به معاملات نفت خام سبک در بورس نیویورک<sup>۵</sup> پیشنهاد می‌کنند. آنها با استفاده از داده‌های روزانه، شواهدی را ارائه می‌کنند که نشان می‌دهد در نظر گرفتن تلاطم تصادفی قیمت‌گذاری را بهبود می‌بخشد، اما گنجاندن پرش‌ها را کم‌اهمیت‌تر می‌دانند.

وو (۲۰۰۹) مدل تلاطم تصادفی چند متغیری را با استفاده از داده‌های روزانه در قراردادهای آتی نفت خام WTI معامله شده در بورس نیویورک تخمین می‌زند و نشان می‌دهد که تلاطم تصادفی نقش مهمی ایفا می‌کند.

لارسون و نوسمن (۲۰۱۱) شواهدی برای تلاطم تصادفی و پرش در هر دو بازده و تلاطم قیمت روزانه نفت خام WTI از ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۹ پیدا ارائه کردند.

چان و گرت (۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های با تناوب هفتگی بازدهی نفت خام، نتیجه می‌گیرند که مدل‌های «تلاطم تصادفی» (با جزء میانگین متحرک مرتبه اول) قادرند ویژگی‌های اصلی داده‌های نفت خام را به طور کارآمدتری نسبت به «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» تکرار کنند. در عین حال، آنها تأثیر مثبت منفی قابل توجهی در بازارهای نفت خام دارند.

اویونا و یائوبین<sup>۶</sup> (۲۰۲۱) مدل تلاطم تصادفی با زمان‌های پیوسته را برای پیش‌بینی تلاطم قیمت‌های نفت خام مورد استفاده قرار دادند. آنها با استفاده از تقریب اویلر - مارویاما<sup>۷</sup>

- 
1. Merton jumps
  2. Leverage Effect
  3. Chen et al.
  4. Schwartz and Trolle
  5. New York Mercantile Exchange (NYMEX)
  6. Oyuna and Yaobin
  7. Euler-Maruyama

مدل هستون را برآورد می‌کنند. براساس نتایج پژوهش آنها مدل تلاطم تصادفی به منظور پیش‌بینی بازده نفت خام WTI و برنت نسبت به «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» کارایی بیشتری دارد.

چن و همکاران (۲۰۱۹) مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی برحسب توزیع احتمال‌های مختلف را برای داده‌های نفت برنت و WTI برآورد می‌کنند. آنها نشان می‌دهند مدل تلاطم تصادفی با اثرات اهرمی<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی ارزش در معرض ریسک<sup>۲</sup> و ارزش در معرض ریسک شرطی<sup>۳</sup> مناسب‌تر از بقیه مدل‌های «تلاطم تصادفی» و «مدل‌های گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» است.

لین<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰) در مقاله‌ای به مقایسه مدل‌های نوع «گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» تک رژیمی، مدل‌های نوع «گوناگون ناهمسانی واریانس شرطی عمومی» با تغییر رژی‌های مارکفی و مدل‌های ناهمسان شرطی با تغییر رژی‌های مارکفی پنهان<sup>۵</sup> بر توانایی‌های پیش‌بینی آنها در بازارهای نفت خام WTI و داکواین<sup>۶</sup> می‌پردازد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل مارکفی پنهان گارچ نمایی<sup>۷</sup> عملکرد بهتری از مدل‌های رقیب دارد. همچنین آنها نشان می‌دهند که مارکفی پنهان گارچ نمایی نه تنها در بازارهای نفت خام توسعه یافته، بلکه در بازارهای نفت خام در حال ظهور نیز عملکرد مناسبی دارد.

### ۳. معرفی مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی و نحوه برآورد مدل‌ها

نفت خام WTI در بورس کالای نیویورک معامله می‌شود. این نوع نفت خام از نوع سبک هست و تفاوتش از نفت برنت آن است که WTI سبک‌تر و کم‌گوگردی‌تر یا شیرین‌تر می‌باشد. به دلیل کیفیت بسیار بالا، نفت خام WTI برای پالایش بخش بیشتری از بنزین عالی است، در حالی که برنت برای تولید بنزین و تقطیر میانی ایده‌آل است. نفت خام برنت در واقع ترکیبی از نفت خام از ۱۵ میدان نفتی مختلف در سامانه‌های برنت و نینیان واقع در دریای شمال است. بیشتر نفت خام WTI در منطقه غرب میانه ایالات متحده، به طور

- 
1. Stochastic Volatility with Leverage (SVL)
  2. Value at risk (VaR)
  3. Conditional Value at risk (CVaR)
  4. Lin et al.
  5. Hidden Markov (HM)
  6. Daqing
  7. HM-EGARCH

دقیق‌تر در کوشینگ (اوکلاهاما)، و برخی دیگر در منطقه ساحل خلیج فارس پالایش می‌شود. نفت خام برنت در شمال غربی اروپا پالایش می‌شود. در ابتدای این بخش مدل‌های مورد استفاده معرفی و توصیف خواهد شد و سپس نحوه مقایسه مدل‌ها با فاکتور بیزی با استفاده از رویکرد بیزی شرح داده می‌شود.

### ۳-۱. معرفی مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی

در این بخش پیش از تشریح و توصیف، مدل‌های تلاطم تصادفی که برای بررسی ویژگی‌های بازده قیمت نفت خام WTI مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول (۱) به همراه نماد خلاصه‌سازی شده معرفی شده‌اند. در ادامه این پژوهش تنها از فرم خلاصه‌نویسی شده برای اشاره به مدل‌ها استفاده خواهد شد.

جدول ۱. مدل‌های تلاطم تصادفی استفاده شده در پژوهش

SV	تلاطم تصادفی پایه‌ای
SVL	تلاطم تصادفی با مؤلفه اثر اهرمی
SVJ	تلاطم تصادفی با مؤلفه پرش <sup>۱</sup>
SVLJ	تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش <sup>۲</sup>
SVCJ	تلاطم تصادفی با پرش همبسته در بازده و در تلاطم (پرش مرتون) <sup>۳</sup>
SVLCJ	تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش همبسته در بازده و در تلاطم <sup>۴</sup>

#### ۳-۱-۱. مدل پایه‌ای تلاطم تصادفی

با تعریف نرخ بازده قیمت‌های نفت خام به صورت  $y_t = \log\left(\frac{p_t}{p_{t-1}}\right)$  که به طور تقریبی دارای میانگینی نزدیک به صفر است آنگاه توزیع شرطی بازده نفت خام مشروط به واریانس نامشهود یا به بیانی دیگر تلاطم پنهان را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$y_t | V_t = \varepsilon_t = V_t^{0.5} u_t, \quad (1)$$

که  $u_t \sim N(0,1)$  در رابطه فوق واریانس  $V_t$  نامعلوم است. تکنیک‌های فضا حالتی که در مدل‌های «تلاطم تصادفی» برای مدل‌سازی تغییرات واریانس بسیار مورد استفاده قرار

1. Stochastic Volatility with Jump (SVJ)
2. Stochastic Volatility with Leverage & Jump (SVLJ)
3. Stochastic Volatility Correlated with Jump (SVCJ)
4. Stochastic Volatility Correlated with Leverage & Jump (SVLCJ)

می‌گیرد شامل یک معادله حالت مارکوفی مانا است (هاروی و دیگران (۱۹۹۴) و جاکوایر و دیگران (۲۰۰۴). با قرار دادن  $h_t = \text{Log}(V_t)$  و فرض تبعیت مقدار اولیه  $h_1$  از یک توزیع  $\text{AR}(1)$  مانا خواهیم داشت:

$$(i) y_t = V_t^{0.5} v_t = \exp\left(\frac{h_t}{2}\right) v_t \rightarrow \text{Signal} \quad (2)$$

$$(ii) h_t = \mu + \phi(h_{t-1} - \mu) + \sigma_\omega \omega_t \quad t > 1 \rightarrow \text{eq; state - space}$$

$$(iii) h_1 \sim N\left(\mu, \frac{\sigma_\omega}{1 - \phi^2}\right)$$

$$(v) \begin{pmatrix} v_t \\ \omega_t \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\right)$$

در این رابطه ضریب  $\phi$  با محدودیت فنی  $|\phi| < 1$  در معادله (ii) یا معادله حالت تلاطم، پایداری در تلاطم را اندازه‌گیری می‌کند و  $v_t$  و  $\omega_t$  که در طول زمان می‌توانند مستقل یا غیر مستقل (حاوی اثرات اهرمی) از همدیگر باشند دو نوع شوک در دینامیک بازده دارایی می‌باشند. فرآیند  $h = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$  که در معادلات (ii) و (iii) ظاهر می‌شود غیر قابل مشاهده است. همچنین در رابطه فوق  $h_1$  (مقدار اولیه لگاریتم تلاطم) مطابق توزیع یک فرآیند  $\text{AR}(1)$  مانا توزیع شده است. شایان ذکر است که در معادله (ii) رابطه (۲) پارامتر  $\mu$  میانگین لگاریتم واریاتس و  $\sigma_\omega$  انحراف استاندارد شوک وارد آمده بر لگاریتم تلاطم را نشان می‌دهند.

### ۲-۱-۳. مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی

از واقعیت‌های مشاهده شده بسیار مهم در بازارهای مالی عدم تقارن اثرگذاری شوک‌های منفی و مثبت بر تلاطم است. این عدم تقارن برخی اوقات تحت عنوان اثر اهرمی<sup>۲</sup> و برخی اوقات دیگر تحت عنوان صرف ریسک<sup>۳</sup> توصیف می‌شود. نلسون (۱۹۹۱)، گلستن<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۳) و انگل و ان جی<sup>۵</sup> (۱۹۹۳) شواهدی از وجود اثر اهرمی در بازده برخی متغیرهای مالی ارائه کرده‌اند. هال و وایت (۱۹۸۷) شواهدی را ارائه کرده‌اند که نادیده

---

1. Hyper Parameter  
2. Leverage Effect  
3. Risk Premium Effect  
4. Glosten et al.  
5. Engle and Ng

انگاشتن اثر اهرمی زمانی که واقعاً وجود دارد منجر به اربیی در تخمین قیمت‌گذاری اختیارات می‌شود. بر همین اساس هاروی و شفارد (۱۹۹۶) توصیفی از مدل «تلاطم تصادفی» فوق ارائه کرده‌اند که اثر اهرمی را با معرفی ضریب همبستگی میان توزیع اخلاط‌های بازده نفت خام و لگاریتم تلاطم آن به صورت  $corr(v_t, \omega_{t+1}) = \rho$  دربر می‌گیرد. در این شرایط رابطه (۲) را باید به افزودن اجزا زیر اصلاح کرد:

$$(iii') \theta_1 \sim N\left(\mu, \frac{\sigma_\omega}{1-\phi^2}\right) \quad (3)$$

$$(v') \begin{pmatrix} v_t \\ \omega_{t+1} \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{pmatrix}\right)$$

شایان ذکر است که رابطه فوق را می‌توان با استفاده از توزیع  $t$  برای باقیمانده‌ها نیز نوشت که به منظور خلاصه‌نویسی در اینجا آورده نشده است اما می‌توان به ناکاجیما و عاموری<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) مراجعه کرد.

### ۳-۱-۳. مدل تلاطم تصادفی با پرش در معادله بازده یا سیگنال

در رابطه زیر مدل تلاطم تصادفی به همراه پرش معرفی شده است:

$$(i) y_t = k_t q_t + V_t^{0.5} v_t = k_t q_t + \exp\left(\frac{h_t}{2}\right) v_t \rightarrow \text{Signal} \quad (4)$$

$$(ii) h_t = \mu + \phi(h_{t-1} - \mu) + \sigma_\omega \omega_t, t > 1 \rightarrow \text{eq, state-space}$$

$$(iii) h_1 \sim N\left(\mu, \frac{\sigma_\omega}{1-\phi^2}\right)$$

$$(v) \begin{pmatrix} v_t \\ \omega_t \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\right)$$

$$(iv) q_t \in \{0, 1\}; p(q_t = 1) = K$$

$$(iiv) \psi_t = \log(1 + k_t) \sim N(-0.5\delta^2, \delta^2)$$

در این رابطه،  $q_t \in \{0, 1\}$  متغیر پرش با احتمال موفقیت  $p(q_t = 1) = K$  می‌باشد. بنابراین، اگر  $q_t = 1$  پرش در زمان  $t$  روی می‌دهد و اندازه آن برابر با  $k_t$  تعیین می‌شود که به صورت  $\psi_t = \log(1 + k_t) \sim N(-0.5\delta^2, \delta^2)$  مدل‌سازی می‌شود.

1. Omori

### ۴-۱-۳. مدل تلاطم تصادفی با پرش در معادله بازده یا سیگنال و در معادله تلاطم یا حالت

مدل «تلاطم تصادفی» پرش همبسته در ادبیات اخیر (به عنوان مثال اراکر و همکاران (۲۰۰۳) و کوبایاشی<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) برای بررسی پرش هم‌زمان در بازده و تلاطم مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس مدل «تلاطم تصادفی پرش‌های همبسته» که توسط ناکاجیما و عاموری (۲۰۰۹) فرموله شده به شکل زیر تبدیل می‌باشد:

$$(i) y_t = k_t q_t + V_t^{0.5} v_t = k_t q_t + \exp\left(\frac{h_t}{2}\right) v_t \rightarrow \text{Signal} \quad (5)$$

$$(ii) h_t = \mu + \phi(h_{t-1} - \mu) + J_t q_t + \sigma_\omega \omega_t, t > 1 \rightarrow \text{eq; state - space}$$

$$(iii) h_1 \sim N\left(\mu, \frac{\sigma_\omega}{1 - \phi^2}\right)$$

$$(v) \begin{pmatrix} v_t \\ \omega_t \end{pmatrix} \sim N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \rho & 0 \\ 0 & \rho \end{pmatrix}\right)$$

$$(iv) q_t \in \{0, 1\}; p(q_t = 1) = K$$

$$(iiv) k_t | J_t \sim N(\mu_k + \beta_J J_t, \sigma_k^2)$$

$$(iiiv) J_t \sim \text{Exp}(\mu_J)$$

رابطه فوق بیان می‌کند که برای مدل‌سازی پرش‌هایی که هم‌زمان هم در بازده و هم در تلاطم با احتمال  $p(q_t = 1) = K$  رخ می‌دهند، فرض می‌شود که توزیع مشترک اندازه‌های پرش به صورت

$$k_t | J_t \sim N(\mu_k + \beta_J J_t, \sigma_k^2)$$

$$J_t \sim \text{Exp}(\mu_J)$$

$\text{Exp}(\cdot)$  در این رابطه نشان‌دهنده توزیع نمایی، یا گاما با پارامترهای  $\alpha = \mu_J$  و  $\beta = 1$  است. همچنین در این رابطه همبستگی بین اندازه پرش در بازده و در تلاطم از طریق پارامتر  $\beta_J$  بیان می‌شود.

در ادامه به منظور سادگی در نوشتار روابط، بردار پارامترهای روابط (۲) تا (۸) که باید برآورد شوند به صورت  $\psi = (\mu, \phi, \sigma_\omega, \rho, \mu_k, \sigma_k^2, \beta_J, \mu_J, \sigma_J^2, p)$  و بردار متغیرهای پنهان مدل‌های مختلف به صورت  $LC = (h, q, k, J)$  نشان داده می‌شوند.

1. Kobayashi

## ۲-۳. استنباط بیزی به منظور استخراج توزیع پسین پارامترهای مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی استفاده شده

یکی از موضوعات مهم در زمینه مدل‌های «تلاطم تصادفی» آن است که تخمین پارامترهای این مدل‌ها با روش‌های استنباطی کلاسیک بسیار دشوار است. یونگ و ژانگ (۲۰۱۴) دو دلیل عمده برای این موضوع برمی‌شمارند: (۱) محاسبه تحلیلی تابع راستنمایی این مدل‌ها به دلیل انتگرال‌های چندگانه بعد بالا با روش‌های حداکثر راستنمایی بسیار دشوار است و (۲) روش‌های استنباط کلاسیک تقریباً همواره بر مبنای نظریه مجانبی<sup>۱</sup> قرار دارند که برای این مدل‌ها شناخته شده نیستند. به این دلیل بسیاری از محققین در این حوزه همچون لی<sup>۲</sup> و یو (۲۰۱۲) تکنیک‌های شبیه‌سازی مونت کارلویی زنجیره‌های مارکوفی<sup>۳</sup> را که براساس شیوه بیزی مورد استفاده قرار می‌گیرند را پیشنهاد می‌کنند. روش بیزی براساس استنباط توزیع پسین قرار دارد و برخلاف روش کلاسیک به منظور استنباط در مورد پارامترهای مدل نیازی به تئوری مجانبی ندارد.

به طور کلی استنباط در اقتصادسنجی پارامتری به معنای استخراج اطلاعات در مورد بردار پارامتر  $\psi$  با استفاده از نمونه به دست آمده از جامعه استنباط‌های بیزی براساس توزیع پسین بردار پارامتر  $\psi$  صورت می‌گیرد که با استفاده از قضیه بیز به دست می‌آید. براساس این قضیه، توزیع پسین یک پیشامد متناسب با حاصلضرب توزیع پیشین در تابع لگاریتم راستنمایی تغییر می‌کند. به بیان ریاضی قضیه بیز به صورت زیر است:

$$\xi(\psi|y) = C \prod_{i=1}^n \xi(y_i|\psi) \xi(\psi), \quad y_i \in \Omega \wedge \psi \in \Omega \in \mathbb{R}^m \quad (6)$$

در رابطه (۹) فرض شده است که متغیر تصادفی  $y$  یک متغیر تصادفی پیوسته و فضای پارامتر بردار پارامترهای  $\psi$  مجموعه  $\Omega \in \mathbb{R}^m$  است. اجزا تشکیل‌دهنده این قضیه که در انجام استنباط بیزی و تفسیر آن بسیار اهمیت دارند عبارتند از:

•  $\xi(\psi)$  احتمال حاشیه‌ایی  $\psi$  است که احتمال پیشین<sup>۴</sup>  $\psi$  نامیده می‌شود و نااطمینانی محقق را درباره مقادیر پارامتر  $\psi$  پیش از مشاهده داده‌ها را بیان می‌کند.

---

1. Asymptotic Theory  
 2. Li  
 3. Markov Chain Monte Carlo (MCMC)  
 4. Prior Probability



•  $\xi(\psi|y)$  احتمال شرطی  $\psi$  به شرط مصادیق نمونه تصادفی  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  است که احتمال پسین<sup>۱</sup>  $\psi$  نامیده می‌شود و نااطمینانی محقق را درباره مقادیر پارامتر  $\psi$  پس از مشاهده داده‌ها بیان می‌کند. کلمه پسین در این عبارت نشان دهنده احتمال بعد از مشاهده از اطلاعات  $y$  است.

•  $\prod_{i=1}^n \xi(y_i|\psi)$  احتمال شرطی داده‌های  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  به شرط بردار پارامتر  $\psi$  است که تابع راستنمایی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و نحوه ارتباط داده‌ها را با پارامتر نشان می‌دهد.

•  $C$  احتمال حاشیه‌ایی  $y$  را نشان می‌دهد و به عنوان یک ثابت نرمال‌ساز عمل می‌کند تا از اینکه  $\xi(\psi|y_i)$  یک مقدار احتمالی باشد مطمئن شویم (رستمی و مکیان<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰).

به منظور استنباط آماری (تخمین پارامترها و آزمون فرضیه‌ها) باید فرم تابع راستنمایی و تابع توزیع پیشین مشخص شود. مشخص‌نمایی تابع راستنمایی بستگی به توزیع احتمال داده‌ها دارد. با این حال روشی که بهترین روش مشخص‌نمایی توزیع پیشین و تبدیل اطلاعات ذهنی محقق یا محققین به مقادیر پیشین برای توزیع پارامترها باشد، وجود ندارد. نحوه بیان اطلاعات پیشین درباره پارامترها در فرم تحلیلی (یا توزیعی)،  $\xi(\psi)$ ، و تحلیل حساسیت استنباط پسین به فرم توزیع پیشین منتخب از مسائل قابل ملاحظه ادبیات بیزی می‌باشد (برگر<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶).

نتایج تخمین بیزی در قالب میانگین پسین، انحراف استاندارد پسین و فاصله اعتبار<sup>۵</sup> که مشابه مفهوم فاصله اطمینان در روش کلاسیک است اما متفاوت از آن می‌باشد بیان می‌شود (گلمن<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۷)).

به دلیل وجود متغیرهای پنهان همچون تلاطم و پرش استفاده از رابطه (۹) برای محاسبه توزیع پسین و گشتاورهای بردار پارامتر  $\psi$  در مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی مناسب نیست. زیرا همان‌گونه که در مقدمه گفته شد، محاسبه تابع راستنمایی که در رابطه (۹) با عبارت  $\xi(y_i|\psi)$  نشان داده شده است بسیار دشوار است. برای کاهش این مشکل

---

1. Posterior Probability  
2. Likelihood Function  
3. Rostami & Makiyan  
4. Berger  
5. Credible Interval  
6. Gelman et al.

محاسباتی، استراتژی شناخته شده افزایش داده وانگ و تنر<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) را می‌توان برای افزایش فضای پارامتر با مؤلفه‌های بردار  $LC$  اعمال کرد. در این صورت توزیع پسین رابطه (۶) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\xi\left(\psi, \underbrace{h, q, k, J}_{LC} | y\right) = C \prod_{i=1}^n \xi(y_i | \psi, LC) \xi(\psi),$$

### ۳-۳. گزینش مدل با استفاده فاکتور بیزی

یکی از موضوعات مهم در بررسی تلاطم قیمت‌های نفت خام، انتخاب مدل مناسب برای بازده قیمت است (انتخاب از میان رابطه (۲) تا (۵) است. روش‌شناسی بیزی این امکان را فراهم می‌کند تا با استفاده از مقایسه نسبت احتمال‌های پسین مدل‌های مختلف، مشروط به داده‌های معلوم، مدلی را که حداکثر احتمال تطابق با داده‌ها را داشته باشد انتخاب کنیم. در این بخش، نمای کلی از مقایسه مدل بیزی از طریق فاکتور بیز<sup>۲</sup> ارائه می‌دهیم.

با فرض آنکه تعداد  $\{M_j\}_{j=1}^k$  مدل در دسترس باشد، با استفاده از محاسبه احتمال

پسین [زامین مدل به شرط داده‌ها به صورت زیر صورت می‌پذیرد:

$$\xi\left(\psi, \underbrace{h, q, k, J}_{LC} | y\right) = C \prod_{i=1}^n \xi(y_i | \psi, LC) \xi(\psi), \quad (7)$$

با استفاده از تعریف نسبت  $R_{ji}$  که نسبت احتمالات پسین محاسبه شده مدل‌های رقیب  $i$  و  $j$  براساس رابطه فوق است، می‌توانیم معیاری احتمالی برای مقایسه مدل‌های رقیب به صورت زیر فراهم آوریم:

$$R_{ji} = \frac{p(M_j | y)}{p(M_i | y)} = \frac{p(M_j) p(y | M_j)}{p(M_i) p(y | M_i)}, \quad (8)$$

$$BF_{ji} = \frac{p(y | M_j)}{p(y | M_i)},$$

که در آن

1. Wong and Tanner  
2. Bayesian Factor

$$p(y | M_k) = \int p(y | \theta_k, M_k) p(\theta_k | M_k) d\theta_k \quad (9)$$

تابع راستنمایی حاشیه‌ای مدل  $M_k$  ( $k=i,j$ ) است. این راستنمایی حاشیه‌ای را می‌توان به عنوان پیش‌بینی چگالی داده‌ها تحت صحت مدل  $M_k$  که با استفاده از داده‌های مشاهده شده واقعی  $y$  ارزیابی می‌شود تفسیر کرد. بنابراین اگر داده‌های مشاهده شده احتمالاً توسط مدل  $M_k$  ایجاد باشند، راستنمایی حاشیه‌ای مرتبط با آن مدل بزرگ خواهد بود. از آنجایی که راستنمایی حاشیه‌ای اساساً یک ارزیابی پیش‌بینی چگالی است، برای پیچیدگی مدل یک جریمه داخلی دارد. همچنین زمانی که  $BF_{ji} \geq 1$  نشان دهنده آن است که به ازای داده‌های معلوم  $y$  و پیشین‌های  $p(M_j)$  و  $p(M_i)$  مدل  $j$  با احتمال بیشتری به‌طور دقیق‌تری پدیده تحت بررسی را نسبت به مدل  $i$  بررسی می‌کند (در صورت تساوی  $p(M_j) = p(M_i)$ ). بنابراین، این روش معیاری از عملکرد مدل‌ها را نسبت به هم به دست می‌دهد. برای اطلاعات بیشتر در مورد فاکتور بیزی می‌توان به کاس و رافتری<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) و کوپ<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) مراجعه کرد.

شایان ذکر است که از آنجایی که فاکتور بیز به سادگی نسبت دو راستنمایی حاشیه‌ای<sup>۳</sup> است، محققان تنها راستنمایی‌های حاشیه‌ای مجموعه مدل‌های رقیب را گزارش می‌دهند.

#### ۴. تخمین و تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها انجام می‌شود و سپس بر مبنای نتایج آن به بررسی سازگاری مدل‌های معرفی شده تلاطم تصادفی با ساختار داده‌ها پرداخته می‌شود. پس از آن به مقایسه میان مدل‌ها پرداخته می‌شود و با استفاده از معیار فاکتور بیزی مدل مناسب انتخاب و رفتار فرآیند مولد داده‌ها براساس آن توصیف خواهد شد.

#### ۴-۱. داده‌ها و تحلیل توصیفی

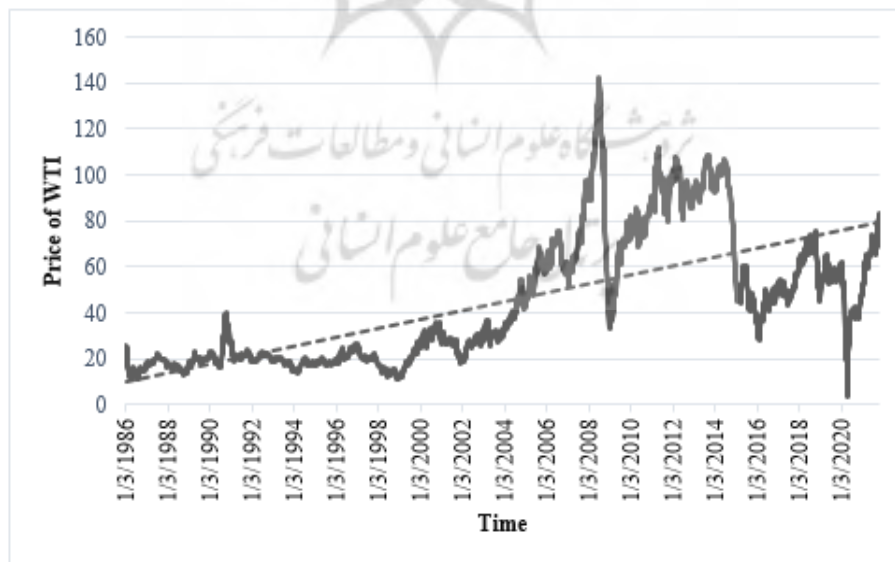
در این پژوهش از قیمت‌های نفت خام WTI که در بازار این کالا از نقش محوری و معیار برخوردار است. قیمت نفت WTI یکی از مهم‌ترین معیارهای جهانی نفت خام است. قیمت

---

1. Kass and Raftery  
2. Koop  
3. Marginal Likelihoods

این نوع نفت خام بدون شک تأثیرگذارترین قیمت نفت در ایالات متحده است. همچنین WTI زیربنای اکثر مشتقات نفتی معامله شده در بورس کالای نیویورک است. نمودار (۱) داده‌های قیمت و نمودار (۲) داده‌های بازده نفت خام WTI را در بازه هفتگی از هفته اول ماه مارس ۱۹۸۷ تا هفته چهارم ماه اکتبر ۲۰۲۱ نشان می‌دهد. براساس اطلاعات این نمودار بیشترین تحولات در قیمت‌های نفت خام مربوط به پس از سال ۲۰۰۵ است. به طوری که در این سال‌ها قیمت WTI سقف ۱۳۳ دلار به ازای هر بشکه را در ماه‌های ژوئن و ژوئیه سال ۲۰۰۸ به دست آوردند. همچنین در این سال‌ها این دو نوع نفت خام سه سقوط شدید را تجربه کرده‌اند که عدم قطعیت بالای بازار نفت خام را نشان می‌دهد و می‌تواند با رشد بازارهای مشتقات نفتی و معاملات سوآپ نفت و اختیار معامله در دو دهه اخیر در ارتباط باشد. کمترین قیمت‌های ماهانه این دو نوع نفت (در دامنه زمانی که این پژوهش در بر می‌گیرد) مربوط به سال‌های قبل از ۲۰۰۰ است، اما در هفته پایانی ماه آوریل سال ۲۰۲۰ این قیمت‌های هفتگی این نفت خام به ۳/۳۲ دلار به ازای هر بشکه سقوط کرد که نمی‌توان سوابقی هفتگی از این چنین قیمتی پس از شروع قرن جدید میلادی یافت (شایان ذکر است که اواخر سال ۲۰۰۱ و اوایل سال ۲۰۰۲ تنها برای چند ماه نفت خام چنین سقوطی را تجربه کرده بود).

نمودار ۱. مسیر زمانی قیمت‌های نفت خام WTI

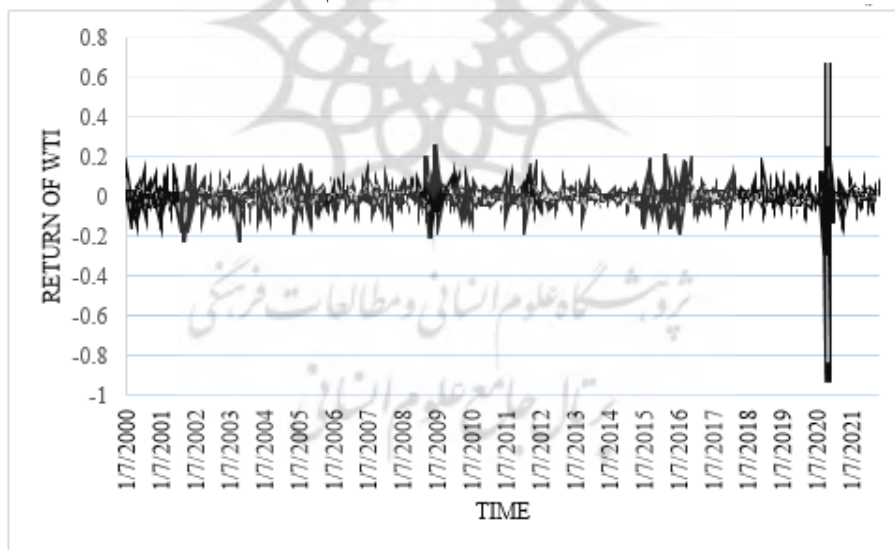


مأخذ: یافته‌های پژوهش

این تحولات در قیمت‌های هفتگی WTI، نمود خود را در بازده نیز نشان داده است. به طور کلی در دامنه زمانی اطلاعات استفاده شده در این پژوهش متوسط بازده WTI برابر با ۰/۱۴ درصد بوده است که بازده هفتگی نسبتاً پایین این نوع نفت خام را نشان می‌دهد. با این حال انحراف استاندارد بازده برابر با ۱۱/۲۵ درصد می‌باشد که در مقایسه با داده‌های میانگین نسبتاً بالاست و پراکندگی بالای تحولات در داده‌های بازده را نشان می‌دهد (این اطلاعات در جدول (۲) قابل مشاهده است). بدیهی است که این پراکندگی بالا در بازده قیمت نفت را می‌توان به نمونه‌های برجسته‌ای از دوره‌های حرکت ناگهانی و چشمگیر قیمت نفت شامل:

تنش بازار ناشی از حمله عراق به کویت و جنگ خلیج پس از آن در ۱۹۹۱-۱۹۹۰، بحران در بازارهای آسیایی و روسیه در ۱۹۹۸-۱۹۹۷، آشفتگی مالی در سال ۲۰۰۸ و بحران جهان در سال ۲۰۲۰ ناشی از همه‌گیری کووید-۱۹ نسبت داد.

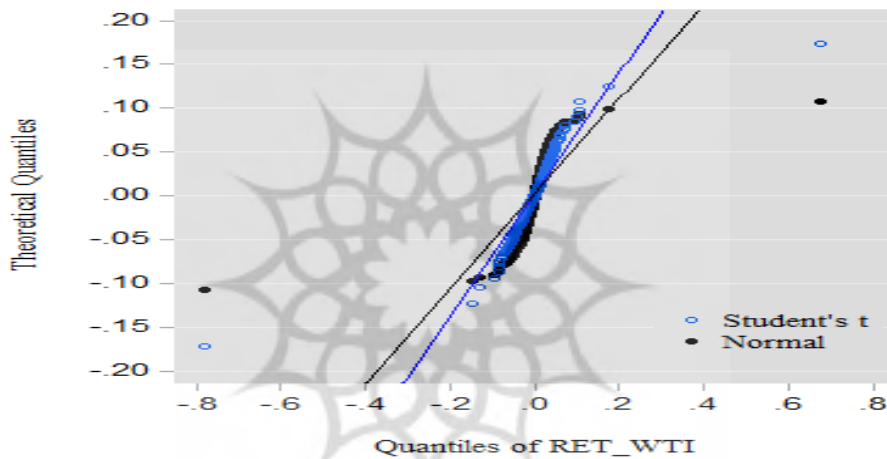
نمودار ۲. مسیر زمانی بازده نفت خام (WTI)



مأخذ: یافته‌های پژوهش

کوانتیل بازده WTI (که با RET-WTI نشان داده شده است) در مقابل کوانتیل نرمال استاندارد و توزیع  $t$  در نمودار (۳) نشان داده شده است. شکل نمودار (۳) به صورت

محدب - مقعر می‌باشد که در داده‌های بازده به خاطر وجود تلاطم خوشه‌ای روی می‌دهد. این موضوع منجر به کشیدگی بالای داده‌های بازده نسبت به توزیع نرمال و توزیع  $t$  شده است زیرا بازده‌های مثبت بزرگ یا منفی بزرگ بیشتر از آن چیزی که این دو توزیع پیش‌بینی می‌کنند روی می‌دهند. نمودار (۳) نشان می‌دهد که حجم بالایی از نقاط نمونه‌ای از خط کوانتیل نرمال دور افتاده است که مویده این موضوع است که داده‌های تاریخی WTI نسبت به توزیع نرمال نقاط دور افتاده بسیار بیشتری دارند. با این وجود توزیع  $t$  نسبت به توزیع نرمال توانسته است تطابق بهتری با داده‌ها داشته باشد اما همچنان که نمودار نشان می‌دهد نتوانسته است منجر به کاهش حجم نقاط دور افتاده شود.

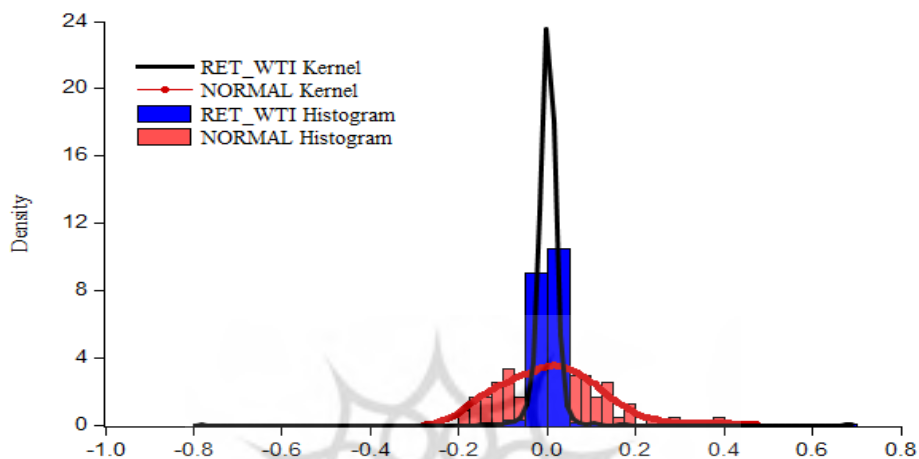


نمودار ۳. چندک‌های بازده نفت خام (WTI) در مقابل چندک‌های توزیع نرمال و توزیع  $t$

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار (۴) چگالی تجربی داده‌های بازده WTI را در مقایسه با چگالی نرمال<sup>۱</sup> نشان می‌دهد. همانگونه که نمودار (۴) نشان می‌دهد چگالی تجربی این نوع نفت خام اوج و دنباله‌هایی متفاوت از توزیع نرمال دارد، به طوریکه اوج آنها بالاتر و دنباله‌های آنها کشیده‌تر و پهن‌تر از توزیع نرمال می‌باشد. با این حال، این چگالی تجربی تقریباً متقارن بوده و لذا، نیازی به تصریح توزیع‌های چوله همچون نرمال یا  $t$  چوله در مدل‌سازی‌ها

بعنوان یک امکان منطقی نیست. بعبارت دیگر تصریح‌های ذکر شده در بخش ۲ این پژوهش کفایت لازم را برای کشف خواص سری زمانی نفت خام می‌باشند. نمودار ۴. چگالی تجربی بازده قیمتی نفت WTI در مقایسه با توزیع نرمال تجربی



مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج فوق این حدس را تقویت می‌کند که عدم استفاده از تلاطم تصادفی، اثرات اهرمی و پرش؛ منجر به نتایج ضعیف‌تری از نظر استنباطی در مورد ویژگی‌های سری زمانی قیمت‌های نفت خام می‌شود.

جدول ۲. آمار توصیفی بازده WTI

	میانگین	بیشترین	کمترین	انحراف استاندارد	چولگی	کشدگی
RET_WTI	۰/۰۰۱۴۱۳	۰/۶۷۵۰۳۸	-۰/۷۸۲۴۹	۰/۱۱۲۵۸۵	-۱/۳۲۴۷۴۴	۳۹/۱۷۷۳۶

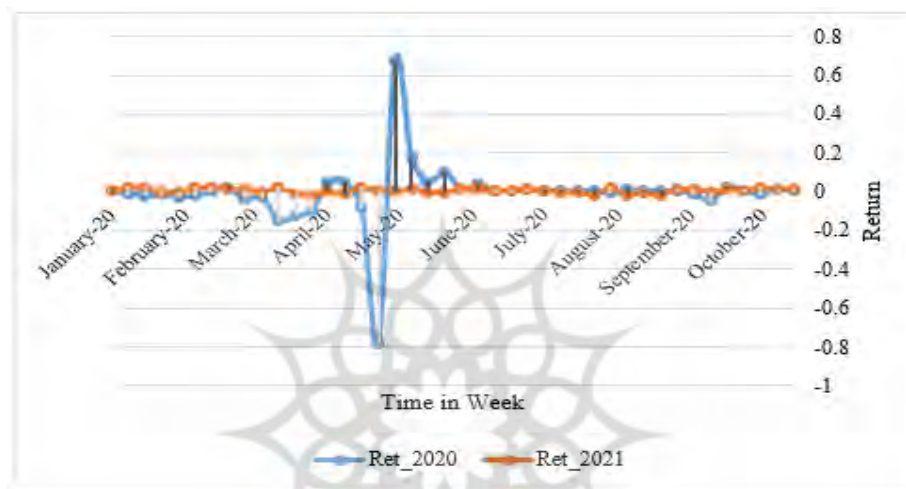
مأخذ: محاسبات پژوهش

به منظور تکمیل تحلیل توصیفی داده‌های بازده قیمت‌های نفت خام WTI مطابق با اهداف این پژوهش، تغییرات بازده قیمت‌های WTI در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۲۱ در نمودار (۵) ارائه شده است. همان‌گونه که نمودار (۵) نشان می‌دهد که تغییرات بازده قیمت نفت در سال ۲۰۲۰ از لحاظ بزرگی به ویژه در هفته‌های انتهایی ماه‌های آوریل و ابتدایی ماه مه قابل قیاس با سال ۲۰۲۱ نیست. این تحولات تا هفته اول سپتامبر ۲۰۲۰ ادامه



داشته و از این زمان به بعد تقریباً در بازار نفت WTI نوعی ثبات به وجود آمده است. جهت تغییرات بازده در سال ۲۰۲۱ مثبت بوده است که به دلیل چشم‌انداز پایان همه‌گیری و محدودیت‌های کرونایی و رشد اقتصادی متعاقب آن در کشورهای جهان بوده است؛ با این حال میزان تغییرات بازده در این سال نسبت به اواسط سال ۲۰۲۰ نسبتاً پایین است.

نمودار ۵. مقایسه بازده قیمت‌های نفت خام WTI سال ۲۰۲۰ با سال ۲۰۲۱



مأخذ: یافته‌های پژوهش

## ۲-۴. نتایج تخمین مدل‌ها

در این بخش نتایج تخمین پسین پارامترهای مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی ارائه می‌شود. این نتایج با استفاده از ۲۵۰ هزار شبیه‌سازی مونت کارلوی زنجیره‌های مارکوفی<sup>۱</sup> به دست آمده است که ۱۰۰ هزار شبیه‌سازی ابتدایی به منظور استنباط دقیق‌تر سوخت شده است و تنها از ۱۵۰ هزار شبیه‌سازی انتهایی استفاده شده است. نتایج براساس میانگین پسین و انحراف استاندارد (در پرانتز) برای هر ضریب در مدل‌های مختلف گزارش شده است. شایان ذکر است که نتایج تخمین‌ها براساس داده‌های روزانه قیمت نفت خام WTI در بازه زمانی جدول (۳) نشان می‌دهد که تلاطم در بازار نفت WTI پایداری بالایی دارد زیرا ضریب  $\phi$  در تمام این مدل‌ها برابر با عددی بین ۰/۹ تا ۰/۹۳ است که بسیار نزدیک به یک

1. Markov Chain Monte Carlo (MCMC)

می‌باشد. در نتیجه، وقوع یک جریان تلاطمی در بازار به سادگی به ثبات منتهی نمی‌شود و برای مدت زیادی بازار متلاطم خواهد بود. این واقعیت به این معناست که تلاطم نقش پرنگی در تعیین قیمت نفت خام WTI خواهد داشت (پتربا و سامرز<sup>۱</sup> (۱۹۸۶)). واریانس معادله حالت یا معادله تلاطم با معکوس سازی ضریب  $\sigma_{\omega}^{-2}$  (که در ادبیات بیزی ضریب دقت نامیده می‌شود) به دست می‌آید و اندازه این ضریب در مدل تلاطم تصادفی با پرش [SVJ] نسبت به سایر مدل‌ها کوچکتر است. این موضوع (کوچک بودن این واریانس نسبت به سایر مدل‌ها) تطابق مناسب داده‌ها را با مدل تلاطم تصادفی با پرش [SVJ] بیان می‌کند. همچنین، بزرگ‌ترین واریانس تلاطم مربوط به «تلاطم تصادفی» است. همچنین مقدار پارامتر سطح<sup>۲</sup> که با ضریب  $\mu_k$  نشان داده شده است از لحاظ اندازه نسبت به همه مدل‌ها بالا و تنها نسبت به مدل تلاطم تصادفی با پرش مرتون پایین است. این موضوع نشان داده آن است که مدل «تلاطم تصادفی» نمایش مناسبی از داده‌های بازده قیمت نفت خام WTI نیست.

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که واریانس تلاطم (ضریب  $\sigma_{\omega}^2$ ) در مدل «تلاطم تصادفی با اثرات اهرمی» به جز مدل تلاطم تصادفی با پرش [SVJ] از سایر مدل‌ها کوچک‌تر است. این موضع نشان می‌دهد که مؤلفه پرش به نسبت اثر اهرمی تأثیر بیشتری بر اطلاعات ما از تلاطم در بازار WTI دارد. ضریب  $\rho$  که اثر اهرمی را اندازه‌گیری می‌کند در تمام مدل‌هایی که شامل این ضریب است منفی می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که شوک‌های منفی نسبت به شوک‌های مثبت، امواج تلاطمی بزرگ‌تری را در بازار نفت خام WTI تولید می‌کنند. با این حال، فاصله اعتبار ۹۵ درصد این ضریب جز برای مدل‌های مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش مرتون و مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش شامل صفر است که بیانگر عدم وجود شواهد کافی برای تایید اثر اهرمی در مدل «تلاطم تصادفی با اثرات اهرمی» در این بازار است. احتمال وقوع پرش (ضریب  $p$ ) در مدل‌های شامل پرش بین ۱/۱ درصد تا ۱/۸ درصد در نوسان است و با توجه به اینکه بسامد داده‌های این مطالعه هفتگی می‌باشد این موضوع یعنی وقوع حداکثر یک پرش در هر سال است. همچنین، ضریب  $\mu_k$  که متوسط اندازه پرش را نشان می‌دهد در همه مدل‌ها جز مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش مرتون منفی

1. Poterba and Summers

2. Level

است. اما با این وجود در دو مدل تلاطم تصادفی با پرش [SVJ] و اثر اهرمی و پرش فاصله اعتبار این پارامتر شامل صفر نیست.

جدول ۳. میانگین پسین و انحراف استاندارد (در پرانتز) پارامترها در مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی

	SV	SVL	SVJ	SVLJ	SVCJ	SVLCJ
$\sigma_{\omega}^{-2}$	۷۶/۴۹ (۳۴۸)	۲۸۰ (۷۱۳/۲)	۳۱۴/۲ (۲۸۴/۱)	۹۴/۵ (۳۹۶/۸)	۳۰/۶۶ (۱۹۸/۲)	۱۴/۴۲ (۱۲۱/۴)
$\mu_h$	-۱۴/۸۱ (۳/۹۳۶)	-۰/۹۷۴۷ (۷/۷۱۶)	-۸/۳۳۴ (۱/۰۶۹)	-۷/۴۴۳ (۲/۴۹۲)	-۱۵/۳۵ (۳/۱۳۴)	-۷/۷۰۴ (۲/۱۵۹)
$\phi$	۰/۹۰۰۶ (۰/۰۶۰۹۲)	۰/۹۰۱۲ (۰/۰۶۵۲۹)	۰/۹۳۳۹ (۰/۰۶۹۶۵)	۰/۹۲۵۷ (۰/۰۵۴۲)	۰/۹۰۷۱ (۰/۰۵۳۰۵)	۰/۹۳۲۱ (۰/۰۳۹۸۲)
$\rho$	-	-۰/۴۳۴۹ (-۰/۴۳۴۹)	-	-۰/۶۶۹۷ (۰/۱۳۷۱)	-	-۰/۵۹۷۸ (۰/۱۷۷۷)
$\sigma_k^{-2}$	-	-	۰/۰۰۰۲ (۰/۰۰۰۰۵)	۳/۵۱۷ (۴/۶۵۶)	۱/۰۷ (۰/۹۷۹۲)	۱/۰۶۸ (۱/۰۱۷)
$\mu_k$	-	-	-۰/۰۰۰۱ (۰/۰۰۰۰۲)	-۱/۷۵۹ (۲/۳۲۸)	-۰/۰۲۶۷۷ (۰/۸۸۷۴)	۰/۰۴۶۸۸ (۰/۹۴۸۸)
$p$	-	-	۰/۰۱۸۴۵ (۰/۰۱۰۰۵)	۰/۰۱۳۰۴ (۰/۰۰۹۱۰۲)	۰/۰۱۴۲۴ (۰/۰۰۹۹۱۴)	۰/۰۱۱۹ (۰/۰۰۸۴۲۵)
$\beta_j$	-	-	-	-	-۰/۰۱۵ (۰/۹۸۹۸)	۰/۰۰۳۷۰۸ (۰/۹۹۰۸)
$\mu_j$	-	-	-	-	۹/۷۰۱ (۶/۹۴۹)	۱۰/۱۸ (۷/۱۳۲)

مأخذ: محاسبات پژوهش

همچنین ضریب  $\sigma_k^{-2}$  که دقت تخمین اندازه پرش را اندازه‌گیری می‌کند؛ در این جدول برای مدل‌های مختلف گزارش شده است. بیشترین دقت در تخمین معادله پرش با توجه به یافته‌های ارائه شده در این جدول مربوط به مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش است که برابر با ۳/۵۱۷ می‌باشد. در نتیجه نسبت به مدل‌های دیگر که مؤلفه پرش را دارند در استخراج اطلاعات از اندازه و زمان پرش به نحو مناسب‌تری عمل می‌کند. اهمیت این موضوع زمانی به خوبی مشخص می‌شود که بدانیم پرش اتفاقی نادر است و اطلاعات

چندانی از آن در داده‌ها به نسبت سایر مؤلفه‌ها وجود ندارد. ضریب  $\beta_r$  که همبستگی میان اندازه پرش در بازده و در تلاطم را اندازه‌گیری می‌کند، در مدل تلاطم تصادفی با پرش مرتون منفی و در مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش مرتون مثبت به دست آمده است. این موضوع ارزیابی مدل‌ها را براساس یک معیار دقیق ضروری می‌کند زیرا افزودن یک مؤلفه به مدل می‌تواند نتایج متفاوت را ارائه کند و تفسیری متفاوت از عملکرد بازده نفت خام و در نتیجه بازار این کالای اساسی ارائه کند. در بخش بعد با استفاده از فاکتور بیزی و راستنمایی حاشیه‌ای چنین ارزیابی از مدل‌ها به عمل آمده است. در نهایت متوسط اندازه پرش وقوعی در تلاطم (ضریب  $\mu_r$ ) قیمت‌های نفت خام در هر دو مدل تلاطم تصادفی با پرش مرتون و مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش مرتون مثبت و تقریباً نزدیک به هم به دست آمده است.

### ۳-۴. نتایج مقایسه مدل‌ها

مدل‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند با استفاده از روش بیزی برآورد شده‌اند. برای محاسبه راستنمایی شرطی این مدل‌ها از رویکردی که لنک و دسربو<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) معرفی کردند، استفاده شده است. در مورد محاسبه راستنمایی حاشیه‌ای مدل‌های تلاطم تصادفی همان‌گونه که چان و گرت (۲۰۱۶) بیان می‌کنند، تابع راستنمایی به صورت تحلیلی در دست نیست بنابراین استفاده از روش‌های نمونه‌گیری الزامی است. به طور کلی تابع راستنمایی مدل‌های تلاطم تصادفی به صورت زیر قابل بیان است:

$$p(y|\theta) = \int p(y|\theta, h)p(h|\theta)dh$$

که  $p(y|\theta, h)$  تابع راستنمایی شرطی (به شرط متغیر پنهان تلاطم  $h$ ) و  $p(h|\theta)$  تابع توزیع پیشین لگاریتم تلاطم  $h$  است. اگر  $h^{(1)}, \dots, h^{(R)}$  نمونه‌های تصادفی و مستقل از چگالی  $g(\cdot)$  باشد، آنگاه می‌توان تابع راستنمایی  $p(y|\theta)$  را با استفاده از برآوردگر نمونه‌گیر زیر به دست آورد:

$$p(y|\theta) = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \frac{p(y|\theta, h^{(i)})p(h^{(i)}|\theta)}{g(h^{(i)})}$$

1. Lenk and Deserbo

در این پژوهش،  $g(\cdot)$  به گونه‌ای انتخاب شده است که بیشترین نزدیکی را با تابع  $p(h|y, \theta)$  (توزیع پسین متغیر تصادفی  $h$ ) داشته باشد.

بر اساس این توضیحات لگاریتم راستنمایی محاسبه و در جدول (۴) برای مدل‌های مختلف تلاطم تصادفی استفاده شده گزارش گردید. نتایج نشان‌دهنده آن است که بهترین مدل به منظور مدل‌سازی تلاطم بازده نفت خام WTI مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش است. در رده دوم مدل تلاطم تصادفی با پرش قرار می‌گیرد و پس از آن مدل «تلاطم تصادفی با اثرات اهرمی». به منظور مقایسه دو به دو مدل‌ها با استفاده از فاکتور بیزی کافی است که لگاریتم حاشیه‌ای هر دو مدل را برهم تقسیم کرد.

جدول ۴: لگاریتم راستنمایی حاشیه‌ای مدل‌های تلاطم تصادفی و انحراف استاندارد متناظر (در پرانتز)

مدل	لگاریتم راستنمایی حاشیه‌ای	رتبه مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها	مدل	لگاریتم راستنمایی حاشیه‌ای	رتبه مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها
SV	-۹۰۶۳ (۶/۵۳)	۶	SVLJ*	-۱۵۳/۱ (۰/۱۵۷)	۱
SVL	-۱۵۷۹ (۰/۸۴۲)	۲	SVCJ	-۸۶۲۳ (۷/۱۲۵)	۵
SVJ	-۵۵۵۸ (۰/۱۴۸)	۳	SVLCJ	-۶۷۸۲ (۳/۸۶۹)	۴

مأخذ: محاسبات پژوهش

این نتایج با نتایج تخمین مدل‌ها که در جدول (۳) ارائه شده است نیز سازگار می‌باشد. بنابراین به منظور مدل‌سازی مناسب تلاطم قیمت‌های نفت خام WTI افزودن مؤلفه اهرم و پرش به معادلات تلاطم تصادفی الزامی است.

پس از آنکه با استفاده از معیار لگاریتم راستنمایی شرطی مدل مناسب انتخاب شد، پرش‌ها و زمان وقوع اتفاق افتادن در قیمت‌های نفت خام WTI را با استفاده از مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش برآورد می‌کنیم. بدین منظور برای محاسبه این مقادیر به صورت زیر عمل می‌کنیم (یونگ و ژانگ ۲۰۱۴)

$$Jump\_times : \bar{q}_t = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M q_t^{(j)}$$

$$Jump\_sizes : \bar{q}_t \bar{k}_t = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M q_t^{(j)} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M k_t^{(j)}$$

در این روابط  $M$  نشان‌دهنده تعداد نمونه‌های استخراج شده از شبیه‌سازی‌ها برای  $q_t$  و  $k_t$  و  $q_t^{(j)}$  و  $k_t^{(j)}$  نشان‌دهنده ژامین نمونه  $q_t$  و  $k_t$  است. در این پژوهش برای محاسبه این آماره‌ها ۱۰۰ نمونه به حجم ۱۰ هزار شبیه‌سازی تولید گردید که نتایج آنها در نمودار (۵) ارائه شده است.

همان‌گونه که نمودار (۶) نشان می‌دهد در هفته هفدهم سال ۲۰۲۰ (بیست و چهارم آوریل ۲۰۲۰) یک پرش منفی در بازده نفت اتفاق افتاده است. طبق داده‌های قیمت نفت خام WTI، در این هفته قیمت‌های WTI از ۲۰ دلار به ۳ دلار در هر بشکه سقوط کرد که کمترین قیمت هفتگی WTI از سال ۱۹۸۶ به بعد بوده و توسط مدل SVLJ با دقت شناسایی شده است. این اتفاق متناظر با جنگ قیمتی میان عربستان و روسیه در نتیجه نادیده گرفتن تقاضای عربستان برای افزایش ۱/۵ میلیون بشکه در روز به خاطر شیوع همه‌گیری کرونا و کاهش ظرفیت انبارهای کوشینگ اوکلاهما (محل ذخیره نفت WTI) بود. همچنین براساس یافته‌های ارائه شده در نمودار (۶) یک پرش مثبت در بازده WTI نیز در این سال مشاهده می‌شود که در تاریخ اول آوریل ۲۰۲۰ به وقوع پیوسته است. اندازه پرش مثبت در بازده تنها ۴ درصد بوده است که در مقابل پرش منفی ۱۴ درصد در بازده نسبتاً کوچک محسوب می‌شود. همان‌گونه که نمودار (۶) نشان می‌دهد، براساس نتایج به دست آمده از مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش تا هفته آخر ماه اکتبر سال ۲۰۲۱ پرش مثبت یا منفی تأثیرگذاری اتفاق نیافتاده است و بازار تقریباً در یک ثبات معنادار مسیر خود را طی می‌کند.

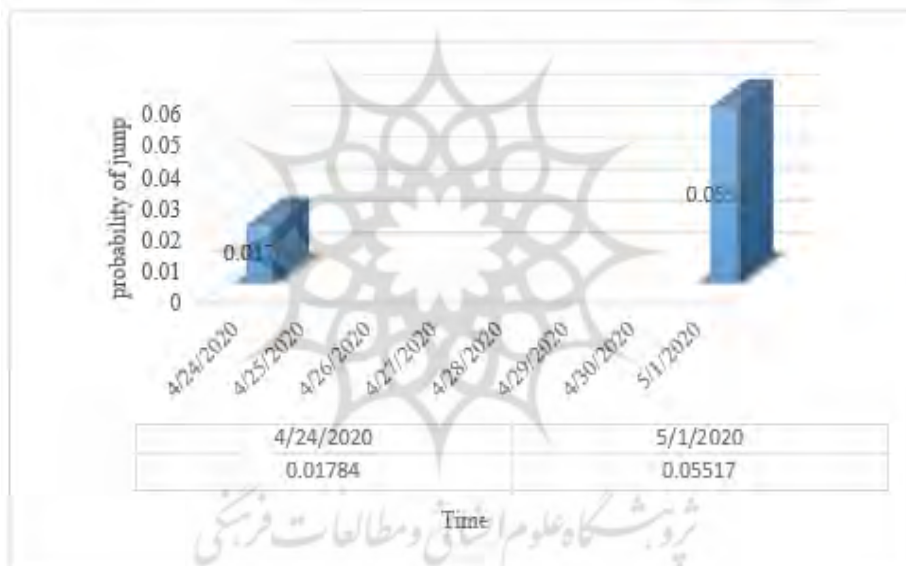
نمودار ۶. برآورد زمان، اندازه و تعداد پرش‌های اتفاق افتاده در بازه هفتگی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۱



مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار (۷) احتمال پرش را نشان می‌دهد. براساس یافته‌های ارائه شده در این نمودار احتمال وقوع پرش در هفته پایانی ماه آوریل ۱/۷ درصد و در هفته اول ماه مه برابر با ۵/۵ درصد ارزیابی شده است که از میانگین سراسری در طول نمونه بسیار بزرگ‌تر است.

نمودار ۷. تخمین میزان احتمال وقوع پرش در بازه قیمت‌های نفت خام WTI در دو سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱



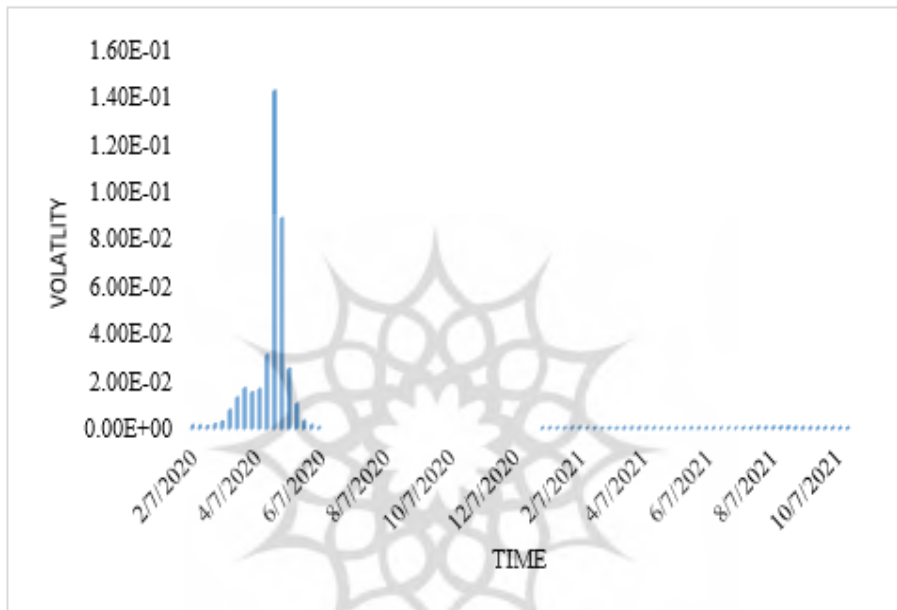
مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار (۷) میزان تلاطم هفته‌های مختلف دو سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. بیشترین اندازه تلاطم در بازه قیمت‌های WTI ۰/۱۴ می‌باشد و مربوط به آخرین هفته ماه آوریل (چهارمین ماه سال میلادی) سال ۲۰۲۰ است. این موج تلاطمی تا ماه ژوئیه (هشتمین ماه میلادی) ۲۰۲۰ ادامه داشته است. با توجه به اینکه تناوب داده‌های مورد استفاده هفتگی است، این موضوع پایداری بالای تلاطم بازه قیمت‌های WTI را نشان می‌دهد.



همچنین نمودار (۸) نشان می‌دهد که در مقایسه با سال ۲۰۲۰ بازار نفت خام WTI روند تلاطم بسیار ملایم‌تری را در سال ۲۰۲۱ طی کرده است.

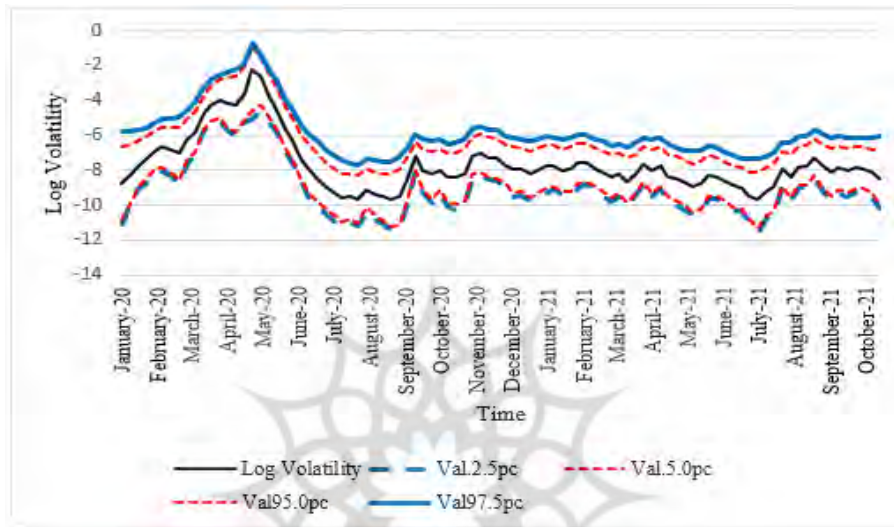
نمودار ۸. مقایسه اندازه تلاطم ارزیابی شده بازده قیمت‌های WTI توسط مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش سال ۲۰۲۰ با سال ۲۰۲۱



مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار (۹) لگاریتم تلاطم یا  $\kappa_t = \exp\left(\frac{h_t}{2}\right)$  را نشان می‌دهد که به صورت  $\bar{\kappa}_t = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \kappa_t^{(j)}$  محاسبه می‌شود و در آن  $j$  امین نمونه از لگاریتم تلاطم  $\kappa_t$  است. این نمودار خوشه‌ای بودن تلاطم را نشان می‌دهد. همچنین فواصل اعتبار ۹۰ درصد (شامل Val.5.0pc تا Val.95.0pc) و ۹۵ درصد (شامل Val.2.5pc تا Val.97.5pc) حول لگاریتم تلاطم ترسیم شده است. این نمودار نسبتاً هموار است که پایداری بالای تلاطم را در بازار نفت خام در بازه هفتگی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. همچنین نمودار (۹) نشان می‌دهد که لگاریتم تلاطم در بازه WTI در سال ۲۰۲۰ به مراتب شدیدتر از تلاطم در سال ۲۰۲۱ بوده است.

نمودار ۹. تلاطم بازده قیمت‌های نفت خام WTI



مأخذ: یافته‌های پژوهش

به منظور کنترل مدل، چگالی پیشگویانه پسین<sup>۱</sup> مدل استخراج و فاصله اعتبار ۹۹ درصد براساس آن ساخته می‌شود. کنترل مدل با استفاده از چگالی پیشگویانه پسین روشی برای ارزیابی ناسازگاری یک مدل با داده‌ها به شکلی است که احتمالاً بر نتایج به دست آمده تأثیر می‌گذارد (گلمن<sup>۲</sup> و همکاران ۲۰۰۴). چگالی پیشگویانه پسین به صورت زیر استخراج می‌شود:

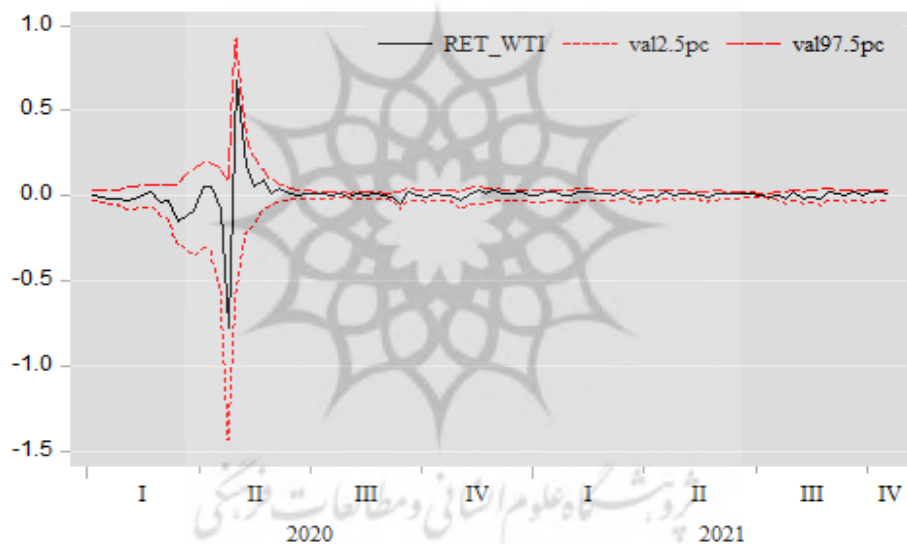
$$p(y_{pre} | y) = \int p(y_{pre} | \theta) p(\theta | y) d\theta,$$

درواقع چگالی پیشگویانه پسین، براساس توزیع پسین بردار پارامترهای مدل (که در رابطه فوق با  $\theta$  نشان داده شده است) مجموعه‌ای از داده‌های  $y_{pre}$  را تولید می‌کند (که داده‌های پیش‌بینی شده یا به دست آمده از مدل نیز نامیده می‌شوند)، در صورتی که این

1. Posterior Predictive Density  
2. Gelman et al.

داده‌ها با داده‌های واقعی  $y$  اختلاف اساسی نداشته باشند و اختلافات موجود ناشی از خطاهای تصادفی و نمونه‌گیری از توزیع باشد آنگاه باید داده‌های واقعی  $y$  در فاصله اعتماد ۹۵ یا ۹۹ درصدی ساخته شده براساس توزیع پیشگویانه پسین قرار گیرند. در نمودار (۱۰) داده‌های بازده نفت خام WTI (که با RET-WTI نشان داده شده است) در فاصله ۹۹ درصد توزیع پیشگویانه پسین که با خطوط بریده نمایش داده شده است، قرار گرفته است. بنابراین، ناسازگاری اساسی بین مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش و داده‌های واقعی بازده WTI که بر نتایج تأثیر اساسی بگذارد وجود ندارد.

نمودار ۱۰. سازگاری مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش با داده‌های واقعی بازده WTI با استفاده از توزیع پیشگویانه پسین



مأخذ: یافته‌های پژوهش

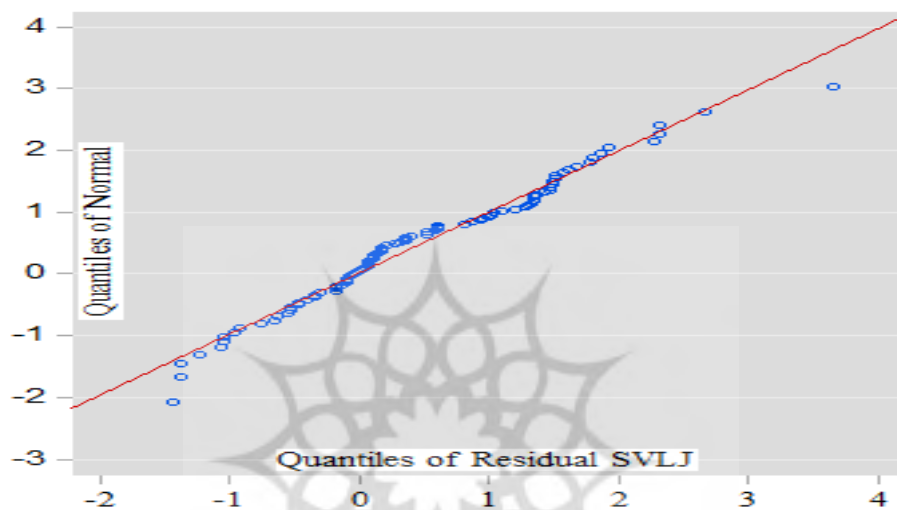
همچنین، نمودار (۱۱) کوانتیل باقیمانده‌های مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش را که به صورت

$$\varphi_{\alpha} = (y_t - \bar{q}_t \bar{k}_t) \exp\left(-\frac{\bar{h}_t}{2}\right) (1 - \rho^2)^{-1}$$

محاسبه شده است  $\bar{q}_t \bar{k}_t$  و  $\bar{h}_t$  به شیوه‌ای که در بالا گفته شد محاسبه می‌شود) در مقابل کوانتیل نرمال را نشان می‌دهد. براساس این یافته‌ها باقیمانده‌ها به صورت نرمال توزیع

شده‌اند و بنابراین، مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش کفایت لازم را برای مدل‌سازی تلاطم داده‌های نفت خام WTI را دارد. در مقایسه با نمودار (۳)، نمودار (۱۱) نشان می‌دهد که چگونه کشیدگی بالای توزیع داده‌های بازده قیمتی WTI توسط مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش کنترل شده است.

نمودار ۱۱. نمودار QQ باقیمانده‌های مدل تلاطم تصادفی با اثر اهرمی و پرش



مأخذ: یافته‌های پژوهش

## ۵. خلاصه و نتیجه‌گیری

قیمت نفت خام یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اقتصادی جهان است و سیاست‌گذاران، تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و شرکت‌کنندگان در بازارهای مالی از نزدیک آن را زیر نظر دارند. نفت خام نه تنها ورودی مهمی در تولید است، بلکه به عنوان یک دارایی اساسی برای بخش وسیع و رو به رشدی از بازارهای مالی عمل می‌کند. رویدادهای بزرگ و نادر می‌توانند شوک‌های بسیار بزرگی را در اقتصادها ایجاد کنند. سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ میلادی از نظر وقوع برخی اتفاقات همچون همه‌گیری کووید-۱۹ منحصر به فرد است. همان‌گونه که نتایج تحلیل داده‌های این پژوهش نشان می‌دهد، در این سال بازار نفت بسیار متلاطم بوده است. بررسی ساختار بازار نفت بدون توجه به چنین اتفاقات ناگهانی و سریعی به نتایجی نادرست و تصمیم‌های غلط خواهد انجامید. این شرایط فرصتی را فراهم می‌کند تا ساختار مدل‌های مختلف ارزیابی تلاطم را بررسی کرد.

در این مقاله ویژگی‌های سری زمانی نفت خام WTI با استفاده از ابزارهای اقتصادسنجی مالی مدرن مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مجموعه‌ای از مدل‌های کلاس تلاطم تصادفی را برآورد و مقایسه گردید. این مدل‌ها دارای چندین ویژگی مطلوب هستند و می‌توانند انواع مختلفی از پویایی را به نمایش بگذارند. همه مدل‌ها براساس داده‌های هفتگی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلوی زنجیره‌های مارکوفی برآورد شدند. این روش برآوردهای مناسبی از پارامترهای مدل و همچنین فرآیند تلاطم پنهان، زمان پرش، اندازه پرش و اثر اهرمی ارائه می‌کند. برآورد متغیرهای پنهان یک مزیت مهم برای تصریح مدل ارائه می‌کند و به ما اجازه می‌دهد تا دید بسیار بهتری از دینامیک مدل‌های مختلف داشته باشیم. بنابراین می‌توانیم شواهد مهم و جدیدی را ارائه دهیم که مدل‌های اقتصادسنجی مدرن چگونه می‌توانند الگوهای موجود در داده‌های قیمت نفت را نشان دهند. در این پژوهش با استفاده از روش راستنمایی شرطی مدل‌ها مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاکی از این بود که وجود مؤلفه پرش در بازده و اثر اهرمی در تلاطم کارایی مدل‌های تلاطم تصادفی را نسبت به حالت‌های جایگزین بهبود می‌بخشد. بر این اساس، مدل تلاطم تصادفی با مؤلفه پرش در بازده و مؤلفه «اثر اهرمی در تلاطم» سازگارترین مدل برای داده‌های بازده نفت خام WTI است. این به معنای آن است که مدل‌سازی تلاطم به صورت تلاطم پنهان با اثرات اهرمی و مؤلفه پرش ویژگی‌های سری زمانی نفت خام برنت و WTI را بهتر از سایر مدل‌ها منعکس می‌کند. در نتیجه، مؤلفه پرش در ارزیابی تلاطم بازده نفت خام به ویژه در شرایط همه‌گیری کووید-۱۹ بسیار مهم است زیرا نتایج نشان‌دهنده وقوع دو پرش بزرگ در بازده قیمت‌های نفت خام بوده است. نادیده گرفتن این موضوع به معنای ارزیابی نادرست از میزان ریسک این بازار خواهد بود که نقش اساسی در توسعه اقتصادهای صادرکننده و واردکننده نفت دارد. پس از تخمین و انتخاب مدل، مشخص گردید که در هفته آخر ماه آوریل سال ۲۰۲۰ یک پرش منفی ۱۴ درصد در بازده نفت خام WTI رخ داده است. همچنین در هفته ابتدایی ماه مه نیز یک پرش مثبت ۴ درصد روی داده است. این نتایج از آن جهت جالب توجه است که مدل‌های تلاطم تصادفی با مؤلفه پرش با توجه به تخمین پارامتر  $p$  (احتمال وقوع پرش) به طور متوسط وقوع یک پرش در سال را محتمل می‌دانستند. همچنین نتایج مدل منتخب حاکی از ثبات بازار نفت در سال ۲۰۲۱ تا هفته انتهای ماه اکتبر می‌باشد. به طوری که تلاطم در بازده WTI در این سال با سال ۲۰۲۰ قابل مقایسه نیست.

به منظور انجام پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های تلاطم تصادفی زمان پیوسته مورد استفاده قرار گیرد و همچنین دینامیک معادله تلاطم و معادله بازده با استفاده از مؤلفه‌های آرما<sup>۱</sup> توسعه یابد و با مدل‌های کنونی مقایسه گردد. همچنین می‌توان از الگوهای چندمتغیره تلاطم تصادفی برای داده‌های قیمت نفت خام به منظور بررسی بازخورد اثرات آنها بر یکدیگر استفاده کرد.

## ۶. تعارض منافع

تعارض منافع وجود دارد.

## ORCID

Mojtaba Rostami

 <https://orcid.org/0000-0001-9813-1831>

Mohammad Nabi Shahiki Tash

 <https://orcid.org/0000-0001-6541-3189>

## References

- Andersen, T. G. and Davis, R. A. and Kreiss J.P. and Mikosch T. V. (2009). Handbook of financial time series. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 555-576.
- Chan, J. C. and Grant, A. L. (2016). Modeling energy price dynamics: GARCH versus stochastic volatility. *Energy Economics*, Vol. 54, pp. 182-189.
- Charles, A., and Darné, O. (2017). Forecasting crude-oil market volatility: Further evidence with jumps. *Energy Economics*, Vol. 67, pp.508-519.
- Chen, L. and Zerilli, P. and Baum, C. F. (2019). Leverage effects and stochastic volatility in spot oil returns: A Bayesian approach with VaR and CVaR applications. *Energy Economics*, Vol. 79, pp. 111-129.
- Chou, R.Y. (1988). Volatility Persistence and Stock Valuations: Some Empirical Evidence Using GARCH. *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 3, pp. 279-294.
- Crisostomo, R. (2015). An analysis of the Heston stochastic volatility model: Implementation and calibration using MATLAB. arXiv Preprint. <https://arxiv.org/abs/1502.02963>.
- Engle, R. (1982). Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of united kingrom inflation. *Econometrica*, Vol. 50, pp. 391-407.
- Eraker, B. and Johannes, M. and Polson, N. (2003). The impact of jumps in volatility and returns. *The Journal of Finance*, Vol. 58(3), pp. 1269-1300.

---

1. ARMA

- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., and Rubin, D. B. (2013). Bayesian data analysis. CRC press.
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Rubin, D.B. (2004). *Bayesian data analysis*, 2nd edn. London: Chapman and Hall.
- Geweke, J. (1989). Bayesian Inference in Econometric Models Using Monte Carlo Integration. *Econometrica*, Vol. 57, pp. 1317-1339.
- Glosten LR. and Jagannathan R. and Runkle DE. (1993). On the Relation between the Expected Value and the Volatility of the Nominal Excess Return on Stocks. *Journal of Finance*, Vol. 48(5), pp. 1779-1801.
- Hoeting, J. A. and Madigan, D. and Raftery, A. E. and Volinsky, C. T. (1999). Bayesian Model Averaging: A Tutorial. *Statistical Science*, Vol. 14 (4), pp. 382-417.
- Hull, J. and White, A. (1987). The pricing of options on assets with stochastic volatilities. *Journal of Finance*, Vol. 42, pp. 281-300.
- Jacquier, E. and Polson, N. and Rossi, P. (2004). Bayesian analysis of stochastic volatility models with fat-tails and correlated errors. *Journal of Econometrics*, Vol. 122, pp. 185-212.
- Jeffreys, H. (1939). Theory of Probability. Oxford: Oxford University Press.
- Kim, S. and Shephard, N. and Chib, S. (1998). Stochastic Volatility: Likelihood Inference and Comparison with ARCH Models. *Review of Economic Studies*, Vol. 65, pp. 361-393.
- Larsson, K. and Nossman, M. (2011). Jumps and stochastic volatility in oil prices: Time series evidence. *Energy Economics*, Vol. 33(3), pp. 504-514.
- Lee, S. W. and Hansen, B. E. (1994). Asymptotic Theory for the GARCH (1, 1) Quasi-Maximum Likelihood Estimator. *Econometric Theory*, Vol. 10, pp. 29-52.
- Lin, Y. and Xiao, Y. and Li, F. (2020). Forecasting crude oil price volatility via a HM-EGARCH model. *Energy Economics*, Vol. 87, 104693.
- Mandelbrot, B. (1963). The Variation of Certain Speculative Prices, *Journal of Business*, Vol. 36, pp. 394-419.
- Meyer, R. and Yu, J. (2000). BUGS for a Bayesian analysis of stochastic volatility models. *Econometrics Journal*, Vol. 3, pp. 198-215.
- Nakajima, J. (2009). Bayesian analysis of GARCH and stochastic volatility: Modeling leverage, jumps and heavy-tails for financial time series [Technical report Mimeo]. Department of Statistical Science, Duke University.
- Nelson, D.B. (1991). Conditional Heteroscedasticity in Asset Returns: A New Approach. *Econometrica*, Vol. 59, pp. 347-370.
- Nelson, D.B. and Foster, D.P. (1994). Asymptotic Filtering Theory for Univariate ARCH Models, *Econometrica*, Vol. 62, pp. 1-41.
- Omori, Y. and Chib, S. and Shephard, N. Nakajima, J. (2007). Stochastic volatility with leverage: Fast and efficient likelihood inference. *Journal of Econometrics*, Vol. 140 (2), pp. 425-449.



- Oyuna, D. and Yaobin, L. (2021). Forecasting the Crude Oil Prices Volatility with Stochastic Volatility Models. *SAGE Open*, Vol. 11(3), 21582440211026269.
- Poterba, J. M. and Summers, L. H. (1988). Mean reversion in stock prices: Evidence and implications. *Journal of financial economics*, Vol. 22(1), pp. 27-59.
- Rostami, M., & Makiyan, S. N. (2020). Modeling Stock Return Volatility Using Symmetric and Asymmetric Nonlinear State Space Models: Case of Tehran Stock Market. *Journal of Economic Modeling Research*, 11(41), pp. 197-229.
- Sadorsky, P. (2005). Stochastic volatility forecasting and risk management. *Applied Financial Economics*, Vol. 15, pp. 121-135.
- Sadorsky, P. (2006). Modeling and forecasting petroleum futures volatility. *Energy Economics*, Vol. 28(4), pp. 467-488.
- Schwert, G.W. (1989). Why Does Stock Market Volatility Change Over Time?. *Journal of Finance*, Vol. 44, pp. 1115-1153.
- Shephard, N. (Ed.). (2005). Stochastic volatility: selected readings. Oxford University Press on Demand.
- Śmiech, S. and Papież, M. and Rubaszek, M. and Snarska, M. (2021). The role of oil price uncertainty shocks on oil-exporting countries. *Energy Economics*, Vol. 93, 105028.
- Stock, J.H. and Richardson, M.P. (1989). Drawing Inferences from Statistics Based on Multi-Year Asset Returns. *Journal of Financial Economics*, Vol. 25, pp. 323-348.
- Tanner, M. A. and Wong, W. H. (1987). The calculation of posterior distributions by data augmentation. *Journal of the American statistical Association*, Vol. 82(398), pp. 528-540.
- Taylor, S.J (1986). Modelling Financial Time Series. John Wiley, New York.
- Withers, S. D. (2002). Quantitative Methods: Bayesian Inference, *Bayesian Thinking*, Progress in Human Geography, Vol. 26 (4), pp. 553-566.
- Yong, L., and Zhang, J. (2014). Bayesian testing for jumps in stochastic volatility models with correlated jumps. *Quantitative Finance*, Vol. 14(10), pp. 1693-1700.
- Yu, J. (2005). On leverage in a stochastic volatility model. *Journal of Econometrics*, Vol. 127(2), pp. 165-178.
- Zhong, M. and Darrat, A. F. and Anderson, D. C. (2003). Do US stock prices deviate from their fundamental values? Some new evidence. *Journal of banking and finance*, Vol. 27(4), pp. 673-697.



**استناد به این مقاله:** رستمی، مجتبی، شهیکی تاش، محمدنبی. (۱۳۹۹). مدل‌سازی دینامیک قیمت‌های نفت خام: مطالعه پرش و تلاطم با استفاده از مدل‌های تلاطم تصادفی (مطالعه موردی: قیمت‌های نفت خام WTI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱)، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۳۷ (۱۰)، ۳۷-۷۲.



Iranian Energy Economics is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.