



ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت در سناریوهای اقلیمی IPCC : با رویکرد

دینامیک سیستم ها

کیان ابتکار^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

حسین خواجه پور^{*}

استادیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

عباس ملکی^۳

استاد، دانشگاه مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

این مقاله با استفاده از رویکرد پویایی سیستم ها، تغییرات چشم انداز قیمت نفت تحت سناریوهای اقلیمی مسیرهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) که توسط IPCC توسعه داده شده است را تا سال ۲۱۰۰ مدل سازی می کند. این مدل ساختارهای بازخوری عمده ای شامل عرضه، تقاضا و قیمت را به یکدیگر مرتبط می کند. در بخش عرضه، تولید اوپک، غیروپک مهم ترین عوامل تعیین کننده هستند. اهداف تولید اوپک منعکس کننده سیاست های مدیریت بازار است و بسیار تحت تأثیر رفتار بازیگران اصلی آن است. عرضه نفت بازیگران اصلی نیز همچنین در یک چرخه به قیمت نفت مربوط می شود. در بخش تقاضا، تقاضای جهانی نفت با توجه به سناریوهای اقلیمی متفاوت در گزارش IPCC مشخص می شود. عدم تعادل بین عرضه و تقاضا باعث تغییرات قیمت نفت برنت در طول زمان می شود. نتایج مدل سازی نشان می دهد که قیمت نفت تا سال ۲۱۰۰ تحت سیاست های پایداری SSP1 به ۲۰ دلار در هر بشکه کاهش می یابد، اما در سناریو SSP3 که بیانگر رقابت منطقه ای است یا SSP4 که نشان دهنده نابرابری و رقابت بیشتر است قیمت نفت تا ۱۰۰ دلار به ازای هر بشکه نیز می رسد. در سناریو SSP5 که بر مبنای رشد اقتصادی - اجتماعی وابسته به مصرف سوخت های فسیلی است، قیمت نفت بعد از گذار از قیمت های به نسبت بالا، روندی کاهشی پیدا می کند. اوج قیمت نفت در سناریوهای IPCC با توجه به RCP آنها می تواند بسیار متفاوت باشد.

واژگان کلیدی: پویایی سیستم ها، قیمت نفت، سناریوهای اقلیمی، تقاضا، عرضه

^۱kian.ebtekar@energy.sharif.edu

^{*}khajehpour@sharif.edu

^۳maleki@sharif.edu



۱- مقدمه

با توجه به نگرانی جامعه جهانی از گرمایش جهانی، تلاش برای اتخاذ سیاست‌های مدیریت تقاضای سوخت‌های فسیلی به ویژه نفت به عنوان یکی از عوامل اصلی تشدید تغییرات اقلیمی گسترش یافته است (Meinshausen et al., 2009). کاهش تقاضای نفت می‌تواند در مدت کوتاهی باعث کاهش قیمت نفت شود (Jaccard, 2005). با افزایش قیمت نفت، تعداد فعالیت‌های مرتبط با اکتشاف نفت گسترش می‌یابد که خود منجر به افزایش سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Harstad, 2012). قیمت‌های پایین نفت به عنوان مانعی برای تولید عمل می‌کنند (Aghion et al., 2016). بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که گذار از مصرف سوخت‌های فسیلی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر برای کاهش پیامدهای تغییرات اقلیمی حیاتی است (Pörtner et al., 2022). پیش‌بینی می‌شود که انتقال انرژی به طور قطعی منجر به کاهش بلند مدت تقاضا برای نفت خواهد شد و فشار فزاینده‌ای بر کاهش قیمت‌ها وارد می‌کند (Mercure et al., 2018). رقابت پذیری و سرعت پذیرش جایگزین‌های انرژی پایدار مانند خودروهای الکتریکی می‌تواند تحت تأثیر قیمت نفت باشد. افزایش هزینه‌های مرتبط با نفت به جذابیت فزاینده سایر منابع انرژی کمک می‌افزاید. در مقابل، کاهش قیمت نفت باعث افزایش استفاده مداوم از سوخت‌های متعارف وابسته به نفت می‌شود (Linn et al., 2014).

اوج مصرف نفت مشروط بر اجرای سیاست‌های مقابله با تغییرات اقلیمی و تحولات انرژی پایدار ممکن است در دو دهه آینده اتفاق بیفتد (IEA, 2022). در نهایت تعامل بین قیمت نفت و تغییرات اقلیمی بر پویایی عرضه، تقاضا و سایر متغیرهای بازار نفت تأثیر می‌گذارد (INVALID CITATION !!!).

در بازار بین‌المللی نفت، عرضه و تقاضا برای تعیین قیمت و در عین حال حفظ حالت تعادل به یکدیگر متصل هستند. رشد و توسعه اقتصادی تأثیرگذارترین نیروهای پشت سر افزایش تقاضا برای نفت خام در سراسر جهان هستند. طبق مطالعات، تقاضای نفت به طور قابل توجهی با رشد تولید ناخالص داخلی همبستگی دارد (Hamilton, 2014). تقاضای نفت در بلند مدت بر خلاف کوتاه‌مدت به تغییرات قیمت نفت حساس‌تر است زیرا مصرف‌کنندگان زمان بیشتری برای واکنش به تغییرات تقاضای نفت نیاز دارند (Csereklyei et al., 2016). سمت عرضه، اوپک و تولیدکنندگان کلیدی غیراوپک مانند روسیه قدرت بازار را برای تعدیل سهمیه تولید و تأثیر بر قیمت‌ها دارند (Behar & Ritz, 2017). در نهایت عدم تعادل بین عرضه و تقاضا باعث نوسانات قیمت نفت می‌شود. رشد سریعتر تقاضا نسبت به عرضه باعث افزایش فشار قیمت می‌شود (Fagan, 2020). به طور کلی، تعامل بین تغییر پویایی عرضه و تقاضا، تعیین‌کننده کلیدی تغییرات قیمت جهانی نفت است و درک این نیروهای اساس بازار بینش مناسبی در مورد چشم انداز تغییرات قیمت نفت ارائه می‌دهد (Baumeister & Kilian, 2016).



در این مقاله با استفاده از رویکرد دینامیک سیستم‌ها تحلیلی بر چشم‌انداز تغییرات قیمت نفت در سناریوهای اقلیمی IPCC ارائه می‌دهد. دینامیک سیستم‌ها روشی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌ها و مسائل پیچیده در طول زمان است. این در دهه ۵۰ میلادی توسط در موسسه فناوری ماساچوست^۱ توسط جی فورستر^۲ توسعه یافت.

مفهوم اصلی این روش این است که سیستم‌ها را می‌توان با استفاده از حلقه‌های بازخوری، حالت و جریان و... که دینامیک غیرخطی سیستم‌ها را نشان می‌دهد، مدل‌سازی کرد (Forrester, 1968).

مدل‌های دینامیک سیستم به دلیل پیچیدگی ناشی از وابستگی‌های متقابل، تعاملات، بازخورد اطلاعات و غیرخطی، آزمایش سناریوها، سیاست‌ها و تصمیمات مختلف، امکان یادگیری در مورد سیستم‌های پیچیده از طریق شبیه‌سازی‌های تعاملی می‌تواند مفید باشد (Stermann, 2002). در دینامیک سیستم‌ها، مسئله‌ای مانند پیش‌بینی قیمت نفت به‌عنوان سیستمی با متغیرهای حالت، جریان، حلقه‌های بازخورد و غیرخطی‌ها مدل‌سازی می‌شود. به طور کلی، دینامیک سیستم یک روش مهم برای درک پویایی قیمت نفت و ایجاد پیش‌بینی‌های مفید است.

در این پژوهش، تغییرات قیمت نفت تحت سناریوهای اقلیمی IPCC مورد بررسی قرار گرفته است. هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی سناریوهای به‌روز شده را در گزارش ارزیابی ششم^۳ سال ۲۰۲۲ به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک^۴ منتشر کرد. این سناریوها چارچوب‌هایی را برای مدل‌سازی مسیرهای مختلف کاهش تغییرات اقلیمی را در این قرن فراهم می‌کنند (Pörtner et al., 2022).

سناریوهای اقلیمی در سناریوهای مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک را ۵ دسته تقسیم بندی می‌کند. در SSP1 سیاست‌های پایداری از انرژی‌های تجدیدپذیر حمایت می‌کنند بنابراین تقاضای نفت کاهش می‌یابد. این امر بر کاهش قیمت نفت فشار وارد می‌کند. SSP2 منعکس کننده مسیر میانی در قبال اجرای سیاست‌های اقلیمی و به معنای کاهش تدریجی مصرف نفت و قیمت‌های نسبتاً پایدار است. SSP3 بیانگر گسترش درگیری‌های منطقه‌ای و ملی‌گرایی است و به دنبال آن تقاضا و قیمت نفت افزایش می‌یابد. SSP4 نشان دهنده نابرابری بالا در داخل و بین کشورها است. قیمت نفت بسته به بی‌ثباتی اقتصادی ممکن است نوسان داشته باشد. تحت SSP5، مصرف نفت به دلیل سیاست‌های توسعه سوخت فسیلی بالا باقی می‌ماند و قیمت‌ها را بالا نگه می‌دارد (Bauer et al., 2023; Kikstra et al., 2022). با این حال، سناریوهای IPCC محدودیت‌هایی دارند. این سناریوها چرخه‌های کوتاه‌مدت، شوک‌ها و شکست‌های ساختاری که قیمت نفت را شکل می‌دهند، در نظر نمی‌گیرند. در این پژوهش با توجه به تغییرات تقاضای نفت در سناریوهای مختلف اقلیمی چشم‌انداز تغییرات نفت در قالب یک مدل دینامیک سیستمی ارزیابی شده است (Riahi et al., 2017).

^۱Intergovernmental Panel on Climate Change

^۲The Massachusetts Institute of Technology (MIT)

^۳Jay Wright Forrester

^۴Sixth Assessment Report (AR6)

^۵Shared Socioeconomic Pathways (SSP)



۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

نفت یکی از اساسی‌ترین کالاهای جهان است که نوسانات قیمت نفت اثرات اقتصادی، ژئوپلیتیکی و زیست‌محیطی گسترده‌ای دارد؛ بنابراین، توانایی پیش‌بینی چشم‌انداز تغییرات دقیق قیمت‌های نفت در آینده بسیار حائز اهمیت است (IEA, 2022). با این وجود به دلیل وابستگی زیاد قیمت نفت به رخدادهای ژئوپلیتیکی و رفتار بازیگران مهم بازار پیش‌بینی دقیق تغییرات نفت در بلندمدت بسیار دشوار است. البته این امر باعث نشده که از ابزارهای ریاضی مختلف به منظور مدل‌سازی رفتار قیمت نفت استفاده نشود زیرا این مدل‌ها با وجود ساده‌سازی‌هایی که در آن‌ها در نظر گرفته می‌شود می‌توانند در بسیاری از موارد کاربردی و مفید باشند. در بخش مرور بر ادبیات، سعی شده است که بررسی ادبیات جامعی از رویکردهای مدل‌سازی که برای پیش‌بینی قیمت نفت به‌ویژه در رابطه با سناریوهای سیاست اقلیمی ارائه شود.

طیف گسترده‌ای از روش‌های کمی و کیفی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی قیمت نفت استفاده شده است. این روش‌ها شامل مدل‌های دینامیک سیستمی، اقتصادسنجی، شبیه‌سازی محاسباتی، آماری، یادگیری ماشین و یا ترکیب تکنیک‌های متعدد می‌شوند. هر رویکرد بر اساس نمایش ساختارهای بازار، متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و مفروضات اساسی، دارای نقاط قوت و ضعف نسبی است. در بخش مرور بر ادبیات ویژگی‌ها و کاربردهای این رویکردهای مدل‌سازی با تمرکز بر مدل‌های دینامیک سیستم‌ها ارزیابی می‌شوند.

مدل‌سازی دینامیک سیستم‌ها یک روش مدل‌سازی به منظور درک رفتار دینامیکی سیستم‌های پیچیده در طول زمان است و روابط بازخوری غیرخطی بین متغیرها در یک سیستم را در قالب متغیرهای حالت، جریان و کمکی ارائه می‌دهد (Sterman, 2002). مدل‌های پویایی سیستم به طور گسترده برای مدل‌سازی پویایی بازار نفت و پیش‌بینی قیمت آن با استفاده از حلقه‌های بازخوری بین متغیرهای کلیدی عرضه، تقاضا، موجودی، ظرفیت و ژئوپلیتیک قیمت نفت را به صورت درون‌زا مدل‌سازی می‌کنند (Mashayekhi, 2001; Rafiq et al., 2016; Samii & Teekasap, 2010). همکاران (۱۹۹۴) عوامل فیزیکی و اقتصادی موثر بر بازارهای نفت مانند منابع، هزینه، فناوری، رشد اقتصادی و مسائل ژئوپلیتیک را به صورت یکپارچه مدل‌سازی کردند (Greenman, 1994). حسینی (۲۰۱۶) در مقاله خود با استفاده از مدل‌های سیستمی، پیچیدگی ساختاری در پویایی قیمت نفت نشان داد (Hosseini et al., 2016). رفیعی سخایی و همکاران (۲۰۱۶) با مدل‌سازی بخش عرضه نفت شامل بازیگرانی مانند اوپک، غیر اوپک، نفت شل آمریکا و ... و تقاضا شامل بخش‌های مانند حمل و نقل و صنعت، تاثیرگذاری متغیرهای مختلف بر مکانیسم‌های بازار را مورد ارزیابی قرار دادند (Rafieisakhaei, Barazandeh, Moosavi, et al., 2016; Rafieisakhaei, Barazandeh, & Tarrahi, 2016). مطالعات مختلف، توانایی مدل‌های دینامیک سیستم را برای بازتولید روندهای قیمت، عرضه و تقاضای تاریخی نشان داده‌اند (de la Fe López-Domínguez et al., 2011; Rafieisakhaei et al., 2017). حسینی و همکاران (۲۰۲۱) و سامی و همکاران (۲۰۱۰) استدلال می‌کنند که ساختار یکپارچه مدل‌های پویایی سیستم می‌تواند تعاملات پیچیده بین سیاست‌های اقتصادی، تغییرات فناوری و ژئوپلیتیک بازار را به خوبی نشان دهد (Hosseini et al., 2021; Li, 2015; Samii & Teekasap, 2010). با این وجود، برخی از محدودیت‌ها مانند در نظر نگرفتن برخی از جنبه‌های دنیای واقعی، نیاز به منابع محاسباتی در مدل‌ها دقیق و بزرگ و ساده‌سازی‌ها دنیای واقعی در مدل‌های دینامیک سیستم پیش‌بینی دقیق تغییرات واقعی قیمت نفت را بسیار دشوار می‌سازد.



مدل‌های اقتصادسنجی با استفاده از روش‌های آماری، برآوردی از روابط اقتصادی و پیش‌بینی نتایج ارائه می‌دهد. طیف وسیعی از تکنیک‌های اقتصادسنجی برای تحلیل و پیش‌بینی قیمت نفت مانند مدل‌های سری زمانی، خودرگرسیون‌های متوالی متغیرهای تصادفی^۲، گارچ^۳ و ... استفاده شده است. مدل‌های اقتصادسنجی از روش‌های آماری تخمین آماری در مجموعه بزرگی از داده‌ها استفاده می‌کنند که بیشتر برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت در بازارهای مالی استفاده می‌شود (Bashiri Behmiri & Pires Manso, 2013). با این حال مدل‌های اقتصادسنجی در نمایش پیچیدگی‌های ساختاری، اثرات بازخورد و رویدادهای نامنظم در مقایسه با رویکردهای شبیه‌سازی محدود و به شدت به کیفیت داده‌های ورودی وابسته هستند.

برخی از مدل‌ها با توجه محدودیت‌های مدل‌های دینامیک سیستم‌ها و اقتصادسنجی، مدل‌های ترکیبی را با ترکیب دینامیک سیستم و روش‌های اقتصادسنجی برای پیش‌بینی قیمت نفت توسعه داده‌اند. هدف اصلی توسعه این مدل‌ها استفاده همزمان از حلقه‌ها بازخوری و تخمین آماری مدل‌های اقتصادسنجی و تحزیه و تحلیل داده‌هاست (Rafieisakhaei et al., 2017). این مدل‌های ترکیبی دقت تحلیل پیش‌بینی را در مقایسه با دینامیک سیستم خالص یا رویکردهای اقتصادسنجی افزایش می‌دهد. اساس دینامیک سیستم یک چارچوب نظری قوی ارائه می‌کند که وابستگی‌های متقابل و پویایی ذاتی در بازار نفت را نشان می‌دهد. تحلیل اقتصادسنجی اعتبار مدل را با استفاده از روش‌های آماری تقویت می‌کند. با این حال، چالش‌ها در ادغام مؤثر رویکردهای مختلف و ناسازگاری احتمالی آن‌ها به عنوان یک چالش باقی می‌ماند.

مدل‌های شبیه‌سازی محاسباتی بزرگ نیز به طور گسترده توسط سازمان‌هایی مانند اداره اطلاعات انرژی^۴، آژانس بین‌المللی انرژی^۵ و اوپک برای مدل‌سازی بازارهای جهانی انرژی به منظور پیش‌بینی و تحلیل سیاست‌ها استفاده شده است. این مدل‌ها مبتنی بر فیزیک، داده‌های فناوری، اقتصادی و زمین‌شناسی دقیق با قدرت محاسباتی بالا برای شبیه‌سازی بازار نفت و تخمین قیمت‌ها استفاده می‌شود (Huntington et al., 2013). به عنوان نمونه مدل جهانی انرژی آژانس بین‌المللی انرژی نشان‌دهنده تعاملات اقتصادی بین تقاضا، عرضه، قیمت‌ها و سایر متغیرهای کلان تحت مفروضات و محدودیت‌های مختلف است (Lee, 2021). این مدل‌های محاسباتی بزرگ، جزئیات گسترده داده را در خود جای داده و بازیگران و محدودیت‌های متعدد بازار را نشان می‌دهند. مقیاس آن‌ها امکان ارزیابی اثرات دقیق رویدادها و سیاست‌ها در بخش‌ها، مناطق و گروه‌های ذینفع را فراهم می‌کند. با این حال، پیچیدگی آن‌ها می‌تواند پویایی مدل را کاهش دهد، کالیبراسیون را چالش برانگیز کند و به منابع محاسباتی گسترده‌ای نیاز داشته باشد.

فراتر از مدل‌های غالب، برخی از مطالعات از تکنیک‌های جایگزین برای تحلیل و پیش‌بینی قیمت نفت مانند مدل‌های یادگیری ماشین، مدل‌های خاکستری و مدل‌های عامل-بنیان استفاده کرده‌اند. رویکردهای یادگیری ماشین

^۱Vector autoregression (VAR)

^۲Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

^۳Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity (GARCH)

^۴Energy Information Administration (EIA)

^۵International Energy Agency (IEA)

^۶Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC)



مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص الگوهای غیرخطی در داده‌های قیمت نفت به کار گرفته شده‌اند (Bashiri Behmiri & Pires Manso, 2013; Xiong et al., 2013). این روش‌های جایگزین در حالی که قابلیت‌های مکمل خوبی را ارائه می‌دهند در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی زمینه اقتصادی ضعیف‌تری دارد.

علاوه بر رویکردهای مدل‌سازی کمی، روش‌های کیفی و نظر کارشناسان نیز در فرآیندهای پیش‌بینی قیمت نفت بررسی شده است. این رویکردهای کمک می‌کند تا عوامل نامنظم مانند ریسک‌های ژئوپلیتیک، نوآوری‌های فناوری، ترجیحات مصرف‌کننده و سیاست‌های زیست‌محیطی که با وجود تاثیرگذاری در بازار نفت در مدل‌سازی کمی با محدودیت مواجه است، در نظر گرفته شود (Huntington et al., 2013). با این حال، مدل‌های کمی و تحلیل داده‌های تاریخی، ورودی‌های اولیه پیش‌بینی قیمت‌ها هستند. ورودی‌های کیفی نقش مکملی را برای سناریوها و عم قطعیت‌ها ایفا می‌کنند و ماهیت بدون ساختار آنها، ادغام آنها را در فرآیندهای پیش‌بینی رسمی چالش برانگیز می‌کند.

به طور خلاصه، در بخش مرور بر ادبیات مروری به نسبت جامع از رویکردهای مدل‌سازی متنوع برای پیش‌بینی و تحلیل قیمت نفت ارائه کرده است. تکنیک‌های مختلف مزایا و محدودیت‌های نسبی دارند و هیچ مدل واحدی نمی‌تواند پیچیدگی‌های چندوجهی موجود در پویایی بازار نفت را به طور کامل نشان دهد (Huntington et al., 2013).

۳- روش‌شناسی تحقیق

این مطالعه با استفاده از رویکرد پویایی سیستم برای بررسی و تحلیل واکنش قیمت جهانی نفت به تغییرات تقاضای آن طبق سناریوهای هیئت بین‌المللی تغییرات اقلیمی که در گزارش ارزیابی ششم بیشتر تحت عنوان مسیرهای اجتماعی - اقتصادی مشترک معرفی شده است (Kikstra et al., 2022)، چشم اندازی از تغییرات قیمت نفت برنت به عنوان یکی از شاخص‌های مهم بازار نفت ارائه می‌دهد. دینامیک سیستم‌ها یک چارچوب مفید و کاربردی برای یکپارچه‌سازی روابط پیچیده و غیر خطی بین عوامل کلیدی عرضه و تقاضا و به دنبال آن قیمت نفت، فراهم می‌کند.

3-1- کلیات مدل

مدل بررسی چشم انداز قیمت نفت بر اساس مدل تحلیل بنیادی که در سال ۲۰۱۵ به منظور بررسی تعادل قیمت نفت برنت به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی بازار نفت توسعه داده شده است (Li, 2015). این مدل که در نرم افزار ونسیم^۳ توسعه و اجرا شده است بر مبنای تعادل بین بخش عرضه و تقاضای نفت طبق رفتار بازیگران اصلی در هر بخش، رفتار تعادلی قیمت نفت در طول زمان را مدل‌سازی می‌کند. شکل ۱ نمودار حلقه علی مدل تحلیلی قیمت نفت را نشان

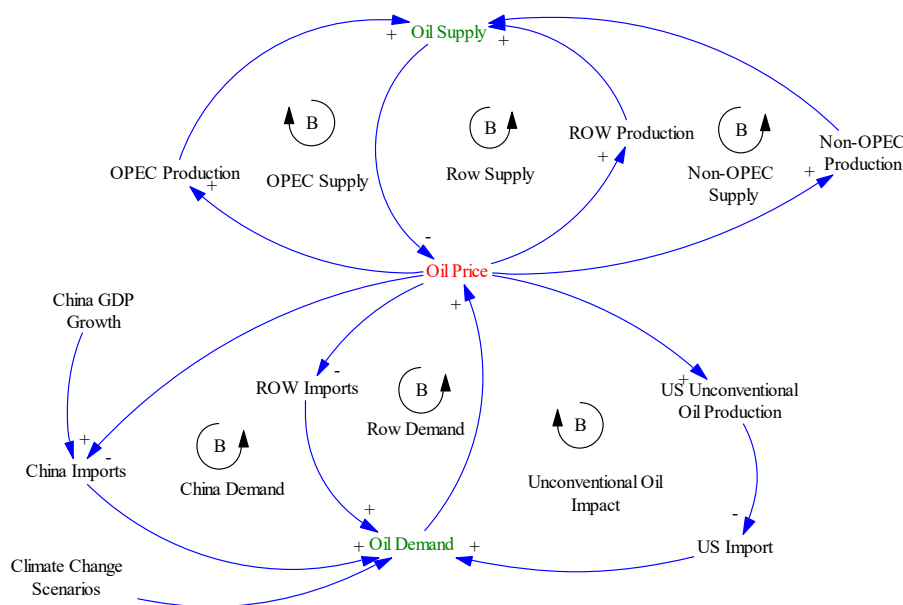
^۱The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

^۲Sixth Assessment Report (AR6)

^۳Vensim dss



می دهد.



شکل ۱. نمودار حلقه علی مدل تحلیل قیمت نفت

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این مدل با ارائه ساختار حلقه های بازخوری شامل تقاضا، عرضه، قیمت و ...، دینامیک اصلی بازار نفت را در قالب روابط غیرخطی مدل سازی می کند. بخش های کلیدی در بخش تقاضا شامل تقاضای چین، ایالات متحده آمریکا و سایر کشورهای جهان است. در بخش عرضه نیز میزان عرضه نفت اوپک و غیر اوپک به عنوان متغیرهای تعیین کننده در قیمت نفت معرفی شده است. در این مدل تعادل بخش عرضه و تقاضا، قیمت نفت را تعیین می کند و قیمت نفت نیز در حلقه بازگشتی بر عرضه و تقاضای بازیگران اصلی بازار تاثیر می گذارد. پس از توسعه مدل اولیه، پارامترها با استفاده از داده های تاریخی تولید نفت، تقاضا، قیمت ها و تولید ناخالص داخلی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ تنظیم می شوند.

3-2- زیر بخش تقاضا

بخش تقاضای مدل شامل تقاضای ایالات متحده آمریکا و چین به عنوان بزرگترین مصرف کنندگان نفت و همچنین تقاضای سایر کشورهای جهان است. تقاضای ایالات متحده آمریکا با توجه به فناوری تولید غیرمتعارف نفت وابستگی زیادی به قیمت نفت دارد. فناوری تولید غیرمتعارف نفت نیازمند قیمت های بالاتر نفت است تا فرآیند تولید از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد. با توجه به قیمت نفت آمریکا تقاضای خود را بر اساس نرخ مصرف و تولید متعارف و غیر متعارف نفت مشخص می کند. تقاضای نفت چین و سایر کشورهای جهان همبستگی فزاینده ای با میزان رشد تولید

¹Rest Of the World (ROW)



ناخالص داخلی خود دارند. در تعیین نرخ تقاضای نفت عوامل دیگری نیز می‌توانند تاثیرگذار باشند در این مدل با در نظر گرفتن پارامترهای تقاضا برای بازیگران اصلی که به کمک داده‌های تاریخی مشخص می‌شوند، بازخوری از تاثیر این عوامل در مدل شبیه سازی شده است. در این مقاله بخش تقاضای نفت بر اساس سناریوهای گزارش ارزیابی ششم IPCC مشخص شده و تاثیر تغییر تقاضای نفت در سناریوهای اقلیمی بر قیمت نفت ارزیابی می‌شود.

3-3- زیر بخش عرضه

بخش عرضه مدل شامل تقاضای نفت اوپک، غیر اوپک و سایر کشورهای جهان می‌شود. رابطه متقابل عرضه نفت هریک از بازیگران اصلی و قیمت نفت با توجه به داده‌های تاریخی که ارتباط بین قیمت نفت و میزان تولید را تعیین می‌کنند در مدل پیاده سازی می‌شود. در بخش عرضه نیز مدل با در نظر گرفتن پارامتری که تاثیر سایر عوامل موثر بر عرضه نفت را مشخص می‌کند و به با کالیبراسیون مدل با داده‌های تاریخی بدست می‌آید، تاثیر این عوامل را بر قیمت نفت مدل سازی می‌کنند.

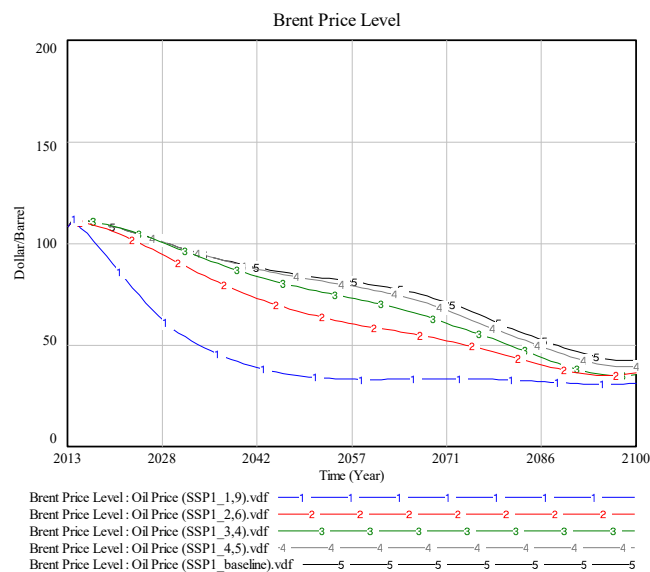
3-4- تعیین قیمت نفت

در نهایت، قیمت نفت برنت بر اساس مازاد تقاضا یا عرضه در کل بازار جهانی نفت مدل سازی می‌شود. تقاضای مازاد بر افزایش قیمت‌ها فشار وارد می‌کند. در حالی که عرضه مازاد قیمت‌ها را به سمت پایین سوق می‌دهد. رفتار اوپک از طریق کاهش یا افزایش به اهداف تولید بر این تعادل تاثیر می‌گذارد. این مدل از تخمین‌های اقتصادسنجی رابطه تاریخی بین سطوح موجودی نفت و قیمت‌ها استفاده می‌کند تا پویایی قیمت را به تصویر بکشد.

۴- مدل سازی، بررسی و تجزیه تحلیل داده‌ها

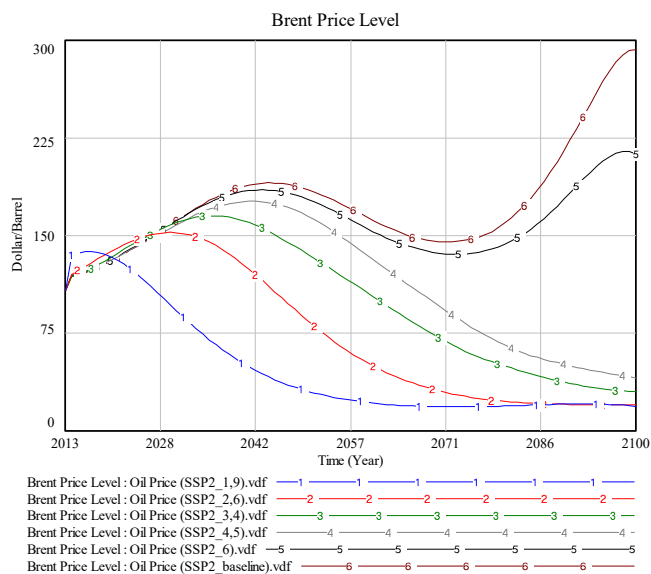
نتایج مدل تفاوت قابل توجهی را در چشم انداز قیمت نفت در مسیرهای مختلف اقتصادی-اجتماعی IPCC از سال ۲۰۱۳ تا ۲۱۰۰ پیش بینی می‌کند. شکل ۲ نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP1 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) را نشان می‌دهد.

^۱Gross Domestic Product (GDP)



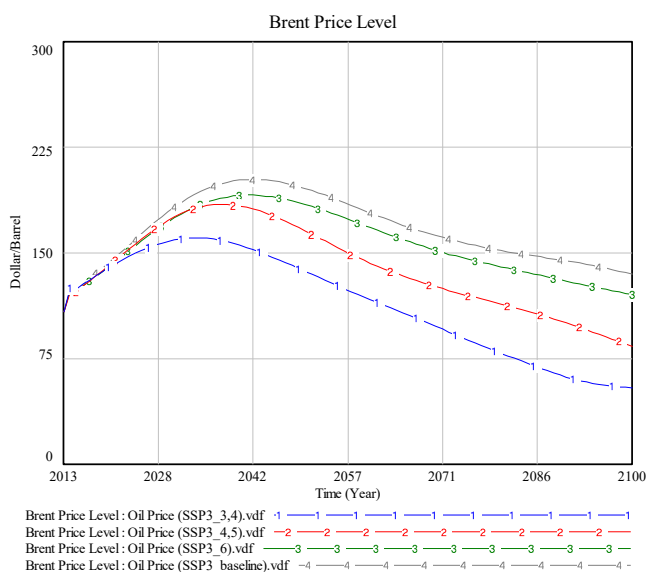
شکل ۲. نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP1 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) از سال ۲۰۱۳ تا ۲۱۰۰

همانطور که در شکل ۲ مشخص است تحت سناریوی پایداری SSP1، قیمت نفت متوسط در سناریوها واداشت تابشی مختلف به طور پیوسته از حدود ۱۰۰ دلار در هر بشکه در سال ۲۰۲۰ به حدود ۲۵ تا ۴۰ دلار در هر بشکه تا سال ۲۱۰۰ کاهش می‌یابد. این نشان دهنده کاهش قابل توجه تقاضا برای نفت است. تقاضای انرژی بیشتر به سمت سوخت‌های جایگزین حرکت می‌کند و تقاضای نفت کاهش می‌یابد. البته در RCPهای مختلف این کاهش قیمت شدت‌های متفاوتی دارد. به عنوان مثال در RCP برابر با ۱,۹ وات بر متر مربع شدت کاهش قیمت نفت بیشتر از سایر سناریوهاست. شکل ۳ نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP2 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP2 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) از سال ۲۰۱۳ تا ۲۱۰۰

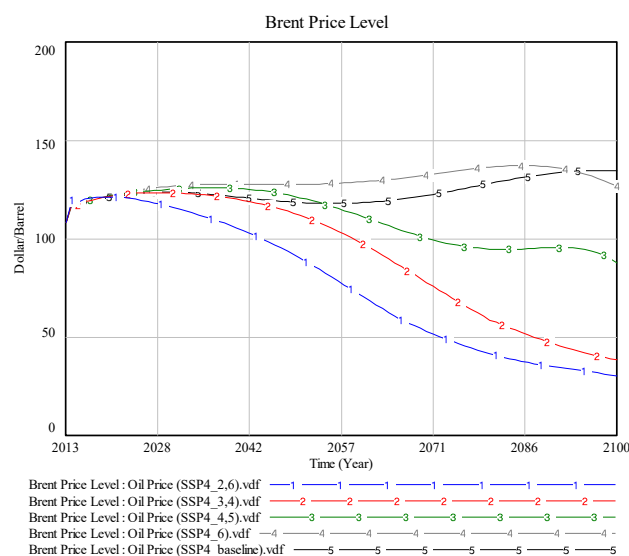
با توجه به شکل ۳ در سناریو SSP2 که بیانگر مسیر میانی در سناریوهای اقلیمی است کاهش قیمت نفت وابسته به RCPهای مختلف می تواند متفاوت باشد. در RCPهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ با توجه به اینکه سختگیری کمتری نسبت به سناریو SSP1 وجود دارد، میزان تقاضای نفت پس از طی دوره‌ای چندساله به اوج خود می‌رسد و به دنبال آن قیمت نفت نیز پس از طی دوره‌ای صعودی، روند نزولی را طی خواهد کرد. البته زمان به اوج رسیدن قیمت نفت در RCPهای مختلف متفاوت خواهد بود. شکل ۴ نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP1 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) را نشان می‌دهد. شکل ۴ نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP3 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP3 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) از سال ۲۰۱۳ تا ۲۱۰۰

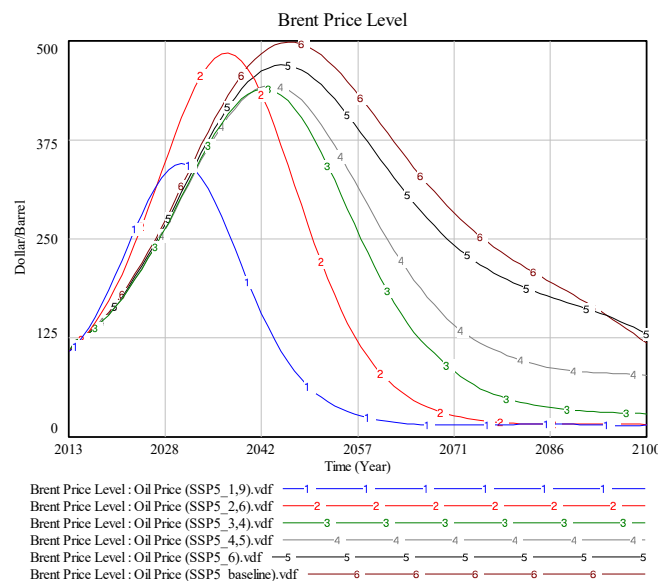


همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است در سناریوهای رقابت منطقه‌ای SSP3 منجر به پایداری تقاضای بالای نفت و قیمت‌های بیش از ۱۰۰ دلار در هر بشکه تا سال ۲۱۰۰ در برخی از RCPها می‌شود. این سناریو که بر مبنای رقابت منطقه‌ای تعریف شده است سخت‌گیری‌های کمتری مبنی بر کاهش مصرف نفت نسبت به سناریو SSP2 دارد که این امر باعث شده است سال‌های اوج تقاضای نفت قیمت بیشتری داشته باشند که این روند در RCPهای مختلف می‌تواند نرخ‌های متفاوتی داشته باشد. شکل ۵ نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP4 و در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP4 در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) از سال ۲۰۱۳ تا ۲۱۰۰

با توجه به شکل ۵ سناریوی نابرابری SSP4 منجر به نوسان قیمت نفت با روندی به طور کلی افزایشی در برخی از RCPها می‌شود که تا سال ۲۱۰۰ به حدود ۸۰ دلار در هر بشکه نیز می‌رسد. در این سناریو با توجه به شکل‌گیری نابرابری و رقابت شدیدتر نسبت به سناریو SSP3 بی‌ثباتی اقتصادی باعث می‌شود پیشرفت در سیاست‌ها اقلیمی به طور محدودتری دنبال شود. میزان تغییرات قیمت نفت نیز در RCPهای مختلف، کاهشی، ثابت و یا حتی به افزایشی باشد. در نهایت شکل ۶ نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP5 در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نتایج ارزیابی چشم انداز تغییرات قیمت نفت تحت سناریو SSP5 در سناریوهای واداشت تابشی مختلف (RCP) از سال ۲۰۱۳ تا ۲۱۰۰

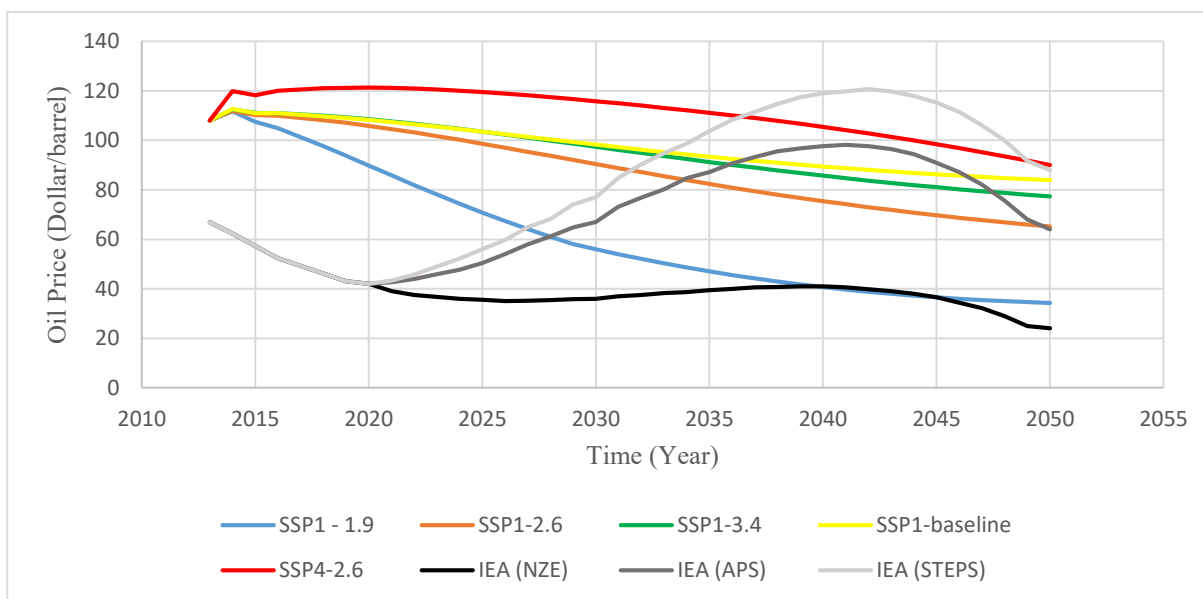
همانطور که در شکل ۶ مشخص است سناریو SSP5 که بر مبنای رشد و توسعه اقتصادی-اجتماعی بر مبنای سوخت فسیلی است، رشد قیمت‌ها را در سال‌های ابتدایی مدل‌سازی پیش‌بینی می‌کند. البته این نرخ افزایش قیمت نفت به دنبال کاهش عرضه نسبت به تقاضا پس از گذراندن نقطه اوج خود روندی به شدت کاهشی می‌یابد. در این مدل‌سازی خطر کاهش نسبت تقاضا به عرضه در سناریوهای پایداری را در مقابل کاهش عرضه و افزایش قیمت‌ها تحت سناریوهای رقابت منطقه‌ای یا سناریوهای مبتنی بر رشد اقتصادی با الویت مصرف سوخت‌های فسیلی، برجسته می‌کند. زمان اوج تقاضا برای نفت به طور قابل توجهی در سناریوها متفاوت است و در حدود سال ۲۰۲۰ در SSP1 در مقابل بعد از ۲۱۰۰ در SSP3 و SSP5 رخ می‌دهد. این پیامدهای عمیقی بر درآمدها و ثبات بودجه در کشورهای صادرکننده نفت دارد و می‌تواند اقتصاد این کشورها در بخش‌های مختلف به صورت مستقیم یا غیرمستقیم تحت تأثیر قرار دهد. به منظور اعتبار سنجی مدل، نتایج پیش‌بینی قیمت نفت برنت در سناریوهای اقلیمی IPCC را با پیش‌بینی قیمت نفت در گزارش چشم انداز آژانس بین‌المللی انرژی بررسی می‌کنیم. آژانس بین‌المللی انرژی پیش‌بینی‌ها و سناریوهایی را به منظور ایجاد بینش بهتر نسبت به اتخاذ سیاست‌های مرتبط با بخش انرژی توسعه داده است و با توجه به این سناریوها پیش‌بینی از تغییرات قیمت نفت در گزارش چشم انداز انرژی جهان ارائه کرده است. سناریوی تعهدات اعلام شده‌که بیانگر این است که تمام تعهدات اقلیمی که توسط دولت‌های سراسر جهان به‌طور کامل و به موقع انجام می‌شوند. تحت این سناریو، انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی در اواسط دهه ۲۰۳۰ به ثبت رسید، اما هنوز فاصله قابل توجهی در مقایسه با آنچه برای رسیدن به انتشار خالص صفر تا سال ۲۰۵۰ لازم است وجود دارد. سناریوهای سیاست‌های بیان شده فقط اجرای سیاست‌های خاصی که توسط قانون حمایت می‌شود و شانس قابل بالایی برای اجرا دارند را در نظر می‌گیرند. انتشار کربن دی اکسید در این سناریو به اوج خود نمی‌رسد اما با هدف دستیابی به انتشار

^۱The Announced Pledges Scenario (APS)

^۲The Stated Policies Scenario (STEPS)



صفر خالص تا سال ۲۰۵۰ سازگار نیست. سناریو انتشارات خالص صفر تا سال ۲۰۵۰ مسیری سخت اما قابل دستیابی را برای صفر کردن خالص انتشارات تا سال ۲۰۵۰ بخش انرژی ارائه می‌دهد. این امر مستلزم استقرار فوری و گسترده همه فناوری های انرژی پاک و کارآمد موجود است. تا سال ۲۰۵۰، نزدیک به ۹۰ درصد از برق توسط انرژی های تجدیدپذیر تامین می شود که بادی و خورشیدی تقریباً ۷۰ درصد را تشکیل می دهند. این سناریو همچنین بر تغییرات قابل توجهی در شیوه زندگی مبتنی بر کاهش تقاضای انرژی وابسته است. شکل ۷ مقایسه چشم انداز تغییرات قیمت نفت در سناریوهای آژانس بین‌المللی انرژی و سناریوهای اقلیمی IPCC را تا سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد.



همانطور که در شکل ۷ مشخص است تغییرات قیمت نفت در برخی از سناریوهای اقلیمی IPCC در RCP های مختلف و سناریوهای آژانس بین‌المللی انرژی به یکدیگر نزدیک هستند. البته با توجه به این که آژانس بین‌المللی انرژی قیمت نفت را بر اساس میانگین قیمت واردکنندگان نفت ارزیابی کرده است و همچنین به دلیل تعریف سناریوها، رویکردها و سال شروع مدل‌سازی بسیار متفاوت در مدل آژانس بین‌المللی انرژی، تفاوت‌هایی بین پیش‌بینی قیمت نفت توسط آژانس و نتایج مدل‌سازی پژوهش وجود دارد. با این حال در بسیاری از سناریوها روندی مشابه مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه در سناریو خالص انتشارات صفر روندی مشابه سناریو SSP1-1.9 که سناریویی بسیار سخت‌گیرانه جهت کاهش نقضای سوخت‌های فسیلی است را دنبال می‌کند و قیمت نفت در سال ۲۰۵۰ در این دو مدل بسیار به هم نزدیک است. همچنین سناریو STEPS که بیشتر بیانگر این موضوع است که کشورها به تمام تعهدات اقلیمی خود عمل نکنند قیمت‌های مشابه با سناریو SSP4-2.6 را در سال ۲۰۵۰ گزارش می‌دهد. البته همانطور که اشاره شده به دلیل ماهیت متفاوت تعریف این سناریوها و روش‌های مدل‌سازی، نتایج تغییرات قیمت، تفاوت‌هایی نیز

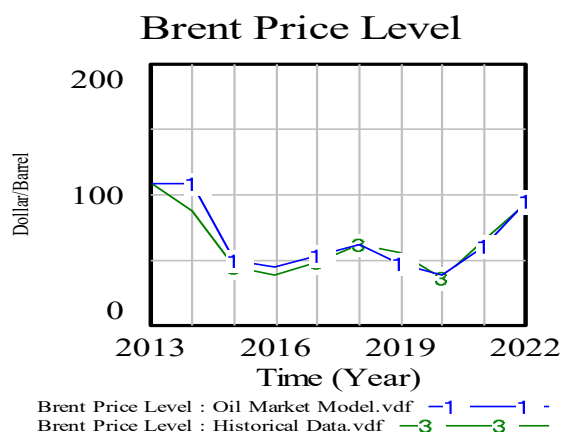
¹The Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)



با یکدیگر دارند.

4-1- آزمون رفتار گذشته

مدل قیمت نفت توسعه داده شده در این پژوهش بر مبنای بازتولید رفتار تعادلی قیمت بر پایه عرضه و تقاضای نفت است. قیمت واقعی نفت می‌تواند در با توجه به رخدادهای ژئولیتیکی نوسان‌های مختلفی را تجربه کند. در این مدل پارامترهایی برای ارزیابی و تعیین تأثیرات این رویدادها در نظر گرفته شده است. با انجام کالیبراسیون مدل و تنظیم این پارامترها، مدل توانایی تولید رفتار گذشته را نیز دارد. شکل ۷ مقایسه بین نتایج مدل و داده‌های تاریخی قیمت نفت نمایش داده شده است.



شکل ۷. مقایسه بین نتایج مدل و داده‌های تاریخی قیمت نفت

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است مدل موفق شده است که رفتار تاریخی قیمت نفت را بازتولید کند. این نکته حائز اهمیت است قیمت نفت با توجه به عوامل مختلف، تغییرات زیادی داشته باشد. به عنوان نمونه بعد از سال ۲۰۱۴ به دلایلی مانند رشد تولید نفت شل آمریکا، تغییر سیاست اوپک از حفظ قیمت به سمت حفظ سهم بازار و کندی رشد اقتصادی، قیمت نفت به دلیل مازاد عرضه کاهش زیادی پیدا کرد (Prest, 2018). در این پژوهش سوال اصلی، بررسی تغییرات قیمت نفت با تمرکز بر تأثیرات سناریوهای اقلیمی بر آن است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این رویکرد مدل‌سازی پویایی سیستم، روابط متقابل پیچیده بین محرک‌های عرضه و تقاضای نفت، ژئولیتیک، سیاست‌های آب و هوایی و رشد اقتصادی را ادغام می‌کند. این مدل چارچوبی مفید برای ترسیم قراردادهای آتی بازار نفت تحت مفروضات مختلف ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی می‌تواند استراتژی‌های صنعت، تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و بحث‌های سیاست انرژی را با ترسیم چشم‌انداز عدم قطعیت‌های پیرامون پیش‌بینی قیمت نفت آگاه



کند. توسعه بیشتر مدل می‌تواند جایگزین‌های دیگری مانند گاز طبیعی و وسایل نقلیه الکتریکی، تفکیک منطقه‌ایو جنبه‌های نظری بازی رفتار اوپک را در بر بگیرد.

نتایج بر ضرورت تنوع بخشیدن به اقتصاد و درآمدهای دولت برای کشورهای وابسته به نفت تاکید می‌کند. اتکای بیش از حد به نفت، کشورها را در معرض نوسانات درآمدهای نفتی قرار می‌دهد. برنامه ریزی اقتصادی استراتژیک باید طیف وسیعی از معاملات آتی قیمت نفت را تحت فشار قرار دهد.

به طور کلی، این مدل‌سازی تأثیر متقابل پیچیده بین رشد اقتصادی، سیاست‌های اقلیمی، فناوری‌های انرژی و ژئوپلیتیک را در شکل‌دهی مسیرهای بازار نفت نشان می‌دهد. قیمت‌های کوتاه مدت راهنمایی محدودی در مورد روندهای بلند مدت ارائه می‌دهند. مدل‌های دینامیک سیستم مانند این می‌تواند به اطلاع‌رسانی استراتژی‌های قوی و آگاه از ریسک توسط بازیگران بازار نفت در بخش دولتی و خصوصی کمک کند

۶- منابع

- !!!). INVALID CITATION .(!!!
- Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hemous, D., Martin, R., & Van Reenen, J. (2016). Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, 124(1), 1-51 .
- Bashiri Behmiri, N., & Pires Manso, J. R. (2013). Crude oil price forecasting techniques: a comprehensive review of literature. *Available at SSRN 2275428* .
- Bauer, N., Keller, D. P., Garbe, J., Karstens, K., Piontek, F., von Bloh, W., Thiery, W., Zeitz, M., Mengel, M., & Streffer, J. (2023). Exploring risks and benefits of overshooting a 1.5° C carbon budget over space and time. *Environmental Research Letters*, 18(5), 054015 .
- Baumeister, C., & Kilian, L. (2016). Forty years of oil price fluctuations: Why the price of oil may still surprise us. *Journal of Economic Perspectives*, 30(1), 139-160 .
- Behar, A., & Ritz, R. A. (2017). OPEC vs US shale: Analyzing the shift to a market-share strategy. *Energy Economics*, 63, 185-198 .
- Csereklyei, Z., Rubio-Varas, M. d. M & , Stern, D. I. (2016). Energy and economic growth: the stylized facts. *The Energy Journal*, 37 .(۲)
- de la Fe López-Domínguez, M., Levy-Carciente, S., Contreras, J., & Paiva-Mata, P. C. (2011). BEHAVIOR OF THE GLOBAL OIL MARKET (1995-2008) AS DESCRIBED BY A SYSTEM DYNAMICS MODEL. *Análise Econômica*, 29 .(۵۶)
- Fagan, M. (2020). Up the Down Staircase: What History Teaches Us about Oil Demand after a Crisis. *Available at SSRN 3592443* .
- Forrester, J. W. (1968). Industrial dynamics—after the first decade. *Management science*, 14(7), 398-415 .
- Greenman, J. (1994). The price of oil: A system dynamic approach. 12th International System Dynamics Conference. Sterling, Scotland: System Dynamics Society ,
- Hamilton, J. D. (2014). *The changing face of world oil markets* .National Bureau of Economic Research Cambridge, MA, USA .
- Harstad, B. (2012). Climate contracts: A game of emissions, investments, negotiations, and renegotiations. *Review of Economic Studies*, 79(4), 1527-1557 .
- Hosseini, S. H., Shakouri G, H., & Peighami ,A. (2016). A conceptual framework for the oil market dynamics: A systems approach. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(2), 171-198 .



- Hosseini, S. H., Shakouri, H., & Kazemi, A. (2021). Oil price future regarding unconventional oil production and its near-term deployment: A system dynamics approach. *Energy*, 222, 119878 .
- Huntington, H., Al-Fattah, S., Huang, Z., Gucwa, M., & Nouri, A. (2013). Oil markets and price movements: A survey of models .
- IEA. (2022). World energy outlook 2022 .
- Jaccard, M. (200 .). Hybrid energy-economy models and endogenous technological change. In *Energy and environment* (pp. 81-109). Springer .
- Kikstra, J. S., Nicholls, Z. R., Smith, C. J., Lewis, J., Lamboll, R. D., Byers, E., Sandstad, M., Meinshausen, M., Gidden, M. J., & Rogelj, J. (2022). The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures. *Geoscientific Model Development*, 15(24), 9075-9109 .
- Lee, J.-U. (2021). IEA, World Energy Outlook 2020. *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, 7(1), 25-30 .
- Li, Q. (2015). *Analysis of oil market fundamental using a system dynamics approach* Massachusetts Institute of Technology .[
- Linn, J., Muehlenbachs, L., & Wang, Y. (2014). How do natural gas prices affect electricity consumers and the environment? *Resources for the Future Discussion paper* .(۱۹-۱۴)
- Mashayekhi, A. (2001). Dynamics of oil price in the world market. 19th International System Dynamics Conference ,
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S .C., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D. J., & Allen, M. R. (2009). Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 C. *Nature*, 458(7242), 1158-1162 .
- Mercure, J.-F., Pollitt, H., Viñuales, J. E., Edwards, N. R., Holden, P. B., Chewpreecha ,U., Salas, P., Sognaes, I., Lam, A., & Knobloch, F. (2018). Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets. *Nature Climate Change*, 8(7), 588-593 .
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegria, A., Craig ,M., Langsdorf, S., Löschke, S., & Möller, V. (2022). IPCC, 2022: Summary for policymakers .
- Prest, B. C. (2018). Explanations for the 2014 oil price decline: Supply or demand? *Energy Economics*, 74, 63-75 .
- Rafieisakhaei, M., Barazandeh, B., & Afra, S. (20 .). A system dynamics approach on oil market modeling with statistical data analysis. SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference ,
- Rafieisakhaei, M., Barazandeh, B., Moosavi, A., Fekri, M., & Bastani, K. (2016). Supply and demand dynamics of the oil market: A system dynamics approach. The 34rd International Conference of the System Dynamics Society ,
- Rafieisakhaei, M., Barazandeh, B., & Tarrahi, M. (2016). Analysis of supply and demand dynamics to predict oil market trends: A case study of 2015 price data. SPE/IAEE Hydrocarbon economics and evaluation symposium ,
- Rafiq, S., Sgro, P., & Apergis, N. (2016). Asymmetric oil shocks and external balances of major oil exporting and importing countries. *Energy Economics*, 56, 42-50 .
- Riahi, K., Van Vuuren, D .P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., & Fricko, O. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168 .
- Samii, M., & Teekasap, P. (2010). Energy policy and oil prices: system dynamics approach to modeling oil market .
- Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world .
- Xiong, T., Bao, Y., & Hu, Z .(۲۰۱۳). Beyond one-step-ahead forecasting: evaluation of alternative multi-step-ahead forecasting models for crude oil prices. *Energy Economics*, 40, 405-415 .



3rd
International Conference on

Systems Thinking in Practice

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



۷- پیوست

روابط ریاضی مدل پایه ارزیابی چشم انداز تغییرات نفت

Brent Price Adjustment time=

0.5

Units: Year

Brent Price Level= INTEG (

Change on Brent Price,

108)

Units: Dollar/Barrel

Change on Brent Price=

Brent Price Level*(Effect of Inventory Coverage on Brent Price-1)/Brent Price Adjustment time

Units: Dollar/(Barrel*Year)

China Demand=

China Initial Demand*Effect of GDP Growth on China Demand*Effect of Brent Price on China Demand

*China Demand Factor

Units: Barrel/Year

China Demand Factor=

1

Units: Dmnl

China GDP Growth=

7.7

Units: Dmnl

China Initial Demand=

3.92594e+09

Units: Barrel/Year

Consumption=

"Oil Supply-Demand Disbalance"/Demand Adjustment Time+Total Demand

Units: Barrel/Year

Demand Adjustment Time=

1

Units: Year

Effect of Brent Price on China Demand=

Table of Effect of Brent Price on China Demand(Brent Price Level)

Units: Dmnl

Effect of Brent Price on US Conventional Oil Production=

IF THEN ELSE(Brent Price Level/US Conventional Oil Breakeven Price<1, 0 ,



3rd
International Conference on

Systems Thinking in Practice

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



Table of Effect of Brent Price on US Conventional Oil Production(Brent Price Level /US Conventional Oil Breakeven Price))

Units: Dmnl

Effect of Brent Price on US Unconventional Oil Production=

IF THEN ELSE(Brent Price Level/US Unconventional Oil Breakeven Price<1, 0 , Table of Effect of Brent Price on US Unconventional Oil Production(Brent Price Level /US Unconventional Oil Breakeven Price))

Units: Dmnl

Effect of GDP Growth on China Demand=

Table of Effect of GDP Growth on China Demand(China GDP Growth)

Units: Dmnl

Effect of Inventory Coverage on Brent Price=

Table of Effect of Inventory Coverage on Brent Price(Inventory Coverage)

Units: Dmnl

FINAL TIME = 2022

Units: Year

The final time for the simulation.

initial stock point for oil supply=

0

Units: Barrel

INITIAL TIME = 2013

Units: Year

The initial time for the simulation.

Initial US Conventional Oil Production Rate=

1.825e+09

Units: Barrel/Year

Initial US Oil Consumption Rate=

6.89375e+09

Units: Barrel/Year

Inventory Coverage=

"Oil Supply-Demand Disbalance"/Consumption

Units: Year

"Non-OPEC Oil Production Rate"=

"Table of Effect of Brent of Price on Non-OPEC Production Rate"(Brent Price Level)*"Non-OPEC Initial Production Rate"*"Non-OPEC Production Factor"

Units: Barrel/Year

"Oil Supply-Demand Disbalance"= INTEG (

"Non-OPEC Oil Production Rate"+OPEC Production Rate+ROW Production Rate-Consumption

,

initial stock point for oil supply)

Units: Barrel/Year

Effect of Brent Price on ROW Demand=

Table of Effect of Brent Price on ROW Demand(Brent Price Level)

Units: Dmnl



3rd
International Conference on

Systems Thinking in Practice

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



Effect of GDP Growth on ROW Demand=

Table of Effect of GDP Growth on ROW Demand(ROW GDP Growth)

Units: Dmnl

Initial US Unconventional Oil Production=

1.82609e+09

Units: Barrel/Year

"Non-OPEC Initial Production Rate"=

9.51153e+09

Units: Barrel/Year

"Non-OPEC Production Factor"=

1

Units: Dmnl

OPEC Initial Production Rate=

1.34426e+10

Units: Barrel/Year

OPEC Production Factor=

1

Units: Dmnl

OPEC Production Rate=

Table of Effect of Brent Price on OPEC Production(Brent Price Level)*OPEC Initial Production Rate

*OPEC Production Factor

Units: Barrel/Year

ROW Demand=

ROW Initial Demand*Effect of Brent Price on ROW Demand*Effect of GDP Growth on ROW Demand

*ROW Demand Factor

Units: Barrel/Year

ROW Demand Factor=

1

Units: Dmnl

ROW GDP Growth=

2

Units: Dmnl

ROW Initial Demand=

57111*365*1000

Units: Barrel/Year

ROW Initial Production Rate=

13863*365*1000

Units: Barrel/Year

ROW Production Factor=

1

Units: Dmnl

ROW Production Rate=



Systems Thinking in Practice

3rd
International Conference on

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



Table of Effect of Brent Price on ROW Production Rate(Brent Price Level)*ROW Initial Production Rate

*ROW Production Factor

Units: Barrel/Year

SAVEPER =

TIME STEP

Units: Year [0,?]

The frequency with which output is stored.

Table of Effect of Brent Price on OPEC Production(

[(10,0)-(250,1.1)],(10,0.1),(20,0.43),(30,0.7),(50,0.85),(60,0.92),(80,0.95),
(108,1),(120,1.03),(130,1.05),(150,1.08),(250,1.1))

Units: Dmnl

"Table of Effect of Brent of Price on Non-OPEC Production Rate"

[(10,0)-(250,1.01)],(10,0.2),(20,0.6),(30,0.93),(50,0.97),(60,0.98),(80,0.99),
(108,1),(120,1.005),(130,1.01),(150,1.01),(250,1.01))

Units: Dmnl

Table of Effect of Brent Price on China Demand(

[(20,0.49)-(200,3.64)],(20,3.64),(40,2.02),(60,1.48),(80,1.21),(90,1.12),(
108,1),(120,0.94),(140,0.82),(160,0.71),(180,0.6),(200,0.49))

Units: Dmnl

Table of Effect of Brent Price on ROW Demand(

[(20,0.49)-(200,3.64)],(20,3.64),(40,2.02),(60,1.48),(80,1.21),(90,1.12),(
108,1),(120,0.94),(140,0.82),(160,0.71),(180,0.6),(200,0.49))

Units: Dmnl

Table of Effect of Brent Price on ROW Production Rate(

[(10,0.2)-(250,1.05)],(10,0.2),(20,0.5),(30,0.77),(50,0.87),(60,0.93),(80,
0.98),(108,1),(120,1.01),(130,1.02),(150,1.03),(250,1.05))

Units: Dmnl

Table of Effect of Brent Price on US Conventional Oil Production(

[(1,0.5)-(10,4.5)],(1,0.5),(1.1,0.55),(1.2,0.6),(1.3,0.7),(1.5,0.8),(1.9,0.95),
(2.16,1),(3,1.3),(5,2),(8,3.5),(10,4.5))

Units: Dmnl

Table of Effect of Brent Price on US Unconventional Oil Production(

[(1,0)-(10,6)],(1,0.3),(1.1,0.4),(1.2,0.5),(1.3,0.6),(1.5,0.75),(1.9,0.95),
(2.16,1),(3,1.3),(5,2.5),(8,4.5),(10,6))

Units: Dmnl

Table of Effect of GDP Growth on China Demand(

[(0,0)-(20,2.6)],(0,0),(1,0.13),(2,0.26),(3,0.39),(4,0.52),(5,0.65),(6,0.78),
(7,1),(8,1.04),(10,1.3),(20,2.6))

Units: Dmnl

Table of Effect of GDP Growth on ROW Demand(

[(0,0)-(10,5)],(0,0),(0.1,0.05),(0.2,0.1),(0.5,0.25),(0.8,0.4),(1,0.5),(1.5,
0.78),(2,1),(4,2),(6,3),(10,5))

Units: Dmnl

Table of Effect of Inventory Coverage on Brent Price(



3rd
International Conference on

Systems Thinking in Practice

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



$[(-50,0)-(-50,30)],(-50,30),(-35.336,25.8571),(-23.3198,21.1429),(-14.1548,15.1429),(-10.2851,11),(-6.41548,7.71428),(-2.74949,3.71428),(-1,1.8),(0,1),(1,0.2),(5,0.15),(10,0.1),(15,0.05),(20,0.01),(50,0))$

Units: Dmnl

TIME STEP = 1

Units: Year [0,?]

The time step for the simulation.

Total Demand=

(US Demand+China Demand+ROW Demand)

Units: Barrel/Year

Total Production Rate=

"Non-OPEC Oil Production Rate"+OPEC Production Rate+ROW Production Rate

Units: Barrel/Year

US Conventional Oil Breakeven Price=

50

Units: Dollar/Barrel

US Conventional Oil Production Rate=

Initial US Conventional Oil Production Rate*Effect of Brent Price on US Conventional Oil Production

*US Conventional Production Factor

Units: Barrel/Year

US Conventional Production Factor=

1

Units: Dmnl

US Demand=

IF THEN ELSE(US Unconventional Oil Production rate+US Conventional Oil Production Rate

-US Oil consumption Rate<0, ABS(US Unconventional Oil Production rate+US Conventional Oil Production Rate

-US Oil consumption Rate) , 0)

Units: Barrel/Year

US Oil Consumption Factor=

1

Units: Dmnl

US Oil consumption Rate=

US Oil Consumption Factor*Initial US Oil Consumption Rate

Units: Barrel/Year

US Oil Inventory= INTEG (

US Conventional Oil Production Rate+US Unconventional Oil Production rate-

US Oil consumption Rate,

0)

Units: Barrel

US Unconventional Oil Breakeven Price=

50

Units: Dollar/Barrel

US Unconventional Oil Production rate=



Systems Thinking in Practice

3rd
International Conference on

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



Initial US Unconventional Oil Production*Effect of Brent Price on US Unconventional Oil Production
*US Unconventional Production Factor
Units: Barrel/Year

US Unconventional Production Factor=
1
Units: Dmnl



3rd
International Conference on

Systems Thinking in Practice

سومین کنفرانس بین المللی

تفکر سیستمی در عمل



Estimating the potential of changes in oil price in IPCC climate scenarios: A system dynamic Approach

Kian Ebtekar¹

Master Student at Energy Engineering Department, Sharif University of Technology

Hossein Khajepour^{2*}

assistant professor at Energy Engineering Department, Sharif University of Technology

Abbas Maleki³

Professor at Energy Engineering Department, Sharif University of Technology

Abstract

This paper uses the systems dynamics approach to model the changes in oil price prospects in the framework of the shared socio-economic pathways (SSP) climate scenarios proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) until 2100. This theoretical structure connects the primary feedback mechanisms: supply, demand, and price. The determining factors of most tremendous significance in the supply sector are OPEC and non-OPEC production levels. The production targets set by OPEC are indicative of its market management policies and are significantly influenced by the actions of its key members. The oil price indicates a cyclical relationship with the oil supply of significant players. The determination of global oil demand in the demand section is based on various climate scenarios presented in the IPCC report. The fluctuation of Brent oil prices over time can be linked to the disparity between supply and demand. According to the model outcomes, the price of oil will be projected to decline to \$20 per barrel by the year 2100 if the sustainability policies outlined in the SSP1 framework are implemented. However, in the alternative scenarios of SSP3, characterized by regional competition, and SSP4, characterized by heightened inequality and competition, oil prices are anticipated to rise to \$100 per barrel. In the context of the SSP5 scenario, which posits a path of economic and social development reliant on the consumption of fossil fuels, the price of oil displays a declining pattern after a period of relatively higher prices. The peak oil prices within the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) scenarios exhibit significant variation based on their Representative Concentration Pathways (RCPs).

Keywords: system Dynamics, oil price, climatic change scenarios, demand, supply

¹kian.ebtekar@energy.sharif.edu

²khajepour@sharif.edu

³maleki@sharif.edu