مروری بر سیاست تجارت انتشار با استفاده از رویکرد پویایی سیستم

سحر اخگر[1]
دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

توجه به گرمایش جهانی و افزایش آلودگی محیط‌زیست، پروتکل کیوتو توسط 37 کشور برای تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو در یک سطح منعقد شده است. بر طبق این پیمان دولت‌ها متعهد شدند که فعالیت‌های تاثیرگذار بر محیط‌زیست را کنترل کنند. به همین دلیل سیاست تجارت انتشار به عنوان یکی از راه‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مطرح شد. پژوهش‌های مختلفی در این حوزه انجام شده است که از روش‌های مختلف از جمله روش‌های اقتصادی، ریاضی، برنامه‌ریزی ریاضی، شبیه‌سازی و غیره برای تحلیل این سیاست استفاده کرده‌اند. به دلیل ماهیت سیاست تجارت انتشار که یک سیستم پیچیده‌ی پویا است، یکی از روش‌های تحلیل و شبیه‌سازی این سیاست، رویکرد پویایی سیستم است که در ادبیات هم به آن پرداخته شده است. این مقاله به مرور تمام مقالاتی که در سال‌های 2009 تا 2021 این سیاست را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم بررسی کرده‌اند، پرداخته است. از بررسی این مقالات می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد پویایی سیستم برای تحلیل اثر این سیاست بر روی شرکت‌ها و زنجیره‌های تامین مختلف بسیار مفید است.

واژگان کلیدی: ، انتشار گازهای گلخانه‌ای، پویایی سیستم، سیاست تجارت انتشار

[1] کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، saharakhgar70@yahoo.com

1- مقدمه

نرخ افزایش میانگین دمای کره زمین نشان‌دهنده تلاش روزافزون لازم برای کنترل آلودگی‌ها است. در غیر این صورت، تأثیرات آن می‌تواند فراتر از رفاه اقتصادی به هر جنبه‌ای از زندگی انسان گسترش یابد (رفیعی‌سخایی و برازنده، 2017a). به همین دلیل، اقدامات و مقررات مثبتی از سوی دولت‌ها پیشنهاد شده و قبل از اینکه وضعیت در آینده نزدیک به وضعیت شدیدی برسد، عملی می‌شود (لی، هاسیس و دووبیچوک، 2016). یک راه حل برای کاهش سرعت تغییرات اقلیمی، تنظیم انتشار کربن توسط صنایع وابسته به سوخت فسیلی و تغییر استفاده از سوخت‌های کربن سنگین به سمت منابع پاک تجدیدپذیر است (رفیعی‌سخایی و برازنده، 2016). به همین دلیل پروتکل کیوتو مکانیسم‌های انعطاف‌پذیر مختلفی را معرفی کرده است: طرح تجارت انتشار (ETS) - مکانیسم توسعه پاک (CDM) و اجرای مشترک (JI) (لی و هاسیس، 2016). این طرح‌ها انگیزه‌های اقتصادی را برای شرکت‌های تولیدی فراهم می‌کنند تا از انرژی پاک یا فناوری‌های سبز در فرآیندهای تولید خود استفاده کنند، که اغلب منابع اصلی انتشار هستند (گنگ و ژو، 2013). در میان مقررات کربن، قوانین مالیات کربن و سیاست تجارت انتشار بیشتر مورد پذیرش و مطالعه قرار گرفته است (وانگ، ژآوو و هرتی، 2018).

پروتکل کیوتو اولین پروتکل از نوع خود در سطح بین المللی است که تجارت انتشار را معرفی می‌کند (چوالییر، 2015)، که از طریق آن کشورهای مختلف می‌توانند برای دستیابی به اهداف کاهش انتشار و کاهش هزینه‌ها همکاری کنند. سیاست یا سیستم تجارت انتشار یک مکانیسم مهم مبتنی بر بازار برای تشویق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) با ارائه قیمت برای این اثرات خارجی در نظر گرفته می‌شوند (دیاز-رینی و تولوچ، 2018). شبیه‌سازی تجارت بین المللی انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان به عنوان ابزاری برای درک و توضیح مفاهیم مجوزهای انتشار برای صنعتگران، سیاست‌گذاران و دانشجویان انجام شده است. این شبیه‌سازی‌ها به ما اجازه می‌دهند تا نحوه‌ی تکامل بازار را درک کنیم (میزوتا و یاماگاتا، 2005). مدل پویایی سیستم به عنوان یک ابزار شبیه‌سازی می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان سازمانی کمک کند تا تأثیر عوامل مختلف (داخلی یا خارجی) را تحت سیاست تجارت انتشار ارزیابی کنند و به آنها در طراحی، مقایسه و انتخاب استراتژی‌های مختلف کمک کند (ژو، پان، چن، و لی، 2016). همچنین پویایی سیستم به عنوان یک ابزار ترسیم، رفتار پویای ذینفعان مختلف در یک بخش را تسهیل می‌کند و به ارزیابی نحوه پاسخ بالقوه این ذینفعان به سیاست‌های مختلف کمک می‌کند (گوپتا، باندیوپادیای و سینگ، 2019). به همین دلیل این مقاله به بررسی پژوهش‌هایی که سیاست تجارت انتشار را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم بررسی کرده‌اند، پرداخته است.

1.1 تجارت انتشار

سیاست تجارت انتشار بر اساس اصول «سقف و تجارت» کار می‌کند که شامل تعیین یک محدودیت کمی، روی مقدار کل گازهای گلخانه‌ای معینی است که توسط کارخانه‌ها، نیروگاه‌ها و سایر تاسیسات منتشر می‌شود (لی و هاسیس، 2016). قانون‌گذار «سقف» را تعیین می‌کند (چوالییر، 2015)، سقف انتشار به مرور زمان کاهش می‌یابد تا انتشار کل کاهش یابد. یک مجوز کربن حق انتشار یک تن کربن‌دی‌اکسید (CO_2) یا معادل آن گازهای گلخانه‌ای را می‌دهد. «تجارت» بازاری را برای مجوزهای کربن ایجاد می‌کند. نهادهای تحت تجارت انتشار مجاز به مبادله مجوزهای انتشار از طریق بازار کربن با قیمت کربن معین در صورت نیاز هستند. در پایان دوره معین، واحدهایی که کمتر از

مجوزهای تخصیص داده شده خود، منتشر می‌کنند، می‌توانند مجوزهای اضافی را برای تامین نیازهای آتی خود ذخیره کنند یا آنها را به سایر نهادهایی که فاقد مجوز هستند، بفروشند. همچنین واحدهایی که انتشار تجمعی آنها بیش از مجوزهای تخصیص یافته به آن‌ها است، می‌توانند مجوزهایی را از بازار کربن خریداری کنند تا انتشار بیش از حد خود را برآورده کنند (لی و هاسیس، 2017). قیمت مجوزهای انتشار بر اساس عرضه و تقاضای اعضای بازار و سطح کمبود ایجاد شده توسط تخصیص اولیه تعیین می‌شود (چوالییر، 2015). هرچه عرضه مجوز انتشار بیشتر باشد، قیمت کربن کمتر خواهد بود. از سوی دیگر، تقاضای بیش از حد برای مجوز انتشار منجر به افزایش قیمت کربن خواهد شد (چن، وانگ و وو، 2013). به عبارت دیگر، نهادی که هزینه کاهش انتشار واحد آن، کمتر از قیمت واحد کربن است، از کاهش انتشار خود و سپس فروش اضافی آن به دیگران سود می‌برد. بالعکس، نهادهایی که هزینه کاهش انتشار واحد آن‌ها، بالاتر از قیمت واحد کربن است، با گزینه اقتصادی‌تر، یعنی خرید مجوز کربن از بازار کربن مواجه هستند. در هر صورت هر دو نوع شرکت از این سیاست سود می‌برند. در نتیجه‌ی این سیاست، شرکت‌ها اکنون متوجه شده‌اند که باید برای انتشار گازهای گلخانه‌ای خود هزینه بپردازند و این در استراتژی‌های تجاری معمول آنها اتخاذ خواهد شد (لی و همکاران، 2016). نهادهای ذکر شده می‌توانند کشور، شرکت، منطقه، بخش صنعت یا هر خوشه تجاری در اینجا باشند. هنگامی که نهادها مناطق یا بخش‌های مختلف در یک کشور هستند، سیاست تجارت انتشار، ملی است. تجارت انتشار در حال حاضر به طور گسترده توسط کشورهای مختلف به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها برای تحقق اهداف کاهش انتشار استفاده می‌شود، به عنوان مثال، اتحادیه اروپا (EU)، استرالیا، کانادا، نروژ، چین، ژاپن و غیره. در میان آنها، اتحادیه اروپا (EU ETS)، اولین و همچنان بزرگترین سیستم چند کشوری و چندبخشی برای تجارت مجوزهای انتشار است که همه 30 کشور را پوشش می‌دهد و همچنین سایر کشورهای غیر اتحادیه اروپا، ایسلند، لیختن اشتاین، نروژ و کرواسی. تاکنون، بیش از 11000 تسهیلات تحت پوشش سیاست تجارت انتشار اتحادیه اروپا گنجانده شده است (هی، ژانگ، ژو و بیان، 2015؛ لی و هاسیس، 2017). بازارهای کربن که در سراسر اتحادیه اروپا (EU) اجرا می‌شوند، نتایج موفقیت‌آمیزی در کاهش انتشار کربن نشان داده‌اند که توسط داده‌های اتحادیه اروپا تأیید شده است رفیعی سخایی و برازنده، a2017). لازم به ذکر است که قیمت کربن بسته به شرایط بازار، در ماه‌های اخیر در بازار اروپا به قیمت 10 تا 30 یورو به ازای هر تن کربن‌دی‌اکسید معامله شده است. در استرالیا قیمت ملی کربن، 23 دلار استرالیا (11.78 یورو به ازای هر تن کربن‌دی‌اکسید) اعلام شده است (هو و پیکل، 2011).

1.2 رویکرد پویایی سیستم

بر اساس اصل تفکر سیستمی و نظریه کنترل بازخورد، مدل پویایی سیستم یک روش شبیه‌سازی سیستماتیک و پویا برای تحلیل پیچیدگی‌های پویا و رفتارهای متغیر زمان در سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی است (لیو و شیائو، 2018). پویایی سیستم در مدل‌سازی رفتار غیرخطی کارآمد است و به مانور داده‌های تاریخی به شیوه‌ای مناسب کمک می‌کند. در واقع، پویایی سیستم به اعتبارسنجی یک مدل کمک می‌کند و همچنین پیش‌بینی تأثیر مدل را در آینده تسهیل می‌کند. علاوه بر این، می‌تواند حساسیت مدل تعریف‌شده را بررسی کند و در مقایسه با سایر مدل‌های آماری، پیش‌بینی قابل اعتمادتری ایجاد کند (گوپتا و همکاران، 2019). تئوری پویایی سیستم در زمینه‌های مختلفی مانند برنامه‌ریزی و طراحی سیاست، رفتار اقتصادی، مدیریت و خط‌مشی عمومی، مدلسازی بیولوژیکی و پزشکی، انرژی و محیط‌زیست، توسعه نظریه در علوم طبیعی و اجتماعی، تصمیم‌گیری پویا، مهندسی نرم‌افزار و مدیریت

زنجیره تامین کاربردهای زیادی دارد (ساودرا ام، دی اُ. فونتز و ام. فریرس، 2018). در میان رویکردهای کمی که در مدل‌سازی مسائل زیست محیطی به کار می‌رود، پویایی سیستم (SD) یکی از روش‌های مناسب برای پیش‌بینی رفتار آینده مدل‌های پیچیده است. در دنیای واقعی، سیستم‌ها اغلب پیچیده هستند و دارای درجه بالایی از بازخورد/واکنش/ارتباط بین اجزای خود هستند (جوکار و مختار، 2018). سیستم سیاست تجارت انتشار یک سیستم پویای پیچیده با تعدادی از عوامل تاثیرگذار است که در میان آنها اثرات غیرخطی و تاخیر زمانی در بین عوامل مختلف وجود دارد و این، تحلیل سیستم تجارت انتشار را دشوار می‌کند. بنابراین تجزیه و تحلیل تعامل بین عوامل مختلف تحت مکانیسم سیاست تجارت انتشار از دیدگاه سیستم ضروری است. روش پویایی سیستم به طور گسترده در مطالعات مختلف سیاست‌های زیست‌محیطی استفاده می‌شوند زیرا دارای توانایی تحلیلی قدرتمندی است که می‌تواند ویژگی‌های غیرخطی سیستم تجارت انتشار را منعکس کند (فنگ، تیان، لیو، فو، و سان، 2018؛ پان و همکاران، 2021).

2- مرور ادبیات و دسته‌بندی ادبیات سیاست تجارت انتشار با استفاده از رویکرد پویایی سیستم

برخلاف تمام مزایایی که برای روش پویایی سیستم و کاربرد آن در تحلیل سیاست تجارت انتشار ذکر شد، پژوهش‌هایی که در این حوزه انجام شده است بسیار محدود است و اکثر مقالات سیاست تجارت انتشار را با استفاده از مدل‌های ریاضی، برنامه‌ریزی ریاضی و اقتصادی مطالعه کرده‌اند برای مثال (گنگ و ژو، 2013)، (ذاکری، دهقانیان، فهیم‌نیا و سارکیس، 2015)، (گارسیا آلوارادو، پاکت، چابانه و آمودئو، 2017)، (سانگ، لیانگ، لیو، و سانگ، 2018)، (وانگ و همکاران، 2018)، تجارت انتشار را با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی بررسی کرده‌اند. همچنین (چن و همکاران، 2013)، (هونگ، چو، ژانگ و یو، 2017)، (کائو، ژو، وو و ژانگ، 2017)، (دیاز-رینی، تولوخ، 2018)، (جیانگ، ژو، وی، چوالیر و هی، 2018)، (لین و جیا 2019)، این سیاست را با استفاده از مدل‌های اقتصادی مورد مطالعه قرار داده‌اند.

با توجه به مطالب ذکر شده، تمرکز این مقاله بر روی مرور مقالاتی است که سیاست تجارت انتشار را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم در بین سال‌های 2009 تا 2021 بررسی کرده‌اند. جستجوی مقالات در این پژوهش به سه روش انجام شده است: 1) جستجو با استفاده از کلید واژه‌های emission trading and system dynamics، cap and trade and system dynamics و carbon trading and system dynamics در پایگاه‌های https://scholar.google.com، https://www.sciencedirect.com، https://www.springer.com، https://www.tandfonline.com 2) بررسی تمام مراجع ذکر شده در مقالات یافت شده با کلیدواژه‌های ذکر شده 3) بررسی مقالاتی که به مقالات یافت شده در روش 2 و 3 ارجاع داده‌اند.

از زمان تأسیس پروتکل کیوتو در سال 1997، مدل‌های مختلفی در ادبیات برای محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) با تلاش برای اجرای مقررات به کشورهای شرکت‌کننده پیشنهاد شده است (رفیعی‌سخایی و برازنده، 2016). همچنین سیاست تجارت انتشار به عنوان یکی از سیاست‌هایی که برای کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار می‌رود از جنبه‌های مختلف و در حوزه‌های مختلفی در ادبیات بررسی شده است. به همین دلیل برای درک بهتر مسائلی که سیاست تجارت انتشار را با رویکرد پویایی سیستم بررسی کرده‌اند، این مقاله این پژوهش‌ها را به دسته‌های زیر تقسیم می‌کند:

- سیاست تجارت انتشار در شرکت‌های تولیدکننده برق و بازار برق
- اثر سیاست تجارت انتشار بر توسعه اقتصادی و حفظ محیط‌زیست
- اثر سیاست تجارت انتشار بر زنجیره‌های تامین و سیستم‌های تولیدی
- سیاست تجارت انتشار در بازار نفت
- بررسی عوامل مختلف سیاست تجارت انتشار

2.1 سیاست تجارت انتشار در شرکت‌های تولیدکننده برق و بازار برق

محققان عمدتاً تأثیر سیاست تجارت انتشار بر سیستم اقتصاد انرژی را مطالعه کرده‌اند. در همین راستا، (مک فارلین، 2009) یک مدل پویایی سیستم برای ارزیابی رفتار چند شرکت تولیدکننده برق و گازهای گلخانه‌ای تحت سیستم تجارت انتشار طراحی کرده است. با مدل‌سازی پویایی سیستم اثر سیاست تجارت انتشار بر قیمت مجوزهای انتشار، تغییر در انگیزه‌های مالی برای سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این مطالعه نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری تجدیدپذیر یک شرکت به سهم سوخت‌های فسیلی در سبد تولید انرژی آن بستگی دارد. این نتایج، نتیجه‌گیری‌های روشنگری در مورد استفاده از مدل پویایی سیستم در سیاست‌گذاری تجارت انتشار ارائه می‌دهد و به تعیین اثربخشی استفاده از سیاست تجارت انتشار برای مبارزه با تغییرات آب‌وهوایی جهانی کمک می‌کند. همچنین (رفیعی‌سخایی و برازنده، b2017) یک مدل پویایی سیستم را برای بررسی چندین جنبه از بازار کربن توسعه داده‌اند. مدل ارائه شده شامل یک مدل فرعی از بازار برق است که یک بخش اساسی در انتشار کربن‌دی‌اکسید است. همچنین داده‌های مربوط به ایالات متحده به منظور ارائه پتانسیل‌های احتمالی و مزایای سیستم تجارت انتشار در این کشور تجزیه‌وتحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم قیمت‌گذاری مجوزهای انتشار می‌تواند به طور فزاینده‌ای برای کنترل انتشار از طریق قیمت مجوزهای انتشار، با پوشش مداوم صنایع بیشتر و کاهش تخصیص مجوز موثر باشد. همچنین نشان دادند که مدل ارائه شده قادر به شبیه‌سازی داده‌ها برای مجوزهای انتشار است. در نهایت، یک سناریوی فرضی در نظر گرفته شده است که در آن انتشار بیشتر توسط سیستم تجارت انتشار در اتحادیه اروپا پوشش داده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که با اضافه کردن پوشش، با افزایش تقاضا، قیمت مجوزهای انتشار افزایش می‌یابد. این متعاقباً منجر به متعادل شدن عرضه و تقاضا برای حفظ اثربخشی فشار قیمت مجوزهای انتشار و تحریک صنایع به سمت فناوری‌های پاک‌تر می‌شود.

تعداد کمی از محققان فرآیند بازی و استراتژی‌های رفتاری دولت و تولیدکنندگان برق را در اجرای مکانیزم تجارت انتشار مطالعه کرده‌اند. (ژاوو و ژانگ، 2018) در این مقاله به این شکاف تحقیقاتی می‌پردازند. این مقاله ابتدا مدل بازی تکاملی دولت و تولیدکنندگان برق را بر اساس تجارت انتشار می‌سازد و سپس با ایجاد یک مدل پویایی سیستم فرآیند تکاملی استراتژی‌های رفتار بازی را شبیه‌سازی می‌کنند و در نهایت تأثیر عوامل کلیدی قابل کنترل دولت را بر ثبات سیستم مورد مطالعه قرار می‌دهند. ترکیب بازی تکاملی و پویایی سیستم در این مطالعه نه تنها به وضوح فرآیند تکامل پیچیده و پویای مدل‌های بازی را تحت عقلانیت محدود نشان می‌دهد، بلکه یک پلت‌فرم شبیه‌سازی کمی و کیفی برای تحلیل روند بازی پویا بین دولت و تولیدکنندگان برق را فراهم می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که: (1) هیچ استراتژی پایدار تکاملی (ESS) در سیستم بازی بین دولت و تولیدکنندگان برق تحت سیاست

تجارت انتشار وجود ندارد (2) هنگامی که دولت یارانه‌های پویا یا اقدامات تنبیهی را اجرا می‌کند، استراتژی ترکیبی سیستم بازی دارای استراتژی پایدار تکاملی است. (3) کاهش یارانه واحد و افزایش جریمه واحد هر دو می‌تواند مشارکت تولیدکنندگان برق در تجارت انتشار را افزایش دهد، اما اولی احتمال نظارت دولت را افزایش می‌دهد. بنابراین، بهتر است زمانی که دولت تعدیل‌های استراتژیک را انجام می‌دهد و به دنبال آن یارانه‌ها را کاهش می‌دهد، جریمه‌ها را افزایش داد. (یو، وو، وانگ، سانگ و ژو، 2020) در این مقاله به بررسی استراتژی سرمایه‌گذاری مناسب برای شرکت‌های برق چین با تأثیر بازار تجارت انتشار کربن در سراسر کشور می‌پردازند و یک مدل پویایی سیستم برای تحلیل سرمایه‌گذاری شرکت‌های برق پیشنهاد شده است. آزمایش‌های شبیه‌سازی بر اساس سه سناریو مختلف سیاست سرمایه‌گذاری (یعنی محافظه‌کارانه، خنثی و فعال) انجام شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، سرمایه‌گذاری کوتاه مدت معقول برای شرکت‌ها باید افزایش یابد. اگر شرکت‌ها تصمیم بگیرند که منابع بیشتری را در نصب نیروگاه‌های سبز (نیروهای آبی، انرژی بادی و فتوولتائیک) سرمایه‌گذاری کنند، کاهش انتشار کربن و سود آنها ممکن است برای دستیابی به تغییرات کیفی در کوتاه‌مدت دشوارتر باشد.

2.2 اثر سیاست تجارت انتشار بر توسعه اقتصادی و حفظ محیط‌زیست

مطالعات مختلف نشان داده است که اقتصاد و محیط زیست در نهایت جدایی ناپذیر هستند (رفیعی‌سخایی و برازنده، 2017a). به همین دلیل (هو و پیکل، 2010) در این مقاله به دنبال بررسی اثر سیاست تجارت انتشار بین‌المللی بر حفاظت از اقلیم و توسعه اقتصادی با کمک مدل‌سازی پویایی سیستم هستند. نتایج نشان می‌دهد که یک قیمت نسبتاً بالا که کاهش انتشار را برمی‌انگیزد، به ناچار اثر بازدارنده‌ای بر رشد اقتصادی طبق مدل ارائه شده دارد. با استفاده از شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم این مقاله، می‌توان پیش‌بینی کرد که قبل از اینکه بازارهای بین المللی تجارت انتشار بتوانند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند، باید تغییرات اساسی صورت گیرد. سپس (هو و پیکل، 2011) در این مقاله اثرات تجارت بین‌المللی انتشار را بر حفاظت از اقلیم و توسعه اقتصادی با کمک مدل‌سازی پویایی سیستم بررسی می‌کنند. با توجه به مدل پویایی سیستم ارائه شده در این مقاله برای تجارت بین‌المللی انتشار، می‌توان نتیجه گرفت که قیمت مجوزها بین کشورهای مختلف به دلیل تابعی از ساختار اقتصاد ملی به شدت متفاوت است. قیمت نسبتاً بالا که کاهش انتشار را تداعی می‌کند، ناگزیر اثر بازدارنده‌ای بر رشد اقتصادی دارد.

عدم قطعیت‌های اقتصادی، تکنولوژیکی و حتی نهادی قابل توجهی وجود دارد که هر کدام ممکن است بر توسعه بازار تجارت انتشار تأثیر بگذارد. (دولگوپولووا، هو، لئوپولد و پیکل، 2015) (Dolgopolova, Hu, Leopold, & Pickl, 2015) از مدل پویایی سیستم برای تخمین این عدم قطعیت‌ها استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بازار تجارت انتشار غیرقطعی ممکن است تعهد بین‌المللی کاهش گازهای گلخانه‌ای را به خطر بیندازد. مدل‌های توصیف شده در این مقاله با هدف ارائه عدم قطعیت‌های اقتصادی، تکنولوژیکی و سازمانی در سطوح مختلف تصمیم‌گیری می‌باشد. تحلیل‌های حساسیت نشان می‌دهد که هر سه نوع عدم قطعیت-نهادی (کاهش هدفمند انتشار)، اقتصادی (نرخ رشد اقتصادی) و فناوری (سرعت بهبود بهره‌وری انرژی و اجرای انرژی پاک) به طور قابل‌توجهی بر قیمت مجوزهای انتشار تأثیر می‌گذارند. همچنین نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم رویکرد مفیدی برای شبیه‌سازی و مدیریت جنبه‌های مختلف عدم قطعیت تجارت انتشار است. (جی. ژانگ، وانگ، تانگ و یو، 2016) بر اساس پویایی سیستم، یک مدل شبیه‌سازی برای سیاست تجارت انتشار با در نظر گرفتن چهار زیرسیستم، یعنی اقتصاد، انرژی، محیط زیست

و سیاست تجارت انتشار، همراه با روابط تعاملی آنها ساخته‌اند تا تاثیر سیاست تجارت انتشار بر اقتصاد و محیط زیست در پکن تیانجین-هبی را به تصویر بکشند. نتایج نشان می‌دهد که (1) به طور کلی، سیاست تجارت انتشار می‌تواند به طور موثر کاهش کربن را در منطقه پکن-تیانجین-هبی ترویج کند، حتی تا حدودی تاثیر منفی بر اقتصاد دارد و (2) مجوز انتشار کمتر، سهمیه‌های آزاد کمتر و قیمت تجارت کربن بالاتر به طور مداوم اثر کاهش کربن را افزایش می‌دهد و در عین حال تأثیر آن را در اقتصاد تشدید می‌کند. نتایج همچنین اثربخشی مدل پیشنهادی را برای گرفتن سیستم سیاست تجارت انتشار پکن-تیانجین-هبی ارائه می‌کند که می‌تواند پشتیبانی مفیدی را برای بخش مدیریت در طراحی سیاست تجارت انتشار و تصمیم‌گیری مرتبط ارائه کند.

2.3 اثر سیاست تجارت انتشار بر زنجیره‌های تامین و سیستم‌های تولیدی

(یانگ، لی و لو، 2012) یک مدل زنجیره تامین بر اساس تئوری پویایی سیستم با یک تامین کننده و یک خرده‌فروش ایجاد کرده‌اند و اثر سیاست تجارت انتشار و سیاست مالیات کربن را بر هزینه تامین‌کننده، خرده‌فروش و زنجیره تامین با استفاده از شبیه‌سازی تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که خرده‌فروش چرخه‌های بهینه متفاوتی را تحت مجوزهای انتشار مختلف انتخاب می‌کند. همچنین، هم تامین‌کننده و هم خرده‌فروش انگیزه دارند که انتشار کربن را تنها تحت یک سقف انتشار معقول کاهش دهند. در غیر این صورت، به کارایی زنجیره تامین آسیب می‌رساند و نمی‌تواند به هدف کاهش انتشار برسد؛ همچنین اگر دولت نرخ مالیات بر انتشار را برای دستیابی به درآمد بیشتر افزایش دهد، هزینه زنجیره تامین و انتشار کربن افزایش می‌یابد. بنابراین، نرخ مالیات کربن باید به طور منطقی فرموله شود. (ژو و همکاران، 2016) از مدل شبیه‌سازی پویای سیستم برای توصیف و مشخص کردن رفتار سیستم‌های تولیدی تحت شرایط و الزامات عملکرد سبز و تقاضای غیرقطعی استفاده می‌کند. مدل‌های مفهومی برای توابع توسعه و تأیید شدند و آزمایش‌های شبیه‌سازی برای پیاده‌سازی مدل‌ها و مقایسه استراتژی‌های مختلف برای تجزیه و تحلیل تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی سیستم، مانند انتشار بیش از حد طولانی‌مدت، سرمایه‌گذاری سبز مداوم برای کاهش انتشار و هزینه خرید مجوزهای انتشار یا پرداخت جریمه (از طریق مالیات بیش از حد انتشار) طراحی شده است. این مدل نشان می‌دهد که چگونه برخی از عوامل یا چالش‌های جدید (مانند انتشار کربن ناشی از تولید، مبادلات و هزینه تنظیم به دلیل خرید یا انجام خود پالایشی و تلاش‌های سرمایه‌گذاری سبز) با عوامل سیستم تولید سنتی (تقاضا، ظرفیت، قیمت و هزینه) برای تشکیل حلقه‌های بازخورد بحرانی به طور جمعی بر رفتار پویایی سیستم کلی تأثیر می‌گذارند.

(تانگ، مو، ژائو، مندیس و ساترلند، 2019) سناریویی را با یک مدل اقتصادی تحت تأثیر سیاست تجارت انتشار، با مصرف‌کنندگانی که محصولات کم کربن را ترجیح می‌دهند، در نظر می‌گیرند و یک مدل بازی تکاملی را برای بررسی تکامل رفتارها برای خرده‌فروشان قدرتمند (مانند آمازون، گوم، والمارت، و غیره) و تولیدکنندگان در یک زنجیره تامین به رهبری خرده‌فروشان ایجاد می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم زنجیره تامین در نهایت به یک حالت ثابت تکاملی خواهد رسید، به این معنی که در نهایت تولیدکنندگان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را انتخاب می‌کنند و با توجه به مشوق‌های بازار، خرده‌فروشان محصولات کم کربن را تبلیغ خواهند کرد. پویایی سیستم برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتارهای پویا و موقت و همچنین برای شبیه‌سازی بازی تکاملی در صنعت لوازم خانگی چینی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سقف انتشار، قیمت بازار مجوزهای کربن، و ترجیحات مصرف‌کنندگان برای محصولات کم کربن، عوامل کلیدی مؤثر بر رفتار خرده‌فروشان و تولیدکنندگان هستند. علاوه بر

این، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که زمانی که قیمت مجوزهای انتشار کربن در بازار بالا است، تولیدکنندگان مایل به سرمایه‌گذاری در کاهش انتشار کربن هستند. با این حال، با کاهش سقف انتشار گازهای گلخانه ای، زمان می‌برد تا همه تولیدکنندگان استراتژی‌ای را اتخاذ کنند که انتشار را کاهش دهد. (اس. ژانگ، وانگ، و یو، 2019) در چارچوب مقررات سیاست تجارت انتشار، مدل بازی تکاملی بین دولت‌ها و تولیدکنندگان را توسعه می‌دهند و تأثیر سیاست‌های دولت بر تصمیم‌گیری‌های تولیدکنندگان و تمایل پویای بازار سرمایه و تجارت را تحلیل می‌کنند. همچنین اثر سیاست‌های دولت بر بازار تجارت انتشار تحت دو سناریو بررسی شده است: قیمت تجارت انتشار استاتیک و قیمت تجارت انتشار پویا. سپس یک مثال عددی با شبیه‌سازی پویایی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که وقتی دولت‌ها قیمت تجارت انتشار استاتیک را اجرا می‌کنند، بازی تکاملی نمی‌تواند به ثبات برسد. تحت قیمت تجارت انتشار پویا، بازی تکاملی دارای استراتژی پایدار تکاملی است.

2.4 سیاست تجارت انتشار در بازار نفت

(رفیعی سخایی، برازنده، موسوی، فکری و باستانی، 2016) در این مقاله، مدلی از بازار کربن ارائه و آن را از طریق رویکرد پویایی سیستم به بازار نفت متصل می‌کند. همچنین عوامل و متغیرهای اصلی درگیر در بازار کربن، به ویژه، منابع اصلی انتشار را بررسی کرده‌اند. به علاوه یک مدل حالت و جریان در مکانیسم‌های بازار تجارت انتشار ارائه شده است که انگیزه‌ای برای صنایع فراهم می‌کند تا به سمت راه‌حل‌های کم‌هزینه‌تر در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای خود حرکت کنند. با اتصال مدل بازار نفت به بازار کربن، می‌توان اثرات قیمت نفت بر انتشار کربن را مدل کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل آموزش‌دیده ارائه شده قادر به ارائه یک تناسب تاریخی بر روی داده‌ها است.

(رفیعی‌سخایی و برازنده، a2017) در این مقاله، یک رویکرد پویایی سیستم در مطالعه اثرات به کارگیری تجارت انتشار بر صنایع ایالات متحده، به ویژه، صنایع نفت و وابسته به نفت که مسئول بخش عمده انتشار کربن هستند، ارائه می‌کنند. برای این منظور، یک مدل پویایی سیستم از عواملی که در توسعه پایدار یک جامعه دخیل هستند ارائه شده است و آن را به بازار کربن و مدل‌های بازار نفت متصل می‌کنند تا ابزاری برای درک تأثیرات اقتصادی احتمالی به کارگیری تجارت انتشار در آمریکا ارائه کنند.

2.5 بررسی عوامل مختلف سیاست تجارت انتشار

(رفیعی‌سخایی و برازنده، 2016) در این مقاله، عوامل دخیل در بازار کربن را از طریق روش پویایی سیستم مدل‌سازی کرده‌اند و سیستمی از معادلات دیفرانسیل را بین عوامل اصلی مانند عرضه، تقاضای مجوز انتشار و قیمت آنها پیشنهاد می‌کنند. ضرایب بر اساس تجزیه و تحلیل حداقل انحراف مطلق (LAD) بر روی داده‌های موجود تاریخی به دست می‌آیند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مداوم پوشش انتشار گازهای گلخانه‌ای از صنایع، کمیسیون اتحادیه اروپا می‌تواند تا سال 2050 به مقادیر مجموعه از پیش تعریف‌شده‌ای از حجم مجاز انتشار برسد.

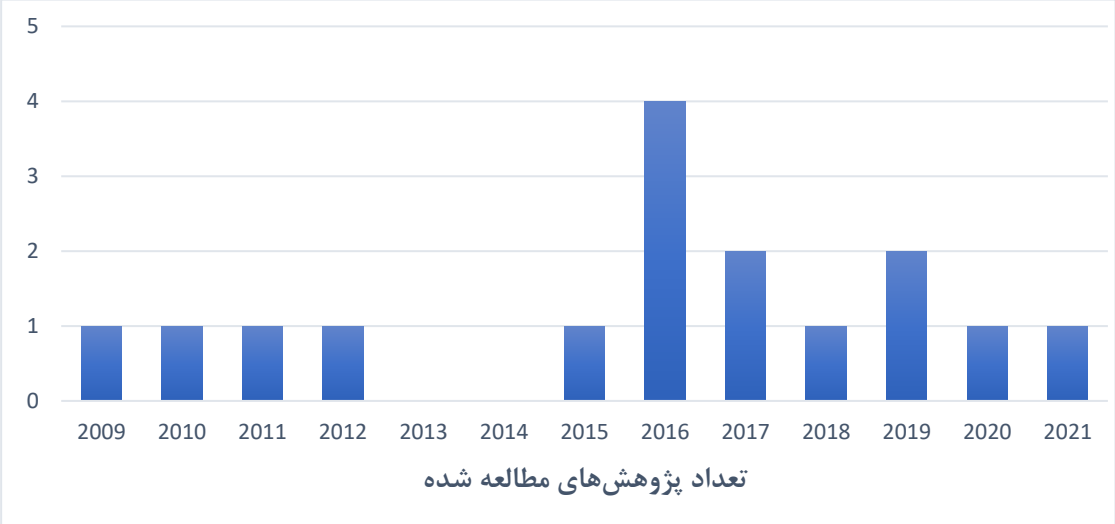
(پان و همکاران، 2021) با در نظر گرفتن استان گوانگدونگ به عنوان مثال، یک مدل پویایی سیستم برای بررسی تعامل بین عوامل داخلی سیستم تجارت انتشار و شبیه‌سازی اثربخشی این سیاست از 2016-2026 ایجاد کرده است. نتایج نشان می‌دهد که (1) خطاهای نسبی بین داده‌های تاریخی و داده‌های شبیه‌سازی شده در 5

درصد کنترل می‌شوند که نشان می‌دهد مدل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی سیستم واقعی مناسب است. (2) میانگین حساسیت نرخ تغییرات مجوزهای انتشار، نسبت پرداختی و ضریب جریمه به ترتیب 0.42، 0.56 و 0.29 است، که نشان می‌دهد این سه پارامتر را می‌توان به عنوان پارامترهای اهرمی که بر کارایی سیاست تجارت انتشار تأثیر می‌گذارد، شناسایی کرد. (3) یک نوع سیاست برای دستیابی به اهداف کاهش انتشار مشکل است. به طور کلی، هدف این مقاله ایجاد یک مدل پویایی سیستم برای بررسی اثربخشی سیاست تجارت انتشار تحت اهداف تعیین‌شده، و جستجوی یک طرح سیاست مناسب برای دستیابی به هدف کاهش انتشار از منظر بهینه‌سازی سیستم است.

در جدول 1 خلاصه‌ای از پژوهش‌هایی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، آورده شده است و در شکل 1 تعداد مقالات بررسی شده به تفکیک هر سال نشان داده شده است.

جدول 1. خلاصه مقالات سیاست تجارت انتشار با رویکرد پویایی سیستم

	نویسندگان	زمینه تحقیقاتی	روش
1	McFarlane (2009)	اثر سیاست تجارت انتشار بر سرمایه‌گذاری در انرژی تجدیدپذیر و ارزیابی رفتار چند شرکت تولیدکننده برق	پویایی سیستم
2	Hu and Pickl (2010)	اثر سیاست تجارت انتشار بین‌المللی بر حفاظت از اقلیم و توسعه اقتصادی	پویایی سیستم
3	Hu and Pickl (2011)	اثر سیاست تجارت انتشار بین‌المللی بر حفاظت از اقلیم و توسعه اقتصادی	پویایی سیستم
4	Yang et al (2012)	اثر سیاست تجارت انتشار و مالیات کربن بر هزینه‌های زنجیره تامین	پویایی سیستم
5	Dolgopolova (2015)	بررسی اثر عدم قطعیت‌های تکنولوژیکی، اقتصادی و نهادی بر توسعه بازار تجارت انتشار و قیمت مجوزهای انتشار	پویایی سیستم
6	Zhang et al (2016)	اثر سیاست تجارت انتشار بر اقتصاد و محیطزیست سه شهر چین	پویایی سیستم
7	Zhou et al (2016)	مشخص کردن رفتار سیستم‌های تولیدی تحت سیاست تجارت انتشار	پویایی سیستم
8	Rafieisakhaei et al (2016)	بررسی رابطه‌ی بین بازار نفت و بازار تجارت انتشار اتحادیه اروپا	پویایی سیستم
9	Rafieisakhaei and barazandeh (2016)	بررسی عوامل دخیل در بازار کربن	پویایی سیستم
10	Rafieisakhaei and barazandeh (2017a)	اثر سیاست تجارت انتشار بر صنایع نفت و وابسته به نفت در آمریکا	پویایی سیستم
11	Rafieisakhaei and barazandeh (2017b)	بررسی سیاست تجارت انتشار در بازار برق	پویایی سیستم
12	Zhao and Zhang (2018)	بررسی بازی بین دولت و تولیدکنندگان برق تحت سیاست تجارت انتشار	بازی تکاملی و پویایی سیستم
13	Tong et al (2019)	بررسی بازی تکاملی بین خرده‌فروشان قدرتمند و تولیدکنندگان در زنجیره تامین تحت سیاست تجارت انتشار با مصرف‌کنندگانی که محصولات کم کربن را ترجیح می‌دهند	بازی تکاملی و پویایی سیستم
14	Zhang et al (2019)	تأثیر سیاست‌های دولت بر تصمیم‌گیری‌های تولیدکنندگان و بازار تجارت انتشار تحت دو سناریو تحت قیمت کربن ایستا و پویا	بازی تکاملی و پویایی سیستم
15	Yu et al (2020)	بررسی استراتژی سرمایه‌گذاری مناسب برای شرکت‌های برق چین تحت سیاست تجارت انتشار	پویایی سیستم
16	Pan et al (2021)	بررسی تعامل بین عوامل داخلی سیستم تجارت انتشار و شبیه‌سازی اثربخشی این سیاست در استان گواندونگ	پویایی سیستم



شکل 1. تعداد مقالات چاپ شده در حوزه تجارت انتشار با رویکرد پویایی سیستم از سال 2009 تاکنون

3- بحث و نتیجه‌گیری

برای پرداختن به پیچیدگی در فرآیندهای تصمیم‌گیری، می‌توان از روش پویایی سیستم به عنوان روشی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی موقعیت‌های پیچیده برای تشخیص تغییرات، بازیگران متعدد و وابستگی‌های متقابل بین سیستم‌ها و فرآیندهای مختلف استفاده کرد. همچنین پویایی سیستم یک روش قدرتمند برای توصیف و تجزیه و تحلیل روابط بین عوامل در سیستم های پیچیده برای شبیه‌سازی رفتار سیستم در طول زمان است. از آنجایی که سیستم سیاست تجارت انتشار یک سیستم پویای پیچیده با روابط غیرخطی است، پویایی سیستم یک روش مفید برای تحلیل سیستم تجارت انتشار است. در این مقاله سعی شده است با بررسی مقالات مختلف مربوط به سیاست تجارت انتشار که از رویکرد پویایی سیستم برای شبیه‌سازی و تحلیل استفاده کرده‌اند، به بررسی اهمیت این موضوع پرداخته شود. برای درک بهتر این پژوهش‌ها یک دسته‌بندی ادبیات انجام شده است که 5 دسته برای مقالات سیاست تجارت انتشار با استفاده از رویکرد پویایی سیستم شناسایی شده است: 1) سیاست تجارت انتشار در شرکت‌های تولیدکننده برق و بازار برق 2) اثر سیاست تجارت انتشار بر توسعه اقتصادی و حفظ محیط‌زیست 3) اثر سیاست تجارت انتشار بر زنجیره‌های تامین و سیستم‌های تولیدی 4) سیاست تجارت انتشار در بازار نفت 5) بررسی عوامل مختلف سیاست تجارت انتشار

از بررسی این مقالات می‌توان نتیجه گرفت که 1) روش پویایی سیستم روش مفیدی برای بررسی و تحلیل اثربخشی سیاست تجارت انتشار و و مقایسه و تحلیل استراتژی‌های مختلف است 2) قیمت بالای مجوز انتشار اثر منفی بر روی اقتصاد دارد و قیمت مجوزهای انتشار بین کشورهای مختلف به دلیل ساختار ملی متفاوت هر کشور، متفاوت است 3) تعیین قیمت کربن مناسب و سقف انتشار معقول می‌تواند بر روی رفتار بنگاه‌ها برای سرمایه‌گذاری سبز اثر قابل توجهی داشته باشد.

همچنین از مرور این مقالات می‌توان نتیجه گرفت که بررسی سیاست تجارت انتشار با استفاده از رویکرد پویایی سیستم در ادبیات در حال افزایش است و نیازمند بذل توجه در آینده است. این مقاله می‌تواند مرجع خوبی از

مقالات حوزه‌ی سیاست تجارت انتشار با استفاده از رویکرد پویایی سیستم باشد که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان، سازمان‌ها و پژوهشگران برای مطالعات بعدی کمک‌کننده باشد.

منابع

Cao, K., Xu, X., Wu, Q., & Zhang, Q. (2017). Optimal production and carbon emission reduction level under cap-and-trade and low carbon subsidy policies. *Journal of Cleaner Production, 167*, 505-513. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.251

Chen, X ,.Wang, Z., & Wu, D. D. (2013). Modeling the Price Mechanism of Carbon Emission Exchange in the European Union Emission Trading System. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 19*(5), 1309-1323. doi:10.1080/10807039.2012.719389

Chevallier, J. (2015). Principles of Emissions Trading. In W. Leal Filho (Ed.), *Handbook of Climate Change Adaptation* (pp. 1217-1238). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Diaz-Rainey, I., & Tulloch, D. J. (2018). Carbon pricing and system linking :Lessons from the New Zealand Emissions Trading Scheme. *Energy Economics, 73*, 66-79. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.04.035

Dolgopolova, I., Hu, B., Leopold, A., & Pickl, S. (2015). Economic, institutional and technological uncertainties of emissions trading—a system dynamics modeling approach. In J. P. Ometto, R. Bun, M. Jonas, & Z. Nahorski (Eds.), *Uncertainties in Greenhouse Gas Inventories: Expanding Our Perspective* (pp. 213-226). Cham: Springer International Publishing.

Fang, G., Tian, L ,.Liu, M., Fu, M., & Sun, M. (2018). How to optimize the development of carbon trading in China—Enlightenment from evolution rules of the EU carbon price. *Applied Energy, 211*, 1039-1049. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.001

García-Alvarado, M ,.Paquet, M., Chaabane, A., & Amodeo, L. (2017). Inventory management under joint product recovery and cap-and-trade constraints. *Journal of Cleaner Production, 167*, 1499-1517. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.074

Gong, X., & Zhou, S. X. (201 .(3Optimal production planning with emissions trading. *Operations Research, 61*(4), 908-924 .

Gupta, M., Bandyopadhyay, K. R., & Singh, S. K. (2019). Measuring effectiveness of carbon tax on Indian road passenger transport: A system dynamics approach. *Energy Economics, 81*, 341-354. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.03.013

He, P., Zhang, W., Xu, X., & Bian, Y. (2015). Production lot-sizing and carbon emissions under cap-and-trade and carbon tax regulations. *Journal of Cleaner Production, 103*, 241-24 .8 doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.102

Hong, Z., Chu, C., Zhang, L. L., & Yu, Y. (2017). Optimizing an emission trading scheme for local governments: A Stackelberg game model and hybrid algorithm. *International Journal of Production Economics, 193*, 172-182. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.07.009

Hu, B., & Pickl, S. (2010). *Analysis and Design of International Emission Trading Markets Applying System Dynamics Techniques.* Paper presented at the AIP Conference Proceedings.

Hu, B., & Pickl, S. (2011). International Emissions Trading: A Pricing Model Based on System Dynamical Simulations. In R. Antes, B. Hansjürgens, P. Letmathe, & S. Pickl (Eds.), *Emissions Trading: Institutional Design, Decision Making and Corporate Strategies* (pp. 33-4 .(3Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Jiang, M., Zhu, B., Wei, Y.-M., Chevallier, J., & He, K. (2018). An intertemporal carbon emissions trading system with cap adjustment and path control. *Energy Policy, 122*, 152-161. doi:https://doi.org/10/1016.j.enpol.2018.07.025

Jokar, Z., & Mokhtar, A. (2018). Policy making in the cement industry for CO2 mitigation on the pathway of sustainable development- A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production, 201*, 142-155. doi:https://doi.org/10.1/016j.jclepro.2018.07.286

Li, F., & Haasis, H.-D. (2016, 2016//). *Green Supply Chain Design Under Emission Trading Scheme.* Paper presented at the Dynamics in Logistics, Cham.

Li, F., & Haasis, H.-D. (2017, 2017//). *Imposing Emission Trading Scheme on Supply Chain.* Paper presented at the Dynamics in Logistics, Cham.

Li, F., Haasis, H.-D., & Dovbischuk, I. (2016, 2016//). *Challenges and Solutions Toward Green Logistics Under EU-Emission Trading Scheme.* Paper presented at the Dynamics in Logistics, Cham.

Liu ,D., & Xiao, B. (2018). Can China achieve its carbon emission peaking? A scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model. *Ecological Indicators, 93*, 647-657. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.049

McFarlane, D. (2009). Utilizing System Dynamics Modeling for the Analysis of a Midwest Regional Carbon Cap and Trade System .

Mizuta, H., & Yamagata, Y. (2005, 2005//). *Gaming simulation of the international CO2 emission trading under the Kyoto Protocol.* Paper presented at the Agent-Based Simulation: From Modeling Methodologies to Real-World Applications, Tokyo.

Pan, X., Li, M., Xu, H., Guo, S., Guo, R., & Lee, C. T. (2021). Simulation on the effectiveness of carbon emission trading policy: A system dynamics approach. *Journal of the Operational Research Society, 72*(7), 1447-1460. doi:10.1080/01605682.2020.1740623

Rafieisakhaei, M., & Barazandeh, B. (2016). *Modeling dynamics of a Market-Based emission control system: Efficacy analysis.* Paper presented at the 2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech).

Rafieisakhaei, M., & Barazandeh, B. (2017a). *Economic potentials of a carbon market on american oil industry: A system dynamics approach.* Paper presented at the SPE Western Regional Meeting.

Rafieisakhaei, M., & Barazandeh, B. (2017b). *The efficacy of market-based emission control systems: A system dynamics approach.* Paper presented at the SPE Health, Safety, Security, Environment, & Social Responsibility Conference-North America.

Rafieisakhaei, M., Barazandeh, B., Moosavi, A., Fekri, M., & Bastani, K. (2016). *Modeling dynamics of the carbon market: A system dynamics approach on the co2 emissions and its connections to the oil market.* Paper presented at the The 34rd International Conference of the System Dynamics Society.

Saavedra M, M. R., de O. Fontes, C. H., & M. Freires, F. G. (2018). Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, 247-259. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.033

Song ,Y., Liang, D., Liu, T., & Song, X. (2018). How China's current carbon trading policy affects carbon price? An investigation of the Shanghai Emission Trading Scheme pilot. *Journal of Cleaner Production, 181*, 374-384. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.102

Tong, W., Mu, D., Zhao, F., Mendis, G. P., & Sutherland, J. W. (2019). The impact of cap-and-trade mechanism and consumers' environmental preferences on a retailer-led supply Chain. *Resources, Conservation and Recycling, 142*, 88-100. doi:https//:doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.005

Wang, M., Zhao, L., & Herty, M. (2018). Modelling carbon trading and refrigerated logistics services within a fresh food supply chain under carbon cap-and-trade regulation. *International Journal of Production Research, 56*(12), 4207-4225. doi:10.1080/00207543.2018.1430904

Yang, J., Li, J.-b., & Lu, W. (2012). The impact of emission policies on supply chain based on system dynamics. *Industrial Engineering and Management, 17*(4), 21-30 .

Yu, X., Wu, Z., Wang, Q., Sang ,X., & Zhou, D. (2020). Exploring the investment strategy of power enterprises under the nationwide carbon emissions trading mechanism: A scenario-based system dynamics approach. *Energy Policy, 140*, 111409. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111409

Zakeri, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B., & Sarkis, J. (2015). Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective. *International Journal of Production Economics, 164*, 197-205. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.012

Zhang ,J., Wang, Z., Tang, L., & Yu, L. (2016). The simulation of carbon emission trading system in Beijing-Tianjin-Hebei region: an analysis based on system dynamics. *Chin. J. Manag. Sci, 24*, 1-8 .

Zhang, S., Wang, C., & Yu, C. (2019). The evolutionary game analysis and simulation with system dynamics of manufacturer's emissions abatement behavior under cap-and-trade regulation. *Applied Mathematics and Computation, 355*, 343-355. doi:https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.080

Zhao, X.-g., & Zhang, Y.-z .(2018) .The system dynamics (SD) analysis of the government and power producers' evolutionary game strategies based on carbon trading (CT) mechanism: A case of China. *Sustainability, 10*(4), 1150 .

Zhou, M., Pan, Y., Chen, Z., & Li, B. (2016). Enterprise behaviour under Cap-and-Trade conditions: an experimental study with system dynamic models. *Journal of Simulation, 10*(1), 12-23. doi:10.1057/jos.2014.36

A Review of Emission Trading Policy using System Dynamics Approach

Sahar Akhgar[1]
Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Due to global warming and increasing environmental pollution, the Kyoto Protocol has been concluded by 37 countries to stabilize the concentration of greenhouse gases in the atmosphere at one level. Under this treaty, governments undertaken to control activities that affect the environment. For this reason, emissions trading policy has emerged as one way to reduce greenhouse gas emissions. Various researches have been done in this field that have used different methods such as economic methods, mathematics, mathematical planning, simulation, etc. to analyze this policy. Due to the nature of the emission trading policy, which is a complex dynamic system, one of the methods of analysis and simulation of this policy is the system dynamics approach, which is also discussed in the literature. This paper reviews all the articles that have examined this policy from 2009 to 2021 using the system dynamics approach. From the review of these articles, it can be concluded that the system dynamics approach is useful for analyzing the effect of this policy on different companies and supply chains.

Keywords: Emission Trading Policy, Greenhouse Gas Emission, System Dynamics.

[1] Master of Industrial Engineering, saharakhgar70@yaoo.com