روابط راهبردی بین کارتل عرضه‌کننده سوخت‌های فسیلی و ائتلاف تقاضاکننده‌ی آن: رویکرد بازی پویا

مرضیه مطففه | m.motaffef@yahoo.com
کارشناس‌ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی اجتماعی،
موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی | m.fadaee@imps.ac.ir
مهدی فدایی
استادیار گروه اقتصاد موسسه عالی آموزش و پژوهش
مدیریت و برنامه‌ریزی (نویسنده مسئول)

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۵ | پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۶

چکیده: در این پژوهش به بررسی اثرات اقتصادی استخراج از ذخایر سوخت‌های فسیلی پرداخته شد که استفاده و مصرف این سوخت‌ها منجر به انتشار آلودگی و وارد نمودن آسیب‌های جدی به محیط‌زیست می‌گردد. در پژوهش حاضر، دنیایی مدل می‌گردد که در آن یک کارتل عرضه‌کننده سوخت‌های فسیلی و یک ائتلاف تقاضاکننده این سوخت‌ها وجود دارد. کارتل حداکثرکننده منافع ناشی از عرضه سوخت خود است و توجهی به اثرات خارجی زیان‌بار زیست‌محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها ندارد. اما ائتلاف مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی، به‌دلیل اینکه از انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی این سوخت‌ها متضرر می‌گردد، سیاست‌هایی را برای کاهش این اثرات منفی که طبعاً منجر به کاهش مصرف سوخت نیز خواهد شد، به‌کار می‌گیرد. بدین ترتیب، به‌دلیل وجود تضاد منافع، کارتل و ائتلاف وارد یک بازی هم‌زمان با یکدیگر می‌شوند که هر یک به‌ترتیب به دنبال حداکثر کردن سود و رفاه خود هستند. نتیجه مهم این بازی رسیدن به دو تعادل پایدار متفاوت است. یک تعادل بسیار به صفر نزدیک است و حکایت از تهی شدن ذخایر سوخت‌های فسیلی دارد، اما مقدار تعادلی دیگر به‌طور معنی‌داری از صفر فاصله دارد که دلیل رسیدن به این نقطه تعادلی به کشف ذخایر جدید برمی‌گردد.

کلیدواژه‌ها: سوخت‌های فسیلی، آلودگی محیط‌زیست، کارتل عرضه‌کننده سوخت‌های فسیلی، ائتلاف واردکننده سوخت‌های فسیلی، بازی پویا.
طبقه‌بندی JEL: Q54, H23, C73.

فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی و بودجه
شاپا (چاپی) ۹۰۹۲-۲۲۵۱ | نمایه در ISC
سال بیستم و یکم | شماره ۱ | بهار ۱۳۹۵ | ص‌ص ۱۲۲-۱۰۵

مقدمه

سوخت‌های فسیلی از مهم‌ترین منابع‌طبیعی در اختیار بشر هستند که همانند بسیاری دیگر از منابع‌طبیعی با محدودیت مواجه بوده و امکان بازتولید و تجدیدپذیری ندارند. از این‌رو، استفاده و حفاظت درست از این منابع اهمیت به‌سزایی دارد. اما یکی از نکات مهمی که سوخت‌های فسیلی را تا حدودی از سایر منابع‌طبیعی متمایز می‌نماید، آلودگی‌های ناشی از مصرف این سوخت‌هاست. آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در دنیای امروزی مسایل عدیده‌ای را برای محیط‌زیست پدید آورده است. استخراج و مصرف سوخت‌های فسیلی علاوه بر اثرات مخربی که بر محیط‌زیست وارد می‌آورد، به‌طور مستقیم سلامت افراد جامعه را نیز به مخاطره می‌اندازد. بنابراین بررسی استخراج و مصرف از یک منبع طبیعی تجدیدناپذیر مثل نفت بدون در نظر گرفتن آلودگی‌های حاصله و اثرات منفی آن منجر به ایجاد نتیجه‌های گمراه‌کننده‌ای خواهد شد که از واقعیت فاصله بسیاری خواهند داشت.

از این‌رو، در این پژوهش سعی بر این شده است که مسئله استخراج از یک منبع طبیعی تجدیدناپذیر (مانند نفت) همراه با عوارض جانبی آن که آلودگی است، مورد بررسی قرار گیرد تا نتایج واقعی‌تر و کارگشاتر باشند. بدین‌منظور، مسئله‌ای مدل می‌شود که در آن یک کارتل[1] (مانند اوپک) عرضه‌کننده سوخت‌های فسیلی، محصول خود را به کشورهای تقاضاکننده این سوخت‌ها صادر می‌کند. هدف کشورهای تقاضاکننده سوخت به حداکثر رساندن رفاه مصرف‌کنندگان و هدف کارتل حداکثر نمودن سودش است. همان‌گونه که بیان شد، فرآورده‌های حاصل از تولیدهای کارتل با آلودگی‌هایی (گازهای گلخانه‌ای) همراه است که مصرف‌کنندگان در کشورهای واردکننده را متضرر می‌سازد و از آنجایی‌که کارتل هیچ مسئولیتی را برای کنترل این آلودگی بر عهده نمی‌گیرد، کشورهای واردکننده سوخت‌های فسیلی، خود کنترل آلودگی را بر عهده می‌گیرند و برای اینکه بتوانند به لحاظ راهبردی نقش مؤثری را در مقابل کارتل ایفا نمایند با یکدیگر تشکیل یک ائتلاف را می‌دهند. به‌دلیل اینکه منافع کارتل و ائتلاف، متأثر از رفتار راهبردی یکدیگر هستند، نمی‌توان مسئله را به روش کنترل بهینه حل نمود؛ بلکه باید بازی راهبردی میان کارتل استخراج‌کننده و ائتلاف واردکننده منبع را حل نمود. در این مسئله به‌دلیل ماهیت ذخایر منابع و انباشت آلودگی که در طول زمان تغییر می‌یابند، بازی میان کارتل و ائتلاف را باید به‌صورت پویا مدل‌سازی نمود.

در همین رابطه و در چارچوب یک مدل پویا، مطالعه‌هایی چند به بررسی اقتصادی، استخراج از

1. Cartel

یک منبع طبیعی که بر روی محیط‌زیست نیز اثرات زیان‌باری می‌گذارد، پرداخته‌اند. تهونن[1] (۱۹۹۵ و ۱۹۹۶) به بررسی استخراج از یک منبع تجدیدناپذیر که اثرات زیان‌باری را بر روی محیط‌زیست می‌گذارد، پرداخته است. وی برای این منظور هم طرف عرضه و هم طرف تقاضای بازار سوخت‌های فسیلی را بررسی نموده است. تهونن (۱۹۹۵) نشان می‌دهد که اگر عرضه سوخت‌های فسیلی توسط فروشندگان رقابتی صورت گیرد، نتیجه‌ها متمایز خواهد بود با زمانی که عرضه این سوخت‌ها را یک کارتل بر عهده می‌گیرد. تهونن (۱۹۹۶) به بررسی استخراج از منبع توسط یک کارتل یا تعدادی عرضه‌کننده که با هم رقابت دارند پرداخته که در طرف مقابل بازار نیز کشورهای خریدار برای مقابله با آلودگی با هم تشکیل یک دولت بین‌المللی را داده‌اند. ویرل[2] (۱۹۹۵) بازی پویایی را بین یک کارتل عرضه‌کننده سوخت‌های فسیلی و یک دولت تقاضاکننده به تصویر می‌کشد که در این بازی مصرف انرژی حاصله از سوخت‌های فسیلی منجر به آلودگی هوا و گرم شدن جهانی می‌گردد. نتیجه‌هایی که وی از این بررسی به‌دست می‌آورد آن است که در نظر گرفتن این موضوع که آلودگی به‌صورت طبیعی تنزل می‌یابد و هزینه استخراج نیز در طول زمان افزایش می‌یابد، منجر به ایجاد یک چارچوب واقع‌بینانه‌تری برای مسایل گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. لیسکی و تهونن[3] (۲۰۰۴) نیز به بررسی اثرات مالیات آلودگی بر روی یک منبع تجدیدناپذیر پرداخته‌اند. آنها مسئله‌ای را به تصویر می‌کشند که در آن یک منبع تجدیدناپذیر توسط یک کارتل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و در طرف مقابل نیز تقاضاکنندگان این منبع آژانسی را تشکیل می‌دهند که بتوانند به‌صورت راهبردی بر روی آلودگی‌های ناشی از ذخایر استخراج‌شده، تأثیر گذارند. نتیجه‌های این بررسی نشان می‌دهد که مالیات‌های کربن می‌توانند برای کاهش قیمت تولیدکننده سوخت‌های فسیلی به‌کار گرفته شوند و در نتیجه باعث جابه‌جایی رانت منبع از کشورهای صادرکننده گردند. همچنین نشان می‌دهد مالیاتی که به خاطر آلودگی وضع می‌گردد فقط یک مالیات پیگوی نیست، بلکه شامل ارزش حال خسارت‌های نهایی و یک جز تعرفه‌ای می‌گردد که این جز سبب می‌گردد تا مالیات آلودگی از مالیات پیگوی منحرف گردد.

مطالعه حاضر با در نظر گرفتن پژوهش‌های پیشین، جهت انطباق بیشتر با واقعیت، موضوع کشف ذخایر جدید را نیز مدنظر قرار داده و به مدل مسئله افزوده است، زیرا منابع‌طبیعی زیادی در سطح جهان وجود دارد که امکان استفاده و بهره‌برداری از آنها تاکنون وجود نداشته است ولی با وجود پیشرفت‌های روزافزون فناوری و دانش بشریت هر روزه این امکان وجود دارد که این منابع

1. Tahvonen
2. Wirl
3. Liski & Tahvonen

قابلیت استفاده و بهره‌برداری را پیدا نموده و به ذخایر موجود اضافه شوند. در دنیای امروزی نیز استخراج‌کنندگان بزرگ منابع‌طبیعی از این امر غافل نبوده و همواره تلاش‌ها و سرمایه‌گذاری‌هایی را برای این منظور انجام داده‌اند که این مسئله تاکنون در پژوهش‌هایی که همزمان به موضوع منابع‌طبیعی و آلودگی پرداخته‌اند، نادیده گرفته شده است. بنابراین این پژوهش سعی دارد با در نظر گرفتن کشف ذخایر جدید، مدل استخراج از منابع‌طبیعی (مانند سوخت‌های فسیلی) را واقعی‌تر و کارآمدتر سازد. در واقع، در این مطالعه کارتل عرضه‌کننده سوخت‌های فسیلی مقدار مشخصی از ذخایر را در اختیار داشته که در هر دوره از این ذخایر، به‌منظور برآورده نمودن تقاضای مصرف‌کنندگان استخراج می‌نماید. از آنجایی که ذخایر در اختیار کارتل محدود بوده، کارتل برای مقابله با این محدودیت در هر دوره تلاشی را به‌منظور کشف ذخایر جدید انجام می‌دهد. لامبرتینی[1] (۲۰۱۴) نیز مسئله‌ای را مدل‌سازی نموده که در آن بنگاه‌ها با سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های اکتشافی دست به کشف ذخایر جدید می‌زنند.

در این مطالعه بازی بین کارتل و ائتلاف در چارچوب یک مدل پویا به‌صورت همزمان و به روش حلقه باز[2] است. در ادامه مسئله پژوهش و مدل‌سازی آن بیان می‌گردد. بخش سوم به حل مدل اختصاص یافته و نتیجه‌های آن در بخش چهارم ارایه شده است. در نهایت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بخش آخر پژوهش حاضر است.

مدل پژوهش

در این پژوهش دنیایی مدل می‌گردد که تنها در آن یک کارتل عرضه‌کننده و یک ائتلاف تقاضاکننده سوخت‌های فسیلی وجود دارد. ائتلاف مذکور متشکل از کشورهای تقاضاکننده‌ای می‌گردد که به‌منظور اثربخشی بیشتر، هم‌پیمان می‌شوند که راهبردهایشان را به‌صورت مشترک انتخاب نمایند. کارتل موجود در این پژوهش نیز مقدار مشخصی از ذخایر سوخت‌های فسیلی را در اختیار دارد که در هر دوره به‌منظور حداکثر نمودن سودش از این ذخایر به میزان q استخراج نموده و به قیمت p می‌فروشد. همچنین از آنجایی‌که میزان این ذخایر محدود بوده، کارتل در هر دوره تلاشی را برای کشف ذخایر جدید انجام می‌دهد که این تلاش با e نشان داده می‌شود. بنابراین، از میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی، x در اختیار کارتل در هر دوره توسط استخراج کاسته و به‌واسطه کشف

1. Lambertini
2. Open-loop

ذخایر جدید بر مقدارش افزوده می‌گردد. با توجه به توضیح‌های بیان شده میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی در طول زمان ثابت نبوده و دستخوش تغییرات قرار می‌گیرد که تغییرات این ذخایر در طول زمان تشکیل، یک معادله پویا به‌صورت معادله (۱) را می‌دهد:

$$\frac{dx(t)}{dt} \equiv \dot{x}(t) = -q(t) + e(t)x(t). \qquad (۱)$$

تغییرات در ذخایر سوخت‌های فسیلی در هر دوره از زمان با x نشان داده می‌شود که برابر است با ذخایر جدید کشف شده در هر دوره (ex)، منهای میزان استخراج از ذخایر در همان دوره (q). کشف ذخایر جدید در هر دوره نیز تابعی از تلاش کارتل (e) و میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی (x) در اختیار کارتل در نظر گرفته می‌شود. علت آنکه کشف ذخایر جدید تابعی از ذخایر در اختیار کارتل است، آن است که احتمال وجود ذخایر جدید در حوالی جایی که ذخایر قبلی موجود است، بیشتر از مناطق دیگر خواهد بود (Lambertini, 2014). به‌عنوان مثال اگر کارتلی مثل اوپک در نظر گرفته شود که اکثر ذخایر سوخت‌های فسیلی‌اش در خاورمیانه واقع شده است و بخواهد اقدام به کشف ذخایر جدید کند، احتمال آنکه این ذخایر در همان منطقه خاورمیانه باشد بسیار بیشتر از بقیه مناطق جهان خواهد بود.

سود لحظه‌ای کارتل از استخراج ذخایر فسیلی و عرضه آن به تقاضاکنندگان با π نشان داده شده و برابر است با:

$$\pi(t) = p(t)q(t) - cq(t)^2 - be(t)^2 . \qquad (۲)$$

همان‌طور که در این تابع سود دیده می‌شود، کارتل با دو جزء هزینه روبه‌رو است که یکی هزینه برای استخراج سوخت‌های فسیلی و هزینه دیگر برای کشف ذخایر جدید است. هزینه استخراج سوخت‌های فسیلی به‌صورت cq^2 و هزینه کشف ذخایر جدید به‌صورت be^2 در نظر گرفته می‌شوند. c و b نیز پارامترهای ثابت هستند.

هدف کارتل بیشینه نمودن سود تنزیل شده‌اش در طول زمان است.

$$J^C = \max_{\{p,e\}} \int_0^\infty e^{-rt} \left[p(t)q(t) - cq(t)^2 - be(t)^2\right] dt, \qquad (۳)$$

با توجه به معادله دینامیک (۱) و شرایط اولیه $x(0)=x_0$ است.

در سوی دیگر مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی، علاوه بر اینکه از مصرف این سوخت‌ها مطلوبیت کسب می‌کنند، از ذخیره آلودگی‌هایی که از تولید و مصرف سوخت‌های فسیلی متصاعد می‌گردد، متضرر می‌گردند. در این مطالعه، فرض می‌گردد میزان انتشار آلودگی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در هر دوره برابر با مقدار استخراج از ذخایر فسیلی آن دوره است، $E(t)=q(t)$ این

آلودگی در طول زمان انباشت شده و این انباشت آلودگی اثرهای منفی بر رفاه مصرف‌کننده می‌گذارد. از آنجایی که کارتل، خود مصرف‌کننده اصلی سوخت‌های فسیلی نیست، مسئولیتی را در قبال کاهش آلودگی‌های ایجاد شده بر عهده نمی‌گیرد. بنابراین، دولت‌های کشورهای وارد (مصرف)کننده برای کنترل (کاهش) مؤثرتر این آلودگی‌ها یک ائتلاف را تشکیل می‌دهند. ائتلاف برای کاهش آثار زیان‌بار آلودگی دو سیاست را همزمان اجرا می‌کند: ۱. وضع مالیات اصلاحی بر هر واحد مصرف (به‌منظور کاهش مصرف) و ۲. انجام فعالیت‌هایی به‌منظور جذب و کاهش انتشار آلودگی. مالیات اصلاحی را با τ و فعالیت برای جذب و کاهش انتشار آلودگی با f نشان داده شده است. بنابراین، میزان انباشت آلودگی در طول زمان به مقدار استخراج (q) و نرخ کاهش انتشار آلودگی (f) وابسته است. همچنین، اگر نسل بشر نابود شده و یا به یک‌باره تصمیم به عدم انتشار آلودگی نماید، طبیعت می‌تواند پس از مدتی آلودگی‌های منتشر شده را از بین ببرد. بنابراین، فرض می‌گردد، آلودگی‌ها در هر دوره با نرخ طبیعی δ پاک‌سازی می‌گردد. با توجه به این توضیحات، انباشت آلودگی از رابطه (۴) تبعیت خواهد کرد:

$$\frac{dz(t)}{dt} \equiv \dot{z}(t) = \big(1 - f(t)\big)q(t) - \delta z(t), \qquad (۴)$$

در این معادله Z بیانگر انباشت آلودگی در طول زمان و Z تغییرات انباشت آلودگی است. با توجه به توضیحات داده شده تابع رفاه ائتلاف مصرف‌کنندگان عبارت است از:

$$W(t) = u\big(q(t)\big) - \big(p(t) + \tau(t)\big)q(t) + R\big(q(t)\big) - D\big(z(t)\big) - \frac{1}{2}f(t)^2. \qquad (۵)$$

تابع مطلوبیت $u(q)$، میزان مطلوبیتی است که مصرف‌کنندگان از مصرف سوخت‌های فسیلی کسب می‌کنند. در این مطالعه فرض می‌گردد که این تابع مطلوبیت به فرم درجه دو و به‌صورت $aq\text{-}1/2\ q^2$ است. همچنین مصرف‌کنندگان باید برای هر واحد از سوخت‌های فسیلی هزینه‌ای را به میزان $p+\tau$ بپردازند که همان‌گونه که قبلاً گفته شد p قیمت تولیدکننده و τ مالیات اصلاحی وضع‌شده توسط ائتلاف برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی به‌منظور کنترل آلودگی‌های ناشی از این سوخت‌هاست. $R(q)$ درآمدهای مالیاتی است که برابر τq بوده و توسط ائتلاف به مصرف‌کنندگان باز توزیع می‌گردد. آلودگی‌ها منتشر شده به‌واسطه تولید و مصرف سوخت‌های فسیلی، اثری منفی[1] بر رفاه مصرف‌کننده داشته و خسارت $D(z)$ را بر جامعه تحمیل می‌کند. این خسارت تابعی از انباشت آلودگی در نظر گرفته می‌شود و توسط $D(z)=hz^2$ اندازه‌گیری می‌گردد. همچنین ائتلاف مصرف‌کنندگان به‌دلیل انجام فعالیت‌هایی به‌منظور کاهش آلودگی، f می‌بایست هزینه‌ای را به میزان

1. Negative Externality

$1/2\ f^2$ متحمل شود.

بنابراین، ائتلاف به دنبال حداکثر نمودن تابع رفاه تنزیل شده (۶) است:

$$J^B = \max_{\{\tau,f\}} \int_0^\infty e^{-rt}\Big[u\big(q(t)\big) - \big(p(t)+\tau(t)\big)q(t) + R\big(q(t)\big) - D\big(z(t)\big) - \frac{1}{2}\,f(t)^2\Big]dt, \quad (۶)$$

با توجه به قید (۴) و شرایط اولیه $z(0)=z_0$ است.

در این مطالعه فرض می‌گردد که تابع تقاضا خطی بوده و برابر با $q(t)=a-p(t)-\tau(t)$ است که پارامتر a قیمت چوک[1] یا همان اندازه بازار[2] است.

از آنجایی که اهداف ائتلاف و کارتل در تعارض با یکدیگر هستند و تحت تأثیر راهبردهای همدیگر قرار می‌گیرند، تعاملات راهبردی میان آنها باید از طریق یک بازی مدل و حل شود. همچنین، رفتار هر بازیگر این بازی بر هر دو رابطه پویای (۱) و (۴) اثر می‌گذارد. بنابراین، در به دست آوردن تعادل باید هر دو محدودیت پویای ذکر شده در مسئله هر دو بازیگر لحاظ شود. در بخش بعد به تفصیل، به بیان این بازی و حل آن پرداخته می‌شود.

حل مدل پژوهش

همان‌طور که گفته شد هدف کارتل بیشینه نمودن سود تنزیل شده‌اش در طول زمان به‌وسیله تعیین قیمت[3] و میزان تلاش برای کشف منبع جدید و هدف ائتلاف حداکثر نمودن رفاه تنزیل شده مصرف‌کنندگان به‌وسیله تعیین میزان مالیات اصلاحی و فعالیت برای کاهش آلودگی است. از آنجایی که اهداف کارتل و ائتلاف در تضاد با یکدیگر بوده و متأثر از متغیرهای کنترلی یکدیگر هستند، بنابراین کارتل و ائتلاف وارد یک بازی همزمان با یکدیگر می‌شوند. این بازی به‌دلیل ماهیت پویای متغیرهای وضعیت آن باید به‌صورت پویا مدل شود. برای حل این بازی پویا، از روش حلقه باز استفاده شده است.

بدین منظور، ابتدا معادلات همیلتونی ائتلاف و کارتل را تشکیل داده و سپس طبق اصل

1. Choke Price
2. Market Size

۳. با توجه به اینکه در این مدل تنها یک عرضه‌کننده وجود دارد و با توجه به تابع تقاضا، انتخاب متغیرهای قیمت یا مقدار عرضه به‌عنوان متغیر کنترلی کارتل نتایج یکسانی را در پی خواهد داشت.

بیشینه‌سازی پنتریاگین[1] مقادیر تعادلی پایای متغیرهای مدل استخراج می‌شوند.

حل مسئله ائتلاف

معادله همیلتونی ائتلاف کشورهای واردکننده برابر است با:

$$H^B = W + \lambda_1 (-q + ex) + \lambda_2\big((1-f)q - \delta z\big). \quad (۷)$$

λ_1 و λ_2 متغیرهای هم وضعیت[2] مرتبط با معادلات (۱) و (۴) هستند. مقدار W نیز از رابطه (۵) جاگذاری می‌گردد. لازم به ذکر است که متغیرهای مسئله تابعی از زمان هستند، اما از این پس جهت سادگی (t) از مقابل متغیرها حذف شده است.

برای تعیین میزان پایای تعادلی f و τ طبق اصل بیشینه‌سازی پنتریاگین باید مشتق مرتبه اول[3]، معادلات الحاقی[4] و شرایط تراگردی[5] مربوط به هر متغیر محاسبه شود که به تفکیک متغیرها، به شرح هر یک از این مراحل پرداخته می‌شود.

با استفاده از شرط مرتبه اول مشتق معادله همیلتونی نسبت به τ، مقدار λ_1 طبق رابطه (۸) به‌دست می‌آید:

$$\frac{dH^B}{d\tau} = 0 \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 - f\,\lambda_2 + \tau. \quad (۸)$$

با استفاده از معادله الحاقی و جایگذاری رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$\dot{\lambda_1} = r\lambda_1 - \frac{dH^B}{dx} \Rightarrow \dot{\lambda_1} = -(e-r)\,(\lambda_2 - f\,\lambda_2 + \tau). \quad (۹)$$

از رابطه (۸) نسبت به زمان مشتق گرفته می‌شود و در رابطه (۹) قرار می‌گیرد تا $\dot{\tau}$ به‌دست آید:

$$\dot{\tau} = \dot{f}\lambda_2 - (1-f)\left(\dot{\lambda_2} - \lambda_2(e-r)\right) - \tau(e-r). \quad (۱۰)$$

λ_1 و $\dot{\lambda_2}$ در ادامه به‌دست آمده و در رابطه (۱۰) جاگذاری شده است.

اکنون شرط مرتبه اول برای معادله همیلتونی نسبت به f تشکیل می‌گردد:

$$\frac{dH^B}{df} = 0 \Rightarrow f = -\lambda_2(a - p - \tau). \quad (۱۱)$$

معادله‌ی الحاقی مربوط به λ_2، به‌صورت رابطه (۱۲) خواهد بود:

$$\dot{\lambda_2} = r\lambda_2 - \frac{dH^B}{dz} \Rightarrow \dot{\lambda_2} = (\delta + r)\lambda_2 + 2hz. \quad (۱۲)$$

حال از معادله (۱۱) نسبت به زمان مشتق گرفته و با استخراج λ_2 از همین رابطه و استفاده از

1. Pontryagin's Maximum Principle
2. Co-state
3. First Order Condition
4. Adjoint Equations
5. Transversality Condition

رابطه (۱۲)، رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد:

$$\dot{f} = \frac{((\delta+r)(a-p+\tau)-\dot{p}-\dot{\tau})f+2hz(a-p-\tau)^2}{a-p-\tau}. \quad (۱۳)$$

با جایگذاری (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) در رابطه (۱۰)، معادله پویای تغییرات τ در طول زمان به‌دست خواهد آمد. شرایط تراگردی این مسئله نیز عبارت است از: $\lim_{t\to\infty} \lambda_1 x = 0$ و $\lim_{t\to\infty} \lambda_2 z = 0$.

پس از استخراج معادلات پویای کنترلی ائتلاف، در ادامه به حل مسئله کارتل پرداخته می‌شود.

حل مسئله کارتل

معادله همیلتونی کارتل به‌صورت رابطه (۱۴) است:

$$H^C = \pi + \lambda_3(-q+ex) + \lambda_4\big((1-f)q - \delta z\big). \quad (۱۴)$$

λ_3 و λ_4 متغیرهای هم وضعیت مرتبط با معادلات (۱) و (۴) بوده و π نیز از رابطه (۲) جاگذاری می‌شود.

شرط مرتبه اول نسبت به p و معادله الحاقی مرتبط با λ_4 به‌ترتیب برابرند با:

$$\frac{dH^C}{dp} = 0 \Rightarrow p = \frac{(a-\tau)(1+2c)+\lambda_3-\lambda_4(1-f)}{2(1+c)}, \quad (۱۵)$$

$$\dot{\lambda_4} = r\lambda_4 - \frac{dH^C}{dz} \Rightarrow \dot{\lambda_4} = (\delta+r)\lambda_4. \quad (۱۶)$$

حال با مشتق‌گیری از رابطه (۱۵) نسبت به t و استخراج λ_4 از همین رابطه و جایگذاری λ_4 و $\dot{\lambda_4}$ در مشتق، معادله پویای کنترلی قیمت به‌دست می‌آید:

$$\dot{p} = \frac{\Big(\dot{f} - (1-f)(\delta+r)\Big)\Big(\lambda_3 + a - \tau - 2\big(p - c(a-p-\tau)\big) + \dot{\lambda_3}(1-f)\Big) - (1-2c)(1-f)\dot{\tau}}{2(1+c)(1-f)}. \quad (۱۷)$$

λ_3 و $\dot{\lambda_3}$ در ادامه به‌دست آمده و در رابطه (۱۷) جاگذاری می‌شود.

مقدار بهینه e نیز از شرط مرتبه اول معادله همیلتونی کارتل نسبت به e به‌دست می‌آید:

$$\frac{dH^C}{de} = 0 \Rightarrow e = \frac{\lambda_3 x}{2b}. \quad (۱۸)$$

معادله الحاقی متناظر با λ_3 نیز برابر است با:

$$\dot{\lambda_3} = r\lambda_3 - \frac{dH_\pi}{dx} \Rightarrow \dot{\lambda_3} = (r-e)\lambda_3. \quad (۱۹)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۸) و به‌ترتیبی که در مورد سایر متغیرهای کنترلی اشاره شد، رابطه (۲۰) حاصل می‌گردد:

$$\dot{e} = b^2 e\left(r - \frac{(a-p-\tau)}{x}\right). \quad (۲۰)$$

شرایط تراگردی $\lim_{t\to\infty} \lambda_3 x = 0$ و $\lim_{t\to\infty} \lambda_4 z = 0$ برقرار است.

معادلات دیفرانسیلی (۱۰)، (۱۳)، (۱۷) و (۲۰) به همراه معادلات (۱) و (۴)، سیستم دینامیکی[1] مسئله را تشکیل می‌دهند که با حل همزمان و برابر صفر قرار دادن آنها به جواب تعادلی وضعیت پایدار[2] دست پیدا خواهد شد. نتیجه این حل، مقادیر تعادلی متغیرهای e، f، p، τ و z برحسب x به صورت رابطه (۲۱ تا ۲۵) به‌دست می‌آید:

$$e = r, \quad (۲۱)$$

$$f = \frac{2r^2hx^2}{\delta(\delta+r)+2r^2hx^2}, \quad (۲۲)$$

$$p = a - \tau - rx, \quad (۲۳)$$

$$\tau = \frac{2(1+b^2)\delta rh(\delta+r)x}{(\delta(\delta+r)+2r^2hx^2)^2}, \quad (۲۴)$$

$$z = \frac{r(\delta+r)x}{\delta(\delta+r)+2r^2hx^2}. \quad (۲۵)$$

یافتن مقدار تعادلی متغیر x به‌دلیل پیچیدگی معادلات و وجود چند جواب برای آن، به‌صورت پارامتری میسر نیست. به همین دلیل، در ادامه برای تحلیل نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی استفاده می‌گردد.

تحلیل عددی

همان‌گونه که اشاره شد، به‌دلیل وجود چند ریشه برای x و وابستگی سایر متغیرها به این متغیر، نمی‌توان جواب صریح برحسب پارامترهای مدل استخراج نمود و نیاز به تحلیل عددی جهت بررسی نتایج مدل است. از این‌رو، در این پژوهش، با تخصیص مقادیر قابل قبول به پارامترهای مدل، به بررسی وضعیت تعادل‌های استخراجی مسئله پرداخته می‌شود.

مقدار پارامترهای c و δ را در این بخش ثابت و به‌ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود.

1. Dynamical System
2. Steady State Equilibrium

در ادامه، تحلیل تعادل‌های مدل را بر اساس مقادیر مختلف پارامترهای a، b، h و r انجام داده و اثر تغییرهای هر یک از این پارامترها بر نتیجه تعادل بررسی می‌گردد. در هر مرحله برای تعیین تأثیر تغییرات هریک از پارامترها، مقدار یک پارامتر را تغییر داده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه‌های کلی تحلیل عددی نشان می‌دهد که در محدوده اختصاص داده شده به پارامترها، بازی بین کارتل و ائتلاف دارای دو تعادل است که یک مقدار تعادلی (تعادل اول) بسیار به صفر نزدیک است و حکایت از تهی شدن ذخایر سوخت‌های فسیلی دارد. درحالی‌که، مقدار تعادلی دیگر (تعادل دوم) به‌طور معنی‌داری از صفر فاصله دارد. علت وجود تعادل دوم نیز به‌دلیل کشف ذخایر جدید است که منجر می‌گردد ذخایر سوخت‌های فسیلی در طول زمان تهی نگردند. لازم به ذکر است که هر دو تعادل پایدار[1] بوده و نیز در شرایط خاص و با در نظر گرفتن محدوده‌های دیگری از پارامترها ممکن است تعداد تعادل‌ها تغییر یابد.

اثر تغییرات اندازه بازار

در این قسمت با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، اثر تغییرات اندازه بازار، a بر تعادل‌های بازی بررسی می‌گردد. بدین منظور، مقادیر پارامترهای b، h و r ثابت و به‌ترتیب برابر ۰/۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ قرار داده و نتیجه تعادل برای سه مقدار مختلف a به‌دست می‌آید. جدول (۱) نشان‌دهنده نتیجه است. همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است، در تعادل اول، با افزایش a میزان ذخیره منبع سوخت فسیلی در حالت مانا کاهش می‌یابد که این امر به‌دلیل افزایش تقاضای ناشی از بزرگ شدن اندازه بازار در فرآیند رسیدن به حالت مانا است. در وضعیت مانا به‌دلیل کوچک شدن ذخیره منبع، مقدار q نیز کاهش و به‌تبع آن p افزایش می‌یابد. برآیند این تغییرات موجب کاهش سود کارتل می‌گردد. با کاهش یافتن عرضه و ذخیره منبع، انباشت آلودگی نیز کاهش یافته و ائتلاف جهت جلوگیری از کاهش بیشتر مطلوبیت مصرف‌کنندگان قوانین زیست‌محیطی را سهل‌تر نموده و بدین ترتیب، با افزایش a مقادیر تعادلی τ و f کاهش می‌یابند.

1. Stable

جدول ۱: اثر تغییرات پارامتر a بر تعادل‌های بازی

	تعادل اول			تعادل دوم		
	a = ۱	a = ۲	a = ۴	a = ۱	a = ۲	a = ۴
x	۰/۰۲۶	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۵۱۶	۱/۳۲۱	۲۶/۵۷۲
z	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۲۵۲	۰/۵۷۷	۰/۲۲۲
τ	۰/۰۴۷	۰/۰۲۲	۰/۰۱۱	۰/۸۷۴	۱/۷۸۳	۰/۰۱۳
f	۰/۵۸×۱۰$^{-۴}$	۰/۱۳×۱۰$^{-۴}$	۰/۳۳×۱۰$^{-۵}$	۰/۰۲۲	۰/۱۲۷	۰/۹۸۳
e	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
p	۰/۹۵۲	۱/۹۷۷	۳/۹۸۹	۰/۱۰۰	۰/۱۵۱	۲/۶۵۸
q	۰/۰۰۱	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۳۱×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۲۶	۰/۰۶۶	۱/۳۲۹
w	۰/۱۹×۱۰$^{-۴}$	۰/۴۴×۱۰$^{-۵}$	۰/۱۱×۱۰$^{-۵}$	۰/۰۰۷	۰/۰۲۹	۰/۴۰۴
π	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	۲/۶۴۹

منبع: محاسبات پژوهشگر

اما در تعادل دوم، افزایش اندازه بازار منجر به افزایش ذخیره منبع و نیز افزایش عرضه سوخت شده است. این امر می‌تواند ناشی از سرعت رسیدن به وضعیت مانا در اثر افزایش a باشد. در واقع، درصورتی‌که تعادل با سرعت بیشتری به وضعیت مانا برسد، در فرآیند رسیدن به حالت مانا میزان کمتری از ذخیره منبع خالی شده و ذخیره سوخت بیشتری در تعادل مانا باقی خواهد ماند. همچنین، لازم به ذکر است، به‌دلیل درجه دوم بودن تابع هزینه استخراج و به‌تبع آن صعودی بودن هزینه نهایی استخراج، با بزرگ شدن اندازه بازار عرضه سوخت‌های فسیلی به میزان کمتری در قیاس با اندازه بازار افزایش می‌یابد که این امر نیز می‌تواند منجر به افزایش ذخایر سوخت‌های فسیلی شود، زیرا با توجه به صعودی بودن هزینه نهایی استخراج، کارتل متناسب با اندازه بازار، به عرضه سوخت نمی‌پردازد. از سوی دیگر، در این تعادل، با بزرگ شدن اندازه بازار، انباشت آلودگی (z)، به‌دلیل افزایش عرضه سوخت‌های فسیلی ابتدا افزایش یافته و به دنبال این افزایش آلودگی، ائتلاف مالیات (τ)، بیشتری را به‌منظور کاهش آلودگی وضع می‌نماید. اما در ادامه، به‌دلیل صعودی بودن هزینه نهایی استخراج عرضه سوخت‌های فسیلی به میزان کمتری افزایش یافته و متعاقب آن انباشت آلودگی نیز کاهش می‌یابد. ائتلاف نیز همراه با کاهش انباشت آلودگی نرخ مالیات را کاهش می‌دهد. با افزایش اندازه بازار، ائتلاف ترجیح می‌دهد برای مقابله با خسارت‌های ناشی از افزایش آلودگی علاوه بر مالیات، میزان فعالیت‌های خود برای کاهش آلودگی (f)، را نیز افزایش دهد. در این تعادل قیمت نیز با افزایش اندازه

بازار افزایش می‌یابد. علت افزایش قیمت به صعودی بودن هزینه نهایی ارتباط خواهد داشت.

اثر تغییرات هزینه اکتشاف

در این قسمت بررسی می‌گردد درصورتی‌که به هر دلیلی هزینه اکتشاف (b)، افزایش یا کاهش داشته باشد، چه اثری بر نتیجه تعادل‌های بازی خواهد داشت. از این‌رو، مقادیر پارامترهای a، h و r ثابت و به‌ترتیب برابر ۲، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ قرار می‌گیرد و نتیجه تعادل برای سه مقدار مختلف b به‌دست می‌آید.

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده، در تعادل اول این بخش که در آن ذخیره مانای منبع نزدیک صفر است، با افزایش، مقدار تعادلی مانای ذخایر افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به علت کمتر شدن زمان رسیدن به حالت مانا باشد که در نتیجه آن و در مرحله گذار به حالت مانا مقادیر کمتری از منبع استخراج شده و میزان ذخایر مانای منبع اندکی بیشتر خواهد بود. با افزایش ذخایر مانای منبع، میزان استخراج، سود کارتل، انباشت آلودگی و متغیرهای ابزاری زیست‌محیطی نیز افزایش می‌یابند و برآیند این تغییرات سبب افزایش رفاه می‌گردد.

جدول ۲: اثر تغییرات پارامتر b بر تعادل‌های بازی

	تعادل اول			تعادل دوم		
	b=۰/۲	b=۰/۲۵	b=۰/۳	b=۰/۲	b=۰/۲۵	b=۰/۳
x	۰/۰۱۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵	۱/۳۷۶	۱/۳۲۱	۱/۲۶۲
z	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۵۹۴	۰/۵۷۷	۰/۵۵۷
τ	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۰۲۸	۱/۷۷۹	۱/۷۸۳	۱/۷۸۷
f	$۰/۸۵\times۱۰^{-۵}$	$۰/۱۳\times۱۰^{-۴}$	$۰/۱۹\times۱۰^{-۴}$	۰/۱۳۶	۰/۱۲۷	۰/۱۱۷
e	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
p	۱/۹۸۲	۱/۹۷۷	۱/۹۷۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۱	۰/۱۵۰
q	$۰/۵۰\times۱۰^{-۳}$	$۰/۶۳\times۱۰^{-۳}$	$۰/۷۶\times۱۰^{-۳}$	۰/۰۶۹	۰/۰۶۶	۰/۰۶۳
w	$۰/۲۶\times۱۰^{-۵}$	$۰/۴۴\times۱۰^{-۵}$	$۰/۶۹\times۱۰^{-۵}$	۰/۰۲۷	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰
π	$۰/۵۰\times۱۰^{-۳}$	$۰/۶۳\times۱۰^{-۳}$	$۰/۷۵\times۱۰^{-۳}$	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶

منبع: محاسبات پژوهشگر

در تعادل دوم با افزایش b، میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش هزینه فعالیت‌های اکتشافی انگیزه اکتشاف جدید کاهش می‌یابد. متعاقب این کاهش انگیزه، میزان

تعادلی مانای ذخایر، استخراج، سود کارتل و انباشت آلودگی نیز کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش به‌دلیل کاهش عرضه سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن کاهش انباشت آلودگی، ائتلاف دلیلی برای افزایش دادن فعالیت‌های خود برای کاهش آلودگی نمی‌بینند. بنابراین، فعالیت‌های کاهش آلودگی خود را کاهش می‌دهد. نکته مهم افزایش میزان مالیات اصلاحی ائتلاف است که علی‌رغم کاهش میزان استخراج رخ داده است. به نظر می‌رسد، ائتلاف با توجه به کاهش ذخایر، جهت حفظ توان مصرف ذخایر منبع برای دوره‌های طولانی‌تر، اقدام به افزایش مالیات اصلاحی وضع شده بر مصرف سوخت می‌نماید. در پاسخ به این راهبرد، کارتل نیز اقدام به کاهش قیمت نموده است. در مجموع، کاهش آثار زیان‌بار آلودگی اثرات مثبت بزرگ‌تری بر رفاه مصرف‌کنندگان در مقابل اثرات منفی ناشی از کاهش مصرف داشته است و از این‌رو، رفاه افزایش یافته است.

اثر تغییرات خسارت‌های آلودگی

در این بخش اثر تغییر ضریب اثرات منفی آلودگی *(h)* که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی نظیر مسایل اقلیمی، فناوری و دیگر موارد باشد، بررسی می‌گردد. همچون بخش‌های پیشین، مقادیر دیگر پارامترها، a، b و r را ثابت و به‌ترتیب برابر ۲، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ قرار داده و نتیجه تعادل برای مقادیر مختلف h به‌دست می‌آید.

جدول ۳: اثر تغییرات پارامتر h بر تعادل‌های بازی

	تعادل اول			تعادل دوم		
	h= ۰/۲	h= ۰/۲۵	h= ۰/۳	h= ۰/۲	h= ۰/۲۵	h= ۰/۳
x	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۱/۷۸۰	۱/۳۲۱	۱/۰۵۷
z	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۷۳۵	۰/۵۷۷	۰/۴۷۶
τ	۰/۰۱۸	۰/۰۲۲	۰/۰۲۷	۱/۷۱۹	۱/۷۸۳	۱/۸۱۸
f	۰/۱۱×۱۰$^{-۴}$	۰/۱۳×۱۰$^{-۴}$	۰/۱۶×۱۰$^{-۴}$	۰/۱۷۴	۰/۱۲۷	۰/۱۰۱
e	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
p	۱/۹۸۱	۱/۹۷۷	۱/۹۷۲	۰/۱۹۲	۰/۱۵۱	۰/۱۲۹
q	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۸۹	۰/۰۶۶	۰/۰۵۳
W	۰/۳۵×۱۰$^{-۵}$	۰/۴۴×۱۰$^{-۵}$	۰/۵۲×۱۰$^{-۵}$	۰/۰۳۴	۰/۰۲۹	۰/۰۲۵
π	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۱۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵

منبع: محاسبات پژوهشگر

وقتی h، پارامتر مربوط به خسارت آلودگی، افزایش می‌یابد، میزان خسارتی که به‌خاطر آلودگی به مصرف‌کنندگان وارد می‌گردد افزایش می‌یابد که این افزایش خسارت باعث کاهش رفاه ائتلاف می‌شود. بنابراین، ائتلاف برای جبران این موضوع، می‌تواند از دو ابزاری که در اختیار دارد استفاده کند. اگر ائتلاف از ابزار مالیات (τ)، استفاده کند و مالیات را افزایش دهد، این امر باعث می‌گردد عرضه سوخت و به‌تبع آن انتشار و انباشت آلودگی کاهش یابد. اما کاهش عرضه سوخت‌های فسیلی علاوه بر اینکه منجر به کاهش آلودگی می‌شود منجر به کاهش مازاد مصرف‌کننده[1] نیز می‌گردد، زیرا با کاهش عرضه سوخت‌های فسیلی مطلوبیت مصرف‌کنندگان که از مصرف سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود، کاهش می‌یابد. اگر ائتلاف برای کاهش خسارت‌های آلودگی، فعالیت‌های کاهش آلودگی (f) را افزایش دهد، اگرچه ممکن است عرضه سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن مازاد مصرف‌کنندگان ثابت باقی بماند، اما چون این فعالیت‌ها هزینه‌هایی فزاینده را برای ائتلاف در پی دارد و از آنجایی که این هزینه‌ها در تابع رفاه ائتلاف منظور می‌گردد، منجر به کاهش رفاه ائتلاف می‌گردد. بنابراین، ائتلاف باید با سنجش اثرات مثبت و منفی مربوط به متغیرهای کنترلی‌اش، به‌طور مناسب اقدام به تغییر این متغیرها نماید تا رفاه بیشتری را برای آن به‌دنبال داشته باشد. همان‌گونه که در جدول (۳) مشخص است، در هر دو تعادل با افزایش ضریب خسارت، ائتلاف اقدام به افزایش مالیت نموده است. اما متغیر مربوط به جذب انتشارات آلاینده‌ها در تعادل اول افزایش و در تعادل دوم کاهش یافته است. سایر متغیرها در تعادل اول تغییر محسوسی در اثر تغییر ضریب خسارت نداشته‌اند. اما در تعادل دوم، با افزایش مالیات میزان عرضه سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد. کاهش عرضه سوخت‌های فسیلی منجر به کاهش انتشار آلودگی و به دنبال آن کاهش انباشت آلودگی می‌گردد. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش h، میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی نیز کاهش می‌یابد که علت این امر می‌تواند به زمان رسیدن به حالت مانا مرتبط باشد.

اثر تغییر نرخ بهره

یکی از مهم‌ترین نتایجی که از این پژوهش حاصل می‌گردد نتایج مربوط به تغییر نرخ بهره است. از این‌رو، مقادیر پارامترهای a، b و h ثابت و به‌ترتیب برابر ۲، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ قرار داده و نتیجه تعادل برای مقادیر مختلف نرخ بهره به‌دست می‌آید.

1. Consumer Surplus

جدول ۴: اثر تغییر نرخ بهره بر تعادل‌های بازی

	تعادل اول			تعادل دوم		
	r= ۰/۰۱	r=۰/۰۵	r=۰/۱	r=۰/۰۱	r=۰/۰۵	r=۰/۱
x	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۰/۰۲۶	۴/۶۴۲	۱/۳۲۱	–
z	۰/۲۵×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۰۶	۰/۰۲۶	۰/۴۲۳	۰/۵۷۷	–
τ	۰/۰۰۱	۰/۰۲۲	۰/۰۶۹	۱/۸۶۰	۱/۷۸۳	–
f	۰/۲۸×۱۰$^{-۷}$	۰/۱۳×۱۰$^{-۴}$	۰/۱۷×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۸۹	۰/۱۲۷	–
e	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۵	–
p	۱/۹۹۹	۱/۹۷۷	۱/۹۲۸	۰/۰۹۴	۰/۱۵۱	–
q	۰/۲۵×۱۰$^{-۴}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۰۳	۰/۰۴۶	۰/۰۶۶	–
W	۰/۱۵×۱۰$^{-۷}$	۰/۴۴×۱۰$^{-۵}$	۰/۱۴×۱۰$^{-۴}$	۰/۰۳۹	۰/۰۲۹	–
π	۰/۲۵×۱۰$^{-۴}$	۰/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	–

منبع: محاسبات پژوهشگر

همان‌طور که در جدول (۴) مشخص است با افزایش نرخ بهره، احتمال دستیابی به تعادل دوم (تعادلی که مقادیر به‌طور معنی‌داری از صفر فاصله دارند) کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش نرخ بهره کارتل نزدیک‌بین[1] شده و آینده برای او کم اهمیت می‌گردد. بنابراین، در کوتاه‌مدت عرضه سوخت را افزایش داده و بخش بیشتری از ذخایر سوخت‌های فسیلی را استخراج می‌نماید تا از درآمد حاصله با توجه به نرخ بهره‌ی بالا، حداکثر استفاده را ببرد. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ بهره بالا منجر به تهی شدن منبع در بلندمدت شده و امکان دست‌یابی به تعادلی که در بلندمدت مقادیر مثبت قابل‌توجهی از ذخایر باقی مانده باشد را از بین می‌برد و تنها تعادل باقی مانده همان تعادل اول با ذخایر نزدیک به صفر خواهد بود. زیاد شدن عرضه سوخت‌های فسیلی ناشی از افزایش نرخ بهره، منجر به افزایش انتشار و انباشت آلودگی نیز می‌گردد که افزایش f را از طرف ائتلاف در پی خواهد داشت.

1. Myopic

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش دنیایی مدل شد که در آن یک کارتل حداکثرکننده منافع ناشی از عرضه سوخت و یک ائتلاف تقاضاکننده این سوخت‌ها وجود دارد. در این مدل کارتل ضمن در اختیار داشتن میزان مشخصی از ذخایر سوخت‌های فسیلی، امکان کشف منابع جدید سوخت را نیز دارد. در مقابل هدف ائتلاف حداکثر نمودن رفاه جامعه با در نظر گرفتن اثرات خارجی زیان‌بار زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است که کارتل توجهی به آن ندارد. بدین منظور، ائتلاف سیاست‌هایی را برای کاهش این اثرات منفی به‌کار می‌گیرد که منجر به کاهش تقاضای سوخت نیز خواهد شد. از این‌رو، تضاد منافع میان کارتل و ائتلاف شکل گرفته و این دو وارد یک بازی هم‌زمان با یکدیگر می‌شوند. به‌دلیل ماهیت پویا بودن ذخایر سوخت‌های فسیلی و انباشت آلودگی، بازی بین آنها در قالب یک بازی پویا و با بهره‌گیری از راهبرد حلقه باز مدل شد.

نتیجه مهمی که از حل این مدل به‌دست آمد، استخراج دو تعادل پایدار متفاوت در بازه‌های بزرگی از پارامترها است. یک تعادل بسیار به صفر نزدیک است و حکایت از تهی شدن ذخایر سوخت‌های فسیلی دارد. اما مقدار تعادلی دیگر به‌طور معنی‌داری از صفر فاصله داشته و بیانگر وجود مقادیر مثبت قابل توجه از ذخایر منبع در بلندمدت است.

تحلیل عددی این مطالعه با در نظر گرفتن مقادیر قابل‌قبول برای پارامترهای مدل نشان می‌دهد که در بلندمدت با افزایش اندازه بازار، ذخایر سوخت‌های فسیلی و میزان عرضه آنها افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش هزینه‌های اکتشاف، سبب کاهش انگیزه‌های اکتشاف و در پی آن کاهش میزان ذخایر و عرضه سوخت‌های فسیلی خواهد شد. در صورت افزایش اثرگذاری منفی آلودگی ناشی از مصرف سوخت بر رفاه مصرف‌کنندگان، ائتلاف برای مقابله با این امر اقدام به افزایش مالیات جهت کاهش مصرف می‌نماید. بررسی اثر تغییر نرخ بهره بر تعادل‌های بلندمدت به‌دست آمده نیز نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بهره سرعت استخراج از منبع افزایش یافته و ذخایر سوخت به سمت تهی شدن پیش می‌روند. در چنین شرایطی، تنها تعادل بلندمدت ممکن همان تعادل اول با ذخایر نزدیک به صفر است.

منابع

ب) انگلیسی

Lambertini, L. (2014). Exploration for Nonrenewable Resources in a Dynamic Oligopoly: an Arrovian Result. *International Game Theory Review*, 16(02), pp. 1-11

Liski, M. & Tahvonen, O. (2004). Can Carbon Tax Eat OPEC's Rents? *Journal of Environmental Economics and Management*, 47(1), pp.1-12

Tahvonen, O. (1995). International CO2 Taxation and the Dynamics of Fossil Fuel Markets. *International Tax and Public Finance*, 2(2), pp.261-278

Tahvonen, O. (1996). Trade with Polluting Nonrenewable Resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, 30(1), pp.1-17

Wirl, F. (1995). The Exploitation of Fossil Fuels Under the Threat of Global Warming and Carbon Taxes: A Dynamic Game Approach. *Environmental and Resource Economics*, 5(4), pp.333-352.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی