

دانشکده مهندسی انرژی

دانشگاه صنعتی شریف

عنوان:

پارادوکس بازدهی انرژی

استاد:

آقای دکتر عباس رجبی قهنویه

نگارندگان :

محمد شریفیان، شایان محمددینی

زمستان ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## چکیده

بهبود بازدهی انرژی در بسیاری از کشورها بخش مهمی از استراتژی کاهش مصرف انرژی و مقابله با گرمایش جهانی است. این مبتنی بر این ایده است که بهبود بازدهی انرژی منجر به کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. ولی طبق تحقیقات دانشمندان مختلف، ارتقای بازدهی انرژی، بدون اقدامات اضافی و اخذ تمهیدات لازم، لزوماً باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی نمی‌شود یا در هر صورت، کاهش مصرف انرژی متناسب با بهبود بازدهی نیست. لازم است اقدامات بهره‌وری انرژی در یک زمینه گسترده‌تر صورت بگیرد، نقش آن در سیاست انرژی تعریف شود و اقدامات اضافی برای به حداقل رساندن اثر بازگشتی در نظر گرفته شود. این حاکی از یک هدف و قصد صریح برای کاهش مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها در هنگام اعمال اقدامات بازدهی انرژی است.

روش انجام تحقیق در این پروژه به صورت مطالعه و بررسی مقالات و کتاب‌های متفاوت از دانشمندان و پژوهشگرانی که در این زمینه تحقیق و مطالعه نموده‌اند، می‌باشد. در ادامه این مقاله به این نتیجه رسیده‌ایم که در اکثر مواردی که اقدام به افزایش بازدهی تجهیزات یا ساختارهای گوناگون در بخش انرژی می‌کنیم، شاهد نوعی پارادوکس در مصرف (افزایش مصرف انرژی در عوض کاهش مصرف آن) یا به اصطلاح علمی، شاهد پارادوکس بازدهی انرژی (پارادوکس جونز) هستیم که به دلیل اثر بازگشتی (rebound effect) می‌باشد که انواع این اثر بازگشتی و مثال‌های متفاوتی از این موضوع را بیان کرده‌ایم. و در نهایت بر اساس بررسی‌هایی که انجام داده‌ایم به این نتیجه رسیده‌ایم که اصل افزایش بازدهی برای کاهش مصرف کاملاً صحیح می‌باشد به شرطی که عامل وقوع پارادوکس بازدهی انرژی، یعنی اثر بازگشتی، با وضع قوانین و اصلاحاتی، کنترل گردد. که کنترل اثر بازگشتی با اعمال روش‌های گوناگونی از جمله وضع مالیات بر مصرف انرژی و آموزش و فرهنگ سازی و ... قابل حصول می‌باشد. در نظر گرفتن همه این جوانب می‌تواند به اصلاح سیاست ملی انرژی منجر شود. اقدامات سیاستی برای حمایت از کارایی و بازدهی بالاتر ضروری

است، اما اقدامات اضافی نیز برای کنترل اثر بازگشتی لازم است. بنابراین یک چارچوب سیاست انرژی جدید باید با در نظر گرفتن اقدامات سنتی بهبود بهره‌وری انرژی و اقدامات تکمیلی برای جلوگیری از عوارض جانبی ناخواسته ایجاد شود.

**کلمات کلیدی:** انرژی، کاهش مصرف انرژی، پارادکس بازدهی انرژی، پارادوکس جونز، اثر بازگشتی، سیاست‌های انرژی، مالیات، مدلسازی انرژی

## فهرست مطالب

۱	چکیده
۱	مقدمه
۲	پارادوکس‌های پنهان در زندگی روزمره
۵	مقدمه‌ای بر پارادوکس بازدهی انرژی
۱۰	اثر بازگشتی چیست؟
۱۳	پارادوکس جونز و تکامل موتورهای بخار
۱۷	رابطه اثر بازگشتی و پارادوکس جونز
۱۸	نحوه پاسخ به پارادوکس بازدهی انرژی (پارادوکس جونز)
۱۹	افزایش کارایی خوب است یا بد؟
۲۱	مدلسازی پارادوکس انرژی
۲۶	نتایج عددی مدلسازی
۲۹	آیا می‌شود اثر بازگشتی را از بین برد؟
۳۰	پارادوکس انرژی در صنعت برق ایران
۳۵	فرض خزوم-بروکس
۳۵	نتیجه‌گیری
۴۰	منابع و مراجع

## فهرست اشکال

- شکل (۱)، نتایج تحقیق پیرامون وضعیت ویتامین D در بین مردم کشور لبنان در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۷..... ۴
- شکل (۲)، پیش‌بینی هوبرت از میزان تولید نفت در ایالات متحده آمریکا..... ۷
- شکل (۳)، پیش‌بینی میزان تولید نفت در جهان..... ۸
- شکل (۴)، اثرات بازگشتی مستقیم و غیر مستقیم جهت مصرف سوخت در جامعه..... ۱۲
- شکل (۵)، اثرات بازگشتی مستقیم و غیر مستقیم جهت تولید سوخت مورد نیاز ..... ۱۳
- شکل (۶)، کاهش قیمت سوخت، تقاضا جهت استفاده بیشتر و سفر با خودروهایی شخصی بالا می‌رود..... ۱۵
- شکل (۷)، تخصیص افزایش کارایی در بهبود رفاه اجتماعی و کاهش تخریب محیط زیست..... ۲۰
- شکل (۸)، نرخ تاخیر در سرمایه‌گذاری (T) به عنوان تابعی از نرخ میانگین رسیدن به تکنولوژی جدید جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی (۸)..... ۲۶
- شکل (۹)، نرخ تاخیر در سرمایه‌گذاری (T) به عنوان تابعی از حد بالای نرخ جهش در بهره‌وری انرژی  $\bar{u}$ ..... ۲۷
- شکل (۱۰)، وابستگی زمان تاخیر در سرمایه‌گذاری به پارامترهای استاتیک مدل..... ۲۸
- شکل (۱۱)، یارانه انرژی در کشورهای مختلف در سال ۲۰۱۹ میلادی (IEA)..... ۳۱
- شکل (۱۲)، منحنی رفاه جامعه بر حسب نرخ یارانه مصرفی برق..... ۳۴
- شکل (۱۳)، پیش‌بینی تقاضای انرژی در جهان تا سال ۲۰۳۰..... ۳۸

## مقدمه

در چند دهه اخیر، سیاست انرژی و آب و هوا در دستور کار جهانی قرار داشته است. دولت‌ها همواره تلاش زیادی برای سیاست‌های ملی افزایش بازدهی انرژی، هم در بخش تولیدی و هم برای خانوارها، به عنوان بخشی از راه حل مشکلات زیست‌محیطی و انرژی انجام می‌دهند. این دستاوردها در افزایش بازدهی، که تا حدی ناشی از پیشرفت فناوری است، به ارتقای رشد اقتصادی و در عین حال کاهش مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها در جو کمک کرده است. با این حال، برخی مواقع یک اثر بازگشتی رخ می‌دهد، که افزایش مصرف انرژی به دنبال بهبود بازدهی انرژی است. در موارد شدید، زمانی که بهبود بازدهی انرژی منجر به افزایش مصرف کلی انرژی می‌شود، به این پارادوکس بازدهی انرژی یا پارادوکس جونز می‌گویند. هدف اصلی این شاخه‌های سیاست تکمیلی، کاهش مصرف انرژی، به ویژه مصرف سوخت فسیلی، به منظور کاهش اثرات نامطلوب بر محیط‌زیست بوده است. روش اصلی کاهش مصرف انرژی، افزایش بازدهی فناوری‌های روزمره به جای تشویق شهروندان برای کاهش مصرف است. در حالی که این دو رویکرد ممکن است در ابتدا دو روی یک سکه به نظر برسند، اقتصاددانان همچنان به بحث در مورد این پرونده ادامه می‌دهند. همانطور که پیشتر بیان شد، بسیاری بر این باورند که افزایش بازدهی فناوری در واقع منجر به مصرف انرژی بیشتر می‌شود که این همان بیان پارادوکس بازدهی انرژی (پارادوکس جونز) می‌باشد. این بدان معناست که ارتقای بازدهی انرژی، بدون اقدامات اضافی و اخذ تمهیدات لازم، لزوماً باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی نمی‌شود یا در هر صورت، کاهش مصرف انرژی متناسب با بهبود بازدهی نیست. لازم است اقدامات بهره‌وری انرژی در یک زمینه گسترده‌تر در نظر گرفته شود، نقش آن در سیاست انرژی تعریف شود و اقدامات اضافی برای به حداقل رساندن اثر بازگشتی در نظر گرفته شود.

ما در این پروژه به دنبال بررسی این موضوع می‌باشیم، زیرا این موضوع اهمیت بسیار زیادی در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی برای کشورهای گوناگون دارد به طوری که با توجه به سرمایه‌گذاری‌های بسیار زیادی که همه ساله برای بهبود بازدهی و راندمان سیستم‌های مصرف کننده انرژی انجام می‌گردد، اگر اثر بازگشتی و پارادوکس بازدهی انرژی که دو اصل کاملاً مرتبط به یکدیگر می‌باشند، در نظر گرفته نشوند، تمام زحمات و هزینه‌های صورت گرفته بی‌ثمر می‌مانند زیرا ممکن است مصرف انرژی به تبع افزایش بازدهی انرژی نه تنها کمتر نگردد، بلکه افزایش هم بیابد. که این موضوع بیانگر اهمیت بررسی پارادوکس بازدهی انرژی و اثر بازگشتی می‌باشد.

با توجه به اهمیت این موضوع که پیشتر نیز به طور کامل بیان گردید است، ما در این تحقیق به دنبال معرفی دقیق پارادوکس بازدهی انرژی و اثر بازگشتی و مثال‌های شاخص از این موضوع، از زندگی روزمره تا مسائل پیچیده‌تر مانند یارانه‌های انرژی، می‌باشیم و همچنین به بررسی روش‌های موجود برای حل این مشکل و کاهش آن در مواقعی که افزایش بازدهی انرژی داریم می‌پردازیم و همچنین مطالعات پیشینیان را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

## پارادوکس‌های پنهان در زندگی روزمره

نبض دنیای مدرن و امکاناتی که با آن همراه است، کنترل دما که در یک روز گرم و سوزان ما را خنک می‌کند یا در یک صبح سرد گزنده ما را گرم می‌کند، برقی که هنگام غروب خورشید خانه‌هایمان را روشن می‌کند، ماشین‌هایی که ما را از نقطه A تا نقطه B در چند دقیقه می‌رساند و ... همه این‌ها نشان از آن دارد که مطمئناً زندگی خود را به روش‌های بی‌شماری بهبود بخشیده‌ایم. اما این نوآوری‌های بزرگ که زندگی را آسان‌تر می‌کنند، در واقع عملکرد بهینه بدن ما را سخت‌تر می‌کنند. بدن انسان نه تنها برای تحمل چالش، بلکه برای رشد در آن طراحی شده است. فیزیولوژی ما به سطوح متوسطی از ناراحتی



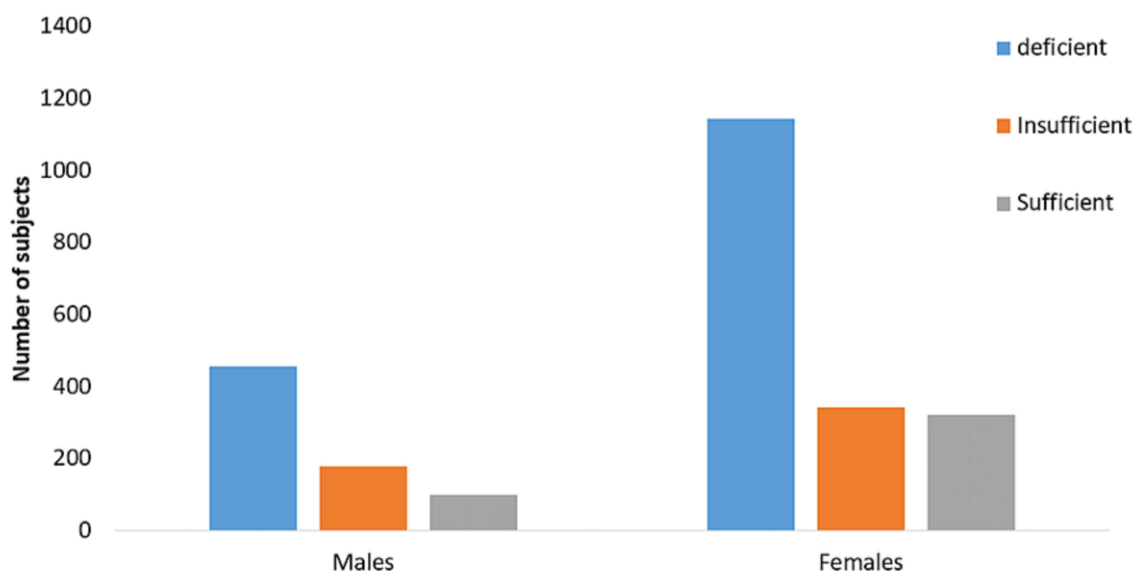
بیولوژیکی و محیطی نیاز دارد تا در بهترین حالت خود عمل کند، و این به ما بستگی دارد که بینیم بدنمان چه چالشی را می‌خواهد پیدا کند.

انتخاب‌هایی که هر روز انجام می‌دهیم می‌تواند منجر به افزایش انرژی جمعی یا برعکس، تخلیه انرژی شود. ما در این بررسی، این عوامل سبک زندگی را به شش دسته تقسیم کرده‌ایم که آنها را «شش خصوصیت» می‌نامیم: مشقت کشیدن، نور خورشید، حالت خاموشی، خواب، چالش‌های حسی و مدیریت استرس. این خبری جدیدی نیست که امروزه ما بیش از هر مقطعی در تاریخ بشریت از نظر جسمی غیرفعال هستیم و سبک زندگی کم تحرک ما بر سلامت ما تأثیر منفی می‌گذارد و ما را مستعد ابتلا به چاقی و سایر بیماری‌های متابولیک می‌کند. همان امکانات مدرنی که زندگی را لذت بخش‌تر کرده است، نشستن طولانی مدت را نیز آسان کرده است، این یک مورد از پارادوکس‌هایی انرژی در زندگی روزمره است که در زندگی مشاهده می‌کنیم. در حالی که ممکن است به نظر برسد که «حفظ انرژی» از احساس تخلیه شدن ما جلوگیری می‌کند، در واقعیت، برعکس این موضوع صادق است: شما باید از انرژی برای تولید انرژی استفاده کنید.

تحقیقات نشان می‌دهد که هر نوع حرکت مداومی که بدن شما را فعال نگه می‌دارد و ماهیچه‌ها را درگیر می‌کند، می‌تواند یک فعالیت قلبی عروقی در نظر گرفته شود. در واقع، تحقیقات گسترده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد حتی حرکات سطح پایین، مانند ضربه زدن به یک مداد یا برداشتن وسیله‌ای از روی زمین، می‌تواند به استفاده مؤثرتر از انرژی سیستم‌های بدن کمک می‌کند و مصرف انرژی را، ۳۰۰ تا ۳۵۰ کالری بیشتر کند. در فرهنگ امروزی بسیاری از مردم این ایده را درونی کرده‌اند که تناسب اندام را می‌توان تنها از طریق یک نوع فعالیت یا آموزش‌های خاص (و معمولاً گران‌قیمت) به دست آورد، اما بدن انسان طوری

طراحی نشده است که به طور مثال، ده ساعت در روز بنشینند و سپس در مدت کوتاهی و با انجام حرکات خاص، به نتیجه مطلوب دست پیدا کند.

لازم به ذکر است، یکی دیگر از موارد بسیار رایج از پارادوکس‌هایی که در زندگی روزمره با آن روبه‌رو هستیم عدم استفاده مناسب از نور خورشید است. علی‌رغم اینکه می‌دانیم برای تامین یکی از ضروری‌ترین ویتامین‌های مورد نیاز بدن هر شخصی که ویتامین D می‌باشد، باید در طول روز، دقایقی را برای این کار اختصاص بدهیم ولی با توجه به وجود مشغله‌های کاری زیاد و همچنین استفاده بیش از حد از نورهای غیرطبیعی مانند نور انواع لامپ‌ها در طول روز، از این موضوع مهم غافل می‌شویم، که این مورد نیز یکی از پارادوکس‌های انرژی در زندگی روزمره می‌باشد که در این حالت با آن روبه‌رو هستیم. برای نمونه در شکل (۱)، وضعیت ویتامین D موجود در مردم کشور لبنان در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۷ را مشاهده می‌کنید. مطابق شکل (۱)، افراد بسیار زیادی (به خصوص خانم‌ها) از کمبود ویتامین D رنج می‌برند و این مسئله در سال‌های آتی تشدید شده است [۱].



شکل (۱) - نتایج تحقیق پیرامون وضعیت ویتامین D در بین مردم کشور لبنان در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۷

## مقدمه‌ای بر پارادوکس بازدهی انرژی

سیاست انرژی یکی از مهم‌ترین مسائل پیش روی جهان امروز است. این را می‌توان به راحتی با مشاهده سه تغییر شگرف در سیاره زمین تشریح کرد:

(۱) **انفجار جمعیت انسان:** در قرن گذشته، جمعیت جهان بیش از سه برابر شده است یعنی از حدود

۱/۷ میلیارد نفر در سال ۱۹۰۰ به بیش از ۶ میلیارد نفر در سال ۲۰۰۰ میلادی رسیده است. به

طور دقیق‌تر می‌توان افزایش سرعت رشد جمعیت در بازه زیر را مشاهده کرد، که جمعیت جهان

از ۳/۵ میلیارد نفر در ابتدای دهه ۱۹۷۰ به ۶/۵ میلیارد نفر در سال ۲۰۰۵ میلادی افزایش یافته

است. تنها در ۳۵ سال، جمعیت جهان بیش از ۳ میلیارد نفر افزایش یافته است، مقداری که بیشتر

از رشد ۳۵ هزار سال گذشته جمعیت می‌باشد.

(۲) **رشد اقتصادی:** با قطعیت می‌توان گفت که رشد اقتصادی چشمگیری در قرن گذشته رخ داده

است و منجر به تشدید فرآیند جهانی شدن اقتصاد شده است. پیشرفت تکنولوژی به خوبی توانسته

است این افزایش چشمگیر در اندازه جوامع انسانی را مدیریت کند. همچنین از سال ۱۹۶۰، در

حالی که جمعیت دو برابر شده و فعالیت اقتصادی ۶ برابر، تولید مواد غذایی ۲/۵ برابر افزایش

یافته، قیمت مواد غذایی بسیار کاهش یافته، همچنین مصرف آب دو برابر شده، برداشت چوب

برای خمیر کاغذ سه برابر و تولید انرژی آبی دو برابر شده است.

(۳) **تشدید نگرانی پیرامون محیط‌زیست و منابع طبیعی:** به طور همزمان با افزایش سرسام‌آور

جمعیت و ثروت ایجاد شده در دنیا، نگرانی‌ها پیرامون تخریب محیط‌زیست و نابودی منابع طبیعی

بالا رفته است. این مسئله نشان می‌دهد که در طول ۵۰ سال گذشته، انسان‌ها اکوسیستم‌های

طبیعی را سریع‌تر و گسترده‌تر از هر دوره زمانی مشابه در تاریخ بشر، تغییر داده‌اند که منجر به از دست دادن قابل توجه و تاحد زیادی غیر قابل برگشت از سرمایه‌های طبیعی زمین، شده است. با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی این تغییرات، واضح است که مشکل اقتصادی که ناشی از نیاز برآوردن تقاضای فزاینده انرژی همراه با رعایت محیط‌زیست است، بیش از پیش، به یک ماموریت غیر ممکن تبدیل خواهد شد و در این زمینه شاهد پارادوکس‌های بازدهی انرژی خواهیم بود که در ادامه بیشتر بررسی خواهیم کرد.

در واقع، اگر قبول کنیم که افزایش مصرف منابع طبیعی با افزایش مصرف انرژی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی، مرتبط با نیاز به تولید و مصرف سرانه کالاها و خدمات بیشتر برای جمعیت بیشتری است، پس باید بپذیریم که دیر یا زود، رشد اقتصادی باید با محدودیت‌های بیوفیزیکی مواجه شود و این مسئله اجتناب‌ناپذیر است. همانطور که دالی<sup>۱</sup> بیان کرده است، رشد اقتصادی امروزه در «دنیای کامل» در حال وقوع است.

در حوزه سیاست‌های انرژی، اهمیت دو موضوع کلیدی مورد بحث قرار گرفته است:

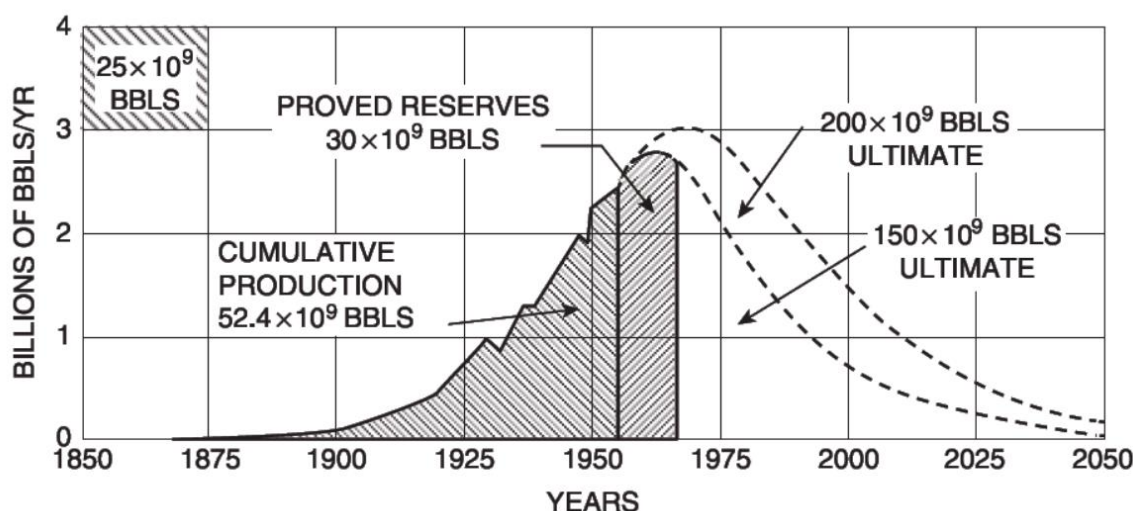
(۱) **پیک مصرف نفت:** از آنجایی که انرژی فسیلی تجدیدناپذیر است و تنها از ذخایر زیرزمینی

استخراج می‌شود، تداوم افزایش سرعت مصرف، موجب خواهد شد که دیر یا زود ذخایر نفت و گاز طبیعی تمام شود. پیک مصرف نفت، نقطه‌ای را نشان می‌دهد که در آن سرعت کشف ذخایر جدید کمتر از سرعتی است که منابع طبیعی از ذخایر موجود استخراج می‌شوند. این مسئله مشابه

1 Daly

وضعیتی است که در آن یک حساب بانکی شروع به تخلیه می‌کند زیرا هزینه (برداشت) از درآمد (سود سپرده) بیشتر است.

مطابق با شکل (۲)، در سال‌های اخیر، پیرامون زمان رسیدن به پیک مصرف نفت در جهان، پیش‌بینی‌های گسترده‌ای انجام گرفته است. به طور مثال هوبرت<sup>۲</sup> با معرفی این مفهوم در یک مقاله، در سال ۱۹۵۳ نظریه‌ای را ارائه کرد. او پیش‌بینی کرد استخراج نفت ایالات متحده در سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۱ به اوج خواهد رسید. امروزه با صراحت می‌توان گفت که این پیش‌بینی خلاف واقع است.

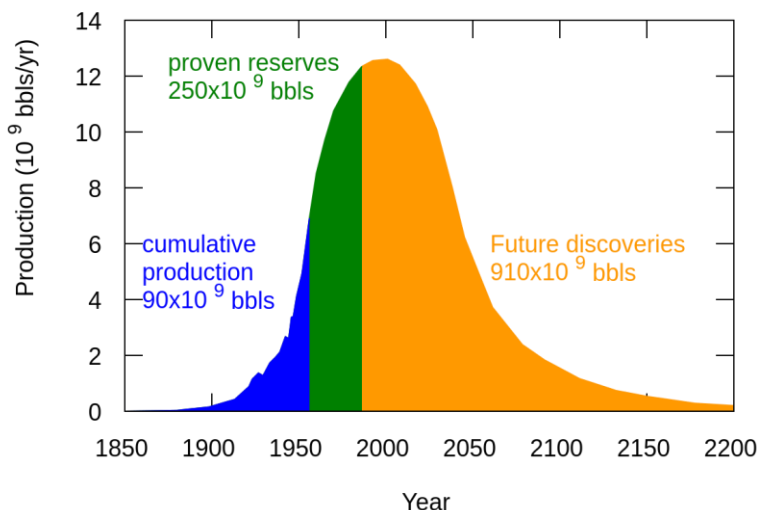


شکل (۲) - پیش‌بینی هوبرت از میزان تولید نفت در ایالات متحده آمریکا

امروزه نیز بسیاری از سازمان‌ها و نهادهای بین‌المللی سعی دارند زمان رسیدن به پیک نفتی را پیش‌بینی کنند. بسیاری بر این باوراند که پیک نفتی در سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۹ انجام شده است و اینک سیر نزولی دارد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌کنید، به علت پیشرفت فناوریهای استخراج، میزان تولید نفت

2 M. King Hubbert

بسیار بالا رفت و تولید آن در جهان به بالاترین حد خود در سال ۲۰۱۸ رسید. به دنبال سقوط تقاضای نفت در آغاز همه‌گیری کووید-۱۹ و جنگ قیمتی بین عربستان سعودی و روسیه، تعدادی از سازمان‌ها پیش‌بینی‌هایی را مبنی بر رسیدن به نقطه پیک نفتی در جهان، طی ۱۰ تا ۱۵ سال آینده ارائه کرده‌اند.



شکل (۳) - پیش‌بینی میزان تولید نفت در جهان

(۲) گرمایش زمین: افزایش میانگین دمای کره زمین که مرتبط با اثر گلخانه‌ای و ناشی از انباشت  $CO_2$  و سایر گازهای تولید شده توسط متابولیسم اقتصاد جهانی است، بر عملکرد طبیعی اکوسیستم جهان تأثیر می‌گذارد.

دو راه برای مقابله با موضوع خطرناک محدودیت‌های بیوفیزیکی که بر «رشد دائمی اقتصاد» تأثیر می‌گذارند، وجود دارد:

- با در نظر گرفتن این گزینه‌ها، انسان‌ها باید به دنبال الگوهای جایگزین توسعه باشند که دیگر بر اساس حداکثر سازی تولید ناخالص داخلی نیست.

■ بر اساس تئوری " گلوله‌های نقره‌ای"<sup>۳</sup>، اگر بتوان به وسیله پیشرفت فناوری، عرضه مداوم انرژی را به مقدار لازم تضمین کرد، رشد تصاعدی جمعیت و مصرف سرانه می‌تواند برای همیشه ادامه داشته باشد.

مطابق با راه‌حل دوم، منظور از پیشرفت فناوری، همان پیشرفت مداوم بازدهی فناوری‌های موجود خواهد بود. به همین دلیل است که برای برطرف کردن نگرانی‌های مردم جهان ناشی از مسائل فوق، بسیاری بر این باورند که امروزه پیشرفت فناوری‌های کارآمد در زمینه‌های انرژی، مورد نیاز است. همچنین ادعا می‌شود که این موضوع یکی از راه‌حل‌هایی است که پیشرفت علم و فناوری باید در برابر کمبود انرژی و در نتیجه تخریب محیط زیست ارائه کند. در واقع بسیاری از سیاستگذاران، اقتصاددان‌های سنتی و عموم مردم به این راه‌حل اعتقاد دارند. در ادامه می‌خواهیم این موضوع را با جزئیات بیشتر بررسی کنیم و خواهیم دید آیا این موضوع واقعا درست می‌باشد و یا تنها یک نظریه ساده‌لوحانه است.

در نگاه اول می‌توان فکر کرد که بهبود در بهره‌وری و بازدهی انرژی باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش اثر یک منبع معین خواهد شد. با این حال، باید توجه داشت که همیشه اینطور نیست. هدف ما نشان دادن این است که افزایش بهره‌وری و بازدهی انرژی در نهایت منجر به افزایش تقاضا و مصرف انرژی می‌شود. این فرضیه "پارادوکس جونز" نام دارد و زمانی برقرار است که افزایش کارایی در استفاده از یک منبع منجر به افزایش میان‌مدت یا بلندمدت در مصرف آن منبع به جای کاهش مصرف شود.

این سوال که آیا افزایش بهره‌وری انرژی منجر به ارتقای صرفه جویی در انرژی می‌شود یا نه، از زمان تحریم نفتی اوپک در سال ۱۹۷۳ مورد بحث بوده است. بسیاری از کارشناسان محیط زیست پیشنهاد می‌کنند که بهبود کارایی استفاده از انرژی یک ابزار سیاستی موثر برای کاهش انتشار جهانی CO<sub>2</sub> است. از سوی

3 Silver bullets

دیگر، دیدگاه مخالف معتقد است که افزایش بهره‌وری انرژی، همانطور که در سطح اقتصاد خرد مشخص می‌شود، می‌تواند نتیجه معکوس داشته باشد و منجر به افزایش مصرف انرژی در سطح اقتصاد کلان، به جای کاهش مصرف گردد. این مورد همان پارادوکس بازدهی انرژی می‌باشد که در ادامه مفاهیم این موضوع را بیشتر بررسی خواهیم کرد [۲].

### اثر بازگشتی<sup>۴</sup> چیست؟

ایده اثر بازگشتی اولین بار در قرن نوزدهم توسط ویلیام استنلی جونز<sup>۵</sup> در کتاب خود به نام مسئله زغال‌سنگ<sup>۶</sup> بیان شد. همچنین پولمینی<sup>۷</sup> و همکاران او در کتاب "پارادوکس جونز و افسانه بهبود بازدهی منابع"<sup>۸</sup>، به بررسی کامل این ادعا و پیشینه آن توسط جونز، پرداخته‌اند و اثر بازگشتی را به طور کامل مورد بررسی قرار داده‌اند. اثر بازگشتی، اصطلاحی کلی برای ساز و کارهایی است که باعث می‌شوند بخشی از انرژی صرفه‌جویی شده، ناشی از بهبود کارایی انرژی، دوباره مصرف شود. به عنوان مثال فرض کنیم گرم کردن یک اتاق، ۱۰۰۰ تومان در روز هزینه دارد و با این قیمت، خانواده فقط می‌تواند یک اتاق را گرم کند. حال با عایق‌کاری پوسته خارجی ساختمان، کارایی انرژی بالا می‌رود و مصرف انرژی معادل هفتاد درصد قبل از اقدام اصلاحی می‌شود. در شرایط جدید، گرم کردن هر اتاق ۷۰۰ تومان هزینه دارد و خانواده ممکن است با این قیمت تصمیم بگیرد دو اتاق را گرم کند. در نتیجه، مصرف انرژی خانواده نسبت به قبل، افزایش می‌یابد.

4 Rebound effect

5William Stanley Jevons

6The Coal Question

7John M. Polimeni

8The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements



اثر بازگشتی به دو دسته کلی اثر بازگشتی مستقیم و اثر بازگشتی غیرمستقیم، تقسیم می‌شود. اثر بازگشتی مستقیم بدین معنی است که با بهبود کارایی انرژی، قیمت خدمات انرژی کاهش یافته و در نتیجه تقاضا برای خدمات انرژی افزایش می‌یابد. گاهی نیز بهبود کارایی انرژی، قیمت خدمات انرژی را کاهش داده و درآمد را افزایش می‌دهد. در نتیجه، قدرت خرید مصرف‌کننده افزایش یافته و این امر باعث افزایش تقاضای سایر کالاها و خدمات می‌شود که این موضوع افزایش مصرف انرژی را به دنبال خواهد داشت. در این حالت اثر بازگشتی تأثیر غیرمستقیم دارد.

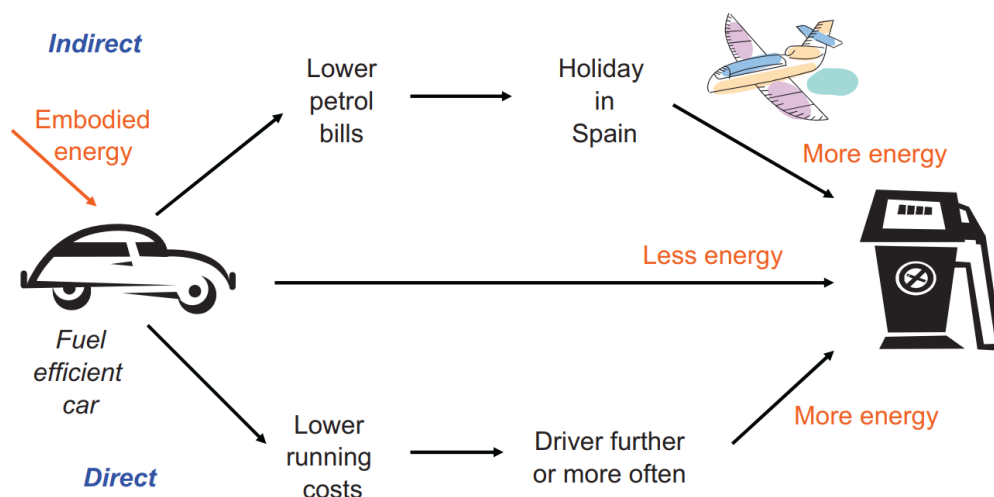
با بررسی تجربی رابطه بین بهبود در بهره‌وری انرژی و اثر بازگشتی، با سه مشکل مفهومی روبرو خواهیم شد:

اولین مورد این است که چگونه می‌توان کارایی انرژی را در هنگام برخورد با سیستم‌های انطباقی پیچیده که بر روی وظایف متعدد در سطوح و مقیاس‌های سلسله‌مراتبی مختلف کار می‌کنند، تعریف و اندازه‌گیری کرد. به عنوان مثال، یک انسان از ورودی‌های انرژی متفاوتی برای اهداف مختلف استفاده می‌کند که تنها در مقیاس‌های زمانی مختلف قابل تعریف هستند. این اهداف می‌تواند دریافت وعده‌های غذایی روزانه، ساختن خانه‌ای برای زندگی، ارائه آموزش برای کودکان یا کمک به توسعه میراث فرهنگی باشد. اگر بخواهیم کارایی را محاسبه کنیم که در آن یک انسان از انرژی یا منابع دیگر برای دستیابی به همه این اهداف استفاده می‌کند، باید از متغیرهای مختلفی استفاده کنیم که فقط در سطوح مختلف سلسله‌مراتبی از تجزیه و تحلیل قابل تعریف هستند و نیاز به پذیرش مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. این امر را نمی‌توان با یک محاسبه ساده از ارزیابی یک معیار کارایی یکپارچه کلی برای این مجموعه پیچیده بدست آورد.

دومین مورد این است که چگونه می‌توان تغییرات راندمان انرژی را که ناشی از تغییر در ضرایب تکنولوژیکی است، در زمانی که سیستم مجموعه همان تحولات را، اما بهتر انجام می‌دهد و همچنین از تغییرات در

بازده انرژی به دلیل تغییر در مشخصات کارکردی، زمانی که سیستم روش‌های راحت‌تری برای انجام چیز دیگری به جای مجموعه اصلی تبدیل‌ها پیدا می‌کند، را محاسبه و در نظر گرفت.

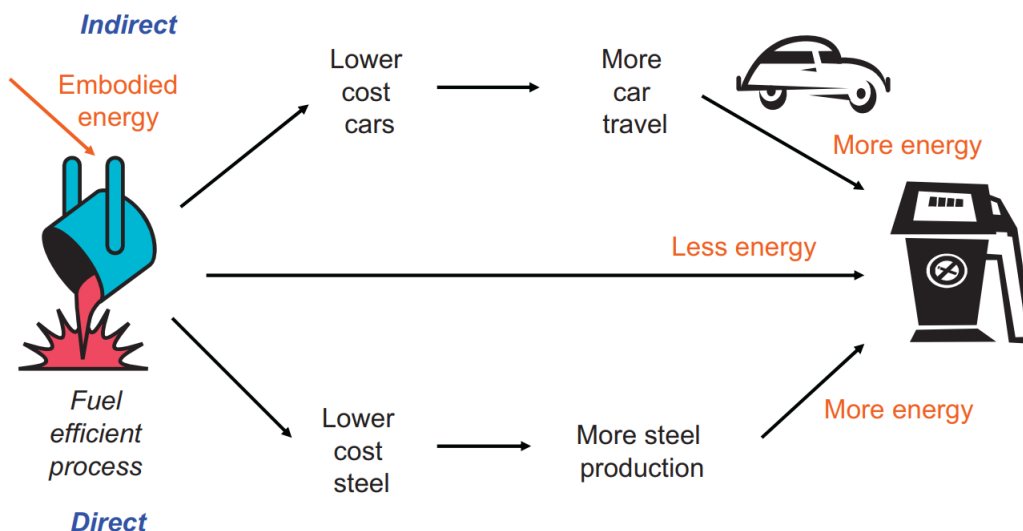
سومین مورد این است که چگونه می‌توان تأثیر تغییرات ناشی از متغیرهای گسترده، به عنوان مثال افزایش جمعیت را از تأثیر تغییرات ناشی از متغیرهای دیگر جدا کرد. به عنوان مثال، در یک زمان معین، یک کشور خاص می‌تواند خودروهایی را انتخاب کند که دو برابر کارآمدتر از خودروهای قدیمی است. با این حال، اگر در همان زمان این کشور افزایش چشمگیری در جمعیت را تجربه کند که موجب سه برابر شدن مصرف بیشتر انرژی در خودروها باشد، آنگاه افزایش جمعیت به طور کامل این بهبود کارایی را خنثی خواهد کرد. در این مورد، داده‌های کلی مصرف انرژی که به کل کشور مربوط می‌شود، باید در رابطه با ترکیب متغیرهای گسترده<sup>۹</sup> (تعداد خودروهای در گردش) و متغیرهای فشرده<sup>۱۰</sup> (متوسط مسافت پیموده شده ناوگان) تفکیک و تحلیل شوند. در شکل (۴) و (۵)، یک نمونه از اثر بازگشتی مستقیم و غیرمستقیم، برای مصرف و تولید سوخت، به صورت شماتیک مشاهده می‌کنید [۳].



شکل (۴) - اثرات بازگشتی مستقیم و غیر مستقیم جهت مصرف سوخت در جامعه

9 Extensive variables

6 Intensive variables



شکل (۵) - اثرات بازگشتی مستقیم و غیر مستقیم جهت تولید سوخت مورد نیاز

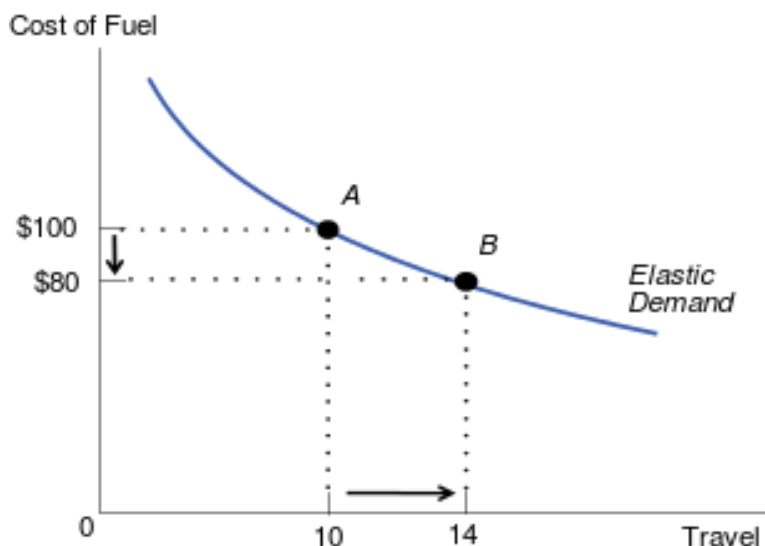
## پارادوکس جونز<sup>۱۱</sup> و تکامل موتورهای بخار

جونز در سال ۱۸۳۵ در لیورپول متولد شد. او پسر یک مهندس و تاجر فولاد بود، که مقالاتی در اقتصاد و حقوق نوشته بود. مفهوم پارادوکس جونز بیان می‌کند که افزایش نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی که همان «کارایی در استفاده از یک منبع» می‌باشد، در میان مدت و درازمدت، به جای کاهش، منجر به افزایش استفاده از آن منبع می‌شود. در آن زمان، جونز در مورد روندهای احتمالی مصرف آبی زغال سنگ بحث می‌کرد و به سناریوهایی که توسط افراد خوش‌بین در فناوری‌ها حمایت می‌شد و افزایش نرخ سالانه مصرف را نادیده می‌گرفتند، واکنش نشان می‌داد. همانند امروز، در آن زمان نیز برخی معتقد بودند که انسان‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی به وسیله‌ی رشد اقتصادی که به وجود آمده است و بکارگیری آن در افزایش بهره‌وری موتورهای بخار، میزان مصرف زغال سنگ را کاهش دهند.

<sup>11</sup>The Jevons Paradox

در مواجهه با چنین ادعایی، جونز به درستی نشان داد که موتورهای کارآمدتر باعث افزایش مصرف زغال سنگ در مصارف ثابت و همچنین گسترش استفاده‌های احتمالی از زغال سنگ برای فعالیت‌های انسانی می‌شود. بنابراین افزایش بهره‌وری به جای کاهش، میزان مصرف ذخایر زغال سنگ موجود را افزایش می‌دهد.

به نظر می‌رسد که پارادوکس جونز نه تنها در مورد تقاضا برای زغال سنگ و دیگر منابع انرژی فسیلی، بلکه در مورد تقاضا برای منابع به طور کلی صادق است. دو برابر شدن راندمان تولید غذا در هکتار، طی ۵۰ سال گذشته نه تنها مشکل گرسنگی را حل نکرد، بلکه متأسفانه این دو برابر شدن کارایی در واقع مشکل کمبود غذا را بدتر کرد، زیرا باعث افزایش تعداد افرادی که به غذا نیاز داشتند شد و همچنین میزان استفاده از محصولات حیوانی در رژیم غذایی و تعداد افراد مبتلا به سوء تغذیه را نیز افزایش داد. به همین ترتیب، دو برابر کردن تعداد جاده‌ها مشکل ترافیک را حل نکرد، بلکه وضعیت ترافیک را بدتر کرد زیرا این مسئله، استفاده بیشتر از وسایل نقلیه شخصی را تشویق خواهد کرد. همچنین در دهه ۸۰ میلادی، خودروهای با انرژی کارآمدتر در نتیجه افزایش قیمت نفت توسعه یافتند و قیمت حامل‌های انرژی کمی کاهش یافت. به دنبال آن صاحبان خودروهای آمریکایی میزان رانندگی برای تامین نیاز اوقات فراغت خود را افزایش دادند و همراه با عملکرد مورد انتظار خودروها، تعداد مایل‌های طی شده افزایش یافت (شکل ۶). علاوه بر این، شهروندان ایالات متحده به طور فزاینده‌ای وسایل نقلیه سنگین‌تری مانند ون‌های کوچک و وانت‌ها را برای رانندگی انتخاب کردند. به عنوان مثالی دیگر، یخچال‌ها در دهه اخیر، کارآمدتر و بزرگتر شده‌اند و ارتقای بهره‌وری انرژی در سطح خرد اقتصادی، منجر به افزایش مصرف انرژی در سطح کلان کل جامعه شده است. از نظر اقتصادی، می‌توانیم این فرآیندهای بالا را به عنوان افزایش عرضه و افزایش تقاضا در بلندمدت توصیف کنیم [۲].



شکل (۶) - با کاهش قیمت سوخت، تقاضا جهت استفاده بیشتر و سفر با خودروهایی شخصی بالا می‌رود.

پارادکس جونز را می‌توان در راندمان آبیاری و مصرف آب نیز مشاهده کرد. کارلوس گومز<sup>۱۲</sup> و کارلوس گوتیرز<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۱)، یک مطالعه اقتصاد خرد در مورد مصرف آب و بهره‌وری آبیاری توسط کشاورزان مدیترانه‌ای انجام دادند. در مطالعه خود، آنها هزینه نهایی استفاده از آب، اثر درآمد و اثر جانشینی را با توجه به یک سری از نوآوری‌های تکنولوژیکی در آبیاری بررسی کردند. آنها به عنوان بخشی از آزمایش خود، معادله تقاضا برای آب توسط کشاورزان مدیترانه‌ای را استخراج کردند. با محاسبات آنها، با توجه به هر گونه پیشرفت در فناوری آبیاری، منحنی تقاضای کشاورزان به سمت راست (تقاضای بیشتر) تغییر خواهد کرد. محققان از این موضوع دو نتیجه مهم گرفتند: اولی در مورد اثر کمیت<sup>۱۴</sup>، دومی اثر قیمت. اثر کمی مشاهده شده این بود که با توجه به نوآوری‌های تکنولوژیکی مورد نظر، آب در دسترس مناطق بیشتری قرار داشت در حالی که قبلاً در برخی نقاط دسترسی به آب وجود نداشت یا دسترسی خیلی

<sup>12</sup>Carlos Gómez

<sup>13</sup>Carlos Gutierrez

<sup>14</sup>Quantity effect

محدود بود. اثر قیمت مشاهده شده این بود که هزینه نهایی آب با نوآوری تکنولوژیک کمتر بود و با مصرف آب کمتر محصول بیشتری به بار می‌آید، که این دو مورد باعث تشویق کشاورزان به مصرف بیشتر آب ارزان‌تر با توجه به دسترس‌پذیری بالاتر و قیمت واحد کمتر، می‌گردد که این مورد یکی از مثال‌های پر تعداد پارادوکس بازدهی می‌باشد. که در اینجا نیز لزوم اخذ تمهیداتی را برای کنترل مصارف کشاورزی نظیر اخذ مالیات یا فرهنگ سازی را مشاهده می‌کنیم.

این دو اثر اشاره شده در بالا، به کشش تقاضای کشاورزان برای آب بستگی دارد. در مجموع، محققان شواهد معتبری در سطح اقتصاد خرد برای پارادوکس بازدهی (پارادوکس جونز) در شیوه‌های آبیاری مدیترانه پیدا کردند.

پارادوکس جونز نام‌ها و کاربردهای متفاوتی دارد به عنوان مثال به، اثر بازگشتی<sup>۱۵</sup> در ادبیات انرژی و پارادوکس پیشگیری<sup>۱۶</sup> در رابطه با سلامت عمومی، مشهور است. در مورد دوم، پارادوکس شامل این واقعیت است که مقدار پول پس‌انداز شده با پیشگیری از چند بیماری هدفمند، منجر به افزایش چشمگیر صورت حساب کلی بخش سلامت در بلندمدت می‌شود. با توجه به این واقعیت که انسان‌ها دیر یا زود باید بمیرند (این واقعیتی است که به نظر می‌رسد توسط تحلیلگران کارایی نادیده گرفته می‌شود)، هر گونه افزایش در طول عمر یک جمعیت، مستقیماً منجر به افزایش هزینه‌های مراقبت‌های بهداشتی می‌شود. علاوه بر نسبت بیشتر افراد بازنشسته در جمعیت که به مراقبت‌های بهداشتی بیشتری نیاز دارند، به خوبی مشخص شده است که هزینه بستری و درمانی سالمندان در بیمارستان بسیار بیشتر از بستری شدن جوانان است.

15Rebound effect

16Paradox of prevention

این مثال آخر ما را به قلب تناقض هدایت می‌کند. پیشرفت‌های تکنولوژیکی در کارایی یک فرآیند نشان دهنده بهبود در متغیرهای فشرده<sup>۱۷</sup> است که به عنوان "بهبود" در هر واحد، چیزی تعریف می‌شود. با این حال، افزایش کارایی تنها در صورتی منجر به صرفه‌جویی در منابع می‌شود که فرآیند تکامل، مجموعه رفتارهای موجود را در پاسخ به بهبود کارایی اصلاح نکند. در حقیقت، سیستم‌های متابولیک در حال تکامل، به ویژه سیستم‌های انسانی، تمایل دارند به سرعت و به طور موثر با هر گونه تغییر در بهبود کارایی سازگار شوند. به محض اینکه یک سری از «پیشرفت‌های تکنولوژیکی» در یک سیستم اجتماعی معرفی شود، فضای بیشتری برای گسترش سطوح فعلی فعالیت وجود دارد و همین باعث پارادوکس بازدهی انرژی یا پارادوکس جونز می‌شود [۵].

### رابطه اثر بازگشتی و پارادوکس جونز

حال که با مفهوم پاراداکس جونز و اثر بازگشتی آشنا شدیم می‌توانیم بگوییم که اگر اثر بازگشتی بیش از ۱۰۰ درصد باشد، پارادوکس جونز برقرار است. به عبارت دیگر افزایش بهره‌وری موجب افزایش کلی مصرف خواهد شد. اگر اثر بازگشتی عددی بین ۰ تا ۱۰۰ درصد باشد، به معنای این است که با افزایش بهره‌وری، مصرف کاهش پیدا می‌کند اما با آنچه که از آن انتظار داشتیم فاصله دارد. اگر اثر بازگشتی منفی باشد، نشان می‌دهد که ذخیرسازی منابع که به وسیله افزایش بهره‌وری صورت گرفته است، از مصرف انرژی بالاتر است. به طور مثال فرض کنید که فردی یک ماشین ظرف‌شویی جدید خریداری کرده‌است که کارایی آن ۱۰ درصد بالاتر از سایر موارد مشابه در بازار خواهد بود. با این حال فرد خریدار همانند قبل از این ماشین ظرف‌شویی استفاده می‌کند و حتی عوامل مصرف انرژی (مثل دمای آب، دفعات شستشوی ظروف

17Intensive

در طول شبانه روز و ... ) را کاهش می‌دهد. در این حالت می‌توان گفت که اثر بازگشتی منفی است و ذخیره انرژی ناشی از افزایش کارایی و بهبود بهره‌وری، با موفقیت انجام شده است و انتظارات جهت میزان کاهش مصرف انرژی به طور کامل برآورده شده است.

### نحوه پاسخ به پارادوکس بازدهی انرژی (پارادوکس جونز)

نکته مهم برای بحث ما این است که مصارف سیستم چگونه گسترش می‌یابد؟ و پیامدهای این گسترش چیست؟ این دو سؤالاتی هستند که برای کسانی که سیستم را از درون مدل اصلی مطالعه می‌کنند، بر اساس پذیرش این الگو نمی‌توانند پاسخ دهند. به عبارت دیگر، هنگامی که کارایی یک فرآیند معین را بر اساس مجموعه‌ای از مدل‌های رسمی افزایش می‌دهیم، زمانی که ما سعی می‌کنیم جهان را با کارآمدتر کردن یک فرآیند خاص نجات دهیم، ناخواسته احتمال حالتی اضطراری را افزایش می‌دهیم. این به نوعی بر سودمندی مدل‌های رسمی دلالت دارد، هر چه این مدل‌ها برای افزایش بهبود کارایی مفیدتر باشند، وضعیت موجود سریع‌تر تغییر می‌کند و به احتمال زیاد این مدل‌های رسمی برای پیش‌بینی‌های بلند مدت بی‌فایده خواهند شد. به همین دلیل است که هنگام پرداختن به تجزیه و تحلیل تکامل، اتخاذ دیدگاه‌های تکمیل‌کننده و همه‌جانبه در مورد تغییر بسیار مهم است. دیدگاه حالت پایدار، که امکان پرداختن به مفاهیمی مانند کارایی، طراحی بهتر و قابلیت اطمینان را در کوتاه مدت به صورت ترکیبی فراهم می‌کند با ترکیب در دیدگاهی تکاملی، که امکان پرداختن به مفاهیم مفید جایگزین مانند سازگاری، تنوع و عدم قطعیت را در درازمدت فراهم می‌کند، راه‌حل پیش‌بینی‌های بهتر درباره نحوه تغییرات مصرف انرژی به تبع افزایش بازدهی فرآیندها، می‌باشد.



## افزایش کارایی خوب است یا بد؟

بهبود کارایی در مجموعه فرآیندهای فناوری که جامعه را حفظ می‌کند (به عنوان مثال خودروهای کارآمدتر) می‌تواند دو نتیجه متفاوت ایجاد کند:

(۱) مناسب برای انسان‌ها: ممکن است از بهبود کارایی برای ارائه استانداردهای مادی بهتری برای زندگی انسان‌ها استفاده شود. از نظر بیوفیزیکی، این بهبود کارایی به معنای دسترسی به انرژی و مواد بیشتر برای استفاده در تولید و مصرف کالاها و خدمات است.

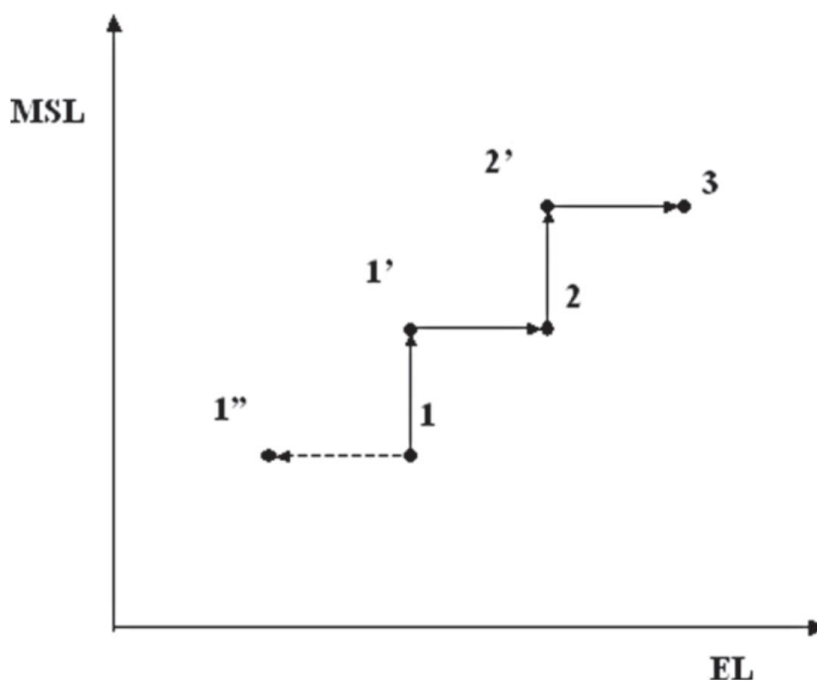
(۲) مناسب برای سیستم‌های اکولوژیکی که سیستم اجتماعی-اقتصادی را در خود جای داده‌اند: ممکن است از بهبود کارایی برای کاهش سطح مصرف منابع طبیعی و سطح تأثیرات زیست‌محیطی استفاده شود. از نظر بیوفیزیکی، این بهبود کارایی به معنای کاهش تأثیر بر محیط زیست است، به عبارت دیگر استخراج منابع کمتر و تخلیه زباله کمتر در فرآیند اقتصادی را شاهد خواهیم بود.

این دو نتیجه می‌تواند از شکل (۷) از نظر حرکات در یک صفحه EL-MSL توضیح داده شود. محور افقی به یک پروکسی برای بارگذاری محیطی<sup>۱۸</sup> (EL) اشاره دارد. محور عمودی به یک نماینده برای استاندارد زندگی مادی<sup>۱۹</sup> (MSL) اشاره دارد. بسته به موضوع خاصی که در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، در رابطه با مسافت پیموده شده یک خودرو، ویژگی‌های کلیدی عملکرد (سرعت، بار، راحتی) را می‌توان با MSL و نیاز بنزین (سوخت مصرف شده در هر مسافت پیموده شده یا انتشار CO<sub>2</sub> در هر مسافت پیموده شده) با EL مرتبط کرد. به همین ترتیب، زمانی که با رشد اقتصادی سروکار داریم، می‌توانیم از یک شاخص کل مصرف انرژی در اقتصاد استفاده کنیم که با تولید ناخالص داخلی همبستگی زیادی دارد. این شاخص

18 Environmental loading

19 Material standard of living

را به عنوان نماینده MSL، و انتشار کل CO<sub>2</sub> را به عنوان شاخص EL تصور کنیم. به طور کلی تر، با استفاده از مفاهیمی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، می توان گفت که افزایش در نرخ شار انرژی می تواند با حرکات رو به بالا در امتداد محور MSL مرتبط باشد، در حالی که افزایش در نرخ تولید آنتروپی می تواند با حرکات به سمت چپ در امتداد محور EL همراه باشد. با نگاهی به نمودار در شکل (۷)، و با فرض نقطه ۱ به عنوان موقعیت اولیه سیستم، افزایش کارایی تکنولوژیکی باعث افزایش درجه آزادی سیستم می شود. بنابراین وزن اتخاذ شده در فرآیند سیاست گذاری، مسئولی است که تصمیم می گیرد که آیا پیشرفت تکنولوژیکی برای بهبود رفاه جامعه استفاده می شود یا موجب کاهش فشار بر محیط زیست خواهد شد [۲].



شکل (۷) - تخصیص افزایش کارایی در بهبود رفاه اجتماعی و کاهش تخریب محیط زیست

## مدلسازی پارادوکس انرژی

در این بخش، ورود یک تکنولوژی جدید در یک صنعت و تاثیر آن در مصرف انرژی را به کمک مدل توسعه یافته توسط دکتر فرازین<sup>۲۰</sup> و همکاران آن را نشان می‌دهیم.

فرض کنید یک شرکت در حال حاضر از یک نوع تکنولوژی خاص استفاده می‌کند، و این تکنولوژی با مرور زمان پیشرفت خواهد کرد. نهاده‌های تولید این شرکت عبارت است از انرژی مصرفی (E) و نیروی کار (L) و در آخر یک محصول مشخص را تولید می‌کند. با فرض این که پیشرفت تکنولوژی و فناوری در این شرکت، بهره‌وری انرژی را بالا خواهد برد، تابع سود این شرکت عبارت است از:

$$\pi_t = \max Pq(\varphi_t, E_t, L_t) - zE_t - wL_t \quad (\text{معادله ۱})$$

در تابع فوق،  $P$  قیمت محصول تولیدی،  $q$  قیمت محصول تولید،  $\varphi_t$  ضریب کارایی و بهره‌وری (ناشی از رشد فناوری است) در مصرف انرژی،  $z$  قیمت انرژی و  $w$  نرخ دستمزد می‌باشد. تابع تولید این بنگاه برابر است با:

$$q(E, L) = \theta(\varphi E)^\alpha L^\beta \quad (\text{معادله ۲})$$

که در آن  $\theta$  پارامتر تغییر (نشان‌دهنده بهره‌وری کلی تولید این شرکت است) خواهد بود. این در حالی است که پارامتر  $\varphi_t$  می‌تواند واحدهای فیزیکی انرژی را به واحدهایی که نشان‌دهنده بهره‌وری و بازدهی انرژی است، تبدیل کند. همچنین با توجه به این که احتمال پیشرفت تکنولوژی ( $\lambda dt$ ) در زمان‌های کوتاه ( $dt$ ) وجود دارد، پارامتر  $\varphi_t$  از یک فرآیند پرش پیروی می‌کند. به عبارت دیگر چون زمان دقیق تغییر

<sup>2</sup> Farzin (1998)

این پارامتر مشخص نیست، در نتیجه این پارامتر به عنوان یک فرآیند پواسون<sup>۲۱</sup> مدلسازی می‌شود و برابر است با:

$$d\varphi = dq, \text{ where } dq = \begin{cases} u & \text{with probability } \lambda dt \\ 0 & \text{with probability } (1 - \lambda dt) \end{cases} \quad (\text{معادله ۳})$$

علاوه بر عدم قطعیت مربوط به زمان‌بندی فناوری‌های جدید، همچنین فرض می‌کنیم که اندازه جهش در بهره‌وری انرژی نامشخص است. به طور خاص، فرض می‌کنیم مقدار  $u$  به صورت یکنواخت بین  $0$  تا  $\bar{u}$  توزیع می‌شود و تابع چگالی آن به این صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(u) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{u}} & \text{for } 0 \leq u \leq \bar{u}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{معادله ۴})$$

اگر تابع سود را با در نظر گرفتن تابع تولید، بیشینه‌سازی کنیم، مقدار بهینه انرژی و نیروی کار مورد نیاز برابر است با:

$$E_i^* = \left[ P\theta \left( \frac{\beta}{w} \right)^\beta \left( \frac{\alpha}{z} \right)^{1-\beta} \right]^{\frac{1}{1-\alpha-\beta}} \varphi_i^{\frac{\alpha}{1-\alpha-\beta}}$$

$$L_i^* = \left[ P\theta \left( \frac{\beta}{w} \right)^{1-\alpha} \left( \frac{\alpha}{z} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{1-\alpha-\beta}} \varphi_i^{\frac{\alpha}{1-\alpha-\beta}} \quad (\text{معادله ۵ و ۶})$$

همچنین تابع سود در کوتاه مدت و برحسب پارامترهای فوق برابر خواهد شد با:

$$\pi_i^* = [1 - \alpha - \beta] \times \left[ P\theta \left( \frac{\alpha}{z} \right)^\alpha \left( \frac{\beta}{w} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{1-\alpha-\beta}} \varphi_i^{\frac{\alpha}{1-\alpha-\beta}} \quad (\text{معادله ۷})$$

<sup>2</sup> Poisson

در رابطه بالا تمام مقادیر به جزء ضریب کارایی و بهره‌وری، ثابت است، پس می‌توان تابع سود را برحسب این ضریب بازنویسی کرد و برابر خواهد شد با:

$$\pi(\varphi_i) = \xi \varphi_i^\gamma, \quad \gamma = \frac{\alpha}{1 - \alpha - \beta}$$

$$\xi = [1 - \alpha - \beta] \times \left[ P \theta \left( \frac{\alpha}{z} \right)^\alpha \left( \frac{\beta}{w} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{1 - \alpha - \beta}} \quad (\text{معادله ۸})$$

ارزش افزوده و سود کوتاه مدت ناشی از بهبود تکنولوژی و افزایش ضریب کارایی و بهره‌وری برابر است با:

$$V(\varphi_i) = \int_{t=0}^{\infty} \pi(\varphi_i) e^{-rt} dt = \frac{\xi \varphi_i^\gamma}{r} \quad (\text{معادله ۹})$$

در هر دوره، تا زمانی که سرمایه‌گذاری در واقع ساخته شود، شرکت باید تصمیم بگیرد که آیا قصد سرمایه‌گذاری را دارد یا می‌خواهد آن را به تعویق اندازد. در صورتی که شرکت تصمیم به سرمایه‌گذاری بگیرد، ارزش افزوده مورد انتظار، مقدار  $V(\varphi_t)$  خواهد شد.

اگر کمترین مقادیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری را  $I$  در نظر بگیریم، ارزش خالص سود ناشی از بهبود تکنولوژی و افزایش ضریب کارایی و بهره‌وری برای یک بنگاه برابر است با:

$$\Omega(\varphi_i) = V(\varphi_i) - I = \frac{\xi \varphi_i^\gamma}{r} - I. \quad (\text{معادله ۱۰})$$

تابع فوق، ارزش خالص یک پروژه را زمانی نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری جهت بهبود کارایی در این پروژه به طور کامل انجام گرفته باشد. همچنین در طول مدلسازی، فرض می‌کنیم که تاثیر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، ناشی از بالا رفتن سطح تکنولوژی، همواره مثبت است. بازده مورد انتظار، ناشی از این بهبود را "ارزش افزوده تولید شده" می‌نامند. اگر سرمایه‌گذاری جهت بهبود سطح فناوری برای مدت  $dt$  به

تعویق بیافتد، ارزش این تعویق برابر با سودی است که بنگاه با توجه به فناوری اولیه به دست می‌آورد. به عبارت دیگر معادله بلمن<sup>۲۲</sup> برابر است با:

$$F(\varphi) = \pi(\varphi_0)dt + \frac{1}{1+rdt} E[F(\varphi + d\varphi)] \quad (\text{معادله ۱۱})$$

در هر دوره شرکت، مجموع هزینه‌ها، که شامل هزینه‌ای که ناشی از عدم توسعه و بهبود تکنولوژی در تولید محصول، به شرکت وارد می‌شود و هزینه توسعه و گسترش یک تکنولوژی جدید را با ارزش افزوده‌ای که بهترین تکنولوژی و فناوری در سود شرکت رقم می‌زند، مقایسه می‌کند.

ممکن است، هزینه فرصت به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در زمان  $t$  از سود بدست‌آمده بیشتر باشد، زیرا بهترین فناوری موجود در آن زمان اجرا نمی‌شود. این فرصت‌ها در طول زمان به دلیل پیشرفت فناوری در حال افزایش است. این احتمال وجود دارد که در آینده یک ارزش افزوده بحرانی  $\varphi^*$  که در آن شرکت در میان سرمایه‌گذاری و تعویق در آن بی‌تفاوت است، رخ دهد. پس از آن و با توجه به پیشرفت روزانه فناوری، شرکت باید جهت بهبود تکنولوژی تولید خود، اقدام کند.

برای حل مدل فوق (معادله ۱۱)، برای پارامتر مصرف انرژی، انتظار می‌رود که دو عامل  $\lambda$  و  $\bar{u}$  افزایش یابد و برابر خواهد شد با :

$$E[F(\varphi + d\varphi)] - F(\varphi) = \lambda dt \left\{ \int_{u=0}^{\varphi^*-\varphi} \frac{1}{\bar{u}} F(\varphi + u) du + \int_{u=\varphi^*-\varphi}^{\bar{u}} \frac{1}{\bar{u}} (\Omega(\varphi + u)) du - F(\varphi) \right\} \quad (\text{معادله ۱۲})$$

سرمایه‌گذاری زمانی انجام می‌شود، که تغییر در سطح تکنولوژی و فناوری بسیار بزرگ باشد. می‌توان با استفاده از معادله ۱۱ و ۱۲، مقدار  $F$  را برحسب  $u$  محاسبه کرد و برابر خواهد بود با:

$$F(\varphi) = \frac{\pi(\varphi_0)}{r + \lambda} + \frac{\lambda}{r + \lambda} \left[ \int_{u=0}^{\varphi^* - \varphi} \frac{1}{\bar{u}} F(\varphi + u) du + \int_{u=\varphi^* - \varphi}^{\bar{u}} \frac{1}{\bar{u}} (V(\varphi + u) - I) du \right] \quad (\text{معادله ۱۳})$$

اگر  $\varphi = \varphi^*$  باشد، معادله ۱۳ برابر است با:

$$F(\varphi^*) = \frac{\pi(\varphi_0)}{r + \lambda} + \frac{\lambda}{r + \lambda} \left[ \int_{u=0}^{\bar{u}} \frac{1}{u} (V(\varphi + u) - I) du \right] = \frac{\xi \varphi_0^\gamma}{r + \lambda} + \frac{\lambda \xi [(\varphi^* + \bar{u})^{\gamma+1} - (\varphi^*)^{\gamma+1}]}{r \bar{u} (r + \lambda) (\gamma + 1)} - \frac{\lambda I}{r + \lambda} \quad (\text{معادله ۱۴})$$

همچنین در حالت بهینه، هزینه سرمایه‌گذاری جهت بالا بردن سطح تکنولوژی برابر با ارزش خالص سود ناشی از بهبود تکنولوژی خواهد بود. به عبارت دیگر:

$$F(\varphi^*) = \Omega(\varphi^*) \quad (\text{معادله ۱۵})$$

در این شرایط شرکت در میان سرمایه‌گذاری و تعویق در آن بی‌تفاوت است، با جایگذاری معادله ۱۰ و ۱۴ در معادله ۱۵، ارزش بحرانی سرمایه‌گذاری در بهبود تکنولوژی جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی بدست می‌آید و برابر است با:

$$\xi \varphi_0^\gamma + \frac{\lambda \xi [(\varphi^* + \bar{u})^{\gamma+1} - (\varphi^*)^{\gamma+1}]}{r \bar{u} (\gamma + 1)} - \left( \frac{r + \lambda}{r} \right) \xi (\varphi^*)^\gamma + r I = 0 \quad (\text{معادله ۱۶})$$

میزان رشد  $\varphi_t$  ضریب کارایی و بهره‌وری در مصرف انرژی (که ناشی از رشد فن‌آوری است) در طول زمان برابر است با:

$$E(\varphi(t)) = \varphi_0 + \frac{1}{2}\lambda\bar{u}(1 - e^{-\lambda t})t. \quad (\text{معادله ۱۷})$$

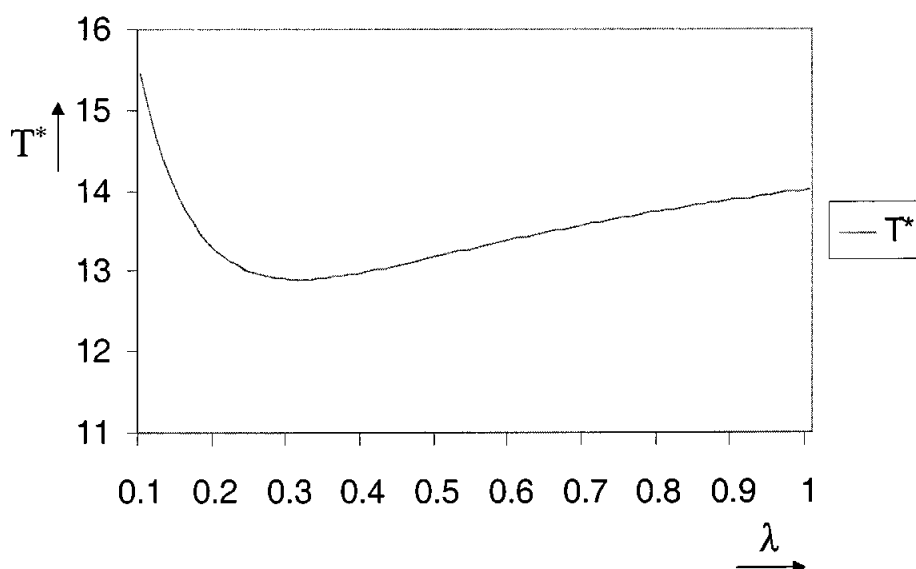
زمان مورد انتظار که در آن ارزش بحرانی به  $\varphi^*$  رسیده است، برابر است با:

$$E(\varphi^*) = \varphi_0 + \frac{1}{2}\lambda T^*\bar{u}(1 - e^{-\lambda T^*}) \quad (\text{معادله ۱۸})$$

با حل همزمان دو معادله ۱۶ و ۱۸، پارامترهای  $\varphi^*$  و  $T^*$  بدست می‌آید.

## نتایج عددی مدل سازی

در این بخش، به طور عددی معادله ۱۶ و ۱۸ حل شده است و تاثیر تغییر در نرخ میانگین ورود فناوری‌های جدید ( $\lambda$ ) تجزیه و تحلیل شده است.



شکل (۸) - نرخ تاخیر در سرمایه‌گذاری ( $T$ ) به عنوان تابعی از نرخ میانگین رسیدن به تکنولوژی جدید جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی ( $\lambda$ )

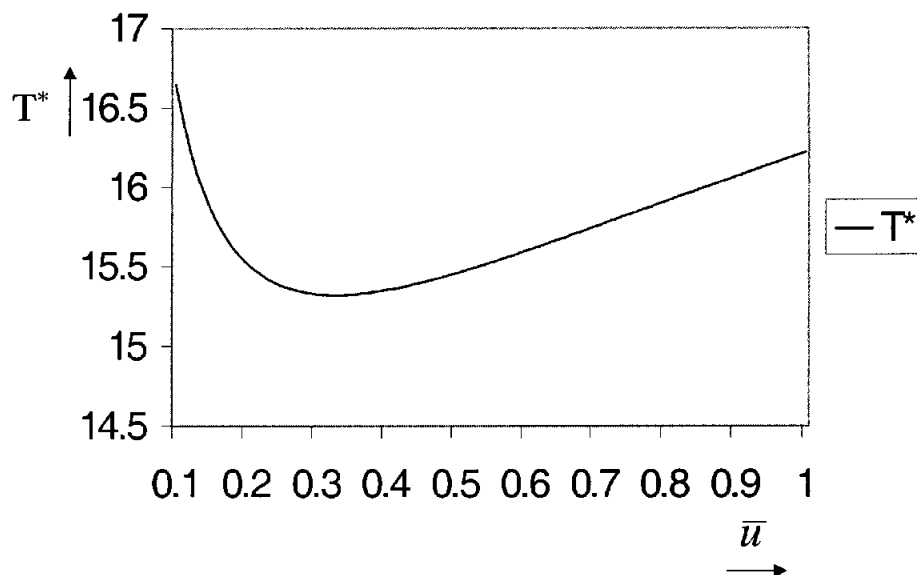
مقادیر پارامترهای ثابت:

$$P=1, \theta=1, w=0.15, z=0.15, \alpha=0.4, \beta=0.35, \varphi_0=1, \bar{u}=0.5, I=1, r=0.1$$



مطابق با شکل (۸)، هزینه‌های بالای نوآوری در سطح تکنولوژی، بنگاه‌ها را مجاب می‌کند تا سرمایه‌گذاری در این زمینه را به تعویق بیندازند و منتظر رسیدن فناوری‌های بهتر باشند. هر چه  $\lambda$  بیشتر می‌شود، هزینه و فرصت سرمایه‌گذاری فعلی بالاتر می‌رود و بنگاه تشویق می‌شود تا سرمایه‌گذاری را انجام دهد. اما از یک جایی به بعد، مجدداً زمان تاخیر در سرمایه‌گذاری رشد می‌کند. به عبارت دیگر افزایش میانگین نرخ ورود فناوری‌های جدید اثر مبهمی بر تاخیر در سرمایه‌گذاری  $T^*$  دارد. می‌توان گفت که برای مقادیر پایین  $\lambda$ ، افزایش میانگین نرخ ورود تکنولوژی‌های جدید، باعث می‌شود بنگاه زودتر از موعد سرمایه‌گذاری کند. اما بعد از یک مقدار بحرانی خاص، تاخیر در سرمایه‌گذاری دوباره افزایش می‌یابد.

همانند شکل (۶)، می‌توان این حل عددی را برای  $\bar{u}$  انجام داد. شهود مشابه بالا است. اول، افزایش اندازه جهش پیش‌بینی شده، ارزش گزینه به تعویق انداختن یک سرمایه‌گذاری برگشت‌ناپذیر را افزایش خواهد داد و به این ترتیب ارزش بحرانی مورد نیاز جهت ترغیب شرکت را افزایش می‌دهد.



شکل (۹) - نرخ تاخیر در سرمایه‌گذاری ( $T$ ) به عنوان تابعی از حد بالای نرخ جهش در بهره‌وری انرژی  $\bar{u}$

مقادیر پارامترهای ثابت:

$$P=1, \theta=1, w=0.15, z=0.15, \alpha=0.4, \beta=0.35, \varphi_0=1, \bar{u}=0.5, I=1, r=0.1$$

با تحلیل شکل‌های ۸ و ۹، می‌توان تاثیر پارامترهای ثابت (استاتیک تطبیقی مدل بدست آمده) بر روی زمان تاخیر در سرمایه‌گذاری ( $T^*$ ) را بدست آورد و برابر خواهد شد با:

	$T^*$
$I$	+
$r$	-
$w$	+
$z$	+
$\varphi_0$	-

شکل (۱۰) - وابستگی زمان تاخیر در سرمایه‌گذاری به پارامترهای استاتیک مدل

تمام این نتایج با شهود اقتصادی سازگار است، به همین دلیل، همه آن‌ها را مورد بحث قرار نمی‌دهیم. به عنوان مثال، افزایش هزینه سرمایه‌گذاری ( $I$ ) را در نظر بگیرید. با افزایش مقدار  $I$ ، شرکت‌ها تصمیم می‌گیرند سرمایه‌گذاری خود را به تعویق بیندازند، لذا مقدار  $T^*$  بالا می‌رود. همچنین اگر فناوری‌های جدید مرتبط با آن گران‌تر باشند، شرکت‌ها به جریان سود بیشتری نیاز دارند. در مثالی دیگر پارمتر  $r$  را در نظر بگیرید، این پارمتر نشان دهنده این است بنگاه‌ها نسبت به فناوری‌های جدید که در آینده در دسترس قرار می‌گیرند، اهمیت کمتری قائل هستند و در عوض خواستار افزایش سود در کوتاه‌مدت خواهند بود. این مدل به ما نشان داد که چرا بسیاری از شرکت‌ها، سرمایه‌گذاری سودآور جهت ارتقای تکنولوژی تولید و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را انجام نمی‌دهند. زیرا پیشرفت فناوری در آینده نامطمئن است و سرمایه‌گذاری‌ها حداقل تا حدودی برگشت‌ناپذیر هستند و نشان می‌دهد که ممکن است برخلاف نظر اکثریت مردم، سرمایه‌گذاری در یک تکنولوژی منطقی نباشد. همچنین سرمایه‌گذاری در کاهش مصرف انرژی در کوتاه مدت پرهزینه است. در نهایت باید گفت که پیشرفت تکنولوژی لزوماً نرخ صرفه‌جویی در

انرژی را بالا نمی‌برد و اجرای آن را از سوی بنگاه سریع‌تر نمی‌کند (ممکن است  $T^*$  بالا رود). پیشرفت تکنولوژی در یک بنگاه، هم هزینه فرصت و هم نرخ بازده سرمایه‌گذاری‌های فعلی را افزایش می‌دهد. این مسئله ممکن است اندکی بر روی انگیزه و اشتیاق شرکت‌های R&D که همیشه در راستای افزایش سطح تکنولوژی یک سیستم تلاش می‌کنند، تاثیر بگذارد [۴].

## آیا می‌شود اثر بازگشتی را از بین برد؟

اثر بازگشتی انرژی در نتیجه واکنش‌های اقتصادی، زمانی است که هزینه ارائه برخی خدمات انرژی به دلیل بهبود بهره‌وری انرژی در ارائه خدمات انرژی کاهش می‌یابد. بنابراین، بسیاری از سیاست‌ها برای کنترل اثر بازگشتی باید در جهت اصلاح واکنش‌های رفتاری عوامل اقتصادی در صورت بهبود کارایی باشد.

گام اول شامل شناخت وجود اثر بازگشتی و نیاز به پرداختن به آن هنگام تعریف اهداف سیاست انرژی برای دستیابی به یک هدف خاص بازده انرژی است. در سال‌های اخیر، گام‌هایی در این مسیر برداشته شده است، همانطور که با علاقه و پذیرش توسط نهادهای رسمی، مانند کمیسیون اروپا و آژانس محیط زیست اروپا، نشان داده شده است. در اسپانیا، برنامه بهره‌وری و صرفه‌جویی انرژی برای سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شده است که در آن اثر بازگشتی نیز لحاظ شده است.

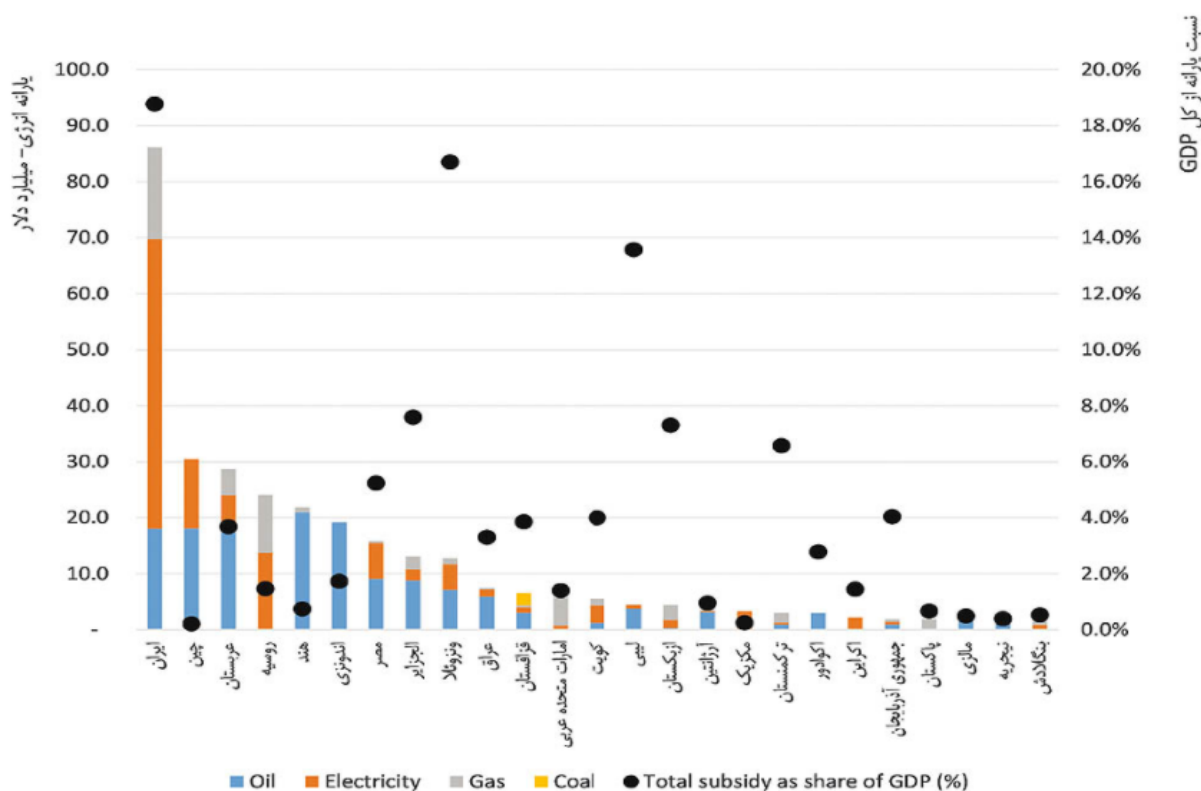
در کشورهایی که تاکنون به فکر بررسی راهکار کنترل اثر بازگشتی و در نتیجه کنترل و جلوگیری از پارادوکس بازدهی انرژی در بخش خانگی و صنعت پرداخته شده است دو راهکار اعمال مالیات بر مصارف انرژی و فرهنگ سازی یا همان تبلیغات و آموزش نحوه مصرف بهینه از انرژی، مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند که تا حد زیادی این اثر بازگشتی را کاهش داده است.

مالیات برای به حداقل رساندن اثر بازگشتی، به طور غیرمستقیم هزینه خدمات انرژی را از طریق افزایش قیمت انرژی افزایش می‌دهد، بنابراین کاهش هزینه ناشی از بهبود بهره‌وری انرژی با این افزایش قیمت انرژی جبران می‌شود. این امر تضمین می‌کند که تقاضای خدمات افزایش نمی‌یابد و بنابراین مصرف مستقیم انرژی به همان اندازه که انتظار می‌رود کاهش می‌یابد. علیرغم مشکلات ایجاد یک مالیات مناسب، استفاده از این ابزارها می‌تواند اثر بازگشتی و پارادوکس بازدهی انرژی را جبران کند و اقدامات بهره‌وری انرژی را موثرتر کند [۶].

## پارادوکس انرژی در صنعت برق ایران

صنعت برق ایران بزرگ‌ترین بخش یارانه‌ای انرژی در جهان است؛ بنابر گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA<sup>۲۳</sup>) ۴۶ درصد کل یارانه‌ای که در جهان برای برق پرداخت می‌شود مربوط به صنعت برق ایران بوده و سایر کشورها مجموعاً ۵۴ درصد کل یارانه‌ای که برای برق پرداخت می‌شود را به خود اختصاص می‌دهند. مثلاً روسیه با ۱۴۵ میلیون نفر جمعیت ۱۳ میلیارد دلار و چین با جمعیت ۱/۴ میلیارد نفر، ۱۲ میلیارد دلار یارانه برق داده می‌شود. اما ایران با جمعیت ۸۰ میلیون نفر، ۵۱ میلیارد دلار یارانه برق پرداخت می‌کند. بر اساس این گزارش در سال ۲۰۱۹ در جهان ۳۱۷ میلیارد دلار یارانه انرژی پرداخت شده است که ایران با ۸۶ میلیارد دلار رتبه اول است و از مجموع یارانه پرداختی، حدود ۶۰ درصد در بخش برق بوده که تقریباً برابر ۱۱ درصد تولید ناخالص داخلی است. در شکل (۱۱)، میزان یارانه انرژی در کشورهای مختلف در سال ۲۰۱۹ میلادی به گزارش IEA را مشاهده می‌کنید.

23 International Energy Agency



شکل (۱۱) - یارانه انرژی در کشورهای مختلف در سال ۲۰۱۹ میلادی (IEA)

این مساله که حوزه برق در ایران بیشترین میزان یارانه را به مردم پرداخت می کند، جای انکار ندارد. حال اگر مبنای سیاست گذاری برای پرداخت یارانه انرژی را افزایش رفاه جامعه در نظر بگیریم، باید انتظار داشت که مردم ایران بیشترین رضایت از بخش برق داشته باشند. این در حالی است که به رغم حجم زیاد یارانه ای که در بخش انرژی پرداخت می شود، در وقایعی مانند خاموشی های کلان شهرهای کشور در زمستان سال ۱۳۹۹ و خاموشی های داوطلبانه و اجباری تابستان سال های گذشته، حجم زیادی از نارضایتی از طریق شبکه های اجتماعی و رسانه ها در جامعه منتشر می شود که این سوال را مطرح می کند آیا به راستی این سیاست نه از منظر صرفا اقتصادی (که بارها مورد چالش قرار گرفته است و شکی در غلط بودن آن نیست)، بلکه از منظر اجتماعی، سیاست موجهی است؟ شواهد موجود حاکی از یک شرایط پارادوکس انرژی در

سیاست‌های حوزه برق را نشان می‌دهد؛ به این معنا که دولت ایران بیشترین حجم یارانه را در جهان و در بین سایر بخش‌ها به حوزه برق می‌دهد، اما میزان رضایت مردم در سطح مورد انتظار افزایش پیدا نکرده است یا دست کم حجم زیادی از نارضایتی در خصوص برق‌رسانی در کشور در میان اقشار جامعه و حوزه‌های صنعتی دیده می‌شود. بنابراین این پرسش به میان می‌آید که چرا با چنین وضع عجیبی در بخش برق مواجه هستیم؟ چگونه می‌توانیم این وضعیت را تحلیل کنیم و آیا می‌توانیم به سیاست‌گذار چهارچوبی برای تصمیم‌گیری جهت برون رفت از وضع موجود ارائه کنیم؟

منحنی لافر<sup>۲۴</sup> زمینه طرح ایده‌ای برای تحلیل شرایط سیاست‌گذاری یارانه انرژی فراهم کرد. داستانی از قول یک روزنامه‌نگار، مشهور شده است به این مضمون که در جلسه‌ای که لافر (یکی از معروف‌ترین اقتصاددان) در سال ۱۹۷۴ با مقامات دولت آمریکا (دیک چنی و دونالد رامسفلد) در یک رستوران داشته است، لافر روی یک دستمال کاغذی رابطه بین نرخ مالیات و درآمد دولت را نشان می‌دهد. طبق این نمودار رابطه بین مالیات و درآمد دولت به صورت یک منحنی  $U$  وارونه است؛ به این ترتیب که درآمد دولت با افزایش نرخ مالیات ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر میزان درآمد دولت از مالیات با دو نرخ بالا و پایین مالیاتی یکسان است. بنابراین به دولت پیشنهاد می‌کند برای آنکه سرمایه‌داران را برای سرمایه‌گذاری تشویق کند، نرخ مالیات را کاهش دهد بدون آنکه نگران کاهش درآمدهای دولتی باشند. اگر چه این مدل با داده‌های تجربی انطباق کاملی ندارد و انتقادهایی به آن شده است اما می‌تواند در فهمیدن و تحلیل موضوعات مشابه مانند سیاست‌گذاری یارانه (به عنوان مالیات منفی) راهگشا باشد. میزان رفاه دریافتی جامعه با افزایش یارانه ابتدا افزایش پیدا می‌کند و به نقطه ماکزیمم می‌رسد. مثلاً در بخش

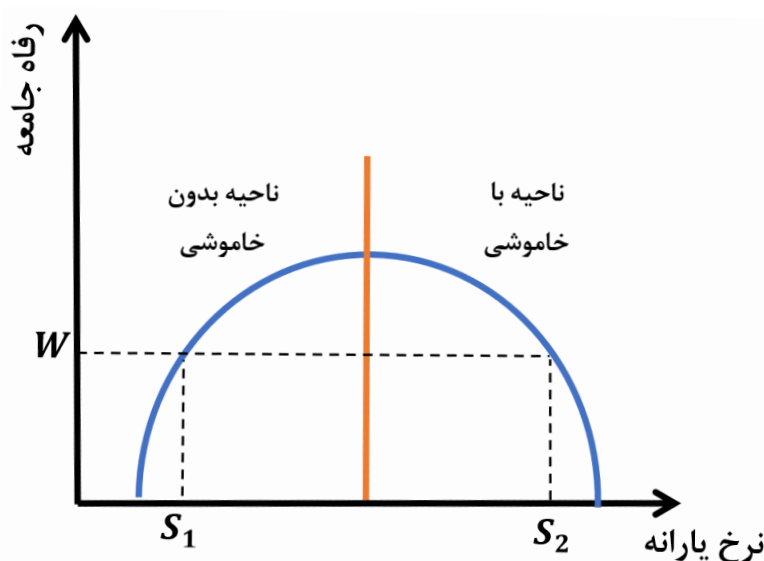
24 Laffer curve

برق، مردم با پرداختی کمتر، برق مورد نیاز خود را دریافت می‌کنند در نتیجه از رفاه بیشتری برخوردار می‌شوند، اما به دلیل آنکه مازاد رفاه مصرف‌کننده، از مازاد رفاه تولیدکننده می‌کاهد، در نتیجه انگیزه تولیدکنندگان برای سرمایه‌گذاری کاهش می‌یابد. همچنین اعتباری که دولت می‌توانست جهت توسعه زیرساخت‌ها سرمایه‌گذاری کند، صرف پرداخت یارانه شده است، بنابراین زیرساخت‌های صنعتی متناسب با میزان تقاضای مورد نیاز مصرف‌کننده افزایش پیدا نمی‌کند و به رغم تقاضای جامعه، پدیده خاموشی رخ می‌دهد. با بروز خاموشی، رفاه جامعه کاهش می‌یابد.

در این تحلیل می‌توانیم ناحیه رفاه را به دو بخش تقسیم کنیم که در بخش اول افزایش نرخ یارانه موجب افزایش رفاه می‌شود تا به نقطه شکنندگی صنعت می‌رسد. نقطه شکنندگی نقطه‌ای است که زیرساخت‌های صنعت برق برای عرضه برق در حداکثر ظرفیت خود قرار دارد و نمی‌تواند با افزایش تقاضای بیشتر برق مورد نیاز را تولید کند؛ در نتیجه پدیده خاموشی رخ می‌دهد. بنابراین در بخش دوم (بعد از نقطه شکنندگی) به رغم آنکه یارانه بیشتری پرداخت می‌شود به دلیل آنکه صنعت برق از مرز شکنندگی عبور کرده است و توان عرضه از میزان تقاضا جا مانده است، خاموشی رخ خواهد داد و با بروز خاموشی‌ها، میزان رفاه کاهش می‌یابد.

این تحلیل می‌تواند برای تعیین سطح مطلوب یارانه برق مورد استفاد قرار گیرد؛ به این معنا که میزان رفاه در منحنی به طور خطی با افزایش یارانه افزایش پیدا نمی‌کند. در واقع زمانی که خاموشی ایجاد شده باشد نشان‌دهنده کاهش رفاه اجتماعی است حتی اگر یارانه زیادی پرداخت شده باشد. به عبارت دیگر دولت برای پرداخت یارانه بخش برق، یک نقطه عطف دارد و با عبور از نقطه عطف، پرداخت یارانه بیشتر رفاه را افزایش نمی‌دهد. حال اگر دولت در وضعیت پرداخت یارانه زیاد همراه با پدیده خاموشی باشد، می‌تواند

میزان یارانه را کاهش دهد (جابه‌جایی از نقطه  $S_2$  به  $S_1$ ) و با خارج شدن از ناحیه خاموشی به ناحیه بدون خاموشی، بدون آنکه نگران کاهش سطح رفاه جامعه باشد، منابع آزاد شده را صرف توسعه زیرساخت صنعت خواهد کرد. بنابراین بر اساس این مدل می‌توانیم به سیاست‌گذار چهارچوبی برای تصمیم‌گیری در خصوص یارانه انرژی ارائه کنیم به این ترتیب که با توجه به قرارگیری سیاست پرداخت یارانه برق در نیمه دوم منحنی؛ دولت می‌تواند با کاهش یارانه بخش برق و سرمایه‌گذاری برای افزایش عرضه (از طریق افزایش ظرفیت تولید و بکارگیری فناوری‌های بهینه‌سازی)، بدون آنکه نگران کاهش رفاه اجتماعی باشد، موجب افزایش توان عرضه بخش برق شود و علاوه بر رونق بخشی صنعت برق، رشد اقتصادی، اشتغال و افزایش ثروت ملی را فراهم کند. در اینجا لازم به یادآوری است که کاهش یارانه بدون افزایش سرمایه‌گذاری برای زیرساخت‌های صنعت برق، میزان رفاه را کاهش خواهد داد.



شکل (۱۲) - منحنی رفاه جامعه بر حسب نرخ یارانه مصرفی برق



## فرض خزوم-بروکس<sup>۲۵</sup>

در دهه ۱۹۸۰، اقتصاددان‌هایی به نام دانیل خزوم و لئونارد بروکس به طور مستقل ایده‌هایی در مورد مصرف انرژی ارائه کردند که عبارت است از "افزایش بازده انرژی به طور متناقضی منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود".

به عبارت دیگر، این اصل بیان می‌کند که «بهبود بهره‌وری انرژی که بر اساس وسیع‌ترین ملاحظات، از نظر اقتصادی در سطح خرد صورت می‌گیرد، منجر به سطوح بالاتر مصرف انرژی در سطح کلان می‌شود». این نظریه تحلیل دقیق‌تری از پارادوکس جونز است.

لازم به ذکر است، اگر هزینه‌های انرژی سهم بزرگی از کل هزینه‌های یک محصول معین یا مصرف آن را تشکیل دهد، معمولاً اثر بازگشتی بیشتر خواهد بود و همچنین این مسئله به کشش‌های تقاضا یک محصول بستگی دارد. به عنوان مثال، بهره‌وری سوخت خودروها تاثیر بسیار بیشتری بر افزایش مسافت پیموده‌شده در مقایسه با افزایش راندمان انرژی در رستوران‌ها دارد (به عنوان مثال برای پخت و پز، یخچال، گرمایش و...). با توجه به این که برای رستوران‌ها، هزینه‌های انرژی مقدار کمی از کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد بنابراین تاثیر این مسئله در قیمت سوخت خودروها بسیار بیشتر است [۷].

## نتیجه‌گیری

سال‌های زیادی بسیاری از سیاست‌مداران و اقتصاددان‌ها معتقد بودند تنها راه نجات از بحران کمبود انرژی و نجات از این کابوس که منابع انرژی روزی تمام می‌شود، پیشرفت تکنولوژی و افزایش بهره‌وری در صنعت

25 Khazoom-Brookes postulate

است. به همین علت سرمایه‌گذاری‌های عظیمی در این زمینه انجام گرفته است تا بتوان به هدف " کاهش مصرف انرژی و رسیدن به بهره‌وری بالاتر" دست پیدا کرد. اما با گذشت زمان، روز به روز مصرف انرژی بالا رفته و نظریه اتمام انرژی در دنیا، قوت بیشتری پیدا کرده است. همچنین اثرات جانبی ناشی از این مسئله مانند: گرمایش زمین، تخریب گونه‌های مختلف زیست‌محیطی، تغییر اقلیم و... نگرانی‌ها بابت آینده کره‌زمین را بالا برده است.

مشاهده کردید که پارادوکس جونز به وسیله اثر بازگشتی، بیان می‌کند که پیشرفت فناوری، لزوماً به کاهش مصرف انرژی کمک نمی‌کند و حتی در شرایطی، مصرف انرژی را بالا می‌برد و منجر به بروز یک بی‌ثباتی و تشکیل یک متابولیسم پرا انرژی می‌شود. نظریه ژرژسکو-روگن<sup>۲۶</sup> بیان می‌کند که یک فناوری در چه صورت می‌تواند در یک سیستم اقتصادی-اجتماعی، با دوام باشد و در راستای رسیدن به اهداف سیستم (در این جا هدف ما کاهش مصرف انرژی است)، حرکت کند. به گفته این نظریه "یک فناوری مانند یک گونه زیستی قابل دوام و زنده است، اگر و تنها اگر بتواند خود را با مازاد انرژی که توسط راه‌اندازی همین فناوری تولید و اکنون در حال استفاده است، تکثیر کند."

مطابق تعریف فوق، امکان اجرای یک فناوری شرط کافی برای با دوام بودن و کارا بودن آن نخواهد بود. امروزه می‌دانیم که سوخت‌های فسیلی ارزش بسیار بالایی برای صنایع مختلف دارند. جامعه مدرن، به دلیل تامین فراوان نفت با کیفیت، در ۵۰ سال گذشته و تلاش برای پیشرفت‌های فناوری برای بالا بردن سطح بهره‌وری، در حال افزایش پدیده مرتبط با پارادوکس جونز در سراسر جهان بوده است.

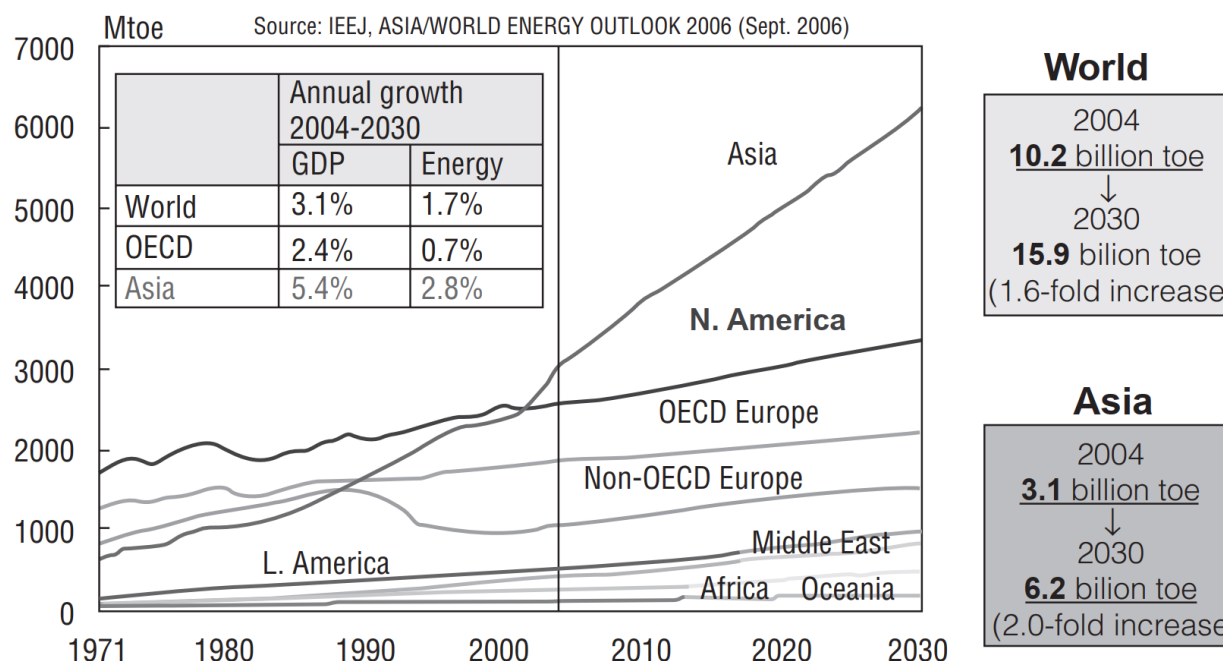
---

26 Georgescu-Roegen

پارادوکس جونز موضوعی است که در چند دایره دانشگاهی شناخته می‌شود و نیازمند داشتن یک نگاهی سیستمی است. همچنین در این دوره که با مسائلی مانند افزایش قیمت حامل انرژی و مشکلات زیست‌محیطی و نگرانی نسبت به رسیدن به نقطه اوج مصرف نفت، روبه‌رو هستیم، اهمیت تازه‌ای پیدا کرده است. این مسئله هم برای کشورهای صادرکننده نفت (عمده درآمد این کشورها از صادرات نفت است و اگر روزی تمام شود، به مشکل خواهند خورد) و هم کشورهای واردکننده نفت (نفت منبع اصلی اکثر محصولات و صنایع این کشورها است) از اهمیت بالایی برخوردار است و بسیاری از کشورهای واردکننده نفت را به فکر یافتن یک سناریوی جدید انرژی، انداخته است. به طور مثال ۷۰ درصد از واردات نفت چین از خاورمیانه است. نگرانی‌های چین در رابطه با افزایش وابستگی به واردات نفت، منجر به مشارکت فعال آن در اکتشاف، تولید و بهره‌برداری نفت شده است. امروزه شرکت‌های چینی در کشورهای قزاقستان، روسیه، ونزوئلا، غرب آفریقا، ایران، عربستان سعودی و کانادا، حضور بسیار فعال و مهمی دارند. اما چین تنها بازیگر تشنه نفت در آسیا نیست، کشورهای دیگر از جمله هند قرار است به تقاضای انرژی در جهان کمک کنند. در حقیقت چین و هند، ۷۰ درصد از مصرف نفت آسیا را طی ۳۰ سال آینده برای خود پیش‌بینی کرده‌اند که با توجه به محدود بودن منابع نفتی، این مسئله برای سایر اقتصادهای بزرگ جهان مانند آمریکا بسیار نگران‌کننده خواهد بود. شکل (۱۰) تقاضا برای انرژی در جهان را به تفکیک نشان می‌دهد. همان طور که گفته شد، در آینده نزدیک تقاضای انرژی در آسیا بسیار افزایش پیدا خواهد کرد. امروزه شاهد آن هستیم به علت کاهش شدید ذخایر نفتی در جهان، بسیاری از کشورها مجبور هستند از زغال سنگ، گاز طبیعی و منابع غیر متعارف نفت مانند نفت سنگین، نفت شیل<sup>۲۷</sup>، ماسه‌های نفت و شن‌های

<sup>2</sup> Shell oil

قیر استفاده کنند و این مسئله در آینده بیشتر خواهد شد. با این حال تامین این منابع انرژی نیز محدود است و کیفیت بسیاری از آن‌ها، با منابع کنونی نفت فاصله زیادی دارد. در حالی که جهان منتظر یک راه‌حل فنی برای بحران انرژی است، این منابع به مرور جایگزین حامل‌های کنونی نفت خواهند شد و مصرف آن‌ها بالا خواهد رفت. به دلیل بازگشت انرژی پایین آن‌ها و تولید آلودگی بسیار زیاد، شاهد افزایش خسارات وارده به محیط زیست خواهیم بود.



شکل (۱۳) - پیشبینی تقاضای انرژی در جهان تا سال ۲۰۳۰

در آخر می‌توان گفت که با توجه به پارادوکس انرژی، یک تهدید بسیار خطرناک برای امنیت انرژی جهان و مسائل زیست محیطی وجود دارد. اهمیت این مسئله برای کشورهای واردکننده انرژی بیشتر است و به نوعی پارادوکس انرژی، سیاست‌های عدم وابستگی آن‌ها در حوزه انرژی به کشورهای غرب آسیا را توجیه می‌کند. اما راه حل چیست؟ آیا باید سرمایه‌گذاری و پیشرفت در جهت بهره‌وری انرژی و گسترش فناوری را متوقف کنیم؟

خیر، هدف ما از تشریح این گزارش، این است که گسترش فناوری تنها راه نجات بشر از بحران پیش‌رو نیست (برخلاف چیزی که بسیاری از مردم به آن باور دارند). برای پیدا کردن یک راه حل، باید تمام جوانب را سنجید. حال آنکه پیشرفت فناوری می‌تواند در جای خود به کاهش مصرف انرژی و حفظ محیط‌زیست کمک کند. مانند: استفاده از ماشین‌های هیبریدی در جوامع توسعه یافته که ناشی از پیشرفت تکنولوژی و فناوری است، می‌تواند به نوبه خود، در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک کند.

همچنین در کشورهایی که تاکنون به فکر بررسی راهکار کنترل اثر بازگشتی و در نتیجه کنترل و جلوگیری از پارادوکس بازدهی انرژی در بخش خانگی و صنعت پرداخته شده است دو راهکار اعمال مالیات بر مصارف انرژی و فرهنگ سازی یا همان تبلیغات و آموزش نحوه مصرف بهینه از انرژی، مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند که تا حد زیادی این اثر بازگشتی را کاهش داده‌اند.

مالیات برای به حداقل رساندن اثر بازگشتی، به طور غیر مستقیم هزینه خدمات انرژی را از طریق افزایش قیمت انرژی افزایش می‌دهد، بنابراین کاهش هزینه ناشی از بهبود بهره‌وری انرژی با این افزایش قیمت انرژی جبران می‌شود. این امر تضمین می‌کند که تقاضای خدمات افزایش نمی‌یابد و بنابراین مصرف مستقیم انرژی به همان اندازه که انتظار می‌رود کاهش می‌یابد. علیرغم مشکلات ایجاد یک مالیات مناسب، استفاده از این ابزارها می‌تواند اثر بازگشتی و پارادوکس بازدهی انرژی را جبران کند و اقدامات بهره‌وری انرژی را موثرتر کند.

مسئله بسیار مهم این است که سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران کشور باید به مسئله پارادوکس انرژی توجه کنند. در واقع پارادوکس انرژی مستقل از هر گونه منابع انرژی جدیدی که در آینده کشف شود، همواره با ما خواهد بود به خصوص زمانی که یک فناوری جدید در راستای افزایش بهره‌وری آن، مطرح شود.

## منابع و مراجع

- [1]. Steven R. Gundry, MD, "The energy pradox what to do when your get up and go has got up and gone" , 2008.
- [2]. John M. Polimeni, Kozo Mayumi, Mario Giampietro , Blake Alcott, " The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements", 2008.
- [3]. Steve Sorrell, "Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency" 2009.
- [4]. DAAN P. VAN SOEST and ERWIN H. BULTE " Does the Energy-Efficiency Paradox Exist? Technological Progress and Uncertainty", March 2000.
- [5]. Shannon Kehoe , Heather Yutko, "ENERGY EFFICIENCY AND CONSERVATION: A PARADOX" , 2009.
- [6]. Jaume Freire-González, Ignasi Puig-Ventosa "Energy Efficiency Policies and the Jevons Paradox", November 2015.
- [7]. Stephen J DeCanio, "The efcieny paradox: bureaucratic and organizational barriers to profitable energy-saving investments", 1998.
- [8]. Todd D. Gerarden, Richard G. Newell, Robert N. Stavins, "Assessing the Energy-Efficiency Gap", 2015.
- [9]. Edward Tenner, "The Efficiency Paradox What big data cant do", 2018.
- [10]. William Steinhurst, Vladlena Sabodash, "The Jevons Paradox and Energy Efficiency A Brief Overview of Its Origins and Relevance to Utility Energy Efficiency Programs" February 2011.