

## تجزیه و تحلیل بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های نفت و گاز اقتصاد ایران

ابراهیم حیدری<sup>۱</sup>

دانشیار اقتصاد دانشگاه خلیج فارس (بوشهر)، eheidari@pgu.ac.ir

فاطمه لشنی

کارشناس ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه خلیج فارس (بوشهر)،

fatemehlashani69@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۰۸

### چکیده

این مقاله به بررسی روند بازده انرژی در فعالیت‌های نفت و گاز در ایران و پیش‌بینی روند آینده این شاخص پرداخته است. در این راستا با استفاده از دو مدل تولید ونگ و هابرت به پیش‌بینی روند تولید نفت و گاز و مقایسه قدرت پیش‌بینی دو مدل پرداخته‌ایم. بررسی روند گذشته بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد نشان داد که حداقل میزان این شاخص طی دوره ۱۳۸۶-۱۳۶۸ مربوط به سال ۱۳۸۱ و معادل با ۴/۹ بوده و حداکثر میزان این شاخص در سال ۱۳۸۶ معادل با ۶۰/۲ می‌باشد. نتایج پیش‌بینی‌ها بر اساس مدل هابرت نشان می‌دهد تحت سناریوی میانگین در سال ۱۴۴۶ با میزان ۱۰۷۰/۱۷ میلیون تن به اوج تولید نفت خام و گاز طبیعی خواهیم رسید، اما براساس مدل پیش‌بینی تولید ونگ این اتفاق در سال ۱۴۶۶ و معادل ۱۱۲۲/۸۲ میلیون تن به وقوع خواهد پیوست. مقایسه قدرت پیش‌بینی دو مدل تولید هابرت و ونگ نشان می‌دهد مدل ونگ دارای قدرت پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل هابرت است.

طبقه‌بندی JEL: Q30, Q39, Q40, Q48, Q49, P18, L27, C02

کلید واژه‌ها: بازده انرژی سرمایه‌گذاری، مدل ونگ، مدل هابرت، ایران، نفت، گاز

## ۱- مقدمه

نفت و گاز نیروی حیاتی کشورهای صنعتی و اقتصادهای وابسته به نفت و گاز می‌باشد. بسیاری از محققان معتقدند که با رشد جمعیت انسانی و به تبع آن افزایش مصرف، رشد اقتصاد با عامل بازدارنده‌ای تحت عنوان "محدودیت منابع انرژی" روبرو خواهد شد. از اینرو همواره نگرانی در خصوص زیست‌پذیری آینده نفت و گاز و اقتصادهای وابسته به آن وجود دارد، بنابراین انرژی و تغییرات آن در طول زمان، از عوامل قابل توجه می‌باشند زیرا منبع اصلی اقتصاد است و جز ضروری هر نوع فعالیت اقتصادی محسوب می‌شود. (دیکسون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷)

در اکثر جوامع تصمیمات مربوط به انرژی با ملاحظات سیاسی همراه است، که این ملاحظات سیاسی پیش‌بینی‌های تولید انرژی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیش-بینی‌های تولید انرژی تنها بر مبنای اقتصادی و براساس تجزیه و تحلیل هزینه-فایده صورت نمی‌گیرد، بلکه ملاحظات سیاسی نیز تأثیر زیادی بر آن دارد. تجزیه و تحلیل-های مبتنی بر قیمت‌ها و روند قیمت‌های انتظاری نمی‌تواند یک راهنمای مؤثر برای پیش‌بینی عرضه انرژی باشد، زیرا در آینده به دلایل زمین‌شناسی و تخلیه منابع، احتمال در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی بسیار کم خواهد بود. علاوه بر این قیمت‌های امروز انرژی تا حد زیادی تحت تأثیر یارانه‌های مختلف قرار دارد. (هال و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹)

از جمله عوامل نگرانی در خصوص عرضه انرژی از دشوارتر شدن تولید نفت و گاز در پی افزایش هزینه‌های استخراج انرژی ناشی می‌شود. همان‌گونه که ارزیابی ما از سرمایه‌گذاری مالی برپایه مقایسه میزان بازگشت آن با مقدار هزینه اولیه انجام می‌گیرد، می‌توان در ارزیابی تولید انرژی نیز از روش بازده انرژی سرمایه‌گذاری<sup>۳</sup> بهره گرفت (دیکسون، ۱۳۸۶).

بازده انرژی سرمایه‌گذاری روشی برای برآورد بازگشت انرژی به اقتصاد و جامعه در مقایسه با انرژی مورد نیاز برای بدست آوردن انرژی است. این روش اگرچه ساده است اما در اندازه‌گیری مقدار یک منبع انرژی روشی قوی به شمار می‌آید. بازده انرژی

1. Dyckson  
2. Hall et al  
3. Energy return on investment (EROI)

سرمایه‌گذاری از تقسیم میزان انرژی تولیدی بر میزان انرژی مصرفی برای حصول آن میزان انرژی تولید شده، حاصل می‌شود.

بازده انرژی سرمایه‌گذاری روشی مناسب برای آزمون فواید و مضرات سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شود. فرآیندهای تولید انرژی به‌طور خاص و واحدهای انرژی به‌طور عام با تولید مازاد بازده انرژی و بالاتر از انرژی مورد نیاز برای فرآیند تولید به جامعه خدمت می‌کند. آن بخش از انرژی که برای تولید سوخت مورد نیاز فرآیندهای خود نیازمند بخش عمده انرژی تولیدی‌اش باشد، انرژی کمتری را به جامعه ارائه می‌دهد. (گرندل، هال و هوک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱)

بازده انرژی در سرمایه‌گذاری برای جامعه حائز اهمیت است زیرا معیار مهم یک اندازه‌گیرنده مهم عرضه انرژی حاصل از سرمایه‌گذاری روی یک منبع انرژی و استخراج آن است که می‌تواند به دیگر بخش‌های اقتصادی جهت تولید کالاها و خدمات علاوه بر آنچه جهت تولید خود نیاز دارد ارائه دهد. (مورش باچر<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲)

هدف این مقاله، مطالعه وضعیت کنونی و پیش‌بینی روند آینده بازده انرژی سرمایه‌گذاری در تولید نفت و گاز در ایران بر پایه مدل ونگ<sup>۳</sup> و مدل هابرت<sup>۴</sup> و مقایسه قدرت پیش‌بینی این دو مدل است. در این تحقیق با سه سؤال مهم مواجه هستیم که انتظار می‌رود در حین انجام مطالعه پاسخی درخور به آنها داده شود. سؤال اول، وضعیت کنونی و روند آینده بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیتهای نفت و گاز ایران چگونه است؟ سؤال دوم، از میان مدل‌های ونگ و هابرت کدام مدل در پیش‌بینی تولید کارایی بیشتری دارا می‌باشد؟ و سؤال سوم اینکه بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیتهای نفت و گاز در ایران به لحاظ تاریخی دارای چگونه رفتاری است؟

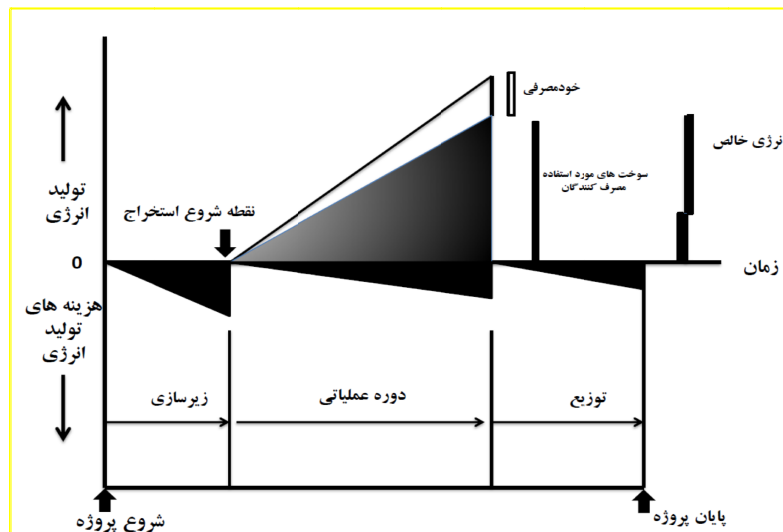
- 
1. Grandell, Hall & Hook
  2. Moerschbaecher
  3. Weng Model
  4. Hubbert Model

## ۲- مبانی نظری و مروری بر مطالعات پیشین

یک راه ارزیابی سیستم انرژی، تجزیه و تحلیل انرژی خالص است که از مقایسه میزان انرژی بازگشتی به جامعه با توجه به تکنولوژی خاص با انرژی ورودی بخش اکتشاف، استخراج و پردازش به دست می‌آید. به عبارت دیگر انرژی ورودی در برگیرنده سرمایه‌گذاری (در اشکال سوخت، فولاد، نیروی کار و...) برای تولید انرژی است و انرژی خالص آن مقداری از عرضه انرژی است که پس از بازپرداخت میزان سرمایه‌گذاری‌های انجام شده باقی می‌ماند. معادله انرژی خالص به صورت زیر است: (فریز، ۲۰۱۱)

انرژی ورودی - انرژی خروجی = انرژی خالص

شکل (۱) سیستم انرژی فرضی و انواع انرژی ورودی و هزینه‌های انرژی (و محصولات انرژی (تولیدات انرژی) را به تصویر می‌کشد، این شکل فرضی می‌تواند اشاره به یک چاه نفت، معدن زغال‌سنگ، نیروگاه هسته‌ای، نیروگاه بادی یا تاسیسات نفت‌رسی داشته باشد.



شکل ۱. سیستم فرضی انرژی (کلیولند و کونور، (۲۰۱۱))

تجزیه و تحلیل انرژی خالص به دنبال بررسی انرژی مستقیم و غیرمستقیم مورد نیاز برای تولید یک واحد انرژی است. هزینه‌های انرژی از جمع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم حاصل می‌شود. انرژی مستقیم سوخت، برق یا هر نوع انرژی است که به‌طور مستقیم در استخراج یا تولید یک واحد انرژی به‌کار می‌رود و انرژی غیرمستقیم انرژی که در جای دیگر اقتصاد جهت تولید کالاها و خدماتی مورد استفاده در استخراج و تولید انرژی به‌کار می‌رود که این انرژی‌ها در مجموع، انرژی ورودی محسوب می‌شوند. (کلیولند و اوکانر<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱)

از جمله دلایل اهمیت انرژی خالص عبارتند از:

- ۱- محدودیت دسترسی به منابع انرژی و سوخت و
  - ۲- ارتباط قوی میان انرژی خالص با استانداردهای مادی زندگی و فرصت‌های اقتصادی موجود در جامعه. (دیل و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱)
- انرژی خالص اگرچه مفید اما گمراه‌کننده است، زیرا برای یک منبع بزرگ اما با کیفیت پایین این شاخص بزرگ است. به همین دلیل بهتر است از شاخص بازده انرژی سرمایه‌گذاری (EROI) در فعالیتهای تولید انرژی را به‌کار ببریم تا مسئله کیفیت هم در نظر گرفته شود. (گوپتا و هال<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱)

بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیتهای تولید انرژی شاخصی برای برآورد بازگشت انرژی به اقتصاد و جامعه در مقایسه با انرژی مورد نیاز برای به‌دست آوردن انرژی است. این شاخص اگرچه ساده است اما در اندازه‌گیری مقدار یک منبع انرژی روشی قوی به شمار می‌آید. شاخص بازده انرژی سرمایه‌گذاری از تقسیم میزان انرژی تولیدی بر میزان انرژی مصرفی در به‌دست آوردن آن میزان انرژی تولید شده، حاصل می‌شود. (گرنندل و همکاران، ۲۰۱۱). فرمول بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیتهای تولید انرژی عبارت است از: (کلیولند و اوکانر، ۲۰۱۱)

$$EROI = \frac{\text{کل انرژی حاصل شده}}{\text{کل انرژی مصرف شده}}$$

- 
1. Cleveland & O'connor
  2. Dale et al
  3. Gupta & Hall

برخی مزایای بالقوه‌ای که تجزیه و تحلیل بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های تولید انرژی می‌تواند ارائه دهد به شرح زیر می‌باشد.

۱- بسیار شبیه به تجزیه و تحلیل هزینه - فایده است از طرفی تجزیه و تحلیل بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های تولید انرژی می‌تواند یک خروجی عددی ارائه دهد که می‌تواند به راحتی با دیگر محاسبات مشابه مقایسه شود.

۲- بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های تولید انرژی یک معیار مفید جهت اندازه‌گیری کیفیت منابع است، منابع با بازده انرژی سرمایه‌گذاری بالا مفیدتر و با کیفیت‌تر از منابع با بازده انرژی سرمایه‌گذاری پایین است، اگر بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های تولید انرژی در طول زمان کاهش یابد، آنگاه بیشتر فعالیت‌های اقتصادی صرف تولید انرژی جهت فعالیت‌های اقتصادی می‌شود و کارهای مفید اقتصادی کمتری (مثل تولید کالا و خدمات مطلوب) صورت می‌گیرد.

۳- این معیار اندازه‌گیری در مقایسه با معیارهای استاندارد منابع انرژی، بینش و درک بیشتری از انرژی خالص حاصله از منبع انرژی ارائه می‌دهد. به‌طور مثال ماسه‌های نفتی کانادا چیزی حدود ۱۷۰ میلیارد بشکه نفت قابل استحصال را داراست که این وبازده انرژی سرمایه‌گذاری آن ۳ به ۱ است که نشان می‌دهد سه چهارم از ۱۷۰ میلیارد بشکه نفت خامبه‌عنوان انرژی خالص خواهد بود.

۴- ایجاد داده‌های سری زمانی بازده انرژی سرمایه‌گذاری برای یک منبع خاص نشان می‌دهد که چگونه کیفیت این منبع در طی زمان تغییر می‌کند. کاهش در بازده انرژی سرمایه‌گذاری نشان‌دهنده کاهش کیفیت منابع است که افزایش در سرمایه‌گذاری‌ها را بدون افزایش در خروجی انرژی نشان می‌دهد. به بیان دیگر این مسئله اثرات تکنولوژی و تخلیه را نشان می‌دهد. اگر بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های تولید انرژی در حال کاهش باشد که اثر تخلیه غالب بر اثر تکنولوژی می‌باشد (هال، ۲۰۱۱)

گیتلی<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) طی مطالعه‌ای به برآورد بازده انرژی سرمایه‌گذاری نفت و گاز ایالات متحده در سواحل مکزیک پرداخت و به این نتیجه رسید که بازده انرژی سرمایه‌گذاری دارای دامنه‌ای میان ۱۰ تا ۲۵ می‌باشد که متاثر از چگونگی تعریف

1. Gately

هزینه‌هاست. گگنون و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) یک ارزیابی مقدماتی از بازده انرژی سرمایه‌گذاری برای نفت و گاز جهان انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که در سال ۱۹۹۱، EROI سرچاه نفت برابر با ۲۶ بود که در سال ۱۹۹۹ به ۳۵ افزایش و سپس در سال ۲۰۰۶ به ۱۸ کاهش یافته است. به اعتقاد آنها این روند نشان‌دهنده آنست که عرضه جهانی نفت خام در دسترسبه‌طور قابل توجهی کمتر از برآورد ذخایر ناخالص است.

گرندل و همکاران (۲۰۱۰)، بازده انرژی سرمایه‌گذاری را در صنعت نفت و گاز نروژ طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۸ بررسی کردند و بدین نتیجه دست یافتند که بازده انرژی سرمایه‌گذاری تولید نفت خام نروژ در اوایل دهه ۱۹۹۰ معادل ۴۴ به یک بوده که به حداکثر خود یعنی ۵۹ به یک در سال ۱۹۹۶ می‌رسد و در نیمه دوم ۲۰۰۰ حدود ۴۰ به یک بوده است. آنها نشان می‌دهند که تغییر شدت حفاری اثر کمی بر به‌دست آوردن انرژی خالص از میادین دارد و انتظار می‌رود که با زیاد شدن عمر میادین بازده انرژی سرمایه‌گذاری در نفت و گاز بدتر شود.

گولفورد و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) از بازده انرژی سرمایه‌گذاری برای تولیدات و اکتشافات نفت و گاز ایالت متحده آمریکا را مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که EROI برای اکتشاف نفت و گاز از ۱۲ در ۱۹۱۹ به ۵ در ۲۰۰۷ کاهش یافته و برای تولیدات صنایع نفت و گاز، از ۱۹۱۹ تا ۱۹۷۲ حدود ۲۰ بوده که در سال ۱۹۸۲ در اوج عملیات حفاری به ۸ رسیده و سپس طی دوره ۲۰۰۲-۱۹۸۶ به ۱۷ بهبود یافته و در اواسط دهه ۲۰۰۰ با کاهشی شدید به ۱۱ رسیده است. موارد فوق نشان می‌دهد در بلندمدت با کاهش تدریجی بازده انرژی سرمایه‌گذاری در تولیدات و اکتشافات نفت و گاز و همچنین رابطه معکوس با تلاش‌های حفاری مواجه هستیم. فریز (۲۰۱۱) به بررسی بازده انرژی سرمایه‌گذاری و انرژی خالص ناشی از تولید نفت و گاز طبیعی معمول در غرب کانادا توسط روش‌های گوناگون جهت کشف پویایی‌های انرژی پرداخته است. تمامی این روش‌ها یک روند نزولی بازده انرژی سرمایه‌گذاری را برای سه دهه اخیر نشان داده‌اند.

1. Gagnon et al

2. Guilford et al

هو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) به مطالعه بازده انرژی سرمایه‌گذاری میدان بزرگ نفتی داکینگ پرداختند نتایج حاکی از کاهش بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد در سال ۲۰۰۱ به ۱۰ و در سال ۲۰۰۹ به ۶/۵ بود. براساس این بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد به ۴/۷ در ۲۰۱۵ کاهش یافته و از طرفی انرژی خالص این میدان نیز کاهش خواهد یافت. روند بازده انرژی سرمایه‌گذاری و انرژی خالص میدان نفتی داکینگ نشان می‌دهد که این میدان در آینده با دشواری‌هایی روبرو خواهد شد که بدون حمایت دولت توان مقابله با آنان را نخواهد داشت.

اسکلو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) به پیش‌بینی تولید نفت در برزیل براساس مدل هابرت و احتمال افزایش ذخایر نفتی پرداختند و نشان دادند که منحنی تولید نفت در برزیل با بیش از ۱۵ سال تأخیر به اوج خود می‌رسد و اینکه تولید نفت به احتمال ۷۵ درصد به ۳.۲۷<sup>۳</sup> میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۲۰ و با احتمال ۵۰ درصد به ۳.۲۸ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۲۸ و با احتمال ۳۹ درصد به اوج خود ۳.۸۸ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۳۶ خواهد رسید.

وانگ و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۱) به مقایسه مدل هابرت و مدل عمومی ونگ پرداخته و فرآیند حل هر دو مدل را به تفسیر کشیده و از این مدل‌ها برای پیش‌بینی تولید نفت استفاده کرده‌اند. نتایج بررسی و مقایسه نشان می‌دهد که اوج تولید نفت در سال ۲۰۱۱ بالغ بر ۳۰ میلیون بشکه خواهد بود و با توجه به قیاس مدل هابرت و مدل ونگ<sup>۵</sup> و اعمال شرایط یکسان بدین نتیجه گرفتند که مدل عمومی ونگ، مدلی بهبود یافته‌تر از مدل هابرت می‌باشد.

ماگیو و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۲) به پیش‌بینی روند تولید سوخت‌های فسیلی در جهان با استفاده از مدل هابرت پرداخته و اذعان می‌دارند که این رویکرد به ما اجازه می‌دهد تا با استفاده از داده‌های تاریخی تولید نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ پی ببریم که منابع انرژی چه زمانی به اوج خود می‌رسند. براساس پیش‌بینی آنها تولید نفت در سال ۲۰۱۵

1.Hu et al

2.Szklo et al

3.Million barrel per day

4.Wang et al

5.Weng model

6.Maggio et al



به ۳۰ میلیارد بشکه در سال و تولید گاز طبیعی در سال ۲۰۳۵ به ۱۳۲ تریلیون فوت مکعب در سال و تولید زغال سنگ در سال ۲۰۵۲ به ۴/۵ میلیارد تن معادل نفت در سال به اوج خود خواهند رسید.

کیانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) طی مطالعه‌ای برای اولین بار در ایران، به بررسی قله هابرت نفت خام ایران تحت یک رویکرد سیستم دینامیکی پرداختند، براساس نتایج این مطالعه اوج تولید نفت خام در سال ۱۴۲۲ با مقدار ۶۲۴.۴۶ میلیون تن رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که در این مطالعه به کمک سناریوهای مختلف و همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت، پیش‌بینی‌هایی در مورد زمان و مقدار اوج هابرت در شرایط مختلف صورت گرفته است.

### ۳- الگوی تحقیق

جهت محاسبه EROI می‌بایستی ابتدا مرز و ترکیب ستاده و نهاده را مشخص نمود، مرز سیستم انرژی برای محاسبه این شاخص براساس مطالعات هو و همکاران (۲۰۱۳) در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱. مرز ستاده و نهاده و چارچوب دو بعدی تجزیه و تحلیل شاخص بازده انرژی سرمایه‌گذاری (EROI)

مرزهای خروجی سیستم انرژی			سطوح مختلف ورودی‌های سیستم انرژی
۳-مصرف	۲-پردازش	۱-استخراج	
$EROI_{3,D}$	$EROI_{2,D}$	$EROI_{1,D}$	انرژی و مواد مستقیم (D)
$EROI_{3,I}$	$EROI_{2,I}$	$EROI_{1,I}(EROI_s)$	انرژی و مواد غیرمستقیم (I)
$EROI_{3,Lab}$	$EROI_{2,Lab}$	$EROI_{1,Lab}$	معادل انرژی هزینه‌های پرداختی نیروی کار (Lab)
$EROI_{3,Aux}$	$EROI_{2,Aux}$	$EROI_{1,Aux}$	معادل انرژی استفاده از خدمات جانبی (Aux)
$EROI_{3,Env}$	$EROI_{2,Env}$	$EROI_{1,Env}$	معادل انرژی هزینه‌های جبران خسارت‌های زیست محیطی (Env)

همان‌گونه که از جدول ۱ ملاحظه می‌شود، ستاده به سه بخش استخراج، پردازش و مصرف نهایی تقسیم می‌شود و نهاده نیز به پنج بخش طبقه‌بندی می‌شود که عبارتند از: انرژی و مواد مستقیم، انرژی و مواد غیرمستقیم (معادل انرژی مصرفی هزینه‌های خرید)، معادل انرژی هزینه‌های پرداختی در به‌کارگیری نیروی کار، معادل انرژی استفاده از خدمات جانبی و معادل انرژی هزینه‌های جبران خسارت‌های زیست محیطی. براساس اطلاعات جدول فوق بازده انرژی سرمایه‌گذاری برحسب انواع ستاده و نهاده‌ها در ۱۵ زمینه قابل مطرح است.

در مطالعه حاضر به محاسبه و بررسی بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد (مربوط به ستاده استخراج و نهاده مواد و انرژی غیرمستقیم) که در جدول ۱ با  $EROI_{1,I}$  یا  $EROI_{stnd}$  نشان داده شده، می‌پردازیم. بر این اساس در تحقیق حاضر ستاده‌ها شامل تولید نفت خام و گاز طبیعی و نهاده‌ها نیز شامل مصرف انرژی بخش استخراج و معادل انرژی مصرفی هزینه‌های خرید (که با شدت انرژی بخش صنعت بیان می‌شود) می‌باشند. بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$EROI_{stnd} = \frac{E_0}{E_D + E_I} \quad (1)$$

که در اینجا،  $E_0$  خروجی پروسه شامل میزان تولید سالانه نفت خام و گاز طبیعی بر حسب داده‌های تولید نفت خام و گاز طبیعی،  $E_D$  ورودی مستقیم پروسه انرژی شامل مصرف انرژی در بخش اکتشاف و استخراج می‌باشد.  $E_I$  نیز ورودی غیرمستقیم پروژه معادل انرژی مصرفی هزینه‌های سرمایه‌گذاری در بخش اکتشاف و استخراج می‌باشد. بدیهی است جهت بررسی روند آینده این شاخص بایستی ابتدا اجزای صورت و مخرج کسر را پیش‌بینی نماییم. در این تحقیق جهت پیش‌بینی تولید از مدل‌های ونگ و هابرت استفاده می‌گردد که پس از مقایسه نتایج، مدل با کارایی بیشتر برگزیده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین به‌منظور پیش‌بینی مخرج نیز از روش برون‌یابی خطی استفاده شده و در نهایت روند آینده بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد را استخراج خواهیم نمود.

### مدل پیش‌بینی هابرت

هابرت ژئوفیزیکی‌دانی است که در دهه ۱۹۵۰، برای اولین بار یک روش عمومی را تحت عنوان تئوری اوج هابرت بر پایه محدودیت عرضه هر منبع انرژی و همچنین رفتار نرخ تولید ارائه داد. مطابق این روش نرخ تولید در طول مرحله توسعه به صورت نمایی افزایش می‌یابد تا به اوج خود برسد، سپس با نرخ تصاعدی کاهش می‌یابد تا جایی که منبع تخلیه شود. او در سال ۱۹۵۶، این تئوری را در تولید نفت‌خام ایالت‌های آمریکا به جز آلاسکا و هاوایی به کار گرفت و به درستی پیش‌بینی کرد که در سال ۱۹۶۵ تولید به اوج خود می‌رسد. هابرت تئوری خود را در قالب ریاضی بیان نمود بگونه‌ای که برای تبیین رفتار تولید، منحنی زنگوله‌ای شکلی را معرفی نمود که بعدها توسط بسیاری از محققان به منظور پیش‌بینی تولید مورد استفاده قرار گرفت و به مدل پیش‌بینی هابرت مشهور شد. (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱)

این مدل پیش‌بینی توسط مجموعه معادلات شماره ۲ الی ۴ به شرح زیر معرفی می‌شود: (ساراوایا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴)

$$q(t) = \frac{2Q_{\max}}{1 + \cosh[\beta(t-t_m)]} \quad (۲)$$

$$Q = \frac{Q_s}{1 + e^{-\beta(t-t_m)}} \quad (۳)$$

$$Q_s = \frac{4Q_{\max}}{\beta} \quad (۴)$$

در اینجا،  $q(t)$  تولید سالانه،  $\beta$  پارامتر شیب منحنی،  $e$  پایه لگاریتم طبیعی (عددنپر)،  $t_m$ : سال حداکثر تولید،  $Q_{\max}$  حداکثر تولید،  $Q$  تولید تجمعی و  $Q_s$  حداکثر موجودی قابل استحصال منبع می‌باشد. جهت حل مدل بالا به سناریوسازی حداکثر منابع قابل استحصال می‌پردازیم. در این رابطه سه سناریو در نظر گرفته می‌شود. (آکورو آکارو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱)

سناریو اول: روش خطی‌سازی هابرت است که طبق فرمول ۵ بیان می‌شود:

$$\frac{dQ}{dt} = q(t) = \alpha \cdot Q \left(1 - \frac{Q}{Q_s}\right) \quad (۵)$$

پارامتر  $\alpha$  نرخ رشد لجستیک است.

سناریو دوم: حداکثر منابع قابل استحصال از جمع ساده تولید تجمعی و میزان ذخایر به‌دست می‌آید.

سناریو سوم: میانگین ساده مقادیر سناریو اول و دوم می‌باشد.

برای تخمین مدل هابرت در ابتدا مقدار حداکثر موجودی قابل استحصال منبع یا  $Q_s$  را بر حسب سه سناریو محاسبه می‌کنیم. پس از محاسبه  $Q_s$  بر پایه سناریوها، برای تخمین پارامتر  $\beta$  و  $t_m$  معادله ۳ را به‌صورت زیر تبدیل می‌کنیم:

$$\frac{Q_s - Q}{Q} = e^{-\beta(t-t_m)}$$

از دو طرف معادله لگاریتم می‌گیریم، داریم:

$$\ln\left(\frac{Q_s - Q}{Q}\right) = -\beta(t - t_m) \quad (۶)$$

حال با تخمین معادله (۶)، پارامتر  $\beta$  و  $t_m$  را برای هر سناریو تخمین می‌زنیم. سپس با جایگزین کردن مقدار  $Q_s$  و مقدار تخمینی پارامتر  $\beta$  در معادله ۴ مقدار  $Q_{max}$  را برای هر سناریو تخمین می‌زنیم. در نهایت با جایگذاری مقادیر تخمین در معادله شماره ۲ مسیر تولید را برای سه سناریو پیش‌بینی می‌کنیم.

### مدل پیش‌بینی ونگ

مدل ونگ بر پایه تابع چگالی کای دو استخراج می‌شود<sup>۱</sup>. مدل ونگ توسط مجموعه معادلات ۷ الی ۱۰ به شرح زیر تعریف می‌شود<sup>۲</sup>:

$$q(t) = \frac{Q_s}{c^{(b+1)}\Gamma(b+1)} t^b e^{-\left(\frac{t}{c}\right)} \quad (۷)$$

$$Q_s = ac^{(b+1)}\Gamma(b+1) \quad (۸)$$

۱. تابع چگالی توزیع کای دو، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{\frac{n}{2}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{\left(\frac{n}{2}\right)-1} e^{-\frac{x}{2}}$$

که در آن:  $f(x)$  تابع چگالی توزیع کای دو،  $\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)$  تابع گاما و  $x$  متغیر تصادفی دارای دامنه صفر تا مثبت بی‌نهایت است.

۲. به منظور اطلاع از جزئیات چگونگی استخراج معادلات از تابع چگالی کای مربع به (Hu, et al., 2013) مراجعه شود.

$$t_m = bc \quad (9)$$

$$Q_{\max} = a \left(\frac{bc}{e}\right)^b \quad (10)$$

در اینجا  $a$  و  $b$  پارامتر آماری هستند، سایر اجزاء نیز در روابط قبل معرفی شده‌اند. پارامتر  $b$  در این مدل مرتبط با پارامتر شکل در تابع چگالی توزیع کای دو می‌باشد، بنابراین  $b = \frac{n}{2} - 1$ . در اینجا به ازای مقادیر مختلف  $b$  پیش‌بینی را ترسیم کرده و آن‌گاه بهترین وضعیت را به کمک شاخص Rms انتخاب می‌کنیم. با جایگذاری  $Q_s$  از معادله ۸ در معادله ۷، می‌توان نوشت:

$$q(t) = at^b e^{-\left(\frac{t}{c}\right)} \quad (\text{تکرار } 7)$$

مدل ونگ را مدل بلندمدت تحت نام چرخه پواسن نیز می‌نامند. دلیل انتساب این نام صرفاً شباهت معادلات مدل ونگ به تابع احتمال جمعی توزیع پواسن می‌باشد. چن<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) این مدل را با استفاده از تابع خطا به یک مدل غیرخطی جدید تبدیل نمود که به مدل عمومی ونگ شهرت یافت. سپس فنگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) در تطبیق مدل عمومی ونگ با رفتار تولید واقعی بیان کردند که منحنی زنگوله‌ای تولید متقارن نیست بنابراین در مقایسه با مدل هابرت دارای محدودیت کمتری است. (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱)

برای تخمین مدل ونگ ابتدا معادله ۷ (تکرار) را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\ln q(t) = \ln a + b \ln t - \frac{t}{c}$$

اگر  $\gamma = \ln a$  و  $\pi = -\frac{1}{c}$  باشد، داریم:

$$\ln q(t) - b \ln t = \gamma + \pi t \quad (11)$$

برای پیش‌بینی تولید در مدل ونگ باید ابتدا معادله ۱۱ را به ازای  $b$  های مختلف تخمین بزنیم. از آن جایی که  $b$  در این مدل مرتبط با پارامتر  $n$  در توزیع کای دو و به گونه‌ای بیانگر تعداد مستطیل‌های زیر منحنی زنگوله‌ای تولید است، ضرورت دارد مقدار بهینه آن را از ابتدا به کمک روش جستجو، تعیین کنیم، سپس بر پایه مقدار تعیین شده  $b$  و مقادیر تخمینی متناظر پارامترهای  $a$  و  $c$ ، علاوه بر مسیر زمانی تولید

سایر پارامترهای مدل نیز به دست می‌آید. لازم به ذکر است برای تعیین پارامتر  $b$  در فرآیند جستجو، علاوه بر بهینه بودن، می‌بایست  $Q_S$  تخمینی توسط این مدل نیز به ازای  $b$  انتخابی به واقعیت نزدیک باشد.

### ضریب فزاینده چرخه سوخت کامل و پیش‌بینی نهاده

رویکرد تجزیه و تحلیل چرخه سوخت با نگاه به مراحل تولید از استخراج تا تحویل به برآورد انرژی کل مورد نیاز مصرفی جهت توزیع یک واحد انرژی در نقطه مصرف می‌پردازد، این رویکرد برای مقایسه بهره‌وری منابع مختلف به کار می‌رود. به منظور سهولت استفاده در برنامه‌های کاربردی، اثرات چرخه سوخت کامل توسط ضریب فزاینده چرخه سوخت کامل بیان می‌گردد و زمانی که در نقطه مصرف اعمال می‌گردد، تخمینی از مصرف انرژی چرخه سوخت کامل به دست می‌آید. این ضریب تابعی از پارامتر شدت انرژی مبتنی بر داده‌های فیزیکی قابل مشاهده است (U.S. DOE, 2010). مطابق کافلین (۲۰۱۲) برای محاسبه عامل فزاینده ابتدا وضعیتی را در نظر می‌گیریم که تنها یک نوع حامل انرژی وجود دارد که تمامی انرژی مورد نیاز جامعه را تأمین می‌کند. بنابر این چنانچه،  $F$  تولید کل انرژی (کل مصرف انرژی توسط اقتصاد)،  $G$  مصرف نهایی انرژی توسط سایر بخش‌های اقتصاد و  $F_e$  مقدار انرژی استفاده شده در بخش تولید انرژی باشد، می‌توان نوشت:

$$F = F_e + G \quad (12)$$

حال اگر  $F_e$  را نسبتی ثابت از  $F$  در نظر بگیریم، یعنی:

$$F_e = \theta F, \quad 0 < \theta < 1$$

ضریب  $\theta$  نشان دهنده شدت مصرف انرژی در فرآیند تولید انرژی است. با جایگذاری خواهیم داشت:

$$F = \theta F + G \quad \Rightarrow \quad F = \frac{1}{1-\theta} G \quad (13)$$

به ضریب  $\frac{1}{1-\theta}$ ، عامل یا ضریب فزاینده چرخه سوخت کامل می‌گوییم. این ضریب تولید نهایی را به مصرف نهایی ارتباط می‌دهد و همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دارای رابطه غیرخطی اما مستقیم با شدت انرژی است. برای سادگی این ضریب را با  $\mu_{nlm}$  نشان می‌دهیم، پس:

$$\mu_{nlin} = \frac{1}{1-\theta} \quad (14)$$

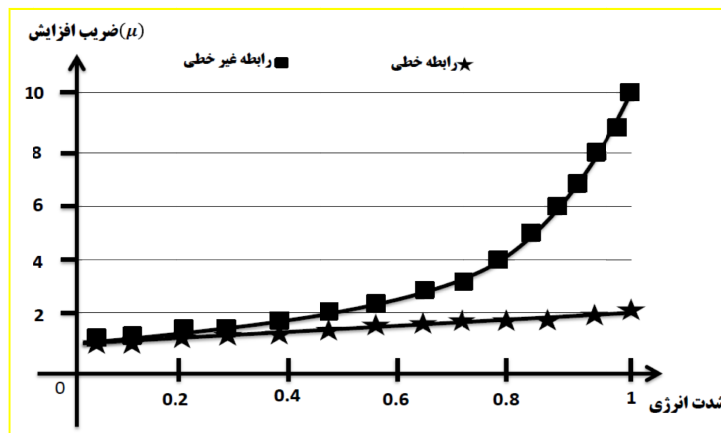
در رویکردی دیگر، انرژی مورد نیاز برای تولید مصرف نهایی (G) را در نظر می‌گیریم و چنانچه آن را به صورت  $cG$  تعریف کنیم، به جای رابطه ۱۲، خواهیم داشت:

$$F = \theta G + G = G(1 + \theta) \quad (15)$$

برای رویکرد دوم، عامل یا ضریب فزاینده چرخه سوخت کامل برابر با  $(1 + \theta)$  می‌باشد و همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این ضریب دارای رابطه خطی اما مستقیم با شدت انرژی است. برای سادگی این ضریب را با  $\mu_{lin}$  نشان می‌دهیم، پس:

$$\mu_{lin} = (1 + \theta) \quad (16)$$

مطابق مطالعه کافلین (۲۰۱۲) اگر شدت انرژی کمتر از ۲۰ درصد باشد، تفاوت روش خطی و غیرخطی جهت برآورد اثرات چرخه سوخت کامل تفاوت چندانی ندارد اما اگر شدت انرژی بیش از ۲۰ درصد باشد این دو رویکرد از هم فاصله می‌گیرند و لذا می‌بایستی روش غیرخطی را مدنظر قرار داد (هو و همکاران، ۲۰۱۳). نمودار ۱ دو رابطه ۱۴ و ۱۶ را به تصویر می‌کشد:



منبع: کافلین (۲۰۱۲)

نمودار ۱. رابطه خطی و غیرخطی ضریب افزایش و شدت انرژی

عوامل زیادی از جمله فرآیندهای متعدد تولید، تکنولوژی‌های استخراج و شرایط اقتصادی و جغرافیایی، میزان مصرف انرژی به‌عنوان نهاده در فرآیند استخراج

سوخت‌های فسیلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تحقیق کافلین<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) در خصوص ضریب فزاینده چرخه سوخت کامل ( $\mu$ ) که در بالا معرفی شد، یک رویکرد عملی جهت پیش‌بینی داده‌های انرژی با تغییرپذیری شرایط جغرافیایی و وابستگی زمانی ارائه می‌دهد. بر این اساس در صورتی که همیان ضریب فزاینده و شدت انرژی خطی باشد، می‌توانیم از روش برون‌یابی خطی جهت پیش‌بینی نهاده‌های انرژی استفاده کنیم. در روش برون‌یابی خطی، نهاده‌ها به صورت تابعی خطی از زمان تعریف می‌شوند. ضرایب این تابع با استفاده از روش حداقل مربعات به دست می‌آید. با توجه به اینکه صورت و مخرج پیش‌بینی شده، به راحتی می‌توان روند آینده این شاخص را مشاهده نمود.

### ضریب فزاینده چرخه سوخت کامل و بازدهی سرمایه‌گذاری انرژی

به منظور استخراج بر پایه ضریب فزاینده ابتدا رابطه میان رشد مطلق مصرف نهایی و رشد مطلق استفاده کل انرژی را به دست می‌آوریم. اگر  $f_t$  را رشد مطلق تولید کل انرژی در زمان  $t$  بنامیم، می‌توان نوشت:

$$F_{t+1} = F_t + f_t \quad (۱۷)$$

می‌دانیم که  $F_t$  تولید کل انرژی در زمان  $t$  می‌باشد. حال اگر  $F_0$  مقدار اولیه تولید انرژی باشد، با جایگذاری‌های مکرر خواهیم داشت:

$$F_{t+1} = F_0 + f_0 + f_1 + f_2 + \dots + f_t \quad (۱۸)$$

برای یک سوخت معین در صورتی که شدت انرژی برابر با  $\theta$  باشد، خواهیم داشت:

$$f_t = \theta f_{t-1}, \quad 0 < \theta < 1 \quad (۱۹)$$

با جایگذاری رابطه ۱۹ در رابطه ۱۸ داریم:

$$F_{t+1} = F_0 + f_0(1 + \theta + \theta^2 + \theta^3 + \dots + \theta^t) = F_0 + \frac{f_0}{1 - \theta}$$

از آنجا که  $0 < \theta < 1$  بنابراین:

$$F_{t+1} = F_0 + \frac{f_0}{1 - \theta} \quad (۲۰)$$

حال اگر رشد مطلق انرژی را از زمان صفر تا  $t$  با  $f$  نشان دهیم، خواهیم داشت:



$$f = \frac{f_0}{1-\theta} \quad (21)$$

حال اگر چنانچه  $g$  را رشد مطلق مصرف نهایی انرژی در دوره مورد بررسی در نظر بگیریم مطابق رابطه ۱۳ می‌توان نوشت:

$$f = \frac{g}{1-\theta} \quad (22)$$

بدیهی است که  $\frac{f}{g} > 1$  زیرا رشد مطلق استفاده کل انرژی بیشتر از مصرف نهایی است. ضریب فرآینده چرخه سوخت کامل،  $(\mu)$ ، نیز در ساده‌ترین شکل خود مساوی است با  $\frac{f}{g}$ ، به عبارت دیگر  $\mu = \frac{f}{g}$ . حال اگر محتوای گرمایی  $f$  و  $g$  را به ترتیب با  $\varepsilon_f$  و  $\varepsilon_g$  نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\mu = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_g} \quad (23)$$

به علاوه مقدار انرژی مورد استفاده توسط سیستم عرضه انرژی به ازای هر واحد مصرف نهایی انرژی در جامعه ( $\delta$ ) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\delta = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} = \mu - 1 \quad (24)$$

صورت کسر بالا یا  $\varepsilon_f - \varepsilon_g$  آن میزان محتوای گرمایی است که در سیستم و توزیع انرژی هزینه شده است. بنابراین توجه به روابط ۲۳ و ۲۴ و مطابق تعریف بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های تولید انرژی می‌توان نوشت:

$$EROI = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \varepsilon_g} = \frac{1}{\theta} \quad (25)$$

رابطه ۲۵ بیان می‌دارد که بازده انرژی سرمایه‌گذاری برابر با عکس شدت انرژی در فرآیند تولید انرژی می‌باشد.

### شاخص‌های سنجش قدرت پیش‌بینی مدل‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی و مقایسه کارایی پیش‌بینی تولید و نهاده‌های دو مدل هابرت و ونگ، از چهار معیار متعارف زیر که از هایکین (۱۹۹۴) اقتباس شده، استفاده می‌شود:

معیار اول: ضریب هم‌بستگی ساده مرتبه

$$R = \frac{\sum q_{act} q_{for} - (\sum q_{act} \sum q_{for} / n)}{\sqrt{(\sum q_{act}^2 - ((\sum q_{act})^2 / n)) (\sum q_{for}^2 - ((\sum q_{for})^2 / n))}}$$

$q_{act}$ : تولید واقعی،  $q_{for}$ : تولید پیش‌بینی،  $n$ : تعداد پیش‌بینی‌ها  
 معیار دوم: ریشه دوم میانگین مجموع مربعات تفاضل مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده

$$R_{ms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{act} - q_{for})^2 / n}$$

معیار سوم: میانگین قدر مطلق خطا

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |q_{act} - q_{for}|}{n}$$

معیار چهارم: متوسط درصد خطای مطلق

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{q_{act} - q_{for}}{q_{act}} \right| \times 100$$

#### ۴- یافته‌های تحقیق

همان‌گونه که بیان شد بازده انرژی سرمایه‌گذاری شاخصی برای محاسبه تولید انرژی برای اقتصاد و جامعه در مقایسه با انرژی مصرف شده است و از تقسیم میزان انرژی تولیدی بر میزان انرژی مصرفی به دست می‌آید (فرمول ۱). در تحقیق حاضر برای محاسبه اجزای این شاخص از اطلاعات مربوط به فعالیت‌های بخش نفت و گاز ایران به شرح زیر استفاده شده است:

$E_0$ : خروجی پروسه معادل تولید سالانه نفت خام و گاز طبیعی بر حسب داده‌های تولید نفت خام و گاز طبیعی طی سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۶۸

$E_D$ : داده‌های مستقیم انرژی شامل مصرف انرژی در بخش اکتشاف و استخراج می‌باشد، اما به دلیل در دسترس نبودن داده‌های آماری انرژی مربوط به مصرف بخش استخراج، این اطلاعات با کسر مصرف انرژی پالایشگاه‌ها و تلفات انتقال و توزیع از مصرف بخش انرژی به دست آمده است. داده‌های آماری این بخش نیز از ترازنامه‌های انرژی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۸۶ استخراج گردیده است.

$E_I$ : ورودی غیرمستقیم پروژه. با توجه به در دسترس نبودن میزان سرمایه‌گذاری در بخش استخراج و اکتشاف، ابتدا سرمایه‌گذاری بخش نفت و گاز را به دست آورده، آن‌گاه پس از کسر میزان سرمایه‌گذاری در پالایشگاه‌ها از سرمایه‌گذاری بخش نفت و

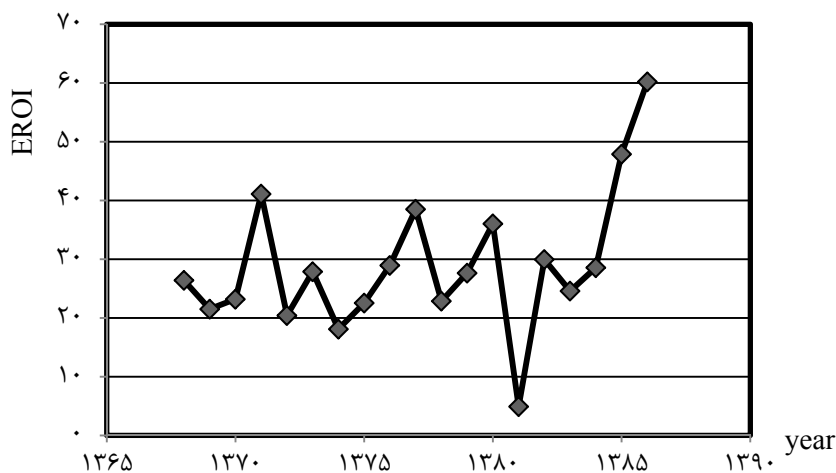
گاز، این اطلاعات محاسبه گردید. میزان سرمایه‌گذاری بخش نفت و گاز براساس داده‌های موجودی سرمایه بخش نفت و گاز برای سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۶۸ به دست آمده است.

شایان ذکر است به منظور یکپارچه‌سازی مقیاس اندازه‌گیری، تمامی واحدها به اگزاژول<sup>۱</sup> تبدیل شده‌اند.

اصولا داده‌های مربوط به نهاده‌های ورودی غیرمستقیم برحسب واحدهای پولی بیان می‌گردند و باید به واحد فیزیکی تبدیل شوند، جهت تبدیل واحد پولی به واحد فیزیکی از شاخص شدت انرژی بخش صنعت استفاده شده است که به صورت ذیل بیان می‌شود: (گگنون و همکاران، ۲۰۰۹)

$$E_i = e_i * Inv$$

که در آن  $e_i$  شدت انرژی بخش صنعت و  $Inv$  میزان سرمایه‌گذاری در بخش اکتشاف و استخراج می‌باشد. با توجه به موارد فوق، روند بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد طی سال‌های ۸۶-۱۳۶۸ با استفاده از داده‌های تولید نفت خام و گاز طبیعی و همچنین داده‌های مصرف انرژی بخش استخراج و معادل انرژی هزینه‌های سرمایه‌گذاری به عنوان نهاده در فعالیت‌های بخش در نمودار ۲ نشان داده شده است:



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۲. بازده انرژی سرمایه‌گذاری

## پیش‌بینی تولید با مدل هابرت

بر اساس معادله ۲، برای پیش‌بینی مسیر تولید لازم است ابتدا پارامترهای  $Q_{max}$ ،  $Q_s$  و  $t_m$  و همچنین پارامتر  $\beta$  تخمین زده شوند. بدین‌منظور در ابتدا مقدار حداکثر موجودی قابل استحصال منبع یا  $Q_s$  را برای سه سناریو مورد اشاره در قسمت قبل محاسبه نموده و سپس بر پایه معادلات ۲ الی ۶، سایر پارامترهای مدل را با روش حداقل مربعات تخمین زده‌ایم. نتایج محاسبات و تخمین در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲. نتایج مدل هابرت تحت سناریوهای مختلف

متغیر	سناریو	اول	دوم	سوم
$Q_s$		۴۸۴۰	۵۴۸۳	۵۱۶۱
$\beta$		۰/۰۳۹۷	۰/۰۳۹۵	۰/۰۳۹۶
$t_m$		۱۴۴۶	۱۴۵۰	۱۴۴۸
$Q_{max}$		۴۷	۵۴	۵۰

منبع: یافته‌های تحقیق

در گام بعد مسیر تولید را بر پایه معادله ۲ برای سه سناریو پیش‌بینی کرده و نتایج را به‌لحاظ قدرت پیش‌بینی به کمک چهار شاخص بیان شده در قسمت قبل مورد مقایسه قرار می‌دهیم. نتایج مقایسه قدرت پیش‌بینی سه سناریو به شرح جدول ۳ می‌باشد:

جدول ۳. مقایسه قدرت پیش‌بینی سناریوهای مختلف مدل هابرت

معیار	R	$R_{ms}$	MAE	MAPE	سناریو
	۰/۹۶۱۱	۰/۸۷	۰/۶۷	۸/۸۸	سناریو ۱
	۰/۹۶۱۲۱	۰/۸۱	۰/۶۲	۸/۶۳	سناریو ۲
	۰/۹۶۱۲۳	۰/۷۷	۰/۶۲	۸/۵۷	سناریو ۳

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج مندرج در جدول نشان می‌دهد که میزان شاخص R برای سناریوی سوم بیشتر و مقدار شاخص‌های  $R_{ms}$ ، Mae و Mape برای این سناریو کمتر از دو سناریو دیگر است. لذا سناریوی سوم دارای قدرت پیش‌بینی بیشتری است. به این ترتیب نتایج مدل هابرت بر پایه سناریوی میانگین با حداکثر منابع قابل استحصال معادل ۵۱۶۱ اگزاژول را در بخش بعد به‌منظور مقایسه قدرت پیش‌بینی با مدل تولید ونگ استفاده خواهیم کرد.

### پیش‌بینی تولید با مدل ونگ

برای پیش‌بینی تولید در مدل ونگ ابتدا معادله ۱۱ را به ازای b های مختلف تخمین زده و سپس به کمک روش جستجو و شاخص  $R_{ms}$  مقدار بهینه b را تعیین نموده‌ایم. از آنجا که در تعیین پارامتر b می‌بایست  $Q_s$  تخمینی توسط این مدل نیز به ازای b انتخابی به واقعیت نزدیک باشد، برای این منظور به ازای مقادیر مختلف b، مقدار  $Q_s$  و شاخص  $R_{ms}$  را نیز محاسبه نموده‌ایم. مطابق معیار انتخاب در فرآیند جستجو مقدار b معادل ۸۰۰ تعیین گردیده است، لذا براساس مدل ونگ یا معادلات ۷ الی ۱۱ داریم:

$$Q_s = 5233 \quad , \quad Q_{max} = 40.31 \quad , \quad t_m = 1465$$

### مقایسه پیش‌بینی مدل هابرت و مدل ونگ

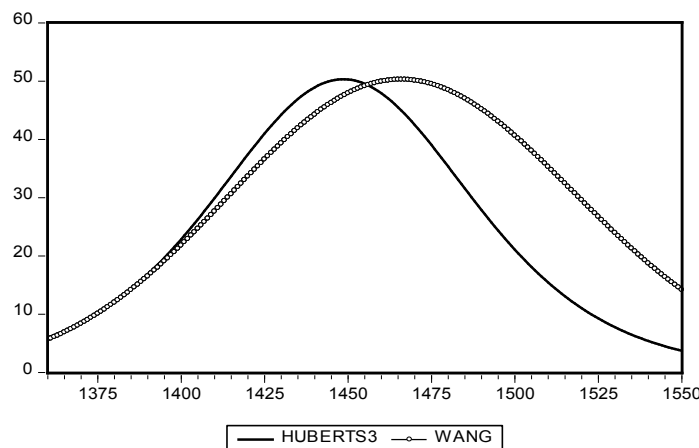
جدول ۴ معیارهای چهارگانه ارزیابی و مقایسه قدرت پیش‌بینی‌های منتج از مدل هابرت و ونگ را نشان می‌دهد:

جدول ۴. مقایسه قدرت پیش‌بینی مدل هابرت و ونگ

MAPE	MAE	$R_{ms}$	R	معیار سناریو
۸/۵۷	۰/۶۲	۰/۷۷	۰/۹۶۱۲	مدل هابرت $Q_s = 5161$
۷/۸۲	۰/۶۰	۰/۷۴	۰/۹۶۲۲	مدل ونگ $Q_s = 5233$

منبع: یافته‌های تحقیق

با جایگذاری مقادیر تخمینی پارامترها و متغیرها در مدل هابرت (سناریوی سوم) و مدل ونگ در معادله‌های تولید ۲ و ۶، مسیر زمانی تولید را در افق مورد مطالعه به‌دست آورده‌ایم. نمودار ۴ مسیر زمانی تولید را در دو مدل هابرت و ونگ به تصویر می‌کشد:



منبع: یافته‌های تحقیق

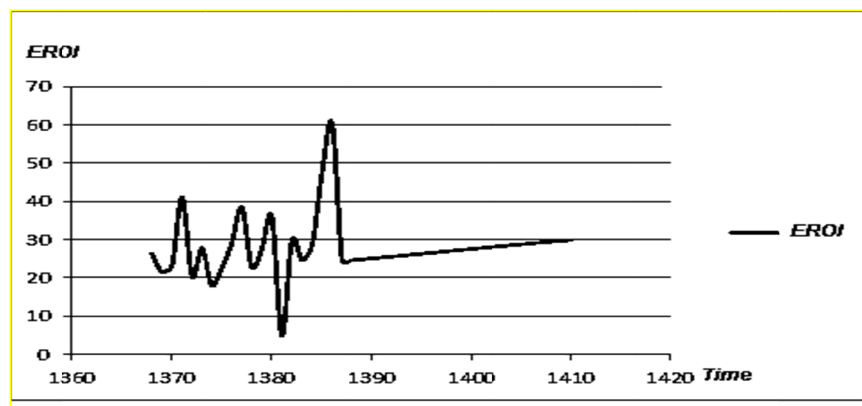
نمودار ۴. پیش‌بینی تولید براساس مدل ونگ و هابرت

براساس نتایج مندرج در جدول ۴ از آنجاکه مدل ونگ دارای R بیشتر و Mae، Rms و Mape کمتری نسبت به مدل هابرت است، لذا مدل ونگ قدرت پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل هابرت دارد. به‌علاوه طبق نمودار ۴ می‌توان گفت که مسیر تولید در هر دو مدل زنگوله‌ای شکل می‌باشد، اما در مدل هابرت دارای شکلی متقارن و مدل ونگ دارای شکلی نامتقارن است. تقارن شکل مدل هابرت به دلیل محدودیت مدل مبنی بر این است که اوج تولید زمانی رخ می‌دهد که به نصف حداکثر ذخایر قابل استحصال برسیم، اما مدل ونگ دچار چنین محدودیتی نیست. از طرفی در واقعیت نیز به دلایل مختلفی از جمله عوامل سیاسی، اقتصادی و اجتماعی اوج تولید ممکن است قبل یا بعد از به نصف رسیدن حداکثر ذخایر قابل استحصال، حاصل شود از اینرو مدل ونگ بهتر و پرکاربردتر از مدل هابرت است. نتایج پیش‌بینی در هر دو مدل نشان می‌دهد که اوج تولید نفت خام و گاز طبیعی در قرن آینده رخ خواهد داد (نمودار ۴). علاوه بر این در هر دو مدل پس از رسیدن به اوج تولید، روند تولید نفت خام و

گاز طبیعی کاهش می‌یابد. از آنجایی که اقتصاد ایران وابستگی شدیدی به درآمدهای حاصل از تولید نفت خام و گاز طبیعی دارد، می‌توان گفت شکاف بزرگی در اقتصاد مالی ایران رخ خواهد داد از این رو بایستی سیاست‌گذاران کشور از این رخداد آگاه بوده و توجهی بیشتری به این مسئله داشته باشند.

### پیش‌بینی بازده انرژی سرمایه‌گذاری

محاسبات تحقیق بر پایه رابطه میان بازدهی انرژی سرمایه‌گذاری و شدت انرژی (معادله ۲۳)، نشان می‌دهد که میزان شدت انرژی در دوره مطالعه مقادیری در فاصله ۲۰/۳ تا ۱/۶۶ درصد بخود می‌گیرد، از اینرو می‌توان روش برون‌یابی خطی را به‌منظور پیش‌بینی نهاده‌ها در نظر گرفت. بر این اساس و با توجه به اینکه صورت و مخرج شاخص بازده انرژی سرمایه‌گذاری (EROI) پیش‌بینی شده، می‌توان به پیش‌بینی بازده انرژی سرمایه‌گذاری پرداخت. اما از آنجا که مدل ونگ در مقایسه با مدل هابرت از کارایی پیش‌بینی بالاتری برخوردار بود، بررسی و تحلیل بازده انرژی سرمایه‌گذاری بر پایه نتایج پیش‌بینی مدل ونگ انجام می‌گیرد. نتایج مربوط به سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۱۰ در نمودار ۵ مشاهده می‌شود:



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۵. روند بازده انرژی سرمایه‌گذاری

بنابراین می‌توان پیش‌بینی نمود که با روند صعودی بازده انرژی روبرو خواهیم بود و با توجه به روند صعودی تولید و همچنین روند صعودی سرمایه‌گذاری تا سال ۱۴۱۰، می‌توان بیان کرد که نرخ افزایش تولید بیشتر از نرخ افزایش سرمایه است و اینکه به‌ازای مقدار معینی سرمایه‌گذاری، به مراتب مقدار انرژی بیشتری برداشت خواهیم نمود. همچنین با بهبود وضعیت تکنولوژی می‌توانیم شاهد بهبود بازده انرژی سرمایه‌گذاری تا سال ۱۴۱۰ باشیم.

##### ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که حداقل میزان بازده انرژی سرمایه‌گذاری طی مورد مطالعه مربوط به سال ۱۳۸۱ و معادل ۴/۹ بوده است. در این سال با حداکثر میزان سرمایه‌گذاری معادل با ۲/۰۳ اگزاژول روبرو بوده‌ایم. از این‌رو بیشترین میزان انرژی حاصل از بخش استخراج در سال ۱۳۸۱ جهت مصرف خود واحد انرژی به‌کار رفته است. به‌علاوه حداکثر میزان بازده انرژی سرمایه‌گذاری در دوره مورد مطالعه معادل با ۶۰/۲ و مربوط به سال ۱۳۸۶ می‌باشد که با حداقل میزان سرمایه‌گذاری معادل ۰/۰۶ اگزاژول در این سال همراه بوده است. لذا بخش عمده انرژی حاصل از بخش استخراج در دوره تحقیق به سایر بخش‌های اقتصادی عرضه شده است. به‌اضافه، در پاسخ به سؤال اول تحقیق مبنی بر وضعیت کنونی و روند آینده شاخص بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های نفت و گاز در اقتصاد ایران، نتایج برآورد نشان می‌دهد که شاخص مزبور دارای یک مسیر نوسانی است.

به منظور برآورد مسیر تولید در افق مطالعه، متغیرهای مقدار و زمان حداکثر تولید و همچنین متغیر حداکثر تولید قابل استحصال در چارچوب دو مدل تحقیق مورد پیش‌بینی قرار گرفت. به این منظور مدل هابرت در قالب سه سناریو در بخش تولید نفت خام و گاز طبیعی برآورد گردید. نتایج برآورد در سناریوی منتخب حاکی از آن است که حداکثر میزان منابع قابل استحصال معادل ۵۱۶۱ اگزاژول و مقدار حداکثر تولید نفت خام و گاز طبیعی نیز معادل ۱۰۷۰ میلیون تن یا ۵۰ اگزاژول بوده که در سال ۱۴۴۸ محقق خواهد شد. علاوه بر این برای پیش‌بینی در مدل ونگ، ابتدا با روش جستجوی هدف، بهترین مقدار را برای پارامتر  $b$  معادل ۸۰۰ به‌دست آورده و سپس به



پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مدل پرداختیم. نتایج پیش‌بینی مدل ونگ نشان می‌دهد که حداکثر میزان منابع قابل استحصال معادل ۵۲۳۳ اگزاژول و اوج تولید نفت خام و گاز طبیعی در سال ۱۴۶۶ و با مقدار ۱۱۲۲ میلیون تن خواهد داد.

مقایسه قدرت پیش‌بینی مدل‌های تولید هابرت و ونگ با استفاده از شاخص‌های  $R$ ،  $Mape$  و  $Mae$  نشان می‌دهد که مدل ونگ قدرت پیش‌بینی بهتری دارد. نمودارهای پیش‌بینی تولید حاکی از آن است که مسیر تولید در مدل هابرت دارای شکلی متقارن و در مدل ونگ دارای شکلی نامتقارن است. تقارن نمودار مدل هابرت به دلیل محدودیت مدل مبتنی بر این است که اوج تولید زمانی رخ می‌دهد که به نصف میزان حداکثر ذخایر قابل استحصال برسیم، اما مدل ونگ دچار چنین محدودیتی نیست. در واقعیت نیز به دلایل مختلفی از جمله عوامل سیاسی، اقتصادی و اجتماعی اوج تولید ممکن است قبل یا بعد از به نصف رسیدن حداکثر ذخایر قابل استحصال، حاصل شود از اینرو مدل ونگ پرکاربردتر از مدل هابرت است. از اینرو در پاسخ به سؤال دوم تحقیق مبنی بر چگونگی قدرت پیش‌بینی مدل‌ها می‌توان گفت قدرت پیش‌بینی مدل ونگ بیشتر از هابرت است.

براساس پیش‌بینی‌های انجام شده، روند بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد تولید نفت خام و گاز طبیعی تا سال ۱۴۱۰ صعودی است. این مسئله بیانگر این موضوع است که تا سال ۱۴۱۰ به ازای افزایش سرمایه‌گذاری در بخش اکتشاف نفت و گاز طبیعی، تولید نفت خام و گاز طبیعی نیز با نرخ بیشتری از نرخ افزایش سرمایه‌گذاری افزایش می‌یابد و لذا با سرمایه‌گذاری و به‌کارگیری تکنولوژی برتر می‌توان بازده انرژی سرمایه‌گذاری استاندارد تولید نفت خام و گاز طبیعی را در آینده بهبود بخشید. از اینرو در رابطه با سؤال سوم تحقیق مبنی بر چگونگی رفتار تاریخی بازده انرژی سرمایه‌گذاری در فعالیت‌های نفت و گاز در ایران می‌توان گفت برای این شاخص روندی مثبت در آینده پیش‌بینی می‌گردد.

### فهرست منابع

- دیکسون، ه. (۱۳۸۶). پایان دوران بلوغ. نشریه روند اقتصادی، ۴۹، ۳۱-۴۸.
- سوری، علی (۱۳۹۲). اقتصادسنجی پیشرفته. انتشارات فرهنگ شناسی، چاپ اول.

Akuru, C., Akoro, C. (2011). A prediction on Nigeria's oil depletion based on Hubbert's model and the need for renewable energy. International scholarly research network, article ID 285649, pp. 1-6.

Charles A.S.Hall , Jessica G. Lambert, Stephen B. Balogh (2014), EROI of different fuels and the implications for society, *Energy Policy* ,64, pp.141–152

Coughlin, K. (2012). A mathematical analysis of full fuel cycle energy use. *Energy*, 37, 698-708.

Florian F. Victor C. (2016), Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society, *Energy Policy* 95, pp.172–186

Freise, J., (2011). The EROI of conventional Canadian natural gas production. *Sustainability*, 3, pp. 2080-2104.

Gagnon, N., Hall, C., Brinker, L., (2009). A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production. *Energies*, 2, pp. 490-503.

Gately, M. (2007). The EROI of U.S. offshore energy extraction: A net energy analysis of the Gulf of Mexico. *Ecological economics*, 63, pp. 355-364.

Grandell, L., Hall, C., Hook, M. (2011). Energy return on investment for Norwegian oil and gas from 1991 to 2008. *Sustainability*, 3, pp. 2050-70.

Guilford, M., Hall, C, O'connor, P., Cleveland, C., (2011). A new long term assessment of energy return on investment (EROI) for U.S. oil and gas discovery and production. *Sustainability*, 3, pp. 1866-1887.

Haykin, S. (1994), "Neural Networks: a Comprehensive Foundation". Macmillan, New York.

Hu, Y., Feng, L., Hall, C., Tian, D., (2011). Analysis of the energy return on investment of the huge Daqing oil Field in China. *Sustainability*, 3, pp.2323-2338.

Hu, Y., Hall, C., Wang, J., Feng, L., Poisson, A., (2013). Energy return on investment (EROI) of China's conventional fossil fuels: Historical and future trends. *Energy*, pp.1-13.

Kiani, B., Hosseini, S., Amiri, R. (2009). Examining the hubbert peak of Iran's crude oil: A system dynamics approach. *European journal of scientific research*. 3(25), pp.437-447.

Maggio, G., Cacciola, G. (2012). When will oil, natural gas and coal peak?. Fuel, 98, pp.111-123.

Moerschbaeche, M., Day, J. (2011). Ultra\_Deepwater Gulf of Mexico oil and gas: energy return on financial investment and a preliminary assessment of energy return on energy investment. Sustainability, 3, pp.2009-2026.

Saravia, T., Szklo, A., Lucena, A., Chavez-Rodriguez, M. (2014). Forecasting Brazil's crude oil production using a Multi-Hubbert variant. Fuel, pp. 115, 24-31.

Szklo, A., Machado, G., Schaeffer, R. (2007). Future oil production in Brazil- Estimates based on a Hubbert Model. Energy policy, 35, pp.2360-2367.

Wang, J., Feng, L., Zhao, L., Snowden, S., Wang, X. (2011). A comparison of two typical multicyclic models used to forecast the world's conventional oil production. Energy policy, 39, pp.7616-7621.

Yaritani, H., Mastushima, J. (2014). Analysis of energy balance of shale gas development. Energies, 7, pp.2207-2227.

---

## Energy Return on Investment (EROI) Analysis of Iranian Oil and Gas Sector

**Ebraheim Heidari<sup>1</sup>**

Associate Professor of Economics at the Persian Gulf University (Bushehr) - Ph.D. in Economics of Resources, eheidari@pgu.ac.ir

**Fatemeh Lasheny**

Graduated Master of Energy Economics from the Persian Gulf University (Bushehr), fatemehlashani69@yahoo.com

Received: 2016/05/16 Accepted: 2017/05/16

### Abstract

The purpose of this study is to evaluate energy return on investment and predict future trends of this indicator. To this end, we study and evaluate the energy return on investment trend predictions given by the Weng and Hubbert models, using the R, Rms, Mae and Mape indicators. Our study of the past trend of energy return on investment for the period of 1989 to 2007, we observe the lowest return of 4.9 in 2002 and the maximum return of 60.2 in 2007. The Hubbert production forecast under the average scenario indicates the peak of crude oil and natural gas production in 2067 to be the equivalent of 1070.17million tonnes, while the Weng model produces a peak of 1122.82 million tonnes in 2087. In comparing Weng and Hubbert models, we find that the Weng model has the better predictive power.

**JEL Classification:** Q30 , Q39 , Q40 , Q48 , Q49 , P18 , L27 , C02

**Keywords:** EROI, Weng Model, Hubbert Model, Oil, Gas, Iran