Iranian Journal of Public Policy
2023 , Vol. 9 , No. 3 , 78-99
Online ISSN: 2538-5089
Home Page: jppolicy.ut.ac.ir

RESEARCH ARTICLE

Window to the Concept of Peak Oil and Policy Implications: Case of Iran

Ali Faryadras[1*], Abbas Maleki[2]

1. Master's Student in Economics, Department of Economics, Faculty of Economy and Political Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Corresponding Author's Email: Ali.faryadras78@yahoo.com
2. Professor, Department of Energy Systems, Faculty of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
Email: Maleki@sharif.edu.ir

Https://doi.org/10.22059/jppolicy.2023.95724

Received: 15 July 2023
Accepted: 12 October 2023
Available Online: 11 December 2023

ABSTRACT

The exhaustibility of fossil energy sources, particularly oil and natural gas, has led to search about when these reservoirs will be depleted or when the maximum extraction from the resources will occur. In this paper, the evolution of the concept of oil peak has been analyzed. The time of Iran's oil peak will be investigated using three scenarios based on King Hubert's theory. Also, other factors such as technology, energy transition, climate change, and the COVID-19 pandemic are examined as complementary topics. The results of this research show Iran's oil peak will occur in the next two to three decades. Concerning concepts such as the transition to renewable energies around the world, Iran's opportunities to make decisions and take actions are very limited. Finally, some policy recommendations based on the various aspects of the oil peak have been discussed in order to better encounter Iran's oil peak.

Keywords:. Hubbert Theory, Iran's Oil Peak, Energy Transition, Climate Change, COVID-19.

Citation: Faryadras, Ali; Maleki, Abbas (2023). Window to the Concept of Peak Oil and Policy Implications: Case of Iran. *Iranian Journal of Public Policy*, 9 (3), 78-99.
DOI: Https://doi.org/10.22059/jppolicy.2023.95724.

Published by University of Tehran.

This Work Is licensed under a CreativeCommons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

فصلنامه سیاستگذاری عمومی

دوره ۹، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲. صفحات ۹۹-۷۸

شاپا الکترونیکی: ۵۰۸۹ - ۲۵۳۸

آدرس سایت: jppolicy.ut.ac.ir

مقاله پژوهشی

درآمدی بر مفهوم قلّه نفتی و الزامات سیاستگذاری: مطالعه موردی ایران

علی فریادرس[1*]، عباس ملکی[2]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

رایانامهٔ نویسنده مسئول: Ali.faryadras78@yahoo.com

۲. استاد سیاستگذاری انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

رایانامه: Maleki@sharif.edu.ir

تاریخ دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۲۰ مهر ۱۴۰۲
تاریخ انتشار: ۲۰ آذر ۱۴۰۲

Https://doi.org/10.22059/jppolicy.2023.95724

چکیده

ویژگی پایان‌پذیر بودن منابع انرژی فسیلی بخصوص نفت و گاز طبیعی باعث شده‌است تا مطالعاتی پیرامون زمان به اتمام رسیدن این مخازن و یا زمان رخ دادن بیشینه استخراج از منابع صورت‌گیرد. در این مقاله ابتدا سیر تطوّر مفهوم قلّه یا قلّه نفتی مورد واکاوی قرارگرفته‌است. سپس زمان وقوع قلّه نفتی ایران در قالب سه سناریو براساس نظریه هیوبرت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین، سایر عوامل همچون تکنولوژی، گذار انرژی، تغییرات اقلیمی، و کووید-۱۹ به عنوان مباحث تکمیلی بررسی می‌شوند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که قلّه نفتی ایران در دو تا سه دهه پیش‌رو رقم خواهدخورد، اما با توجه به نگرانی‌هایی همچون گذار به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان، فرصت ایران برای تصمیم‌گیری و اقدام بسیار محدود است. در پایان نیز توصیه‌های سیاستی مبتنی بر جوانب مختلف بررسی‌شده پیرامون قلّه نفتی، جهت مدیریت بهتر در رویارویی با قلّه نفتی ایران مطرح می‌شود.

واژگان کلیدی: نظریه هیوبرت، قلّه نفتی ایران، گذار انرژی، تغییرات اقلیمی، کووید-۱۹.

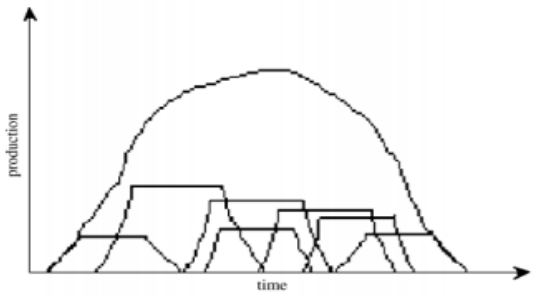
استناد: فریادرس، علی؛ ملکی، عباس(۱۴۰۲). درآمدی بر مفهوم قلّه نفتی و الزامات سیاستگذاری: مطالعه موردی ایران. *فصلنامه سیاستگذاری عمومی*، ۹ (۳)، ۹۹-۷۸.

DOI: Https://doi.org/10.22059/jppolicy.2023.95724.

ناشر: دانشگاه تهران.

مقدمه

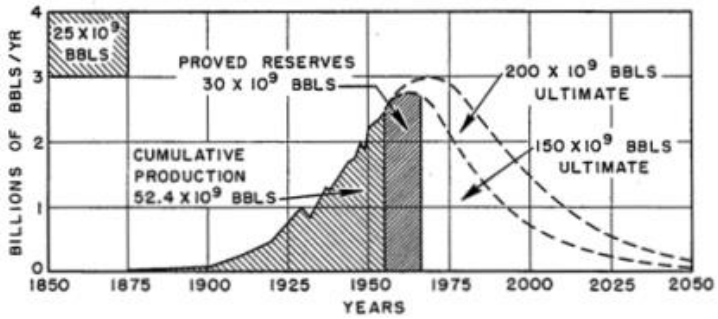
قلّه نفتی[1] به زبان ساده به بررسی زمانی می‌پردازد که تولید نفت به میزان بیشینه خود می‌رسد. یک قلّه نفتی قریب‌الوقوع در جهان، پیامدهای جدی در اقتصاد به دنبال خواهدداشت. بطور مثال، کمبود سوخت و افزایش هزینه‌های انرژی به طور مستقیم یا غیرمستقیم تقریباً بر هر صنعتی اثر خواهدگذاشت و هزینه مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان را افزایش خواهدداد. از این رو، قلّه نفتی می‌تواند شبح رکود تورمی[2] را در بسیاری از نقاط جهان گسترش دهد. در سال ۲۰۰۵ مجله Science در سرمقاله ۱۲۵ امین سالگردش عنوان « ۱۲۵ سوال: ما چه چیزی نمی‌دانیم؟» را کار کرد که پرسش ۱۰۱ آن «چه چیزی و در چه زمانی جایگزین نفت ارزان می شود؟»بود(**Kennedy & et al. 2005:75-102**). این پرسش بطور ضمنی به مفهوم قلّه نفتی، اهمیت و دشواری بررسی آن اشاره دارد. اولین بار در سال ۱۹۰۹ نسبت ذخایر به تولید[3] به منظور بررسی طول عمر منابع پایان‌پذیر مطرح شد. این نسبت اولین تلاش برای گره زدن میزان ذخایر نفت، تولید و زمان با یکدیگر بود. این نسبت، حاصل تقسیم‌کردن میزان ذخایر موجود نفتی به تولید در لحظه حال است که مدت زمان اتمام ذخایر نفت یک کشور را با فرض ثابت ماندن سطح تولید نشان می‌دهد. البته مطابق با نظریه‌های اقتصادی منابع پایان‌پذیر انرژی، تولید نفت ثابت نخواهد ماند و سرمایه‌گذاران تلاش می‌کنند تا ظرفیت تولید میادین خود را افزایش دهند یا دست کم باید روند رو به رشد تقاضای بخش انرژی پوشش داده شود که این امر نیز منجر به افزایش سطح تولید می‌شود. با این حال، این نسبت می‌تواند در گذر زمان با تغییر میزان ذخایر و سطح تولید گمراه‌کننده باشد اما درعین حال تلاش کوچکی در جهت یافتن زمان به اتمام رسیدن ذخایر یا بررسی مقدماتی قلّه نفتی بود که با فرض ثابت ماندن سطح تولید، یک کران بالای زمانی را ارائه می‌کند. به این معنا که با توجه به افزایش میزان سطح تولید در گذر زمان ذخایر نفتی زودتر از این زمان به اتمام می‌رسند. از این رو، این نسبت همچنان در گزارش‌های آماری شرکت بریتیش پترولیوم[4] مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما مفهوم قلّه نفتی بطور جدی در سال ۱۹۵۶ توسط ماریون کینگ هیوبرت[5] زمین‌شناس و ژئوفیزیکدان آمریکایی مطرح شد. بنا بر نتایج هیوبرت، منحنی تولید نفت یک کشور (یا جهان) به شکل زنگوله‌ای[6] و متقارن خواهدشد. در حقیقت در یک مخزن نفتی میزان تولید افزایش می‌یابد تا به بیشینه سطح تولید آن مخزن می‌رسد و پس از آن برای مدت طولانی میزان تولید در همان سطح بیشینه باقی می‌ماند و سپس میزان تولید شروع به کاهش می‌کند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن تمام مخازن کنار یکدیگر مطابق نظریه هیوبرت منحنی میزان تولید نفت در کل کشور (یا جهان) به شکل زنگوله‌ای خواهد بود(شکل ۱).



شکل ۱ . میزان تولید نفت مخازن مختلف و منحنی تولید کلی آمریکا (*Kiani & et al.2009:439*).

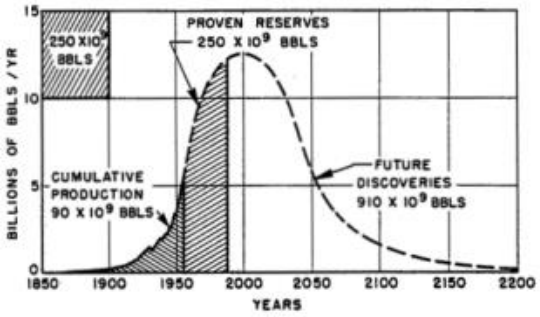
1. Oil Peak
2. Stagflation
3. Reserve-to-Production(R/P)
4. BP Statistical Review
5. Marion King Hubbert
6. Bell-Shaped Curve

هیوبرت در سال ۱۹۵۶ پیش‌بینی کرد که قلّه نفتی در ۴۸ ایالت اصلی آمریکا بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۰ رخ خواهد داد(شکل ۲). آمارها نشان داد که پیش‌بینی هیوبرت صحیح بود. بااین‌حال، بعدها با ظهور تکنولوژی شکست هیدرولیکی(فرکینگ)[1]، حفاری جهت‌دار[2] و دیگر فناوری‌ها تولید نفت آمریکا شروع به اوج‌گرفتن کرد و در نوامبر سال ۲۰۱۷ تولید روزانه به ۱۰،۰۳۸ میلیون بشکه در روز رسید که از تولید ۱۰،۰۱۳ میلیون بشکه در روز در قلّه اکتبر ۱۹۷۰ نیز بیشتر بود(Today in energy.2018).



شکل ۲ . پیش بینی هیوبرت برای تولید نفت در ۴۸ ایالت اصلی آمریکا، کل ذخایر قابل استحصال پیش از شروع استخراج در منحنی پایینی ۱۵۰ میلیارد بشکه و منحنی بالایی ۲۰۰ میلیارد بشکه در نظر گرفته شده‌است(*Hubbert.1962:73*).

همچنین، هیوبرت پیش‌بینی کرد که تولید نفت در جهان در سال ۲۰۰۰ به قلّه خود خواهدرسید(شکل ۳). اما برخلاف پیش‌بینی هیوبرت میزان تولید نفت در جهان پس از سال ۲۰۰۰ روند صعودی خود را حفظ کرد.



شکل ۳ . پیش بینی هیوبرت برای تولید نفت جهان، کل ذخایر قابل استحصال نفت پیش از شروع استخراج ۱۲۵۰ میلیارد بشکه در نظر گرفته شده است (*Hubbert.1962:75*).

پس از هیوبرت عبارت «قلّه نفتی» اولین بار بطور گسترده توسط کالین کمپل[3] و جین لاهرر[4] در مقاله پایان نفت ارزان[5] در مجله معروف Scientific American در سال ۱۹۹۸ مورد استفاده قرارگرفت(Campbell & Laherrére.1998:78-83). لاهر و همکارش کمپل پیش‌بینی کردند که تولید نفت متعارف در جهان در حوالی سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۴ به قلّه خود خواهدرسید. این مقاله پس از وقوع و مشاهده نتایج شوک نفتی ۱۹۷۳ (تحریم نفتی اعراب علیه غرب پس از وقایع جنگ رمضان)، ۱۹۷۹(وقوع انقلاب اسلامی ایران، متوقف شدن فعالیت صنعت نفت ایران، توقف صادرات نفت به جهان، و متعاقباً جنگ ایران و عراق)، و نیز جهش قیمت نفت در سال ۱۹۹۰ در نتیجه حمله صدام حسین به کویت نوشته‌شد. در نتیجه این کاهش عرضه نفت و بالارفتن قیمت نفت در شوک‌های نفتی بود که اهمیت نفت به عنوان یک پیشران اصلی و اساسی در اقتصاد و بررسی قلّه نفتی بیشتر

1. Hydraulic Fracturing (Fracking)
2. Directional Drilling
3. Collin Campbell
4. Jean Laherrére
5. The End of Cheap Oil

متوجه تحلیل‌گران شد. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از نظریه هیوبرت به بررسی قلّه نفتی در ایران بپردازیم. در این باره، به منظور پوشش دادن مشکلات ناشی از نبود عوامل اقتصادی، سیاسی و تکنولوژیکی سعی شده‌است تا ابعاد پنهان مرتبط این عوامل با قلّه نفتی مورد واکاوی قرار بگیرد. ابتدا در بخش دوم ادبیات قلّه نفتی را مرور می‌کنیم و سپس در بخش سوم مشخصاً به تحلیل مدل هیوبرت می‌پردازیم. در بخش چهارم با ارائه روند تاریخی تولید نفت در سه کشور که به لحاظ روند تاریخی مرتبط با صنعت نفت، ویژگی های خاصی دارند را بررسی کرده‌ایم تا با ماهیت و گونه‌های مختلف تولید نفت آشنا شویم. در بخش پنجم نقش فناوری‌های نوین در قلّه نفتی که یکی از نقاط مغفول نظریه هیوبرت است را به تفصیل مورد تحقیق قرار داده‌ایم. در ادامه، در بخش ششم به مطالعه موردی قلّه نفتی در ایران پرداخته‌ایم. در بخش هفتم نیز رابطه قیمت نفت با قلّه نفتی و نظریه هتلینگ و اثرات آن‌ها بر قلّه نفتی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. متعاقباً در بخش ۸ آسیب‌شناسی عوامل حکمرانی و در بخش ۹ روش‌های بازیافت ثانویه و ثالثیه با رویکردی نسبت به مسائل ایران به اختصار آورده شده‌اند. همچنین رابطه قلّه نفتی با مسائل گذار انرژی و تغییرات اقلیمی، کووید-۱۹، و سرمایه‌گذاری و تحریم، در سه بخش انتهایی مقاله به صورت خلاصه منعکس شده‌اند. در پایان نیز، توصیه‌هایی براساس یافته‌های این پژوهش به منظور مواجهه با قلّه نفتی در ایران ارائه شده‌است.

مرور ادبیات

از سال ۱۹۷۰ تاکنون بررسی قلّه نفتی به لحاظ نوع مدل‌سازی و نیز پیاده‌سازی آن در کشورهای مختلف یا در سطح جهانی موضوع اصلی بسیاری از پژوهش‌ها بوده‌است. از دیدگاه نظری، در بین متخصصین این حوزه اجماعی بر یک مدل خاص وجود ندارد. در حقیقت می‌توان مدل‌های مختلف قلّه نفتی را در چهار دسته مدل‌های برازش منحنی[۱]، شبیه سازی سیستم[۲]، پایین به بالا[۳] و اقتصادی طبقه‌بندی کرد(Brandt.2010:3958). مدل برازش منحنی بر بازتولید صحیح داده‌های تاریخی تولید نفت تاکید دارد. مدل شبیه‌سازی سیستم از متغیرهایی مستقل تشکیل شده‌است و نیز رابطه علت و معلولی چندانی میان استخراج و زمان در در مدل‌های شبیه‌سازی سیستم دیده نمی‌شود. مدل پایین به بالا با استفاده از جزئیات و اطلاعات مخازن و میادین در سطح خرد، تولید در سطح کلان را محاسبه می‌کند. مدل‌های اقتصادی نیز مدل‌هایی هستند که منابع پایان‌پذیر انرژی را ازجنبه مدیریت میزان استخراج همراه با در نظرگرفتن متغیرهای اقتصادی مانند نرخ بهره بانکی یا خرید انواع اوراق و اشکال مختلف سرمایه‌گذاری بررسی می‌کنند تا صاحب منبع انرژی به بیشترین سود برسد. در مدل‌های اقتصادی نحوه استخراج و مفهوم قلّه نفتی به صورت ضمنی لحاظ شده‌است. هر مدل از حیث مکانیستیک[۴](شامل توابع با جزئیات اقتصادی، تکنولوژیکی، یا فیزیکی فرایند تولید نفت برای ساخت نمودار تولید نفت) یا فرضی[۵](در نظر گرفتن یک تابع فرضی برای نمودار استخراج مانند لجستیک یا گاوسی) و فیزیکی[۶](تکیه بر مسائل زمین شناسی، تکنولوژی، و مهندسی) یا اقتصادی[۷] (تکیه بر جنبه‌های اقتصادی مانند قیمت، تقاضا، و هزینه) بودن و نیز از جنبه مقیاس بکارگیری مدل و پیچیدگی آن دارای ویژگی‌های منحصر به خود است(Brandt.2010:3970). در جدول ۱ برخی از مهم‌ترین این مدل‌ها را در دسته‌های گوناگون مشاهده می‌کنید.

1. Curve Fitting Model
2. Simulation Model
3. Bottom-up Model
4. Mechanistic
5. Hypothetical
6. Physical
7. Economic

جدول ۱ . برخی از مدل‌های مختلف قلّه نفتی در دسته‌بندی‌های مختلف با ویژگی‌های گوناگون (Brandt.2010:3971)

سازنده مدل	سال	مدل	مکانیستیک/فرضی	فیزیکی/اقتصادی	مقیاس	پیچیدگی
مدل‌های پیش از برازش منحنی						
دی	۱۹۰۹	ذخایر به تولید	فرضی	فیزیکی	کشور	بسیار ساده
دی	۱۹۰۹	ذخایر به تولید و رشد نمایی	فرضی	فیزیکی	کشور	بسیار ساده
آیرس	۱۹۵۲	منحنی زنگوله‌ای دستی	فرضی	فیزیکی	کشور	–
هیوبرت	۱۹۵۶	منحنی زنگوله‌ای دستی	فرضی	فیزیکی	کشور	–
مدل‌های برازش منحنی						
هیوبرت	۱۹۵۹	تولید تجمعی لجستیک	فرضی	فیزیکی	کشور	بسیار ساده
مور	۱۹۶۶	تولید تجمعی گمپرتز	فرضی	فیزیکی	کشور	بسیار ساده
لاهر	۱۹۹۹	تولید چندچرخه‌ای	فرضی	فیزیکی	کشور	ساده–متوسط
برنت	۲۰۰۷	برازش نامتقارن	فرضی	فیزیکی	کشور–منطقه–جهان	بسیار ساده–ساده
کافمن	۲۰۰۸	منحنی U شکل وارونه منعطف	فرضی	فیزیکی	جهان	بسیار ساده
مدل‌های شبیه سازی سیستم						
دیویس	۱۹۵۸	شبیه‌سازی اقتصادی تکراری	مکانیستیک	فیزیکی+اقتصادی	کشور	پیچیده
نایل	۱۹۷۳	شبیه‌سازی تولید گاز طبیعی	مکانیستیک	فیزیکی+اقتصادی	کشور	پیچیده
استرمن	۱۹۸۳	شبیه‌سازی اکتشاف و استخراج نفت خام	مکانیستیک	فیزیکی+اقتصادی	کشور	پیچیده
دیویدسن	۱۹۹۰	شبیه‌شازی ترکیبی تولید و واردات نفت خام	مکانیستیک	فیزیکی+اقتصادی	کشور	بسیار پیچیده
برنت	۲۰۰۹	شبیه‌سازی تولید نفت و جانشین نفت	مکانیستیک	فیزیکی+اقتصادی	کشور–جهان	پیچیده
مدل‌های پایین به بالا						
کمپل	۱۹۹۵	مدل پایین به بالا با پایگاه داده اختصاصی	مکانیستیک	فیزیکی	حوزه نفتی–منطقه–جهان	پیچیده
اسمیت	۲۰۰۶	مدل پایین به بالا با پایگاه داده تقریبا عمومی	مکانیستیک	فیزیکی	حوزه نفتی–منطقه–جهان	پیچیده
محققین تحقیقات انرژی کمبریج	۲۰۰۴	مدل پایین به بالا با پایگاه داده اختصاصی	مکانیستیک	فیزیکی+اقتصادی	حوزه نفتی–کشور–منطقه–جهان	پیچیده
مدل‌های اقتصادی						
هتلینگ	۱۹۳۱	نظریه بهینه‌سازی تهیدگی	مکانیستیک	اقتصادی	–	بسیار ساده
فیشر	۱۹۶۴	مدل اقتصادسنجی اکتشاف نفت و گاز	مکانیستیک	اقتصادی	استانی(ایالتی)	پیچیده
اوری	۱۹۸۲	مدل ترکیبی بر اساس مدل هیوبرت	مکانستیک+فرضی	فیزیکی+اقتصادی	کشور	پیچیده
کافمن	۱۹۹۱	اقتصادسنجی ترکیبی/مدل هیوبرت	مکانستیک+فرضی	فیزیکی+اقتصادی	استانی(ایالتی)	پیچیده
کافمن	۲۰۰۱	مدل اقتصادسنجی به همراه سری قیمت نفت	مکانستیک	اقتصادی	استانی(ایالتی)	پیچیده

همچنان که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید در ابعاد مختلف شاهد تعدد و تکثر در میان مدل‌های قلّه نفتی هستیم و تلاش‌ها برای بررسی قلّه نفتی از زمان هیوبرت تاکنون ادامه داشته‌است. با این حال، تاکنون پیرامون قلّه نفتی ایران مطالعات نسبتاً معدودی انجام شده‌است. کیانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ براساس یک مدل سیستم دینامیکی بر اساس نظریه هیوبرت به بررسی قلّه نفتی ایران پرداختند(Kiani & et al.2009). همچنین حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۴ همچنان که خود در مقاله ذکر کرده‌اند نه به منظور پیش‌بینی دقیق قلّه نفتی ایران بلکه به منظور شناخت پویایی‌های تولید نفت ایران در قالب یک مدل سیستم دینامیکی تولید نفت ایران را شبیه‌سازی کردند(Hosseini & et al.2014). ابراهیمی و قصابانی در سال ۲۰۱۵ در یک مطالعه به پیش‌بینی میزان تولید نفت کشورهای عضو اوپک از جمله ایران با استفاده از مدل هیوبرت چندچرخه‌ای[1] پرداختند (Ebrahimi & Ghasabani.2015). مخدوم و پورانصاری نیز در سال ۲۰۲۱، قلّه هیوبرت برای منابع نفتی و گازی ایران و چند

1. Multicyclic Hubbert Model

کشور منتخب را مطالعه‌کردند(Makhdoum & Pouransari.2022). از این رو مطالعه و بررسی ابعاد مختلف و مرتبط با قلّه نفتی به خصوص در مورد ایران اهمیت بالایی دارد. در نگاه سنتی قلّه نفتی، کاهش تولید پس از گذر از قلّه نفتی، شتاب می‌گیرد. شتاب گرفتن کاهش تولید به دلیل چالش‌های ناشی از استخراج باقی مانده‌های ذخایر نفتی در مخازن است. این جمله که «اکنون به قلّه نفتی رسیده‌ایم» بارها در سال‌های مختلف در جهان بیان شده‌است و مطابق با نگاه سنتی انتظار شتاب‌گرفتن کاهش تولید نیز می‌رفته‌است. بااین‌حال، دو عامل کشف ذخایر جدید نفتی و نیز ظهور تکنولوژی‌های جدید برای استخراج نفت نظیر شکست هیدرولیکی و حفاری افقی باعث شد تا اعلام قلّه نفتی به نوعی زودرس تلقی شود. یافتن زمان قلّه نفتی مسئله‌ای بطور کامل حل‌شده نیست و با بهبود مدل‌ها یا بررسی عدم‌قطعیت‌های اثرگذار بر آن نظیر ابعاد اقتصادی، سیاسی و تکنولوژیکی می‌توان گام‌های موثری در مطالعه قلّه نفتی برداشت. بااین‌حال، در میان مدل‌های مختلف قلّه نفتی، کماکان مدل هیوبرت بطور گسترده توسط پژوهشگران مورد استفاده قرارمی‌گیرد. دلیل این امر نیز سادگی استفاده از این مدل است. پایگاه داده مدل هیوبرت به لحاظ در دسترس بودن برای محققین بسیار راحت‌تر از سایر مدل‌ها است. در مدل هیوبرت به اطلاعات و جزئیات فراوان در سطح خرد و داده‌های محرمانه نیازی نیست. از سویی صرف نظر از تأثیر فناوری‌های جدید، مدل هیوبرت قلّه نفتی سال ۱۹۷۰ در آمریکا را به درستی پیش‌بینی‌کرده‌بود (در بخش ۵,۲ به این موضوع خواهیم پرداخت). در نتیجه، شاید بتوان مدل هیوبرت را نوعی مدل با تکیه بر تخمین‌زدن قلّه نفت متعارف[1] درنظرگرفت.

تحلیل

مدل هیوبرت

براساس (Hubbert.1962:57) و (Claerbout & Muir.2020:2-3) مطالعات هیوبرت به معادله لجستیک[2] زیر برای تولید سالانه نفت منجرشد:

$$Q(t) = \frac{Q_\infty}{1 + e^{\omega(\tau - t)}}$$

که در آن ω نرخ رشد ذاتی[3]، t زمان، τ زمان وقوع قلّه، Q تولید تجمعی و Q_∞ منابع نهایی قابل استحصال[4] می‌باشند. این معادله را، معادله لجستیک هیوبرت می‌نامند. با اعمال چند عملیات ریاضیاتی می‌توانیم معادله لجستیک فوق‌الذکر را به معادله زیر تبدیل کنیم:

$$\frac{dQ}{dt} = P = \omega Q\left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right)$$

که در آن P تولید سالانه نفت می‌باشد. این معادله را، معادله هیوبرت[5] می‌نامند. با تقسیم طرفین معادله بر Q خواهیم داشت:

$$\frac{P}{Q} = \omega\left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right)$$

که نکته مهم در این حالت خطی‌بودن معادله بر حسب دو متغیر $\frac{P}{Q}$ و Q می‌باشد. از این رو، معادله اخیر را خطی‌سازی هیوبرت[6] می‌نامند. با استفاده از داده‌های تاریخی P_i و Q_i و قرار دادن آن‌ها در صفحه $(\frac{P}{Q}, Q)$ و برازش بهترین خط عبوری از این نقاط و

1. Conventional Oil
2. Logistic Equation
3. Intrinsic Growth Rate
4. Ultimate Recoverable Resources (URR)
5. Hubbert Equation
6. Hubbert Linearization

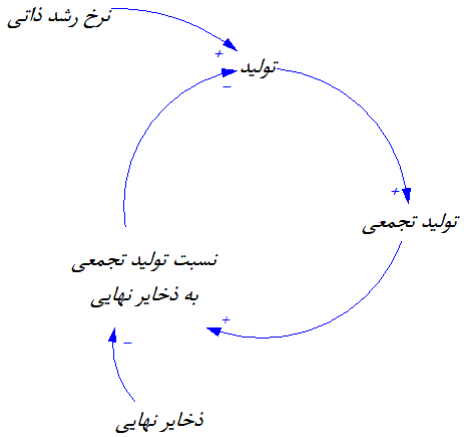
محاسبه عرض از مبدا آن، مقدار ω تعیین می‌شود. در حقیقت بنا بر معادله اخیر هنگامی که $Q=0$ بشود $\omega=$ عرض از مبدا $\left(\frac{P}{Q}\right)$خواهد شد. همچنین در طول از مبدأ که $\frac{P}{Q}=0$ است، خواهیم داشت که $Q=Q_\infty$ درنتیجه این مقدار برابر منابع نهایی قابل استحصال خواهد بود. درنتیجه با داشتن ω و Q_∞ با استفاده از معادله هیوبرت می‌توان قله نفتی را پیش‌بینی کرد.

مدل‌سازی

مدل‌سازی قلّه نفتی در این پژوهش با استفاده از نرم افزار ونسیم[1] و پویایی‌شناسی سیستم[2] انجام شده‌است. دو رکن اساسی در روش پویایی‌شناسی سیستم، نمودار علت و معلولی[3] و نمودار حالت و جریان[4] است.

نمودار علّت و معلولی

نمودار علت و معلولی برای مدل‌سازی مفهومی یک سیستم دینامیکی در یک دیدگاه کل نگر[5] استفاده می‌شود. نمودار علت و معلولی در یک دیدگاه کل‌نگر نشان می‌دهد که متغیرها چطور به هم وابسته‌اند(شکل ۴). رابطه مستقیم با علامت + و رابطه عکس با علامت – نمایش داده می‌شود.

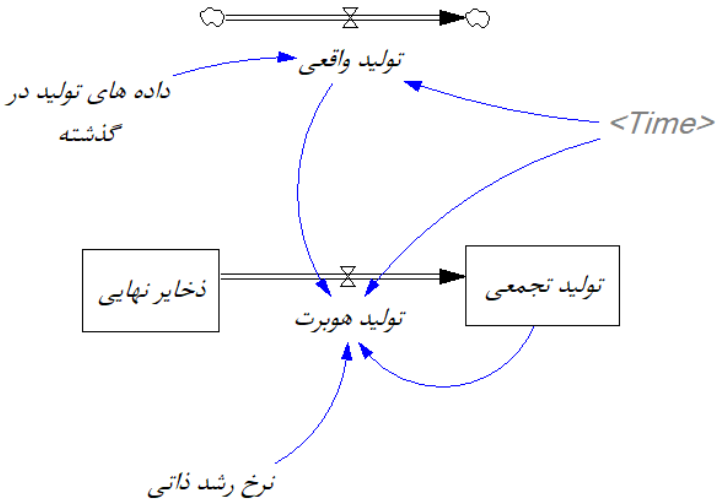


شکل ۴ . نمودار علت و معلولی شبیه‌سازی قلّه نفتی.

نمودار حالت و جریان

نمودار حالت و جریان زیربنای اساسی پویایی‌شناسی سیستم است. متغیر حالت در یک زمان معیّن اندازه‌گیری می‌شود و یک مقدار مشخص را نشان می‌دهد. این مقدار می‌تواند در نتیجه انباشه‌شدن ورودی‌هایی و خارج‌شدن مقادیری از آن، پیش از آن زمان معیّن باشد. متغیر جریان در یک بازه زمانی اندازه‌گیری می‌شود. از این رو متغیر جریان در واحد زمان اندازه‌گیری می‌شود. متغیر حالت با ▭، متغیر جریان با ⟹، نرخ جریان با ⧖، سرچشمه یا نابودی جریان با ☁ و وابستگی متغیرهای کمکی به یکدیگر با ⟶ نمایش داده می‌شوند(شکل ۵).

1. Vensim
2. System Dynamics(SD)
3. Casual Loop Diagram(CLD)
4. Stock-Flow Diagram
5. Holistic



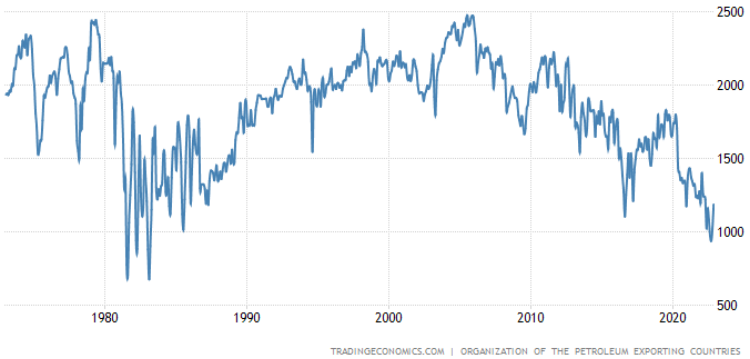
شکل ۵ . نمودار حالت و جریان شبیه سازی قلّه نفتی.

بررسی تولید نفت نروژ، اندونزی و نیجریه

در این قسمت برای نمونه به بررسی کلی تولید نفت در سه کشور منتخب نیجریه، اندونزی، و نروژ می‌پردازیم. می‌خواهیم مشاهده کنیم که مسیر حقیقی تولید نفت در این کشورها به چه شکلی بوده‌است.

نیجریه

نیجریه یکی از غنی‌ترین کشورهای آفریقایی با موهبت‌های طبیعی سرشار نظیر گاز طبیعی، نفت خام، قلع، سنگ معدن، سنگ آهک، و زمین می باشد. در سال ۱۹۵۸ نیجریه با تولید روزانه ۵۱۰۰ بشکه در روز از اولین میدان نفتی خود به جمع صادرکنندگان نفت پیوست(Obite & et al.2021:1). تولید نفت نیجریه در سال ۲۰۲۱ به میزان ۱۶۲۶ هزار بشکه در روز رسید که در مقایسه با تولید معادل ۲۴۵۹ هزار بشکه در روز در سال ۲۰۱۱ حاکی از کاهش ۴ درصدی تولید سالانه در دهه اخیر این کشور می-باشد(BP.2022:15). کاهش تولید نفت از اواسط سال ۲۰۲۰ به دلیل سرمایه‌گذاری کم و نشت قابل توجهی همراه با تعمیر و نگهداری ضعیف و سرقت بوده‌است(IMF.2022). اگرچه نیجریه در طول این دهه کماکان بزرگترین تولیدکننده نفت خام آفریقا بوده‌است اما تولید نفت نیجریه تحت تاثیر اختلالات نامنظم عرضه می‌باشد(شکل ۶).

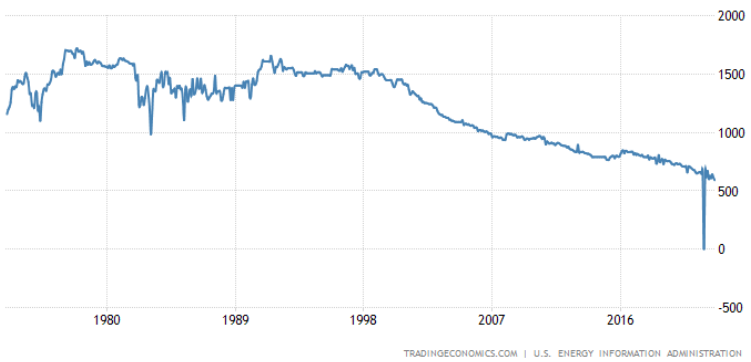


شکل ۶ . روند تولید نفت خام نیجریه (هزاربشکه در روز) (Nigeria Crude Oil Production.2023)

تولید نفت نیجریه در سال ۲۰۰۵ با مقدار ۲۴۹۶ هزار بشکه در روز به بیشینه خود رسید و تا کنون به این مقدار بازنگشته-است(Nigeria Crude Oil: Exports.2021). با این حال در سال ۲۰۲۱ ذخایر نفت خام نیجریه برابر ۳۷۰۵۰ میلیون بشکه بوده‌است(Nigeria Facts and Figures.2021). در نتیجه اگرچه تاکنون سطح تولید سال ۲۰۰۵ به ظاهر قلّه نفتی نیجریه محسوب می‌شود اما این امکان وجود دارد که این قلّه نفتی بار دیگر شکسته شود و بیشینه جدیدی را به ثبت برساند، هرچند مشکلات متعدد تولید نفت در نیجریه سایه سنگینی بر این امکان در کوتاه‌مدت و میان‌مدت می‌اندازد.

اندونزی

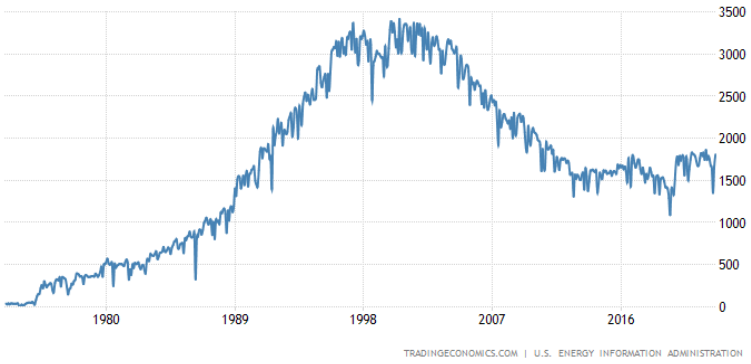
منحنی تولید نفت اندونزی از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۰ مسطح بوده‌است (شکل ۷). در طول سه دهه گذشته به طور میانگین میزان تولید نفت اندونزی ۱٫۵ میلیون بشکه در روز می‌باشد. این سطح ثابت از تولید به دلیل تجربه‌کردن چند فاز اکتشاف بوده‌است. دو نمونه از مهم‌ترین فازها (برحسب میزان اکتشاف)، اکتشافات نفت در خشکی در دهه ۱۹۴۰ و ۱۹۷۰، و نیز اکتشافات مهم در دریا که از سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۵ می‌باشند(Bentley.2016:34). در نهایت نیز تهی‌سازی منابع و نزولی بودن تولید منجر به خروج اندونزی از اوپک در سال ۲۰۰۹ شد.



شکل ۷ . روند تولید نفت خام اندونزی (هزاربشکه در روز) (Indonesia Crude Oil Production.2023).

نروژ

نفت در دریای شمال در اواخر دهه ۱۹۶۰ کشف شد و تولید تجاری آن در اوایل دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. جذابیت نفت دریای شمال همزمان با وقوع بحران نفتی سال ۱۹۷۳ به منظور جبران کاهش عرضه نفت، منجر به توسعه سریع تولید نفت از سوی نروژ و کاهش قیمت نفت در اوایل دهه ۱۹۹۰ شد. هزینه صرف‌شده در برنامه توسعه تکنولوژی‌های جدید تولید نفت دریای شمال ۱۱ میلیون دلار بیشتر از بودجه اختصاص داده آمریکا در پروژه فرود بر کره ماه بود(Oil: High Costs, High Stakes on the North Sea.1975). جریان توسعه تولید نفت در نروژ در سال ۲۰۰۱ با میزان تولید ۴٫۵ میلیون بشکه در روز به قلّه خود رسید (شکل ۸). تولید نفت در نروژ اکنون حدود ۱٫۷ میلیون بشکه در روز می‌باشد(Norwegian Petroleum Directorate.2022).



شکل ۸ . روند تولید نفت خام نروژ (هزاربشکه در روز)(Norway Crude Oil Production. 2023).

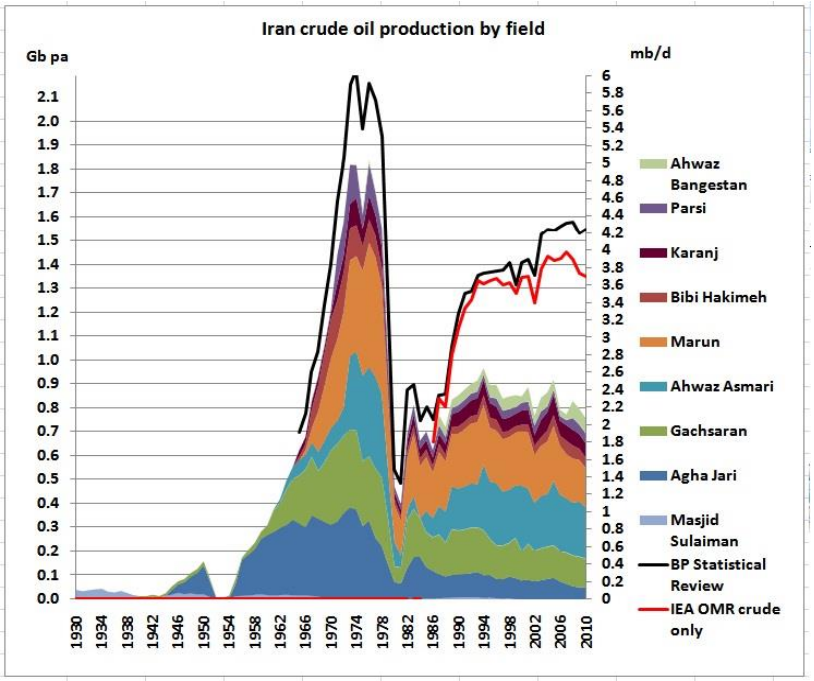
همان‌طور که مشاهده شد، تولید نفت الزاماً در همه کشورها از الگوی یکسانی تبعیت نمی‌کند. تولید نفت ممکن است همانند نیجریه با نوسانات متعددی روبرو بشود. در مورد اندونزی نیز مشاهده شد که تولید نفت به یک قلّه نقطه‌ای مطابق با الگوی زنگوله‌ای شکل، نیانجامید. بلکه با اکتشافات متعدد در چندین فاز، قلّه آن دوره‌ای را با سطح تولید ثابت شامل می‌شد. مورد نروژ نیز مثال خوبی برای آنچه قلّه نفتی هیوبرت نامیده می‌شود هست که به وضوح از قلّه نفتی با رفتاری بسیار شبیه به تابعی زنگوله‌ای شکل تبعیت می‌کند.

نقش فناوری‌های نوین در جابجایی زمان قلّه نفتی

فناوری ارتباطی تنگاتنگ با مسئله قلّه نفتی دارد. فناوری‌ها به طور کلی می‌توانند از دو طریق اکتشافات جدید میادین نفتی و افزایش نرخ برداشت از میادین بر قلّه نفتی اثر بگذارند. فناوری‌های نوین می‌توانند موجب بهبود در فرایندهای مختلف صنعت نفت بشوند. اما از سوی دیگر این تهدید نیز برای صاحبان منابع تجدیدناپذیر وجود دارد که سرعت فزاینده گسترش علم و فناوری ارمغانی برای بشر به همراه داشته‌باشد که او را از نیاز به انرژی‌های فسیلی مبرّا کند. این واقعیت که «عصر حجر به دلیل پایان یافتن سنگ تمام نشد، بلکه کشف فلز بود که عصر حجر را به اتمام رساند» به خوبی این امر را تبیین می‌کند. در این صورت حجم ذخایری هیدروکربنی که به بیشینه ثروت ممکن تبدیل نشده‌اند، رها خواهند شد.

قلّه نفتی ایران

ایران تاکنون با یک قلّه نفتی در دهه ۱۹۷۰ مواجه شده‌است. در آن زمان تولید نفت ایران در چند میدان عظیم نفتی در رقابت با عربستان سعودی به شدت افزایش یافت. در اواسط دهه ۷۰ میلادی افزایش نرخ تولید از میادین عظیمی چون مارون، آغاجاری و گچساران باعث شد تا تولید بالای ۶ میلیون بشکه در روز رقم بخورد(شکل ۹). این سطح تولید پابرجا نماند و از دهه ۱۹۷۰ تاکنون تکرار نشده‌است. اکنون پرسش این است که آیا ایران از قلّه نفتی خود عبور کرده‌است؟



شکل ۹ . تولید نفت خام در ایران به تفکیک میادین از سال ۱۹۳۰ تا ۲۰۱۰(Crude Oil Peak.2012).

میزان ذخایر نفت خام و هیدروکربورهای مایع قابل استحصال در پایان سال ۱۳۹۹ بالغ بر ۱۵۹,۱ میلیارد بشکه بوده‌است (ترازنامه انرژی.۱۳:۱۳۹۹). این مقدار معادل ۹,۱ درصد ذخایر نفت جهان است. نسبت ذخایر به تولید (R/P) که در مقدمه ذکر شد برای ذخایر نفتی ایران برابر با ۱۲۲,۹ سال خواهد شد[۱]. با این حال این مقدار با کشف میدان‌های نفتی جدید می‌تواند افزایش پیداکند. از طرفی چون تحقیقات و اکتشافات برای کشف ذخایر نفتی هنوز ادامه دارد، افزایش میزان ذخایر نهایی محتمل است. با این وجود در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای میزان ذخایر نفتی موجود در کشور اگرچه خود حائز اهمیت است اما آثار آن تنها در به تاخیر انداختن قلّه نفتی برای چند سال در کران بالای زمان قلّه نفتی است. از این رو مسئله اساسی در تخمین زمان قلّه نفتی توانایی تولید یا ظرفیت تولید در کشور است. تمام مشکلات ناشی از جنگ ۸ ساله، تحریم‌ها و به‌روز نبودن تکنولوژی‌های مورد استفاده باعث شده‌است تا در طی سال‌های طولانی سطح تولید نفت از میزان مشخصی فراتر نرود. به همین جهت نرخ رشد ذاتی تولید را بررسی می‌کنیم. اگر خطی‌سازی هیوبرت را برای تولید نفت در ایران انجام دهیم، داده‌های خطی‌سازی‌شده هیوبرت به دو دوره قبل و بعد از سال ۱۳۶۰ قابل تفکیک است(شکل ۱۰). در دوره قبل از سال ۱۳۶۰ نرخ رشد ذاتی ۱۳,۳ درصد است که نرخ بسیار بالایی است. این دوره شامل اولین قلّه نفتی است که تاکنون برای ایران رقم خورده‌است. اما در چهار دهه اخیر یعنی

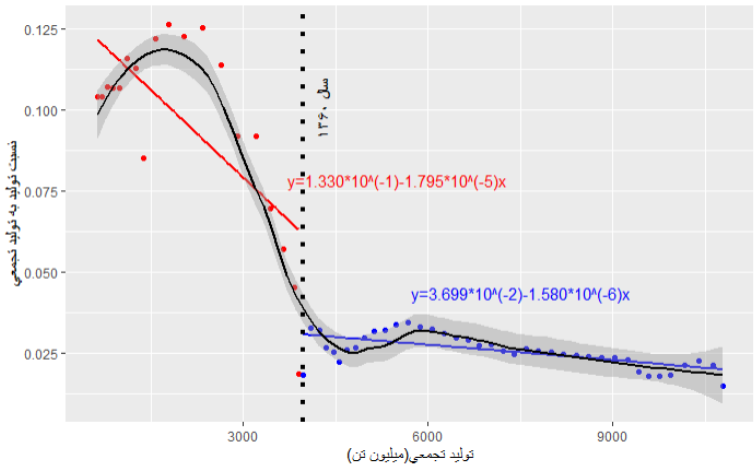
۱. مجددا تذکر داده می‌شود که این نسبت با فرض ثابت ماندن سطح تولید می‌باشد و در گذر زمان می‌تواند با توجه به تغییرات میزان ذخایر و سطح تولید گمراه‌کننده تلقی شود. در آمارنامه‌های ایران (ترازنامه انرژی و ترازنامه هیدروکربوری) ذخایر اثبات شده هیدروکربور مایع شامل اجزای متعددی است که درصد بالای آن را نفت خام تشکیل می دهد. بنابراین در واژه‌نامه هر آمارنامه‌ای بایستی به تعریف ذخایر اثبات شده توجه شود. فارغ از اینکه علاوه بر نفت خام چه مواردی در آمار لحاظ می‌شود نکته قابل تأمل آن است که ذخایر اثبات‌شده درصدی از نفت درجا (oil-in-place) است. نفت درجا در یک مخزن نفتی به هیدروکربور مایعی می‌گویند که در تخلخل‌های سنگ آن مخزن به تله افتاده‌است. بنابراین آنچه در مخازن نفتی زیر زمین وجود دارد نفت درجاست که تمام آن را نمی‌توان استحصال کرد. به درصدی از نفت درجا که قابل استحصال است ضریب بازیافت می‌گویند که از مخزنی به مخزن دیگر متفاوت است. بطورمثال، وقتی گفته می‌شود متوسط ضریب بازیافت اولیه و ثانویه در کشور ما ۲۵ درصد است یعنی به طور متوسط از ۱۰۰ بشکه نفت درجا تنها می‌توان ۲۵ بشکه استحصال کرد و ۷۵ بشکه در تخلخل‌های سنگ مخزن باقی می‌ماند. چون آمار نفت درجا به صورت تجمعی گزارش می‌شود لذا درصدی از آن که قابل استحصال است یعنی ذخایر اثبات شده نیز تجمعی است که این موضوع در آمارنامه ها منعکس نمی شود. در واقع آمار تولید تجمعی کشورها به راحتی برای کشورهای مختلف قابل دسترسی نیست تا با کسر از ذخایر اثبات شده بتوان باقی‌مانده ذخایر قابل استحصال را محاسبه کرد.

دوره دوم نرخ رشد ذاتی به ۳٫۷ درصد کاهش می‌یابد که مهم‌ترین علل آن وقوع انقلاب اسلامی، جنگ ۸ ساله ایران و عراق و تحریم‌های ایالات متحده هستند. همچنین مطابق با آنچه در بخش ۳٫۱ شرح دادیم، طبق خطی سازی هیوبرت، Q_∞ برابر با ۲۳۴۱۱٫۴ میلیون تن معادل بشکه نفت خام می‌شود.

شکل ۱۰ . خطی‌سازی هیوبرت با استفاده از داده‌های تاریخی تولید نفت در ایران منبع: [یافته‌های پژوهش].

همچنان که ذکرکردیم مسئله اصلی تولید نفت در ایران ظرفیت تولید است که با مشکلات عدیده‌ای روبرو است. از این رو سه سناریو را بر پایه نرخ رشد ذاتی در نظر می‌گیریم و سرعت افزایش میزان تولید را هدف قرار می‌دهیم. به همین منظور یکی از وجه تسمیه‌های نام‌گذاری سناریوها تناسب آن‌ها با سرعت نرخ رشد ذاتی است.

سناریو تنبل



تنبل‌ها[1] به حرکات آهسته و آرام خود معروف هستند. سناریو تنبل نیز به حرکات آهسته و آرام ایران در تولید نفت به دلیل سرمایه‌گذاری‌های محدود اشاره دارد. در سناریو تنبل به دلیل باقی‌ماندن و تشدید تحریم‌های ایالات متحده آمریکا علیه صنعت نفت ایران، فقدان سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی مطلوب و عدم استفاده از تکنولوژی‌های نسل اول دنیا رشد تولید بسیار آهسته است. همچنین به علت عدم برنامه‌ریزی صحیح در بکارگیری از روش‌های ازدیاد برداشت میزان افزایش ظرفیت تولید به شدت کند است. همچنین حفظ ظرفیت تولید نفت در ایران به علت مسائل سرمایه‌گذاری و تکنولوژیکی با دشواری‌هایی روبرو خواهد بود. نرخ رشد ذاتی تولید نفت ایران در این سناریو ۲٫۷ درصد در نظرگرفته شده‌است. در این سناریو قلّه نفتی با تولید حدود ۳۴۰۹۳۶۹ بشکه در روز در سال ۱۴۰۳ به قلّه خود می‌رسد.

سناریو گوزن شمالی

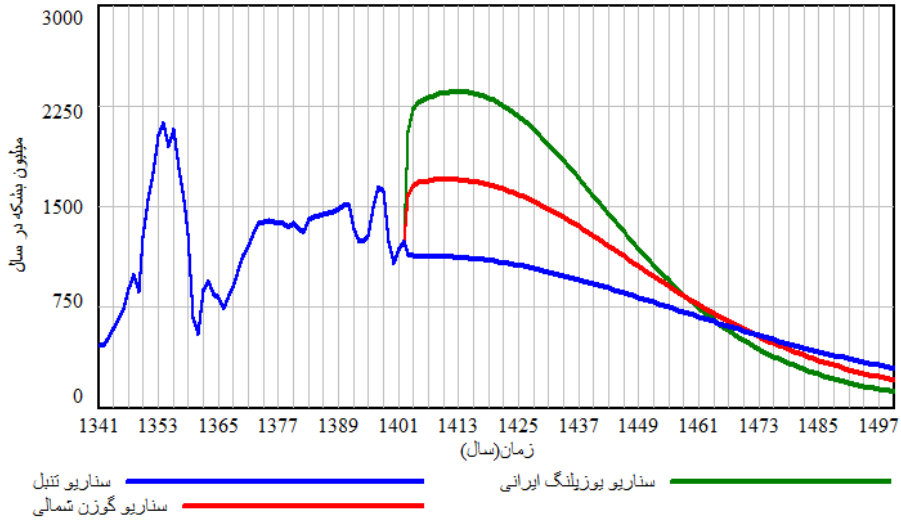
گوزن‌های شمالی[2] که به چابکی معروف هستند، به طور منحصر به فردی برای زنده‌ماندن در شرایط سخت زمستانی با برف عمیق، یخ، باد و دمای پایین مناسب هستند. آن‌ها از نظر بهره‌وری انرژی در چنین آب و هوایی نسبت به سایر حیوانات خشکی برتری دارند. در این سناریو نیز ایران اگرچه تلاش خود را برای رفع تحریم‌ها انجام می‌دهد همچنان با برخی از تحریم‌های اقتصادی مواجه هست، اما می‌تواند در برخی فناوری‌ها و اکتشافات جدید سرمایه‌گذاری‌هایی انجام دهد تا سطح متوسط رشد تولید نفت را حفظ و افزایش دهد. در سناریو گوزن شمالی با فرض تامین مالی و سرمایه‌گذاری با تکیه بیشتر بر تامین مالی در داخل کشور یا

1. Sloth
2. Reindeer

سرمایه‌گذاری‌های کشورهایی چون چین و روسیه، ظرفیت تولید با سرعت بیشتری نسبت به سناریو قبل افزایش می‌یابد. با این‌حال در این سناریو نمی‌توان انتظار داشت که تولید بدون چالش و با سرعت بسیار بالایی شتاب فزاینده‌ای بگیرد. در این سناریو تلاش می‌شود تا سطح تولید نفت کاهش نیابد و با جذب سرمایه‌گذاری‌های بیشتر به ظرفیت تولید افزوده‌شود. همچنین در برخی از میادین مهم روش‌های مختلف ازدیاد برداشت مورد استفاده قرارخواهد گرفت. از سویی ایران نیز بازارهای جدید برای فروش بیشتر نفت خود می‌یابد. نرخ رشد ذاتی سناریو گوزن شمالی ۳,۷ درصد در نظر گرفته شده‌است. در این سناریو قلّه نفتی با تولید حدود ۴۶۶۱۱۵۰ بشکه در روز در سال ۱۴۱۲ به قلّه خود می‌رسد.

سناریو یوزپلنگ ایرانی

یوزپلنگ ایرانی[1] به سرعت باورنکردنی خود شهرت دارد. یوز نیز که از بن مضارع یوزیدن می‌باشد به معنای جهیدن است. سناریوی پلنگ ایرانی نشان‌دهنده سرعت بیشتر در برداشتن گام‌ها نسبت به سناریو گوزن شمالی است. در سناریو یوزپلنگ ایرانی با فرض رفع مشکلات ناشی از آثار تحریم‌های ایلات متحده برای سرمایه‌گذاری در بخش انرژی کشور و رفع موانع صادرات نفت به سایر کشورها، ظرفیت تولید با سرعت بالایی در نتیجه ورود سرمایه‌گذاران مختلف داخلی و خارجی شکل می‌گیرد. با یک برنامه‌ریزی صحیح از بخش عمده ظرفیت‌های موجود ازدیاد برداشت برای حداکثرسازی میزان استخراج استفاده خواهدشد. همچنین برنامه هایی برای اکتشاف میادین جدید نفتی با سرمایه‌گذاری‌های مناسب در دستور کار قرار می‌گیرد. یوز آسیایی از دیر باز مورد توجه بوده‌است و در شکار غزال و آهو در خدمت پادشاهان بوده‌است(Kothari & Chhapgar.2005:16). در این سناریو نیز ادراک غالبی از گذار انرژی در داخل کشور شکل خواهد گرفت و موجب خواهد شد تا با تبدیل منابع فسیلی به بیشترین دارایی ممکن در راه ایجاد یک توسعه پایدار گام‌هایی بزرگ برداشته شود. رشد ذاتی این سناریو ۴,۷ درصد درنظرگرفته شده‌است. در این سناریو قلّه نفتی با تولید حدود ۶۴۵۸۶۸۴ بشکه در روز در سال ۱۴۱۴به قلّه خود می‌رسد. جزئیات مدل‌سازی در پیوست ۱ ارائه شده به مجله ضمیمه شده‌است. در شکل ۱۱ نتیجه شبیه‌سازی سه سناریو براساس مدل هیوبرت قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ . شبیه‌سازی قلّه نفتی ایران بر اساس سه سناریو تنبل، گوزن شمالی و یوزپلنگ ایرانی به همراه داده‌های تاریخی تولید از سال ۱۳۴۱ تا ۱۴۰۱منبع:[یافته‌های پژوهش].

همچنین، در جدول ۲ خلاصه‌ای از وضعیت سه سناریو مذکور را مشاهده می‌کنید.

1. Persian Cheetah

جدول ۲ . خلاصه مشخصات و خروجی‌های سناریوهای تنبل، گوزن شمالی و چیتا منبع:[یافته‌های پژوهش]

نام سناریو	تنبل	گوزن شمالی	یوزپلنگ ایرانی
نرخ رشد ذاتی	۲,۷٪	۳,۷٪	۴,۷٪
سال وقوع قلّه	۱۴۰۳	۱۴۱۲	۱۴۱۴
تولید سالانه در قلّه (میلیون بشکه در سال)	۱۲۴۴,۴۲	۱۷۰۱,۳۲	۲۳۵۷,۴۲
تولید روزانه در قلّه (بشکه در روز)	۳۴۰۹۳۶۹	۴۶۶۱۱۵۰	۶۴۵۸۶۸۴

هنوز در بسیاری از مناطق ایران فعالیت‌های اکتشافی نفت صورت نگرفته‌است. درنتیجه، با در نظرگرفتن ذخایر احتمالی اکتشافی در آینده، مشکلات موجود در افزایش سطح تولید و نتایج مدل می‌توان انتظار داشت که قلّه نفتی ایران (صرف‌نظر از تولید تاریخی) تا دو دهه آینده همچنان رقم نخواهد خورد. کشورهای جهان در حالی سعی در عبور از انرژی‌های فسیلی در دو دهه آینده دارند که ایران در این بازه زمانی احتمالا به قلّه نفتی خود نیز نخواهد رسید. از این رو، دو دهه پیش‌رو زمانی حیاتی برای ایران در جهت استفاده از منابع انرژی خود در برهه‌ای حیاتی در جهان است که احتمالاً گذار انرژی از انرژی‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر شتاب خواهدگرفت.

قیمت نفت و قلّه نفتی

قیمت نفت رابطه پیچیده‌ای با قلّه نفتی دارد. با این حال، در یک عبارت می‌توان گفت که قیمت بالای نفت باعث می‌شود تا کاهش تولید در پس از قلّه شتاب یابد و از طرفی قیمت پایین نفت باعث به تأخیر افتادن قلّه نفتی می‌شود. به عبارتی قیمت نفت در دو سمت قبل و بعد از قلّه نفتی اثرگذار خواهد داشت. قبل از وقوع قلّه نفتی افزایش قیمت نفت موجب خواهد شد تا سرمایه‌گذاری‌های بیشتری در دو بخش تکنولوژی‌های جدید و اکتشاف برای دستیابی به منابعی که استخراج آن‌ها صرفه اقتصادی نداشت شکل بگیرد. چنین امری موجب خواهد شد تا پس از رسیدن به قلّه نفتی به علت رشد سریع ظرفیت تولید نفت و نیز احتمال اکتشاف ذخایر جدید، سرعت کاهش تولید مطابق با نگاه سنتی قلّه نفتی، شتاب بگیرد. همچنین با همین استدلال، قیمت پایین نفت موجب خواهد شد تا ذخایر کمتری مورد اکتشاف قرار بگیرد و بخش‌های تحقیق و توسعه سرمایه‌های بزرگی را به خود اختصاص ندهند که باعث تأخیر در قلّه نفتی شود. اما به علت عدم سرمایه‌گذاری‌های جدید ممکن است در دوره‌های آتی به دلیل کاهش ظرفیت‌های جدید تولید و پایین‌تر قرار گرفتن سطح عرضه از تقاضا، قیمت نفت افزایش یابد. در نتیجه اثرگذاری قیمت نفت بر قلّه نفتی شامل پویایی‌های متعددی است که تشخیص و شناسایی آن کار دشواری است و عوامل گوناگون دیگری بر نحوه اثرگذاری قیمت در وقوع قلّه نفتی نظیر عوامل اقتصادی، ژئوپلیتیکی و رفتار مصرف‌کنندگان دخیل هستند. در این زمینه نظریه هتلینگ نیز می‌تواند در فهم برخی از پویایی‌های قیمت نفت و قلّه نفتی حائز اهمیت باشد. مطابق با نظریه هتلینگ، نرخ بهینه استخراج از یک منبع تجدیدناپذیر نرخی است که ارزش فعلی[1] سود حاصل از نرخ استخراج فعلی با ارزش فعلی سود حاصل از استخراج‌های آینده در قیمت‌های بالاتر تنظیم شود. مطابق با قانون هتلینگ در یک مسیر استخراج بهینه و تعادل صنعت رقابتی منابع، قیمت یک منبع تجدیدناپذیر باید با نرخی برابر نرخ بهره رشد کند که می‌توان به شکل زیر آن را فرموله کرد:

$$p_t = p_0 e^{rt}$$

که p_t قیمت در دوره زمانی t، p_0 قیمت در اولین دوره زمانی، و r نرخ بهره می‌باشد(Devarajan & Fisher.1981:66).

در حقیقت صاحب منبع با یک مسئله بهینه‌سازی روبرو است که می‌توانیم آن را به صورت زیر نشان دهیم:

$$\max_q p(q, q', q'') q' e^{-rt} dt$$

1. Present Value

$$\text{subject to: } \begin{cases} q \le \bar{S} \\ q(0) = 0 \\ q' > 0 \\ q'(0) = 0 \end{cases}$$

با $p(q, q', q'') = a - bq - cq' - dq''$ که $q(t)$ تولید تجمعی در زمان t، $q'(t)$ تولید در زمان t، $q''(t)$ تغییر در تولید در زمان t، r نرخ بهره بدون ریسک، $\bar{S}$ کل منابع قابل استحصال، و a, b, c, d پارامترهای مثبت هستند(Cunha & Missemer.2020:11). ازسویی بر نظریه هتلینگ ایراداتی وارد است، از جمله اینکه با مشاهدات تجربی ناسازگاری‌هایی دارد. با این حال، منطق نظریه هتلینگ صحیح می‌باشد و آنچه باعث برخی ناسازگاری‌ها با مشاهدات تجربی می شود احتمالاً ناشی از مشخصه‌های بازار است(Raymond.2017).

عوامل حکمرانی

عوامل حکمرانی در ابعاد گوناگونی با قلّه نفتی گره خورده‌است. یک حکمرانی خوب می‌تواند با تنظیم‌گری‌های خود یک بازار انرژی مناسب را شکل دهد. اگر حکمرانی به اندازه کافی قوی نباشد می‌تواند مانعی در ایجاد سرمایه‌گذاری انرژی یا هدایت سرمایه به بخش‌های غیر مولد بر اثر فساد شود. در نتیجه تولید در زیربهینه‌ها و پایین‌تر از حد مطلوب قرار می‌گیرد. در یک حکمرانی ایده‌آل باید تمام جوانب توسعه پایدار نیز در نظر گرفته‌شود. همچنین، دولت‌ها می‌توانند در حکمرانی خود به توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت بیشتری دهند و تقاضای نفت را کاهش دهند. بررسی ساختار انرژی کشور حکایت از آن دارد که سیاست‌گذاری‌های بخش انرژی در ایران متولی خاصی ندارد. پراکنده بودن نهادهای تصمیم‌گیر در بخش انرژی درکنار چندوجهی بودن مسائل انرژی باعث عدم هماهنگی و فقدان کارایی در تصمیم‌گیری‌ها شده‌است. به موجب قانون برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران، دولت موظف شده‌بود تا براساس ضوابطی امور انرژی را در یک وزارتخانه تجمیع کند(قانون برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران.۱۳۷۹). با این حال در دوره ششم مجلس شورای اسلامی، با مطرح شدن تشکیل شورای عالی انرژی، ایده تشکیل وزارت انرژی به کناره رفت. بر اساس ماده ۵ قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی در سال ۱۳۸۹، سیاستگذاری در بخش انرژی کشور از جمله انرژی‌های نو و بهینه‌سازی تولید و مصرف انواع حامل‌های انرژی فقط برعهده شورای‌عالی انرژی است(Energy consumption pattern modification law.2011). موارد زیر از مهم‌ترین آسیب‌شناسی‌های ساز و کار شورای عالی انرژی است.

۱- عدم تشکیل منظم جلسات
۲- نبود متولی مشخص و قابل اطمینان برای پیگیری امور
۳- فقدان ساختار اداره و تصمیم‌گیری مشخص با رویکرد اجماع‌سازی
۴- عدم حذف ساختارهای زائد و موازی موجود
۵- ضعف دبیرخانه شورای عالی انرژی
۶- تضاد منافع و عدم پذیرش مواضع و دیدگاه‌های سایر اعضا
۷- ملزم بودن تصمیمات شورا به امضای رئیس جمهور
۸- عدم حضور سایر قوای مقننه و قضائیه در ساختار پیگیری امور شورا
۹- فقدان دستور جلسات اساسی برای طرح و تصمیم‌گیری در شورا
۱۰- مغایرت مقررات و قوانین تشکیل دستگاه‌های زیرمجموعه بخش انرژی(Nowrozi.2022)

قلّه نفتی، بازیافت ثانویه و ثالثیه

مخزن نفتی در زمان اکتشاف و پیش از برداشت دارای فشار اولیه است، چراکه تحت فشار لایه‌های زیرزمینی می‌باشد. با گذشت زمان و تخلیه طبیعی چاه از این فشار کاسته می‌شود. به منظور جبران این کاهش فشار از روش‌های متعددی استفاده می‌شود. بازیافت ثانویه شامل روش‌هایی مانند تزریق آب، گاز، و یا هردو به مخزن است. روش‌های حرارتی(تزریق بخار،احتراق درجا و...)، روش‌های شیمیایی(تزریق پلیمر،سرفکتانت[1] و...)، روش‌های امتزاجی(تزریق گاز طبیعی، نیتروژن و...) و روش میکروبی نیز از روش‌های ازدیاد برداشت[2] یا بازیافت ثالثیه هستند(Shepherd.2009:237-245).

جدول ۳ . آب و گاز تزریقی به مخازن نفتی طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۹(*Energy balance sheet of 2019.2019:171; Hydrocarbon balance sheet.2017:47*)

سال	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹٤	۱۳۹٥	۱۳۹٦	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹
کل آب تزریقی (هزار بشکه در روز)	۱۳۰,۶۳	۱۲۵,۸۸	۲۹۵,۹	۲۲۹,۱۳	۲۸۶,۷۱	۲۷۳,۹۰	۲۳۲,۰۴	۲۴۰,۵۴۷	۲۴۱,۶۴۳
کل گاز تزریقی (میلیون متر مکعب در روز)	۷۷,۶۹	۸۱,۹۳	۷۲,۱۷	۸۶,۳۷	۸۰,۳۴	۸۹,۹۴	۶۹,۲۶	۵۷,۳	۳۶,۹

همچنان که در جدول ۴ قابل مشاهده است در زمینه تزریق گاز از سال ۱۳۹۷ و آب از سال ۱۳۹۶ به بعد با کاهش نسبتاً شدیدی مواجه هستیم. بیشتر مخازن نفتی ایران در نیمه دوم عمر خود قرار دارند از این رو پرواضح است که مخازن نفتی نیاز ضروری به تزریق گاز و آب دارند. استفاده از روش‌های بازیافت ثانویه یا ثالثیه در مخازن باید با توجه به امکان پذیری فنی، اقتصادی، و فناوری میدان صورت بگیرد. با این حال، با توجه به اینکه ۹۰٪ مخازن نفتی ایران از نوع مخازن کربناته شکاف‌دار هستند تزریق کربن دی اکسید به مخازن به صورت امتزاجی می‌تواند یکی از بهترین روش‌های موجود با حفظ ملاحظات زیست محیطی در بازیافت ثالثیه است(Mirzaei Piyaman & et al.2008:9). میانگین ضریب بازیافت[3] از میادین نفتی در جهان حدود ۳۵ درصد می‌باشد. در ایران اما ضریب بازیافت میادین نفتی حدود ۲۵ درصد می‌باشد. ضریب بازیافت معلول عوامل متعدد ازجمله سنگ مخزن و نفت تولیدی است. بطور مثال، در آمریکا که مشکلات سرمایه‌گذاری و تکنولوژیکی وجود ندارد، مخزن شکاف‌دار اسپربری[4] ضریب بازیافت ۷ درصدی دارد. در خاورمیانه نیز بطور مثال حدود ۹۰ درصد مخازن نفتی عربستان سعودی از نوع شن و ماسه‌ای است و ضریب بازیافت آن‌ها بطور میانگین ۴۰ درصد است که این برتری در مقابل مخازن کربانته شکاف دار ایران منطقی است(Mizenaft.2021). بنابراین، پیرامون بحث ضریب بازیافت نباید مقایسه‌های ساده‌ای انجام داد چراکه این امر ناشی از عوامل متعدد با ویژگی‌های مخصوص هر مخزن است.

قلّه نفتی، گذار انرژی و تغییرات اقلیمی

گذار از انرژی‌های فسیلی به انرژی‌های تجدید پذیر را گذار انرژی[5] می نامند. پایان‌پذیر بودن انرژی‌های فسیلی و تغییرات اقلیمی عوامل مهمی در جهت تسریع گذار انرژی هستند. از این رو شدت‌یافتن مسائل محیطزیستی مرتبط با بهره‌گیری از منابع فسیلی می‌تواند سرعت گذار انرژی را شتاب ببخشد و متعاقباً قلّه نفتی را زودتر رقم بزند. خوشبین‌ها معتقداند که امکان یک تغییر سریع در رفتار مصرف‌کننده‌ها وجود دارد، با این‌حال روندهای تاریخی خلاف آن را به ما می‌گویند. از سویی شرکت‌ها و سرمایه-گذاران نفتی ادعا می‌کنند که میزان تولید نفت متعارف در جهان در طی سال‌های گذشته ثابت بوده‌است. بنابراین سهم اصلی

1. Surfactant
2. Enhanced Oil Recovery (EOR)
3. Recovery Factor
4. Spareberry
5. Energy Transition

افزایش تولید نفت مربوط به نفت نامتعارف و تکنولوژی شکست هیدرولیکی است. در نتیجه ادعا می‌شود که قلّه نفتی رویکردی منفعلانه نسبت به تغییرات اقلیمی و مسائل محیط‌زیستی دارد. از طرفی کشورهای متعدد، برنامه‌های مختلفی در زمینه تغییرات اقلیمی برای خود تعریف کرده‌اند. برای مثال چین سال ۲۰۶۰ و رهبران اتحادیه اروپا سال ۲۰۵۰ را برای رسیدن به انتشارات کربن صفر[1] هدف قرار داده‌اند. ایالات متحده آمریکا نیز با پیروزی جو بایدن در انتخابات ریاست جمهوری مجدداً به توافق‌نامه پاریس که توسط دونالد ترامپ در سال ۲۰۱۵ از آن خارج شده بود بازگشت. آمریکا اکنون سال ۲۰۳۵ را برای کربن صفر انتخاب کرده‌است(White House.2021). سیاست‌های کاهش انتشارات کربن شامل توسعه و بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش بهره‌وری انرژی، مالیات بر کربن، سیستم تجارت انتشارات کربن[2]، مکانیزم جبران[3]، سرمایه‌گذاری اقلیمی مبتنی بر نتایج[4] و... می‌شود(Tsai.2020:1-2). با این وجود چالش‌های زیادی در سیاست‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی و انتشارات کربن وجود دارد و کشورهای پیشگام در این زمینه نیز همچنان در حال استفاده از منابع فسیلی هستند و گذار انرژی به آسانی رخ نخواهد داد. اگرچه تاکنون تلاش‌ها برای یک معاهده الزام‌آور در زمینه تغییرات اقلیمی و کاهش انتشارات کربن به ثمر نرسیده‌است اما ابعاد حقوقی این ماجرا در حال پیشرفت‌های بزرگی است. بطور مثال، در ۲۶ مه ۲۰۲۱ دادگاهی در شهر لاهه هلند شرکت شل را ملزم به کاهش ۴۵ درصدی انتشارات کربن تا سال ۲۰۳۰ براساس سال مبنای ۲۰۱۹ کرد(Bloomberg.2021). میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی ایران در سال ۱۳۹۹ در بخش‌های نیروگاهی، خانگی و تجاری، حمل و نقل و صنعت به ترتیب برابر ۲۰۰,۰۲۵، ۱۶۲,۹۳۷، ۱۴۱,۵۴۲ و ۱۲۷,۸۲۲ تن معادل دی اکسید کربن بوده است(Energy balance sheet of 2019.2019:259). ایران اگرچه در این زمینه‌ها فعالیت جدی نداشته است اما باید مقدمه‌هایی برای ورود به این عرصه را فراهم‌کند. البته با توجه جایگاه ویژه ایران در زمینه نفت و گاز باید توجه داشت که تغییرات اقلیمی و گذار انرژی خود از تهدیدکنندگان اصلی ایران خواهند بود. پیرامون آثار تغییر اقلیم بر ایران، یک بررسی زمانی–مکانی[5] از تغییرات متغیرهای اقلیمی بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ در ایران انجام گرفته‌است(جدول ۴).

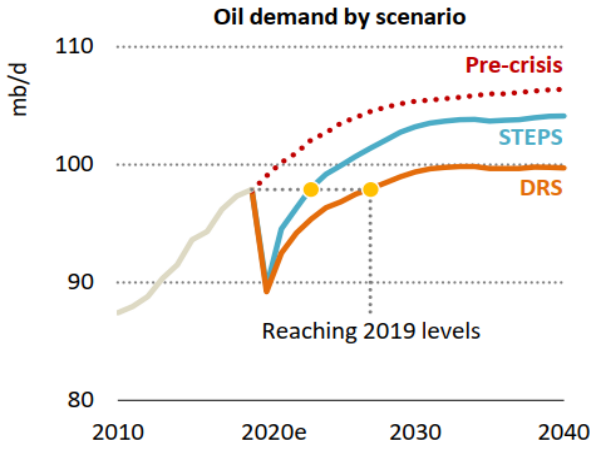
جدول ۴ . تغییرات متغیرهای اقلیمی در ایران بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵(Malaekeh & et al.2022)

متغیرهای عموماً افزایشی کشور	متغیرهای با روندهای متفاوت در استان‌ها	متغیرهای عموماً کاهشی کشور
سرعت باد **میانگین دما** **تابش خورشیدی** **بیشینه‌ی دما**	تبخیر فشار اتمسفریک	نزولات آسمانی رواناب حجم منبع آب پوسته سپیدایی یا ضریب بازتاب کمینه‌ی دما بارش شدید

1. Zero Carbon Emissions
2. Emission Trading System (ETS)
3. Offset Mechanism
4. Result-Based Climate Finance (RBCF)
5. Spatio-Temporal

قلّه نفتی و کووید-۱۹

آغاز همه‌گیری کووید-۱۹ [1] در دسامبر ۲۰۱۹ موجب اختلالات گسترده در ابعاد مختلف اقتصاد جهانی بخصوص تقاضای انرژی شد. آژانس بین‌المللی انرژی در دو سناریو «سیاست‌های اعلامی» و «سناریو بهبود به تاخیر افتاده»، تقاضای نفت جهان را در پی همه‌گیری کووید-۱۹ بررسی کرد(شکل ۱۲). همانطور که در شکل مشاهده می‌شود هر دو سناریو فرم یکسانی به لحاظ نوع روند دارند.



شکل ۱۲ . تقاضای نفت در دوسناریو سیاست‌های اعلامی(*Stated Policies Scenario*) و سناریو بهبود به تاخیر افتاده(*Delayed Recovery Scenario*) در کنار شرایط پیش از همه گیری کووید-۱۹ (*Pre-crisis*) (*World Energy Outlook.2020:38*).

شیوه اثر گذاری کووید-۱۹ بر قلّه نفتی عمدتاً از کانال تقاضای نفت است. اگرچه در اثر کووید-۱۹ تغییراتی در رفتار مصرف-کننده رخداده که بعضی از آن‌ها ممکن است در جهان پساکرونا نیز همچنان همراه ما باشد ولی در مجموع تقاضای نفت افزایش خواهد یافت تا جایی که به مقدار معین و تثبیت شده‌ای برای مدت نسبتا طولانی برسد. دوره‌ای که تقاضای نفت به سطح تثبیت شده‌ای برسد دوره‌ای حیاتی است که تلاش‌ها در جهت گذار انرژی سرعت خواهدیافت. در نتیجه با درنظرگرفتن اثر کووید-۱۹ بر تقاضای نفت از طریق توجه ویژه به گذار انرژی، از یک سو با افزایش سطح تقاضا و از سوی دیگر با رقم خوردن دوران قلّه نفتی برخی کشورها در دو دهه پیش‌رو و نیز چالش‌ها و عدم قطعیت‌های گذار انرژی می‌توان انتظار داشت که در صورت حضور جدی ایران در بازار نفت، پیامدهای ناشی از کووید-۱۹ بر زمان قلّه نفتی ایران بطور غیر مستقیم تاثیرگذار باشد.

قلّه نفتی، سرمایه‌گذاری و تحریم

همیشه در بورس، سهام و سرمایه‌گذاری عدم قطعیت بوده‌است بخصوص وقتی که صحبت از شرکت‌های نفتی می‌شود. بطورکلی صنعت پایین‌دست، میان‌دست و بالادست نفت در کنار ریسک‌های آن نیاز به سرمایه‌گذاری‌های بزرگی دارد. در سال‌های اخیر دغدغه‌های محیطزیستی سبب شده‌است تا تحریم‌هایی از سوی فعالان محیطزیستی و سازمان‌های مردم نهاد علیه شرکت‌های نفتی در بازار سهام صورت‌گیرد. در گزارش «کربن صفر تا ۲۰۵۰-یک نقشه راه برای بخش انرژی جهانی» که توسط آژانس بین المللی انرژی در ماه می ۲۰۲۱ منتشرشده، بیش از ۴۰۰ بخش مختلف را برای رسیدن به هدف کربن صفر تا سال ۲۰۵۰ بررسی کرده‌است که یکی از این بخش‌های آن، سرمایه‌گذاری است(IEA.2021:3). در بخش سرمایه‌گذاری این گزارش جسورانه‌ترین درخواست که عدم سرمایه‌گذاری در پروژه‌های جدید سوخت فسیلی است، مطرح شده‌است. در قلّه نفتی، سرمایه‌گذاری به طور

1. Covid-19

جدی نقشی اساسی و مهم را ایفاخواهد چراکه تا سرمایه‌ای نباشد فعالیت اقتصادی در صنعت نفت رخ نخواهد داد. اما اینکه اهداف همسو با تغییر جهت سرمایه‌گذاری از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی‌های پاک تا چه اندازه موفقیت‌آمیز باشد به راحتی قابل پیش‌بینی نیست. در برنامه ششم توسعه ایران برای صنعت نفت ۲۰۰ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری مورد نیاز در نظر گرفته شد که سهم بخش بالادستی صنعت نفت حدود ۱۳۰ میلیارد دلار بود(هفته نامه دانش نفت.۱۳۹۵). از این رو متوسط رشد سالانه سرمایه گذاری صنعت نیز ۳۹,۵ درصد لحاظ شده‌بود(قانون برنامه پنج‌ساله ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی.۵:۱۳۹۴). صادرات نفتی ایران در سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ به ترتیب ۲۱ و ۳۸,۷ میلیارد دلار بوده است(CBI.2021). ارقامی که مقایسه آن با نیازهای سرمایه‌گذاری پیام واضح و روشن نیاز صنعت نفت به سرمایه‌گذاری خارجی را اعلام می‌کند.

نتیجه‌گیری

قلّه نفتی به بررسی زمانی می‌پردازد که میزان تولید نفت به بیشینه خود می‌رسد و پس از آن روند صعودی تولید متوقف می‌شود. این حقیقت که منابع فسیلی، منابعی پایان‌پذیر هستند مشوقی برای بررسی زمان قلّه خواهد بود. یافتن قلّه نفتی به ما مدت زمان باقی‌مانده برای ایجاد آمادگی در سیستم انرژی کشور تا شروع کاهش تولیدات نفتی را می‌دهد. در این ارتباط چند نتیجه‌گیری ارائه می‌شود:

۱- با بررسی سیر تطوّر مباحث نظری پیرامون قلّه نفتی دریافتیم که پیش‌بینی زمان وقوع قلّه به علت پیچیدگی عوامل دخیل بر آن یعنی ابعاد سیاسی، تکنولوژیکی و اقتصادی مسئله‌ای باز است. تلاش‌ها برای یافتن مدلی دقیق‌تر از زمان هیوبرت تاکنون ادامه داشته‌است. با این حال مدل هیوبرت هنوز به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- برخی از کاربردها و آثار مهم فناوری‌های نوین و لزوم بهره‌گیری از آن‌ها نظیر شکست هیدرولیکی، حفاری افقی، و هوش مصنوعی در قلّه نفتی مورد بررسی قرار گرفت. دریافتیم که فناوری می‌تواند تأثیرات شگرفی در تسریع، تثبیت دوره قلّه، و ایجاد قلّه‌های جدید نفتی داشته باشند.

۳- در این پژوهش قلّه نفتی ایران در قالب سه سناریو تنبل، گوزن شمالی، و یوزپلنگ ایرانی بر روی میزان نرخ رشد ذاتی در تولید نفت شبیه‌سازی شد. با نگاه کلی به نتایج اختصاصی هر سناریو و نیز مسائلی چون احتمال اکتشاف ذخایر جدید نفتی و چالش‌های پیش روی افزایش سطح تولید می‌توان انتظار داشت که ایران در دو تا سه دهه پیش رو با قلّه نفتی خود مواجه خواهد شد. با عنایت به مسئله مهمی چون گذار انرژی و نیز وجود ذخایر فراون نفتی در ایران می‌توان به این نتیجه رسید که فرصت عمل برای ایران بسیار محدود است.

۴- چالش اصلی ایران در زمینه صنعت نفت وجود تحریم‌های ایالات متحده و نبود سرمایه‌گذاری‌های کافی داخلی و خارجی است. در نتیجه اهتمام اصلی باید بر روی رفع تحریم‌ها، جذب سرمایه‌گذاری حداکثری، و بکارگیری فناوری‌های نوین در چارچوب سیاست‌های کلی نظام باشد. از سویی بحث افزایش نرخ بازیافت، به ویژگی‌های ذاتی سنگ مخزن و نفت تولیدی بستگی دارد که با رفع تحریم نیز همچنان برخی از این محدودیت‌های فنی باقی خواهند ماند.

توصیه‌های سیاستی

۱- با توجه به یافته‌های این مقاله و دیگر پژوهش‌ها، فرصت تاریخی ایران برای رشد و توسعه و از بین بردن عقب ماندگی خود بسیار محدود است. بدون شک حامل‌های انرژی فسیلی نقشی اساسی در آینده ایران خواهند داشت. بنابراین سیاست‌گذاری‌های مربوط به بخش نفت و گاز باید بیشتر از دیگر بخش‌ها و حتی دیگر حامل‌های انرژی مانند انرژی هسته‌ای، تجدیدپذیر، و حتی

برق مورد توجه قرار گیرد. صادرات هر چه بیشتر نفت و مشتقات آن به معنای دسترسی بیشتر به منابع مالی برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های کشور و انرژی‌های پاک است.

۲- قله نفتی برای ایران هنوز اتفاق نیفتاده است. این هم فرصتی بی‌نظیر برای آینده ایران است. همه مناطق خشکی و دریایی ایران مطالعه کامل از لحاظ زمین‌شناسی برای پیدا نمودن منابع معدنی انجام نگرفته است. یک برنامه‌ریزی استراتژیک برای بخش نفت و گاز می‌تواند ایران را با انبوهی از فرصت‌های جذاب روبرو نماید. با این حال، نمی‌توان انتظار داشت که میادین عظیم نفتی مورد اکتشاف واقع شوند، اما با کشف میادین متوسط و یا حتی کوچک با توجه به مزیت‌های هزینه‌ای در ایران قابلیت اقتصادی خواهند داشت.

۳- ایران از معدود کشورهایی است که منابع انرژی فراوان بصورت مشترک با همسایگان خود دارد. توصیه می‌شود با استفاده از تحدید حدود آب‌ها و مرزها (Demarcation) و مشخص‌سازی سهم هر کشور از منبع مشترک (Unitization) از مخازن مشترک در دریا و خشکی استفاده کامل انجام شود.

۴- برنامه‌ریزی برای اکتشاف، توسعه، استخراج، انتقال و صادرات نفت خام ایران یک برنامه پیچیده غیرخطی با متغیرهای متعدد است. بخصوص اگر قید زمان را نیز به آن اضافه کنیم. این کار نیازمند یک بنگاه مشاوره‌ای در سطح بین‌المللی و مستقل از وزارت نفت و شرکت‌های تابعه است. به این منظور می‌توان در مسائلی که از منظر امنیتی و استراتژیک تهدیدی برای بخش انرژی کشور نیست در چارچوب سیاست‌های کلی نظام از خدمات مشاوره‌ای و علمی شرکت‌های بین‌المللی معتبر استفاده کرد.

۵- مدیریت تزریق آب و گاز و دیگر روش‌های ثانویه و ثالثیه بازیافت نفت، مدیریت بخش تقاضا در داخل، طراحی قراردادهای نفتی جذاب برای سرمایه‌گذار خارجی، انتشار اوراق مشارکت برای تامین مالی داخلی، اولویت قرار دادن میادین نفتی مشترک در بهره‌برداری، رفع ضعف‌های مطالعاتی در بازار و روندهای انرژی در جهان، بهره‌گیری از نسل چهارم فناوری و هوش مصنوعی به منظور بهینه‌سازی عملیات چاه‌ها، توجه به مسائل محیط زیستی، برآورد میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و ایجاد سازوکاری قانونی برای سیاستگذاری قاطع در بخش انرژی از دیگر توصیه‌های سیاستی مهم است.

References

1- Bentley, R. (2016). Introduction to Peak Oil. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26372-4
2- Bloomberg. (2021). What a Dutch Court Ruling Means foe Shell and Big Oil. Retrieved from: https://www.bloomberg.com/news/articles/۲۰۲۱-۰۶-۰۴/what-a-dutch-court-ruling-means-for-shell-and-big-oil-quicktake
3- BP. (2022). BP Statistical Review of World Energy 2022. [online] London: BP Statistical Review of World Energy. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf
4- Brandt, A. (2010). Review of mathematical models of future oil supply: Historical overview and synthesizing critique. Energy, 35(9), 3958-3974. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.045
5- Campbell, C. J., & Laherrère, J. H. (1998). The End of Cheap Oil. Scientific American, 278(3), 78–83. http://www.jstor.org/stable/26057708
6- CBI. (2021). Balance of payments .Retrieved from: https://www.cbi.ir/simplelist/23791.aspx
7- Claerbout, J. & Muir, F. (2020). Hubbert math. Retrieved from: https://sepwww.standford.edu/sep/jon/hubbert.pdf
8- Crude Oil Peak. (2012). Iran's 2nd and last oil peak. Retrieved from: http://crudeoilpeak.info/irans-2nd-and-last-oil-peak
9- Cunha, R. & Missemer, A. (2020). The Hotelling Rule in Non-Renewable Resource Economics: A Reassessment. Canadian Journal of Economics, 53(2): 800-820. https://doi.org/10.1111/caje.12444
10- Daneshenaft. (2016). Danesh Neft report from the conference "Examining the requirements and challenges of partnership contracts and investment financial instruments". Retrieved from: http://www.daneshenaft.ir/cvid/۲۵۰/content/۱۰۱۰۲/default.aspx
11- Devarajan, S., & Fisher, A. C. (1981). Hotelling's "Economics of Exhaustible Resources": Fifty Years Later. Journal of Economic Literature, 19(1), 65–73. http://www.jstor.org/stable/2724235
12- Ebrahimi, M. & Ghasabani, N. (2015). Forecasting OPEC crude oil production using a variant Multicyclic Hubbert Model. Journal of Petroleum Science and Engineering, 133. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.010
13- Energy balance sheet of 2019. (2019). Deputy Department of Electricity and Energy Affairs, Ministry of Energy. https://pep.moe.gov.ir
14- Energy consumption pattern modification law. (2011). Retrieved from: https://rc.majlis.ir/fa/law/show/789793
15-
16- Hosseini, S. H., G., H. S., Kiani, B., Pour, M. M., & Ghanbari, M. (2014). Examination of Iran's crude oil production peak and evaluating the consequences: a system dynamics approach. Energy Exploration & Exploitation, 32(4), 673–690. http://www.jstor.org/stable/90006592
17- Hubbert, M. (1962). Energy Resources. Washington, DC: The National Academies Press.

18- Hydrocarbon balance sheet. (2017). Deputy Department of Planning of the Ministry of Oil. Tehran: The central building of the Ministry of Petroleum.
19- IEA. (2021). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: International Energy Agency.
20- Indonesia Crude Oil Production. (2023). Trading Economics. Retrieved from: https://tradingeconomics.com/indonesia/crude-oil-production
21- IMF. (2022). "Nigeria: Staff Concluding Statement of the 2022 Article IV Mission". Retrieved from: https://www.imf.org/en/News/Articles/2022/11/18/nigeria-staff-concluding-statement-of-the-2022-article-iv-mission
22- Law of the 6th five-year economic, social and cultural development plan (2017-2021). (2017). Retrieved from: https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1014547
23- Law of the Third Economic, Social and Cultural Development Program of the Islamic Republic of Iran. (2000). Retrieved from: https://rc.majlis.ir/fa/law/show/93301
24- Malaekeh, S., Safaie, A., Shiva, L. & Tabari, H. (2022). Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. Stoch Environ Res Risk Assess 36:3725–3752. https://doi.org/10.1007/s00477-022-02223-0
25- Mirzaei Piyaman, A., Salavati, S., Karimi, H. & Masihi, M. (2008). Evaluation of enhanced oil recovery (EOR) methods in fractured carbonate reservoirs. Applied geology and environment conference. https://sid.ir/paper/818593/fa
26- Mizenaft. (2021). What is recovery factor? Retrieved from: http://www.mizenaft.com/report/29322/%D8%A7%D8%B5%D9%84-%D9%85%D8%A7%D8%AC%D8%B1%D8%A7%DB%8C-%D8%B6%D8%B1%DB%8C%D8%A8-%D8%A8%D8%A7%D8%B2%DB%8C%D8%A7%D9%81%D8%AA-%DA%86%DB%8C%
27- Nigeria Crude Oil: Exports. (2021). CEIC. Retrieved from: https://www.ceicdata.com/en/indicator/nigeria/crude-oil-exports
28- Nigeria Crude Oil Production. (2023). Trading Economics. Retrieved from: https://tradingeconomics.com/nigeria/crude-oil-production
29- Norway Crude Oil Production. (2023). Trading Economics. Retrieved from: https://tradingeconomics.com/norway/crude-oil-production
30- Norwegian Petroleum Directorate. (2022). Production figures September 2022. Retrieved from: https://www.npd.no/en/facts/news/Production-figures/2022/production-figures-september-2022/
31- Nowrozi, M. (2022). "Investigating obstacles to improving the effectiveness of the Supreme Energy Council". Retrieved from: https://iranthinktanks.com/examining-the-barriers-to-improving-the-effectiveness-of-the-high-energy-council/
32- Oil: High stakes, high costs in the North Sea. (1975) Time Magazine. Retrieved from: https://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,913489,00.html
33- Kennedy & et al. (2005). 125 questions: What don't we know? Science, 309, pp.75–102. Retrieved from: https://www.sciencemag.org/site/feature/misc/webfeat/125th/
34- Kiani, B., & Hosseini, S.H. (2009). Examining the Hubbert Peak of Iran's Crude Oil: A System Dynamics Approach. European Journal of Scientific Research, 25(3), 437-447.
35- Kothari, A. & Chhapgar, B. (2005). Threasure of Natural History. Bombay Natural History Society and Oxford University Press.
36- Makhdoum, H. & Pouransari, Z. (2022). Analytical Study of Iran Nonrenewable Energy Resources Using Hubbert Theory. ACS Omega, 7(2):1772-1784. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04696
37- Obite, C., Chukwu, A., Bartholomew, D., Nwosu, U. & Esiaba, G. (2021). Classical and machine learning modeling of crude oil production in Nigeria: Identification of an eminent model for application. Energy Reports, 7: 3497-3505. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.005
38- Raymond. (2017). "A Modern Validation of Hotteling's Rule". Theoretical Economic Letters, 7. https://doi.org/10.4236/tel.2017.77140
39- Shepherd, M. (2009). Oil Field Production Geology: AAPG Memoir 91. American Association of Petroleum Geologists. https://doi.org/10.1306/M911316
40- Today in energy. (2018). U.S. monthly crude oil production exceeds 10 million barrels per day, highest since 1970. Retrieved from: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34772
41- Tsai, W. (2020). Carbon Emission Reduction—Carbon Tax, Carbon Trading, and Carbon Offset. Energies, 13(22): 6128. https://doi.org/10.3390/en13226128
42- White House. (2021). President Biden sets 2030 greenhouse gas pollution reduction target. Retrieved from: https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/04/22/fact-sheet-president-biden-sets-2030-greenhouse-gas-pollution-reduction-target-aimed-at-creating-good-paying-union-jobs-and-securing-u-s-leadership-on-clean-energy-technologies/