



The University of Tehran Press

## Economic Evaluation of the Methanol Value Chain: Focusing on MTO Plant Development and Toll-Based Olefin Production

Seyed Saeid Daneshi<sup>1</sup> | Ali Shahrooie<sup>2</sup> | Mohammadmehdi Hajian<sup>3\*</sup>

1. Ph.D. Candidate in International Oil and Gas Contract Management, Faculty of Law and Political Science, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. Email: [S\\_Daneshi@atu.ac.ir](mailto:S_Daneshi@atu.ac.ir)

2. Ph.D. Candidate in Oil and Gas Economics, Faculty of Economics, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran. Email: [Alishahrooie@yahoo.com](mailto:Alishahrooie@yahoo.com)

3. Corresponding Author, Assistant Professor of Oil and Gas Law, Faculty of Law and Political Science, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. Email: [Hajian@atu.ac.ir](mailto:Hajian@atu.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Paper

**Article History:**

**Received:** 22 May 2025

**Revised:** 21 July 2025

**Accepted:** 26 September 2025

**Published Online:** 15 January 2025

**Keywords:**

Value Chain,  
Methanol,  
MTO,  
Economic Evaluation.

### ABSTRACT

In the volatile and complex environment of global energy markets, making optimal investment decisions requires a deep understanding of the value chain and the relative advantages within each of its links. As a strategic resource, natural gas must be directed through pathways that generate the highest long-term value. This study focuses on a key segment of the natural gas value chain—the methanol-to-olefins (MTO) route—and evaluates the economic and strategic feasibility of two main options: (1) establishing a domestic MTO plant, and (2) exporting methanol for toll-based olefin production abroad. Using financial modeling based on three operational scenarios, the findings reveal that none of the proposed options meet the minimum expected internal rate of return (IRR) of 15%. High operating expenses, technological inefficiencies, and a lack of competitive feedstock pricing are identified as major barriers to economic viability. The toll-processing model—defined as outsourcing methanol conversion to olefins under a service-fee agreement—also fails to deliver acceptable returns under typical conditions. The study concludes that MTO projects are not financially attractive under current market dynamics. Therefore, the strategic focus should shift toward extended value chain models such as GTO<sup>+</sup> and MTO<sup>+</sup>, which integrate downstream production of higher-value petrochemical products. These approaches, supported by innovative financing structures and collaborative investment models, are essential for creating sustainable value from natural gas resources.

**Cite this article:** Daneshi, S.; Shahrooie, A. & Hajian, M. (2026). Economic Evaluation of the Methanol Value Chain: Focusing on MTO Plant Development and Toll-Based Olefin Production. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 57-78. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.395500.1152>



© Seyed Saeid Daneshi, Ali Shahrooie, Mohammadmehdi Hajian

**Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.395500.1152>

### Introduction

The growing volatility in global energy markets has intensified the need for strategic, value-driven investments, particularly in the upstream and midstream sectors of the petrochemical industry. In this context, natural gas—especially its conversion into value-added downstream products—plays a pivotal role in ensuring economic resilience and minimizing dependency on raw exports. Iran, with a surplus of methanol production capacity, faces an urgent need to expand its value chain to avoid the adverse consequences of market saturation and low-value exports. This study investigates feasible pathways for extending the methanol value chain by evaluating the economic and strategic viability of converting methanol into light olefins via Methanol-to-Olefins (MTO) processes.

## **Materials and Methods**

This research adopts a descriptive-analytical approach using library studies, techno-economic modeling, and financial scenario analysis. Three operational scenarios are explored: (1) constructing a new MTO unit alongside a methanol plant (GTO integration), (2) acquiring and reassembling a second-hand MTO unit from China, and (3) toll manufacturing of olefins by exporting methanol to a Chinese MTO complex. Key data such as capital expenditure (CAPEX), operational expenditure (OPEX), feedstock price, product yield, and prevailing global market rates were compiled from domestic and international sources. The financial performance of each scenario was assessed using Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR), with a discount rate of 15%, a construction period of 3.5 years, and a 15-year operational horizon.

## **Results**

The findings indicate that none of the evaluated scenarios meet the expected investment return threshold of 15%. In the first scenario, despite technological integration and proximity of upstream and downstream units, the IRR remains below 10% due to high investment costs and the lack of feedstock pricing advantages. The second scenario involving a second-hand MTO unit demonstrated even lower profitability due to reduced conversion efficiency, higher maintenance and operational costs, and outdated technology. The third scenario, which involves outsourcing the olefin production via tolling agreements, showed relatively lower investment risk, but also failed to deliver sufficient returns. The IRR under this model reached a maximum of 7% assuming favorable fee agreements. Only under highly optimistic conditions—such as reducing tolling fees below \$30 per ton of methanol—would the IRR approach the acceptable range, which appears unlikely given the high operational costs on the Chinese side.

## **Discussion and Conclusion**

The analysis suggests that constructing or acquiring standalone MTO units, even under integrated GTO structures, cannot fulfill the profitability expectations of investors under current economic and operational constraints. High CAPEX, operational inefficiencies, volatile product markets, and lack of feedstock subsidies collectively undermine project viability. Consequently, strategic focus must shift towards more comprehensive downstream integration models such as GTO+ and MTO+, which involve further processing of olefins into high-value petrochemical products. Such approaches, coupled with modern partnership models, may unlock higher margins and ensure economic sustainability. Future studies should investigate deeper techno-economic assessments and policy incentives required to support the development of extended value chains in the petrochemical sector.



انتشارات دانشگاه تهران

## فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

# ارزیابی اقتصادی زنجیره ارزش متانول: با تمرکز بر توسعه واحد MTO و تولید الفین مبتنی بر قرارداد خدماتی

سید سعید دانشی<sup>۱</sup> | علی شهروی<sup>۲</sup> | محمدمهدی حاجیان<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری مدیریت قراردادهای بین‌المللی نفت و گاز، دانشکده حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: [S\\_Daneshi@atu.ac.ir](mailto:S_Daneshi@atu.ac.ir)
۲. دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، دانشکده اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران. رایانامه: [Alishahrooie@yahoo.com](mailto:Alishahrooie@yahoo.com)
۳. نویسنده مسئول، استادیار حقوق نفت و گاز، دانشکده حقوق و علوم سیاسی - دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: [hajian@atu.ac.ir](mailto:hajian@atu.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

زنجیره ارزش،

متانول،

MTO،

ارزیابی اقتصادی.

در شرایط پرتلاطم و پیچیده بازار جهانی انرژی، انتخاب مسیر بهینه سرمایه‌گذاری نیازمند تحلیل عمیق زنجیره ارزش و درک صحیح از مزیت‌های نسبی در هر حلقه از آن است. در این راستا، گاز طبیعی به عنوان یک منبع استراتژیک، باید از مسیرهایی عبور کند که بیشترین ارزش افزوده را در بلندمدت خلق کند. مطالعه حاضر با تمرکز بر بخشی از زنجیره ارزش گاز طبیعی، یعنی مسیر متانول به الفین، به تحلیل اقتصادی و راهبردی دو گزینه اصلی می‌پردازد: احداث واحد MTO در داخل کشور و ارسال متانول برای فرآوری کارمزدی در خارج از کشور. با مدل‌سازی مالی مبتنی بر سه سناریو عملیاتی، یافته‌ها نشان می‌دهند در هیچ‌یک از حالت‌های بررسی‌شده، نرخ بازدهی پروژه به سطح مورد انتظار سرمایه‌گذار (۱۵ درصد) نمی‌رسد و گزینه‌های پیشنهادی از جذابیت اقتصادی برخوردار نیستند. هزینه‌های بالای عملیاتی، ناکارآمدی فناوری‌های موجود و ضعف در مزیت قیمتی خوراک، از دلایل اصلی عدم توجیه‌پذیری اقتصادی این پروژه‌ها به شمار می‌روند. بر این اساس، تمرکز بر توسعه زنجیره‌های تکمیلی تحت عناوین GTO<sup>+</sup> یا MTO<sup>+</sup> و طراحی مدل‌های نوین مشارکت و سرمایه‌گذاری، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای خلق ارزش و پایداری اقتصادی در این مسیر تلقی می‌شود.

**استناد:** دانشی، سید سعید؛ شهروی، علی و حاجیان، محمدمهدی (۱۴۰۴). ارزیابی اقتصادی زنجیره ارزش متانول: با تمرکز بر توسعه واحد MTO و تولید الفین مبتنی بر قرارداد خدماتی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۱) ۷۸-۵۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.395500.1152>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© سید سعید دانشی، علی شهروی، محمدمهدی حاجیان

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.395500.1152>



## ۱. مقدمه

سرمایه‌گذاری در صنایع سرمایه‌بر نظیر نفت، گاز و پتروشیمی، مستلزم تحلیل جامع و چندبعدی از عوامل مؤثر بر فرایند تصمیم‌گیری است. ویژگی‌هایی نظیر مقیاس بالای سرمایه‌گذاری اولیه، طولانی بودن دوره بازگشت سرمایه و وجود ریسک‌های فنی، مالی و نهادی، ضرورت ارزیابی دقیق و چندلایه پروژه‌ها را دوچندان می‌سازد. تصمیم‌گیری مؤثر در چنین محیطی، در گرو کاهش عدم قطعیت‌ها و دستیابی به تصویری واقع‌بینانه از متغیرهای کلیدی اقتصادی و صنعتی است. در این میان، مرحله پیش از اجرا - شامل شناسایی، تحلیل، اولویت‌بندی و تعریف فرصت‌های سرمایه‌گذاری - نقشی اساسی در شکل‌گیری مزیت رقابتی و خلق ارزش افزوده ایفا می‌کند. شواهد تجربی نیز بیانگر آن است که کیفیت مطالعات امکان‌سنجی و طراحی اولیه، تأثیر مستقیمی بر موفقیت یا شکست پروژه‌ها دارد؛ به گونه‌ای که طراحی دقیق، حتی با اجرای متوسط، می‌تواند نتایج اقتصادی مطلوب‌تری نسبت به اجرای عالی یک طرح فاقد پایه تحلیلی ارائه دهد. با این حال، در فضای پروژه‌محور کشور، غفلت از تحلیل‌های عمیق در مرحله پیش از اجرا، به شکل‌گیری پروژه‌های نیمه‌تمام و غیراقتصادی منجر شده که فاقد توانایی خلق ارزش پایدار هستند. بر این اساس، دستیابی به درکی روشن از وضعیت گذشته، حال و آینده حوزه‌های صنعتی، به‌ویژه در زنجیره‌های ارزش کلیدی، شرط لازم برای تصمیم‌گیری مبتنی بر تحلیل و سرمایه‌گذاری موفق محسوب می‌شود. یکی از چالش‌های برجسته در این زمینه، مازاد تولید متانول در زنجیره ارزش گاز طبیعی است. در این تحقیق، بررسی سناریوهای پیش رو برای حل مسائل مرتبط با مازاد متانول تولیدی کشور و ایجاد ارزش افزوده در زنجیره ارزش گاز طبیعی مد نظر قرار گرفته است. یکی از رویکردهای قابل بررسی برای حل این مشکل، بهره‌گیری از فناوری تبدیل متانول به الفین‌های سبک<sup>۱</sup> (MTO) است؛ راهکاری که ظرفیت‌های بالقوه‌ای برای ارتقای بهره‌وری و افزایش ارزش افزوده در اختیار می‌گذارد. علاوه بر این، زنجیره متنوعی از سبد محصولات پایین‌دستی پتروشیمی نیز از طریق الفین‌های سبک قابل تولید است. در این پژوهش، با بررسی گزینه‌های مختلف سرمایه‌گذاری در زنجیره ارزش متانول و با توجه به محدودیت‌ها، به طور خاص به ارزیابی راه‌های توسعه فرایند MTO به منظور بهره‌برداری از مازاد متانول تولیدی پرداخته شده است. در واقع هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی راهکارها برای ارتقای بهره‌وری در صنعت پتروشیمی در زنجیره متانول ایران است. در این راستا، سه گزینه عملیاتی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند:

(۱) احداث یک واحد جدید MTO،

(۲) خرید، حمل و نصب مجدد یک واحد دست‌دوم<sup>۲</sup> (MTO)،

(۳) ارسال متانول به یک پلنت MTO مستقر در چین برای تولید کارمزدی الفین‌ها.

این گزینه‌ها بر اساس پیشنهادهای عملیاتی واقعی برای اجرای واحدهای MTO و با در نظر گرفتن شرایط ویژه صنعت پتروشیمی کشور طراحی شده‌اند. این پژوهش به دنبال مقایسه و تحلیل دقیق فنی - اقتصادی این گزینه‌ها به منظور شناسایی بهترین راهکار برای استفاده بهینه از منابع کشور است. در واقع، پژوهش به دنبال پاسخ‌دهی به این پرسش است که بهترین و منطقی‌ترین سناریو برای توسعه زنجیره ارزش گاز طبیعی از مسیر محصول متانول کدام است و هر یک از این پاسخ‌ها تحت چه شرایطی می‌توانند بازدهی قابل قبول اقتصادی را متوجه سرمایه‌گذاران کنند؟ در این راستا، فناوری تبدیل متانول به الفین (MTO) به عنوان بخشی از یک پروژه گاز به الفین<sup>۳</sup> (GTO) یکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفته و محاسبات انجام‌شده بر اساس پیشنهادهای مورد اشاره برای واحد MTO، در کنار داده‌های واقعی یک پروژه متانول در کشور خواهد بود. مقاله ابتدا به بررسی مبانی نظری مرتبط با زنجیره ارزش گاز طبیعی و جایگاه متانول در این زنجیره پرداخته و سپس تحلیل‌های فنی و اقتصادی مرتبط با گزینه‌های مختلف سرمایه‌گذاری در این حوزه را ارائه می‌دهد. در بخش پیشینه پژوهش، مطالعات مرتبط با این موضوع مرور شده و خلأهای موجود در تحقیقات پیشین شناسایی خواهد شد. در ادامه، روش‌شناسی پژوهش توضیح داده شده و نحوه جمع‌آوری داده‌ها و رویکرد امکان‌سنجی پروژه‌های سرمایه‌گذاری تشریح شده است. در نهایت، یافته‌های پژوهش ارائه شده و در بخش «بحث و نتیجه‌گیری»، جمع‌بندی و نتایج حاصل از تحقیق بیان شده است.

1. Methanol-To-Olefins (MTO)

2. Second hand MTO

3. Gas-To-Olefins (GTO)

## ۲. مبانی نظری

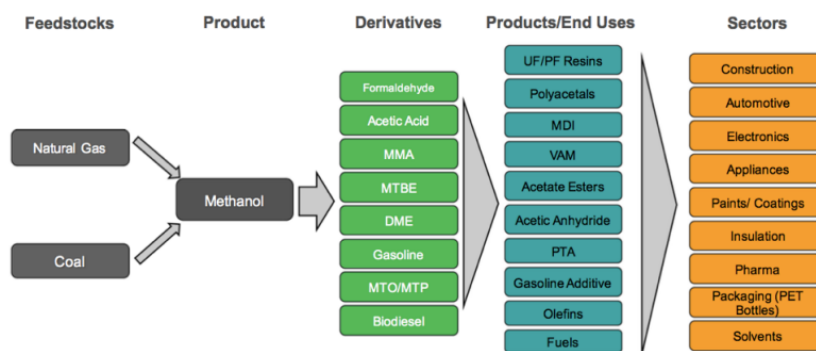
### ۲-۱. زنجیره ارزش گاز طبیعی و جایگاه متانول

گاز طبیعی ترکیبی از هیدروکربن‌ها است که عمدتاً شامل عناصر سبک نظیر متان و اتان می‌شود؛ این دو ترکیب در شرایط جوی به صورت گاز باقی می‌مانند. این مخلوط ممکن است حاوی هیدروکربن‌های سنگین‌تری همچون پروپان، بوتان، پنتان و هگزان نیز باشد. در مخازن گاز طبیعی، حتی هیدروکربن‌های سنگین‌تر به دلیل فشار بالای مخزن معمولاً در حالت گازی قرار دارند. با این حال، در سطح زمین و تحت فشار اتمسفریک، این ترکیبات اغلب به صورت مایع درمی‌آیند و به عنوان مایعات گاز طبیعی<sup>۱</sup> (NGLs) استخراج می‌شوند. پس از جداسازی از جریان گاز، این مایعات می‌توانند به اجزای مختلفی تفکیک شوند؛ از میعانات سنگین نظیر هگزان‌ها، پنتان‌ها و بوتان‌ها گرفته تا اتان و گاز مایع<sup>۲</sup> (LPG) که عمدتاً از بوتان و پروپان تشکیل شده است. با این حال، بخش عمده‌ای از گاز طبیعی - بیش از ۹۰ درصد آن - را متان تشکیل می‌دهد. متان پس از فرایند پالایش، به عنوان سوخت در مصارف مختلف قابل استفاده است. این گاز علاوه بر نقش کلیدی در تأمین سوخت خانگی و صنعتی، در تزریق به میادین نفتی و همچنین به عنوان خوراک در صنایع پتروشیمی کاربرد فراوانی دارد. زنجیره ارزش گاز متان شامل محصولاتی همچون متانول، آمونیاک، اوره و سایر ترکیبات است. تولید این محصولات زمینه‌ساز رشد صنایع پایین‌دستی و راهبردی مانند کشاورزی، ساختمان، خودروسازی، نساجی، پزشکی و لوازم خانگی می‌شود. در این میان، شرایط بین‌المللی و سیاست‌های صنعتی کشور تا کنون باعث توسعه نامتوازن صنعت پتروشیمی شده است. آنچه در حال حاضر در این صنعت مشاهده می‌شود، تمرکز شدید بر محصولات پتروشیمیایی مبتنی بر خوراک گازی است، در حالی که توسعه متوازن و همه‌جانبه این صنعت در بسیاری از ابعاد نادیده گرفته شده است. در این راستا، توسعه بی‌رویه واحدهای تولید متانول در سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های اساسی صنعت پتروشیمی کشور تبدیل شده است. تا پایان برنامه ششم توسعه (سال ۱۴۰۱)، ظرفیت تولید متانول در ایران به حدود ۱۵/۷ میلیون تن رسیده بود. با اجرای طرح‌های جدید مبتنی بر متانول، پیش‌بینی می‌شود تا پایان برنامه هفتم توسعه، ۱۶/۳ میلیون تن دیگر به این ظرفیت افزوده شود. همچنین، برآورد می‌شود تا پایان برنامه هشتم (سال ۱۴۱۱)، ۸/۳ میلیون تن دیگر نیز به ظرفیت تولید کشور اضافه شود. بر این اساس، مجموع ظرفیت پیش‌بینی شده تا سال ۱۴۱۱، شامل طرح‌هایی با محصول نهایی متانول و نیز طرح‌هایی که متانول را به عنوان محصول میانی استفاده می‌کنند، بیش از ۴۰/۲۹۲ میلیون تن خواهد بود [۱]. شواهد نشان می‌دهد تا کنون توسعه زنجیره پایین‌دستی متانول در کشور محقق نشده و بخش عمده متانول تولیدی، همچنان به صورت خام، عمدتاً به مقصد چین صادر می‌شود. زنجیره گاز طبیعی از مسیر تولید محصول متانول به عنوان محور این پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است. در خصوص توسعه زنجیره ارزش، مصرف متانول بسیاری از محصولات زنجیره ارزش همانند اسید استیک، پلی‌استال و فرمالدهید نسبت به ابعاد تولید کشور بسیار پایین است؛ لذا پروژه‌های کلان‌تری همچون MTP/MTO می‌تواند پاسخ مناسب‌تری به عرضه روزافزون متانول کشور باشد.

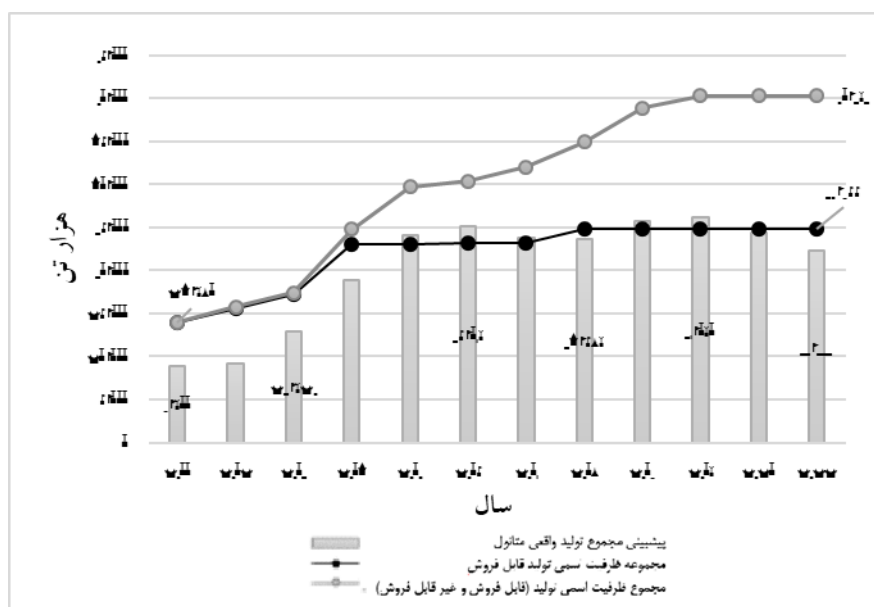
با این وجود، طرح‌های در دست اجرای متانولی که با مجوزهایی نظیر MTO/GTO و MTP<sup>+</sup>/GTP<sup>+</sup> آغاز شده‌اند در عمل پیشرفت چندانی نداشته‌اند [۲]. در کنار رشد ظرفیت تولید، مسئله تقاضای پایدار و قابل اتکا برای این میزان تولید بالقوه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده، تا سال ۱۴۰۲ از مجموع ظرفیت اسمی ۱۷/۴ میلیون تن، به همین میزان امکان فروش صادراتی وجود داشته است. با بهره‌برداری از پروژه‌های جدید، این ظرفیت اسمی به بیش از ۴۰/۲ میلیون تن خواهد رسید؛ در حالی که ظرفیت قابل فروش، تا پایان سال ۱۴۱۱ تقریباً ثابت مانده و حدود ۲۵ میلیون تن باقی خواهد ماند.

1. Natural Gas Liquids (NGL)

2. Liquefied Petroleum Gas (LPG)



شکل ۱. زنجیره ارزش متانول

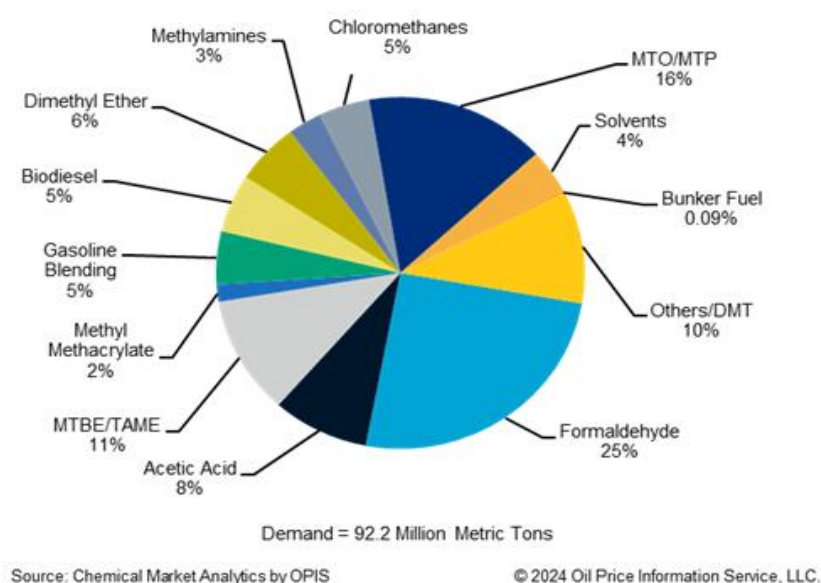


شکل ۲. پیش‌بینی تولید و ظرفیت اسمی قابل فروش متانول کشور تا پایان برنامه هشتم توسعه

ظرفیت بالای تولید متانول کشور از یک سو و انحصار بازار تقاضای متانول صادراتی ایران به چین از سوی دیگر، ریسک‌های قیمتی و بازار را پیش‌روی فعالان این صنعت قرار داده و اقتصاد پروژه‌ها را با مسائل جدی روبه‌رو کرده است. در کنار توسعه بازارهای عرضه متانول، راهکار پیش رو برای خروج از بحران مازاد متانول تولیدی کشور، توسعه زنجیره ارزش متانول است. لذا، با توجه به اهمیت مقوله ارزش‌آفرینی از منابع هیدروکربوری و صیانت از ذخایر ملی و با مد نظر قرار دادن چالش‌ها و تنگناهای پیش روی صنعت، این پژوهش بر توسعه و بهبود زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی و به طور خاص زنجیره متانول از مسیر فرایند MTO معطوف شده است.

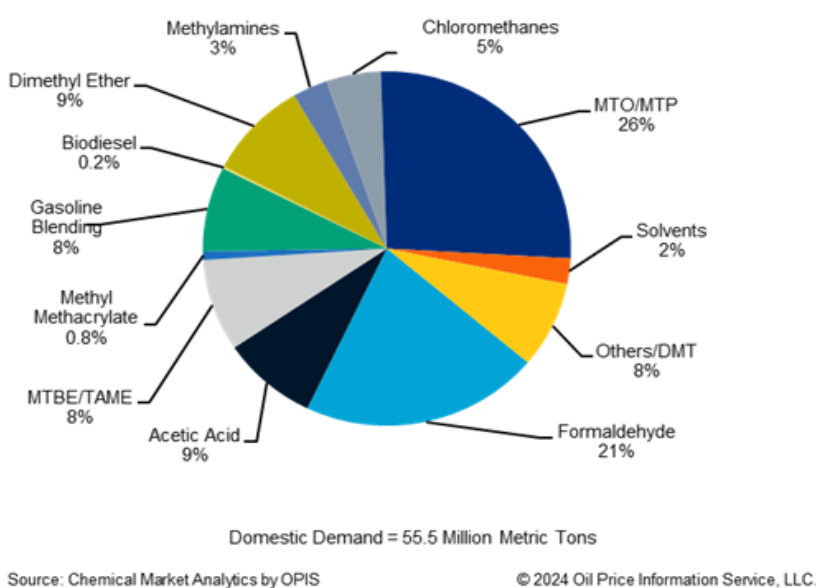
## ۲-۲. رویکرد تبدیل متانول به الفین‌ها (بررسی فناوری MTO)

در دهه‌های اخیر، تولید گسترده محصولات الفینی در کشور چین به افزایش واردات فرآورده‌های نفتی به این کشور انجامید. در واکنش به این روند، راهبرد کلان چین مبتنی بر کاهش وابستگی به واردات نفت، ارتقای امنیت انرژی ملی و بهره‌برداری از منابع غنی زغال‌سنگ داخلی، شکل گرفت. در این چارچوب، طی یک دهه گذشته، مؤسسات علمی و دانشگاهی این کشور تلاش‌های گسترده‌ای را برای جایگزینی زغال‌سنگ به جای مشتقات نفتی در فرایند تولید الفین‌ها آغاز کرده‌اند. نتیجه این سیاست، توسعه و تجاری‌سازی فناوری‌های MTO (تبدیل متانول به الفین) و CTO (تبدیل زغال‌سنگ به الفین) بوده است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در سال ۲۰۲۳ بیش از ۱۶ درصد از متانول تولیدی جهان در واحدهای MTO/MTP به مصرف رسیده است.



شکل ۳. مصرف متانول جهان بر اساس مصرف‌کنندگان نهایی [۳۲]

مطابق شکل ۴، در کشور چین به عنوان بزرگ‌ترین متقاضی متانول، از مجموع ۵۵ میلیون تن تقاضای محلی، حدود ۱۴/۵ میلیون تن، یعنی حدود ۲۶ درصد تقاضای متانول به واحدهای MTO/MTP اختصاص یافته است.

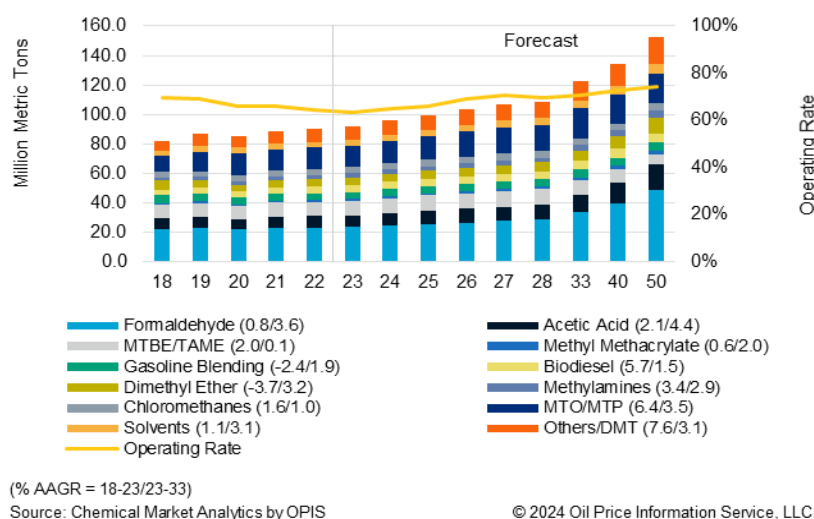


شکل ۴. مصرف متانول چین بر اساس مصرف‌کنندگان نهایی [۳۲]

این در حالی است که بیش از ۷۴ درصد از کل متانول مصرفی در چین از زغال سنگ تولید می‌شود. در این روند، چندین نهاد پیشرو چینی، از جمله مؤسسه فیزیک و شیمی دالیان<sup>۱</sup> وابسته به آکادمی علوم چین، شرکت سینوپک<sup>۲</sup>، و دانشگاه چینهوا<sup>۳</sup> نقش محوری در توسعه فناوری‌های MTO ایفا کرده‌اند. با این وجود، به نظر می‌رسد شرکت اگزون موبیل<sup>۴</sup> آمریکا، بزرگ‌ترین دارنده مالکیت فکری در زمینه فناوری‌های تبدیل متانول به الفین باشد.

1. Dalian Institute of Chemical Physics  
 2. (Sinopec)  
 3. Tsinghua University  
 4. ExxonMobil

سایر شرکت‌های دارای اختراعات ثبت‌شده در این حوزه شامل UOP<sup>۱</sup> مستقر در ایالات متحده و لورگی<sup>۲</sup> مستقر در آلمان هستند. اگرچه سرمایه‌گذاری در بخش MTO در کشورهای مختلف جهان در حال گسترش است، اما همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، نرخ رشد MTO/MTP از ۶/۴ درصد در بازه ۲۰۱۸-۲۰۲۳ به ۳/۵ درصد در بازه ۲۰۲۳-۲۰۳۳ کاهش می‌یابد و توسعه قابل توجه این فناوری در خارج از چین طی دهه آینده چندان محتمل به نظر نمی‌رسد. با این حال، مناطقی همچون جنوب شرق آسیا (از جمله مالزی و اندونزی)، شبه‌قاره هند، آمریکای شمالی، و به‌ویژه منطقه خاورمیانه، از جمله ایران، به عنوان گزینه‌های بالقوه برای استقرار واحدهای MTO مطرح هستند؛ هرچند در بسیاری از این موارد، این واحدها عمدتاً به عنوان زنجیره‌های پایین‌دستی پروژه‌های GTO (گاز به متانول) عمل می‌کنند.



شکل ۵. پیش‌بینی تقاضای جهانی متانول تا افق ۲۰۵۰ [۳۲]

در ادامه تکنولوژی‌های مطرح در MTO مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

### ❖ تکنولوژی DMTO

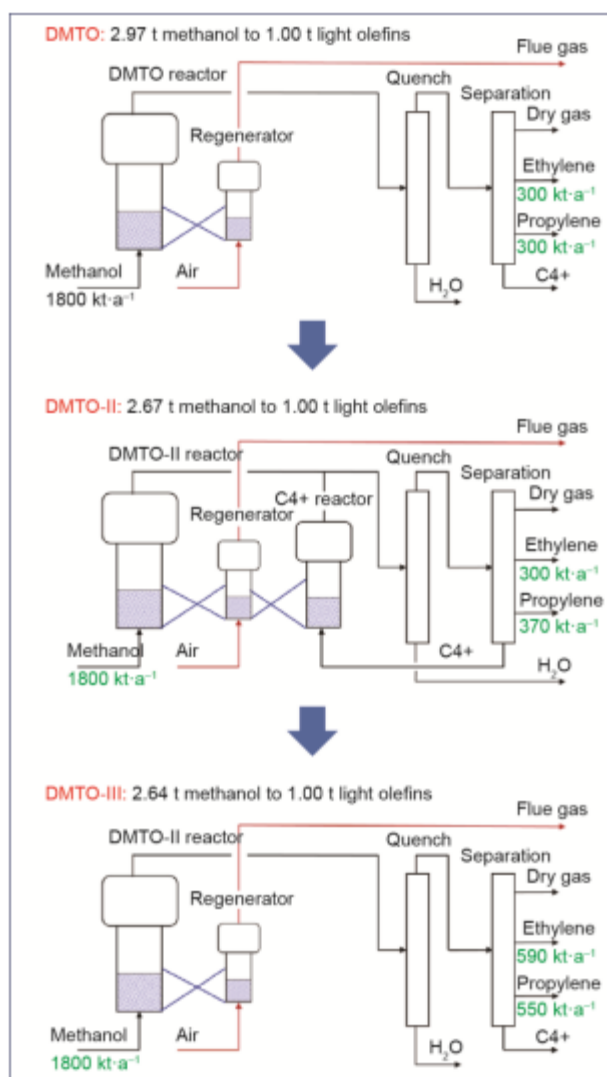
در کشور چین، فناوری‌های تجاری و نزدیک به تجاری متعددی برای صدور مجوز فرایند MTO توسعه یافته است. از مهم‌ترین این فناوری‌ها می‌توان به DMTO-I، DMTO، DMTO-II ارتقا یافته یا (DMTO-II) و DMTO-III اشاره کرد که همگی توسط مؤسسه فیزیک و شیمی دالیان وابسته به آکادمی علوم چین (DICP) توسعه یافته‌اند. تا کنون این فناوری در دو نسخه DMTO-I و DMTO-II به مرحله تجاری‌سازی رسیده است. در طراحی مبتنی بر فناوری DMTO-III، میزان مصرف متانول برای تولید یک تن اتیلن و پروپیلن، بدون بازیافت محصولات جانبی  $C_4^+$ ، به حدود ۲/۶ تا ۲/۷ تن کاهش یافته است. همچنین، نرخ خوراک متانول برای یک راکتور بستر سیال با قطر حدود ۱۱ متر در فاز متراکم می‌تواند تا ۳ میلیون تن در سال افزایش یابد؛ به این معنا که یک واحد DMTO-III قادر خواهد بود سالانه حدود یک میلیون و یکصد و پنجاه هزار تن الفین سبک را بدون افزایش هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (CAPEX) تولید کند. در سال ۲۰۱۹، تیم آکادمی علوم چین آزمایش‌های مربوط به این فناوری را روی یک واحد آزمایشی با ظرفیت سالانه ۱۰۰۰ تن به پایان رساند. تا پایان سال ۲۰۲۰، مجوز ساخت پنج واحد تجاری مبتنی بر فناوری DMTO-III صادر شده، اما تا کنون هیچ کارخانه‌ای با این فناوری به مرحله بهره‌برداری نرسیده است. فرایند DMTO-II اساساً مشابه فرایند UOP بوده و همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، فرایند DMTO-II درواقع تجمع DMTO-I با<sup>۳</sup>

1. Universal Oil Products (UOP)

2. Lurgi

3. Olefins Conversion Technology

OCT است. فناوری DMTO-II DICP، دارای تمام ویژگی‌های فناوری DMTO-I است، اما به منظور کاهش محصولات جانبی در طراحی این فرایند از یک کاتالیست اختصاصی دو عملکردی D803C-II01 استفاده شده که می‌تواند هم واکنش متانول به الفین را کاتالیز کرده و هم  $C_4^+$  در جریان محصولات جانبی را کاتالیز کند. فناوری Lummus Olefins Recovery و فناوری Olefins Conversion Technology (OCT) خروجی راکتور متانول به الفین را گرفته و آن را برای تولید محصولات درجه پلیمری اتیلن و پروپیلن و مخلوط  $C_4$  استفاده می‌کند. بوتادین در مخلوط  $C_4$  هیدروژن‌دار شده و به همراه سایر محصولات جانبی  $C_4$  (و اندکی اتیلن تولید شده) در واحد تبدیل الفین (OCT) به پروپیلن گرید پلیمری تبدیل می‌شود. به دلیل قابلیت ریکاوری بیشتر اتیلن و پروپیلن با صرف انرژی کمتر، فرایند ریکاوری Lummus DMTO در بسیاری از پروژه‌های تجاری DMTO در چین اجرا شده است [۳].



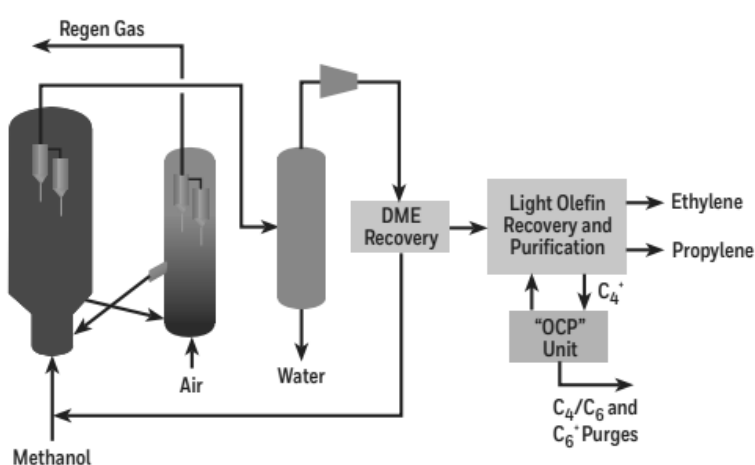
شکل ۶. نسل‌های سه گانه فرایند DMTO [۳]

### ❖ تکنولوژی UOP

هدف اصلی فرایند UOP MTO، تولید پروپیلن و اتیلن با حداقل تولید محصولات سنگین‌تر از  $C_5$  است. این فرایند بر پایه تجربیات گسترده شرکت UOP در زمینه فرایند FCC<sup>۱</sup> نفت توسعه یافته است. در سال ۱۹۹۲، شرکت UOP همکاری با شرکت

1. Fluid Catalytic Cracking (FCC)

Norsk Hydro را آغاز کرد و در سال ۱۹۹۵، لیسانس اختصاصی فرایند UOP/Hydro MTO را به بازار ارائه داد. گام بعدی برای UOP/Hydro MTO، تجاری‌سازی این فناوری بود که با راه‌اندازی یک واحد نیمه‌تجاری کاملاً یکپارچه در بلژیک در سال ۲۰۰۹ محقق شد. این واحد دمو، شامل یک فرایند کامل MTO با بخش‌های خالص‌سازی و بازیابی محصولات، به همراه یک واحد شکست الفینی (OCP) به منظور حداکثرسازی بازدهی اتیلن و پروپیلن بود. فرایند UOP MTO در چندین پروژه تجاری MTO در چین مورد استفاده قرار گرفته است. در این فرایند از کوپل راکتور - احیاکننده استفاده شده، پس از آگیری، محصول میانی دی‌متیل‌اتر (DME) تولید شده وارد برج جداسازی شده، محصولات اصلی جدا شده و جریان برگشتی پس از طی فرایند کراکینگ و جداسازی به برج باز می‌گردد. استفاده از طراحی راکتور بستر سیال در کنار فشار عملیاتی بالاتر، به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش چشمگیر ظرفیت طراحی تک‌مرحله‌ای منجر شده است. نسبت تولید اتیلن به پروپیلن در این فناوری، بسته به شرایط عملیاتی راکتور، در بازه ۰/۷۵ تا ۱/۵ متغیر است، به نحوی که دمای بالاتر راکتور به افزایش تولید اتیلن منجر می‌شود [۴]. شکل ۷ چرخه فرایندی فناوری UOP را نشان می‌دهد.



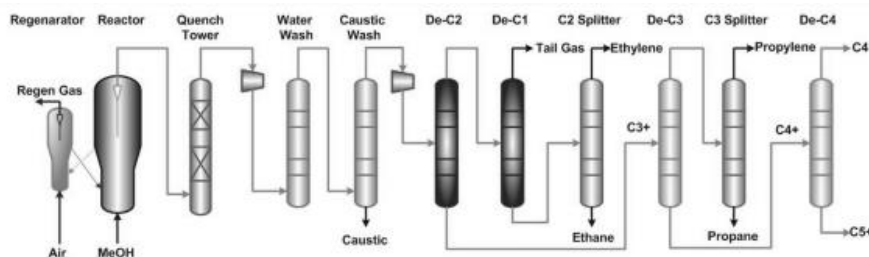
شکل ۷. دیاگرام فرایندی UOP MTO [۴]

### ❖ تکنولوژی SMTO

فناوری S-MTO که به صورت انحصاری توسط شرکت ساینوپک (SINOPEC) توسعه یافته است، از زغال‌سنگ یا گاز طبیعی به عنوان ماده اولیه استفاده می‌کند و از طریق متانول، الفین‌های سبک نظیر اتیلن و پروپیلن (در گرید پلیمری) تولید می‌کند. این فناوری را می‌توان در فرایندهای تبدیل زغال‌سنگ یا گاز به الفین و همچنین، در بهینه‌سازی واحدهای کراکر اتیلن به کار برد. فرایند S-MTO شامل دو بخش اصلی است:

- بخش تبدیل متانول
- بخش بازیابی الفین‌های سبک

در این فرایند، خوراک متانول گرم‌شده در یک راکتور بستر سیال و در حضور کاتالیست ویژه SMTO به محصولات مورد نظر تبدیل می‌شود. گاز خروجی از راکتور، پس از شست‌وشو و سردسازی برای حذف ذرات ریز کاتالیست و بازیابی حرارت، به واحدهای بعدی هدایت می‌شود. کاتالیست غیرفعال‌شده در بخش بازیابی، احیا و دوباره به چرخه باز می‌گردد. گاز محصول فشرده‌شده، ابتدا در برج شست‌وشو به منظور حذف ترکیبات اکسیژنه و اسیدی تصفیه شده، سپس خشک و به برج جداسازی اتان (de-ethanizer) هدایت می‌شود. گاز بالاسری این برج به برج جداسازی متان (de-methanizer) و جریان پایین به برج جداسازی پروپان (de-propanizer) فرستاده می‌شود. گاز بالاسری de-methanizer به سیستم سوخت وارد شده و بخش مایع آن برای جداسازی اتیلن و اتان به برج C2 ارسال می‌شود. گاز بالاسری de-propanizer نیز به برج C3 فرستاده می‌شود تا پروپیلن و پروپان از هم جدا شوند. مایع پایین این برج نیز برای جداسازی ترکیبات C4 و C5+ به برج de-butanizer منتقل می‌شود [۵].



شکل ۸. دیاگرام فرایندی S-MTO [۵]

### ۳. پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، توجه به زنجیره ارزش گاز طبیعی و محصولات مشتق از آن، به‌ویژه متانول و الفین‌ها، در ادبیات پژوهشی داخلی و بین‌المللی افزایش یافته است. این مطالعات عمدتاً با هدف کاهش خام‌فروشی، افزایش ارزش افزوده، و بهبود بهره‌وری اقتصادی در صنعت پتروشیمی کشور صورت گرفته‌اند. به عنوان مثال، سیفی و صادقی شاهدانی [۶] در مقاله‌ای به تحلیل اقتصادی تکمیل زنجیره ارزش گاز طبیعی پرداخته و اثر احداث واحدهای تبدیل متانول به الفین و پلی‌الفین را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد احداث این واحدها از منظر اقتصادی برای کشور در افق ده‌ساله آینده به‌صرفه و دارای توجیه فنی و مالی است. این مسیر، از جمله فرصت‌های مهم برای خروج از خام‌فروشی متانول محسوب می‌شود که با ارتقای امنیت و پایداری صنعت پتروشیمی کشور، می‌تواند دغدغه‌های ناشی از مازاد عرضه و صادرات کم‌بازده متانول را برطرف کند. موسایی و همکاران [۷] مدلی برای انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی از بین چهار گزینه گاز طبیعی فشرده<sup>۱</sup>، گاز طبیعی مایع<sup>۲</sup>، دی‌متیل‌اتر<sup>۳</sup> و گاز به مایع<sup>۴</sup> طراحی کردند. از طریق تکنیک دلفی و به کمک نظرات خبرگان، شاخص‌های اثرگذار بر انتخاب بهینه سوخت غربالگری و رتبه‌بندی شدند و به منظور تبدیل رتبه به وزن از تکنیک معتبر مرکز ثقل استفاده شد. در نهایت با داشتن اوزان شاخص‌ها، از تکنیک جدید «کوکازو» بهره گرفته شد تا سوخت برتر مشخص شود. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بهترین گزینه برای کشور گاز طبیعی مایع است و در رتبه بعدی، گاز طبیعی فشرده قرار گرفت. دستخوان [۸] در پژوهشی به ارزیابی و تحلیل فنی، اقتصادی و مالی سه فرایند پیشنهادی برای تکمیل زنجیره ارزش گاز طبیعی شامل تولید پروپیلن از متانول (MTP)، تولید الفین از متانول (MTO) و تولید الفین از گاز طبیعی (GTO) پرداخته است. وی در ادامه با بهره‌گیری از روش تحلیل سناریو و شبیه‌سازی مونت کارلو، سناریوهای مختلف قیمتی برای مواد اولیه و محصولات در فناوری‌های یادشده را مورد بررسی قرار داده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد طرح تولید متانول در صورتی که قیمت سی‌اف‌آر متانول بالاتر از ۲۶۰ تا ۲۸۰ دلار باشد - با فرض هزینه حمل‌ونقل ۶۰ دلار به ازای هر تن به مقصد چین - دارای صرفه اقتصادی خواهد بود. همچنین، در شرایطی که اختلاف قیمت محصولات پایین‌دستی نسبت به نرخ متانول افزایش یابد، اجرای طرح‌های پایین‌دستی حتی در قیمت‌های بالاتر از ۴۰۰ دلار برای هر تن متانول نیز از توجیه اقتصادی برخوردار خواهد بود. دانشی و دستخوان در مقاله‌ای ضمن تحلیل زنجیره ارزش متانول به ارائه راهکاری دوگانه برای حل مسائل مازاد متانول و ناترازی سوخت در کشور پرداخته‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد اگرچه هزینه سرمایه‌گذاری این طرح نسبت به پالایشگاه‌های نفتی و طرح‌های زنجیره ارزش متانول مانند MTO/MTP پایین‌تر است، ولی با قیمت‌های فعلی متانول و سبد محصولات، این طرح از نتایج اقتصادی جذابی برخوردار نیست. آنالیز حساسیت اقتصاد طرح MTG بیانگر این موضوع است که در روندهای افزایشی قیمت نفت، اقتصاد این طرح بهبود یافته و می‌توان MTG را به عنوان یکی از گزینه‌های موجود اقتصادی برای رفع معضل اقتصاد ضعیف پروژه‌های متانولی در ایران مد نظر قرار داد. در عین حال، با توجه به ارائه تسهیلاتی در خصوص

1. Compressed Natural Gas (CNG)
2. Liquefied Natural Gas (LNG)
3. Dimethyl- Ether (DME)
4. Gas- To- Liquid (GTL)

تخفیف خوراک پلکانی به این پروژه‌ها و نیز تسهیلات مالی متناسب با پیشرفت پروژه، سرمایه‌گذاری در یک طرح MTG در ایران می‌تواند توجیه‌پذیر باشد.

مانالال<sup>۱</sup> و همکاران [۹] در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی تولید اتیلن مبتنی بر کربن جایگزین در یک خوشه پتروشیمی»، به غربالگری فناوری و ارزیابی تأثیر آن بر زنجیره ارزش اتیلن پرداخته‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد با جایگزینی مواد اولیه در تولید اتیلن از منابع کربن جایگزین (ACS) مانند CO<sub>2</sub>، زیست‌توده و زباله، فرایند تولید می‌تواند به طور قابل توجهی تغییر کند و اثرات مربوط به این تغییرات در یک خوشه صنعتی بسیار به هم پیوسته می‌تواند اثرات آشکاری به دلیل وابستگی متقابل سیستم ایجاد کند. چن<sup>۲</sup> و همکاران [۱۰] در مقاله خود تحت عنوان «استراتژی بحث‌برانگیز سوخت متانول در چین و ارزیابی آن» یکی از کاربردهای جدید متانول به عنوان سوخت را بررسی کرده‌اند. پژوهشگران یادشده در این تحقیق به توسعه‌های سوختی متانول، برنامه‌ریزی برای دستیابی به این کاربرد و استفاده از آن در کشور چین توجه کرده‌اند. با توجه به موضوعات آلودگی محیط زیستی و سوخت‌های فسیلی به مسئله نگریده‌اند و کاربرد متانول به عنوان سوخت جایگزین بنزین را انقلابی در کاهش گازهای گلخانه‌ای مطرح کرده‌اند. گوگاتی<sup>۳</sup> [۱۱] در مقاله خود تحت عنوان «فناوری پروسه متانول به الفین: آمار موجود و چشم‌انداز آینده» ابتدا به کشف و توسعه این فرایند پرداخته و سپس به تجاری‌سازی این فرایند توسط شرکت‌های فعال این حوزه متمرکز شده و در نتیجه، شرکت هانیول یو او پی، به عنوان شرکت فعال‌تر این واحدها در مقیاس بزرگ‌تر در کشور چین مطرح کرده است؛ در حالی که حرکت به سمت واحدهای تبدیل متانول به الفین را در سایر مناطق جهان از جمله خلیج فارس، ایالات متحده و آسیا و اقیانوسیه را کند برشمرده است. در مقاله دای لانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۱۲] به بررسی توسعه زنجیره ارزش گاز طبیعی و استحصال اتان در کشور ویتنام پرداخته شده و فرآوری گاز اتان برای تولید محصولات پتروشیمی از منظر بازاریابی، فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد تولید پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به دلیل برخورداری از بازده اقتصادی مطلوب، بهره‌گیری از فناوری‌های شناخته‌شده، وجود تقاضای زیاد و کمبود عرضه در بازار، مناسب‌ترین گزینه توسعه‌ای به شمار می‌رود. مدرانو گارسپا<sup>۵</sup> و همکاران [۱۳] در مقاله‌ای با عنوان «رقابت اقتصادی و زیست‌محیطی فناوری‌های مبتنی بر اتان برای سنتز وینیل کلرید»، به بررسی پتانسیل زیست‌محیطی و اقتصادی فناوری‌های کلرزی اتان پرداخته‌اند. سنتز مونومر وینیل کلرید (VCM برای تولید PVC)، در درجه اول به اتیلن مشتق‌شده از نفت متکی است که به هزینه‌های بالا و آلودگی بالای کربنی منجر می‌شود. اتان مشتق‌شده از گاز طبیعی در سنتز VCM به عنوان خوراک بهینه برای کاهش انتشار کربن و صرفه‌جویی در هزینه‌ها در نظر گرفته شده است. همه مسیرها تحت دو سناریو زمانی حال و آینده نگر (۲۰۵۰) ارزیابی شدند. با ترکیب شبیه‌سازی فرایند و ارزیابی چرخه عمر (LCA)، این نتیجه‌گیری حاصل شد که فناوری‌های کلرزی اتان کاتالیزوری می‌تواند ۳۲ درصد کاهش هزینه تولید در وضعیت توسعه فعلی و ۵۶ درصد با در نظر گرفتن پتانسیل کامل آن‌ها در آینده را به همراه داشته باشند. هر چند از نظر زیست‌محیطی در سناریوی فعلی این تکنولوژی‌ها مضر هستند، ولی سهم کربن سنتز VCM را تا ۲۶ درصد در حالت فعلی و تا ۵۸ درصد در آینده کاهش می‌دهد. دوتا<sup>۶</sup> و همکاران [۱۳] در پژوهشی به بررسی فنی اقتصادی در مورد مایعات گاز طبیعی و متانول به عنوان مواد اولیه بالقوه برای تولید الفین پرداخته‌اند. تغییر به سمت مواد اولیه غیر متعارف در آینده، NGL و متانول را به رقابای احتمالی به عنوان مواد خام در بخش شیمیایی تبدیل می‌کند. تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد NTO سودآورتر از MTO است. مسیر NTO نه تنها منجر به ۵۵ درصد ارزش خالص فعلی بالاتر می‌شود، بلکه باعث کاهش قیمت تمام‌شده اتیلن در مقایسه با MTO می‌شود. بنابراین پژوهش، از منظر اقتصادی، به نظر می‌رسد NGL ماده اولیه جذاب‌تری برای تولید الفین‌ها نسبت به متانول باشد. استاهل و همکاران [۱۴] در پژوهشی، روشی کم‌فشار برای تبدیل مستقیم اولفین‌ها به الکل‌های زنجیره‌بلند با استفاده از متانول ارائه کردند. این فرایند از

1. James Tonny Manalal

2. Chen Hao

3. Gogate

4. Nguyen Dai Long

5. Medrano-García

6. Arnab Dutta

یک توالی واکنش شامل تبدیل متانول به گاز سنتز، هیدروفرورمیلایسون و در نهایت احیای آلدهید به الکل تشکیل شده است. سیستم کاتالیزوری ترکیبی مورد استفاده، امکان انجام واکنش در شرایط ملایم و بدون نیاز به گازهای فشرده یا تجهیزات فشار بالا را فراهم می‌کند. سهیلی و نخعی‌پور [۱۵] با استفاده از محاسبات DFT پایداری و فعالیت گونه‌های زیرکونیوم در چارچوب SAPO-18 برای بهبود عملکرد کاتالیست‌های فرآیند متانول به اولفین (MTO) را بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد قرارگیری  $Zr^{3+}$  موجب افزایش پایداری و گزینش‌پذیری بالاتر به سمت تولید پروپیلن می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد بهینه‌سازی نحوه ورود زیرکونیوم به ساختار کاتالیست می‌تواند موجب بهبود قابل توجه در عملکرد فرایند MTO شود. همان‌گونه که اشاره شد، این پژوهش با تمرکز بر بهره‌برداری کامل از ظرفیت یک واحد متانول مقیاس جهانی (یک میلیون و ششصد و پنجاه هزار تن در سال) از طریق توسعه زنجیره ارزش به محصولات الفینی، برای نخستین بار سه گزینه عملیاتی بر مبنای فرایند MTO را به صورت تلفیقی و مقایسه‌ای بررسی می‌کند. نوآوری این مطالعه در تحلیل سناریوهای مختلف توسعه زنجیره، با لحاظ مشخصات فنی، الزامات سرمایه‌گذاری، و وضعیت بازار محصولات نهایی، به‌ویژه در شرایط منطقه‌ای ایران و با تأکید بر رفع چالش خام‌فروشی متانول است. همچنین، این مقاله با اتکا به داده‌های به‌روز از عملکرد فناوری‌های MTO پیشرفته، چارچوبی کاربردی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران ارائه می‌دهد.

#### ۴. روش پژوهش

فرایند تصمیم‌گیری در پروژه‌های سرمایه‌گذاری مستلزم تعریف دقیق اهداف، شناسایی گزینه‌های مختلف، ارزیابی امکان‌پذیری هر گزینه، تحلیل پیامدهای ناشی از اجرای آن‌ها و در نهایت انتخاب راه‌حل بهینه است [۱۶]. کیفیت تصمیم‌گیری در پروژه‌های کلان پتروشیمی، نقش محوری در موفقیت یا ناکامی آن‌ها ایفا می‌کند؛ چراکه کیفیت برنامه‌ریزی، کارآمدی راهبردها و اثربخشی نتایج همگی تابع مستقیم تصمیماتی‌اند که در مراحل مطالعات مفهومی و پایه اتخاذ می‌شوند. در این پژوهش، برای دستیابی به راه‌حلی برای خلق حداکثری ارزش افزوده، از رویکردی توصیفی - تحلیلی بهره گرفته شده است. در مرحله نخست، ادبیات مرتبط با خام‌فروشی، فرآورده‌فروشی و تکمیل زنجیره ارزش به صورت کتابخانه‌ای گردآوری شد و با تحلیل گزارش‌های تخصصی داخلی و بین‌المللی، چارچوب نظری و تحلیلی اولیه شکل گرفت. در ادامه، وضعیت صنعت متانول کشور و امکان‌سنجی فنی و اقتصادی فناوری‌های MTO (تبدیل متانول به الفین‌ها) مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مورد استفاده شامل ظرفیت‌های طراحی، قیمت خوراک و محصولات، هزینه‌های سرمایه‌گذاری (CAPEX) و عملیاتی (OPEX) بوده و از منابع معتبر داخلی و بین‌المللی استخراج شده‌اند. همچنین، اطلاعات محلی نظیر متوسط هزینه‌های سرمایه‌گذاری در ایران، نرخ بهره و مدل‌های رایج قراردادهای کارمزدی در تحلیل لحاظ شده‌اند. مرحله اصلی پژوهش شامل ارزیابی اقتصادی سه سناریو است: احداث واحد MTO با تجهیزات نو، احداث با تجهیزات دست‌دوم، و تولید کارمزدی الفین‌ها از متانول. برای تحلیل اقتصادی این سناریوها، یک مدل مالی مبتنی بر مفروضاتی همچون نرخ تنزیل ۱۵ درصد، دوره ساخت ۳/۵ سال، دوره بهره‌برداری ۱۵ ساله، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی و نرخ‌های واقعی فروش تنظیم شد. این مفروضات مبتنی بر پروژه‌های واقعی و مثال‌های عینی در کشور لحاظ شده‌اند؛ به عنوان مثال، در خصوص نرخ تنزیل، طبیعی است که متناسب با شرایط هر صنعت و بنگاه اقتصادی، این نرخ می‌تواند ارقام متفاوتی داشته باشد. بر این اساس، برگرفته از مطالبات اقتصادی هلدینگ‌های بزرگ پتروشیمی کشور از یک پروژه اقتصادی، نرخ تنزیل ۱۵ درصد ارزی به عنوان یک نرخ پذیرفته شده و قابل قبول برای یک پروژه متعارف پتروشیمی شناخته می‌شود. در خصوص هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی نیز داده‌های مطالعات امکان‌سنجی پروژه‌های در حال ساخت و طرح‌های تعریف شده پتروشیمی و همچنین، اعلام‌های قیمت و هزینه از شرکت‌های صاحب تکنولوژی و فعال در کشور چین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ارزیابی اقتصادی با هدف تخصیص بهینه منابع در شرایط محدودیت مالی انجام شده و امکان‌سنجی تداوم یا اصلاح پروژه را فراهم می‌سازد. برای تحلیل مالی پروژه‌ها، از دو شاخص رایج ارزش فعلی خالص<sup>۱</sup> (NPV) و نرخ بازده داخلی<sup>۲</sup> (IRR) استفاده شده است. شاخص NPV بیانگر تفاوت میان ارزش فعلی جریان‌های نقدی ورودی و خروجی پروژه بوده و سودآوری

1. Net Present Value (NPV)

2. Internal Rate Of Return (IRR)

اقتصادی طرح را با لحاظ نرخ تنزیل نشان می‌دهد. مقدار مثبت NPV دلالت بر توجیه‌پذیری اقتصادی دارد، در حالی که مقدار منفی آن نشان‌دهنده فقدان صرفه اقتصادی است [۱۷].

$$NPV = \sum_{t=1}^T Ct / (1+r)^t \quad (۱)$$

که در رابطه ۱، Ct معادل خالص جریان‌های نقدی ورودی و خروجی در زمان‌های ۱ تا t و r معادل نرخ تنزیل مورد نظر سرمایه‌گذار است. شاخص نرخ بازدهی داخلی، نرخ تنزیلی است که ارزش فعلی خالص (NPV) تمام جریان‌های نقدی یک پروژه خاص را برابر با صفر می‌کند. برای محاسبه IRR، باید NPV را برابر با صفر قرار داد و برای نرخ تنزیل (r)، آن را حل کرد. هنگامی که NPV یک طرح برابر صفر است، این سرمایه‌گذاری از لحاظ اقتصادی سربه‌سر است، زیرا نه ارزشی ایجاد شده و نه از بین رفته است. بر این اساس، IRR برابر با نرخ بازدهی است که به واسطه آن طرح وارد فضای سوددهی خواهد شد. بنابراین، در صورتی که نرخ بازدهی مورد انتظار سرمایه‌گذار از این نرخ کمتر باشد، طرح دارای شرایط اقتصادی مناسبی خواهد بود. در نهایت، در این بخش، تمامی بررسی‌های قبلی در قالب اعداد و ارقام مالی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. شایان یادآوری است، در این مرحله به کمک یک مدل مالی و اقتصادی میزان حساسیت شاخص‌های اقتصادی طرح نسبت به نرخ کارمزد تبدیل در سناریوی تولید کارمزدی الفین از متانول سنجیده می‌شود؛ تا توجیه‌پذیری اقتصادی طرح به‌درستی بررسی شود. به منظور ارائه شاخص‌های اقتصادی و تحلیل نتایج مبتنی بر آن‌ها با توجه به لزوم انعطاف‌پذیری و پویایی در ابزار، از نرم‌افزار اکسل بهره گرفته شده است.

## ۵. یافته‌های پژوهش

با تحلیل جامع وضعیت زنجیره ارزش گاز طبیعی و متانول و تمرکز خاص بر فرایند MTO، در ادامه، سه گزینه کلیدی برای توسعه زنجیره ارزش از مسیر فرایند MTO، به منظور بهره‌برداری بهینه از ظرفیت یک واحد متانول با تولید سالانه یک میلیون و ششصد و پنجاه هزار تن، بر اساس نتایج و یافته‌های این پژوهش، مورد ارزیابی و بررسی قرار خواهند گرفت. در این راستا، سه گزینه عملیاتی مبتنی بر پیشنهاد‌های واقعی و اجرایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین، به منظور حفظ انسجام و یکپارچگی زنجیره ارزش و تسهیل مقایسه میان گزینه‌های پیشنهادی، تلاش شده است تا واحد MTO در کنار یک پلنت متانولی مورد تحلیل قرار گیرد. از این‌رو، ارزیابی‌ها بر اساس خوراک گازی و در قالب یک واحد یکپارچه (GTO) انجام شده است.

### گزینه اول: احداث واحد MTO

در این گزینه، به موازات احداث یک واحد متانول با استفاده از فناوری شرکت دانمارکی هالدورتاپسوی<sup>۱</sup>، پیشنهاد‌های مرتبط با احداث واحد الفینی از لایسنسور چینی (شرکت دالیان) نیز مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. این پیشنهادها در قالب یک طرح یکپارچه GTO مورد بررسی قرار گرفته‌اند. درخور یادآوری است که برای تولید سالانه ۱۶۵۰ هزار تن متانول به عنوان محصول میانی، حدود ۱/۳ میلیارد نرمال متر مکعب گاز طبیعی به عنوان خوراک واحد متانول مصرف می‌شود. متانول تولیدی به واحد MTO منتقل شده و پس از پردازش، محصولات با ارزشی مانند اتیلن، پروپیلن و  $C_4^+$  به عنوان محصولات نهایی تولید می‌گردند. مشخصات مربوط به پلنت GTO، از جمله میزان سرمایه‌گذاری و حجم محصولات نهایی تولیدی، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات واحد GTO (متانول + MTO)

| پلنت   | تکنولوژی         | سرمایه‌گذاری<br>(میلیون دلار) | محصول   | نوع محصول | تولید<br>(هزار تن در سال) |
|--------|------------------|-------------------------------|---------|-----------|---------------------------|
| متانول | Haldor<br>Topsoe | ۵۳۰                           | متانول  | میانی     | ۱۶۵۰                      |
| MTO    | DMTO-II          | ۵۹۰                           | اتیلن   | نهایی     | ۲۴۸                       |
|        |                  |                               | پروپیلن | نهایی     | ۳۹۷                       |
|        |                  |                               | $C_4^+$ | نهایی     | ۴۷                        |

1. Haldor Topsoe

میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای احداث واحد متانول، طبق محاسبات صورت گرفته، حدود ۵۳۰ میلیون دلار برآورد شده است. همچنین، بر اساس مطالعات امکان‌سنجی، احداث یک واحد تولید الفین از متانول با استفاده از تکنولوژی DMTO-II به سرمایه تقریبی ۵۹۰ میلیون دلار نیاز دارد (Business Plan for MTO, 2024). نتایج ارزیابی اقتصادی طرح احداث واحد متانول به همراه واحد تولید الفین از مسیر فرایند MTO، در جدول ۲ به تفصیل آورده شده است.

جدول ۲. نتایج ارزیابی اقتصادی واحد GTO (متانول + MTO)

|             |                                                                            |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| ۱،۱۲۰       | برآورد سرمایه‌گذاری اولیه طرح (میلیون دلار)                                |
| ۶۹۲         | مجموع تناژ محصول تولیدی (هزارتن)                                           |
| ۵۶۴         | قیمت فروش هر تن اتیلن (دلار/تن)                                            |
| ۵۷۲         | قیمت فروش هر تن پروپیلن (دلار/تن)                                          |
| ۵۶۳         | قیمت فروش هر تن گازمایع (دلار/تن)                                          |
| ۳۹۳         | برآورد مجموع فروش سالیانه FOB (میلیون دلار)                                |
| ۴۳۹         | برآورد هزینه‌های عملیاتی سالیانه (میلیون دلار)                             |
| ۵۵          | تخفیف خوراک (۳۰ درصد)                                                      |
| ۱۰          | برآورد حاشیه سود عملیاتی در دوره شمولیت تخفیف (بدون استهلاک - میلیون دلار) |
| ۰.۱۴        | IRR                                                                        |
| محدوده منفی | نرخ تنزیل                                                                  |
| %۱۵         | NPV (با نرخ تنزیل ۱۵٪) - (میلیون دلار)                                     |
| -۳۷۶        |                                                                            |

بر این اساس و با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، نکات و ملاحظات زیر در خصوص طرح احداث واحد یکپارچه GTO (شامل واحد متانول و MTO) قابل توجه است:

نخست، بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد نرخ بازده داخلی (IRR) این طرح کمتر از نرخ تنزیل ۱۵ درصد بوده و در نتیجه، در شرایط پایه، فاقد توجیه اقتصادی است. دوم، مطابق با تحلیل حساسیت صورت‌گرفته، بهبود شاخص‌های اقتصادی طرح و دستیابی به نرخ بازده بالاتر از ۱۵ درصد، منوط به تحقق یکی از دو شرط کلیدی خواهد بود: فروش محصولات نهایی به قیمتی بیش از ۷۰۰ دلار به‌ازای هر تن، یا تأمین خوراک گاز طبیعی با نرخ حداکثر ۷ سنت به‌ازای هر مترمکعب. سوم، هرگونه کسری در تأمین خوراک گاز، آثار منفی قابل توجهی بر صرفه اقتصادی پروژه به جا خواهد گذاشت و این مسئله باید به طور جدی در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ شود.

### گزینه دوم: خرید و انتقال یک واحد دست دوم MTO در کنار احداث واحد متانول

در سناریوی دوم، راهکار خرید یک واحد کارکرده تبدیل متانول به الفین (MTO) از کشور چین مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین انگیزه‌های ارزیابی این گزینه، کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، تسهیل در فرایند تأمین مالی و بهره‌مندی از دانش فنی و تجربه پیشین بهره‌برداری از این واحد است. بر اساس این سناریو، فرایند شامل خرید، جداسازی، حمل و نصب مجدد یک واحد دست دوم MTO در مجاورت یک واحد جدید متانول است. مشابه سناریوی نخست، این گزینه نیز در قالب یک طرح یکپارچه GTO مورد ارزیابی قرار گرفته است. در یک مجتمع استاندارد متانول، با مصرف حدود ۱/۳ میلیارد نرمال مترمکعب گاز طبیعی به‌عنوان خوراک، سالانه حدود یک میلیون و ششصد و پنجاه هزار تن متانول تولید می‌شود. با توجه به ظرفیت طراحی واحد دست دوم MTO، که معادل ۱۰۸۰۰ هزار تن متانول در سال است [۲۲]، حدود ۱۵۰ هزار تن از متانول مورد نیاز این واحد باید از منابع خارج از مجتمع تأمین شود. مشخصات فنی و اقتصادی پلنت GTO دست دوم در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات واحد GTO دست دوم (متانول+MTO دست دوم)

| پلنت   | تکنولوژی         | میزان سرمایه‌گذاری<br>(میلیون دلار) | محصول                       | نوع<br>محصول | تولید سالانه<br>(هزار تن در سال) |
|--------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------|----------------------------------|
| متانول | Haldor<br>Topsøe | ۵۳۰                                 | متانول                      | میانی        | ۱۶۵۰                             |
| MTO    | DMTO-I           | ۳۰۰                                 | اتیلن                       | نهایی        | ۳۰۹                              |
|        |                  |                                     | پروپیلن                     | نهایی        | ۳۰۱                              |
|        |                  |                                     | C <sub>4</sub> <sup>+</sup> | نهایی        | ۸۴                               |

با توجه به ترکیب محصول تولیدی، تکنولوژی مورد استفاده DMTO-1 باشد. میزان سرمایه‌گذاری لازم برای احداث واحد متانول بر اساس محاسبات صورت گرفته حدود ۵۳۰ میلیون دلار و سرمایه مورد نیاز برای خرید و حمل واحد MTO دست دوم از چین حدود ۲۵۰ میلیون دلار برآورد شده است. حدود ۵۰ میلیون دلار نیز برای هزینه‌های راه‌اندازی مجدد در نظر گرفته شده است (همان). نتایج ارزیابی اقتصادی طرح GTO دست دوم به شرح جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج ارزیابی اقتصادی طرح GTO دست دوم (واحد متانول+MTO دست دوم)

|             |                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------|
| ۸۳۰         | برآورد سرمایه‌گذاری اولیه طرح (میلیون دلار)                 |
| ۶۹۴         | مجموع تناژ محصول تولیدی (هزارتن)                            |
| ۵۶۴         | قیمت فروش هر تن اتیلن (دلار/تن)                             |
| ۵۷۲         | قیمت فروش هر تن پروپیلن (دلار/تن)                           |
| ۵۶۳         | قیمت فروش هر تن هر C <sub>4</sub> (دلار/تن)                 |
| ۳۹۴         | برآورد مجموع فروش سالیانه FOB (میلیون دلار)                 |
| ۰.۱۴        | قیمت خوراک گاز طبیعی (دلار/متر مکعب)                        |
| ۴۸۰         | برآورد هزینه‌های عملیاتی سالیانه (میلیون دلار)              |
| ۰           | تخفیف خوراک (۰ درصد)                                        |
| -۱۰         | برآورد حاشیه سود عملیاتی در دوره شمولیت تخفیف (میلیون دلار) |
| محدوده منفی | IRR                                                         |
| -۲۷۵.۷      | NPV (با نرخ تنزیل ۱۵٪) - (میلیون دلار)                      |

بر پایه تحلیل‌های فنی و اقتصادی صورت‌گرفته، ملاحظات زیر در خصوص گزینه دوم یعنی احداث یک مجتمع GTO مشتمل بر واحد متانول جدید و واحد MTO دست‌دوم از چین، قابل توجه است:

حتی با در نظر گرفتن تخفیف ۳۰ درصدی نرخ خوراک گاز طبیعی به دلیل توسعه زنجیره ارزش، طرح پیشنهادی در مجموع از نرخ بازده داخلی (IRR) منفی برخوردار بوده و لذا به‌تنهایی فاقد جذابیت برای سرمایه‌گذاران خواهد بود. یکی از عوامل مؤثر در این وضعیت، استفاده از فناوری قدیمی‌تر (DMTO-I) در واحد MTO است که به دلیل نرخ تبدیل پایین‌تر متانول به الفین‌ها، اثربخشی اقتصادی طرح را تضعیف می‌کند. همچنین بهره‌برداری از یک واحد دست‌دوم، به طور معمول با هزینه‌های عملیاتی بیشتری نسبت به واحدهای نو همراه است. این افزایش در هزینه‌های جاری، ناشی از استهلاک بالاتر تجهیزات، نیاز به تعمیرات مکرر و بازدهی انرژی پایین‌تر بوده و در مجموع باعث کاهش جذابیت اقتصادی طرح خواهد شد.

### گزینه سوم: تولید کارمزدی الفین از متانول در مجتمع‌های مستقر در چین

در این گزینه، به جای صادرات خام متانول تولیدی از یک واحد متانولی داخلی، راهبردی مبتنی بر افزایش ارزش افزوده در زنجیره محصولات پتروشیمی اتخاذ شده است. بر این اساس، متانول تولیدشده به بنادر چین حمل شده و در اختیار یک مجتمع MTO فعال در این کشور قرار می‌گیرد. مجتمع یادشده با تقبل کلیه هزینه‌های عملیاتی، نسبت به فرآورش متانول و تولید محصولات الفینی نظیر اتیلن و پروپیلن اقدام می‌کند. در ادامه، محصولات تولیدی در محل کارخانه به مالک ایرانی تحویل داده

می‌شود و هزینه‌های مربوط به فرآورش به صورت کارمزدی (حق‌العمل‌کاری) از طریق صدور صورتحساب تسویه می‌شود. شایان یادآوری است که با توجه به استقرار گسترده صنایع پایین‌دستی الفین‌ها در مجاورت مجتمع‌های پتروشیمی چین، هزینه‌های حمل‌ونقل داخلی این محصولات برای مالک ایرانی عملاً حذف شده و در محاسبات لحاظ نشده است. همچنین، با توجه به ظرفیت طراحی شده ۱۹۸۰۰ هزار تنی مجتمع MTO مستقر در چین، حدود ۱۵۰ هزار تن از متانول مورد نیاز این مجتمع، خارج از ظرفیت داخلی تولید مجتمع متانولی طرف قرارداد تأمین خواهد شد. جزئیات مشخصات فنی و شرایط مربوط به تولید کارمزدی در جدول ۵ درج شده است.

جدول ۵. مشخصات فنی و شرایط مربوط به تولید کارمزدی الفین

| پلنت                   | میزان سرمایه‌گذاری<br>(میلیون دلار) | محصول                                                                                                                                                                                                                                    | نوع<br>محصول                                  | تولید سالانه<br>(هزار تن در سال) |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| متانول                 | ۵۳۰                                 | متانول                                                                                                                                                                                                                                   | میانی                                         | ۱۶۵۰                             |
| تولید کارمزدی<br>الفین |                                     | انعقاد یک قرارداد بلندمدت از نوع اجاره یا حق‌العمل‌کاری به منظور فرآورش متانول تولیدی ایران در مجتمع‌های MTO خارجی (نظیر مجتمع‌های مستقر در چین)، و تحویل محصولات الفینی نهایی در محل کارخانه به طرف ایرانی، در ازای پرداخت کارمزد تبدیل | اتیلن ۳۰۹<br>پروپیلن ۳۰۱<br>C <sub>4</sub> ۸۴ |                                  |

بر اساس پیشنهادهای ارائه‌شده و بر مبنای محاسبات صورت‌گرفته، نتایج ارزیابی اقتصادی گزینه سوم، یعنی طرح تولید کارمزدی الفین از متانول، در جدول ۶ ارائه شده است. در این الگو، بدون نیاز به سرمایه‌گذاری مستقیم در احداث واحد MTO، فرایند تبدیل متانول به الفین از طریق قرارداد بلندمدت اجاره/حق‌العمل‌کاری با مجتمع‌های فعال در کشور چین انجام می‌پذیرد. این روش ضمن کاهش چشمگیر ریسک‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری، امکان بهره‌برداری از مزایای زنجیره ارزش بدون تقبل هزینه‌های سرمایه‌ای مستقیم را برای طرف ایرانی فراهم می‌سازد. شایان یادآوری است محاسبات پایه صورت گرفته بر اساس نرخ کارمز ۳۰ دلار به ازای هر تن خوراک متانول محقق شده است.

جدول ۶. نتایج ارزیابی اقتصادی تولید کارمزدی الفین

|      |                                                             |
|------|-------------------------------------------------------------|
| ۵۳۰  | برآورد سرمایه‌گذاری اولیه طرح (میلیون دلار)                 |
| ۶۹۴  | مجموع تناژ محصول تولیدی (هزار تن)                           |
| ۸۳۸  | قیمت فروش هر تن اتیلن (دلار/تن)                             |
| ۸۴۸  | قیمت فروش هر تن پروپیلن (دلار/تن)                           |
| ۶۵۳  | قیمت فروش هر تن C <sub>4</sub> (دلار/تن)                    |
| ۵۶۹  | برآورد مجموع فروش سالیانه FOB (میلیون دلار)                 |
| ۳۰۲  | هزینه تمام‌شده متانول (میلیون دلار/سال)                     |
| ۱۲۵  | برآورد هزینه‌های تولید الفین‌ها (میلیون دلار)               |
| ۰    | تخفیف خوراک (۰)                                             |
| ۵۹   | برآورد حاشیه سود عملیاتی در دوره شمولیت تخفیف (میلیون دلار) |
| ٪۷   | IRR                                                         |
| -۱۸۳ | NPV (با نرخ تنزیل ۱۵٪) - (میلیون دلار)                      |

بر اساس ارزیابی‌های فنی و اقتصادی انجام‌شده و در چارچوب سناریوی سوم، که مبتنی بر تولید کارمزدی الفین از متانول در واحدهای مستقر در چین و انعقاد قرارداد بلندمدت (Long-Term Agreement) اجاره یا حق‌العمل‌کاری است، نکات و ملاحظات زیر قابل توجه است:

در این مدل، هزینه‌های مرتبط با احداث واحد MTO، جداسازی، حمل و نصب مجدد تجهیزات حذف شده و در نتیجه سرمایه‌گذار از ریسک‌های ناشی از اجرای پروژه در این ابعاد مصون می‌ماند. در صورت دستیابی به توافقی برد - برد با طرف چینی، عملاً متانول تولیدی واحد داخلی به صورت پایدار به مصرف خواهد رسید. همچنین، با استقرار واحد MTO در یک مجتمع

پتروشیمیایی یکپارچه، امکان تضمین فروش بخش عمده‌ای از الفین تولیدی نیز فراهم خواهد شد. البته با توجه به مفاد ماده (۳) تصویب‌نامه شماره ۱۵۲۵۳۶/ت/۵۷۹۴۴ مورخ ۲۳/۱۲/۱۳۹۹ هیئت وزیران [۲۱]، امکان بهره‌مندی از تخفیف پلکانی خوراک فقط برای طرح‌هایی که خود دارای واحدهای پایین‌دستی داخل کشور باشند فراهم است؛ لذا این تخفیف در سناریوی حاضر موضوعیت نخواهد داشت که از منظر اقتصادی اثر منفی بر اقتصاد طرح دارد. از آنجا که فرایند تولید الفین در مجاورت بازار هدف (چین) انجام می‌گیرد، هزینه‌های حمل و صادرات الفین حذف می‌شود و این مزیت، بخشی از عدم‌النفع بهره‌مندی از تخفیف خوراک را جبران می‌کند. با توجه به مفروضات اقتصادی تحلیل‌شده، طرح تولید متانول به‌تنهایی توجیه‌پذیر نبوده و حتی در صورت فرآورش کارمزدی آن به الفین (با لحاظ ۳۰ دلار به ازای فرآورش هر تن متانول) در خارج از کشور، نرخ بازدهی کل پروژه حدود ۷ درصد بوده که بیانگر این موضوع است که این طرح همچنان از منظر اقتصادی جذاب نیست. چانه‌زنی میان طرف ایرانی و طرف چینی، درنهایت باید به تعیین نرخ برای کارمزد تبدیل منجر شود که هم برای طرف چینی سودآور بوده و هم بتواند نرخ بازدهی طرح را برای طرف ایرانی به محدوده قابل قبول (در اینجا ۱۵ درصد) نزدیک کند. در این خصوص، انجام آنالیز حساسیت نسبت به نرخ کارمزد، ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس نتایج آنالیز حساسیت در جدول ۷ نمایش داده شده است.

| جدول ۷. نتایج آنالیز حساسیت طرح تولید کارمزدی متانول نسبت به نرخ کارمزد |            |      |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|------|
| کارمزد (\$/t)                                                           | درصد تغییر | IRR  |
| ۱۰۸                                                                     | ۵۰٪        | منفی |
| ۷۲                                                                      | ۴۰٪        | منفی |
| ۵۱                                                                      | ۳۰٪        | منفی |
| ۴۰                                                                      | ۲۰٪        | ۲    |
| ۳۳                                                                      | ۱۰٪        | ۵    |
| ۳۰                                                                      | ۰          | ۷    |
| ۲۷                                                                      | -۱۰٪       | ۸    |
| ۲۲                                                                      | -۲۰٪       | ۹    |
| ۱۵                                                                      | -۳۰٪       | ۱۲   |
| ۹                                                                       | -۴۰٪       | ۱۵   |

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۷، دستیابی به نرخ بازده مورد انتظار سرمایه‌گذار (۱۵ درصد) تنها در صورتی ممکن خواهد بود که نرخ کارمزد اپراتور MTO به حدود ۹ دلار کاهش یابد. این در حالی است که با در نظر گرفتن هزینه‌های بالای عملیاتی و مفروضات فعلی طرح، تحقق چنین سطحی از تخفیف در کارمزد بسیار دشوار به نظر می‌رسد و از منظر اقتصادی ممکن است برای مالک چینی واحد MTO فاقد جذابیت لازم باشد. در نتیجه، حصول به توافق برد - برد میان طرفین مستلزم انجام مذاکرات دقیق و طراحی سازوکارهایی برای توزیع منافع و ریسک‌ها خواهد بود.

به منظور تکمیل مقایسه‌ای نتایج این بخش، مبتنی بر اطلاعات بخش تکنولوژی (جدول ۶)، مختصراً به وضعیت الفین‌ها در چین و توسعه تکنولوژی MTO پرداخته می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، توسعه این تکنولوژی در کشور چین از تکنولوژی نسل اول DMTO به نسل سوم در حال گذار است و بدیهی است با بهبود راندمان عملیاتی و تقویت نرخ تبدیل متانول به بنزین، تکنولوژی DMTO-III از منظر اقتصادی وضعیت به مراتب مناسب‌تری برای پروژه‌های متانول به الفین به همراه خواهد داشت. در واحد DMTO-III، حتی اگر مصرف متانول برای تولید ۱ تن اتیلن و پروپیلن بدون بازیافت محصولات جانبی  $C_4^+$  به ۲/۶ تا ۲/۷ تن کاهش یابد، نرخ خوراک متانول برای یک راکتور بسترسیال با قطر حدود ۱۱/۰ متر در فاز متراکم می‌تواند تا ۳۰۰۰ هزار تن در سال افزایش یابد؛ به این معنا که یک واحد DMTO-III می‌تواند سالانه حدود ۱۱۵۰ هزار تن الفین سبک را بدون افزایش هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (CAPEX) تولید کند.

## ۶. بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، سه سناریو برای تولید الفین از متانول در قالب فرایند MTO مورد بررسی قرار گرفت: احداث کامل واحدهای متانول و MTO، خرید واحد دست دوم MTO و احداث واحد متانول، و در نهایت احداث واحد متانول و تولید کارمزدی الفین در چین. مهم ترین نتایج تحلیلی در جدول ۸ نمایش داده شده است:

جدول ۸. مقایسه سناریوهای ۳گانه توسعه زنجیره ارزش متانول

| سناریوی اول: احداث متانول + MTO | سناریوی دوم: خرید MTO<br>دست دوم + احداث متانول | سناریوی سوم: احداث<br>متانول + تولید کارمزدی الفین    | مؤلفه / سناریو                             |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| بسیار بالا                      | نسبتاً کمتر (به دلیل دست دوم بودن MTO)          | نسبتاً پایین                                          | سرمایه گذاری ثابت<br>(CAPEX)               |
| بالا                            | بسیار بالا (ناشی از کهنگی تجهیزات)              | پایین (بخش قابل توجهی توسط طرف<br>چینی پرداخت می شود) | هزینه های عملیاتی<br>(OPEX)                |
| بالا (ساخت کامل)                | بالا (حمل، نصب مجدد، بهره برداری)               | پایین (انتقال متانول، عقد قرارداد)                    | ریسک اجرای پروژه                           |
| نیازمند انتقال فناوری           | وابسته به توانایی احیای تکنولوژی قدیمی          | بهره گیری از تخصص طرف چینی                            | دسترسی به فناوری و نیروی<br>متخصص          |
| مشمول تخفیف خوراک               | مشمول تخفیف خوراک                               | فاقد شمول تخفیف (مطابق ماده ۳<br>آیین نامه)           | نیاز به مجوز و تأمین خوراک<br>با تخفیف     |
| منفی (غیر جذاب)                 | منفی (غیر جذاب)                                 | حدود ۷٪ (غیر جذاب)                                    | نرخ بازده داخلی (IRR)                      |
| زیاد                            | زیاد                                            | نسبتاً کمتر (برای واحد متانول)                        | نیاز به تأمین مالی خارجی                   |
| زیاد                            | زیاد                                            | کم (نزدیکی به بازار مصرف چین)                         | وابستگی به بازارهای صادراتی<br>محصول نهایی |
| متوسط                           | کم (به دلیل مالکیت تجهیزات)                     | بالا (امکان چانه زنی بر سر نرخ کارمزد)                | قابلیت انعطاف در تنظیم<br>قراردادها        |

ارزیابی های فنی، اقتصادی و اجرایی نشان می دهد که هر یک از این سناریوها با چالش هایی جدی در مسیر دستیابی به بازدهی مناسب برای سرمایه گذار مواجه اند. سناریوی اول که شامل احداث کامل زنجیره تولید در داخل کشور است، به رغم مزیت توسعه زنجیره ارزش داخلی و بهره گیری از مشوق های قانونی نظیر تخفیف پلکانی خوراک، به دلیل نیاز به سرمایه گذاری اولیه بسیار بالا، ریسک های اجرای قابل توجه، و نرخ بازده کمتر از مقدار هدف گذاری شده (۱۵ درصد)، توجیه پذیر نیست. سناریوی دوم یعنی خرید و نصب مجدد یک واحد MTO دست دوم، با این فرض که بخش متانولی در داخل احداث شود، با وجود کاهش نسبی هزینه های سرمایه ای، همچنان با ریسک های فنی و اجرایی بالا (نظیر مشکلات حمل، نصب و احیای تکنولوژی قدیمی) و هزینه های عملیاتی بالا مواجه است. این گزینه حتی با اعمال تخفیف خوراک نیز نرخ بازدهی منفی از خود نشان داده و قابل اتکا نیست. سناریوی سوم که انتقال متانول ایران به چین و فرآورش کارمزدی آن به الفین را در نظر دارد، با حداقل هزینه سرمایه گذاری و ریسک اجرایی همراه است و از نظر مکان بازار نیز مزیتی نسبی دارد. اما حتی در این حالت نیز نرخ بازدهی کل پروژه در محدوده ۷ درصد باقی می ماند، که فاصله معناداری با انتظارات سرمایه گذار دارد. براساس تحلیل حساسیت انجام شده، تنها در صورتی می توان به نرخ بازدهی مطلوب ۱۵ درصد نزدیک شد که کارمزد فرآورش به زیر ۹ دلار در هر تن متانول کاهش یابد؛ چیزی که با توجه به هزینه های بالای عملیاتی و شرایط مالک MTO در چین، بسیار بعید به نظر می رسد. بنابراین، نتیجه گیری کلیدی این است که رویکردهای مبتنی بر فرایند MTO در قالب های فعلی (اعم از ساخت، خرید، یا فرآورش کارمزدی) توانایی تأمین نرخ بازدهی مناسب برای سرمایه گذاران را ندارند، به ویژه وقتی فناوری غالب، چینی و با بهره وری پایین تر است. این مسئله در کنار محدودیت های ساختاری بازار، نبود مزیت هزینه ای بلندمدت، و عدم امکان بهره مندی از مزایای قانونی در سناریوی سوم، همگی بر لزوم بازنگری در راهبرد توسعه زنجیره ارزش تأکید دارند.

بر این اساس، برای ایجاد ارزش افزوده پایدار از منابع گازی کشور، رویکردهای توسعه باید از تولید صرف متانول و حتی الفین عبور کنند و به سمت طرح‌های  $\text{MTO}^+$  و  $\text{GTO}^+$  سوق یابند؛ طرح‌هایی که با تمرکز بر تولید محصولات نهایی پتروشیمی مانند پلی‌الفین‌ها، مشتقات  $\text{C}_4$ ، و ترکیبات پایین‌دستی می‌توانند هم بازارهای پایدارتر و پرسودتری فراهم آورند و هم از نظر اقتصادی برای سرمایه‌گذاران توجیه‌پذیرتر باشند. تحقق این هدف، مستلزم انجام مطالعات جامع، روزآمد و مبتنی بر فناوری‌های نوین در حوزه طراحی زنجیره، مکان‌یابی بهینه، انتخاب فناوری، ساختار قراردادهای بین‌المللی، و الگوهای تأمین مالی است.

## منابع

- [1] National Petrochemical Company (NPC). Production and project data in petrochemical development plans (Seventh and Eighth Plans). Tehran: NPC; 2025. [Persian]
- [2] Daneshi SS, Dastkhoun H. Evaluation of methanol to gasoline (MTG) project: Overcoming methanol surplus and gasoline deficit crisis. *Energy Economics Studies Quarterly*. 2024;20(82):149–186. [Persian]
- [3] Mao Y, Peng T, Zhongmin L. DMTO: A Sustainable Methanol-to-Olefins Technology. Dalian National Laboratory for Clean Energy & National Engineering Laboratory for MTO & Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China; 2020.
- [4] Richard S. UOP Advanced MTO™ Process. UOP Olefins Seminar; 2016.
- [5] Sinopec. Review of the Methanol to Olefins (S-MTO) process. Beijing: Center for Advanced Petrochemical Value Chain Development; 2016.
- [6] Seifi V, Sadeghi Shahdani M. Economic evaluation of natural gas value chain extension: Methanol to olefins/polyolefins plants in 10-year horizon. *Energy Economics Studies Quarterly*. 2021;18(72):89–120. [Persian]
- [7] Mousaei A, Hatefi MA, Heidari Asl MM. . Designing a comprehensive model for selecting the optimal fuel in the natural gas value chain (case study: Iran). *Iranian Journal of Energy Economics*. 2020;10(37):129–58. [Persian]
- [8] Dastkhoun H. Feasibility Study of Methanol to Propylene Technology and comparison with alternative technologies based on the capacity of the Law on Protection of Downstream Petrochemical Industries. *Energy Economics Studies Quarterly*. 2022;73:197–236. [Persian]
- [9] Manalal JT, Pérez-Fortes M, Gonzalez PI, Ramirez AR. Evaluation of alternative carbon-based ethylene production in a petrochemical cluster: Technology screening and value chain impact assessment. *Comput Aided Chem Eng*. 2023;52:2453–8.
- [10] Chen H, Yang L, Zhang P, Harrison A. The controversial fuel methanol strategy in China and its evaluation. *Energy Strategy Rev*. 2014;4:28–33.
- [11] Gogate MR. Methanol-to-olefins process technology: current status and future prospects. *Pet Sci Technol*. 2019;37(5):559–65.
- [12] Long ND, Hung NM, Hai LD, Hang NTT, Thua HM. . Evaluation of deep processing of ethane for petrochemical production from domestic natural gas. *Sci Technol Dev J*. 2019;20(K9):53–8.
- [13] Dutta A, Karimi IA, Farooq S. Technoeconomic perspective on natural gas liquids and methanol as potential feedstocks for producing olefins. *Ind Eng Chem Res*. 2019;58:963–72.
- [14] Stahl S, Vossen JT, Popp S, Leitner W, Vorholt AJ. Methanolation of olefins: Low-pressure synthesis of alcohols by the formal addition of methanol to olefins. *Angew Chem Int Ed*. 2025;64(7):e202418984.
- [15] Soheili S, Nakhaei Pour A. Consideration of the methanol-to-olefins (MTO) reaction over different zirconium species of the Zr-SAPO catalyst: a comprehensive periodic DFT investigation. *RSC Adv*. 2024;26:5226–36.
- [16] Bidehendi G, Karami SH, Amiri MJ. Application of multi-criteria decision-making methods in the environment. Kiajur Press; 2015. [Persian]
- [17] Brealey R, Myers S, Allen F. Principles of Corporate Finance. 12th ed. McGraw-Hill Education; 2019.
- [18] Chinese Partner. Proposal for second-hand MTO plant sale. Internal Report; 2024. [Persian]
- [19] Executive Bylaw of Article B Amendment, Targeted Subsidies Law. Enactment No. 51939/T62393H, dated 2024. [Persian]
- [20] Hassani M, Rezvaneh A, Abbasi A, Agha Beigi. Value Chain Development Experience in the Petrochemical Industry (Case Study: China). Parliament Research Center; 2018. Report No. 15740. [Persian]
- [21] Resistance Economy Think Tank. Evaluation report on methane value chain development in Iran. 2023. [Persian]
- [22] Maham Oil and Gas Value Chain Studies Center. Comprehensive analysis of ethane supply and demand in South Pars Economic Zone. 2024. [Persian]

- [23] Maham Oil and Gas Value Chain Studies Center. Analytical review of global ethylene and propylene production trends. 2020. [Persian]
- [24] Mirjalili F, Rajabpour H. Legal impacts on balanced and sustainable development of the petrochemical value chain. Parliament Research Center; 2023. Report No. 19257. [Persian]
- [25] Bayat A, Rahbar F, Vatani A, Razavi A. Analysis of petrochemical industry value chains with focus on petro-refinery approach. *Pet Bus Rev*. 2022;6(4):115–32.
- [26] Bhalchandra G, Nilanjana B, Satakshi A, Monika K, Purnayan M. Liquefied natural gas value chain: A comprehensive review and analysis. *Chem Eng Technol*. 2023;47(3):430–47.
- [27] Chauvy R, Verdonck D, Dubois L, Thomas D, De Weireld G. Techno-economic feasibility and sustainability of an integrated carbon capture and conversion process to synthetic natural gas. *J CO<sub>2</sub> Util*. 2021 May;47:101488. doi: 10.1016/j.jcou.2021.101488.
- [28] Franza L, Suryadi B. Natural gas in Southeast Asia: Key trends and long-term outlook. 2021.
- [29] IHS Report. Price forecasting. London: IHS Markit; 2023.
- [30] IHS Report. Process economics program – methanol. London: IHS Markit; 2023.
- [31] IHS Report. World analysis – methanol report. London: IHS Markit; 2024.
- [32] IHS Report. Chemical market analytics – methanol report (CMA). London: IHS Markit; 2024.
- [33] Mirnizami S. Sanctions and the Petrochemical Industry: The Investment Outlook of the National Pension Fund. Sharif University Policy Research Institute; 2019.
- [34] Mohammadi R, Hadizadeh M. Methanol to Olefin (MTO) value chain management. *New Appl Stud Manag Econ Account*. 2023;6(1):7–17.
- [35] U.S. Energy Information Administration. Monthly Energy Review. December 2021. <https://www.eia.gov/outlooks/steo/>
- [36] Ruud W. Value chain analysis of the natural gas industry: Lessons from the US and opportunities for Europe. *J Nat Gas Sci Eng*. 2010;2(2):86–104.
- [37] Todorova G, Ilieva Y. Key motivational factors to locate within an industry cluster: Case of the Dutch flower cluster. [Master's thesis]. Aarhus University; 2011.
- [38] Chen YH, Hsieh W, Chang H, Ho CD. Design and economic analysis of industrial-scale methanol-to-olefins plants. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2022;130.
- [39] Zhao Z, Jiang J, Wang F. Economic analysis of twenty light olefin production pathways. *J Energy Chem*. 2021;56:193–204.