Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Assessment of Investment Opportunities in Iranian Petrochemical Industry through Integrated Technical, Economic and Financial Modeling of the Entire Network of Petrochemical Units

Ali Setayeshnia, Mohammad Fakhroleslam *

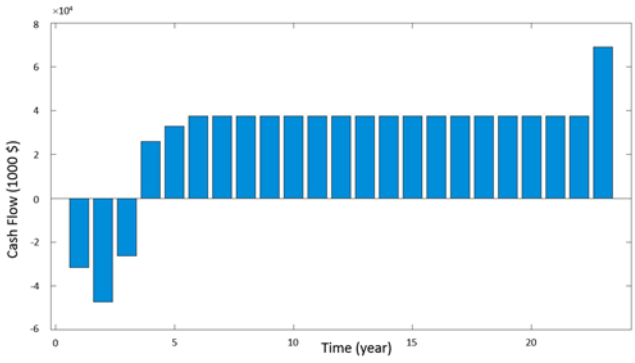
Process Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received 2024-12-01
Revised 2024-12-13
Accepted 2024-12-13
Available online 2025-04-21
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Petrochemical industry
Value chain
Process-financial modeling
Pseudo steady state
Investment opportunities

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research Subject: Identifying and evaluating investment opportunities across the entire network of Iranian petrochemical units is of particular importance for developing the petrochemical industry's value chain, maximizing added value, and ensuring the optimal use of oil and gas resources.

Research Approach: The purpose of this research is to create a mathematical model to identify and evaluate investment opportunities by analyzing technical and economic-financial data of process units active in the Iranian petrochemical industry. This tool can process a large volume of information in a limited time and with acceptable accuracy and provide the desired output. Process information of petrochemical complexes, including operational units, production and consumption of materials, technologies used, and prices of raw materials and products, is the main data that form the basis for preparing mathematical models. In addition to process units, environmental variables affecting the system, along with their effect on the model, are also modeled and integrated with the network of process units.

Main Results: By creating a model and performing the simulation process, the various outputs of the system include: technical and economic-financial analysis, estimation of investment costs of process units, sensitivity analysis of the network of process units to technical and economic parameters and variables such as feed and product prices, as well as the operational capacity of process units. For example, to validate the simulator outputs, the actual data of the Amirkabir Petrochemical Complex were compared with the outputs obtained from the simulator, and accordingly, the error rate of the simulator was estimated to be 3.36 percent in the estimation of the production rate of main products and 22 percent in the estimation of the production rate of by-products. Finally, based on the simulator outputs, investment opportunities in the value chain of the Iranian petrochemical industry were identified, evaluated, and validated, and on this basis, the establishment of a methanol-to-olefin (MTO) conversion unit was introduced as a valid investment opportunity in the downstream part of the methanol value chain.

* Corresponding author: fakhroleslam @modares.ac.ir – ORCID: 0000-0002-3863-9155

Copyright@ 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در صنعت پتروشیمی ایران مبتنی بر مدل‌سازی یکپارچه فنی، اقتصادی و مالی کل شبکه واحدهای پتروشیمی

علی ستایش‌نیا، محمد فخرالاسلام *

گروه مهندسی فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

موضوع تحقیق: شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری با در نظر گرفتن کل شبکه واحدهای پتروشیمی ایران در جهت توسعه زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی و برای دستیابی به بیشترین ارزش افزوده و استفاده بهینه از منابع نفت و گاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

روش تحقیق: هدف از انجام این پژوهش ایجاد مدلی ریاضی برای شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری با تحلیل داده‌های فنی و اقتصادی-مالی واحدهای فرایندی فعال در صنعت پتروشیمی ایران است. این ابزار می‌تواند در زمانی محدود و با دقتی قابل‌قبول حجم زیادی از اطلاعات را پردازش کرده، خروجی مطلوب را ارائه دهد. اطلاعات فرایندی مجتمع‌های پتروشیمی شامل واحدهای عملیاتی، میزان تولید و مصرف مواد، فناوری‌های مورد استفاده و قیمت مواد اولیه و محصولات از داده‌های اصلی هستند که مبنای تهیه مدل‌های ریاضی است. علاوه بر واحدهای فرایندی، متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر سامانه همراه با نحوه اثرگذاری آن‌ها بر مدل نیز مدل‌سازی و با شبکه واحدهای فرایندی یکپارچه شده است.

نتایج اصلی: با ایجاد مدل و انجام فرایند شبیه‌سازی، خروجی‌های مختلف سامانه شامل: تحلیل فنی و اقتصادی-مالی، تخمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای فرایندی، تحلیل حساسیت شبکه واحدهای فرایندی نسبت به عوامل و متغیرهای فنی و اقتصادی مانند قیمت خوراک و محصولات و همچنین ظرفیت عملیاتی واحدهای فرایندی است. به‌منظور اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌ساز، داده‌های واقعی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر برای نمونه با خروجی‌های به‌دست‌آمده در شبیه‌ساز مقایسه شد و میزان خطای شبیه‌ساز به‌طور میانگین در برآورد میزان تولید محصولات اصلی ۳/۳۶ درصد و برآورد میزان تولید محصولات جانبی ۲۲ درصد ارزیابی شد. در نهایت مبتنی بر خروجی‌های شبیه‌ساز، شناسایی، ارزیابی و اعتبارسنجی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی ایران انجام شد که بر این اساس، احداث واحد تبدیل متانول به الفین (MTO) به‌عنوان فرصت سرمایه‌گذاری معتبر در بخش پایین‌دستی زنجیره ارزش متانول معرفی شد.

کلیدواژه‌ها

صنعت پتروشیمی

زنجیره ارزش

مدل‌سازی فرایندی و مالی

شبه‌پایا

فرصت‌های سرمایه‌گذاری

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: fakhroleslam @modares.ac.ir – ORCID: 0000-0002-3863-9155

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان . این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

با توجه به جایگاه صنعت نفت، گاز و پتروشیمی ایران از نظر ذخایر هیدروکربنی، چشم‌انداز این صنعت در چگونگی بهره‌مندی از این ذخایر خدادادی حائز اهمیت است. به بیان دیگر در شرایطی که مسیر دستیابی به ارزش افزوده با استفاده از منابع نفت و گاز مشخص نیست، نمی‌توان برای ایجاد اشتغال و ارزش افزوده بیشتر هدف‌گذاری و برنامه‌ریزی کرد. در نتیجه قبل از هرگونه تصمیم‌گیری علاوه بر ارزیابی بازار خوراک و محصولات باید تحلیل فرایندی و اقتصادی-مالی مرتبط با بخش‌های مختلف زنجیره ارزش نیز صورت گیرد.

در سال ۱۴۰۱، حدود ۳۹/۶ میلیون تن محصول نهایی قابل فروش در مجتمع‌های پتروشیمی ایران تولید شده است که ۷۰ درصد محصولات تولیدشده به مناطق مختلف دنیا (عمدتاً کشور چین) صادر شده و ۳۰ درصد در داخل کشور مورد استفاده قرار گرفته است. حدود ۲۹ درصد از کل محصولات صادراتی متانول، ۱۸٪ اوره، ۱۷٪ پروپان و بوتان، ۱۲درصد پلی‌اتیلن، ۴ درصد برش‌های سنگین و ۲۰٪ سایر محصولات بوده است [۱]. بنابراین لزوم توسعه متوازن زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی در کشور متناسب با سبد محصولات صادراتی و وارداتی و اهمیت آن در اقتصاد کشور باید مورد توجه بیشتر قرار گیرد.

در این راستا با تکیه بر دانش و بینشی که نسبت به فرایندها، تجهیزات فرایندی و واکنش‌های شیمیایی وجود دارد و همچنین با بهره‌گیری از ابزارهای ریاضی می‌توان در جهت بهبود مدیریت، عملیات پیوسته و شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در راستای توسعه زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی گام برداشت. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در توسعه و کاربرد روش‌های ریاضی برای حل نظام‌مند برخی از مشکلات مربوط به راهبردهای اقتصادی و تصمیم‌گیری‌های مختلف در سطوح خرد و کلان در راستای توسعه زنجیره ارزش در صنایع نفت و گاز حاصل شده است که در ادامه برخی از پژوهش‌های انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پژوهشی عوامل موثر بر توسعه صنعت پتروشیمی ایران و مدل‌سازی سازوکار ایجاد بیشترین درآمد در واحدهای عملیاتی با استفاده از رویکردی شبه‌پایا و نظام‌مند انجام شده است. در این تحقیق با دیدگاهی کلان بر مبنای درآمد حاصل از سه منبع؛ فروش نفت و گاز و فروش محصولات پالایشی و پتروشیمیایی برای دستیابی به بیشترین سودآوری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی زنجیره ارزش انجام شده است [۲]. جین کوانگ بوک و همکاران [۳] مسئله برنامه‌ریزی افزایش ظرفیت عملیاتی تولید واحدهای فرایندی در شبکه واحدهای فرایندی در صنایع شیمیایی را مورد بررسی قرار دادند. اسفن سی گراوز و همکاران [۴] مدل جدیدی برای مطالعه برنامه‌ریزی تولید چندین واحد فرایندی مرتبط با یکدیگر را ارائه کردند. سورش اس پیتی و همکاران [۵] مدل‌سازی و شبیه‌سازی پویا زنجیره تأمین نظام‌مند پالایشگاهی را به‌عنوان ابزار کمی ارزشمند برای تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار دادند. در بخش اول، مدلی پویا از زنجیره تأمین واحدهای یکپارچه پالایشگاهی ارائه شده است. در بخش دوم کاربرد شبیه‌ساز ایجادشده برای پشتیبانی در تصمیم‌گیری، طراحی و عملیات بهینه زنجیره تأمین پالایشگاه بر اساس چارچوب شبیه‌سازی-بهینه‌سازی نشان داده شده است [۶].

بیسواس و ناراهاری [۷] سامانه پشتیبانی در تصمیم‌گیری با استفاده از مدل‌سازی شیءگرا (Object-Oriented) را توسعه دادند که تصمیم‌گیری راهبردی و عملیاتی را در زنجیره‌های تأمین ممکن می‌سازد. این سامانه دارای دو جزء اصلی است: ۱) ایجاد کلاسی برای مدل‌سازی شیءگرای عناصر زنجیره تأمین و تعاملات پویا بین عناصر مختلف و ۲) ایجاد محیطی کاربری که به‌طور بالقوه می‌تواند شامل روش‌های حل الگوریتمی قدرتمند و مبتنی بر شبیه‌سازی برای تصمیم‌گیری زنجیره تأمین باشد. سرجیو ام اس و همکاران [۸] روش‌های برنامه‌ریزی خطی را توصیف و این روش‌ها را برای حل مشکلات مربوط به برنامه‌ریزی واحد عملیاتی استفاده کردند. ژنیا جیا، ماریانتی ایراپتریتو [۹] چالش‌ها و راه‌حل‌های تهیه مدل جامع ریاضی برای برنامه‌ریزی کارآمد عملیات پالایشگاه نفت را مورد بررسی قرار دادند. ماریو گوآکاردو و همکاران [۱۰] نیز مسئله برنامه‌ریزی تاکتیکی در زنجیره تأمین برای تولید محصولات خاص از منابع نفتی را مورد بررسی قرار دادند. گراسمن و پارک سانون [۱۱] مدل بهینه‌سازی چنددوره‌ایی با متغیرهای گسسته و پیوسته (MILP) برای شبکه فرایندهای پیوسته ارائه کردند. در موردی تقریباً مشابه، ناوا سهیندیس و همکاران [۱۲] مدل MILP چنددوره‌ای برای انتخاب بهینه و توسعه فرایندها بر اساس تقاضا و قیمت مواد شیمیایی در صنعت پتروشیمی ارائه کردند. ماه دمپستر و همکاران [۱۳] چارچوبی برای مسئله برنامه‌ریزی تأمین، تحویل و توزیع محصولات برای شرکت‌های فعال در حوزه نفت ارائه دادند. دانیل باری فولر و همکاران [۱۴] برای کوتاه کردن زمان ایجاد مدل‌ها و ساختارها مبتنی بر دانش و بینشی دقیق از واحدهای فرایندی، مدلی مبتنی بر عامل یادگیری (Learning Agents) ارائه کردند.

در پژوهش‌های انجام‌شده اغلب تجهیزات یا بخش‌های اصلی واحد فرایندی به‌عنوان حلقه‌های زنجیره ارزش (اجزای سامانه) یا زنجیره تأمین مبنای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بوده است و اغلب هدف بهینه‌سازی زنجیره تأمین از نظر اقتصادی است. در پژوهش‌هایی که با دیدگاهی کلان‌تر از واحد فرایندی یا مجتمع پتروشیمی، زنجیره ارزش را مورد بررسی قرار دادند، هدف، مدل‌سازی ریاضی سامانه مورد بررسی و بهینه‌سازی مسائل اقتصادی بوده و کمتر به مدل‌سازی فنی و فرایندی واحدهای عملیاتی پرداخته شده است.

مطالعه توسعه صنعت پتروشیمی در مکزیک نیز توسط جیمنزی و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۸۲ انجام شد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی ریاضی از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (Mix Integer Programming) برای مدل‌سازی روابط پیچیده بین واحدهای فرایندی مختلف مجتمع پتروشیمی استفاده شد. گورکان و کارتال [۱۶] در سال (۱۹۸۹) توسعه صنعت پتروشیمی ترکیه را مورد مطالعه قرار دادند. در این راستا، مدل برنامه‌ریزی خطی (Linear Programming) با هدف به‌حداقل‌رساندن هزینه تولید محصولات پتروشیمی توسعه داده شد. حسینی و همکاران [۱۷] در سال ۱۳۹۵ با ارائه مدلی مفهومی از پویایی قیمت نفت، به بازار نفت پرداختند. در مطالعه آن‌ها تأثیر عوامل مختلف بر قیمت نفت مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نحوه و میزان تأثیر هر یک از این عوامل با استفاده از ابزارهای رایانه‌ای در سامانه‌ای با رویکرد پویا (System Dynamics) اعمال شد. اخیراً دانش‌زند و همکاران [۱۸] مدل

عرضه و تقاضا برای تخصیص بهینه گاز طبیعی به بخش‌های مختلف با در نظر گرفتن نحوه قیمت‌گذاری گاز برای هر بخش متناسب با تقاضا ارائه کردند. ولی‌زاده و همکاران [۱۹] رابطه بین قیمت حامل‌های انرژی و تأثیر آن در صنعت پتروشیمی ایران را با استفاده از رویکرد ارزیابی اقتصاد بررسی کردند.

سوسارا آ. ون دن هور و ایگناسیو ای. گراسمن [۲۰] نیز مدلی ریاضی غیرخطی گسسته چنددوره‌ای (MINLP) را که شامل طراحی، برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری و توسعه زنجیره ارزش در صنعت پتروشیمی است، ارائه کردند و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی را در دوره‌های زمانی متفاوت مورد بررسی قرار دادند. ام کنگیسر و هو گاندر [۲۱] مدل نظام‌مند بهینه‌سازی برای مدیریت زنجیره ارزش جهانی مواد شیمیایی ارائه کردند. متین تیجرکای و گراسمن [۲۲] مسئله MINLP برای ایجاد بهینه شبکه‌های واحدهای فرایندی به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی گسسته که با معادلات غیرخطی مدل‌سازی‌شده، ارائه کردند. اسفن سی گراوز و همکاران [۲۳] مدل جدیدی برای مطالعه برنامه‌ریزی‌های مورد نیاز چندین واحد عملیاتی مرتبط با یکدیگر ارائه کردند.

با توجه به مطالعات انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت باوجود اهمیت موضوع تحلیل زنجیره ارزش صنایع پتروشیمی در اقتصاد ایران، تا به حال پژوهش مدون و جامعی در خصوص تحلیل کلان زنجیره ارزش با هدف شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری با رویکرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندی و اقتصادی-مالی انجام نشده است. از طرفی با توجه به گستردگی اطلاعات و داده‌های موجود در بخش‌های مختلف زنجیره ارزش و همچنین با توجه به اینکه تصمیم‌گیری، سیاست‌گذاری صحیح و برنامه‌ریزی در طول زنجیره ارزش صنایع نفت، گاز و پتروشیمی نیازمند تحلیل و بررسی اطلاعات و داده‌های گسترده در ابعاد مختلف است، تحلیل و بررسی اطلاعات موجود توسط بشر امکان‌پذیر نیست. بنابراین سامانه نرم‌افزاری برنامه‌ریزی‌شده مورد نیاز است تا بتواند در زمان محدود و با دقتی قابل‌قبول حجم زیادی از اطلاعات را پردازش کند و خروجی مطلوب را ارائه دهد.

در این راستا، در این پژوهش اطلاعات مجتمع‌های پتروشیمی فعال در ایران به تفکیک واحدهای عملیاتی شامل ظرفیت اسمی واحدها، میزان تبدیل مواد در هر یک از واحدهای فرایندی متناسب با فناوری مورد استفاده و همچنین قیمت مواد اولیه، محصولات و خدمات جانبی به‌عنوان عوامل اصلی مسئله در پایگاه داده ثبت شد. سپس مبتنی بر مدل‌سازی شیءگرا، فرایند شبیه‌سازی و همچنین ارزیابی مدل و نتایج شبیه‌ساز انجام شد و خروجی‌های مختلف سامانه برای شناسایی و تحلیل فرصت‌های سرمایه‌گذاری در صنعت پتروشیمی ایران مورد استفاده قرار گرفت.

۲ بخش نظری

شناسایی، ارزیابی و اعتبارسنجی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی برای کسب بیشترین ارزش افزوده، همواره یکی از مهم‌ترین مراحل در فرایند تدوین راهبرد بهینه توسعه زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی در کشورهای مختلف و همچنین شرکت‌های فعال در این صنعت است. در ایران نیز لزوم توسعه زنجیره ارزش با هدف تبدیل مواد خام و محصولات پایه به محصولات با حداکثر ارزش افزوده در راستای برنامه‌های هفتم و هشتم توسعه زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی در کشور باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، شناخت و استفاده از ابزارها و روش‌های مناسب نقش به‌سزایی در فرایند تصمیم‌سازی ایفا می‌کند. در این پژوهش، از مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبه‌پایای فرایندی و اقتصادی-مالی شبکه واحدهای فرایندی صنعت پتروشیمی ایران به‌عنوان ابزاری برای شناسایی و تحلیل فرصت‌های سرمایه‌گذاری در این صنعت استفاده شده که می‌تواند زیرساختی تسهیل‌کننده در فرایند تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری بر اساس شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدات فراهم آورد.

۲-۱ مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه واحدهای فرایندی

شبکه واحدهای فرایندی در صنعت پتروشیمی، مجموعه‌ای از واحدهای فرایندی موجود در مجتمع‌های پتروشیمی مختلف است که هر کدام متناسب با جایگاه خود وظیفه‌ای بر عهده دارد و قسمتی از تبدیل مورد نیاز در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی را انجام می‌دهد. مدل‌سازی و در نهایت شبیه‌سازی چنین شبکه‌ای به روشی نظام‌مند، در ابتدا نیازمند جمع آوری و ایجاد پایگاه داده‌ای از اطلاعات فرایندی و اقتصادی-مالی واحدهای فرایندی موردنظر است. با توجه به منابع در دسترس، داده‌های فرایندی و اقتصادی-مالی ۱۹۴ واحد فرایندی فعال در ایران در پایگاه داده در قالبی مشخص جمع‌آوری شد [۲۴]. سپس بر اساس داده‌های ثبت‌شده در پایگاه داده، واحدهای فرایندی تشکیل‌دهنده شبکه و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر بر اساس عوامل فرایندی و اقتصادی-مالی مدل‌سازی شد. مدل‌سازی واحدهای فرایندی با ایجاد ساختاری مشخص با نگاهی شیءگرا انجام شد و مدل‌سازی نحوه ارتباط بین واحدهای فرایندی نیز با در نظر گرفتن تبادل ماده بین واحدها صورت گرفت.

هر واحد فرایندی با در نظر داشتن مواد مصرفی و تولیدی آن می‌تواند به‌ترتیب به‌عنوان واحد پایین‌دستی یا بالادستی واحدهای فرایندی دیگر ایفای نقش کند. با آگاهی از واحدهای بالادستی و پایین‌دستی تمامی واحدهای فرایندی، سامانه واحدهای فرایندی به‌صورت درهم‌تنیده شکل می‌گیرد. درهم‌تنیدگی واحدهای فرایندی از این منظر حائز اهمیت است که هر تغییری در واحدهای فرایندی بالادستی یا مقدار و قیمت خوراک یا خدمات جانبی آن‌ها روی عملکرد فرایندی و مالی واحدهای پایین‌دست اثرگذار بوده، توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی-مالی کل سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مشخصات واحدهای فرایندی در شش گروه دسته‌بندی شده است:

- **مشخصات ورودی** که به‌عنوان متغیرهای مستقل در سامانه هستند و توسط کاربر یا سامانه تصمیم‌گیرنده تعیین شده و سایر مشخصات بر اساس این ورودی‌ها محاسبه می‌شوند که شامل ظرفیت عملیاتی واحد فرایندی، قیمت مواد و عوامل مالی است.
- **مواد ورودی و خروجی** که شامل نوع، مقدار و قیمت هر یک از مواد خام ورودی، خدمات جانبی، محصولات اصلی و جانبی مورد استفاده در هر واحد فرایندی است.
- **هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت** که شامل هزینه‌های مربوط به تجهیزات اصلی و داخل محدوده واحد (BLI) و خدمات جانبی (Offsites) متناسب با زمان، مکان و ظرفیت واحدهای فرایندی مجتمع‌های پتروشیمی ایران

است.

• **هزینه‌های عملیاتی** که شامل تمامی هزینه‌های ثابت و متغیر تولید محصول(ها) است. هزینه‌های متغیر تولید شامل هزینه‌های خرید مواد خام ورودی و خدمات جانبی و عواید ناشی از فروش محصولات جانبی می‌شود. هزینه‌های ثابت تولید نیز هزینه‌های کارکنان، مدیریت، هزینه‌های تعمیرات و نگه‌داری است. همچنین هزینه‌های غیرمستقیم تولید از جمله هزینه‌های استهلاک، بیمه، مالیات، بازاریابی و فروش نیز در نظر گرفته می‌شود.

• **شاخص‌های مالی** بر اساس فرضیات عملیاتی واحد محاسبه می‌شوند. مهم‌ترین شاخص‌های مالی که توسط شبیه‌ساز محاسبه و مورد استفاده قرار می‌گیرند، جریان نقدینگی (Cash Flow)، ارزش خالص فعلی (NPV) و نرخ بازده داخلی (IRR) است.

برای مدل‌سازی شبکه واحدهای فرایندی و ایجاد امکان شبیه‌سازی و مطالعه آن در شرایط عملیاتی مختلف، باید علاوه بر واحدهای فرایندی، متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر سامانه به همراه نحوه اثرگذاری آن‌ها بر مدل نیز مدل‌سازی شوند. این مدل‌ها شامل عوامل مالی نظیر ضرایب هزینه، ضرایب مکان، نرخ تنزیل، مدل استهلاک و اسقاط و همچنین مدل‌سازی قیمت مواد شیمیایی و مواردی از این دست که از عوامل اصلی مورد نیاز برای انجام محاسبات اقتصادی-مالی هستند، به همراه نحوه اثرگذاری آن‌ها بر کل سامانه، به‌صورت مجزا به مدل سامانه وارد شده، در محاسبات در نظر گرفته می‌شوند

در ادامه برای هر یک از موادی که در هر یک از واحدهای فرایندی تولید یا مصرف می‌شود، مدل قیمتی ساده‌ای (مدل خطی) در نظر گرفته شده و بر اساس توالی قرارگیری مواد در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی و نحوه تأثیرپذیری قیمت هر ماده از ماده پایین‌دستی آن، شبکه قیمت مواد شیمیایی ایجاد شده است، به‌طوری‌که با تغییر قیمت نفت و گاز، قیمت سایر مواد شیمیایی تغییر خواهد کرد. مدل قیمتی خطی ایجادشده برای محصولات بالادستی صنعت پتروشیمی از دقت بیشتری برخوردار هستند و برای محصولات پایین‌دستی، از دقتی کمتر اما قابل‌قبول برخوردار هستند. در نهایت، مطابق شکل ۱، برای تحلیل شبه‌پایای فرایندی و اقتصادی-مالی واحدهای فرایندی صنعت پتروشیمی ایران، مبتنی بر شبیه‌ساز ایجادشده، شبکه واحدهای فرایندی با شبکه قیمت مواد یکپارچه خواهد شد.

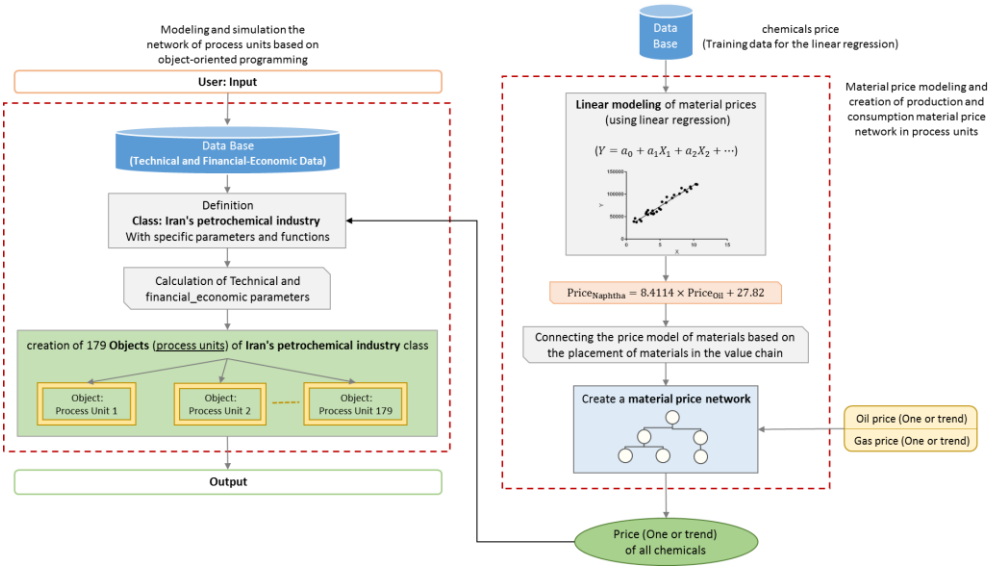
۲-۲ رویه شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری

شبیه‌ساز ایجادشده ابزار تصمیم‌گیری قدرتمندی برای تعیین راهبرد بهینه در توسعه زنجیره ارزش و شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری است. در ابتدا مطابق شکل ۲ مبتنی بر خروجی‌های شبیه‌ساز با انتخاب کلیه واحدهای فرایندی فعال در ایران، شبکه واحدهای فرایندی صنعت پتروشیمی ایران ایجاد شده و مبتنی بر جداول موازنه مواد، روند عرضه و تقاضا کلیه مواد تولید و مصرف‌شده در واحدهای فرایندی از منظر مقدار و ارزش با هدف شناسایی خوراک‌های در دسترس با زنجیره تأمین پایدار مشخص شده است. مواد دارای تراز مثبت (موادی که بیشتر از میزان تقاضای صنعت پتروشیمی تولید می‌شوند) و تراز منفی (موادی که کمتر از میزان تقاضای صنعت پتروشیمی تولید می‌شوند) و در ادامه سه ماده‌ای که دارای بیشترین تراز مثبت هستند، مشخص می‌شود. موادی که مازاد نیاز شبکه واحدهای فرایندی صنعت پتروشیمی تولید می‌شوند، در دسته‌بندی محصولات نهایی، محصولات میانی و مواد پایه تقسیم‌بندی می‌شوند.

تولید یکپارچه محصولات نهایی از محصولات پایه با توجه به خلق ارزش در تمامی مراحل زنجیره ارزش، سودآوری بیشتری ایجاد خواهد کرد. اغلب محصولات میانی تجارت‌پذیری پایینی داشته و در همان محل تولید به محصولات نهایی تبدیل می‌شوند. تولید محصولات پایه از جمله متانول، آمونیاک، اتیلن و پروپیلن نیز نسبت به تولید یکپارچه محصولات نهایی از محصولات پایه ارزش افزوده پایین‌تری دارد. با هدف خلق ارزش افزوده بیشتر در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی، سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری برای تدوین راهبرد مناسب صنعت پتروشیمی در راستای توسعه زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی باید به‌گونه‌ای باشد که با ایجاد واحدهای پایین‌دستی، محصولات پایه به محصولات نهایی تبدیل شود تا بیشترین ارزش افزوده در این صنعت ایجاد شود.

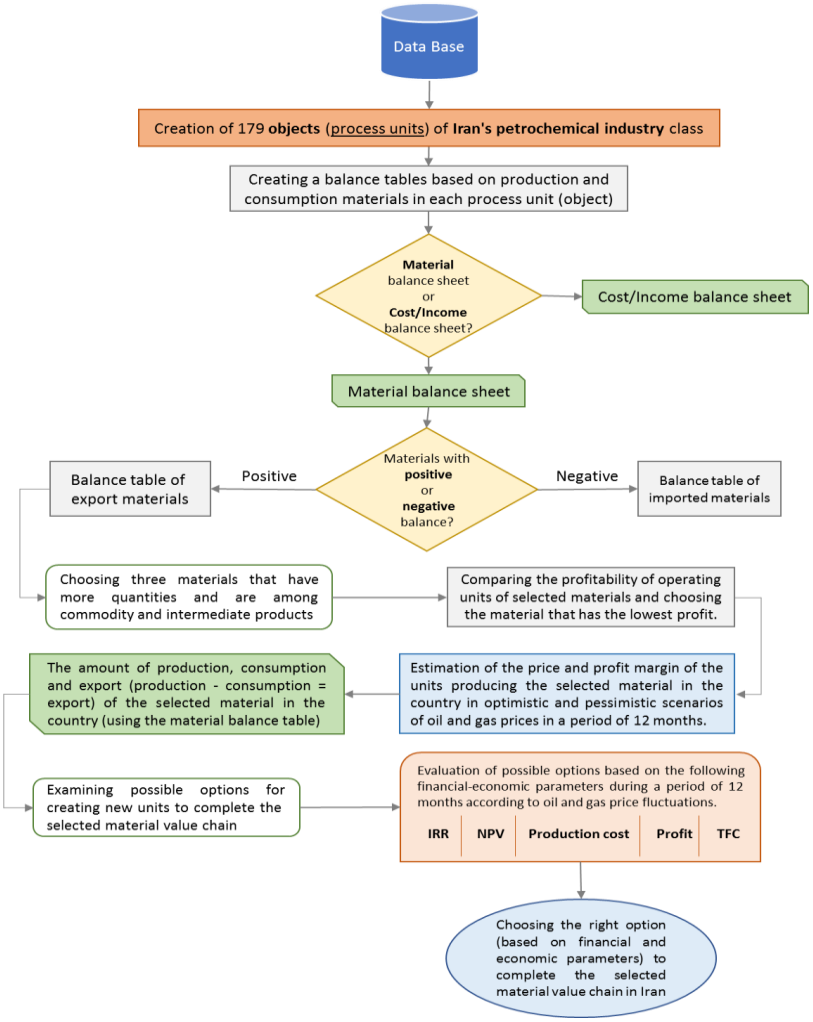
در ادامه، سودآوری سه واحد فرایندی فعال در ایران که تولیدکننده سه ماده انتخاب‌شده در مرحله قبل هستند، به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. درواقع در این مرحله، شبکه واحدهای فرایندی سه واحد منتخب ایجاد خواهد شد و سودآوری هر یک متناسب با تغییرات قیمت نفت و گاز در بازه‌های زمانی ۶ ماهه (۱۲ بازه ۶ ماهه) با یکدیگر مقایسه می‌شود.

در نهایت، واحد فرایندی که کمترین سودآوری و بیشترین میزان تولید در کشور را داشته باشد، به‌عنوان ماده منتخب برای سرمایه‌گذاری در زنجیره پایین‌دستی آن ماده انتخاب خواهد شد. در مرحله بعد، سه ماده از مشتقات پایین‌دستی زنجیره ارزش ماده که در ایران تولید نمی‌شوند یا میزان تولید آن‌ها در کشور دارای کمترین تقاضای داخلی است، انتخاب شده، بر اساس عوامل اقتصادی-مالی با یکدیگر مقایسه خواهند شد. واحدهای فرایندی تولیدکننده هر یک از این سه ماده در سامانه نرم‌افزاری مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده و در نهایت با یکپارچه‌سازی شبکه واحدهای فرایندی ایجادشده، شبکه قیمت مواد عوامل اقتصادی-مالی هر سه واحد در بازه‌های زمانی ۶ ماهه (۱۲ بازه ۶ ماهه) با توجه به نوسانات قیمت نفت و گاز با یکدیگر مقایسه خواهند شد. در نهایت، بهترین فرصت سرمایه‌گذاری مبتنی بر عوامل اقتصادی-مالی انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، تحلیل حساسیت عوامل مالی واحد منتخب نسبت به تغییرات ظرفیت عملیاتی واحد فرایندی انجام می‌شود. در این پژوهش، شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری، مبتنی بر شاخص‌های فنی و مالی انجام شده است. طبیعتاً سایر معیارهای اثرگذار در فرایند تصمیم‌سازی از جمله اثرات زیست‌محیطی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نیز قابلیت اضافه‌شدن به ساختار مدل‌سازی پیشنهادی را دارند و با گردآوری اطلاعات دقیقی از این حوزه‌ها، می‌توان این معیارها را نیز در ارزیابی و انتخاب فرصت‌های سرمایه‌گذاری به کمک سامانه پیشنهادی در نظر گرفت.



شکل ۱ مدل‌سازی و شبیه‌سازی یکپارچه فرایندی و اقتصادی-مالی شبکه واحدهای فرایندی و شبکه قیمت مواد شیمیایی

Figure 1 Integrated process and economic-financial modeling and simulation of the network of process units and the price network of chemicals



شکل ۲ مراحل ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی ایران

Figure 2 Steps to evaluate investment opportunities in the value chain of Iran's petrochemical industry

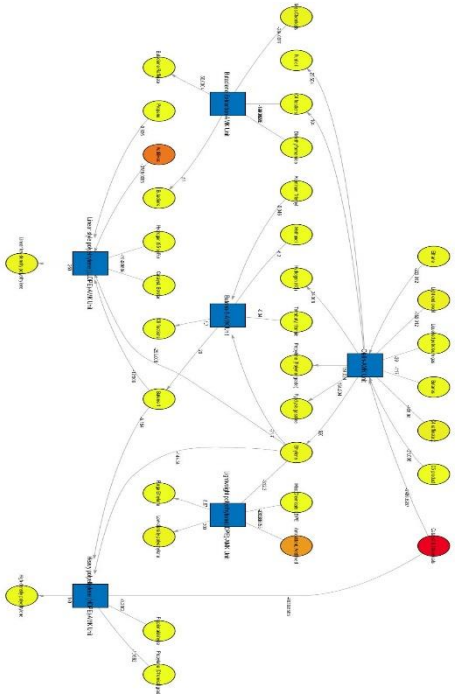
۳ نتایج و بحث

در این بخش به‌منظور اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌ساز ایجادشده، به‌عنوان نمونه عملیاتی، نتایج شبیه‌سازی واحدهای فرایندی پتروشیمی امیرکبیر با داده‌های واقعی منتشرشده در صورت‌های مالی این شرکت مقایسه شده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در این پژوهش مدل‌سازی فرایندی و مالی شبکه کل واحدهای فرایندی صنعت پتروشیمی ایران شامل ۱۹۴ واحد فرایندی به‌صورت یکپارچه ایجاد شده است، اما با توجه به محدودیت حجم محتوا در مقاله صرفاً برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌ساز، واحدهای فرایندی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر به‌عنوان نمونه در این بخش ارائه شده‌اند. در ادامه، مبتنی بر خروجی‌های شبیه‌ساز ایجادشده طی مراحل مشخص، شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری به‌منظور توسعه زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی در ایران بر اساس عوامل فرایندی و اقتصادی-مالی مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی خروجی‌ها و نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت نظام‌مند از یکپارچه‌سازی شبکه واحدهای فرایندی و شبکه قیمت مواد به‌دست آمده است. نتایج مورد بررسی در این بخش نمونه‌ایی از خروجی‌های شبیه‌ساز ایجاد شده است. خروجی‌های مختلف سامانه نرم‌افزاری شامل: تحلیل فنی، تحلیل‌های اقتصادی-مالی و تخمین قیمت واحدهای فرایندی و محصولات آن‌ها برای استفاده در تصمیم‌گیری‌ها در صنعت پتروشیمی در مطالعات موردی مختلف، تحلیل حساسیت شبکه واحدهای فرایندی نسبت به عوامل و متغیرهای فنی و اقتصادی مانند قیمت نفت، گاز، شاخص‌های مالی مرتبط با هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت و هزینه‌های تولید و ظرفیت عملیاتی است.

۳-۱ اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌ساز

به‌منظور ارزیابی خروجی‌های شبیه‌ساز، به‌عنوان نمونه شبکه واحدهای فرایندی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر با ۶ واحد فرایندی الفین، بوتادین، بوتن-۱، HDPE، LLDPE و LDPE شبیه‌سازی شده و با داده‌های مربوط به تولید و فروش شرکت پتروشیمی امیرکبیر در گزارش‌های سال مالی منتهی به ۱۳۹۹/۱۲/۳۰ منتشر شده در شرکت مدیریت فناوری بورس تهران (tsetmc) مقایسه شده است. در ابتدا طرحواره شبکه واحدهای فرایندی به‌عنوان یکی از خروجی‌های شبیه‌ساز با ساختار نشان‌داده‌شده در شکل ۳ تشکیل شده است. مقدار جریان (بر حسب هزار تن در سال) هر یک از مواد در شکل ۳ (واحد مربوط به مواد شیمیایی افزودنی و کاتالیزگر مصرفی بر خلاف واحد سایر مواد که هزار تن در سال است، واحد این ماده هزار دلار در سال است؛ بنابراین باوجود مقدار کم جریان این ماده، مقدار عددی آن نسبت به سایر مواد بیشتر شده و در نتیجه رنگ مربوط به این ماده پررنگ‌تر از سایر مواد است) روی خطوط درج شده است. ضخامت خطوط نشان‌دهنده مقدار جریان ماده تبادل‌شده است؛ به این معنی که هرچه ضخامت خطوط بیشتر باشد، مقدار تولید یا مصرف ماده شیمیایی مربوط بیشتر است. از طرفی شدت رنگ (پررنگ و کم‌رنگ بودن) مربوط به هر ماده (دایره‌ها) نشان‌دهنده مقدار تولید یا مصرف ماده شیمیایی مربوط است.

جداول موازنه مواد شبکه واحدهای فرایندی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر مطابق جدول ۱ در شبیه‌ساز ایجاد شده است. اعداد منفی و مثبت به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار مصرف و تولید ماده در هر یک از واحدهای فرایندی است. در ستون دوم نیز مقدار کل مواد تولیدی (اعداد مثبت) و مصرفی (اعداد منفی) در کل مجتمع پتروشیمی امیرکبیر آورده شده است. این جدول‌ها مبنای بسیاری از تصمیمات مدیران واحدهای فرایندی بوده و به تنهایی و قبل از اعمال محاسبات بیشتر، خروجی‌های ارزشمندی به شمار می‌آیند.



شکل ۳ طرحواره شبکه واحدهای فرایندی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر

Figure 3 Schematic of the network of process units of Amirkabir Petrochemical Complex

جدول ۱ جدول موازنه شبکه واحدهای فرایندی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر (برخی از مواد شیمیایی افزودنی و کاتالیزگرهای مصرفی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر از این جدول حذف شده است.)

Table 1 The balance table of the network of process units of Amirkabir Petrochemical Complex (some additive chemicals and consumable catalysts of Amirkabir Petrochemical Complex have been removed from this table.)

ROW	Unit	Complex	Olefin Unit	Butadiene Extraction Unit	Butene-1 Unit	HDPE Unit	LLDPE Unit	LDPE Unit
Nominal Capacity	KTPA		520	51	20	140	260	300
Butadiene	KTPA	51		51				
Butadiene Raffinate	KTPA	50.0004		50.0004				
Butanes	KTPA	-117	-117					
Butene-1	KTPA	2.3			20	-5.194	-12.506	
C4 fractions	KTPA	-0.9988	104	-104.9988				
C4 raffinate 2	KTPA	-408.98	-408.98					
C5 product	KTPA	-21.008	-21.008					
C6 fractions	KTPA	1.7			1.7			
Ethane	KTPA	-233.012	-233.012					
Ethylene	KTPA	-213.348	520		-21.7	-144.34	-255.008	-312.3
Fuel oil	KTPA	23.504	23.504					
High-density polyethylene	KTPA	140				140		
Hydrogen (KG)	KTPA	34.008	34.008					
Light end credit	KTPA	-350.012	-350.012					
Linear low-density polyethylene	KTPA	260					260	
Liquefied petroleum gas	KTPA	-39	-39					
Low-density polyethylene	KTPA	300						300
Methanol	KTPA	-6.3			-6.3			
Propane	KTPA	-0.936					-0.936	
Propylene (Chemical grade)	KTPA	-1.1662				-1.1662		
Propylene (Polymer grade)	KTPA	154.024	154.024					
Pyrolysis gasoline	KTPA	134.004	134.004					

به‌منظور اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌ساز در جدول ۲ به‌عنوان نمونه میزان تولید محصولات پتروشیمی امیرکبیر بر اساس میزان تولید واقعی محصولات در سال ۱۳۹۹ با خروجی‌های شبیه‌ساز (محاسبه میزان تولید محصولات) مقایسه شده است. در این راستا ظرفیت عملیاتی هر یک از ۸ واحد فرایندی مجتمع پتروشیمی امیرکبیر با توجه با ظرفیت‌های درج شده در صورت‌های مالی سال مالی منتهی به ۱۳۹۹/۱۲/۳۰ پتروشیمی امیرکبیر به‌عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده می‌شود [۲۵]. سپس میزان تولید سایر محصولات (و مواد اولیه مصرفی) محاسبه شده و مطابق جدول ۲ در خروجی نمایش داده می‌شود. بر اساس نتایج جدول ۲، متوسط خطای شبیه‌ساز در برآورد میزان تولید محصولات اصلی ۳/۶۳ درصد و محصولات جانبی ۲۲ درصد برآورد شده است.

عمده اختلاف خروجی‌های شبیه‌ساز با داده‌های مرجع، در برآورد مقدار تولید برخی از محصولات جانبی از جمله هیدروژن، بنزین گرماکافت، پالیده (Raffinate) واحد بوتادی‌ان و سوخت مایع است که عمدتاً به‌دلیل متغیر بودن سیاست‌های فروش محصولات جانبی در واحد بازرگانی، متغیر بودن کیفیت محصول متناسب با شرایط عملیاتی، متغیر بودن مشخصات و ترکیب درصد خوراک دریافتی در بازه‌های زمانی مختلف و همچنین عدم فروش برخی از محصولات جانبی و مصرف آن‌ها به‌عنوان سوخت در برخی از واحدهای فرایندی است. در نتیجه در صورت‌های مالی اظهارشده توسط شرکت مقدار فروش محصولات جانبی متناسب با ظرفیت اسمی تولید محصول تفاوت خواهد داشت.

جدول ۲ مقایسه خروجی‌های شبیه‌ساز با مقدار تولید و فروش واقعی شرکت پتروشیمی امیرکبیر، منتشرشده در صورت‌های مالی سال مالی منتهی به ۱۳۹۹/۱۲/۳۰ [۲۵]

Table 2 Comparing simulator outputs with actual production and sales volumes of Amirkabir Petrochemical Company, published in the financial statements of the financial year ending 12/30/2019 [25]

Product	Simulator Nominal Capacity	Nominal Capacity	Simulator Error	Simulator Operational Capacity	Operational Capacity	Simulator Error
Linear Low Density Polyethylene	260	260	0 %	264.123	264.123	0 %
Heavy polyethylene	140	140	0 %	128.613	128.613	0 %
Propylene	154.024	154	0.016 %	103.876	109.524	5.157 %
Pyrolysis gasoline	134.004	134.200	0.146 %	90.374	120.485	24.991 %
Low Density Polyethylene	300	300	0 %	235.337	235.337	0 %
Butadiene	51	51	0 %	27.631	27.631	0 %
Raffinate butadiene	50.0004	52	3.848 %	27.089	41.959	35.439 %
Hydrogen	34.0080	34	0.024 %	22.935	20.733	-10.621 %
Ethylene	520	520	0 %	350.698	350.698	0 %
Butene-1	20	20	0 %	20.323	20.323	0 %
C4-section	104	104.600	0.574 %	70.139	71.263	1.577 %
Liquid fuel	23.5040	23.400	-0.444 %	15.851	19.715	19.715 %
Total	**1,790.5404**	**1,793.200**	-	**1,356.989**	**1,410.404**	-

۳-۲ تحلیل و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری

بر اساس جدول موازنه مواد و ظرفیت اسمی واحدهای فرایندی سه ماده متانول، آمونیاک و اتیلن‌دی‌کلراید (EDC) به‌ترتیب با مقدار ۱۱ میلیون ۸۷۹ هزار تن، ۳ میلیون و ۱۰۷ هزار تن و ۳۲۴ هزار تن در سال بیشتر از میزان نیاز شبکه واحدهای فرایندی در صنعت پتروشیمی تولید می‌شود. متانول و آمونیاک جزء محصولات پایه و اتیلن‌دی‌کلرید جزء محصولات میانی در صنعت پتروشیمی محسوب می‌شود. برای مقایسه سودآوری تولید این سه محصول به‌عنوان نمونه سه واحد فرایندی فعال که تولیدکننده متانول، آمونیاک و اتیلن‌دی‌کلرید در ایران هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. حاشیه سود (Profit Margin) (اختلاف قیمت تمام‌شده (Product Value) و قیمت محصول در بازار (Product Cost)) این واحدها بر اساس عوامل فرایندی و اقتصادی-مالی لحاظ‌شده در شبیه‌ساز طی ۱۲ بازه زمانی ۶ ماهه بر اساس روندی مشخص برای تغییرات قیمت نفت و گاز با یکدیگر مقایسه شده است. قیمت محصولات و مواد اولیه مصرفی در واحدهای فرایندی نیز بر اساس شبیه‌سازی شبکه قیمت مواد با روند مشخص قیمت نفت و گاز تخمین زده شده است.

جدول ۳ مقایسه حاشیه سود واحدهای فرایندی تولیدکننده آمونیاک، متانول و اتیلن‌کلرید

(واحد قیمت نفت: $/Barrel ، واحد قیمت گاز: $/Nm^3$ ($/Mmbtu=0.0353$/Nm^3$)

Table 3 Comparison of profit margin of process units producing ammonia, methanol and ethylene chloride

(Oil price unit: $/Barrel, Gas price unit: $/Mmbtu=0.0353$/Nm3)

Oil Price Trend	73.47	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Ammonia Unit / Capacity: 680 KTPA / Pardis Petrochemical Co. (Unit: ¢/KG)												
Product Value	24.52	24.22	23.25	23.54	24.10	24.64	23.90	24.21	23.40	22.35	22.51	21.77
Product Cost	49.85	55.75	74.73	69.11	58.17	47.51	62.08	56.07	71.86	92.26	89.16	103.7
Profit Margin	**25.32**	**31.52**	**51.47**	**45.57**	**34.06**	**22.86**	**38.17**	**31.86**	**48.46**	**69.91**	**66.64**	**81.97**
Methanol Unit / Capacity: 1000 KTPA / Fanavaran Petrochemical Co. (Unit: ¢/KG)												
Product Value	12.56	13.25	15.46	14.81	13.53	12.29	13.99	13.29	15.13	17.51	17.14	18.84
Product Cost	16.00	16.79	18.11	18.57	18.75	14.46	17.76	19.30	22.49	25.72	26.11	29.59
Profit Margin	**3.44**	**3.54**	**2.64**	**3.76**	**5.22**	**2.17**	**3.78**	**6.01**	**7.37**	**8.21**	**8.97**	**10.74**
Ethylene dichloride Unit / Capacity: 890 KTPA / Arvand Petrochemical Co. (Unit: ¢/KG)												
Product Value	76.67	76.69	76.51	76.72	77.00	76.43	76.73	77.16	77.41	77.56	77.70	78.03
Product Cost	189.1	189.2	188.0	189.4	191.3	187.5	189.5	192.2	193.8	194.8	195.8	197.9
Profit Margin	**112.7**	**112.5**	**111.5**	**112.7**	**114.2**	**111.1**	**112.7**	**115.1**	**116.4**	**117.3**	**118.1**	**119.9**

مطابق جدول ۳ حاشیه سود تولید هر کیلوگرم آمونیاک، متانول و EDC متناسب با تغییرات قیمت نفت و گاز در بازه زمانی مشخص محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. بر این اساس، حاشیه سود تولید هر کیلوگرم متانول معادل ۳/۴۴ تا ۱۰/۷۴ سنت به ازای هر کیلوگرم است که نسبت به دو محصول آمونیاک و EDC حاشیه سود به مراتب پایین‌تری دارد. بنابراین در راستای اولویت‌بندی شناسایی خوراک‌های در دسترس برای شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری محتمل در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی در ایران، با هدف خلق بیشترین ارزش افزوده، زنجیره ارزش مبتنی بر خوراک متانول از اولویت بالاتری برخوردار است. در ادامه، سه محصولی که از مشتقات پایین‌دستی متانول هستند و در ایران تولید نمی‌شوند یا تقاضای کمی در بازار داخلی ایران دارند، به‌عنوان فرصت‌های سرمایه‌گذاری محتمل از منظر شاخص‌های مالی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است.

در حال حاضر ایران یکی از بزرگترین تولیدکنندگان و صادرکنندگان متانول در جهان است. با توسعه و بهره‌برداری از فازهای مختلف مجتمع گازی پارس جنوبی در سال‌های گذشته و افزایش ظرفیت تولید گاز طبیعی ارزان‌قیمت در کشور، احداث واحدهای تولیدکننده متانول در کشور افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در حال حاضر، ظرفیت بر اساس جدول موازنه مواد در شبیه‌ساز تولید متانول در کشور حدود ۱۲ میلیون و ۳۰۵ هزار تن در سال است که حدود ۳/۵ درصد از آن در واحدهای پایین‌دستی پتروشیمی‌های داخل کشور از جمله واحدهای اسید استیک، MTBE و فرمالدهید مصرف می‌شود و ۹۶/۵ درصد از آن به سایر کشورها از جمله چین صادر می‌شود [۱].

از طرفی در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش قیمت گاز طبیعی، حاشیه سود واحدهای تولیدکننده متانول به طرز چشم‌گیری کاهش داشته است. از این‌رو شرکت‌های تولیدکننده متانول و همچنین دولت به‌دنبال ارائه فرصت‌های سرمایه‌گذاری برای توسعه زنجیره ارزش متانول در کشور به‌منظور جلوگیری از خام‌فروشی متانول و همچنین خلق بیشترین ارزش افزوده از منابع گاز طبیعی هستند. ازاین‌رو بر اساس شبیه‌ساز ایجادشده، مطالعه موردی وضعیت واحدهای فرایندی تولیدکننده متانول در کشور و همچنین برخی از فرصت‌های سرمایه‌گذاری در راستای توسعه زنجیره ارزش متانول در کشور با توجه به روند تغییرات قیمت نفت و گاز انجام شده است. مطابق جدول ۴، سودآوری و حاشیه سود دو واحد فرایندی تولیدکننده متانول در ایران (پتروشیمی فناوران و کاوه) به‌عنوان نمونه با توجه به روند تغییرات قیمت متانول طی بازه‌های زمانی ۶ ماهه (۱۲ بازه ۶ ماهه) متناسب با تغییرات قیمت نفت و گاز در مطالعه موردی اولیه (افزایش تدریجی قیمت نفت و گاز) در سامانه نرم‌افزاری محاسبه شده است.

جدول ۴ بررسی سودآوری و حاشیه سود پتروشیمی فناوران و کاوه بر اساس روند تغییرات قیمت نفت و گاز

Table 4 Investigating the profitability and profit margins of Fanavaran and Kaveh petrochemicals based on the scenario of oil and gas price changes

Oil Price Trend	73.47	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Methanol Cost	**24.52**	**24.22**	**23.25**	**23.54**	**24.10**	**24.64**	**23.90**	**24.21**	**23.40**	**22.35**	**22.51**	**21.77**
Methanol Unit / Capacity: 2,310 KTPA / Kaveh Petrochemical Co. (Unit: ¢/KG)												
Product Value	12.83	13.37	15.12	14.60	13.60	12.61	13.96	13.40	14.86	16.74	16.45	17.79
Margin	3.176	3.418	2.984	3.967	5.155	1.845	3.808	5.895	7.637	8.981	9.663	11.79
Profit (10 Million $/yr)	17.08	17.34	15.34	17.90	21.22	14.13	17.90	23.04	26.24	28.27	30.01	34.16
Methanol Unit / Capacity: 1000 KTPA / Fanavaran Petrochemical Co. (Unit: ¢/KG)												
Product Value	12.56	13.25	15.46	14.81	13.53	12.29	13.99	13.29	15.13	17.51	17.14	18.84
Margin	3.443	3.542	2.645	3.765	5.220	2.170	3.777	6.010	7.367	8.213	8.971	10.74
Profit (10 Million $/yr)	8.3	8.4	7.5	8.62	10.08	7.03	8.64	10.87	12.23	13.07	13.83	15.60

بر اساس جدول موازنه شبکه واحدهای فرایندی در ایران در بین مشتقات مختلف متانول در حال حاضر واحدهای فرایندی اتانول سنتزی، متیل‌آمین و متانول به الفین (MTO) به‌عنوان واحدهای فرایندی پایین‌دستی زنجیره ارزش متانول در کشور وجود ندارد و در این پژوهش به‌عنوان فرصت‌های سرمایه‌گذاری محتمل برای توسعه زنجیره ارزش متانول در ایران مطرح شده است. از این رو با جمع‌آوری و ثبت داده و اطلاعات سه واحد فرایندی مذکور در پایگاه داده و با استفاده از خروجی‌های سامانه نرم‌افزاری، عوامل فرایندی و اقتصادی-مالی سه واحد فرایندی مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. محصولات اصلی واحد MTO، الفین‌های سبک شامل اتیلن و پروپیلن هستند که دو محصول پایه راهبردی در صنعت پتروشیمی محسوب می‌شوند. در حال حاضر، یکی از نقاط ضعف توسعه زنجیره ارزش در صنعت پتروشیمی ایران، عدم تقارن در توسعه زنجیره ارزش پروپیلن در کشور است؛ به‌طوری‌که در حال حاضر حدود ۹۶ درصد از پروپیلن تولیدشده در کشور برای تولید پلی‌پروپیلن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴]؛ درصورتی‌که سایر محصولات پایین‌دستی زنجیره ارزش پروپیلن محصولات دارای تقاضا در بازار کشور و از منظر تولید، محصولاتی با ارزش افزوده بالا هستند. زنجیره ارزش اتیلن نیز برای تولید طیف گسترده‌ای از محصولات پلیمری از منظر سرمایه‌گذاری بسیار جذاب است. بنابراین یکی از عوامل تأثیرگذار در جذابیت سرمایه‌گذاری در واحدهای MTO در ایران، تولید دو محصول پایه اتیلن و پروپیلن است که محصولات دارای زنجیره ارزش با ارزش افزوده بالا را توسعه می‌دهد. در جدول ۵، متناسب با ظرفیت اسمی مبنا، حجم سرمایه‌گذاری هر یک از واحدهای فرایندی MTO، MTE و Methylamine با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۵ مقایسه حجم سرمایه‌گذاری ثابت واحدهای منتخب

Table 5 Comparison of fixed investment volume of selected units

Methanol to Olefins (MTO) Unit / Capacity: 250 KTPA / Unit: Million Doller					
TFC	550.396	**BLI**	230.568	**Off Site**	319.827
Methanol to Ethanol (MTE) Unit / Capacity: 100 KTPA / Unit: Million Doller					
TFC	105.146	**BLI**	79.625	**Off Site**	25.521
Methylamine Unit / Capacity: 50 KTPA / Unit: Million Doller					
TFC	76.188	**BLI**	30.862	**Off Site**	45.325

در جدول ۶، شاخص نرخ بازگشت داخلی سرمایه‌گذاری (IRR) سه واحد فرایندی مورد بررسی طی بازه‌های زمانی ۶ ماهه (۱۲ بازه ۶ ماهه) با نوسانات قیمت نفت و گاز با یکدیگر مقایسه شده است. با افزایش قیمت نفت و گاز میزان IRR واحد MTE و متیل‌آمین افزایش و مقدار IRR واحد MTO کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه سودآوری واحد MTO نسبت به دو واحد فرایندی دیگر حساسیت بالاتری نسبت به قیمت خوراک (متانول) دارد.

جدول ۶ مقایسه نرخ بازگشت داخلی سرمایه‌گذاری (IRR) واحدهای منتخب

Table 6 Comparison of the internal rate of return on investment (IRR) of selected units

Oil Price Trend	73.4	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Internal Rate of Return (IRR) (Percentage %)												
MTO	32%	32%	33%	32%	30%	33%	32%	29%	28%	27%	27%	25%
MTE	14%	16%	18%	19%	20%	10%	17%	21%	26%	31%	32%	36%
Methylamine	4%	7%	14%	12%	9%	3%	10%	8%	15%	21%	20%	24%

در جدول ۷، شاخص ارزش خالص فعلی (NPV) سه واحد فرایندی با یکدیگر مقایسه شده است. حساسیت NPV نسبت به قیمت نفت و گاز کمتر از حساسیت شاخص IRR است. میزان شاخص NPV نیز متناسب با افزایش قیمت نفت و گاز افزایش پیدا می‌کند. مطابق جدول ۷، مقدار NPV واحد MTO همواره بیشتر از واحد MTE و متیل‌آمین است.

جدول ۷ مقایسه ارزش خالص فعلی (NPV) واحدهای منتخب
Table 7 Comparison of net present value (NPV) of selected units

Oil Price Trend	73.47	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Net Present Value (NPV) (Unit: Billion $ Per Year)												
MTO	0.718	0.719	0.779	0.723	0.647	0.772	0.715	0.610	0.566	0.549	0.512	0.448
MTE	0.034	0.049	0.070	0.083	0.091	0.001	0.068	0.104	0.168	0.230	0.240	0.310
Methylamine	-0.02	-0.01	0.025	0.015	-0.006	-0.03	0.000	-0.009	0.028	0.074	0.069	0.104

در جدول ۸ تا جدول ۱۰، تغییرات کلیه هزینه‌های تولید و در نهایت اختلاف بین قیمت تمام‌شده محصول نهایی (Product Value) (با احتساب ۲۵ درصد حاشیه سود تولیدکننده) و قیمت فروش محصول (Product Price) سه واحد فرایندی موردنظر متناسب با روند قیمت نفت و گاز نشان داده شده است. سایر هزینه‌های تولید از جمله هزینه نیروی انسانی، خدمات جانبی و کاتالیزگرها در طی بازه زمانی موردنظر ثابت در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حاشیه سود واحد MTE از ۱۴۴/۵- دلار به ۲۹۲/۲+ افزایش پیدا می‌کند. در واحدهای فرایندی عمده هزینه‌های تولید (حدود ۸۰ درصد) مربوط به هزینه‌های مواد اولیه است در نتیجه قیمت خوراک تأثیر زیادی بر توجیه‌پذیری اقتصادی واحدهای فرایندی دارد.

جدول ۸ هزینه‌های تولید واحد MTO
Table 8 Production costs of MTO unit

Oil Price Trend	73.47	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Methanol to Olefins (MTO) Unit / Capacity: 250 KTPA / Unit: ¢/KG												
Feedstocks Costs	95.09	99.76	107.5	110.3	111.4	85.90	105.5	114.6	133.6	152.8	155.1	175.7
By Products Costs	-96	-100	-112	-111	-107	-90.7	-106	-107	-123	-141	-140	-156
Catalysts Chemicals Costs	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46
Utilities Costs	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22	18.22
Variable Costs	26.74	26.69	22.69	26.59	31.89	22.83	27.06	34.53	37.89	39.34	41.94	46.70
Labor Costs	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Total Direct Costs	29.45	29.40	25.39	29.30	34.59	25.54	29.77	37.24	40.60	42.05	44.65	49.40
Plant Cash Costs	32.81	32.77	28.76	32.67	37.96	28.90	33.13	40.61	43.96	45.42	48.02	52.77
Plant Gate Costs	38.45	38.41	34.40	38.31	43.60	34.54	38.77	46.25	49.60	51.06	53.66	58.41
Net Production Costs	40.61	40.57	36.43	40.46	45.92	36.58	40.94	48.65	52.11	53.60	56.29	61.19
Product Value	71.95	71.90	67.77	71.79	77.25	67.92	72.28	79.98	83.44	84.94	87.62	92.52
Product Price	94.55	94.61	93.98	94.73	95.70	93.72	94.75	96.23	97.09	97.61	98.12	99.25

جدول ۹ هزینه‌های تولید واحد MTE
Table 9 Production costs of MTE unit

Oil Price Trend	73.47	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Methanol to Ethanol (MTE) Unit / Capacity: 100 KTPA / Unit: ¢/KG												
Feedstocks Costs	14.79	15.71	17.76	17.80	17.32	13.50	16.80	17.61	20.89	24.45	24.58	28.00
By Products Costs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Catalysts Chemicals Costs	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97
Utilities Costs	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24
Variable Costs	36.01	36.93	38.98	39.01	38.53	34.72	38.01	38.83	42.11	45.67	45.79	49.21
Labor Costs	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
Total Direct Costs	39.09	40.01	42.06	42.09	41.62	37.80	41.10	41.91	45.19	48.75	48.87	52.29
Plant Cash Costs	42.19	43.11	45.15	45.19	44.71	40.90	44.19	45.00	48.29	51.85	51.97	55.39
Plant Gate Costs	46.92	47.84	49.89	49.92	49.44	45.63	48.92	49.73	53.02	56.58	56.70	60.12
Net Production Costs	49.18	50.13	52.24	52.28	51.79	47.85	51.25	52.09	55.47	59.14	59.27	62.79
Product Value	75.47	76.42	78.53	78.56	78.07	74.14	77.53	78.37	81.76	85.43	85.55	89.08
Product Price	64.02	67.16	72.42	74.28	75.00	57.83	71.06	77.19	89.98	102.8	104.4	118.3

جدول ۱۰ هزینه‌های تولید واحد Methylamine
Table 10 Production costs of methylamine unit

Oil Price Trend	73.47	73.95	68.5	75.03	83.57	66.18	75.21	88.15	95.72	100.2	104.6	114.6
Gas Price Trend	3.914	4.377	5.867	5.426	4.567	3.73	4.874	4.402	5.642	7.244	7	8.145
Methylamine Unit / Capacity: 50 KTPA / Unit: ¢/KG												
Feedstocks Costs	42.53	46.07	55.83	54.09	49.72	39.46	50.04	49.57	60.53	73.45	72.68	83.49
By Products Costs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Catalysts Chemicals Costs	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Utilities Costs	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39
Variable Costs	59.42	62.96	72.72	70.98	66.62	56.35	66.94	66.47	77.42	90.35	89.57	100.3
Labor Costs	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Total Direct Costs	61.81	65.35	75.10	73.37	69.00	58.74	69.32	68.85	79.80	92.73	91.96	102.7
Plant Cash Costs	65.62	69.16	78.92	77.18	72.82	62.55	73.13	72.67	83.62	96.55	95.77	106.5
Plant Gate Costs	72.48	76.02	85.77	84.04	79.67	69.41	79.99	79.52	90.47	103.4	102.6	113.4
Net Production Costs	75.90	79.55	89.61	87.81	83.32	72.73	83.64	83.16	94.45	107.7	106.9	118.1
Product Value	113.9	117.6	127.7	125.9	121.4	110.8	121.7	121.2	132.5	145.8	145.0	156.2
Product Price	81.86	89.33	110.9	106.2	95.67	76.42	97.61	94.66	116.8	143.7	141.3	162.9

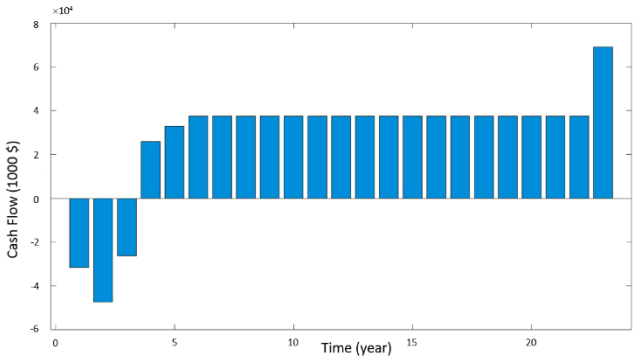
با توجه به شاخص‌های مالی مورد بررسی و تغییرات این شاخص‌ها متناسب با تغییرات قیمت نفت و گاز، واحد تولید اتانول سنتزی از متانول از شاخص‌های مالی نسبتاً مطلوب‌تری برخوردار است و به‌عنوان واحد منتخب برای توسعه زنجیره ارزش متانول در ایران مطرح شده است. ازاین‌رو تحلیل حساسیت عوامل مالی (سودآوری، IRR و NPV) واحد فرایندی MTE نسبت به تغییرات ظرفیت عملیاتی در جدول ۱۱ نشان داده شده است. متناسب با خروجی‌های شبیه‌ساز هر سه عامل مالی مورد بررسی با کاهش ظرفیت عملیاتی واحد نسبت به ظرفیت اسمی، کاهش پیدا خواهند کرد. بنابراین اقتصاد واحد موردنظر حساسیت بالایی نسبت به ظرفیت عملیاتی تولید دارد.

جدول ۱۱ تحلیل حساسیت عوامل مالی نسبت به تغییرات ظرفیت عملیاتی

Table 11 Analyzing the sensitivity of financial parameters to operational capacity changes

Nominal Capacity (KTPA)	100	100	100	100	100	100
Operating Capacity (KTPA)	**100**	**95**	**90**	**85**	**80**	**75**
Profit (10 Million dollars per yr)	4.846	4.604	4.362	4.120	3.877	3.635
IIR (%)	0.308	0.297	0.285	0.272	0.260	0.247
NPV (Billion dollars per yr)	0.230	0.214	0.197	0.181	0.165	0.148

مطابق جدول ۵، کل هزینه سرمایه‌گذاری ثابت موردنیاز برای ساخت واحد MTE حدود ۱۰۵ میلیون و ۱۴۶ هزار دلار برآورد می‌شود که طی دوره سه‌ساله هزینه می‌شود. بعد از سه سال، عملیات پیوسته مجتمع آغاز شده و تولید به‌مدت ۲۰ سال انجام می‌گیرد. ارزش قراضه طرح بعد از ۲۰ سال تولید، ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. جریان نقدینگی پروژه در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر اساس جریان نقدینگی محاسبه‌شده، ارزش خالص فعلی ۲۳۰ میلیون و ۲۳ هزار دلار و نرخ بازده داخلی ۳۰/۸ درصد به‌دست آمده است.



شکل ۴ جریان نقدینگی واحد فرایندی تبدیل متانول به اتانول (MTE)

Figure 4 Cash flow of methanol to ethanol (MTE) process unit

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی و تحلیل شبه‌پایا فرایندی و اقتصادی-مالی زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی ایران از دیدگاه کلان با تعریف معیارهای مشخص برای شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در طول زنجیره ارزش این صنعت انجام شده است. ۱۹۴ واحد فرایندی فعال در صنعت پتروشیمی ایران با ایجاد پایگاه داده، با نگاهی شیءگرا همراه با نحوه ارتباط بین واحدهای فرایندی با در نظر گرفتن تمامی حالت‌های ممکن برای تبادل مواد و خدمات جانبی بین واحدها مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است یکنواختی و باریکی مطلوبی برخوردار است. این ویژگی‌ها موجب بهبود تراکم و همگنی ریزساختار غشاهای تولیدی شده است.

بعد از ایجاد بستر مناسب برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه واحدهای فرایندی صنعت پتروشیمی ایران، بر اساس مطالعات انجام‌شده و گردآوری داده‌های قیمتی، روند تغییرات قیمت محصولات پتروشیمیایی در پایگاه داده ثبت و با استفاده از روش رگرسیون خطی، قیمت هر یک از مواد شیمیایی با توجه به توالی قرارگیری محصولات در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی و نحوه تأثیرپذیری قیمت هر ماده از ماده پایین‌دستی آن با استفاده از مدلی خطی تابعی از قیمت نفت خام و گاز طبیعی تخمین زده می‌شود. در نهایت، مبتنی بر خروجی‌های شبیه‌ساز، شناسایی و ارزیابی فرصت‌های سرمایه‌گذاری معتبر، مبتنی بر عامل تأمین پایدار خوراک، تحلیل شاخص‌های فرایندی و اقتصادی-مالی و تبدیل محصولات پایه به محصولات با ارزش افزوده بالاتر در جهت توسعه زنجیره ارزش در صنعت پتروشیمی ایران پیشنهاد شده است. در توسعه مدل شبکه واحدهای فرایندی، کاهش بار محاسباتی و در نتیجه افزایش سرعت محاسبات بسیار مورد توجه بوده است. ازاین‌رو، قابلیت به‌روزرسانی داده‌ها و تحلیل در زمان واقعی برای کاربردهایی نظیر بهینه‌سازی بهنگام (RTO) وجود دارد.

مراجع

1. National Petrochemical Company of Iran, Iran's Petrochemical Industry Yearbook, Planning and Development Department, NPC, Tehran, 91-101, 2022.
2. Hajiebrahimi Farashah V., Sazvar Z. and Hosseini S.H., A Dynamic Model to Formulate Effective Capacity Expansion Policies in Iranian Petrochemical Industry to Complete the Value Chain, *Energy Policy*, 148, 1-12, 2021.
3. Bok J.K., Lee H. and Park S., Robust Investment Model for Long-Range Capacity Expansion of Chemical Processing Networks Under Uncertain Demand Forecast Scenarios, *Computers & Chemical Engineering*, 22, 1037-1049, 1998.
4. Graves S., Kletter D. and Hetzel W., A Dynamic Model for Requirements Planning with Application to Supply Chain Optimization, *Operations Research*, 46, 1-4, 1998.
5. Pitty S., Li W., Adhitya A., Srinivasan R. and Karimi I. A., Decision Support for Integrated Refinery Supply Chains: Part 1. Dynamic Simulation, *Computers & Chemical Engineering*, 32, 2767-2786, 2008.
6. Koo L. Y., Adhitya A., Srinivasan R. and Karimi I. A., Decision Support for Integrated Refinery Supply Chains: Part 2. Design And Operation, *Computers & Chemical Engineering*, 32, 2787-2800, 2008.
7. Biswas S. and Narahari Y., Object Oriented Modeling and Decision Support for Supply Chains, *European Journal of Operational Research*, 153, 704-726, 2004.
8. Neiro S.M.S. and Pinto J.M., A General Modeling Framework for the Operational Planning of Petroleum Supply Chains, *Computers & Chemical Engineering*, 28, 871-896, 2004.
9. Jia Z. and Ierapetritou M., Efficient Short-term Scheduling of Refinery Operations based on a Continuous Time Formulation, *Computers & Chemical Engineering*, 28, 1001-1019, 2004.
10. Guajardo M., Kylinger M. and Rönnqvist M., Speciality Oils Supply Chain Optimization: From a Decoupled to an Integrated Planning Approach, *European Journal of Operational Research*, 229, 540-551, 2013.
11. Bok J.K., Grossmann I.E. and Park S., Supply Chain Optimization in Continuous Flexible Process Networks, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39, 1279-1290, 2000.
12. Sahinidis N.V., Grossmann I.E., Fornari R.E. and Chathrathi M., Optimization Model for Long Range Planning in the Chemical Industry, *Computers & Chemical Engineering*, 13, 1049–1063, 1989.
13. Dempster M.A.H., Hicks Pedrón N., Medova E.A. and Scott E.J., Planning Logistics Operations in the Oil Industry,

Operational Research Society, 51,1271-1288, 1999.
14. Fuller D.B., Ferreira Filho V.J.M. and de Arruda E.F., Oil Industry Value Chain Simulation with Learning Agents, *Computers & Chemical Engineering*, 111, 199-209, 2018.
15. Jiménez A., Rudd D.F. and Meyer R.R., A Study of the Development of a Mexican Petrochemical Industry Using Mixed-Integer Programming, *Computers & Chemical Engineering*, 6, 219–229,1982.
16. Gürkan T. and Kartal N., Model for the Development of the Turkish Petrochemical Industry, *Engineering Costs and Production Economics*, 18,145–157, 1989.
17. Hosseini S.H. and Shakouri H.G., A Study on the Future of Unconventional Oil Development Under Different Oil Price Scenarios: A System Dynamics Approach, *Energy Policy*, 91, 64–74, 2016.
18. Daneshzand F., Amin-Naseri M.R., Asali M., Elkamel A. and Fowler M., A System Dynamics Model for Optimal Allocation of Natural Gas to Various Demand Sectors, *Computers & Chemical Engineering*, 128, 88–105, 2019.
19. Valizadeh J., Sadeh E., Javanmard H. and Davodi H., The Effect of Energy Prices on Energy Consumption Efficiency in the Petrochemical Industry in Iran, *Alexandria Engineering*, 57, 2241–2256, 2018.
20. van den Heever S.A. and Grossmann I.E., Disjunctive Multiperiod Optimization Models for Process Networks, Department of Chemical Engineering Carnegie Mellon University, 1, 1-6, 2000.
21. Kannegiesser M. and Günther HO., An Integrated Optimization Model for Managing the Global Value Chain of a Chemical Commodities Manufacturer, *Operational Research Society*, 62, 711-721, 2017.
22. Türkay M. and Grossmann I.E., Logic-Based MINLP Algorithms for the Optimal Synthesis of Process Networks, *Computers & Chemical Engineering*, 20, 959–978, 1996.
23. Graves S.C., Kletter D.B., William B. Hetzel W.B., A Dynamic Model for Requirements Planning with Application to Supply Chain Optimization, *Operations Research*, 46, 35-49, 1998.
24. National Petrochemical Company, https://www.nipc.ir, Available Dec. 2023.
25. Securities and Exchange Organization of Iran, Kodal Publishers Information System, https://www.codal.ir, Available Nov. 2023.