

Technical and Economic Evaluation of Linear Low Density Polyethylene Production

Zohre Taherkhani*

Associate Professor of Polymer Engineering, Chemical Process Design Research Group,
ACECR-Tehran Organization, Tehran, Iran

Abstract

Linear low-density polyethylene (LLDPE) is one of the most important engineering thermoplastics due to its favorable combination of mechanical properties, good processability, and tunable molecular microstructure, which has secured its prominent position in polymer industries. LLDPE is primarily produced via copolymerization of ethylene with α -olefins in the presence of Ziegler–Natta or metallocene catalysts. In this study, a feasibility assessment of an LLDPE production plant with a nominal capacity of 400,000 tons/year was carried out. The estimated fixed capital investment, operating cost, and annual profit were 242.7, 363.7, and 156.3 million USD, respectively. Economic evaluation indicators, including an internal rate of return of 64.4%, a net present value of 518.5 million USD, and a payback period of 1.55 years at a 20% discount rate, demonstrate the economic viability of the project. Sensitivity analysis revealed that selling price and material cost exert the greatest influence on profitability, highlighting the critical role of market risk management in ensuring long-term economic sustainability.

Keywords: Linear low-density polyethylene, gas-phase process, industrial production, economic evaluation, sensitivity analysis

ارزیابی فنی و اقتصادی تولید پلی اتیلن سبک خطی

زهره طاهرخانی*

استادیار مهندسی پلیمر، گروه پژوهشی طراحی فرایندهای شیمیایی، جهاد دانشگاهی-سازمان تهران، تهران، ایران

Email: ztaherkhani@acecr.ac.ir

چکیده

پلی اتیلن سبک خطی (LLDPE) یکی از مهم ترین پلیمرهای گرمانرم مهندسی است که به دلیل برخورداری از ترکیب مطلوبی از خواص مکانیکی، فرآیندپذیری مناسب و قابلیت تنظیم ریزساختار مولکولی، جایگاه ویژه‌ای در صنایع پلیمری دارد. این پلیمر از طریق کوپلیمریزاسیون گاز اتیلن با آلفا-اولفین‌ها در حضور کاتالیزورهای زیگلر-ناتا یا متالوسن تولید می‌شود. در این پژوهش، امکان‌سنجی فنی-اقتصادی احداث واحد تولید LLDPE با ظرفیت اسمی ۴۰۰ هزار تن در سال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد سرمایه‌گذاری ثابت، هزینه‌های سالیانه و سود سالیانه به ترتیب ۲۴۲،۷، ۳۶۳،۷ و ۱۵۶،۳ میلیون دلار برآورد می‌شود. شاخص‌های اقتصادی شامل نرخ بازده داخلی ۶۴،۴٪، ارزش خالص فعلی ۵۱۸،۵ میلیون دلار و دوره بازگشت سرمایه ۱،۵۵ سال در نرخ تنزیل ۲۰ درصد، بیانگر توجیه‌پذیری اقتصادی طرح است. تحلیل حساسیت نشان داد قیمت فروش محصول و هزینه مواد اولیه بیشترین تأثیر را بر سودآوری دارند و مدیریت ریسک بازار در پایداری اقتصادی پروژه نقش کلیدی دارد.

کلمات کلیدی: پلی اتیلن سبک خطی، فرایند فاز گاز، تولید صنعتی، ارزیابی اقتصادی، تحلیل حساسیت

۱. مقدمه

پلی اتیلن سبک خطی (LLDPE) از دهه ۱۹۷۰ به عنوان نسل جدیدی از پلی اتیلن ها معرفی شد و به دلیل ساختار عمدتاً خطی با شاخه های کوتاه و یکنواخت، جایگاه مهمی در میان پلی اتیلن ها به دست آورد [۱-۲]. این تفاوت بنیادی در ریزساختار مولکولی، نقش تعیین کننده ای در خواص نهایی پلیمر ایفا می کند و باعث ایجاد خواص نظیر استحکام کششی بالا، ازدیاد طول مناسب در نقطه شکست، مقاومت مطلوب در برابر پارگی، سوراخ شدگی و مقاومت به ترک خوردگی تنش-محیطی می شود [۳-۴].

ترکیب منحصربه فرد خواص مکانیکی، فرآیندپذیری مناسب و قابلیت تنظیم ساختار مولکولی، کاربرد گسترده LLDPE را در صنایع مختلف فراهم کرده است. این کاربردها شامل تولید فیلم های بسته بندی، کیسه های صنعتی، لوله های منعطف و پوشش های کشاورزی می باشد [۵-۷]. به ویژه در صنعت بسته بندی، این پلیمر با امکان تولید فیلم های نازک و مقاوم، کاهش مصرف مواد اولیه و بهبود کارایی اقتصادی را ممکن می سازد.

در سال های اخیر تقاضای جهانی برای LLDPE رشد قابل توجهی داشته است. با این حال، توسعه واحدهای تولیدی نیازمند ارزیابی دقیق جنبه های فنی و اقتصادی فرآیند می باشد. انتخاب فناوری مناسب پلیمریزاسیون و شرایط عملیاتی تأثیر مستقیمی بر کیفیت محصول نهایی، بهره وری فرآیند و هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری دارد.

با وجود گزارش های تجاری متعدد در زمینه ارزیابی اقتصادی تولید LLDPE، جزئیات روش شناسی و مفروضات مدل در این منابع منتشر نشده است [۸]. مرور منابع علمی نیز نشان می دهد تاکنون مطالعه دایره ای که ارزیابی فنی-اقتصادی فرایند فاز گاز را همراه با تحلیل حساسیت ارائه دهد، گزارش نشده است. پژوهش حاضر با ارائه چارچوبی شفاف و قابل بازتولید برای تحلیل اقتصادی این فرایند، خلأ موجود در مطالعات پیشین را پوشش می دهد.

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی فنی-اقتصادی احداث یک واحد تولید پلی اتیلن سبک خطی (LLDPE) با ظرفیت ۴۰۰ هزار تن در سال به روش پلیمریزاسیون فاز گاز است. بدین منظور، (۱) فرآیندهای متداول تولید LLDPE از منظر فنی بررسی و مناسب ترین فناوری انتخاب می شود، (۲) شاخص های کلیدی اقتصادی شامل سرمایه ثابت کل، هزینه تولید واحد، ارزش خالص فعلی (NPV) در نرخ تنزیل ۲۰٪، نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازگشت سرمایه محاسبه می گردد، و (۳) تحلیل حساسیت اقتصادی با در نظر گرفتن تغییرات $\pm 20\%$ درصدی نسبت به متغیرهای اثرگذار نظیر قیمت خوراک (قیمت اتیلن و هگزن)، درآمد فروش و سرمایه گذاری ثابت انجام می شود. نتایج این مطالعه مبنایی کمی برای تصمیم گیری سرمایه گذاری و کاهش ریسک های اقتصادی در توسعه صنعتی این محصول فراهم می آورد.

۲. فرایندهای تولید پلی اتیلن سبک خطی

۱,۲ فرآیندهای صنعتی تولید پلی اتیلن سبک خطی

پلی اتیلن سبک خطی به صورت صنعتی از طریق چند مسیر فرآیندی مختلف تولید می شود که هر یک از آن ها از نظر شرایط عملیاتی، پیچیدگی فرآیند، سرمایه گذاری اولیه و ویژگی های محصول نهایی تفاوت هایی دارند. به طور کلی، فرآیندهای صنعتی تولید LLDPE را می توان در سه دسته اصلی شامل فرآیند فاز گاز، فرآیند دوغابی یا اسلاری و فرآیند محلولی طبقه بندی کرد.

در فرآیند فاز گاز، واکنش پلیمریزاسیون در حضور کاتالیزور جامد و در فاز گازی انجام می شود. این ویژگی موجب کاهش پیچیدگی واحد، مصرف انرژی کمتر و سهولت جداسازی محصول می شود. در مقابل، در فرآیند دوغابی، پلیمریزاسیون در یک محیط هیدروکربنی مایع (معمولاً ایزوبوتان یا هگزان) انجام می گیرد که ذرات پلیمر به صورت معلق در آن رشد می کنند. این فرآیند امکان کنترل مناسب توزیع وزن مولکولی و تولید گریدهای متنوع را فراهم می سازد، اما نیازمند واحدهای بازیافت حلال و تجهیزات اضافی است.

فرآیند محلولی نیز یکی دیگر از مسیرهای صنعتی تولید LLDPE به شمار می رود که در آن پلیمر تولید شده در دمای بالا به طور کامل در حلال حل می شود. این روش به دلیل یکنواختی ساختار مولکولی و قابلیت تولید گریدهای خاص با توزیع وزن مولکولی باریک، به ویژه برای تولید پلیمرهای متالوسنی کاربرد دارد. با این حال، دما و فشار بالای عملیاتی، مصرف انرژی زیاد و هزینه های بالای بازیافت حلال، از محدودیت های اصلی این فناوری محسوب می شوند [۹ و ۷].

با وجود مزایا و کاربردهای هر یک از این فرآیندها، بررسی های صنعتی نشان می دهد که فرآیند فاز گاز به دلیل سادگی فرآیند، عدم نیاز به حلال، هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری کمتر و مقبولیت گسترده در مقیاس های بزرگ صنعتی، به عنوان گزینه غالب و رایج صنعتی برای تولید LLDPE مطرح است [۱۰].

۲,۲ فرآیندهای تولید پلی اتیلن سبک خطی به روش فاز گاز

در حال حاضر، چندین فرآیند تجاری فاز گاز برای تولید پلی اتیلن توسعه یافته است که از میان آن ها می توان به فرآیند یونپیل^۱، فرآیند اینوون^۲ و فرآیند اسفریلین^۳ اشاره کرد [۱۴-۱۱].

- فرآیند یونپیل

این فرآیند یکی از شناخته شده ترین و پرکاربردترین فناوری های صنعتی برای تولید پلی اتیلن سبک خطی و پلی اتیلن سنگین است و نزدیک به ۱۱۰ خط راکتور در بیش از ۲۵ کشور جهان با ظرفیتی بالغ بر ۲۵ میلیون تن در سال بر پایه این فرآیند فعالیت می کنند. در این فرآیند، اتیلن به همراه کومونومرهایی نظیر ۱-بوتن یا ۱-هگزن در یک راکتور بستر سیال پلیمریزه می شوند. کاتالیزورهای پودری، معمولاً بر پایه تیتانیوم یا سامانه های تیتانیوم-کروم، به صورت پیوسته به راکتور تزریق شده و محصول نهایی نیز به طور مداوم از راکتور خارج می گردد. فناوری

¹ UNIPOL

² Innovene

³ Spherilene

یونپیل قابلیت تولید گریدهای LLDPE مبتنی بر کاتالیزورهای متالوسن را نیز دارا می‌باشد. سامانه کاتالیزوری متنوع این فرآیند امکان تولید محصولات با چگالی در محدوده وسیع $0.97 - 0.90 \text{ g/cm}^3$ را فراهم می‌آورد. در این فرایند سیال‌سازی بستر و کنترل رشد ذرات پلیمر از طریق جریان گاز واکنش‌دهنده انجام می‌شود. گاز خروجی پس از عبور از مبدل‌های حرارتی خارجی، خنک شده و به راکتور بازمی‌گردد. شرایط عملیاتی متداول این فرآیند شامل فشار در محدوده $2/2$ مگاپاسکال و دمای 80 تا 110 درجه سانتی‌گراد است که بسته به گرید محصول و نوع کاتالیزور تنظیم می‌شود. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در این فناوری، حالت چگالشی و تزریق عوامل القاکننده چگالش (ICA) نظیر ایزوپنتان است که ظرفیت خنک‌کنندگی و در نتیجه ظرفیت تولید را تا چند برابر حالت پایه افزایش می‌دهد [۷، ۱۴-۱۵].

- فرآیند اینوون

فرآیند اینوون یکی از فناوری‌های مهم پلیمریزاسیون الفین‌ها در فاز گاز است. این فرآیند از راکتور بستر سیال برای پلیمریزاسیون اتیلن در حضور کومونومر و گاز هیدروژن و با استفاده از کاتالیزورهای زیگلر-ناتا، متالوسن یا کروم برای تولید LLDPE و HDPE بهره می‌گیرد. این فرایند از نظر شرایط عملیاتی شباهت‌های زیادی به فرایند یونپیل دارد و تفاوت اصلی این دو فرآیند در سیستم خنک‌سازی و مدیریت حرارت واکنش است. از ویژگی‌های برجسته این فناوری می‌توان به انعطاف‌پذیری در استفاده از کومونومرهای C4 تا C8 و هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی پایین اشاره کرد. این فرآیند قادر به تولید طیف گسترده‌ای از محصولات شامل mLLDPE، LLDPE و HDPE می‌باشد که در کاربردهایی نظیر پوشش‌دهی اکستروژنی، فیلم، قالب‌گیری تزریقی، لوله و کاربردهای سیم و کابل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷، ۱۵].

- فرآیند اسفرلین

فرایند اسفرلین یک فرآیند پلیمریزاسیون فاز گاز قابل انعطاف برای تولید پلی‌اتیلن سبک خطی و پلی‌اتیلن سنگین محسوب می‌شود. این فناوری ترکیبی از فناوری پلیمریزاسیون دوغابی پیش‌پلیمریزاسیون و راکتورهای بستر سیال فاز گاز است. در این ساختار، ابتدا واکنش پیش‌پلیمریزاسیون در یک راکتور حلقه‌ای کوچک انجام شده و سپس پیش‌پلیمر به صورت پیوسته به یک یا دو راکتور بستر سیال فاز گاز با زمان اقامت کوتاه هدایت می‌شود. در پیکربندی دو راکتوره، ترکیب گاز، دما و فشار هر راکتور به صورت کاملاً مستقل قابل کنترل است که انعطاف‌پذیری بالایی در طراحی محصول ایجاد می‌کند. یکی از ویژگی‌های شاخص این فرآیند، تولید مستقیم ذرات پلیمر با شکل کروی و توزیع اندازه یکنواخت است که می‌تواند نیاز به مرحله گرانول‌سازی را کاهش دهد یا حتی به طور کامل حذف کند. در حال حاضر، شرکت بازل^۴ گریدهای LLDPE را در محدوده چگالی $0.936 - 0.919 \text{ g/cm}^3$ با استفاده از این فناوری تولید می‌کند [۷، ۱۵].

شبیه‌سازی فرآیند تولید LLDPE به روش فاز گاز معمولاً با نرم‌افزار Aspen Polymer Plus انجام می‌شود. همچنین برای تحلیل هیدرودینامیک بستر سیال، نرم‌افزارهای CFD مانند Cmsol Multiphysics قابل استفاده

⁴ Basel

هستند. در صورت نیاز به مدلسازی دقیق‌تر فرآیند، این ابزارها می‌توانند در مطالعات تکمیلی مورد استفاده قرار گیرند.

در میان فناوری‌های مختلف، فرایند فاز گاز، به دلیل گستردگی کاربرد صنعتی، سابقه عملیاتی طولانی، ظرفیت بالای واحدهای تجاری و انعطاف‌پذیری در تولید طیف وسیعی از محصولات، به‌عنوان بالغ‌ترین و رایج‌ترین فناوری تولید تجاری پلی‌اتیلن سبک خطی شناخته می‌شود. با تمرکز بر این فناوری به عنوان مدل پایه، بخش بعدی این مقاله به تشریح کامل فرآیند، ارائه مبانی طراحی و استخراج شاخص‌های کلیدی مورد نیاز برای ارزیابی اقتصادی طرح می‌پردازد.

۳،۲ شرح فرآیند و مبانی طراحی فرآیند فاز گاز

فرآیند تولید پلی‌اتیلن سبک خطی به روش پلیمریزاسیون فاز گاز شامل دو بخش اصلی، پلیمریزاسیون و تکمیل محصول و بسته‌بندی می‌باشد. بخش پلیمریزاسیون خود از سه زیربخش تشکیل شده که عبارتند از: آماده‌سازی و خالص‌سازی خوراک، پلیمریزاسیون در راکتور بستر سیال و برداشت و تخلیه محصول. در ادامه، جریان فرآیند و تجهیزات اصلی هر یک از این بخش‌ها تشریح می‌شود:

- آماده‌سازی و خالص‌سازی خوراک

اتیلن به‌عنوان خوراک اصلی از طریق خط لوله وارد واحد شده و پیش از ورود به راکتور پلیمریزاسیون، تحت عملیات خالص‌سازی دقیق قرار می‌گیرد. حذف ناخالصی‌هایی نظیر اکسیژن و رطوبت برای جلوگیری از غیرفعال‌شدن کاتالیزور و تضمین پایداری عملیاتی راکتور ضروری است. بدین منظور، جریان اتیلن خوراک‌های جانبی شامل کومونومر ۱-هگزن و گاز نیتروژن از ستون‌های حاوی کاتالیزور مسی عبور داده می‌شود تا اکسیژن حذف گردد. سپس خوراک وارد ستون حاوی جاذب غریبال مولکولی شده و رطوبت آن جذب می‌شود. این سطح از خالص‌سازی به‌ویژه در فرآیندهای مبتنی بر کاتالیزورهای متالوسنی اهمیت بیشتری دارد، زیرا این کاتالیزورها نسبت به ناخالصی‌هایی نظیر اکسیژن، آب، ترکیبات گوگرددار، مونوکسید و دی‌اکسید کربن حساسیت بالاتری از خود نشان می‌دهند [۱۷-۱۵].

- پلیمریزاسیون در راکتور بستر سیال

پس از خالص‌سازی، اتیلن و کومونومر وارد راکتور بستر سیال می‌شوند. این راکتور در دمای عملیاتی حدود ۸۵ درجه سانتی‌گراد و فشار تقریبی ۲/۲ MPa عمل می‌کند. واکنش پلیمریزاسیون در حضور کاتالیزور جامد انجام شده و ذرات پلیمر به‌صورت پیوسته در بستر سیال رشد می‌کنند. به منظور کنترل وزن مولکولی پلیمر تولیدی، مقدار کمی گاز هیدروژن به‌عنوان عامل اختتام زنجیر به جریان خوراک تزریق می‌شود.

کاتالیزور پلیمریزاسیون در مخزن تحت اتمسفر گاز نیتروژن نگهداری شده و به‌صورت پیوسته به راکتور تزریق می‌گردد. زمان اقامت متوسط مونومرها در راکتور حدود ۲/۵ ساعت است. نرخ تولید پلیمر عمدتاً از طریق کنترل نرخ تزریق کاتالیزور تنظیم می‌شود، در حالی که فشار عملیاتی راکتور با تنظیم میزان خوراک مونومر تازه در محدوده تقریبی ۲/۲ MPa حفظ می‌گردد.

واکنش پلیمریزاسیون به شدت گرمازا است و کنترل حرارت نقش تعیین کننده‌ای در پایداری فرآیند دارد. گرمای آزاد شده از واکنش از طریق گردش مداوم گاز واکنش دهنده در بستر سیال دفع می‌شود. گاز خروجی از بالای راکتور پس از عبور از یک مبدل حرارتی خارجی تا دمایی پایین‌تر از نقطه شبنم خنک شده و سپس به راکتور بازگردانده می‌شود. گردش گاز در حلقه بازیافت توسط یک کمپرسور انجام می‌گیرد. کنترل ظرفیت خنک‌سازی راکتور از طریق تنظیم دمای گاز بازیافتی و مقدار سیال قابل تراکم موجود در آن صورت می‌پذیرد. [۱۷-۱۵].

- برداشت و تخلیه محصول

پس از پلیمریزاسیون، ذرات پلی‌اتیلن به صورت متناوب از ناحیه نزدیک به کف راکتور برداشت می‌شوند. تخلیه محصول به دلیل فشار بالای راکتور و جلوگیری از اتلاف مونومر دشوار است. بنابراین از یک سیستم برداشت مرحله‌ای با مخازن و شیرهای موازی استفاده می‌شود. این سیستم امکان کاهش تدریجی فشار و انتقال ایمن محصول را فراهم می‌سازد. در این سیستم، ذرات پلیمر ابتدا از راکتور به محفظه‌های دریافت محصول منتقل می‌شوند. این محفظه‌ها تحت سیال‌سازی نیتروژن قرار داشته و از طریق دریچه‌های کشویی به یکدیگر متصل هستند. انتقال محصول بین این محفظه‌ها به صورت مرحله‌ای انجام می‌شود تا فشار به تدریج کاهش یابد. سپس گرانول‌ها به مخازن دمشی محصول منتقل شده و در ادامه وارد مخزن تخلیه نهایی می‌شوند. مخزن تخلیه نهایی با فشار عملیاتی حدود 0.3 MPa (5 psi) و زمان اقامت تقریبی ۴ ساعت طراحی شده است. در این مرحله، نیتروژن به منظور حذف مونومرها و هیدروکربن‌های باقی‌مانده از محصول تزریق می‌گردد.

گاز جدا شده از پودر پلیمری خروجی مخزن تخلیه، فشرده و خنک می‌شود تا امکان بازیابی کومونومر و سایر هیدروکربن‌های قابل تراکم فراهم گردد. گازهای غیرقابل تراکم به صورت متناوب به سیستم مشعل هدایت می‌شوند یا در صورت تجهیز واحد به سیستم بازیابی، برای افزایش بازده کلی فرآیند مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرند. [۱۸-۱۹].

- تکمیل و بسته‌بندی محصول

محصول پودر پلیمری خروجی از بخش پلیمریزاسیون وارد واحد تکمیل شامل سیستم اختلاط، اکستروژن و گرانول‌سازی می‌شود. در این مرحله، افزودنی‌هایی نظیر کمک‌فرآیندها، پایدارکننده‌ها و مواد ضدچسبندگی متناسب با گرید نهایی پلیمر به محصول افزوده می‌شوند. این افزودنی‌ها به صورت مستقیم به جریان خوراک اکسترودر تزریق می‌گردند.

گرانول‌های تولیدی پس از خروج از اکسترودر و خنک‌سازی به سیلوهای ذخیره‌سازی منتقل شده و به‌طور موقت نگهداری می‌شوند. در نهایت، محصول از طریق قیف‌های بارگیری به وسیله کامیون یا واگن ریلی حمل شده، یا در صورت نیاز به بخش بسته‌بندی و انبارش نهایی ارسال می‌گردد [۱۵].

۴.۲ مدل اقتصادی

تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری در واحدهای پتروشیمی، با توجه به سرمایه بالا، دوره بازگشت طولانی و حساسیت شدید سودآوری به نوسانات قیمت خوراک و محصولات، مستلزم انجام ارزیابی‌های یکپارچه فنی-

اقتصادی است [۸]. چارچوب مطالعه شامل برآورد سرمایه‌گذاری ثابت، تخمین هزینه‌های عملیاتی و در نهایت ارزیابی شاخص‌های مالی تصمیم‌گیری است تا امکان قضاوت دقیق درباره جذابیت سرمایه‌گذاری فراهم شود. به منظور ارزیابی اقتصادی طرح، شاخص‌های نرخ بازده داخلی^۵ (IRR)، ارزش فعلی خالص^۶ (NPV)، دوره بازگشت سرمایه^۷ (PP) و شاخص سودآوری^۸ (PI) محاسبه گردید [۲۰].

نرخ بازده داخلی از جمله معیارهای ارزیابی کاربرپذیر در تحلیل اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری محسوب می‌گردد. این معیار معرف نرخ تنزیلی است که در آن، ارزش فعلی خالص طرح به صفر می‌گراید؛ به بیان دیگر، در این نرخ، ارزش فعلی مجموع جریان‌های نقدی آتی دقیقاً با سرمایه‌گذاری اولیه برابر است [۲۱-۲۳].

ارزش فعلی خالص یکی دیگر از شاخص‌های اقتصادی مهم در ارزیابی است که بر اساس رابطه ۱ تعیین می‌شود:

$$NPV = \sum_{n=1}^T \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0 \quad (1)$$

در این رابطه، CF_n جریان نقدی خالص در سال n ، i نرخ تنزیل، n عمر اقتصادی طرح (۲۰ سال) و I_0 کل سرمایه‌گذاری ثابت است. مثبت بودن NPV نشان‌دهنده ایجاد ارزش افزوده اقتصادی فراتر از نرخ بازده مورد انتظار سرمایه‌گذار است [۲۱-۲۳].

دوره بازگشت سرمایه نیز به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری محسوب می‌شود. دوره بازگشت سرمایه از نسبت سرمایه‌گذاری اولیه به جریان نقدی سالانه به‌دست می‌آید و بیانگر مدت‌زمان لازم برای بازگشت هزینه اولیه سرمایه‌گذاری از محل جریان‌های نقدی ورودی است [۲۱-۲۳].

شاخص سودآوری (PI) از دیگر معیارهای تصمیم‌گیری در ارزیابی اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری به‌شمار می‌رود. این شاخص از نسبت ارزش فعلی جریان‌های نقدی آتی به سرمایه‌گذاری اولیه حاصل می‌شود و میزان کارایی سرمایه‌گذاری را منعکس می‌سازد. به منظور محاسبه این شاخص از معادله ۲ استفاده می‌شود.

$$PI = \frac{\sum_{n=1}^T \frac{CF_n}{(1+i)^n}}{I_0} \quad (2)$$

در مدل اقتصادی، کلیه محاسبات بر مبنای شرایط بازار جهانی و منطقه‌ای در سال ۲۰۲۵ انجام شده است. قیمت خوراک و محصولات بر اساس میانگین قیمت‌های قراردادی منطقه خاورمیانه استخراج شده است [۲۴]. نرخ تنزیل (i) معادل ۲۰٪ سالانه بر اساس معیارهای رایج در ارزیابی اقتصادی طرح‌های پتروشیمی انتخاب شده است. عمر اقتصادی طرح ۲۰ سال و ظرفیت اسمی واحد ۴۰۰ هزار تن در سال با ضریب بهره‌برداری ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

برآورد سرمایه ثابت و هزینه خرید تجهیزات فرایند تولید پلی اتیلن سبک خطی با استفاده از داده‌های موجود در گزارشات اقتصادی S&P Global برآورد شده است [۸]. به منظور تعدیل زمانی قیمت تجهیزات و درنظر گرفتن اثر تورم صنعتی، تغییرات قیمت تجهیزات و تحولات بازار جهانی، از شاخص قیمت کارخانه مهندسی شیمی^۹

⁵ Internal Rate of Return

⁶ Net Present Value

⁷ Payback Period

⁸ Profitability Index

⁹ Chemical Engineering Plant Cost Index

استفاده گردید. تعدیل زمانی، همگن سازی مبنای مقایسه اقتصادی را امکان پذیر می سازد. جریان نقدی سالانه (CFn) معادل سود خالص عملیاتی تعیین شده و مطابق با رویکرد رایج در ارزیابی های سطح یک، فرض شده است که در طول دوره بهره برداری مقدار آن ثابت باقی می ماند. برای جبران عدم قطعیت های مهندسی و نوسانات بازار، ضریب عدم قطعیت ۱۰٪ (مطابق جداول ۱ و ۳) به برآورد کلی سرمایه اضافه شده است.

۳. نتایج و بحث

۱,۳ سرمایه گذاری ثابت

سرمایه گذاری ثابت مورد نیاز برای احداث واحد تولید پلی اتیلن سبک خطی (LLDPE) با ظرفیت اسمی ۴۰۰ هزار تن/سال، مشتمل بر دو مؤلفه اصلی سرمایه گذاری محدوده فرایندی^{۱۰} (BLI) و سرمایه گذاری خارج از محدوده فرایندی^{۱۱} است. برآوردهای انجام شده حاکی از آن است که سرمایه گذاری محدوده فرایندی این طرح معادل ۱۵۱/۹ میلیون دلار می باشد که جزئیات آن در جدول ۱ ارائه گردیده است. این میزان سرمایه گذاری شامل هزینه های تجهیزات اصلی فرآیند، نصب، هزینه های غیرمستقیم، واحد بسته بندی و همچنین هزینه ریسک احتمالی است.

هزینه تجهیزات فرایندی به عنوان یکی از اجزای اصلی سرمایه گذاری محدوده فرایندی، حدود ۳۳/۸ میلیون دلار برآورد شده است. این تجهیزات شامل راکتورها، برج های جداسازی، ظروف و مخازن، مبدل های حرارتی، کمپرسورها، تجهیزات ویژه و پمپ ها می باشند (جدول ۱).

در جدول ۲، توزیع سرمایه گذاری محدوده فرایندی بین دو بخش اصلی پلیمریزاسیون و تکمیل و بسته بندی به تفکیک ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که بخش پلیمریزاسیون با اختصاص ۶۹/۳ میلیون دلار معادل ۴۵٪ از کل سرمایه گذاری محدوده فرایندی را به خود اختصاص داده است. در مقابل، بخش تکمیل و بسته بندی محصول با ۸۳/۷ میلیون دلار، بیشترین سهم از این سرمایه گذاری را دارا می باشد. از این میزان، هزینه مربوط به بخش کامپاندینگ، اکستروژن و سیستم گرانول سازی معادل ۳۵/۵ میلیون دلار برآورد گردیده است.

جدول ۱. سرمایه گذاری محدوده فرایندی تولید LLDPE با فرآیند فاز گاز (ظرفیت ۴۰۰,۰۰۰ تن/سال)
Table 1. Battery Limits Investment (BLI) for Gas-Phase LLDPE Production (400,000 Tons/Year)

No.	Item	Cost (1000 \$)
1	equipment	Reactors
2		Columns (tower)
3		Vessels and tanks
4		Heat exchangers
5		Compressors
6		Special equipment
7		Pumps

¹⁰ Battery Limits Investment

¹¹ Off-site Investment

8	Total equipment cost	33774.28
9	Direct installation cost	32155.81
10	Packaging unit	35486.97
11	Indirect cost	35501.62
12	Unscheduled equipment	136918.69
13	Contingency	15062
Battery limit investment (BLI)		151980.69

جدول ۲: تفکیک سرمایه‌گذاری محدوده فرایندی تولید LLDPE به روش فاز گاز (ظرفیت ۴۰۰,۰۰۰ تن/سال)

Table 2. Breakdown of ISBL Investment for Gas-Phase LLDPE Production (400,000 Tons/Year)

Breakdown of ISDE investment for Gas Phase EEDPE Production (100,000 TPA)				
No.	Item		polymerization	Product finishing and bagging
			Cost (1000\$)	Cost (1000\$)
1	Equipment	Reactors	5747.36	-
2		Columns (tower)	3768.75	-
3		Vessels and tanks	1559.85	12773.97
4		Heat exchangers	2043.5	-
5		Compressors	6369.19	-
6		Special equipment	-	1612.19
7		Pumps	-	29.31
8	Total equipment cost		19488.62	14417.56
9	Direct installation cost		26751.84	5965.09
10	Packaging unit		-	35486.97
11	Indirect cost		16178.40	19545.16
12	Unscheduled equipment		62418.87	75141.78
13	Contingency		6866	8296
Battery limit investment			69284.87	73710.78

سرمایه‌گذاری خارج از محدوده فرایندی (جدول ۳) نیز معادل ۹۰/۷ میلیون دلار محاسبه شده است که شامل هزینه‌های تصفیه پسماند، تأسیسات و انبار و تأسیسات خدمات می‌باشد. هزینه‌های تصفیه پسماند معادل میزان متعارف، یعنی ۵٪ از سرمایه‌گذاری محدوده فرایندی (BLI) فرض شده است. هزینه تأسیسات خدمات عمومی به مبلغ ۴۳/۵ میلیون دلار در نظر گرفته شده که معادل ۲۰٪ از مجموع سرمایه‌گذاری محدوده فرایندی به اضافه هزینه‌های تأسیسات و انبار است. هزینه‌های تأسیسات خدمات عمومی برای ساختمان‌های اداری، غذاخوری، سیستم‌های اطفاء حریق، سیستم پنوماتیک، کارگاه‌ها، راه‌های داخلی و غیره می‌باشد. همچنین، برای پوشش عدم قطعیت‌های برآورد، یک ضریب پیش‌بینی‌نشده معادل ۱۰ درصد در سرمایه‌گذاری خارج از محدوده لحاظ شده است. بر اساس این جدول، کل سرمایه‌گذاری خارج از محدوده به ۹۰/۷ میلیون دلار می‌رسد.

جدول ۳. سرمایه‌گذاری خارج از محدوده فرایندی تولید LLDPE با فرآیند فاز گاز (ظرفیت ۴۰۰,۰۰۰ تن/سال)

Table 3. off-Site Investment for Gas-Phase LLDPE Production (400,000 Tons/Year)

No.	Item	Cost (1000\$)
1	Utilities and Storage	Clarified water
2		Cooling water
3		Process water
4		Refrigeration
5		Inert gas
6		Tankage
7		Warehouse facilities
8	Total utilities and storage	
9	General service facilities	
10	Waste treatment	
11	Off-site installed	
12	Contingency (10%)	
Off-site investment		90696.88

در مجموع، مطابق با جدول ۴ با جمع سرمایه‌گذاری محدوده فرایندی و سرمایه‌گذاری خارج از محدوده فرایندی، سرمایه ثابت کل $12(TFC)$ برای احداث یک واحد تولید LLDPE با ظرفیت اسمی ۴۰۰ هزار تن در سال برابر با ۲۴۲/۷ میلیون دلار برآورد شده است.

جدول ۴. سرمایه‌گذاری ثابت تولید پلی اتیلن سبک خطی با فرآیند فاز گاز (ظرفیت ۴۰۰,۰۰۰ تن/سال)

Table 4. Total Fixed Capital (TFC) Investment for Gas-Phase LLDPE Production (400,000 Tons/Year)

No.	Item	Cost (1000\$)
1	Battery limit investment	151980.69
2	Off-site investment	90696.88
Total Fixed Capital Investment:TFC		242677.57

۲,۳ هزینه‌های عملیاتی

هزینه‌های عملیاتی واحد تولید LLDPE به تفکیک مواد اولیه و سایر اجزای اصلی شامل هزینه تأسیسات و انرژی، نیروی انسانی و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است.

برآورد هزینه مواد اولیه بر اساس قیمت‌های مرجع گزارش‌های اقتصادی و با توجه به دبی مواد مصرفی در فرآیند تولید صورت پذیرفته است [۲۴]. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۴، هزینه کل مواد اولیه معادل ۰/۸۱ دلار به ازای کیلوگرم LLDPE برآورد شده است که از این مبلغ ۰/۸۳ دلار مرتبط به اتیلن و ۰/۱۳ دلار مرتبط به هگزن می‌باشد. مصرف خالص مونومر (اتیلن + هگزن) معادل ۱/۰۰۹ کیلوگرم مونومر/کیلوگرم LLDPE در نظر گرفته شده است که شامل ۰/۸۹۹۷ کیلوگرم اتیلن و ۰/۱۰۹۷ کیلوگرم هگزن به ازای هر کیلوگرم LLDPE است.

هزینه کاتالیزور متالوسن پایه‌دار با فرض بهره‌وری ۷۰۰۰ کیلوگرم پلیمر به ازای هر کیلوگرم کاتالیزور حدود ۱۵۴ دلار/کیلوگرم (۷۰ دلار/پوند) برآورد شده است. بر این اساس، هزینه کاتالیزور معادل ۰/۰۲۲ دلار به ازای هر کیلوگرم محصول محاسبه می‌گردد.

¹² Total Fixed Capital Investment

هزینه تأسیسات و انرژی شامل برق، بخار، آب خنک‌کننده، آب فرآیندی، نیتروژن و سیستم‌های برودتی معادل ۰/۰۲۴ دلار به ازای هر کیلوگرم LLDPE برآورد گردیده است. هزینه نیروی انسانی بر اساس الگوی سه‌شیفت کاری و با احتساب سایر هزینه‌های مرتبط برآورد شده است. با افزودن این هزینه به هزینه‌های متغیر، هزینه مستقیم کل تولید معادل ۰/۸۴ دلار به ازای هر کیلوگرم LLDPE حاصل می‌گردد. با احتساب مالیات و بیمه و همچنین استهلاک سالانه معادل ۱۰ درصد از سرمایه ثابت کل، هزینه تمام‌شده محصول در درب کارخانه معادل ۰/۸۸ دلار به ازای هر کیلوگرم برآورد می‌شود. در نهایت، با افزودن هزینه‌های عمومی و اداری، فروش و تحقیقات (معادل ۲ درصد از ارزش محصول)، هزینه خالص تولید ۰/۹۱ دلار به ازای هر کیلوگرم برآورد می‌گردد. شکل ۱ نمودار دایره‌ای سهم هزینه‌های عملیاتی را نشان می‌دهد. با عنایت به هزینه خالص تولید پلی‌اتیلن سبک خطی، حداقل قیمت فروش جهت انجام مطالعات اقتصادی، معادل قیمت منطقه‌ای این محصول یعنی ۱/۳۰ دلار به ازای هر کیلوگرم تعیین شده است.

جدول ۵. هزینه مواد اولیه تولید پلی اتیلن سبک خطی با فرآیند فاز گاز (ظرفیت ۴۰۰,۰۰۰ تن/سال)

Table 5. Raw Material Costs for Gas-Phase LLDPE Production (400,000 Tons/Year)

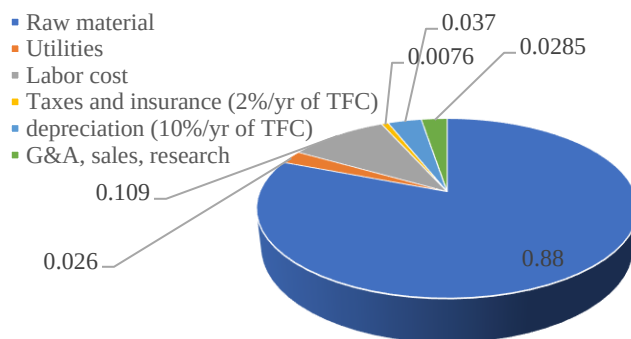
No.	Raw material	Unit cost ((\$/kg)	Consumotion per kg	(\$/kg)
1	Ethylene	0.75	0.89969	0.67477
2	1-hexene	1.0	0.10965	0.10965
3	Hydrogen	2.2	0.000212	0.00047
4	Iso pentane	1.37	0.000424	0.00058
5	Metallocene catalyst	154	0.000143	0.02202
Total				0.80749

جدول ۶. هزینه سالیانه تولید پلی اتیلن سبک خطی با فرآیند فاز گاز (ظرفیت ۴۰۰,۰۰۰ تن/سال)

Table 6. Annual Operating Costs for Gas-Phase LLDPE Production (400,000 Tons/Year)

No.	Item	Cost (\$/kg)	Operation cost (1000 \$)
1	Raw material	0.807	322800
2	Utilities	0.02442	9768
3	Labor cost	0.01	4000
4	Taxes and insurance (2%/yr of TFC)	0.00704	2816
5	depreciation (10%/yr of TFC)	0.03476	13904
6	G&A, sales, research	0.026	10400
Total		0.90922	363688

بر اساس ظرفیت تولید در افق زمانی یکساله، هزینه کل سالیانه طرح معادل ۳۶۳/۷ میلیون دلار برآورد گردیده و در مقابل، درآمد حاصل از فروش محصول بالغ بر ۵۲۰ میلیون دلار خواهد بود.



شکل ۱. نمودار دایره ای سهم هزینه‌های عملیاتی
Figure 1. Pie chart of operating cost distribution

۳,۳ شاخص‌های اقتصادی طرح

تحلیل اقتصادی طرح تولید LLDPE با ظرفیت اسمی ۴۰۰ هزار تن در سال بر اساس عمر مفید ۲۰ سال انجام شد. جدول ۷ شاخص‌های اقتصادی مانند سرمایه ثابت کل، هزینه سالیانه، قیمت تمام شده، درآمد سالیانه، سود سالیانه، نرخ بازده داخلی، ارزش فعلی خالص، مدت زمان بازگشت سرمایه، شاخص سودآوری، میزان تولید در نقطه سربه سر و... را برای طرح تولید پلی اتیلن سبک خطی نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی اقتصادی، نرخ تنزیل ۲۰ درصد به عنوان نرخ متعارف برای تحلیل‌های ارزی در شرایط ریسک سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شد.

جدول ۷. شاخص‌های اقتصادی طرح تولید پلی اتیلن سبک خطی

Table 7. Economic parameters for LLDPE Production Project

No.			Unit
1	Production Capacity	400000	Ton/year
2	Project Lifetime	20	Year
3	Discount Rate	20	%
4	Total Fixed Capital (TFC)	242.7	10 ⁶ \$
5	Operation Cost	363.7	10 ⁶ \$
6	product Unit Cost (Cost of Production)	0.91	\$/kg
7	Annual Sales Revenues	520	10 ⁶ \$
8	Annual Net Profit	156.3	10 ⁶ \$
9	Internal Rate of Return (IRR)	64.4	%
10	Net Present Value (NPV)	518.5	10 ⁶ \$
11	Payback Period (PBP)	1.55	Year
12	Profitability Index (PI)	3.14	-
13	break-even point	0.70	10 ⁶ ton

همان طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود میزان سرمایه‌گذاری ثابت کل (TFC) برابر با ۲۴۲/۷ میلیون دلار و هزینه عملیاتی سالیانه طرح نیز معادل ۳۶۳/۷ میلیون دلار برآورد شد. با فرض قیمت فروش ۱۱/۳۰ دلار/کیلوگرم

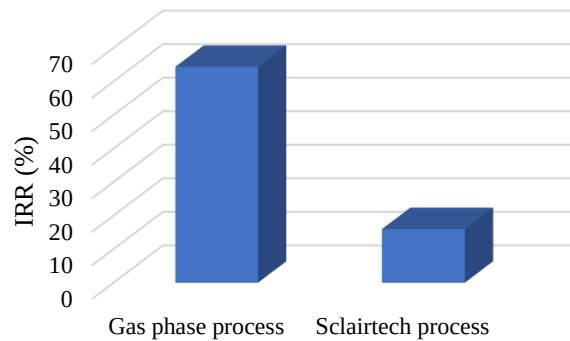
و قیمت تمام شده محصول ۰/۹۱ دلار/کیلوگرم، درآمد سالیانه طرح حدود ۵۲۰ میلیون دلار برآورد گردید که منجر به سود خالص سالیانه (جریان نقدی) برابر با ۱۵۶/۳ میلیون دلار شده است. این میزان جریان نقدی بیانگر توانایی مناسب طرح در ایجاد بازده عملیاتی و پوشش هزینه‌های سرمایه‌گذاری است.

بر اساس تحلیل جریان‌های نقدی تنزیل شده، ارزش فعلی خالص (NPV) طرح برابر با ۵۱۸/۵ میلیون دلار به دست آمد. مثبت بودن این شاخص نشان می‌دهد که مجموع ارزش فعلی منافع اقتصادی بیش از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بوده و طرح در نرخ تنزیل مفروض، ارزش افزوده اقتصادی ایجاد می‌کند. نرخ بازده داخلی نیز برابر با ۶۴٪ محاسبه شد که از نرخ تنزیل بالاتر بوده و بیانگر جذابیت سرمایه‌گذاری و بازده مناسب طرح است.

دوره بازگشت سرمایه معادل ۱/۵۵ سال برآورد گردید که نشان‌دهنده بازگشت نسبتاً سریع سرمایه اولیه از محل جریان‌های نقدی ورودی است. همچنین شاخص سودآوری (PI) برابر با ۳/۱۴ محاسبه شد که بزرگ‌تر از واحد بوده و تأییدکننده اقتصادی بودن طرح از منظر نسبت منافع به هزینه‌ها می‌باشد.

علاوه بر این، میزان تولید تجمعی لازم برای رسیدن به نقطه سر به سر سرمایه‌گذاری برابر با ۰/۷ میلیون تن برآورد شد. این شاخص نشان می‌دهد که طرح پس از این سطح تولید، وارد مرحله سوددهی خالص خواهد شد. به‌طور کلی، مجموعه شاخص‌های مالی شامل NPV مثبت، IRR بالاتر از نرخ تنزیل، دوره بازگشت سرمایه کوتاه و شاخص سودآوری بزرگ‌تر از یک، بیانگر توجیه‌پذیری اقتصادی احداث واحد LLDPE در ظرفیت مورد بررسی است. با این حال، با توجه به سهم قابل توجه هزینه خوراک در ساختار هزینه‌های تولید، تحلیل حساسیت جهت ارزیابی ریسک ناشی از نوسانات قیمت مواد اولیه در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی جایگاه نتایج این پژوهش و تعیین مزیت نسبی فناوری فاز گاز، مقایسه‌ای سیستماتیک با مطالعات پیشین انجام شده است (شکل ۲). در مطالعه‌ای که بر روی فرآیند محلولی اسکرتک ۱۳ با ظرفیت ۴۰۰ هزار تن در سال انجام شده، نرخ بازده داخلی معادل ۱۶٪ گزارش شده است [۲۵]. همچنین دوره بازگشت سرمایه در آن مطالعه حدود ۳٫۲ سال برآورد گردیده است. این در حالی است که در پژوهش حاضر، نرخ بازده داخلی برای فرآیند فاز گاز معادل ۶۴٫۴٪ و دوره بازگشت سرمایه ۱٫۵۵ سال محاسبه گردید. اختلاف چشمگیر ۴۸٪ در IRR و کاهش حدود ۵۰٪ در دوره بازگشت سرمایه، ناشی از عوامل زیر است: (۱) سرمایه‌گذاری ثابت کمتر در فناوری فاز گاز به دلیل عدم نیاز به واحدهای بازیافت حلال، (۲) حذف هزینه‌های مربوط به حلال و خالص‌سازی آن، (۳) مصرف انرژی پایین‌تر به دلیل عدم نیاز به گرمایش و سرمایش حلال در مقیاس وسیع، و (۴) سادگی عملیاتی و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که فناوری فاز گاز در مقیاس صنعتی ۴۰۰ هزار تن در سال از برتری اقتصادی نسبت به فناوری محلولی برخوردار است.



شکل ۲: نمودار مقایسه IRR در فرایند تولید LLDPE

Figure 2. Comparison of IRR in the LLDPE Production Process

۴,۳ تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت یکی از ارکان اساسی در مطالعات اقتصادی مرتبط با طرح‌های سرمایه‌گذاری به شمار می‌رود. تحلیل حساسیت میزان تأثیر عوامل کلیدی بر شاخص‌های اقتصادی را ارزیابی می‌کند. این رویکرد، درک دقیق‌تری از ریسک‌ها و عدم قطعیت‌ها فراهم می‌سازد و به سرمایه‌گذاران در تصمیم‌گیری آگاهانه کمک می‌کند.

به‌منظور بررسی پایداری اقتصادی واحد تولید LLDPE و تعیین میزان تأثیر تغییرات عوامل کلیدی بر شاخص سودآوری، تحلیل حساسیت با در نظر گرفتن تغییر $\pm 20\%$ در پنج متغیر اصلی شامل قیمت مواد اولیه، قیمت فروش محصول، قیمت اتیلن، قیمت هگزن و سرمایه ثابت انجام شد. شاخص مورد ارزیابی در این تحلیل نرخ بازده داخلی بود که به‌عنوان مهم‌ترین معیار تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ نتایج تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی (IRR) را نسبت به تغییر $\pm 20\%$ در شاخص‌های کلیدی اقتصادی نشان می‌دهد. در بین متغیرهای بررسی‌شده، قیمت فروش محصول بیشترین اثر را بر مقدار IRR داشته است و به‌عنوان بحرانی‌ترین پارامتر اقتصادی طرح شناخته می‌شود. به‌طوری‌که با کاهش 20% قیمت فروش، مقدار IRR به حدود 21% کاهش می‌یابد و با افزایش 20% قیمت فروش، این شاخص تا 102% افزایش پیدا می‌کند. دامنه تغییرات نشان می‌دهد که سودآوری طرح تابع شرایط بازار و نوسانات قیمت محصول نهایی است. از این‌رو، ریسک بازار مهم‌ترین عامل تهدیدکننده پایداری اقتصادی این پروژه محسوب می‌شود.

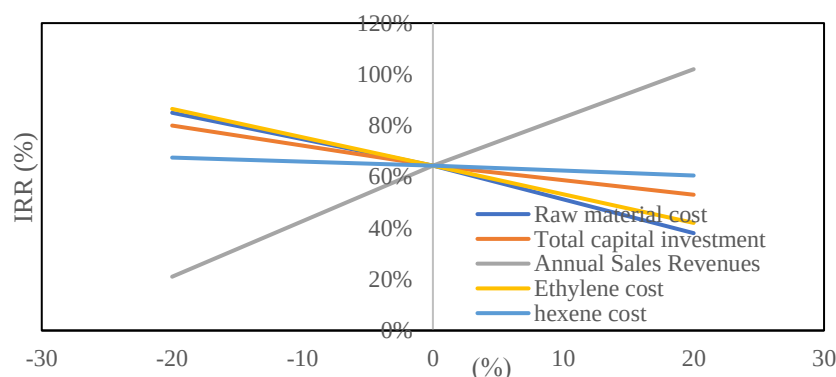
پس از قیمت فروش، قیمت اتیلن به‌عنوان مهم‌ترین متغیر هزینه‌ای و دومین عامل اثرگذار بر IRR شناسایی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش 20% قیمت اتیلن، IRR از $64,4\%$ به $42,0\%$ کاهش می‌یابد و با کاهش 20% قیمت اتیلن، این شاخص به $86,5\%$ افزایش پیدا می‌کند. دامنه تغییرات حدود 44% بیانگر آن است که سودآوری طرح وابستگی بالایی به قیمت خوراک اصلی دارد. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که اتیلن سهم عمده‌ای در هزینه‌های عملیاتی واحد دارد و هرگونه نوسان در قیمت یا محدودیت در تأمین آن می‌تواند توجیه‌پذیری اقتصادی طرح را تحت تأثیر قرار دهد.

سرمایه ثابت در رتبه بعدی اثرگذاری قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده حساسیت متوسط IRR نسبت به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه است. به‌گونه‌ای که افزایش 20% سرمایه ثابت موجب کاهش IRR به حدود 53% می‌شود، در

حالی که کاهش ۲۰٪ آن این شاخص را تا حدود ۸۰٪ افزایش می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که کنترل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهینه‌سازی فرایند، انتخاب مناسب فناوری و مدیریت دقیق هزینه‌های اجرایی می‌تواند بهبود معناداری در شاخص‌های اقتصادی طرح ایجاد کند.

در مقابل، قیمت هگزن اثر کمتری بر IRR نشان داده است. با افزایش ۲۰٪ قیمت هگزن، مقدار IRR به حدود ۶۰٫۵٪ کاهش می‌یابد و با کاهش ۲۰٪ آن، IRR به حدود ۶۷٫۵٪ افزایش پیدا می‌کند. دامنه تغییرات حدود ۷٪ نشان می‌دهد که حساسیت طرح نسبت به این متغیر در سطح متوسط رو به پایین قرار دارد و در مقایسه با متغیرهای کلیدی‌تر، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر وضعیت اقتصادی طرح ندارد.

بر اساس نتایج این تحلیل، می‌توان متغیرهای اثرگذار بر IRR را از نظر میزان اهمیت به‌صورت قیمت فروش محصول، قیمت اتیلن، سرمایه ثابت و قیمت هگزن رتبه‌بندی کرد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که طرح تولید LLDPE از منظر اقتصادی، نسبت به نوسانات قیمت فروش محصول و قیمت اتیلن بیشترین حساسیت را دارد و این دو پارامتر، تعیین‌کننده‌ترین عوامل در حفظ یا تضعیف جذابیت سرمایه‌گذاری پروژه هستند.



شکل ۳: نمودار تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی طرح تولید پلی اتیلن سبک خطی

Figure 3. Sensitivity analysis of internal rate of return (IRR) for LLDPE production project

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، امکان‌سنجی فنی-اقتصادی احداث واحد تولید پلی‌اتیلن سبک خطی (LLDPE) با ظرفیت ۴۰۰ هزار تن در سال به روش پلیمریزاسیون فاز گاز مورد بررسی قرار گرفت. برآوردها نشان داد سرمایه ثابت کل ۲۴۲٫۷ میلیون دلار، هزینه عملیاتی سالانه ۳۶۳٫۷ میلیون دلار و سود خالص سالانه ۱۵۶٫۳ میلیون دلار می‌باشد. محاسبه شاخص‌های اقتصادی حاکی از آن است که نرخ بازده داخلی (IRR) معادل ۶۴٪، ارزش خالص فعلی (NPV) در نرخ تنزیل ۲۰٪ برابر ۵۱۸٫۵ میلیون دلار و دوره بازگشت سرمایه ۱٫۵۵ سال می‌باشد. مجموع این شاخص‌ها بیانگر توجیه‌پذیری اقتصادی طرح است. تحلیل حساسیت نشان داد که به ترتیب درآمد فروش، هزینه مواد اولیه (به ویژه اتیلن) و سرمایه ثابت بیشترین درجه حساسیت را بر شاخص سودآوری طرح دارند. کاهش ۲۰٪ در درآمد فروش، نرخ بازده داخلی را به حدود ۲۱٪ کاهش می‌دهد که نزدیک به نرخ تنزیل بوده و طرح را در آستانه غیراقتصادی شدن قرار می‌دهد. در مقابل، افزایش ۲۰٪ در سرمایه ثابت تنها تأثیر حدود ۱۰٪ بر نرخ بازده داخلی دارد. بنابراین ریسک بازار (نوسان قیمت فروش) بحرانی‌ترین ریسک پروژه شناسایی شد. مقایسه

نتایج این پژوهش با فناوری محلولی اسکرتک نشان می‌دهد که نرخ بازده داخلی فرآیند فاز گاز (۶۴٪) به طور قابل توجهی بالاتر از فرآیند محلولی (۱۶٪) است که عمدتاً ناشی از سرمایه‌گذاری کمتر، نبود حلال و مصرف انرژی پایین‌تر در فناوری فاز گاز می‌باشد. بر این اساس، احداث واحد تولید LLDPE با فناوری فاز گاز در ظرفیت مورد بررسی، اقتصادی است. با این حال، موفقیت بلندمدت آن مستلزم مدیریت هوشمندانه نوسانات بازار خوراک و محصول، بهینه‌سازی بهره‌وری عملیاتی و کنترل هزینه‌های سرمایه‌ای خواهد بود.

- مشارکت علمی

زهره طاهرخانی (نویسنده مسئول)، مسئولیت اجرای کلیه مراحل پژوهش، از جمله طراحی مطالعه، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، و همچنین نگارش مقاله را بر عهده داشته است.

۵. منابع و مراجع

- [1] Zhang, B., Chen, B., Dong, J. Y. (2025). Industrial Synthesis of Linear Low-Density Polyethylene with H-Shape Long-Chain-Branching Structures Using Ziegler-Natta Catalysts *Macromolecular Reaction Engineering*, 19, 2400044. <https://doi.org/10.1002/mren.202400044>.
- [2] Spalding, M. A., Chatterjee, A. M. (2018). “*Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets*”, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- [3] Du, W., Ren, Y., Tang, Y., Shi, Y., Yao, X., et al. (2018). Different structure transitions and tensile property of LLDPE film deformed at slow and very fast speeds, *European Polymer Journal*, 103, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.04.003>.
- [4] Larasati, D. A., Rochmadi, Fahrurrozi, M., Budhijanto, W. (2025). Mechanical and biodegradability properties of Linear low-density polyethylene/porang blends, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101134>.
- [5] Simanke, A. G., Lemos, C., Pires, M. (2013). Linear low density polyethylene: Microstructure and sealing properties correlation, *Polymer Testing*, 32, 279-290. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.010>.
- [6] An, M., Cui, B., Duan, X. (2022). Preparation and applications of linear low-density polyethylene, *Journal of Physics: Conference Series*, 2229, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2229/1/012009>.
- [7] Sharma, N., Liu, Y. A., (2023). “*Integrated Process Modeling, Advanced Control and Data Analytics for Optimizing Polyolefin Manufacturing*”, First edition, Wiley-VCH, virginia, 163.
- [8] IHS Group, (2008). “*Chemical Process Economics Program Report No. 36: Low-Density Polyethylene*”, S&P Global Inc., Houston, TX, 42.
- [9] Mrad, A. B., Sheibat-Othman, N., Amorim, A. P. A., Lopes do Rosario, R., McKenna, T. (2023). Polyethylene Slurries: Swelling and Solubility, *Macromolecular Reaction Engineering*, 17, 2300020. <https://doi.org/10.1002/mren.202300020>.
- [10] Nikazar, S., Nikzinat, E., Sepahi, A., Rashedi, R., Saati, M. Najafi, M. (2022). Impact of Prepolymerization Monomer on Polymerization and Properties of LLDPE, *Journal of Petrochemical Engineering*, 2, 20-28. [doi:10.36959/901/250](https://doi.org/10.36959/901/250).

- [11] Makaryana, I. A., Sedova, I. W. (2020). Analysis of the State and Development Prospects of the Industrial Catalysts Market for Polyolefins Production, *Russian Journal of General Chemistry*, 90, 1141-1162. [doi:10.1134/S1070363220060304](https://doi.org/10.1134/S1070363220060304).
- [12] Babaei, M., Farahani M., Shokri, A. A. (2018). Study and Evaluation of the Effect of Reaction Environment in Dry and Condensed Modes on Heat Transfer and Productivity of Gas-Phase Polymerization Reactor, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 16(95), 92-102, In Persian. <https://doi.org/20.1001.1.17355400.1396.16.95.8.3>.
- [13] Karimi, S., Beigzadeh, R. (2023). Simulation of Fouling Phenomenon in Low Density Polyethylene Reactor in Kurdistan Petrochemical Company, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(128), 52-66, In Persian. <https://doi.org/10.22034/ijche.2022.317156.1157>.
- [14] Naidoo, P. (2013). A comparative analysis of the chemical composition of linear low density polyethylene polymers synthesised with 1- hexene comonomer under different catalytic conditions, MSc Thesis, Department of Chemistry and Polymer Science, University of Stellenbosch, South Africa, 2013.
- [15] Dengfei, W., Jian, W., Feng, G., Yuxin, G., Wei, D., Guoxing, Y. (2016). Progress in technology and catalysts for gas phase polyethylene processes, *Advance in Sciences and Engineering*, 25, 264-273.
- [16] Ghorbani Khoshkroudi, S. R., Rabbani, Y., Tavakoli, O. (2021). Power and Steam Production Using Exhaust Gas Recovery to the Flare of Jam Petrochemical LLDPE Unit, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(116), 7-20, In Persian, <https://doi.org/10.22034/ijche.2021.248772.1048>.
- [17] Liu, Z. (2018). WIPO (PCT), WO2019079068A1, Univation Technologies LLC.
- [18] Chen, Z., Han, Y., Geng, Z. (2024). Novel kinetic modeling strategy for industrial-scale UNIPOL polypropylene with Ziegler-Natta catalyst, *Chemical Engineering Journal*, 482, 148830. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148830>.
- [19] Khaksar, S. A., Zhivdar, M., Rahimi, R. (2021). A Comparative Evaluation of Sour Gas Sweetening Processes and Techno-Economic Assessment of Flare Gas Sweetening through Catalytic Conversion of H₂S to Methyl Mercaptan, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(115), 17-30, In Persian. <https://doi.org/10.22034/ijche.2021.252156.1057>.
- [20] Alipour, S., Ghafelebashi, A. H., Savari, Ch. (2022). Techno-Economic Analysis of the Levulinic Acid Synthesis from Monosaccharides, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(118), 7-21, In Persian. <https://doi.org/10.22034/ijche.2021.259392.1076>.
- [21] Sharkawy, A. E., (2004). "Economic Feasibility Studies", First edition, Cairo university: Faculty of Engineering, Cairo, 19.
- [22] Dwiputranto, H., Siregar, H., Sasongko, H. (2016). Financial Feasibility Study for Poly Aluminum Chloride, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 6, 231-237.
- [23] Veronica, J., Nandiyanto, A. (2023). Evaluation Analysis of PEGylated Poly(amidoamine) Dendrimer Production by Divergent Synthesis Method, *Applied Research in Science and Technology*, 3, 36-43. <https://doi.org/10.33292/areste.v3i1.44>.
- [24] <https://www.imarcgroup.com/lldpe-pricing-report>, Available in January 2026.
- [25] Prasetyo, G., Rionaldo, H., Dharmayanty, D., Syafri, N. (2025). Techno-Economic Analysis of Linear Low-Density Polyethylene Plant Using Sclairtech Process Optimized by Heat Integration, *Applied Engineering, Innovation, and Technology*, 2, 15-21. <https://doi.org/10.62777/aeit.v2i1.61>.