Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

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

Research Paper

Analysis of the chlorine chain in Iran's petrochemical industry and investigating its development pathways

Siavash Moeini [1], Mohammad Fakhroleslam [1,*]

[1] *Process Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University,Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Received 2025-05-30
Accepted 2025-07-01
Available online 2026-05-11
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Value Chain
Chlorine Chain
Petrochemical Industry Analysis
Investment Opportunities
Chlorine

GRAPHICAL ABSTRACT

ABSTRACT

Research subject: Chlorine and its derivatives, due to their unique properties, are used in the production of a wide range of materials in chemical, polymer, agricultural, pharmaceutical, and health industries. In fact, more than half of the marketed products worldwide are directly or indirectly related to the chlorine industry. Given the significance of these chemicals, this study aims to analyze the status of the chlorine chain in Iran's petrochemical industry and identify its strengths, weaknesses, and investment opportunities.

Research approach: To assess the status of domestic chlorine production, the nominal and actual production capacities of petrochemical companies were collected and analyzed based on official data from the National Petrochemical Company. Using the collected statistics and data, the decrease in the operational rates of petrochemical companies was analyzed. Additionally, the share of end-use applications in the total chlorine consumption in Iran was determined and analyzed using block mass balance of the process units. To identify investment opportunities in the chlorine chain, trade data for chlorine compounds were collected and analyzed based on customs documentation, in order to identify and introduce chemicals with significant import volume or value compared to other substances.

Main results: The results showed that the majority of chlorine in Iran is used for the production of ethylene dichloride/polyvinyl chloride, with this application accounting for over 91% of chlorine consumption in the petrochemical industry. On the other hand, the high cost of replacing mercury-based chlor-alkali units with more environmentally friendly membrane technology and the inability to secure feedstock were identified as the main reasons for the decline in operational capacity for chlorine and polyvinyl chloride production in the country. Using trade statistics, methylene chloride, powder choline chloride, suspension and emulsion polyvinyl chloride, neoprene, and epichlorohydrin were identified as chemicals with high import volume and value, making the evaluation of their production projects important.

* Corresponding author: fakhroleslam@modares.ac.ir

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 مروری

تحلیل وضعیت زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران و بررسی مسیرهای توسعه آن

سیاوش معینی [۱]، محمد فخرالاسلام [۱,*]

[۱] گروه مهندسی فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: کلر و مشتقات آن به دلیل برخورداری از خواص ویژه، برای تولید طیف وسیعی از مواد در صنایع شیمیایی، پلیمری، کشاورزی، دارویی و بهداشتی استفاده می‌شوند؛ طوری که بیش از نیمی از محصولات بازاریابی‌شده در جهان به طور مستقیم یا غیرمستقیم با صنعت کلر در ارتباط هستند. با توجه به اهمیت این مواد، این پژوهش با هدف تحلیل وضعیت زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران و شناسایی نقاط قوت، ضعف و فرصت‌های قابل‌سرمایه‌گذاری در این زمینه انجام شده است.

روش تحقیق: برای بررسی وضعیت تولید داخلی مواد کلردار، میزان ظرفیت‌های اسمی و واقعی تولید شرکت‌های پتروشیمی با استناد به آمار رسمی شرکت ملی صنایع پتروشیمی جمع‌آوری و تحلیل شد. با استفاده از آمار و اطلاعات جمع‌آوری‌شده، کاهش نرخ عملیاتی شرکت‌های پتروشیمی تحلیل شد. همچنین، با استفاده از موازنه جرم بلوکی واحدهای فرایندی، سهم کاربردهای نهایی از میزان مصرف کلر در ایران تعیین و تحلیل شد. برای شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری موجود در زنجیره کلر، داده‌های تجاری مواد کلردار بر اساس مستندات گمرک جمع‌آوری و تحلیل شد تا موادی که حجم یا ارزش وارداتی قابل‌توجهی نسبت به سایر مواد دارند، شناسایی و معرفی شوند.

نتایج اصلی: نتایج نشان دادند که عمده کلر ایران در راستای تولید اتیلن‌دی‌کلرید/پلی‌وینیل‌کلرید مصرف شده و سهم این کاربرد از میزان مصرف کلر در صنعت پتروشیمی بالغ بر ۹۱ درصد است. از طرفی، هزینه‌بربودن تعویض واحدهای کلرآلکالی جیوه‌ای با فناوری غشایی که محیط‌زیستی‌تر است و ناتوانی در تأمین خوراک، به ترتیب به عنوان دلایل اصلی کاهش ظرفیت عملیاتی تولید کلر و پلی‌وینیل‌کلرید در کشور شناسایی شدند. با استفاده از آمار تجاری، مواد متیلن‌کلرید، کولین‌کلرید پودری، پلی‌وینیل‌کلرید تعلیقی و امولسیونی، نئوپرن و اپی‌کلروهیدرین به عنوان مواد با حجم و ارزش وارداتی بالا شناسایی شدند که بررسی طرح تولید آن‌ها حائز اهمیت است.

کلیدواژه‌ها

زنجیره ارزش

زنجیره کلر

تحلیل صنعت پتروشیمی

فرصت‌های سرمایه‌گذاری

کلر

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

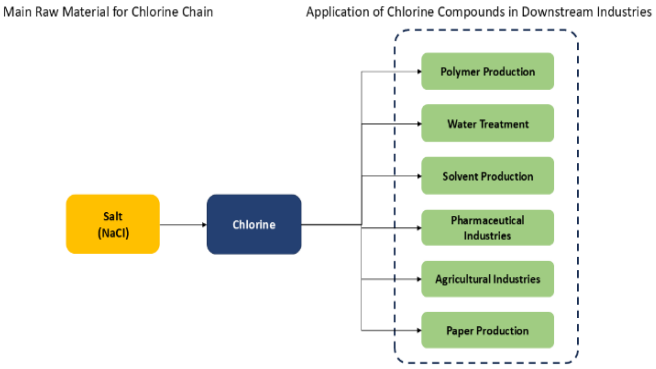
* نویسنده مسئول: fakhroleslam@modares.ac.ir

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

زنجیره کلر بخش مهمی از زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی است که شامل تولید کلر و تبدیل آن به سایر مواد کلردار می‌شود. کلر و مشتقات آن در تولید طیف گسترده‌ای از مواد مانند پلیمرها، ترکیبات شیمیایی، دارویی و کشاورزی کاربرد دارند و نقش مهمی در صنایع شیمیایی و زندگی روزمره ایفا می‌کنند. سالانه میلیون‌ها تن کلر تولید شده و مشتقات آن در بیش از ۸۵٪ داروها و بیش از نیمی از محصولات بازاریابی‌شده در صنایع شیمیایی به‌کار می‌روند [۱]. اهمیت این ماده در اقتصاد جهانی به‌گونه‌ای است که بخش قابل‌توجهی (حدود ۴۵٪) از مشاغل صنعتی در کشور آمریکا به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با صنعت کلر در ارتباط هستند [۲].

نمایی کلی از بخش‌های ابتدایی زنجیره کلر و کاربردهای نهایی مواد کلردار در شکل ۱ نمایش داده شده است. گاز کلر با استفاده از فناوری برق‌کافت نمک طبیعی در فرایندی با نام کلرآلکالی تولید شده [۳] و در واحدهای پایین‌دستی مصرف می‌شود. واحد کلرآلکالی نه‌تنها تولیدکننده کلر است، بلکه محصولات جانبی سود سوزآور و هیدروژن هم به‌وسیله آن تولید می‌شوند [۴]. به همین دلیل، تأمین سود سوزآور که یکی از مواد پرکاربرد در صنایع شیمیایی است [۱]، به عملکرد صنعت کلرآلکالی وابسته است. در حال حاضر، بیش از ۹۷٪ کلر تولیدشده در جهان به‌وسیله فرایند کلرآلکالی تولید می‌شود [۲]. دسترسی آسان به نمک طبیعی و فراوانی آن، از دلایل اقبال گسترده به صنعت کلرآلکالی در مقیاس جهانی بوده است [۵،۱]. بخش باقی‌مانده کلر با استفاده از سایر روش‌ها مانند تبدیل کاتالیزوری هیدروژن کلرید به کلر تولید می‌شود [۶].



شکل ۱ طرحواره نقطه آغازین زنجیره کلر و کاربردهای مواد قابل‌تولید در این زنجیره [۱، ۲]

Figure 1 An overview of the starting point of the chlorine chain and the applications of producible chemicals within this chain [1, 2]

حدود نیمی از کلر تولیدی در سطح جهان صرف تولید پلیمر پلی‌وینیل‌کلرید (PVC) می‌شود؛ پلیمری که پس از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، به‌عنوان سومین پلیمر مصنوعی پرمصرف در جهان شناخته می‌شود [۷]. این ماده که از پلیمری‌شدن مونومر وینیل‌کلرید تولید می‌شود [۷]، در تولید محصولاتی مانند لوله‌ها، ورق‌ها، پوشش‌های کف، سیم و کابل و کالاهای متنوعی که در ساختمان‌سازی و صنایع مصرفی کاربرد دارند، استفاده می‌شود [۱]. علاوه بر PVC، سایر پلیمرها مانند پلی‌وینیلیدن‌کلرید، نئوپرن (پلی‌کلروپرن)، پلی‌کربنات [۸]، رزین‌های اپوکسی [۹]، سیلیکون‌ها [۱۰]، پلی‌یورتان‌ها [۱۱] و پلیمرهای آرامید [۱۱] نیز از واکنش‌های مواد کلردار تولید می‌شوند، صرف‌نظر از این‌که محصول نهایی حاوی کلر باشد یا نباشد. مواد کلردار همچنین در سنتزهای شیمیایی آلی اهمیت فراوانی دارند؛ به‌عنوان مثال، ترکیباتی مانند کلرومتان‌ها، آلیل‌کلرید، مونوکلرواستیک‌اسید و اپی‌کلروهیدرین به‌طور گسترده در واکنش‌های شیمیایی به‌کار گرفته می‌شوند و به تولید محصولات متنوعی منجر می‌شوند که ممکن است حاوی کلر باشند یا نباشند. بخش کمی از مصرف کلر به تولید حلال‌ها اختصاص دارد. هیدروکربن‌های کلردار دارای خواصی هستند که در بین حلال‌های آلی نادر است. از این خواص می‌توان به فراریت بالا (که باعث تسریع در خشک‌شدن می‌شود) و غیرقابل اشتعال بودن اشاره کرد. این حلال‌ها به‌راحتی از طریق تقطیر بازیافت می‌شوند. با این حال، به دلیل مشکلات محیط زیستی، مصرف آن‌ها کاهش یافته و حجم کمی از مصرف کلر را به خود اختصاص داده‌اند [۱].

تاکنون پژوهش‌های جامع و مدونی به منظور تحلیل و توسعه زنجیره کلر صورت نگرفته است. عمده پژوهش‌ها بر سایر زنجیره‌های ارزش مانند زنجیره ارزش متانول [۱۶-۱۳] و الفین‌ها [۱۸-۱۶] متمرکز بوده‌اند. در این میان، معدود پژوهش‌های مرتبط با زنجیره کلر اغلب به بررسی جنبه‌های ایمنی و خطرات محیط زیستی مواد قابل‌تولید در این زنجیره پرداخته‌اند و تمرکز آن‌ها بیش‌تر بر کاهش مصرف مواد کلردار آلاینده در فرایندهای پتروشیمی بوده است.

در سال ۱۹۹۷، مطالعه‌ای توسط کلیجن و همکاران بر روی مواد تولیدی زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی هلند انجام شد. نتایج مطالعه نشان دادند که تعدادی از مواد کلردار نقش قابل‌توجهی در آسیب به محیط زیست نظیر گرمایش جهانی، تخریب لایه ازن و سمیت انسانی دارند. اجرای سیاست‌های کاهش انتشار، مانند حذف تدریجی کلروفلوئوروکربن‌ها (CFCs) و کاهش دی‌اکسین‌ها، تأثیرات مثبتی بر کاهش آسیب‌های محیط زیستی این زنجیره داشته است [۱۹]. در این راستا، هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها (HCFCs) در بسیاری از موارد جایگزین CFCها شدند و خود نیز در حال حذف‌شدن هستند. بازار HCFCها در کشورهای توسعه‌یافته به دلیل گرایش به استفاده از مواد کم‌ضررتر در حال کاهش و حذف است [۲۰].

چانگ و آلن در سال ۱۹۹۷، به بررسی راهکارهایی به‌منظور کاهش مصرف کلر در صنایع شیمیایی پرداختند. رویکرد اصلی پژوهش معطوف به کاهش مصرف کلر از طریق استفاده از فرایندهای جایگزین یا بهبود فرایندهای موجود و همچنین استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای انتخاب مسیرهای کم‌هزینه‌تر و سازگار با محیط زیست بود [۲۱].

حذف بازار گروه‌های پرخطر و استفاده از فرایند کلرآلکالی غشایی برای تولید کلر، می‌تواند نویدبخش بررسی‌های لازم بر روی سایر محصولات باارزش تولیدی در این زنجیره باشد. در پژوهش‌های مختلفی به اهمیت تولید مواد کلردار و بررسی فرایندهای تولید آن‌ها پرداخته‌اند. یاندراپو و کانیداراپو در سال ۲۰۲۱، با توجه به افزایش تقاضای متیل‌کلرید به‌عنوان ماده میانی برای تولید پلیمرهای سیلیکونی، به طراحی فرایند تولید متیل‌کلرید از طریق کلرینه‌کردن متان پرداختند. این مطالعه با اهداف افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود ایمنی فرایند از طریق روش‌های طراحی پیشرفته و افزایش توجیه اقتصادی انجام شده است [۲۲].

گارسیا و همکاران در سال ۲۰۲۳، فناوری نوظهور تولید وینیل‌کلرید از اتان

را با فناوری مرسوم مبتنی بر اتیلن از جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که فناوری‌های مبتنی بر اتان، به‌ویژه در حالت ایده‌آل تا سال ۲۰۵۰، می‌توانند انتشار کربن را تا ۵۸٪ کاهش داده و هزینه‌های تولید را ۳۲ تا ۵۶٪ کاهش دهند. در این راستا، نویسندگان از نرم‌افزار Aspen Plus برای شبیه‌سازی فناوری‌ها، ارزیابی چرخه عمر و مدل‌سازی اقتصادی استفاده کردند [۷]. آلمنا و مارتین در سال ۲۰۱۶، به بررسی فنی-اقتصادی تولید اپی‌کلروهیدرین از گلیسیرین پرداختند که ماده اولیه موردنیاز برای تولید رزین اپوکسی است. آن‌ها با تمرکز بر طراحی مفهومی و تحلیل فنی-اقتصادی این فرایند، نشان دادند که استفاده از گلیسیرین در تولید اپی‌کلروهیدرین، منجر به افزایش بازدهی فرایند، کاهش گازهای گلخانه‌ای و سودآوری تولید اپی‌کلروهیدرین نسبت به فناوری مرسوم تولید این ماده (مبتنی بر پروپیلن) می‌شود [۲۳].

با توجه به مطالعات انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که تاکنون پژوهش مدون و جامعی برای شناسایی، تحلیل و توسعه زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران صورت نگرفته است. این در حالی است که تقاضا برای بیش‌تر مواد کلردار در ایران عمدتاً از طریق واردات تأمین می‌شود. واردات این مواد در شرایطی صورت می‌گیرد که پتانسیل تولید اکثر آن‌ها از نظر دسترسی به منابع اولیه و انرژی ارزان وجود دارد. ایران از نظر دسترسی به منابع نفت، گاز و نمک طبیعی در جایگاه ویژه‌ای قرار دارد؛ طوری‌که مطابق گزارش سالیانه سازمان کشورهای صادرکننده نفت (اوپک)، در زمره دارندگان بزرگ ذخایر انباشت شده نفت و گاز طبیعی در جهان محسوب می‌شود. همچنین، از نظر دسترسی به دریاچه‌ها و معادن نمک، مانند دریاچه‌های آب شور در شهر بندر امام و دریاچه قم، پتانسیل بالایی برای تأمین نمک موردنیاز در واحدهای کلرآلکالی دارد. از طرفی مطابق با مرجع [۲۴]، صنعت کلرآلکالی که نقطه آغازین زنجیره کلر است، جز صنایع انرژی‌بر محسوب می‌شود؛ بنابراین، دسترسی به انرژی ارزان، می‌تواند یکی از مزیت‌های اقتصادی در طرح احداث هم‌زمان واحدهای کلرآلکالی و صنایع پایین‌دست باشد که کشور ایران از آن برخوردار است.

در این مقاله، با تمرکز بر اطلاعات جمع‌آوری‌شده از شرکت‌های پتروشیمی تولیدکننده مواد کلردار و آمار تجاری، وضعیت زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران مورد تحلیل قرار گرفته است تا به یکی از موضوعات کم‌تر بررسی‌شده در حوزه زنجیره ارزش محصولات پرداخته شود. در این راستا، نوع مواد تولیدی و جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش بررسی شده و عوامل مؤثر بر کاهش نرخ عملیاتی واحدهای فرایندی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین، سهم هر یک از کاربردهای نهایی از میزان مصرف کلر تحلیل شده و در نهایت، فرصت‌های سرمایه‌گذاری موجود در این زنجیره با اتکا به داده‌های تجاری شناسایی و معرفی می‌شوند. همچنین، طرح چهار رویکرد که ابعاد مختلف توسعه زنجیره ارزش محصولات را پوشش می‌دهد، یکی از وجوه اصلی تمایز این پژوهش با سایر پژوهش‌های پیشین است.

۲ بخش نظری

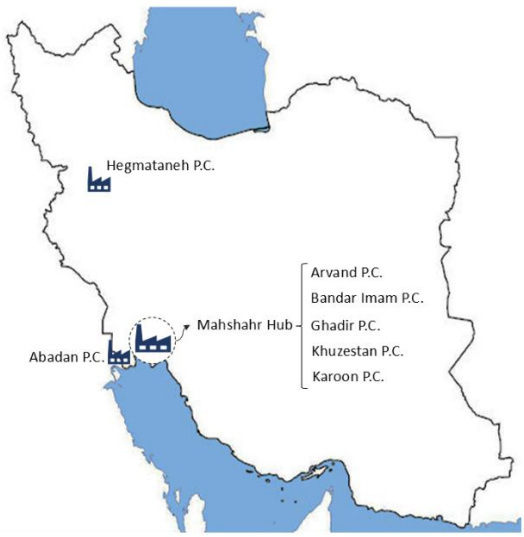
۲-۱ روش شناسی

۲-۱-۱ گردآوری اطلاعات تولید مواد کلردار در صنعت پتروشیمی ایران

در این پژوهش، تحلیل وضعیت زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران بر اساس داده‌ها و آمار رسمی شرکت ملی صنایع پتروشیمی انجام شده است [۲۵]. به این منظور، اطلاعات مربوط به ظرفیت‌های اسمی و واقعی تولید مواد کلردار از گزارش‌های مرجع مذکور برای سال ۱۴۰۰ استخراج شده است [۲۶]. همچنین، بخشی از اطلاعات حاصل از میزان تولید و فروش شرکت‌های پتروشیمی از سامانه اطلاع‌رسانی سازمان بورس و اوراق بهادار جمع‌آوری شده است [۲۷].

مطابق با آمار، در حال حاضر، ۷ شرکت پتروشیمی در حال تولید مواد کلردار هستند که مجموع ظرفیت اسمی تولید آن‌ها ۴/۲ میلیون تن در سال است. این میزان معادل با ۵٪ کل ظرفیت اسمی صنعت پتروشیمی ایران محسوب می‌شود. از میان آن‌ها، ۵ شرکت پتروشیمی اروند، بندر امام، غدیر، خوزستان و کارون در منطقه اقتصادی ماهشهر قرار دارند و پتروشیمی‌های آبادان و هگمتانه به‌ترتیب در آبادان و همدان جای گرفته‌اند. جانمایی شرکت‌های پتروشیمی تولیدکننده کلر و مواد کلردار در نقشه ایران در شکل ۲ و اطلاعات تولید آن‌ها در جدول ۱ ارائه داده شده است.

سایر شرکت‌های تولیدکننده مواد کلردار ذیل وزارت صنعت، معدن و تجارت (صمت) قرار دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شرکت نیروکلر در اصفهان و یزد و شرکت کلرپارس در تبریز اشاره کرد. این دو شرکت بخشی از کلر را به‌صورت محصول نهایی برای خدمات تصفیه آب عرضه کرده و بخشی از آن را به سایر مشتقات کلر تبدیل می‌کنند. سایر واحدهای تولیدکننده از ظرفیت اسمی پایینی برخوردار هستند و کاربرد محصولات آن‌ها در مقیاس محلی است.



شکل ۲ جانمایی شرکت‌های پتروشیمی تولیدکننده مواد کلردار به‌صورت محصول اصلی یا جانبی در نقشه ایران [۲۵]

Figure 2 Location of petrochemical companies producing chlorinated chemicals as main or by-products on the vector map of Iran [25]

با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده، ابتدا تولیدات شرکت‌های پتروشیمی بررسی شده و ورودی‌ها، خروجی‌ها و سبد محصولات کلردار در صنعت پتروشیمی شناسایی و معرفی می‌شوند. سپس، این داده‌ها به منظور دسته‌بندی محصولات بر اساس جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش، به چهار دسته مواد خام، محصولات پایه، محصولات میانی و محصولات نهایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحلیل، مواد خام به موادی اطلاق شده که صرفاً به‌عنوان ورودی به صنعت پتروشیمی هستندو در نقطه ابتدایی زنجیره کلر قرار دارند. محصولات پایه موادی هستند که طیف گسترده‌ای از محصولات از واکنش‌های آن‌ها تولید می‌شود. محصولات میانی موادی هستند که عمدتاً بلافاصله پس از تولید مصرف شده و ارزش فروش بالایی ندارند و محصولات نهایی، خروجی‌های صنعت پتروشیمی محسوب می‌شوند که به سایر صنایع یا بازارهای مختلف عرضه می‌شوند.

به منظور تحلیل عمیق‌تر، بررسی سهم هر یک از کاربردهای نهایی از میزان مصرف کلر اهمیت بالایی دارد؛ زیرا شناخت دقیق این سهم‌ها به شناسایی اولویت‌های مصرف، بخش‌های پرتقاضا، فرصت‌های رشد و برنامه‌ریزی راهبردی در صنعت پتروشیمی کمک می‌کند. برای تعیین سهم هر یک از کاربردهای نهایی از مصرف کلر، ابتدا توزیع کلر در واحدهای پایین‌دستی بررسی شده و محصولات نهایی حاصل از آن‌ها تحلیل و دسته‌بندی می‌شوند. سپس، با بهره‌گیری از داده‌های مربوط به تولید، مصرف و تبادل مواد میان مجتمع‌های پتروشیمی، میزان مصرف ورودی‌ها و تولید خروجی‌های هر واحد فرایندی مشخص شده و بر اساس آن، میزان توزیع کلر در کاربردهای مختلف تعیین می‌شود. در نهایت، سهم هر کاربرد ارائه و تحلیل می‌شود.

۲-۱-۲ گردآوری اطلاعات تجارت مواد کلردار قابل تولید در صنعت پتروشیمی

به منظور شناسایی نقاط ضعف زنجیره کلر در ایران و معرفی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در این حوزه، از اطلاعات مربوط به تجارت مواد کلردار استفاده شده است. این داده‌ها با استناد به آمارهای رسمی گمرک ایران استخراج شده‌اند [۲۸]. داده‌های تجاری هر یک از مواد کلردار در بازه زمانی پنج ساله ۱۴۰۱-۱۳۹۷ بر اساس کد تعرفه اختصاصی مربوط، استخراج و تحلیل شده‌اند. داده‌های جمع‌آوری شده از صادرات مواد در جدول ۲ و داده‌های وارداتی در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

به همین طریق، اطلاعات موردنیاز از ارزش تجاری مواد کلردار بر اساس آمارهای رسمی سازمان گمرک کشور قابل‌استخراج است. آن دسته از موادی که حجم یا ارزش وارداتی/صادراتی آن‌ها بیش‌تر از ۵٪ کل حجم یا ارزش وارداتی/صادراتی مواد کلردار بوده، به‌عنوان مواد کلیدی در تحلیل وضعیت صادرات و واردات تلقی شده‌اند. سپس، موادی که حجم یا ارزش وارداتی بالایی دارند، به‌عنوان فرصت‌های سرمایه‌گذاری در زنجیره کلر معرفی می‌شوند که امکان تولید آن‌ها در داخل کشور وجود دارد.

جدول ۱ ظرفیت اسمی و واقعی تولید مواد کلردار در شرکت‌های پتروشیمی

Table 1 Nominal and actual production capacity of chlorinated compounds in petrochemical companies

Company	Products	Capacity (KTPA)	Operational Capacity (KTPA)	Status
Arvand P.C.	Chlorine	585.00	427.66	-
	Ethylene dichloride	890.00	529.30	-
	Vinyl Chloride Monomer	343.00	256.17	-
	Suspension Polyvinyl Chloride	300.00	198.27	-
	Emulsion Polyvinyl Chloride	40.00	19.80	-
	Bleach	16.00	0.03	-
Bandar Imam P.C.	Chlorine	250.00	0.00	Phased-Out
	Ethylene dichloride	440.00	259.30	-
	Vinyl Chloride Monomer	180.00	159.07	-
	Suspension Polyvinyl Chloride	175.00	155.52	-
	Bleach	6.60	6.52	-
Ghadir P.C.	Ethylene dichloride	240.00	170.62	-
	Vinyl Chloride Monomer	150.00	108.98	-
	Suspension Polyvinyl Chloride	120.00	108.17	-
Abadan P.C.	Chlorine	26.40	0.00	Phased-Out
	Ethylene dichloride	86.20	31.33	-
	Vinyl Chloride Monomer	71.00	37.68	-
	Suspension Polyvinyl Chloride	120.00	32.67	-
Hegmatane P.C.	Suspension Polyvinyl Chloride	40.00	1.88	-
Karoon P.C.	Hydrogen Chloride (as a By-Product)	189.00	88.64	-
	Bleach	6.80	5.43	-
Khuzestan P.C.	Phosgene	11.60	2.58	-

جدول ۲ حجم صادراتی مواد کلردار طی بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۹۷

Table 2 Export volume of chlorinated chemicals during the period 1397–1401 (2018–2022)

Chemicals	HS Code	1397	1398	1399	1400	1401	Average
		KTPA					
Chlorine	2801 10 00	8.96	9.13	7.37	8.76	9.85	8.81
Hydrochloric Acid	2806 10	34.87	30.26	24.24	32.89	39.50	32.35
Ammonium Chloride	2827 10 00	0.02	0.01	0.08	2.05	1.88	0.81
Sodium Hypochlorite	2828 90 10	17.76	22.58	51.67	59.64	54.52	41.24
Ethylene Dichloride (EDC)	2903 15 00	13.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60
Vinyl Chloride Monomer (VCM)	2903 21 00	6.27	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25
Suspension Polyvinyl Chloride (S-PVC)	3904 10 10	77.67	153.23	102.28	107.77	28.21	93.83
Emulsion Polyvinyl Chloride (E-PVC)	3904 10 20	0.17	3.18	5.08	1.32	0.06	1.96
Total		**158.70**	**218.39**	**190.71**	**212.43**	**134.02**	**182.85**

جدول ۳ حجم وارداتی مواد کلردار طی بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۹۷

Table 3 Import volume of chlorinated chemicals during the period 1397–1401 (2018–2022)

Chemicals	HS Code	1397	1398	1399	1400	1401	Average
		KTPA					
Chlorine	2801 10 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hydrochloric Acid	2806 10	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02
Ammonium Chloride	2827 10 00	0.54	1.50	0.45	0.32	0.37	0.64
Sodium Hypochlorite	2828 90 10	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Methyl chloride & Ethyl chloride	2903 11 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ethylene Dichloride (EDC)	2903 15 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methylene Chloride	2903 12 00	8.17	11.98	6.57	8.52	11.75	9.40
Chloroform	2903 13 00	0.16	0.23	0.20	0.25	0.08	0.19
1,4-Dichlorobutane	2903 19 00	0.00	0.06	0.12	0.01	0.04	0.05
Vinyl Chloride Monomer (VCM)	2903 21 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Trichloroethylene	2903 22 00	0.05	0.01	0.09	0.12	0.12	0.08
Tetrachloroethylene	2903 23 00	2.23	3.53	2.37	1.05	3.54	2.54
Chlorodifluoromethane	2903 71 00	0.88	1.32	1.46	1.35	1.62	1.33
Dichlorofluoroethane	2903 73 00	0.23	1.32	0.84	0.31	0.51	0.64
Epichlorohydrin	2910 30 00	0.55	4.00	3.88	1.72	1.83	2.40
Chlorobenzenes	2903 91 00	0.12	0.36	0.27	0.11	0.27	0.23
Mono-chloroacetic acid	2915 40 10	0.22	0.27	0.33	0.40	0.07	0.26
Chloride choline (75%) liquid	2923 10 10	0.23	0.27	0.12	0.27	0.59	0.29
Chloride choline (60%) powder	2923 10 20	9.97	10.54	3.96	5.11	7.82	7.48
Suspension Polyvinyl Chloride (S-PVC)	3904 10 10	16.65	1.43	2.84	2.83	10.41	6.83
Emulsion Polyvinyl Chloride (E-PVC)	3904 10 20	2.80	1.61	2.20	2.91	5.56	3.02
Polyvinylidene Chloride (PVDC)	3904 50 00	0.06	0.12	0.16	0.15	0.16	0.13
Neoprene(latex)	4002 41 00	0.32	0.04	0.00	0.02	0.00	0.08
Neoprene	4002 49 00	1.73	1.18	1.34	1.22	1.23	1.34
Calcium Hypochlorite	2828 10 00	1.25	0.72	0.30	0.38	0.43	0.62
Total		**46.17**	**40.52**	**27.51**	**27.06**	**46.42**	**37.54**

۳ نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا با استفاده از داده‌های استخراج‌شده از تولیدات شرکت‌های پتروشیمی، وضعیت تولید مواد کلردار در صنعت پتروشیمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با تکیه بر داده‌های تجاری، مواد با حجم و ارزش وارداتی بالا شناسایی شده و به‌عنوان فرصت‌های سرمایه‌گذاری موجود در زنجیره کلر معرفی می‌شوند. در نهایت، چهار مسیر کلی برای توسعه زنجیره ارزش محصولات پیشنهاد می‌شود که کاربرد عمومی داشته و می‌توانند مبنای سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های آینده در صنعت پتروشیمی قرار گیرند.

۳-۱ تحلیل وضعیت زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران

این تحلیل در سه بخش مجزا صورت می‌گیرد که شامل بررسی تولیدات مواد کلر در صنعت پتروشیمی و دسته‌بندی آن‌ها بر اساس جایگاه قرارگیری در زنجیره ارزش، تحلیل نرخ عملیاتی واحدهای تولیدکننده این مواد و همچنین تعیین سهم هر یک از کاربردهای نهایی از میزان مصرف کلر در صنعت پتروشیمی ایران است. این رویکرد سه‌جانبه، چشم‌انداز مناسبی از عملکرد، چالش‌ها و فرصت‌های موجود در زنجیره کلر فراهم می‌آورد.

۳-۱-۱ بررسی تولیدات و دسته‌بندی مواد بر اساس جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش

مطابق جدول ۱، بخش عمده کلر تولیدی در صنعت پتروشیمی ایران برای تولید پلی‌وینیل‌کلرید مصرف شده و بخشی از آن به هیدروکلریک اسید، سدیم‌هیپوکلریت (آب‌ژاول) و فسژن تبدیل می‌شود. در حال حاضر، پتروشیمی اروند تنها شرکت تولیدکننده کلر در مقیاس کلان بوده که علاوه بر مصارف خود، تأمین‌کننده خوراک پتروشیمی‌های غدیر، آبادان، کارون و کیمیای بندر امام نیز است. نمک مصرفی در این پتروشیمی از دریاچه‌های نمک شهر بندر امام استحصال می‌شود.

مجموع ظرفیت اسمی کل PVC کشور ۷۸۵ هزار تن در سال است که ۷۴۵ هزار تن در سال آن از طریق فرایند پلیمری‌شدن تعلیقی و ۴۰ هزار تن در سال آن به شکل امولسیون تولید می‌شود. شرکت‌های پتروشیمی اروند، بندر امام، غدیر و هگمتانه تولیدکننده PVC از نوع تعلیقی و پتروشیمی اروند تنها تولیدکننده PVC از نوع امولسیون است. PVC بعد از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، سومین پلیمر پرمصرف در جهان است و حدود ۵۰٪ مصرف کلر در جهان را به خود اختصاص داده است. به منظور تولید این ماده، اتیلن‌دی‌کلرید (EDC) از واکنش مستقیم کلر و اتیلن و همچنین واکنش غیرمستقیم هیدروژن کلرید و اتیلن تولید می‌شود. سپس، مونومر وینیل‌کلرید (VCM) که به‌عنوان فرایند در تولید PVC استفاده می‌شود، از واکنش گرماکافت EDC حاصل شده و در فرایند پلیمری‌شدن استفاده می‌شود.

بخش عمده هیدروکلریک اسید تولیدی در صنعت پتروشیمی ایران به‌عنوان محصول جانبی واحدهای وینیل‌کلرید مونومر تولید می‌شود. بخش عمده آن بلافاصله به واحدهای تولید اتیلن‌دی‌کلرید تغذیه شده و باقیمانده در گرید تجاری تنظیم و به بازار عرضه می‌شود. شرکت‌های پتروشیمی اروند، غدیر، آبادان و بندر امام از جمله تولیدکنندگان هیدروکلریک‌اسید در واحدهای VCM هستند که بخش کمی از آن به بازار عرضه شده و مابقی در واحدهای تولید اتیلن‌دی‌کلرید مصرف می‌شود. در حال حاضر، شرکت پتروشیمی کارون بزرگ‌ترین تولیدکننده و عرضه‌کننده هیدروکلریک اسید در کشور است که این ماده را به‌عنوان محصول جانبی در واحدهای تولید ایزوسیانات‌ها تولید می‌کند.

محصول اصلی پتروشیمی خوزستان، پلی‌کربنات، از واکنش یک ماده کلردار تولید می‌شود، اما خود فاقد کلر است. بخش عمده کلر ورودی به پتروشیمی خوزستان به فسژن تبدیل می‌شود که به‌عنوان خوراک واحد پلی‌کربنات مصرف و بخش کمی از آن به سدیم‌هیپوکلریت تبدیل می‌شود.

به‌عنوان جمع‌بندی، سبد محصولات صنعت پتروشیمی ایران در زنجیره کلر شامل مواد کلردار PVC، هیدروکلریک‌اسید و سدیم‌هیپوکلریت بوده و اتیلن‌دی‌کلرید، وینیل‌کلرید و فسژن به‌عنوان مواد میانی تولید و مصرف می‌شوند. بر این اساس و توضیحات ارائه‌شده، دسته‌بندی مواد این زنجیره بر اساس جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش کلر، در شکل ۳ ارائه شده است. سایر مشتقات کلر در مقیاس‌های پایین در واحدهای ذیل وزارت صمت تولید می‌شوند.

Raw Materials	Basic Products	Intermediates	Final Products
❖ Salt (It is extracted from the salt lakes of Mahshahr city)	❖ Chlorine ❖ HCl (It is produced as a by-product in Vinyl Chloride & TDI Unit)	❖ Ethylene Dichloride ❖ Vinyl Chloride ❖ Phosgene	❖ Polyvinyl Chloride (PVC) ❖ Sodium Hypochlorite ❖ Part of HCl

شکل ۳ دسته‌بندی مواد موجود در زنجیره کلر صنعت پتروشیمی ایران بر اساس مفهوم مواد بالادستی، میانی و پایینی

Figure 3 Classification of chemicals in the chlorine chain of Iran's petrochemical industry based on upstream, intermediate, and downstream concepts

با توجه به ظرفیت‌های اسمی و عملیاتی ارائه‌شده در جدول ۱، سهم قابل‌توجه مصرف کلر در تولید پلی‌وینیل‌کلرید نسبت به سایر محصولات به‌وضوح مشاهده می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که تمرکز فعلی صنایع پتروشیمی کشور عمدتاً بر توسعه و بهره‌برداری از بخش پایین‌دستی زنجیره ارزش کلر، یعنی تولید مواد پلیمری نهایی، معطوف شده است. تولید PVC به‌عنوان یکی از محصولات راهبردی و پرمصرف، نقش محوری در کاربردهای صنعتی و ساختمانی ایفا می‌کند و بخش عمده‌ای از کلر تولیدی را به خود اختصاص داده است.

۳-۱-۲ تحلیل نرخ عملیاتی واحدهای فرایندی تولیدکننده مواد کلردار

در این بخش، به تحلیل پایین‌بودن نرخ عملیاتی واحدهای تولیدکننده کلر، پلی‌وینیل‌کلرید و سدیم‌هیپوکلریت پرداخته می‌شود. از آن جا که موادی مانند EDC و VCM به‌صورت ماده میانی تولید و مصرف می‌شوند و بازار آن‌ها متأثر از شرایط تولید و بازار PVC است، بررسی شرایط PVC به‌منزله بررسی شرایط تولید آن‌ها است. همچنین، تولید فسژن نیز متأثر از شرایط بازار محصولات نهایی (ایزوسیانات‌ها و پلی‌کربنات) است که صحبت از آن‌ها خارج از مبحث زنجیره کلر است.

- **تولید کلر**

مطابق با داده‌های جدول ۱، مجموع ظرفیت اسمی واحدهای کلرآلکالی در پتروشیمی‌های کشور ۸۶۱ هزار تن در سال است. ، مقدار کلر تولید و مصرف‌شده حدود ۴۲۸ هزار تن در سال بوده که نشان‌دهنده ضریب بهره‌برداری ۰/۵۰ است. علت اصلی این فاصله میان ظرفیت اسمی و عملیاتی، خروج واحدهای کلرآلکالی پتروشیمی‌های بندر امام و آبادان از مدار تولید به دلایل محیط زیستی بوده است. در مجموع، این دو واحد ۲۷۶ هزار تن در سال از ظرفیت اسمی تولید کلر را به خود اختصاص داده‌اند. فناوری مورداستفاده در این دو واحد از نوع کلرآلکالی جیوه‌ای بوده که به دلیل استفاده از جیوه، آثار مخربی بر سلامتی انسان و محیط زیست

داشته‌اند. دو عامل بالابودن هزینه‌های جایگزینی این فناوری با فناوری غشایی و نیاز به تأمین دانش فنی مرتبط با الکترولایزرهای مورداستفاده در سلول‌های غشایی، از جمله عوامل اصلی تأخیر در نوسازی و به‌سازی این واحدها بوده است. در نتیجه، توقف فعالیت این دو واحد که نزدیک به ۳۰٪ از ظرفیت اسمی تولید کلر را به خود اختصاص داده‌اند، عامل اصلی کاهش نرخ بهره‌برداری از ظرفیت تولید کلر در ایران است.

❖ **تولید پلی‌وینیل‌کلرید**

در حال حاضر، PVC با نرخ عملیاتی نسبتاً بالایی در شرکت‌های پتروشیمی غدیر، بندر امام و اروند تولید و عرضه می‌شود. میانگین نرخ تولید PVC در پتروشیمی‌های غدیر و بندر امام طی دوره زمانی سه ساله منتهی به ۱۴۰۲ حدود ۰/۹۵ بوده‌است. با توجه به آن‌که هر سه پتروشیمی در منطقه اقتصادی ماهشهر قرار داشته و خوراک آن‌ها به‌وسیله پتروشیمی اروند قابل‌تأمین است، لذا مشکلی بابت دسترسی به خوراک برای این سه پتروشیمی وجود نداشته است.

عمده اختلاف میان ظرفیت اسمی و عملیاتی PVC در کشور به عملکرد دو پتروشیمی هگمتانه و آبادان مربوط است. مجموع ظرفیت اسمی PVC در این دو پتروشیمی، ۱۵۰ هزار تن در سال است که ۲۰٪ ظرفیت اسمی تولید این ماده را در کشور شامل می‌شود. پتروشیمی هگمتانه در استان همدان و در سال ۱۳۹۹ به بهره‌برداری رسید و میانگین نرخ عملیاتی آن طی سال‌های گذشته ۰/۰۷ بوده است. خوراک مصرفی این مجتمع وینیل‌کلرید بوده که تأمین آن از دو پتروشیمی اروند و غدیر برنامه‌ریزی شده است. وینیل‌کلرید ماده‌ای سمی و اشتعال‌پذیر بوده و در دسته‌بندی مواد آلاینده قرار می‌گیرد. انتقال این ماده در حجم زیاد و در مسافت‌های طولانی سخت بوده و نگه‌داری و انتقال آن نیازمند رعایت الزامات ایمنی بسیاری است. همچنین، با توجه به ارزش پایین این ماده در مقایسه با PVC، عموم تولیدکنندگان تمایل دارند تا وینیل‌کلرید تولیدی خود را به PVC تبدیل کنند، تا آن که با ارزش پایین به فروش برسانند. این دو مورد، دلایلی هستند که تأمین خوراک پتروشیمی هگمتانه را با مشکلات فراوانی مواجه کرده‌اند.

واحد PVC پتروشیمی آبادان با ظرفیت اسمی ۱۱۰ هزار تن در سال طراحی و احداث شده است. متوسط نرخ عملیاتی این واحد طی سال‌های گذشته ۰/۲۳ بوده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، واحد کلرآلکالی پتروشیمی آبادان که مسئولیت تولید کلر را بر عهده دارد، به دلایل محیط‌زیستی از مدار تولید خارج شد. به همین دلیل، عدم تولید کلر در این پتروشیمی، عامل اصلی کاهش تولید پایین‌دست این مجتمع، PVC، بوده است.

❖ **تولید سدیم‌هیپوکلریت**

ظرفیت اسمی تولید سدیم‌هیپوکلریت در شرکت‌های پتروشیمی کشور بالغ بر ۲۹/۶ هزار تن در سال است که با ضریب عملیاتی ۰/۴۱، میزان تولید واقعی این ماده حدود ۱۲/۱ هزار تن در سال برآورد شده است. در میان این شرکت‌ها، پتروشیمی‌های بندر امام و کارون از نرخ عملیاتی نسبتاً بالایی برای تولید این ماده برخوردار بوده‌اند؛ اما پتروشیمی اروند که ۵۴٪ از سهم تولید سدیم‌هیپوکلریت در بین شرکت‌های پتروشیمی را در اختیار دارد، با تولید تنها ۰/۰۳ هزار تن، نرخ عملیاتی بسیار پایینی داشته است (۰/۲ درصد). علی‌رغم عدم وجود گزارش رسمی درباره علت کاهش بهره‌برداری در واحد تولید سدیم‌هیپوکلریت پتروشیمی اروند، احتمالاً عوامل اقتصادی نقش مهمی در این موضوع داشته‌اند. میزان سود حاصل از فروش هر کیلو تن محصولات سدیم‌هیپوکلریت و پلی‌وینیل‌کلرید برای شرکت پتروشیمی اروند در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ بررسی سود حاصل از فروش هر کیلو تن محصولات پلی‌وینیل‌کلرید و سدیم‌هیپوکلریت بر اساس صورت‌های مالی سال مالی منتهی به ۱۴۰۰/۱۲/۲۹ شرکت پتروشیمی اروند [۲۷]

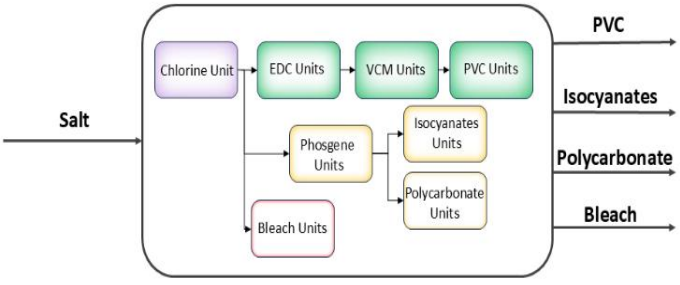
Table 4 Analysis of profit per thousand tons from the sales of polyvinyl chloride (PVC) and sodium hypochlorite products based on the financial statements for the fiscal year ended 1400/12/29 (2022/03/20), Arvand petrochemical company [27]

Chemicals	Sales volume (kt)	Total profit (Million Rials)	Profit per unit sold (Million Rials/kt)
Sodium Hypochlorite	0.03	87	2,900
Polyvinyl Chloride	233.7	43,155,767	184,663.1

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، سود حاصل از فروش هر کیلو تن محصول PVC تقریباً ۶۴ برابر بیش‌تر از سود فروش سدیم‌هیپوکلریت است. این اختلاف قابل‌توجه در سودآوری، نشان‌دهنده جذابیت و اولویت اقتصادی بالاتر تولید PVC نسبت به سایر محصولات است.

۳-۱-۳ بررسی سهم کاربردهای نهایی از میزان مصرف کلر در صنعت پتروشیمی ایران

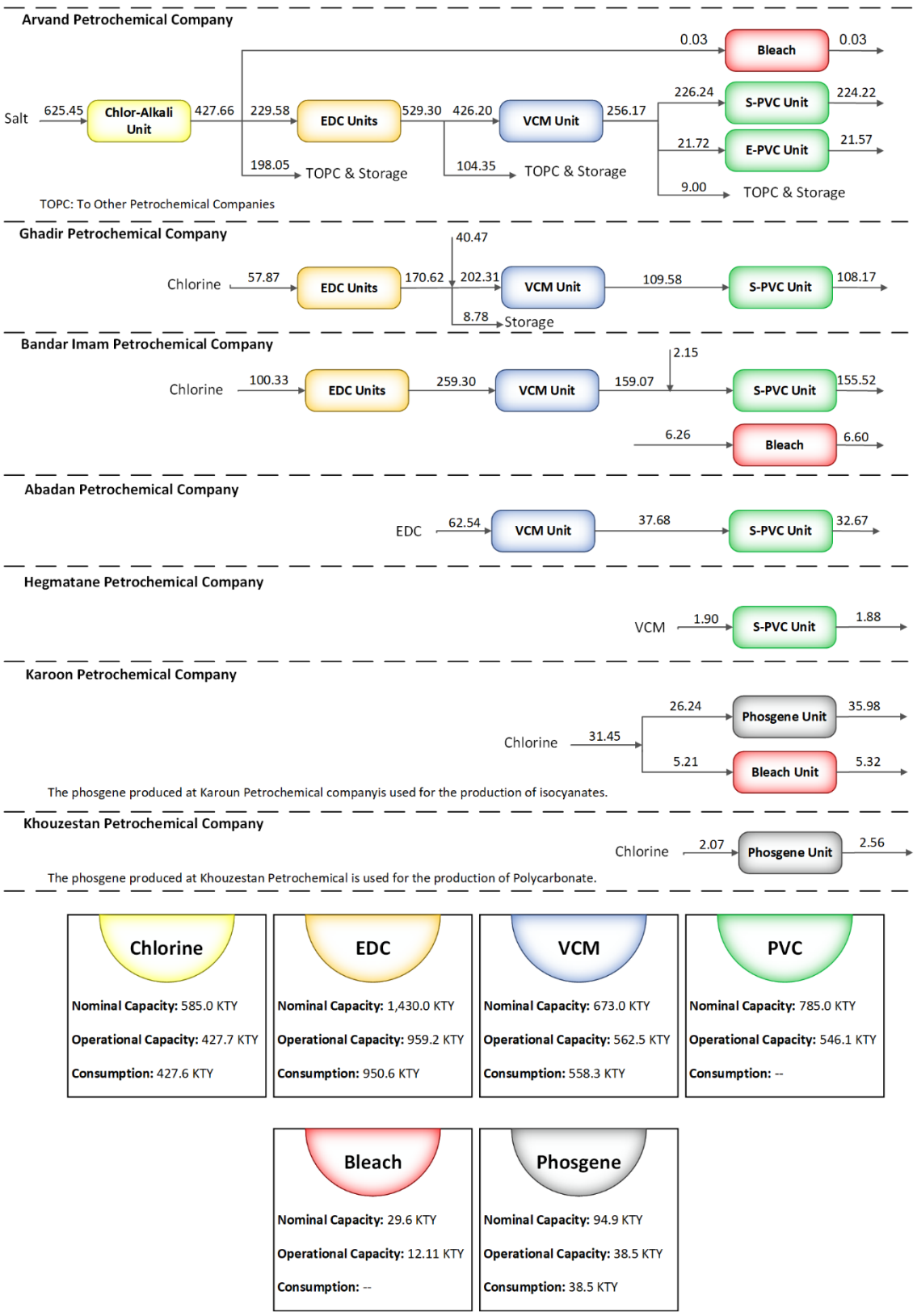
بر اساس جدول ۱ و توضیحات ارائه‌شده در بخش قبل، کلر تولیدی در مجتمع‌های پتروشیمیایی عمدتاً برای تولید پلی‌وینیل‌کلرید استفاده شده و بخشی از آن در راستای تولید سدیم‌هیپوکلریت و فسژن مصرف می‌شود. بر این اساس، ساختار موجود در شکل ۴ برای نشان‌دادن نحوه مصرف کلر در صنایع پتروشیمی قابل‌ارائه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاربردهای کلر تولیدی در صنعت پتروشیمی ایران در چهار دسته قرار می‌گیرد: نخست، مصرف کلر در تولید EDC/PVC؛ دوم، استفاده از کلر در تولید ایزوسیانات‌ها از طریق واکنش‌های فسژن، سوم؛ تولید پلی‌کربنات از طریق فسژن و چهارم؛ کاربرد کلر در بخش بهداشت (سدیم‌هیپوکلریت به‌عنوان عامل ضدعفونی‌کننده و گندزدا کاربرد دارد).



شکل ۴ طرحواره نحوه مصرف کلر در صنعت پتروشیمی ایران

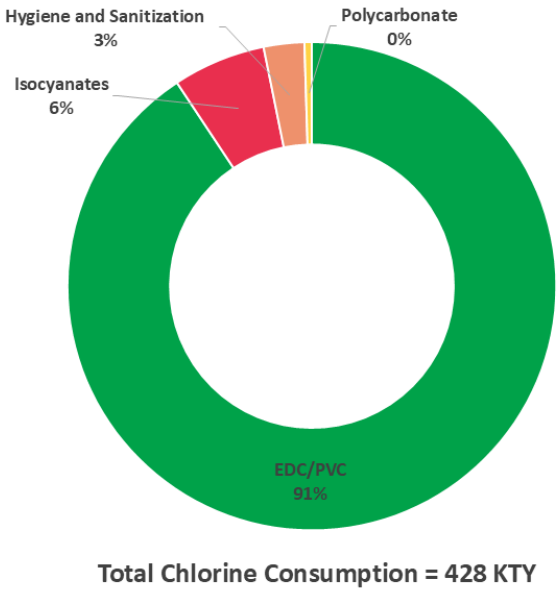
Figure 4 An overview of chlorine consumption in Iran's petrochemical industry

به‌منظور محاسبه سهم هر یک از کاربردهای مذکور از میزان مصرف کلر، موازنه جرم واحدهای فرایندی شرکت‌های پتروشیمی در شکل ۵ ارائه شده است تا اطلاعات بهتری از میزان تولید و مصرف مواد حاصل شود. بر اساس موازنه‌های جرم، سهم هر یک از کاربردها از میزان مصرف کلر محاسبه شده و نتایج در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۵ جریان‌های ورودی و خروجی واحدهای فرایندی که تولیدکننده مواد کلردار هستند

Figure 5 Input and output flows of process units producing chlorinated compounds



شکل ۶ سهم هر یک از کاربردهای نهایی از میزان مصرف کلر در صنعت پتروشیمی ایران

Figure 6 Share of each application in chlorine consumption within Iran's petrochemical industry

در سال ۱۴۰۰، ۴۲۸ هزار تن کلر در مجتمع‌های پتروشیمیایی تولید شده که ۳۸۸ هزار تن از آن برای تولید PVC مصرف شده است؛ بنابراین، PVC با سهم ۹۱ درصدی از مصرف کلر ایران، به‌عنوان بخش غالب و تأثیرگذار بازار کلر در نظر گرفته می‌شود. در واقع، میزان عرضه و تقاضای کلر در ایران عمدتاً متناسب با نوسانات بازار PVC است. تقاضا برای EDC/PVC عمدتاً به‌وسیله بخش ساخت‌وساز هدایت می‌شود. بیش از ۹۰٪ از PVC تولیدی در جهان، برای تولید لوله‌ها و اتصالات، درها و چارچوب‌ها، فیلم و ورق و سیم و کابل مصرف شده که کاربرد عمده آن‌ها در صنعت ساختمان است؛ بنابراین، صنعت ساختمان به‌عنوان یکی از محرک‌های اصلی تولید کلر در ایران محسوب می‌شود.

پس از EDC/PVC، تولید ایزوسیانات‌ها حدود ۶ درصد از مصرف کلر در صنایع پتروشیمی را در بر گرفته و به‌عنوان دومین عامل بزرگ مصرف کلر شناخته می‌شوند. این مواد عمدتاً در تولید فوم‌های پلی‌یورتان مصرف شده که عمدتاً در صنعت خودروسازی، ساخت‌وساز و مبلمان، کاربرد دارند.

سدیم‌هیپوکلریت که با کاربردهای بهداشتی تولید می‌شود، حدود ۳٪ از کلر تولیدی در صنایع پتروشیمی را به خود اختصاص داده است. این ماده به‌عنوان عامل ضدعفونی‌کننده و گندزدا استفاده می‌شود و با توجه به اهمیت بهداشت و توسعه شهرنشینی، پیش‌بینی می‌شود سهم آن از مصرف کلر حفظ و یا افزایش یابد. شایان ذکر است، با در نظر گرفتن تولیدات سایر صنایع شیمیایی ذیل وزارت صمت، سهم دسته کاربردهای بهداشتی از میزان مصرف کلر از سهم دسته ایزوسیانات‌ها پیشی خواهد گرفت. بخش کوچک باقی‌مانده از تقاضای کلر (کم‌تر از ۱٪) هم به تولید پلی‌کربنات اختصاص داشته است.

۳-۲ تحلیل داده‌های تجاری و ارائه فرصت‌های سرمایه‌گذاری در زنجیره کلر

بخش قابل‌توجهی از تقاضای مواد کلردار مورد نیاز کشور از طریق واردات تأمین می‌شود، طوری که متوسط حجم واردات و ارزبری سالانه آن‌ها به ترتیب حدود ۳۸ هزار تن و ۵۷ میلیون دلار برآورد شده است. مطابق با شکل ۷، مواد متیلن‌کلرید، کولین‌کلرید، پلی‌وینیل‌کلرید تعلیقی و امولسیونی، تتراکلرواتیلن و اپی‌کلروهیدرین از مهم‌ترین مواد وارداتی در حجم و ارزش بالا بوده و نئوپرن، ماده‌ای است که علی‌رغم حجم واردات نسبتاً پایین، دارای ارزش وارداتی قابل‌توجه است.

از میان مواد وارداتی اشاره‌شده، تنها دو محصول PVC تعلیقی و امولسیونی در کشور تولید می‌شوند و تراز تجاری آن‌ها مطابق با شکل ۷ و شکل ۸، مثبت است. در صورت عرضه بخشی از PVC صادراتی در کشور، می‌توان نیاز به واردات این ماده را کم و حتی برطرف کرد. بالاتر بودن نرخ فروش صادراتی نسبت به فروش داخلی، می‌تواند یکی از دلایل جذاب برای صادرات این ماده باشد. با این حال، به‌دلیل تجارت‌پذیری این ماده و رشد تقاضای داخلی، امکان بررسی طرح تولید آن وجود دارد؛ بنابراین، شرایط امکان‌سنجی طرح تولید تمامی مواد وارداتی اشاره‌شده با در نظرداشتن میزان افزایش تقاضا طی دهه آینده و تجارت‌پذیری محصولات وجود دارد. البته از میان مواد اشاره‌شده، بازار تتراکلرواتیلن در سال‌های پیش رو، به دلیل محدودیت‌های محیط‌زیستی اعمال‌شده کاهش چشم‌گیری خواهد بود

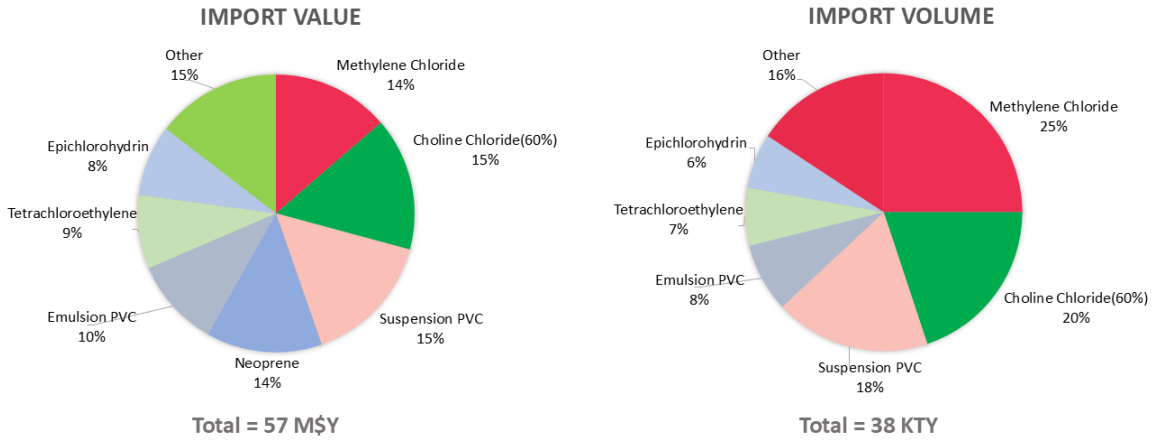
۳-۳ ارائه رویکردهای توسعه زنجیره ارزش محصولات

در این بخش، چهار رویکرد مختلف برای شناسایی طرح‌های مهم در صنعت پتروشیمی و توسعه زنجیره ارزش محصولات پیشنهاد شده است که مبتنی بر داده‌های تجاری، تنوع سبد محصولات و جلوگیری از خام‌فروشی مواد بالادستی در صنعت پتروشیمی هستند.

۳-۳-۱ رویکرد یکم: تولید موادی که حجم وارداتی بالایی به کشور دارند

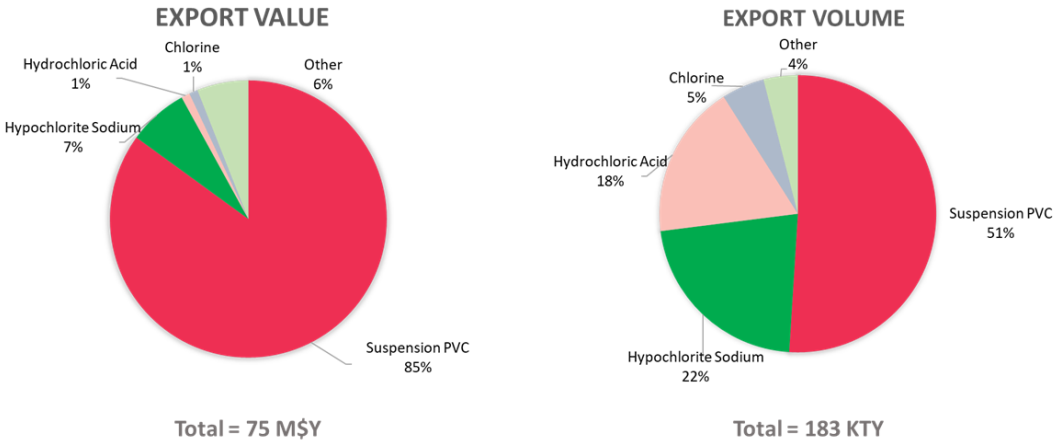
واردات محصولات با حجم بالا می‌تواند وابستگی اقتصادی کشور به منابع خارجی را افزایش داده و کشور را در برابر نوسانات قیمت‌ها و محدودیت‌های بین‌المللی آسیب‌پذیر کند. با تمرکز بر تولید داخلی این مواد، نه‌تنها نیازهای

صنایع مختلف کشور برطرف می‌شود، بلکه امکان کاهش ارزبری، افزایش اشتغال و بهبود تراز تجاری فراهم می‌شود. در نهایت، ارزش این رویکرد توسعه‌ای در تحقق خودکفایی، افزایش تاب‌آوری کشور در برابر شوک‌های خارجی و کاهش وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی نهفته است.



شکل ۷ حجم و ارزش وارداتی مواد کلردار به کشور که قابل‌تولید در صنعت پتروشیمی هستند

Figure 7 Import volume and value of chlorinated chemicals that can be produced in the petrochemical industry



شکل ۸ حجم و ارزش صادراتی مواد کلردار از کشور

Figure 8 Export volume and value of chlorinated chemicals

۳-۳-۲ رویکرد دوم: تولید موادی که ارزش وارداتی بالایی به کشور دارند

تولید این مواد از اولویت‌های اساسی در سیاست‌گذاری‌های اقتصادی و صنعتی به شمار می‌رود. با توجه به محدودیت منابع ارزی و اهمیت مدیریت صحیح آن‌ها، تولید داخلی این مواد می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش خروج ارز از کشور داشته باشد. علاوه بر مزایای ارزی، تولید داخلی این محصولات منجر به کاهش وابستگی صنایع داخلی به منابع خارجی شده و هزینه‌های بالای تأمین مواد اولیه کاهش یابد.

۳-۳-۳ رویکرد سوم: تنوع سبد محصولات پتروشیمی با درنظرگرفتن ارزش وارداتی و زنجیره ارزش

تنوع سبد محصولات پتروشیمی نقش مهمی در کاهش مخاطرات مرتبط با نوسانات بازار، افزایش رقابت‌پذیری و تقویت پایداری صنعت پتروشیمی دارد. توسعه محصولات متنوع در زنجیره ارزش می‌تواند منجر به کاهش وابستگی به بازارهای محدود و ایجاد فرصت‌های جدید در بازارهای داخلی و خارجی شود.

۳-۳-۴ رویکرد چهارم: تبدیل مواد با مازاد تولید به محصولات با ارزش افزوده بیش‌تر

وجود مواد با مازاد تولید را می‌توان از چالش‌های اصلی صنعت پتروشیمی نام برد که بازار محدود داخلی و خارجی دارند. برای مثال، متانول تولیدی ایران به علت سیاست‌گذاری‌ها و تصمیمات نادرست به‌صورت مازاد مصرف داخل و منطقه تولید می‌شود و به علت عدم قدرت چانه‌زنی، با قیمت ارزان‌تر فروخته می‌شود؛ بنابراین، لزوم بررسی طرح‌هایی با محوریت تبدیل مواد بالادستی به مواد باارزش افزوده بالاتر، بیش از پیش حس می‌شود. هدف نهایی این رویکرد، بهره‌برداری بهینه از منابع موجود و بالادستی در راستای درآمدزایی بیش‌تر صنعت پتروشیمی است.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در این بخش، رویکردهای مختلفی برای

توسعه زنجیره ارزش محصولات پتروشیمی وجود دارد که هر یک با تکیه بر جنبه‌های متفاوتی از نیازهای صنعت و اقتصاد کشور، منجر به غربال‌گری و شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری می‌شوند. رویکرد یکم توسعه بر تولید موادی متمرکز است که حجم وارداتی بالایی دارند و با توسعه تولید داخلی آن‌ها، می‌توان وابستگی اقتصادی کشور به منابع خارجی را کاهش داد. رویکرد دوم با هدف کاهش خروج ارز و بهبود مدیریت منابع ارزی، بر تولید محصولاتی تأکید دارد که ارزش وارداتی بالایی دارند. رویکرد سوم به اهمیت تنوع سبد محصولات پتروشیمی اشاره دارد که با تکمیل و توسعه آن، مخاطرات بازار کاهش و فرصت‌های رقابتی صنعت افزایش می‌یابد. در نهایت، رویکرد چهارم به چالش مازاد تولید برخی مواد مانند متانول پرداخته و بر تبدیل این مواد به محصولات با ارزش افزوده تأکید دارد، تا ضمن بهره‌برداری از منابع موجود، درآمدزایی صنعت پتروشیمی افزایش یافته و خام‌فروشی کاهش یابد. این رویکردها، چارچوبی جامع برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در راستای توسعه پایدار زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی محسوب می‌شوند.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، وضعیت زنجیره کلر در صنعت پتروشیمی ایران با تمرکز بر میزان ظرفیت اسمی و عملیاتی واحدهای فرایندی و میزان مصرف و تجارت مواد کلردار مورد تحلیل قرار گرفت. در حال حاضر، سهم عمده‌ای از کلر تولیدی کشور (۹۱٪) صرف تولید پلی‌وینیل‌کلرید شده و باقی‌مانده در راستای تولید فسژن و سدیم‌هیپوکلریت مصرف می‌شود که سهم هر یک از آن‌ها از میزان مصرف کلر به‌ترتیب ۶٪ و ۳٪ است. پلی‌وینیل‌کلرید به‌عنوان سومین پلیمر مصنوعی پرمصرف در جهان، عمدتاً در صنعت ساختمان کاربرد دارد؛ بنابراین، صنعت ساختمان به‌عنوان محرک اصلی افزایش یا کاهش نرخ تولید کلر در ایران محسوب می‌شود. از طرفی، تمرکز بالا بر تولید PVC، اگرچه سودآوری قابل‌توجهی برای تولیدکنندگان اصلی دارد، اما موجب عدم تنوع در سبد محصولات کلردار و وابستگی زنجیره کلر به نوسانات بازار PVC شده است. این در حالی است که بخش مهمی از تقاضای مواد کلردار در ایران، به‌وسیله واردات تأمین می‌شود. مواد متیلن‌کلرید، کولین‌کلرید، پلی‌وینیل‌کلرید تعلیقی و امولسیونی، اپی‌کلروهیدرین و نئوپرن، جز مواد وارداتی مهم از نظر میزان واردات یا ارزش واردات هستند. واردات این مواد در شرایطی انجام می‌شود که کشور ایران به دلیل دسترسی به دریاچه‌ها و معادن نمک که به‌عنوان ماده ابتدایی زنجیره کلر شناخته می‌شود و همچنین دسترسی به منابع نفت و گاز در خطوط ساحلی جنوب و جنوب غربی، از قابلیت بالایی برای توسعه این زنجیره برخوردار است. در نهایت، چهار رویکرد مختلف مبتنی بر حجم واردات مواد، ارزش واردات، تنوع سبد محصولات و جلوگیری از خام‌فروشی مواد بالادستی در صنعت پتروشیمی پیشنهاد شد که می‌توانند مبنایی برای سیاست‌گذاری‌ها و شناسایی طرح‌های سرمایه‌گذاری مهم در زنجیره ارزش صنعت پتروشیمی باشند.

مراجع

[1] Fauvarque J., The chlorine industry, *Pure and Applied Chemistry*, 68(9), 1713-1720, 1996.

[2] Value Chain Studies Center, Chlorine: Global And Domestic Market Review, VCMstudy, Tehran, 3-5 2022.

[3] Lakshmanan S. and Murugesan T., The chlor-alkali process: Work in progress, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 225-234, 2014.

[4] Crook J. and Mousavi A., The chlor-alkali process: A review of history and pollution, *Environmental Forensics,* 17(3), 211-217, 2016.

[5] Kohsaka Y., Matsuura D. and Kimura Y., Sustainable synthesis of fine chemicals and polymers using industrial chlorine chemistry, *Communications Chemistry*, 7(1), 265, 2024.

[6] Mortensen M., Minet R., Tsotsis T. and Benson S., A two-stage cyclic fluidized bed process for converting hydrogen chloride to chlorine, *Chemical Engineering Science*, 51(10), 2031-2039, 1996.

[7] Medrano-García J.D., Giulimondi V., Ceruti A., Zichittella G., Pérez-Ramírez J. and Guillén-Gosálbez G., Economic and environmental competitiveness of ethane-based technologies for vinyl chloride synthesis, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(35), 13062-13069, 2023.

[8] Fukuoka S., Tojo M., Hachiya H., Aminaka M. and Hasegawa K., Green and sustainable chemistry in practice: Development and industrialization of a novel process for polycarbonate production from CO_2 without using phosgene, *Polymer Journal*, 39(2), 91-114, 2007.

[9] Enikolopyan N., Markevitch M., Sakhonenko L., Rogovina S. and Oshmyan V., Kinetics of epoxide resins formation from epichlorohydrin and bisphenol-A, *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry*, 20(5), 1231–1245, 1982.

[10] Hamawand I.B. and Hanna F.Z., Production of organosilane by the direct reaction of silicon with methyl chloride, *Engineering and Technology Journal*, 25(10), 2007.

[11] Yushchenko D.Y., Zhizina E. and Pai Z., Methods for the synthesis of phthalic acid dichlorides, *Catalysis in Industry*, 12(1), 29-38, 2020.

[12] Hernández-Camacho N.V., Gómez-Castro F.I., Ponce-Ortega J.M. and Martín M., Production of methanol from renewable sources in Mexico: Supply chain optimization, *Computers & Chemical Engineering*, 188, 108780, 2024.

[13] Hosseinpour A., Shayesteh K. and Es'haghi P., A review of the importance, production, economics, and future of methanol in Iran and the world, *Chemical Research And Technology*, 2(1), 1-11, 2025.

[14] Mohammadi R. and Hadizadeh Harandi M., Methanol to olefin (MTO) value chain management, *New Applied Studies in Management, Economics & Accounting*, 6(1), 7-17, 2023.

[15] Tabibian S.S. and Sharifzadeh M., Statistical and analytical investigation of methanol applications, production technologies, value-chain and economy with a special focus on renewable methanol, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113281, 2023.

[16] Bayat A., Rahbar F., Vatani A. and Razavi S.A., An analysis of the value chains of the petrochemical industry with a focus on the new approach of petro-refinery, *Petroleum Business Review*, 6(4), 115-132, 2022.

[17] Althoff J. et al., Economic feasibility of the sugar beet-to-ethylene value chain, *ChemSusChem*, 6(9), 1625-1630, 2013.

[18] Yang M. and You F., Comparative techno-economic and environmental analysis of ethylene and propylene manufacturing from wet Shale gas and naphtha, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(14), 4038-4051, 2017.

[19] Kleijn R., Tukker A. and Van Der Voet E., Chlorine in the Netherlands, Part I, An overview, *Journal of Industrial Ecology*, 1(1), 95-116, 1997.

[20] S&P Global, Chlorinated methanes, Chemical Economics Handbook (CEH), S&P Global, 20-22, 2021.
[21] Chang D. and Allen D.T., Minimizing chlorine use: Assessing the trade-offs between cost and chlorine reduction in chemical manufacturing, *Journal of Industrial Ecology*, 1(2), 111-134, 1997.
[22] Yandrapu V.P. and Kanidarapu N.R., Process design for energy efficient, economically feasible, environmentally safe methyl chloride production process plant: Chlorination of methane route, *Process Safety and Environmental Protection,* 154, 360-371, 2021.
[23] Almena A. and Martín M., Technoeconomic analysis of the production of epichlorohydrin from glycerol, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(12), 3226-3238, 2016.
[24] Klaucke F., Hoffmann C., Hofmann M. and Tsatsaronis G., Impact of the chlorine value chain on the demand response potential of the chloralkali process, *Applied Energy*, 276, 115366, 2020.
[25] National Petrochemical Company of Iran, https://www.nipc.ir, Available Feb. 2025.
[26] National Petrochemical Company of Iran, Performance report of Iran's petrochemical industry year 1400, Planning and Development Department, NPC, Tehran, 11-35, 2022.
[27] Securities and Exchange Organization of Iran, Kodal Publishers Information System, https://codal.ir, Available Feb. 2025.
[28] The Islamic Republic of Iran Customs Administration (IRICA), https://irica.ir, Available Sep. 2022.