استفاده از سرمای عمیق برای بازیافت گازهای حاصل در پالایشگاه‌ها

سید مجتبی موسوی نائینیان[1]
نیکلای الکساندرویچ، نیکلای فیلین، والریا پاخومف[2]

۱ـ دانشکدهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
۲ـ گروه سرمای عمیق دانشگاه دولتی مهندسی محیط‌زیست مسکو

چکیده

گازهای حاصل از واحدهای پالایشگاه‌ها برای سوختن به مشعل‌ها ارسال می‌شود که علاوه بر آلودگی محیط‌زیست، مواد پرارزشی نیز سوزانده می‌شود. روش پیشنهادی استفاده از سرمای عمیق، ضمن حل مسأله محیط‌زیست تولید مرحله‌ای هیدروکربن، ازت، هیدروژن و در نهایت آب سنگین و هلیوم را ممکن می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: سیکل تبرید، سیکل سرمای عمیق، مبدل، برج تقطیر غنی‌سازی، صفحات، جاذب جذب‌کننده سطحی، دیتریم D_2O، آب سنگین

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقدمه

در تکنولوژی موجود در پالایش فرآورده‌های نفتی، مخلوطی از گازها حاصل می‌شود که دارای هیدروژن، هیدروکربن، ازت و دیگر گازها است. مقدار هریک از گازها بستگی به محل استخراج نفت، تکنولوژی عمل آوری و متغیر است. (نمونه برداری از یک پالایشگاه در مسکو با حدود ۶۵۰۰۰ متر مکعب گاز خروجی در هر ساعت و آنالیز آن درصد وزنی گازهای مختلف را به شرح جدول شماره (۱) مشخص کرد). از نتایج آنالیز مشاهده می‌شود در مخلوط گازی حاصل در پالایشگاه‌ها به مقدار زیاد گازهای با ارزشی چون اتیلن و پروپیلن وجود دارد که ماده اولیه تولید مواد پلیمری است. متان و اتان که می‌توان برای تولید گرما و انرژی الکتریکی به کار برد. اگر وجود ازت در مخلوط باعث کاهش ارزش حرارتی آن می‌شود، در عوض ازت خالص در صنعت کاربرد دارد.

جدول ۱ـ درصد وزنی گازها

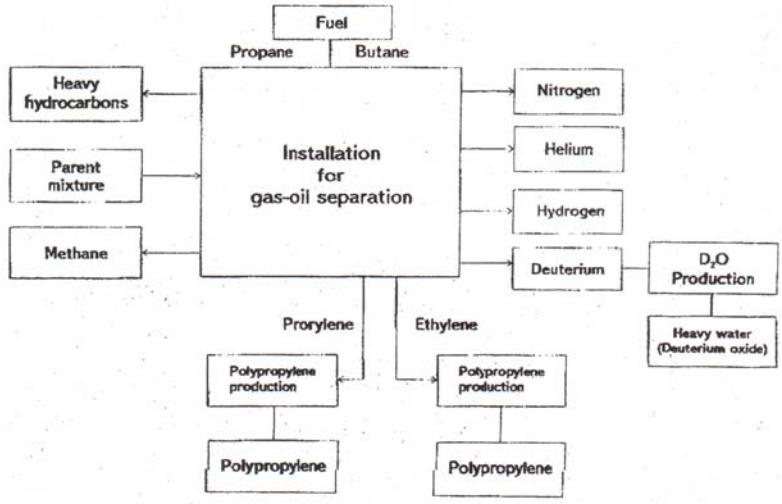
ماده	فرمول شیمیایی	درصد وزنی ٪
هیدروژن	H_2	۲ – ۲/۵
ازت	N_2	۶ – ۶/۵
متان	CH_4	۲۰ – ۲۵
اتان	C_2H_6	۱۸ – ۲۰
اتیلن	C_2H_2	۱۴ – ۱۷
پروپان	C_3H_8	۲ – ۲/۵
پروپلن	C_3H_6	۱۳ – ۱۵
i بوتان	i C_4H_{10}	۲ – ۳
n بوتان	n C_4H_{10}	۰/۵ –۱
بوتیلن	C_4H_8	۲ – ۲/۵
پنتان	C_5H_{12}	۴ – ۴/۵
دی اکسید کربن	CO_2	تا ۰/۵
انیدرید	H_2S	تا ۲

پروپان ـ بوتان را می‌توان به عنوان سوخت موتوری استفاده کرد و بالاخره هیدروژن به عنوان مادهٔ پرارزش در تکنولوژی‌های نوین جایگاه ویژه‌ای به خود اختصاص داده است. متأسفانه در اکثر پالایشگاه‌ها و به خصوص پالایشگاه‌های قدیمی با تجهیزات راندمان پایین، بیشترین مقدار گاز خروجی و حتی در بعضی پالایشگاه‌ها تمام گاز خروجی به مشعل‌ها برای سوختن ارسال می‌شود. سوزندان گاز خروجی از عمل آوری در پالایشگاه‌ها باعث آلودگی نه تنها محیط پالایشگاه‌ها، بلکه اطراف آن می‌شود. در حال حاضر روش‌های مختلف برای جداسازی گاز خروجی از پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که این روش‌ها نتوانسته‌اند به طور کلی مسأله بهره‌وری را حل کنند. آنالیز فنی و اقتصادی نشان داده است که مناسب‌ترین روش، استفاده از تکنولوژی سرمای عمیق است که امکان جداسازی مرحله‌ای هیدروکربن، ازت، هیدروژن، آب سنگین و هلیوم را می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

محققان پیش‌بینی کرده‌اند که این روش عمق عمل‌آوری را تا ۵٪ کاهش می‌دهد و به صورت واضح نتیجه تولید را بالا می‌برد و آلودگی محیط‌زیست را کاملاً کاهش می‌دهد.

در شکل شماره (۱) مواد حاصل در صورت استفاده از سرمای عمیق (کرایجینک) برای گازهای خروجی در پالایشگاه‌ها نشان داده شده است



شکل ۱ـ مواد حاصل از جداسازی گاز در پالایشگاه

بررسی یک حالت نمونه

محاسبات و آنالیز برای یکی از پالایشگاه‌های مسکو با حدود ۶۵۰۰۰ متر مکعب گاز خروجی در ساعت نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سرمای عمیق، می‌توان در هر ساعت معادل ۴۰۰۰ کیلوگرم اتیلن، ۳۵۰۰ کیلوگرم پروپیلن، ۱۵۰۰۰ کیلوگرم مخلوط سنگین هیدروکربن، تا ۱۰۰۰۰ کیلوگرم پروپیلن، ۳۵۰۰ کیلوگرم ازت و بالاخره تا ۳۰۰۰ کیلوگرم هیدروژن تولید کرد.

وجود مقدار زیاد دیتریم (D_2O) حاصل به روش بسیار پاکیزه که قیمت پایین تولید در اثر جداسازی تدریجی مواد دیگر با کاهش درجه حرارت تا ۲۰ درجه کلوین از ویژگی‌های این روش است. مطالعات نشان می‌دهد که به روش سرمای عمیق از ۶۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت گاز حاصل در پالایشگاه مورد نظر می‌توان حدود ۴۰ تن آب سنگین در سال به دست آورد که قیمت آن در حدود ۸ میلیون دلار است. روش سرمای عمیق تکنولوژی جداسازی گاز خروجی پالایشگاه‌ها به شرح زیر است:

- تمیزسازی مخلوط گازی از رطوبت، دی اکسید کربن، انیدرید در فشار ۳ تا ۴ مگا پاسکال
- جداسازی هیدروکربن سنگین در اثر تقطیر با سردکردن به وسیله مخلوط گازی برگشت
- تولید هیدروکربن سبک یا مخلوط در برج تقطیر غنی‌سازی در حدود ۸۰ درجه کلوین
- تولید هیدروژن از گاز باقی مانده در حدود ۲۰ درجه کلوین
- تولید دیتریم از هیدروژن با تولید آب سنگین

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

ـ به دست آوردن هلیوم در سرمای پایین با استفاده از روش جذب سطحی

در شکل شماره (۲) شماتیک دستگاه سرمای عمیق پیشنهادی با تولید مواد مختلف نشان داده شده است. مخلوط گازی با فشار ۰/۳ تا ۰/۵ مگاپاسکال در اثر عبور از فیلتر منواتیلن امین از انیدرید که در جذب کننده جدا می‌شود و سپس در جذب کننده سطحی دی‌اکسیدکربن و بخار آب جدا می‌شود و پس از آن تا فشار ٤ مگا پاسکال در کمپرسور (۱) متراکم می‌شود. گرمای ناشی از تراکم به وسیله آب در خنک‌کننده (۲) و (۳) خارج می‌شود و در نتیجه سردکردن، مواد سنگین تقطیر می‌شود و روانه سپراتورها می‌شوند. جریان مایع و گاز به واحد تبرید با درجه حرارت متناسب وارد می‌شود و در مبدل‌های (٤ و ٥) سرد و به برج‌های (۱۳ و ١٤) وارد می‌شود و قسمتی از مواد خالص از جمله هیدروکربن از آن جدا می‌شود.

در مبدل‌ها از مس و آلومینیوم و فولاد ضدزنگ استفاده می‌شود و برج‌های صفحه‌ای هستند که تعداد صفحات با توجه به خلوص و نوع مواد تولیدی ٤٥ تا ۱۰۰ عدد است.

مخلوط ازت و هیدروژن و متان و ناخالصی‌های ناچیز هیدروکربن وارد مدار اولیه سرمای عمیق می‌شود و در مبدل تا ۸۰ درجه کلوین سرد و به ۲ برج تقطیر وارد می‌شود و متان خالص در برج ۸ و ازت در برج ۱۱ جدا می‌شوند. تولید سرما در این محدوده درجه حرارت به وسیله سیکل ازتی با استفاده از کمپرسور و توربو اکسپاندر و مبدل‌ها انجام می‌گیرد.

هیدروژن با مقدار کمی ازت و هیدروکربن وارد مدار دوم سرمای عمیق با محدوده تغییر درجه حرارت ٦٧ تا ۲۰ درجه کلوین می‌شود. به طور مقدماتی به وسیله مخلوط خنک برگشتی سرد می‌شود و در جذب‌کننده‌های سطحی ازت و هیدروکربن جدا و وارد برجی با ارتفاع حدود ۲۵ متر می‌شود که ابتدا محلول D_2O و سپس دیتریم خالص به دست می‌آید.

برای حصول سرما در حد ۲۰ درجه کلوین از کمپرسور، توربو اکسپاندر و مبدل‌ها از جنس فولاد ضد زنگ کرم نیکلی و هم‌چنین آلیاژ آلومینیوم توصیه می‌شود. وزن کلی دستگاه سرمای عمیق از فولاد ضد زنگ ۸۰۰ تن است.

در صورت وجود هلیوم در مخلوط گازی به وسیله جذب کننده سطحی جداسازی انجام می‌گیرد. برای تولید سرما در حد ۲۰۰ درجه کلوین از سیکل پروپان ـ اتیلن و در حد ۸۰ درجه کلوین از سیکل ازت و برای حد ۲۰ درجه کلوین سیکل سرمای عمیق هیدروژنی پیشنهاد می‌شود.

امکان تعویض سیکل پروپان ـ اتیلن به سیکل توربو اکسپاندر نیز امکان‌پذیر است. یکی از خصوصیات این نوع تکنولوژی امکان تولید آب سنگین (حدود ۹۷۰ کیلوگرم در سال از هر ۱۰۰۰ متر مکعب در ساعت هیدروژن) است که از نظر محیط‌زیست بسیار تمیزتر از روش تکنولوژی H_2S معمول است. تکنولوژی پیشنهادی جداسازی گاز خروجی پالایشگاه‌ها، امکان بازیابی کامل و جداسازی را فراهم می‌آورد و علاوه بر تولید مواد پرارزش از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری می‌کند. این روش امکان استفاده کامل از سرما در سطوح مختلف را فراهم می‌آورد که خود در برگشت سریع‌تر سرمایه مؤثر است.

سیستم پیشنهادی و ابعاد دستگاه‌ها بستگی به گازهای موجود و مواد تولیدی و خلوص آن‌ها دارد. در جدول شماره (۲) تولید سالانه و ارزش مواد تولیدی برای نمونه پالایشگاه ارائه شده است

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

(محاسبات جدول براساس نمونه گاز خروجی در پالایشگاه مسکو با گاز خروجی حدود ٦٥٠٠٠ مترمکعب در ساعت انجام گرفته است).

جدول ۲ـ مقدار پیش‌بینی مواد حاصل از ۶۵۰۰۰ متر مکعب در ساعت گاز خروجی در پالایشگاه مسکو و قیمت حدودی و درآمد سالانه جهت بررسی اقتصادی بازگشت سرمایه

نوع مواد	مقدار حاصل در سال به تن	قیمت حدودی هرتن به دلار	درآمد پیش‌بینی در سال به میلیون‌دلار
هیدروژن	٢٤٠٠٠	٣٠٠	٧/٢٠
ازت	٢٨٠٠٠	٦٠	١/٦٨
متان	٤٠٠٠٠	٥٠	٢/٠٠
اتان	٤٠٠٠٠	٥٠	٢/٠٠
اتیلن	٣٢٠٠٠	٤٠٠	١٢/٨٠
پروپان	٢٨٠٠٠	٦٠	١/٦٨
پروپلن	٨٠٠٠٠	٤٠٠	٣٢/٠٠
i بوتان	٦٠٠٠	١٢٠	٠/٢٧
n بوتان	٢٠٠٠	١٢٠	٠/٢٤
بوتیلن	٥٠٠٠	١٥٠	٠/٧٥
پنتان	٩٠٠٠	١٥٠	١/٣٥
	جمع		٦٢/٤٢

سیستم پیشنهادی به نحوی است که نیاز نیست که کلیه وسایل و تجهیزات هم زمان نصب شوند و با توجه به اعتبار و زمان می‌توان نصب تجهیزات را به ۲ مرحله تولید هیدروکربن **(۲۰۰K)** و تولید هیدروژن ۹۰٪ تقسیم کرد. اما زمانی از نظر اقتصادی کاملاً قابل توجیه است که به صورت کامل با تولید آب سنگین اجرا شود.

مبدل‌ها، برج‌ها، دستگاه سردکننده و تمام تجهیزات مورد نیاز سیکل سرمای عمیق (در دو بلوک) و واحد تبرید در خارج از ساختمان در هوای آزاد قرار می‌گیرد و کلیه ماشین‌آلات و سیستم هدایت باید در داخل ساختمان قرار گیرد.

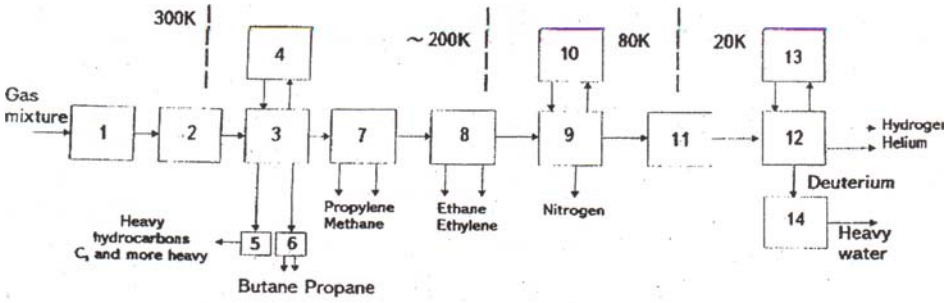
برآورد فنی و اقتصادی

تحقیق برای پالایشگاه نمونه با ٦٥٠٠٠ متر مکعب گاز خروجی نشان می‌دهد که برای نصب، زمینی به مساحت ١/٥ هکتار لازم است. برآورد مصرف انرژی الکتریکی حدود ٢٠ تا ٣٠ مگاوات و آب مورد نیاز (سیستم مداربسته) حدود ٨٠٠ تا ١٠٠٠ متر مکعب در ساعت خواهد بود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

برای پالایشگاه بین ۵۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب گاز خروجی در ساعت قیمت تجهیزات حدود ٤٠ میلیون دلار برآورد می‌شود و زمان تکمیل پروژه با حصول آب سنگین و هلیوم حدود ۳ الی ٤ سال از تأمین اعتبار پیش‌بینی می‌شود.

بازگشت سرمایه حداکثر ۳ سال برآورد می‌گردد. لازم به یادآوری است که هر یک از قسمت‌های یونیت به طور مجزا هم‌اکنون در صنایع مختلف در کشورهای مختلف و از جمله روسیه تولید و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. بدیهی است برای هر پالایشگاه و تعیین ابعاد وسایل و ظرفیت دستگاه‌ها نیاز به بررسی فنی و اقتصادی است و این بررسی زمانی در حدود ۹ ماه لازم دارد. طرز قرارگیری وسایل و تجهیزات سرمای عمیق مطابق شکل شماره (۲) است.



شکل ۲ـ شماتیک دستگاه سرمای عمیق برای تولید مواد مختلف

۱ـ بخش پاکسازی و خشک‌کردن ۲ـ بخش افزایش فشار (کمپرسور) ۳ـ بخش مبدل‌های حرارتی ٤ـ سیکل خنک‌کاری ٥ـ بخش آزادسازی هیدروکربن‌های سنگین ٦ـ بخش تولید پروپان و بوتان ۷ـ بخش تولید پروپیلن در متان ۸ـ بخش به دست آوردن اتیلن و اتان ۹ـ بخش نیتروژن ۱۰ـ سیکل سیرمای عمیق نیتروژن ۱۱ـ بخش مبدل‌های حرارتی ۱۲ـ بخش تولید هیدروژن، دیتریم و هلیم ۱۳ـ سیکل سرمای عمیق هیدروژن ١٤ـ بخش تولید آب سنگین.

منابع:

1. A. Arkharov, I.Marfenina, and Xe.Mikalin. “Theory and Design of Cryogenic system” , Moscow, 1988.

۲ـ والریا پاخومف، ”وجود گازهای باارزش در گازهای خروجی پالایشگاه‌ها“، سری مقالات انستیتوی تحقیقاتی کورچاتف. روسیه ۲۰۰۰-۱۹۹۹.

۳ـ نیکلای فیلین، ”استفاده از سیستم کراجنینگ در صنایع مختلف“، مسکو ۱۹۹٦.

٤ـ سرگی گرچ، ”اصول ترمودینامیکی مایع‌سازی و تجزیه گازها جلد اول“، مؤسسه دولتی انرژی مسکو، ۱۹۸۰.

٥ـ سرگی گرچ، ”محاسبات حرارتی و طراحی تجهیزات و ماشین‌آلات سیستم‌های کرایجنینگ جلد دوم“، مؤسسه دولتی انرژی مسکو، ۱۹۸۰.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]