1st International Conference on new achievements in Science & Technology
24th August 2017
اولین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین در علوم و تکنولوژی
۲ شهریور ماه ۱۳۹۶ – تهران

بررسی و مقایسه تکنولوژی‌های نوین کاهش نفت کوره و ارتقاء آن به فراورده‌های سبک و میانی تقطیر از منظر اقتصادی

۱ رضا مدنیان دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش سیستم های انرژی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

۳ دکتر احمد توسلی، دانشیار

۴ بابک به نژاد، استاد مشاور، دانشجوی دکترا، دانشگاه امیر کبیر

چکیده: این مقاله از جنبه اقتصادی به انتخاب بهترین تکنولوژی برای ارتقاء کیفیت نفت سنگین و کاهش نفت کوره می پردازد. مسئله اقتصادی در اکثر زمینه‌ها مهمترین پارامتر برای طراحی، انتخاب و... در مسائل صنعتی و تجاری است. به همین جهت آنالیزهای اقتصادی دقیقی برای انتخاب بهترین تکنولوژی کاهش نفت کوره مورد نیاز است. در این مقاله با نگاه اقتصادی به بررسی انواع تکنولوژی‌های ارتقاء نفت سنگین پرداخته شد و مقایسه‌ی جامعی بین این تکنولوژی‌ها انجام شد. این تحقیق از نوع نظری و به لحاظ ماهیت توصیفی و تحلیلی است. با ارزیابی‌های اقتصادی و تحلیل پارامترهای اقتصادی (سود خالص، هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های عملیاتی، NPV، IRR، کیفیت محصولات، بازار محصولات، مصرف انرژی و...) می‌توان گفت؛ استفاده از روش‌های حذف کربن هزینه‌ها را به میزان چشم‌گیری کاهش خواهد داد اما محصولات تولیدی کیفیت لازم را نخواهد داشت و بازار مناسبی برای فروش وجود نخواهد داشت. به همین جهت ارزش خالص فعلی این فرایندها منفی است. استفاده از فرآیندهای شکست هیدروژنی کیفیت بسیار بالایی در محصولات نتیجه می‌دهد اما به دلیل نیاز به سرمایه‌ی اولیه بالا و هزینه‌های عملیاتی بالا محدودیت‌هایی را در کاربرد خواهد داشت. فرآیندهای شکست کاتالیستی نظیر RFCC می‌تواند همه این نیازها را به میزان مورد قبولی برطرف نماید چرا که با صرف هزینه‌های متوسط، کیفیت محصولات خوبی را در اختیار خواهد گذاشت. مصرف انرژی مناسبی دارد و از همه مهمتر NPV این طرح مثبت و نسبت به سایر طرح‌ها بیشتر است. نرخ بازگشت سرمایه خوبی داشته و سود خالص ناشی از آن بیش از سایر تکنولوژی‌هاست.

کلید واژه ها: تکنولوژی‌های نوین، کاهش نفت کوره، منظر اقتصادی، RFCC

مقدمه

نفت کوره از هیدروکربورهای سنگین نفت خام که دارای ترکیبات گوگردی، اکسیژنه و فلزات هستند تشکیل می‌شود و به دلیل سنگینی به آسانی نمی‌سوزد. با طراحی مشعل‌های مناسب، با استفاده از بخارآب، هوای فشرده و پخش مکانیکی به صورت ذرات ریز، امکان سوختن این فراورده در کوره میسر شده است. این سوخت به قیمت بسیار ارزانی فروخته می‌شود (در گذشته حدود ۷۰ درصد قیمت نفت خامی که از آن تولید شده است) و بعنوان یک فراورده جانبی تلقی می‌گردد.مشخصه‌های بحرانی نفت کوره عبارتند از گرانروی و مقدار گوگرد.در سالهای آینده، با توجه به لزوم جلوگیری از آلودگی هوا، مقدار بیشینه گوگرد، بی شک، کاهش خواهد یافت. در برخی نقاط، فقط نفت کوره‌های کم‌گوگرد می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و این گرایش، رو به توسعه است. نفت کوره‌های سنگین که حاوی گوگرد بسیار کمی باشند، خواهان بیشتری دارند و به قیمتهای نزدیک قیمتهای نفتهای خام اولیه فروخته می‌شوند[۱].

استفاده از نفت کوره به دلیل سنگینی و گرانروی زیاد مشکل است. از سوی دیگر به دلیل وجود مقادیر زیاد گوگرد در نفت کوره این فراورده به میزان بیشتری به محیط زیست آسیب می رساند. همچنین با توجه به افزایش تقاضا در بازار فراورده‌های نفتی میانی تقطیر، سال‌هاست که قوانین محکمی در اروپا و آمریکا برای کاهش مصرف نفت سنگین و نفت کوره وضع شده است. کاهش مصرف نفت سنگین و نفت کوره که علاوه بر مزایای خود در حوزه محیط زیست، کاهش مصرف انرژی را نیز به دنبال خواهد داشت؛ زیرا سوزاندن نفت کوره و نفت سنگین نیازمند صرف انرژی بیشتر است[۱].

از سوی دیگر باید گفت که استفاده از روش‌هایی برای ارتقاء کیفیت و پالایش نفت سنگین منجر به صرفه جویی در هزینه‌ها می‌شود چرا که خرید نفت خام سبک و شیرین هزینه بر است. نفت خام سنگین گزینه‌ای بهتر از سایز منابع انرژی، برای جایگزینی نفت خام سبک است. با عنایت به دورنمای جهانی وضعیت انرژی، پس از نفت خام سبک و گاز طبیعی، تنها نفت خام سنگین(به دلیل فراوانی و سهولت روش‌های ارتقاء آن) می‌تواند نیازهای آتی انرژی را برآورده سازد.

تکنولوژی‌های مختلفی در زمینه ارتقاء کیفیت و پالایش نفت سنگین در دسترس است تا نیازهای پالایشگاه‌ها را برطرف سازد. وظیفه همه این روش‌ها تولید محصولات نفتی سبک به شکل موثر و اقتصادی از نفت کوره و نفت سنگین است. تکنولوژی‌های پیشین ارتقاء کیفیت نفت سنگین و سبک را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. الف) فرایندهای حذف کربن[۱] ب) فرایندهای افزودن هیدروژن[۲]

در فرایندهای حذف کربن، تکنولوژی‌هایی وجود دارند که از این اساس استفاده می‌کنند. برای مثال: استخراج با حلال[۳] شکست کاتالیستی[۴] شکستحرارتی[۵] و... . از تکنولوژی‌های افزودن هیدروژن نیز می‌توان به تصفیه هیدروژنی[۶]، شکست هیدروژنی[۷] و... اشاره کرد.

در کنار این تکنولوژی‌ها برخی تکنولوژی‌های نوظهور در میان ثبت اختراع‌ها، گزارش‌ها و... پدیدار شده‌اند که هنوز مطالعه کافی و درستی روی آنها صورت نگرفته است. برخی از این تکنولوژی‌های نوظهور به طور خلاصه در زیر آورده شده اند: فرایند HCAT، فرایند HTL، فرایند GHU، فرایند IMP، فرایند التراسونیک NexGen، فرایند HEH، فرایند CCU، تکنولوژی‌های بر پایه التراسونیک و...

هر یک از تکنولوژی‌های نوین در زمینه کاهش نفت کوره، دارای مزایای فراوانی هستند که با داشتن ویژگی‌های خاصی بخشی از معایب موجود در روش‌های مشابه را حذف می‌کنند[۱].

---

[1] Carbon rejection
[2] Hydrogen addition
[3] Solvent Extraction
[4] Catalytic Cracking
[5] Thermal Cracking
[6] Hydroprocessing/Hydrotreating/Hydroconversion
[7] Hydrocracking

همه تکنولوژی‌ها از منظر اقتصادی قابل بحث و بررسی هستند. در بحث ارزیابی اقتصادی پارامترهایی چون میزان مصرف انرژی، میزان تقاضا برای هریک از فراورده‌های نفتی، وضعیت بازار برای هریک از فراورده‌ها، توزیع قیمت بین نفت خام سبک و سنگین، سود دهی هریک از تکنولوژی‌ها، هزینه‌های اولیه مجهز کردن پالایشگاه‌ها به این تکنولوژی‌ها، هزینه‌های عملیاتی این تکنولوژی-ها، هزینه‌ی حلال‌ها، مواد و لوازم جانبی به کار رفته، ارزش محصولات جانبی ایجاد شده و... باید در نظر گرفته شده و تحلیل شوند.

در این پژوهش تکنولوژی‌های نوین کاهش نفت کوره و ارتقاء آن به فراورده‌های سبک و میانی تقطیر، از نقطه نظر اقتصادی با در نظر گرفتن همه پارامترهای اشاره شده بررسی و مقایسه می‌شوند. تا الزامات، مکانیزم، مزایا، معایب و حوزه کاربردی هریک روشن شود.

پژوهش حاضر می‌تواند مورد استفاده در پالایشگاه‌ها و واحدهای تقطیر در کشور باشد و تا حد خوبی ملاحظات اقتصادی هریک از این تکنولوژی‌ها را فراهم نماید.

پیشینه تجربی تحقیق

در این جا به مرور تحقیقات انجام شده توسط محققین پیشین در خصوص ارزیابی اقتصادی تکنولوژی‌های نوین در زمینه کاهش نفت کوره و کاهش مصرف انرژی پرداخته می‌شود.

در دهه‌ی اخیر فرآیندهای ارتقاء کیفیت پسماندهای نفتی برای تولید محصولات سبک توسعه فراوانی یافته‌اند. زیرا درخواست برای نفت کوره و نفت سنگین در دنیا درحال کاهش است. دهقانی و همکاران (۲۰۰۹)[۲] کارایی و راندمان تکنولوژی‌های مختلف کاهش نفت کوره و ارتقاء کیفیت نفت سنگین را با یکدیگر مقایسه کردند و تحلیلی اقتصادی با مولفه های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های کارکردی و درآمد محصول انجام دادند.

در پژوهش رانا و همکاران (۲۰۰۷) [۳]، تکنولوژی‌های مختلف برای کاهش نفت کوره و فرآوری مانده‌ها: شامل انواع تصفیه هیدروژنی حرارتی و کاتالیستی ثابت مرور و به بحث گذاشته شد. احتمال ترکیب مزایای این تکنولوژی‌ها با یکدیگر در کنار یک کاتالیست مناسب با فعالیت شکست کنترل شده و افزوده شده، مورد بررسی قرارگرفت. در خصوص خواص پس‌ماندهای اولیه و ترکیب آنها، فرایندهای هیدروژنی ارتقاء کیفیت، هزینه‌های اجرایی هریک از فرایندها، انواع کاتالیست‌ها و میزان تاثیر آنها، همچنین افق‌های پیشروی این تکنولوژی‌ها توضیحاتی ارائه شد.

صمیمی و همکاران (۲۰۱۳) [۵]با استفاده از اطلاعات موجود در داخل کشور سعی در انتخاب بهترین فرآیندهای ارتقاء برای ته مانده‌های سنگین نفتی ایران داشتند. تمرکز آنها تنها بر روی متغیرهای اقتصادی طرح‌ها و تکنولوژی‌های مختلف بود. آنها دریافتند که روش (IGCC) به تدریج ارزان‌تر می‌شود و می‌تواند یک راه حل نهایی خواب برای باقی‌مانده‌های سنگین پالایشگاهی باشد. علاوه بر همه مزایای دیگر، این روش به خوبی پسمانده‌های صنعتی، کشاورزی و شهری را از بین می‌برد و می تواند یک روش اقتصادی و بسیار تمیز برای ارتقاء باقیمانده‌های سنگین باشد. هم چنین، به دلیل تولید برق و بخار آب فراوان و ارزان، برای پالایشگاه‌های مجاور شهرهای بزرگ یا مناطق بزرگ صنعتی کشور ما گزینه مناسبی است. درپالایشگاه‌های بزرگ کشور، ترکیبی از این طریقه با سه روش دیگر می تواند توجیه اقتصادی بسیار بیشتری هم داشته باشد (مثلا با حذف برخی از واحدها مثل هیدروژن سازی).

اسماعیل نیا و آذرمهر (۲۰۰۸) [۶]در مقاله خود تامین بنزین مورد نیاز از طریق پالایش نفت خام سنگین ایران که از میادین تازه توسعه یافته مانند سروش و نوروز تولید می‌گردد، مورد ارزیابی قرار دادند. ظرفیت پالایشگاه مورد نظر ۲۰۰ هزار بشکه در روز در نظر گرفته شد و خوراک پالایشگاه، نفت خام سنگین میدان نوروز بود. لازم به ذکر است که محل احداث پالایشگاه و همچنین نحوه تامین این نوع نفت خام، آب مورد نیاز و مسائل زیست محیطی در این بررسی لحاظ نگردید. الگوی به کار رفته در پژوهش آنها یک الگوی مدرن و پیشنهادی بود که فرض شده امکان دسترسی به آن برای کشور وجود دارد. در بحث ارزیابی پالایشگاه، حالات گوناگونی برای ارزیابی احداث پالایشگاه مطرح شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی احداث

پالایشگاه نفت سنگین نشان دهنده آن است که در قیمت‌های نفت خام پایین‌تر از ۵۶ دلار در هر بشکه، احداث پالایشگاه اقتصادی است. بطوریکه با کاهش قیمت‌های نفت خام توجیه اقتصادی طرح افزایش می‌یابد.

التمتامی[8] و همکاران (۲۰۱۴) [۷] یک ارزیابی اقتصادی و آنالیز حساسیت برای برخی فرایندهای ارتقاء کیفیت نفت کوره انجام دادند. هفت طرح ارتقاء کیفیت نفت کوره، که به عنوان طرح‌های تولید محصولات بالای تقطیر پیشنهاد شد، برای بازیابی و ارتقاء $\frac{t}{y}$ ۳/۵×۱۰^{۶} باقی مانده های اتمسفریک شناسایی شد. این هفت طرح با استفاده از روش تنزیل نقدینگی بررسی شدند. شاخص-های اقتصادی نظیر نرخ داخلی بازده(IRR[9])، دروه بازپرداخت(PBP[10])، مقدار ارزش حال خالص(NPV[11]) برای هریک محاسبه شد.

روش تحقیق

مقاله حاضر به لحاظ هدف کاربردی، از نوع نظری، به لحاظ ماهیت توصیفی – تحلیلی است. به منظور گردآوری اطلاعات از روش کتابخانه ای استفاده شد. به نحوی که پژوهش حاضر به منظور ارائه ارزیابی جامعی از همه جنبه‌های تکنولوژی‌های نوین در ارتقاء کیفیت نفت خام سنگین و کاهش نفت کوره به بررسی؛ انتخاب تکنولوژی کم ریسک؛ مقایسه هزینه‌های سرمایه‌ای، کارکردی و سرویس‌های جانبی (Utilities) و درآمد محصول در تکنولوژی‌های مختلف؛ ویژگی‌ها، مقادیر و قیمت خوراک ورودی و محصولات بدست آمده؛ ارزیابی اقتصادی تکنولوژی‌های مختلف با استفاده از متد DCF با مقایسه معیارهای اقتصادیIRR و NPV؛ بررسی تقاضا برای محصولات پالایشگاهی؛ جمع بندی مزایا و معایب مهم هر یک از انواع فرآیندها در نگاه کلی؛ ارزیابی نهایی با در نظر گرفتن همه فاکتورها برای انتخاب تکنولوژی برتر؛ استفاده از طرح های ترکیبی پرداخت.

فرضیه پژوهش

مولفه‌های اقتصادی از جمله خهزینه‌های اولیه، هزینه‌های عملیاتی، ارزش محصولات تولیدی، قیمت تجهیزات به کار رفته، کیفیت تکنولوژی و... در انتخاب تکنولوژی برتر از تاثیر بسزایی دارد.

[8] Eltemtamy
[9] internal rate of return
[10] Paybackperiod
[11] net present value

نتایج بررسی

۱- ارزیابی اقتصادی تکنولوژی‌های مختلف کاهش نفت کوره

تورم قیمت نفت خام و فرآورده‌های پالایشگاهی پارامتری کلیدی در ارزیابی اقتصادی فرآیندهای ارتقاء کیفیت محسوب می‌شود. از سوی دیگر در نظر گرفتن تقاضای جهانی و استفاده از روش‌های بازاریابی جدید برای محصولات پالایش شده از نکات مهم دیگر است.

برای ارزیابی اقتصادی روش‌های مختلف ارتقاء کیفیت نفت سنگین، به مطالعه برخی مراجع و تحلیل‌های مهم انجام شده در سراسر دنیا، پرداخته شد. با استفاده از جداول و داده‌های منتشر شده در مراجع مربوط به هریک از فرآیندها، مقایسه‌ای از انواع روش‌ها از نقطه نظر اقتصادی انجام می‌گیرد. به همین منظور در حالت‌های مختلف مقایسه‌هایی بر اساس مراجع و داده‌های منتشر شده ارائه شد.

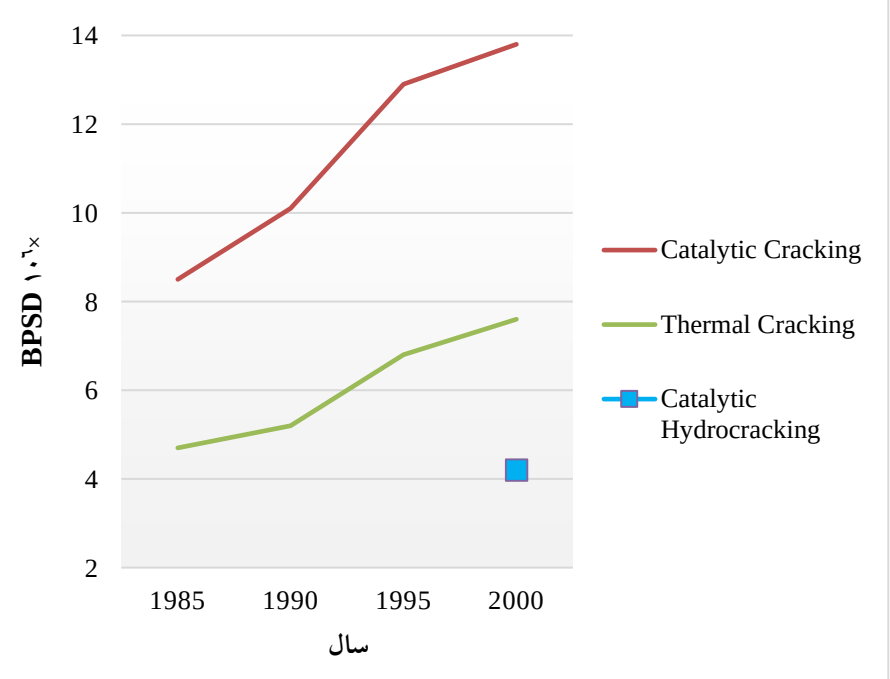
۱-۱- انتخاب تکنولوژی کم ریسک

برای به کارگیری یکی از تکنولوژی‌های کاهش نفت کوره و تبدیل نفت سنگین در یک پالایشگاه، شرط اول قابلیت اطمینان بالای تکنولوژی منتخب است. منظور این است که تنها تکنولوژی با اطمینان به سرانجام خواهد رسید و بازده مد نظر را ایجاد خواهد کرد که به خوبی در گذشته خود را اثبات کرده باشد. بنابراین تنها تکنولوژی‌هایی که به کرات در صنعت نفت و گاز در دنیا استفاده شده باشند می‌توانند یک سرمایه‌گذاری کم رسیک به حساب آیند. برای یک سرمایه گذار کاهش ریسک سرمایه-گذاری بسیار مهم است. از جمله تکنولوژی‌هایی که خود را به اثبات رسانده‌اند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شکست هیدروژنی ته ماند(تبدیل هیدروژنی)
- شکست کاتالیستی (RFCC-VR HDS)
- استخراج با حلال (SDA)
- کاهش گرانروی(visbreaking)-(شکست حرارتی)
- ککینگ تاخیری (delayed coking)-(شکست حرارتی)

این تکنولوژی‌ها بیشتر از سایر فرآیندها در صنعت نفت و گاز مورد استفاده بوده اند لذا جزو کم ریسک ترین فرآیندها هستند. همچنین، اطلاع داشتن از روند استفاده از این تکنولوژی‌ها در سال‌های مختلف نیز می‌تواند مفید باشد زیرا نشان خواهد داد که کدام یک از این تکنولوژی‌ها با تمایل بیشتری در سال‌های اخیر روبرو بوده است. همانطور که در نمودار ۱- مشخص است بیشترین شیب نمودار مربوط به روش‌های شکست کاتالیستی مانند روش RFCC است. یعنی روش RFCC با سرعت بیشتری در حال توسعه و به کارگیری در دنیا است و سالیانه چند ده میلیون بشکه در روز(BPSD[۱۲]) برای فرآوری با این روش استفاده می‌شود.

[12]Barrel per stream day



نمودار ۱: روند استفاده از فرآیندهای اصلی ارتقاء نفت سنگین در دنیا

۱-۲- مقایسه هزینه‌های سرمایه‌ای، کارکردی و سرویس‌های جانبی (Utilities) و درآمد محصول در تکنولوژی‌های مختلف

منظور از هزینه‌های سرمایه‌ای[۱۳] عمدتا هزینه‌هایی است که برای احداث یک فناوری در ابتدای کار نیاز است. هزینه‌های عملیاتی[۱۴] هزینه‌هایی است که در حین کارکردن تکنولوژی به بار می‌آید. این هزینه‌ها شامل: هزینه‌های متغیر (مواد خام، کاتالیزور، مواد شیمیایی، مواد خوراک، تجهیزات و لوازم) و هزینه‌های ثابت (استهلاک، مالیات، بیمه، نگهداری و تعمیر، نیروی انسانی، مصرف انرژی و...) می‌شود. بنابراین برای انتخاب تکنولوژی برتر از میان فناوری‌های کم ریسک ارتقاء کیفیت تەماندهای سنگین، یکی از پارامترهای مهم همین مناسب بودن هزینه‌های سرمایه‌ای خواهد بود. لفظی که آورده شد مناسب بودن است. یعنی ارزان بودن هزینه‌ها کافی نیست بلکه باید تکنولوژی انتخاب شود که هم هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی مناسبی داشته باشد و همزمان درآمد حاصل از آن و بازده آن نیز بالا باشد. به بیان دیگر در کنار هزینه‌های مناسب، اقتصادی، مقرون به صرفه و کارآمد نیز باشد. در ادامه دو نمونه مقایسه از تکنولوژی‌ها به لحاظ بحث هزینه‌ها و درآمدها ارائه شده است.

هزینه سرمایه‌ای طرح‌های ارتقاء کیفیت تەماندهای نفتی بر اساس گازی‌سازی، به طور پیوسته در حال کاهش است. امروزه هزینه‌ی سرمایه‌ای گازی‌سازی برای تولید توان(نیرو) در فناوری گازی سازی یکپارچه سیکل ترکیبی(IGCC[۱۵])، 850 – 950 $/kW گزارش شده است، این در حالی که این هزینه در دوره‌ی ۱۹۹۲-۱۹۸۷ در حدود 1500 – 2500 $/kW بوده است. کاربرد گازی سازی بر اساس تولید گاز سنتز، تقریبا رشد سالیانه ۱۰ درصدی داشته است [۹].مقایسه‌ای بین دو فرآیند حذف کربن با فرآیند RFCC در ادامه نشان داده شده است. سه نیروگاه مختلف جهت مقایسه هزینه‌های سرمایه‌ای، کارکردی و درآمد محصولات در نظر گرفته شده‌اند. نیروگاه اول از روش ککینگ تاخیری استفاده می‌کند. در این نیروگاه، ته مانده‌های برج خلاء، به سوخت‌های حمل و نقل (نفتا، محصولات میانی تقطیر) نفت گاز[۱۶] و کک مصرفی در واحد FCC تبدیل می‌شود. در نیروگاه دوم از فناوری گازی سازی یکپارچه سیکل ترکیبی (IGCC) بر روی پالایشگاه مبتنی بر FCC استفاده می‌شود. در

[13] Capital cost
[14] Operational cost
[15] Integrated Gasification Combined Cycle
[16] Gas oil

این نیروگاه، ته‌ماندهای برج خلاء و دوغاب واحد FCC برای تولید برق(معمولا در حدود MWe 1836 – 978) بدون مقدار قابل توجهی انتشار آلاینده مصرف می‌شوند. مفید است که یادآور شویم که این فرایند حتی در مناطق غنی گاز طبیعی انتخاب خوبی است. اما نیروگاه سوم شامل یک واحد RFCC با تصفیه هیدروژنی ته ماندهبرج تقطیر[۱۷] است. تمام ته ماندهای اتمسفریک تصفیه هیدروژنی شده و به یک واحد RFCC فرستاده می‌شود (بدون هیچ تقطیر خلاء). تصفیه هیدروژنی محتویات فلزی را حذف کرده، غلظت گوگرد را کاهش داده و بازده واحد RFCC را افزایش می‌دهد. برای بدست آوردن هرچه بیشتر سوخت‌های حمل و نقل به جای الکتریسیته، واحدهای RFCC یا ککینگ تاخیری بایستی استفاده شوند. انتخاب بین این دو بسته به بسیاری از عوامل ویژه‌ی محیط و محل اجرا است. اما مشخصا واحد RFCC مزیت استفاده از گازهای مایع(LPG) غیر اشباع را به وسیله‌ی فرایندهای آلکیلاسیون[۱۸]، MTBE یا DIPE[۱۹] دارد.

به جهت مقایسه این سه نیروگاه، در هر نیروگاه، ۲۲۰۰۰۰ بشکه در روز برداشت شد. فرض شد که قیمت نفت خام بین ۱۶ تا ۲۴ دلار به ازای هر بشکه باشد. قیمت کک به صورت محافظه کارانه صفر دلار به ازای هر تن در نظر گرفته شد(با استفاده از قیمت تجاری جاری ۲۰ دلار در هر تن، نرخ بازده داخلی روش ککینگ تاخیری ۳٪ افزایش می‌یابد.). این تحلیل شامل نیروگاه اصلی ارتقاء کیفیت پسماند به اضافه‌ی نیروگاه مورد نیاز برای پالایش فرآورده‌های آن است (برای مثال ظرفیت اضافی واحد FCC). قیمت توان(قدرت) $cents/KW$ 5 در نظر گرفته شده است. با این داده‌ها و ورودی‌ها هزینه‌های سرمایه‌ای، کارکردی و درآمد محصول مقایسه شده و **Error! Unknown switch argument.** در گزارش شده است.

جدول ۱- مقایسه هزینه‌ها و درآمدها در سه روش ارتقاء کیفیت نفت سنگین[۹]

	ککینگ تاخیری	IGCC	RFCC
هزینه سرمایه‌ای($)	۶۲۳-۴۸۵	۱۳۵۳-۲۱۰۳	۷۰۳-۷۰۵
هزینه کارکردی (میلیون دلار در هر سال)	۴۰-۵۰	۱۳۸-۲۳۰	۹۱-۱۰۰
هزینه کارکردی (دلار به ازای هر بشکه خوراک ته ماند اتمسفریک)	۱/۱	۳/۷-۵/۰	۲/۴-۲/۷
درآمد محصول (میلون دلار در هر سال)	۸۶۱-۹۳۲	۱۰۷۹-۱۴۰۴	۱۸۷-۱۰۲۰

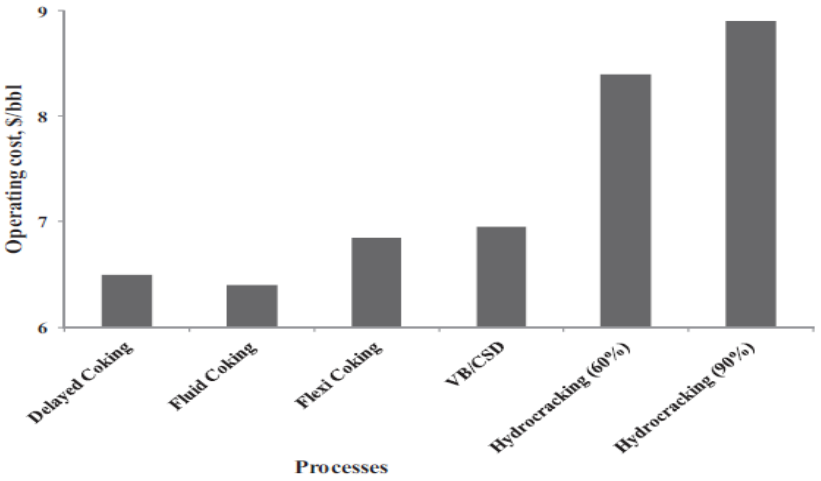
فناوری IGCC بیشترین هزینه سرمایه‌ای را دارد. همچنین هزینه عملیاتی سالانه آن نیز بیش از سایر روش‌ها است. اما از سوی دیگر بیشترین درآمد حاصل از محصول را دارد. با توجه به میزان این هزینه‌ها، و توجه به درآمد حاصل از محصولات می‌توان گفت که در میان این سه استفاده از روش RFCC در مجموع هم به نسبت کم هزینه بوده و هم درآمد محصولات حاصل از آن مقدار قابل توجهی است.

با توجه به فرض‌های انجام شده، همه‌ی این سه گزینه‌ی بالا، نرخ بازگشت سرمایه (RoR[۲۰]) مثبت بین ۷ تا ۲۰ ٪ دارند. نرخ بازگشت سرمایه در RFCC بیشتر از IGCC و در IGCC بیشتراز ککینگ تاخیری است همین موضوع برتری چشمگیری را به RFCC نسبت به سایر تکنولوژی‌ها می‌دهد.نرخ بازده داخلی (IRR[۲۱]) تا حد زیادی به قیمت ته ماندهای تقطیر حساس است و هر ۱ دلار بر بشکه تغییر در قیمت آن می‌تواند ۲ تا ۸ ٪ IRR را تغییر دهد [۹].

در پژوهش دیگری هزینه‌های عملیاتی برای تکنولوژی‌های مختلف مقایسه گردیده است.

نمودار ۲- مربوط به این تحلیل است

[17] Atmospheric residue
[18] Alkylation
[19] Di-Isopropyl Ether
[۲۰] Rate of return
[21] Internal rate of return



نمودار۲: هزینه‌های کاری برای تکنولوژی‌های مختلف[۴]

این هزینه‌های عملیاتی شامل همه هزینه‌های مصرف انرژی، دستمزدها، هزینه‌های کاتالیزور، حلال‌ها، هزینه‌های سرویس‌های جانبی و... می‌باشد که مجموع این دست هزینه‌ها را هزینه‌های کاری یا عملیاتی می‌گویند. این نمودار نیز به خوبی نشان می‌دهد که هزینه‌ی کارکردی فرآیندهای افزودن هیدروژن به مراتب بیشتر از فرآیندهای حذف کربن است. اما نباید فراموش کرد که در عوض این روش‌ها صرفه اقتصادی بیشتری خواهند داشت که در ادامه در خصوص آن توضیح داده خواهد شد.

در ادامه به طور مجزا هزینه‌های سرویس‌های جانبی و Utility و عملیاتی به طور تفکیک شده برای برخی تکنولوژی‌ها قیاس می‌گردد.

این تفکیک هزینه‌ها در جدول۲- قابل مشاهده است.

جدول ۲- میزان مصرف انرژی، سرویس‌های جانبی و Utilityبه ازای حجم مشخصی از خوراک ورودی در تکنولوژی‌های مختلف[۸, ۱۰]

نام فرآیند	سرویس‌های جانبی و utilities	مقدار مصرف
Delayed coking	توان (kwh/bbl)	۳/۶
	سوخت $(10^6\ Btu/bbl)$	۱۲۰
	بخار (lb/bbl)	۴۰
	آب خنک کننده (gal/bbl)	۳۶
Visbreaking	توان مصرفی $(kW/BPSD)$	۰/۰۳۵۸
	سوخت $(10^6\ Btu/bbl)$	۰/۱۱۹۵
	بخار در فشار متوسط (lb/bbl)	۶/۴
	آب خنک کننده (gal/bbl)	۷۱/۰
RFCC	برق (kwh/bbl)	۸/۸>
	بخار (lb/bbl)	
	پر فشار $(600\,lb/in^2\ gage)$	۳۴/۴
	فشار متوسط $(150\,lb/in^2\ gage)$	۴۵/۱>
	کم فشار $(50\,lb/in^2\ gage)$	۸
	آب تصفیه شده (lb/bbl)	۷۳/۵>
	آب خنک کننده (gal/bbl)	۲۷۰>
	کاتالیزور (lb/bbl)	۰/۱۶>
RCD	توان (kwh/bbl)	۵
	بخار پر فشار (lb/bbl)	۱۱
	هیدروژن مصرفی (SCF/bbl)	۷۵۰
	آب خنک کننده (gal/bbl)	۲۲
	کاتالیزور (lb/bbl)	۰/۱
LC-Fining 75%	برق (kWh/m^3)	۱۰۳/۸
	سوخت $(10^3\ kJ/m^3)$	۴۶۳
	بخار (kg/m^3)	۲۷۷
	آب خنک کننده (m^3/m^3)	۳/۹۲
H-oil	برق (kWh/m^3)	۵۶-۱۰۷
	سوخت $(10^3\ kJ/m^3)$	۵۳۰-۷۶۰
	آب خنک کننده (m^3/m^3)	۲/۴-۵/۷
	قیمت کاتالیزور $(U.S\ \$)$	۳/۱۵-۱۲/۶

جدول۲- میزان مصرف انرژی، سرویس‌های جانبی[۲۲]، تجهیزات و سایر موارد مصرفی در هر یک از تکنولوژی‌ها را به ازای واحد خوراک ورودی $(bbl-m^3)$به تفکیک نشان می‌دهد. با مطالعه دقیق جدول ۲- نمودار ۲- قابل درک خواهد بود و می‌توان به

خوبی دریافت که چرا هزینه‌های عملیاتی و کاری روش‌های شکست هیدروژنی بیش از روش‌های شکست کاتالیستی و هزینه‌های عملیاتی شکست کاتالیستی بیش از روش‌های حذف کربن است.

در بخش میزان مصرف انرژی(توان) باید گفت که میزان مصرف انرژی در تکنولوژی‌های H-oil و LC-fining بیشتر از RFCC و RCD است و در آنها نیز بیشتر از فرآیندهای روش‌های کاهش گرانروی و ککینگ تاخیری است.

با توجه به نیاز برخی روش‌ها به کاتالیزور، روش‌های H-oil، LC-Fining، RFCC و RCD به دلیل مصرف کاتالیزور، هزینه‌های مضافی را بر فرآیند تحمیل می‌نمایند.

از منظر آب مصرفی نیز روش‌های افزودن هیدروژن آب بیشتری مصرف می‌کنند. همچنین نیاز به استفاده از هیدروژن در این روش‌ها نیز عامل دیگری برای افزایش هزینه‌های جاری، عملیاتی و سرویس‌های جانبی است.

درست است که طبق بررسی‌ها هزینه‌های سرمایه‌ای، عملیاتی، هزینه‌های جانبی و مصرف انرژی در روش‌های شکست کاتالیستی و روش‌های افزودن هیدروژن بیش از روش‌های حذف کربن است. اما هیچ گاه نمی‌توان تنها هزینه‌ها را معیاری برای تصمیم‌گیری قرار داد. بایستی معیارهای مهم دیگری نیز مورد توجه قرار گیرد. برای مثال ارزش و قیمت محصولات تولید شده، نرخ بازگشت سرمایه، ارزش خالص فعلی فرآیندها، میزان سود خالص، میزان تقاضا برای محصولات، بازار فروش محصولات، راندمان و.. از معیارهای مهمی دیگری است که در ادامه بررسی خواهند شد.

۱-۳- ویژگی‌ها، مقادیر و قیمت خوراک ورودی و محصولات بدست آمده

مسئله مهم دیگر در استفاده از تکنولوژی‌های کاهش نفت کوره، نوع، میزان و ارزش خوراک ورودی و محصولات تولید شده است. البته مقدار خوراک ورودی در یک فرآیند و میزان محصولات تولید شده وابسته به ابعاد راکتورها و ظرفیت پالایشگاه است. همین موضوع امکان مقایسه را به طور دقیق از منظر مقدار محصول تولیدی صلب می‌کند. اما می‌توان با توجه به کیفیت محصولات تولید شده، ارزش آنها را برآورد کرد.جدول ویژگی‌های خوراک ورودی و محصولات فرآیندها را با قیمت نسبی آنها نشان می‌دهد.

همانطور که در بخش قبل دیده شده، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای روش‌های حذف کربن، مانند visbreaking و ککینگ کمتر از هزینه‌های روش‌های RFCC و روش‌های افزودن هیدروژن است. اما با توجه به جدول۳- می‌توان دریافت کیفیت و قیمت محصولات تولید شده در فرآیندهای RFCC و افزودن هیدروژن بسیار بیشتر از سایر تکنولوژی‌ها است. لذا استفاده از روش RFCC یا روش‌های حذف کربن می‌تواند محصولات با ارزش تر و با قیمت بالاتری را بدست دهد که بازار فروش مناسبی دارند. بنابراین هر هنگام که سرمایه کافی در دست باشد انتخاب روش RFCC یا روش‌های افزودن هیدروژن می‌تواند انتخاب بهتری باشد.

[۲۲]Utilities

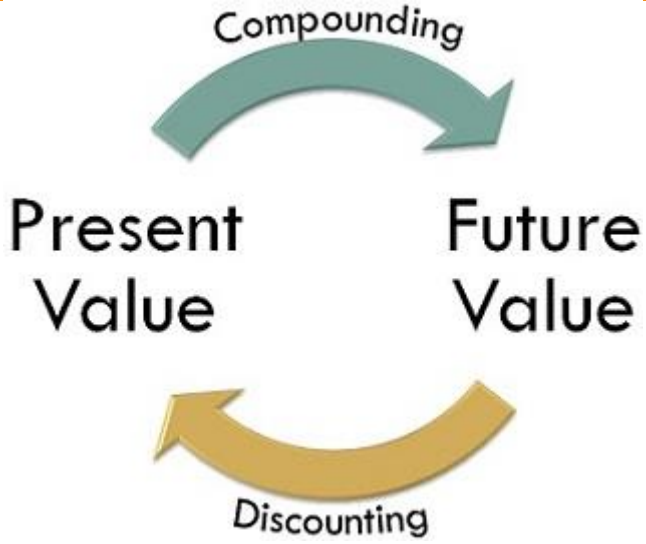
جدول ۳- ویژگی‌ها، مقادیر و قیمت نسبی خوراک و فرآورده‌ها در تکنولوژی‌های ارتقاء ته ماندهای سنگین [۸, ۱۰]

نوع فرآیند	خوراک ورودی	محصولات	مقدار محصول ($wt\%$)	ارزش نسبی محصولات
Visbreaking	ته ماند خلا (۹۰/۷۵ $vol\%$) + نفت گاز سنگین (۸/۷۴ ٪) + نفت گاز سبک(۰/۵۱ ٪) ($400-538°C$) ($200-400°C$)	گاز	۱-۲	کم
		نفتا	۲-۳	زیاد
		نفت گاز	۵-۷	متوسط
		نفت کوره	۹۰-۹۲	کم
ککینگ تاخیری	ته ماند خلاء، قیر کاهش گرانروی شده، خروجی فرآیند **visbreaking**، ته ماند اتمسفریک، نفت دوغاب، قیر، خروجی‌های **SDA**	**گاز**	۹/۰۵	کم
		نفتا و بنزین با اکتان پایین	۱۱/۲۱	زیاد
		نفت گاز	۳۹/۹۴	متوسط
		کک	۳۹/۸۰	کم
RFCC	ته ماند خلاء یا ته ماند اتمسفریک با آلاینده‌های فلزی و کربن کنرادسون، نفت گاز اتمسفریک، نفت گاز خلاء، نفت گازی خروجی از ککر، نفت گاز خروجی از شکست حرارتی، نفت آسفالت زدایی شده و یا ترکیبی از خوراک های یاد شده	هیدروژن سولفاید	۰/۰۳	کم
		هیدروژن	۰/۹۱	کم
		متان و اتان	۶/۶۱	زیاد
		اتیلن	۴/۳۰	زیاد
		پروپان	۵/۲۳	زیاد
		پروپیلن	۱۸/۳۷	زیاد
		n-بوتان	۲/۲۵	زیاد
		i-بوتان	۸/۵۹	متوسط
		بوتیلن	۱۲/۹۲	زیاد
		بنزین	۱۸/۸۱	زیاد
		LCO[۲۳]	۸/۴۴	متوسط
		نفت صاف شده[۲۴]	۵/۱۹	کم
		کک	۸/۳۴	کم
هیدروکرکینگ بستر دوغابی	خوراک ها با محتوای فلز و گوگرد بالا، ته ماند خلاء و اتمسفریک	گاز ($HC-H_2S$)	۹/۱-۹/۱۵	کم
		نفتا	۴/۹-۱۴/۰	زیاد
		نفت گاز	۲۶/۹-۳۹/۱	متوسط
		VGO	۲۳/۳-۳۴/۹	متوسط
		DAO	۸/۵-۲۴/۴	متوسط

۴-۱- ارزیابی اقتصادی تکنولوژی‌های مختلف با استفاده از متد DCF با مقایسه معیارهای اقتصادیIRR و NPV

هنگامی که قرار است تصمیم‌های سرمایه‌گذاری گرفته شود، تاثیر زمان بر ارزش پول و منابع (جریان نقدینگی) باید در نظر گفته شود. متد DCF[۲۵]، روشی است که تکنیک‌های مرکب و تنزیل[۲۶] را در ارزیابی اقتصادی اعمال می‌کند. مفهوم ارزش فعلی و آتی و رابطه آن با تکنیک‌های مرکب و تنزیل در شکل ۱- نمایش داده شده است.

[۲۳] Light cycle oil
[۲۴] Decant oil
[۲۵] Discounted cash flow
[۲۶] Compounding and discoung



شکل۱:رابطه ارزش فعلی و آتی با تکنیک‌های مرکب و تنزیل

روابط مرکب و تنزیل برای تبدیل ارزش فعلی و آتی به یکدیگر در زیر ارائه شده است:

$$Future\ value = \sum Present\ value \times (1+r)^n \quad (۱)$$

$$Present\ value = \sum Future\ value/(1+r)^n \quad (۲)$$

معادله () مربوط به روش مرکب و معادله () برای حالت تنزیل است که در آن nشماره سال و r نرخ تنزیل (نرخ بهره مرکب) است. متد DCF دو معیار برای کنترل و ارزیابی طرح‌های اقتصادی دارد: ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی.

ارزش خالص فعلی (NPV[۲۷]) در علم اقتصاد مهندسی، یکی از روش‌های استاندارد ارزیابی طرح‌های اقتصادی است. در این روش، جریان نقدینگی (درآمدها و هزینه‌ها) برپایه زمان وقوع (درآمد یا هزینه) به نرخ روز تنزیل می‌شود. به این ترتیب در جریان نقدینگی، ارزش زمان انجام هزینه یا به دست آوردن درآمد نیز لحاظ می‌گردد. در حقیقت در این پارامتر درآمدهای سالانه، نرخ‌های تنزیل و تورم، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های عملیاتی در نظر گرفته می‌شود. رابطهNPV به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\boldsymbol{NPV = \sum_{i=1}^{n} \frac{CF_i}{(1+r)^{i-1}}} \quad (۱)$$

که در آن CF_i جریان نقدینگی در سال i ام r نرخ تنزیل است. جریان نقدینگی در سال اول (زمان حاضر) همان هزینه‌های سرمایه‌ای است که باید به صورت منفی در فرمول وارد شود. در محاسبه جریان نقدی در سال‌های بعدی هم باید هزینه‌های عملیاتی از درآمدها کسر شود.

ارزش فعلی خالص مثبت نشان می‌دهد که درآمدهای محاسبه‌شده‌ای که از پروژه یا سرمایه گذاری به دست می‌آید از هزینه های پیش‌بینی‌شده فراتر می‌رود. عموماً سرمایه گذاری با NPV مثبت سودمند خواهد بود و سرمایه گذاری با NPV منفی منجر به زیان خالص خواهد شد. این موضوع، پایه قانون ارزش فعلی خالص است که می‌گوید تنها باید در پروژه‌هایی سرمایه گذاری کرد که ارزش فعلی خالص مثبت دارند.

از سوی دیگر نرخ بازده داخلی، نرخ تنزیلی است که منحر به صفر شدن NPV در یک پروژه می‌گردد. بالا بودن این پارامتر گویای این موضوع است که به لحاظ زمانی، طرح ما در اثر هزینه‌های عملیاتی، تورم، و کاهش ارزش مالی، مقاوم تر است و در بازه بلند مدتی سودمند خواهد بود. رابطه مربوط به آن به صورت زیر است:

$$NPV = \sum_{i=1}^{n} \frac{CF_i}{(1+IRR)^{i-1}} = 0 \quad (۲)$$

چهار طرح ارتقاء ته ماندهای نفتی در جدول ۴- از منظر اقتصادی مقایسه شده است.

[27]Net present value

جدول :Error! No text of specified style in documentمقایسه برخی شاخص‌های اقتصادی در روش‌های ارتقاء کیفیت نفت کوره[۱۱]

تکنولوژی	NPV(Million US$@10%/Yr)	IRR (%/Y)	NPV Ratio(@10%/Yr)
گازی سازی	-۲	۸/۵	-۰/۱۰
بستر غلیانی	-۲۵۳	N.A.	-۱/۴۰
ککینگ تاخیری	-۱	۹/۸	-۰/۰۱
تبدیل هیدروژنی[۲۸]	۱۱۲	۷۵/۱	۶/۲۰

لذا با مقایسه NPV مشخص شده برای هریک از تکنولوژی‌ها در جدول Error! **No text of specified style in document.** می‌توان دریافت که به دلیل منفی شدن NPV در روش‌های بستر غلیانی، ککینگ تاخیری و گازی سازی، این فرآیندها مقرون به صرفه نیست و لذا اجرای طرح منتفی است.تبدیل هیدروژنی باعث رسیدن به NPV مثبت شده است. مضاف بر آن، این شاخص در این تکنولوژی‌ها بسیار بالا است که این موضوع نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در این تکنولوژی و پرداخت هزینه‌های کارکردی و سرمایه‌ای توجیه اقتصادی دارد.لذا می‌توان دریافت که فرآیندهای تبدیل هیدروژنی صرفه اقتصادی بهتری نسبت به فرآیندهای حذف کربن برای سرمایه‌گذاری خواهند داشت.

در ارزیابی که توسط مرکز همکاری‌های نفتی ژاپن در سال ۲۰۰۵ صورت گرفت، سود خالص و هزینه‌های عملیاتی در تکنولوژی-های مختلف محاسبه شد. نتیجه این ارزیابی در **Error! Unknown switch argument.** آورده شده است. همانطور که در جدول ۵- دیده می‌شود، به ترتیب درآمد حاصل از تکنولوژی‌های RFCC، شکست هیدروژنی و ککینگ تاخیری بیش از سایر فرآیندها است. این در حالی است که هزینه‌های عملیاتی بالا در روش شکست هیدروژنی تهماند باعث شده است که از سود خالص این روش کاسته شود. هزینه‌های عملیاتی روش شکست هیدروژنی بسیار بالا است که همون موضوع باعث کمتر شدن سوددهی آن نسبت به RFCC شده است. در نهایت با کم کردن هزینه‌های عملیاتی هر یک از روش‌ها از میان درآمدها نشان داده شده است که روش RFCC بیشترین سود خالص را در بین سایر روش‌ها نتیجه می‌دهد.

جدول ۵- درآمد، هزینه‌های عملیاتی و سود خالص تکنولوژی‌های ارتقاء نفت سنگین[۱۲]

تکنولوژی ($MM\$/year$)	RHCR[۳۱]	RFCC	SDA[۳۰]	VISB[۲۹]	Delayed coking
درآمد(**A**)	۳۱۹/۴	۳۲۳/۹	۲۹۶/۲	۲۶۷/۳	۳۱۴/۵
هزینه‌های عملیاتی متغیر(**B**)	۵۳/۹	۴۴/۸	۴۳/۸	۴۰/۴	۳۹/۶
هزینه‌های عملیاتی متغییر (**C**)	۱۰۰/۴	۹۴/۳	۸۹/۵	۸۷/۳	۹۱/۸
سود خالص (**A-B-C**)	۱۶۵/۱	۱۸۴/۸	۱۶۲/۹	۱۳۹/۶	۱۸۳/۱

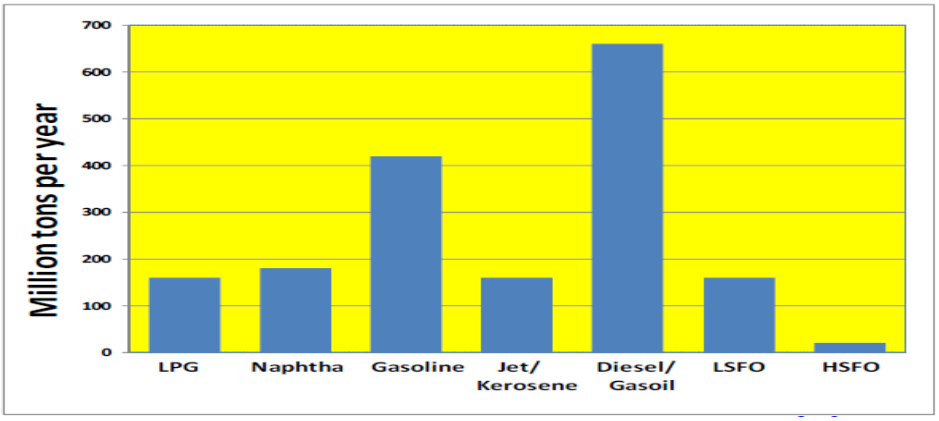
بنابراین فرآیند RFCC توانسته است توازن خوبی را بین همه مولفه‌ی اقتصادی برقرار نماید. به طوری که با صرف هزینه‌های مناسب (نه کم و نه زیاد)، بازدهی بالا، سود خالص زیاد و ارزش خالص فعلی (NPV) مناسبی ارائه دهد.

۱-۵- بررسی تقاضا برای محصولات پالایشگاهی

تقاضا برای فرآورده‌های پالایشگاهی یکی دیگر از عوامل مهم برای انتخاب طرح و فرآیند بهینه در ارتقاء کیفیت نفت سنگین است. از آنجایی که فرآورده‌های تولید شده در هر یک از فرآیندها به لحاظ نوع، کیفیت و قیمت متفاوت است بایستی در انتخاب نوع فرآیند به این نکته دقت نمود که حد الامکان به سوی تولید محصولاتی رفت که بازار بزرگتری برای فروش دارد. نمودار ۳- رشد تقاضا برای هر یک از فرآورده‌های نفتی را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که موقعیت مناسبی برای احداث

[28] Hydro-conversion
[29] Visbreaking
[30] Solvent Deasphalting
[31] Residue hydrocracking

فرآیندهای تبدیل پسماند فراهم است. به ویژه با توجه به تقاضا برای فرآورده‌ها، روش‌های فرآوری با هیدروژن به لحاظ بازار و فروش، محصولات بهتری را در اختیار خواهند گذاشت.



نمودار ۳: رشد تقاضای جهانی برای فرآورده‌های نفتی[۱۳]

۲- جمع بندی مزایا و معایب مهم هر یک از انواع فرآیندها در نگاه کلی

مهمترین مزایا و معایب هر یک از تکنولوژی‌ها در جدول آورده شده است.

جدول ۶: مزایا و معایب تکنولوژی‌های ارتقاء کیفیت ته‌ماندهای نفتی

نوع فرآیند	مزایا	معایب
فرآیندهای شکست حرارتی (حذف کربن): **visbreaking**، **delayed coking**، **fluid coking**، **flexi coking**، **Eureka / HSC**[۳۲]	✓ می‌تواند برای نفت‌های سنگینی به کار رود که به دلیل ناخالصی بالا(فلز، سولفور، **CCR** و غلظت نیتروژن) با سایر روش‌ها نمی‌توانند به راحتی فرآوری شوند. ✓ هزینه سرمایه‌ای پایین ✓ اجرای آسان	اندک بودن فرآورده‌های بنزین اکتان اندک بودن فرآورده‌های پایدار تولید گازهای کم ارزش (C_1, C_2) بازار محدود برای کک تولیدی
فرآیندهای شکست کاتالیستی (**RFCC ،VGO FCC**)	تولید بنزین اکتان به میزان زیاد تولید گازهای پر ارزش(پروپیلن، اتیلن) تولید بخار پر فشار(**HP**) و فشار متوسط(**MP**) صرفه اقتصادی بالا (**NPV** و **IRR** بالا)	محدودیت در نوع خوراک هزینه‌ی سرمایه‌ای نسبتا زیاد نیاز به واحد پیش تصفیه برای حذف ناخالصی‌ها (محتویات فلز، گوگرد، **CRR**، نیتروژن) هزینه‌های عملیاتی بالا (به دلیل گرانی کاتالیزورها)
استخراج با حلال، **SDA**	می‌تواند برای نفت‌های سنگینی به کار رود که به دلیل ناخالصی بالا(فلز، سولفور، **CCR** و غلظت نیتروژن) با سایر روش‌ها نمی‌توانند به راحتی فرآوری شوند. می‌تواند نفت آسفالت زدایی شده(**DAO**) را با فرآیندی ساده تهیه کند. هزینه سرمایه‌گذاری پایین	تولید قیر کم ارزش (پر گوگرد، با ویسکوزیته زیاد) فشار کاری بالا
فرآوری با هیدروژن: (بستر ثابت (**RCD**)، بستر متحرک، بستر غلیانی(**H-oil**، **LC-Fining**)، بستر دوغابی)	تولید محصولات با کیفیت بالا حذف آسفالتین، فلز، نیتروژن، گوگرد از نفت سنگین انعطاف پذیری عملیاتی بالا	هزینه‌های عملیاتی بسیار بالا (کاتالیزور و هیدروژن) فشار کاری بسیار بالا هزینه سرمایه‌گذاری بسیار بالا تولید قیر کم ارزش یا مقادیر زیاد نفت کوره کم گوگرد

[32] High-conversion Soaker Cracking

۳- ارزیابی نهایی با در نظر گرفتن همه فاکتورها برای انتخاب تکنولوژی برتر

با کنار هم گذاشتن همه پارامترهای اقتصادی که در این فصل تحلیل شد، می‌توان جدولی ساده مطابق با جدول تهیه کرد که با یک دید کلی به ما در انتخاب فرآیند برتر کمک کند.

با توجه به جدول۷- مزیت‌های اصلی فرایندهای شکست هیدروژنی و تبدیل هیدروژنی مانند H-oil، LC-Fining، RCD و... کیفیت محصولات عالی و راندمان بالای آنهاست. اما به دلیل هزینه‌های بالای عملیاتی، سرمایه‌ای و جانبی و مصرف زیاد انرژی ممکن است مورد توجه نباشند. روش‌های شکست حرارتی مانند کاهش گرانروی و ککینگ تاخیری هزینه‌های عملیاتی، سرمایه‌ای و جانبی کمی دارند اما محصولات تولیدی آنها کم ارزش بوده و لذا بازار مناسبی ندارد. فرآیندهای شکست کاتالیستی مانند RFCC با موازنه خوبی که بین همه پارامترها ایجاد می‌کنند هم هزینه‌ی مناسبی داشته و هم فرآورده‌های نهایی تولید شده‌ی آنها از کیفیت مناسبی برخوردار است. تنها مشکل مهم این فرآیند نیاز آن به پیش تصفیه است تا گوگردها و فلزات موجود تا حد زیادی از خوراک ورودی حذف شوند. همین موضوع باعث می‌شود که در اکثر پالایشگاه به صورت ترکیبی از این فرآیندها استفاده شود تا نقاط ضعف یکدیگر را پوشش دهند.

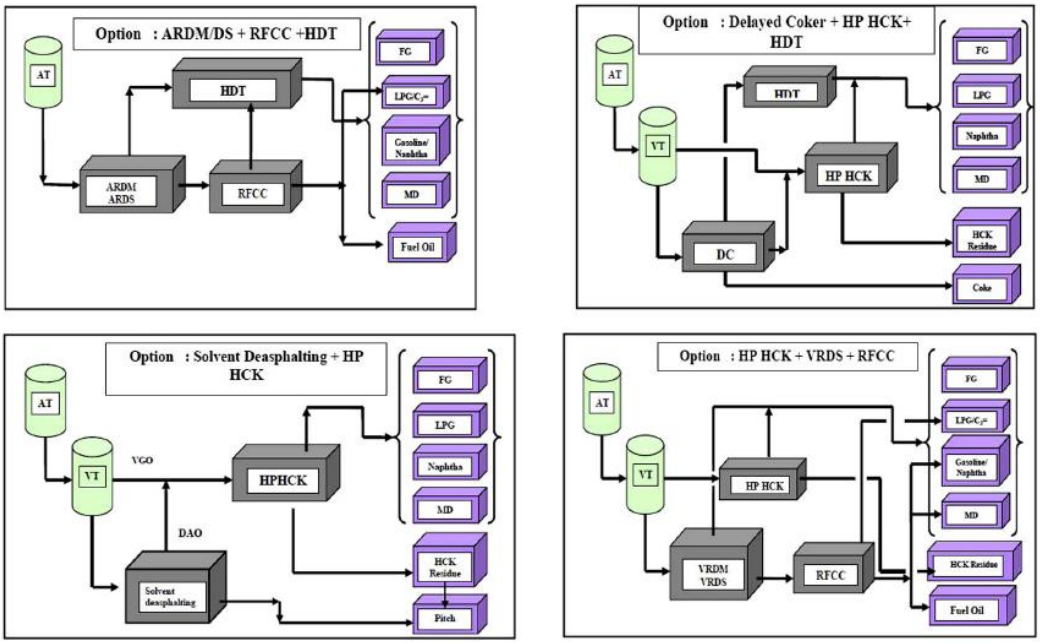
جدول ۷: ررسی مهمترین معیارها در انتخاب تکنولوژی برتر ارتقاء ته‌ماندهای نفتی

	شکست هیدروژنی (fixed bed, RCD)	تبدیل هیدروژنی (H-oil, LC fining)	شکست کاتالیستی (RFCC)	استخراج با حلال (SDA)	شکست حرارتی (delayed coking, visbreaking)
نوع خوراک	**HGO[33]/VGO[34]**	**AR[35]/VR[36]**	**VGO/AR**	**AR/VR**	**AR/VR**
قابلیت اطمینان	بالا	بالا	بالا	بالا	بالا
پیش تصفیه	نیاز دارد	-	نیاز دارد	-	-
کیفیت فرآورده	عالی	عالی	خوب	خوب	کم
فرآورده اصلی	محصولات میانی تقطیر	محصولات میانی تقطیر	بنزین با اکتاب بالا، پروپیلن	**DAO[37]**	بنزین با اکتان پایین
فرآورده جانبی	نفت کوره کم سولفور	قیر[38] کم ارزش	نفت دوغاب	قیر پر گوگرد	نفت کوره پر گوگرد/ کک
ارزش محصولات	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	کم
راندمان تکنولوژی	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط
هزینه سرویس‌های جانبی (**Utilities**)، (مصرف کاتالیست، هیدروژن، بخار، آب خنک کننده و...)	زیاد	زیاد	متوسط	کم	کم
میزان مصرف انرژی	زیاد	زیاد	متوسط	پایین	پایین
هزینه سرمایه ای	زیاد	زیاد	متوسط	کم	کم
هزینه‌های عملیاتی	زیاد (کاتالیزور و هیدروژن)	زیاد (کاتالیزور و هیدروژن)	متوسط (کاتالیزور)	کم	کم
ارزش خالص فعلی(**NPV**)	متوسط	خوب	خوب	پایین	متوسط
سود خالص	متوسط	متوسط	خوب	متوسط	متوسط

[33] Heavy gas oil
[34] Vacuum gas oil
[35] Atmospheric residue
[36] Vacuum residue
[37] Deasphalted oil
[38] Low value pitch

۴- استفاده از طرح های ترکیبی

طرح های شکست هیدروژنی و طرح‌های شکست کاتالیستی اغلب نیازمند پیش تصفیه برای کاکرد بهینه هستند. بنا براین نمی‌توان با هر خوراک انتظار بهترین عملکرد را از آنها داشت. خوراک‌هایی با درصد پایین گوگرد و فلزات اغلب در این فرآیندها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سویی، روش‌های حذف کربن محدودیت کمتری در خوراک‌های مصرفی دارند اما فرآورده‌ی آنها ارزش بالایی ندارند. این دو نکته شاید این تفکر را ایجاد نماید که برای رسیدن به بهترین نتیجه بهتر است به صورت ترکیبی از فرآیندها استفاده نمود.این تفکر، تفکر دوری نیست و هم اکنون در بسیاری از پالایشگاه‌ها به صورت ترکیبی از فرآیندهای بررسی شده استفاده می‌شود. برخی از این طرح‌ها که هم اکنون در بسیاری از پالایشگاه‌ها مورد استفاده است در شکل۲- نمایش داده شده است.



شکل۲: برخی از طرح‌های ترکیبی برای ارتقاء کیفیت تەماندهای نفتی[۷]

برای مثال با ادغام روش‌های فلززدایی و گوگرد زدایی با روش‌های RFCC، یا ترکیب روش‌های استخراج با حلال با روش‌های شکست هیدروژنی و... می‌توان نواقض هر یک از تکنولوژی‌ها را پوشاند. اما این مسئله که کدام یک از همین طرح‌های ترکیبی نسبت به سایر طرح‌های ترکیبی ارجعیت دارد، خود نیازمند یک ارزیابی فنی و اقتصادی توام است که به بررسی آنها، مزایا و معایب هر یک بپردازد. کما اینکه برخی محققین به این موضوع پرداخته‌اند [۷].

بحث و نتیجه گیری

بر طبق بررسی های صورت گرفته در این مقاله مهمترین نتایج بدست آمده از ارزیابی‌های اقتصادی برای انتخاب بهترین تکنولوژی نفت کوره به شرح ذیل می باشد:

مهمترین متغیرهای اقتصادی تعیین کننده در انتخاب تکنولوژی برتر عبارتند از: قیمت خوراک مصرفی، قیمت فرآورده‌های هریک از فرآیندها، بازدهی تکنولوژی، میزان مصرف انرژی، میزان تقاضا برای محصولات، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی، بازاریابی و بازگشت زمانی سرمایه، NPV، IRR و... . این متغیرها مورد تحلیل قرار گرفت.

انتخاب تکنولوژی بار ریسک پایین اولین قدم برای سرمایه‌گذاری است. با توجه به کاربرد تکنولوژی‌های مختلف در دنیا روش‌های شکست هیدروژنی، شکست کاتالیستی، استخراج با حلال، کاهش گرانروی و ککینگ تاخیری کم ریسک ترین تکنولوژی‌ها هستند.

فرآیندهای شکست هیدروژنی بیشترین هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و سرویس‌های جانبی را دارند. هزینه‌های فرآیندهای شکست کاتالیستی مانند RFCC متوسط بوده و روش‌های حذف کربن مانند کاهش گرانروی و ککینگ تاخیری کمترین هزینه‌ها را به همراه دارند.

مهمترین شاخص برای ارزیابی فرآیندها و میزان اقتصادی بودن آنها، شاخص‌های IRR و NPV است. در این پژوهش نشان داده شد که ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی در فرآیند RFCCبیش از همه روش‌هاست و بنابراین بهترین گزینه‌ی اقتصادی است. همچنین سود حاصل از این روش هم بیشتر از سود سایر روش‌هاست.

رشد تقاضا در دنیا نشان می‌دهد که نفت گاز و بنزین و نفتا با بیشترین میزان تقاضا مواجه هستند.

در مجموع ارزیابی اقتصادی نشان داد که روش‌های بستر ثابت، LC-fining، H-Oil، کیفیت فرآورده بالا و محصولات پر ارزشی را تولید می‌کنند. اما به دلیل مصرف انرژی زیاد و هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی بالا، سود خالص ناشی از آنها متوسط است.

از سوی دیگر مصرف انرژی، هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه‌های عملیاتی در روش‌های استخراج با حلال و حذف کربن (ککینگ تاخیری، کاهش گرانروی) پایین است اما کیفیت فرآورده‌ها پایین و محصولات کم ارزشی تولید می‌شود. لذا سود خالص حاصل از این تکنولوژی‌ها نیز متوسط است.

فرآیندهای شکست کاتالیستی مانند RFCC هم هزینه کمتری و هم مصرف انرژی پایین‌تری در مقایسه با روش‌های شکست هیدروژنی دارند و هم کیفیت محصولات تولیدی آنها خوب است. همین موضوع باعث می‌شود که بیشترین سود خالص را نتیجه دهند.

در نهایت، می‌توان مقایسه‌ای بین هزینه‌های سرمایه‌گذاری در هریک از تکنولوژی‌ها و درآمد بدست آمده از آنها مطابق با شکل۳- انجام داد. که نشان می‌دهد روش‌های شکست هیدروژنی پرهزینه‌ترین تکنولوژی‌ها هستند در صورتی که بیشترین سود برای ترکیب روش‌های سولفور زدایی هیدروژنی (VR-HDS[۳۹]) و RFCCاست.

[39] Vacuum residue-Hydrodesulfurization

شکل۳: مقایسه درآمد تکنولوژی‌ها در مقابل هزینه‌های سرمایه‌ای

پیشنهادهای تحقیق

پس از ارزیابی‌های اقتصادی از تکنولوژی‌های نوین کاهش نفت کوره و ارتقاء ته‌ماندهای سنگین نفتی، مزایا و معایب همه تکنولوژی‌ها مشخص گردید. با هدف کاهش هزینه‌ها، کاهش مصرف انرژی، افزایش بازده و تولید محصولات با کیفیت بهترین این تکنولوژی‌ها مشخص شد. حال که ارزیابی‌های اقتصادی تکنولوژی‌های کاهش نفت کوره انجام شده است و معیارهای انتخاب بهترین فرآیند از منظر مصرف انرژی، بازدهی، کیفیت محصولات، هزینه‌ها و... روشن شده است، باید بر اساس شرایطی نظیر میزان سرمایه، پیشرفت تکنولوژیک، بازار محصولات و... تکنولوژی مورد نظر برای طراحی دقیق و عملیاتی سازی انتخاب شود. مطابق با پژوهش انجام شده دیده شد که فرآیند RFCC در مجموع بهترین انتخاب از منظر اقتصادی خواهد بود. لذا بایستی قدم در راه طراحی دقیق و عملیاتی سازی این تکنولوژی گذاشت و دانش حاصله را در صنعت پیاده نمود. به همین منظور برای پیشبرد هرچه بیشتر دانش و همچنین صنعتی شدن موضوع پیشنهاداتی برای سایر محققین برای پژوهش بیشتر در ادامه آورده شده است:

محاسبه سود، هزینه‌ها و... در یک واحد RFCC در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت

بهینه سازی فرآیندهای کاهش نفت کوره (RFCC یا غیره) به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش سود

منابع

[1]Castañeda, L., J. Muñoz, and J. Ancheyta, Combined process schemes for upgrading of heavy petroleum. Fuel, 2012. 100: p. 110-127.

[2]Dehghani, A., M. Sattarin, H. Bridjanian, and M. Kh, Investigation on effectivenessparameters in residue upgrading methods. Pet. Coal, 2009. 51(4): p. 229-236.

[3]Rana, M.S., V. Samano, J. Ancheyta, and J. Diaz, A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residua. Fuel, 2007. 86(9): p. 1216-1231.

[4]Sahu, R., B.J. Song, J.S. Im, Y.-P. Jeon, and C.W. Lee, A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. 27: p. 12-24.

[5]خادم صمیمی آ، بریجانیان ح ،کریمی غ ، زارعی ابیانه م. انتخاب بهترین فرآیندهای ارتقاء، برای ته مانده های سنگین نفتی ایران. فصلنامه علمی ترویجی فرآیند نو، ۲۰۱۳. ۸(۴۱) صفحه: ۸۱-۹۸.

[6]اسماعیل نیا ع،ا، ون. آذر مهر.ارزیابی اقتصادی احداث پالایشگاه بر مبنای نفت سنگین به منظور جلوگیری از واردات بنزین. علوم اقتصادی, پاییز ۱۳۸۷(۴).

[7]El-Temtamy, S.A. and T.S. Gendy, Economic evaluation and sensitivity analysis of some fuel oil upgrading processes. Egyptian Journal of Petroleum, 2014. 23(4): p. 397-407.

[8]Meyers, R.A., Handbook of petroleum refining processes. 2004: McGraw-Hill.

[9]Phillips, G. and L. FANG. Advances in residue upgrading technologies offer refiners cost-effective options for zero fuel oil production. in ERTC. Annual meeting. 2002.

[10]Raseev, S., Thermal and catalytic processes in petroleum refining. 2003 :CRC Press.

[11]Sartori, R. A Technology to Convert the Bottom of the Barrel to Transportation Fuels. in Snamprogetti & Eni Tecnologie, 3rd. Bottom of the Barrel Technology Conference & Exhibition, Antwerp. 2004.

[12]Upgrading Process of Heavy Oil-Selection of Heavy Oil Upgrading Process 2005: Japan Cooperation Center,Petroleum.

[13]Duddy, J., L. Wisdom, S. Kressmann, and T. Gauthier. Understanding and optimization of residue conversion in H-Oil®. in Proceedings of the Third Bottom of the Barrel Technology Conference (BBTC), October. 2004.