Archive of SID

تحلیل شبکه بازیافت هیدروژن به‌کمک کامپیوتر برای مدیریت هیدروژن در صنایع فرایندی

رحیم احمدی تجرودی، فرشاد نورایی*+
مازندران، دانشگاه علوم و فنون مازندران، گروه مهندسی شیمی

داود رشتچیان
تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

چکیده: عواملی ازجمله نیاز به تولید سوخت‌های پاکیزه (کم گوگرد) برای کاهش آلودگی محیط زیست و تبدیل نفت خام سنگین به برش‌های سبک‌تر و دلخواه، ظرفیت مورد نیاز واحدهای هیدروتریتر و هیدروکراکر در پالایشگاه‌ها و در نتیجه نیاز به هیدروژن بیشتر را به‌طور مداوم افزایش می‌دهد. در این مقاله ابتدا فرایندهای تولید کننده، مصرف کننده و بازیابی کننده‌ی هیدروژن معرفی و سپس معیارهای انتخاب فناوری سیستم‌های بازیافت هیدروژن شرح داده شده و چند روش اصلاح شبکه‌ی هیدروژن و ارزیابی آنها به اختصار معرفی شده است. مدیریت هیدروژن در پالایشگاه‌های نفت، مستلزم شناخت منابع بالقوه تولید و مصرف کننده‌های هیدروژن در آن و انتخاب بهترین شیوه و الگوی مرتبط کردن منابع و مصارف هیدروژن است. با توجه به تعدد الگوهای ممکن ارتباط در مقیاس صنعتی، و نیاز به برآوردهای اقتصادی برای انتخاب بهترین الگو، وجود یک نرم‌افزار که محاسبه‌ها را بتوان به‌کمک آن انجام داد، ضروری است. چنین نرم‌افزاری تاکنون در منابع علمی بین‌المللی معرفی نشده است. در این مقاله نرم‌افزاری معرفی شده که توسط نویسندگان در محیط ویژوال بیسیک ایجاد شده و قادر است با دریافت اطلاعات مربوط به شرایط موجود و مورد نیاز (با توجه به محدودیت فرایندی) شبکه‌ی هیدروژن، گزینه‌های فرایندی گوناگونی را برای اصلاح شبکه‌ی هیدروژن پیشنهاد کند. خروجی‌های این نرم‌افزار عبارت‌اند از: مشخص کردن گلوگاه در شبکه‌ی هیدروژن به‌منظور تجزیه وتحلیل شبکه، تعیین نقطه کار سیستم بازیافت هیدروژن و برآورد اقتصادی جامع طرح‌های متفاوت اصلاح شبکه که امکان انتخاب گزینه‌ی برتر را فراهم می‌آورد.

واژه های کلیدی: مدیریت هیدروژن، نرم‌افزار مهندسی، بازیافت هیدروژن، پالایش نفت، گلوگاه (پینچ) هیدروژن

KEY WORDS: *Hydrogen management, Engineering software, Hydrogen recovery, Refining, Hydrogen pinch.*

مقدمه

افزایش نیاز به سوخت‌های پاکیزه به‌منظور جلوگیری از آلودگی محیط زیست و تبدیل برش‌های سنگین و ترش به برش‌های سبک‌تر، پالایشگاه‌ها را به سمت افزایش ظرفیت واحدهای هیدروتریتر و هیدروکراکر سوق می‌دهد. با افزایش ظرفیت این

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: f.nourai@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

واحدها، مصرف هیدروژن به‌عنوان یوتیلیتی در پالایشگاه افزایش می‌یابد. از طرفی در واحد تولید هیدروژن همراه با هیدروژن تولیدی، آلاینده‌ی کربن دی‌اکسید نیز تولید می‌شود که از نظر زیست محیطی، پالایشگاه‌ها را در تولید هیدروژن محدود می‌سازد. البته، بسته به نوع فرایند، مقدار تولید کربن دی‌اکسید نسبت به تولید هیدروژن متغیر است [۱].

کشور ایران با مسایلی مانند کمبود بنزین، نیاز به سوخت‌های پاکیزه (کم گوگرد) و نفت خام سنگین به عنوان خوراک پالایشگاه‌ها مواجه است و برای حل این‌گونه مشکل‌ها، اصلاح و احداث واحدهای فرایندی هیدروکراکر، هیدروتریتر و واحد تولید هیدروژن لازم است. راه‌حل دیگر، اصلاح شبکه هیدروژن است که در این زمینه در ایران تحقیقاتی صورت گرفته است [۲و۳].

به‌منظور مصرف بهینه‌ی هیدروژن در پالایشگاه‌ها روش‌های متفاوتی ارایه شده است که عبارت‌اند از: روش گرافیکی (فناوری پینچ) [۴]، روش ریاضی (برنامه‌ریزی غیرخطی[۱]) [۳]، و ابرساختار[۲] [۵]. به‌وسیله‌ی روش گرافیکی می‌توان مقدار حداقل مصرف هیدروژن و نقطه‌ی گلوگاه (به منظور تعیین محل نصب خالص‌سازهای هیدروژن [۶]) را در شبکه مشخص کرد. از جمله اشکال‌های این روش در نظر نگرفتن محدودیت فشار و هزینه‌ها است که اغلب مربوط به کمپرسور می‌شود.

در روش ریاضی با توجه به این‌که در شبکه‌ی هیدروژن، اختلاط جریان‌ها با خلوص‌های متفاوت صورت می‌گیرد، مسألهٔ برنامه‌ریزی غیرخطی مطرح می‌شود. برای حل به‌روش ریاضی، تابع هدف به‌طور معمول هزینه یا شدت جریان خروجی واحد هیدروژن است [۷]. در این روش می‌توان بر اساس حداقل هزینه یا حداقل مصرف هیدروژن (فقط به‌وسیله‌ی لوله‌کشی بین فرایندها) شبکه را اصلاح و بهینه کرد.

این‌که آیا شبکه بهینه شده به‌وسیله‌ی روش ریاضی در پالایشگاه قابل اجراست یا خیر، یا در هنگام به‌وجود آمدن مشکل در یک واحد مصرف کننده و یا تولید کننده با توجه به این‌که تمام فرایندهای شبکه هیدروژن پالایشگاه به هم تنیده شده است (در روش ریاضی) پالایشگاه دچار بحران می‌شود، و سرانجام این‌که نمی‌توان به‌وسیله‌ی این روش تجهیزات جدید یا محل نصب آنها را در پالایشگاه مشخص کرد، از مشکل‌های روش ریاضی به شمار می‌روند. البته، می‌توان ورودی تجهیزات جدید و یا موجود را به‌عنوان پارامترهای بهینه سازی تعریف کرده و شبکه را حل کرد، ولی تعیین محل آنها به‌عهده‌ی طراح است.

با توجه به مسایل ذکر شده، برای جبران کمبود هیدروژن در پالایشگاه‌ها می‌توان به سه روش عمل کرد: ۱ـ افزایش تولید هیدروژن، ۲ـ کاهش ظرفیت مصرف کنندگان هیدروژن، و ۳ـ بازیافت هیدروژن از گازهای خروجی پالایشگاه (محتوی هیدروژن) که به سیستم سوخت ارسال می‌شوند. با توجه به تحقیقات انجام شده در مورد پالایشگاه‌های داخل کشور، که از فناوری قدیمی استفاده می‌کنند، روش سوم (بازیافت هیدروژن) بسیار مناسب بوده و قابل اجراست.

باید توجه داشت که در پالایشگاه‌های قدیمی، برای اعمال برنامه‌ریزی غیرخطی جهت بهینه کردن شبکه‌ی هیدروژن نیاز به احداث لوله‌کشی‌های جدید، تعویض برخی از لوله‌کشی‌های قدیمی، تغییر شرایط کمپرسورها و به‌دنبال آن اصلاح سیستم کنترلی مطرح می‌شود و با به‌هم‌تنیدن شبکه‌ی هیدروژن در پالایشگاه قدیمی، با کوچک‌ترین اشکال در هر واحد، مشکلی در واحد وابسته ایجاد خواهد شد. در نتیجه، کل شبکه در حالت بحرانی قرار می‌گیرد که ممکن است موجب از کار افتادن برخی از واحدها شود و ضررهای فراوانی به پالایشگاه تحمیل شود.

از این رو، بهینه کردن شبکه با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی برای رسیدن به سوددهی در پالایشگاه‌های قدیمی، معقول نیست. لازم به ذکر است که در پالایشگاه‌های جدید که در حال تأسیس یا طراحی هستند، نتیجه‌های حاصل از حل شبکه به‌کمک برنامه‌ریزی غیرخطی بسیار مفید و قابل توجه است. در این مقاله با توجه به شرایط کشور بیشتر به مسأله بازیافت هیدروژن و نتیجه‌های حاصل از آن پرداخته شده است.

یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از سیستم بازیافت هیدروژن برای جبران کمبود هیدروژن، ریسک کم آن است. بدین گونه که در صورت بروز مشکل در سیستم بازیافت، می‌توان فرایند بازیافت را به‌طور موقت برای اصلاح از شبکه خارج کرده و شبکه را به حالت قبل برگرداند، یعنی ظرفیت واحد هیدروژن به شرایط قبل (بدون سیستم بازیافت) برگردانده می‌شود.

در واقع سیستم بازیافت مانند یک سیستم جانبی عمل می‌کند که قابل خارج کردن از سرویس است و تغییرهای ساختاری در شبکه‌ی هیدروژن پالایشگاه که مدت‌های طولانی به‌راحتی به‌وسیله‌ی بهره‌بردار کنترل می‌شده لازم نخواهد بود.

در این مقاله، نرم‌افزاری ارایه شده که در محیط ویژوال‌بیسیک

(۱) Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)

(۲) Superstructure

www.SID.ir

Archive of SID

توسعه یافته است. در این نرم‌افزار می‌توان با وارد کردن اطلاعات مربوط به جریان‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده‌ی هیدروژن (شدت جریان، خلوص و فشار)، گلوگاه را در شبکه‌ی هیدروژن تعیین کرد. جریان‌های حاوی هیدروژن که به سیستم سوخت ارسال می‌شود و جریان‌هایی که نیاز به ارتقاء خلوص و فشار دارند، به‌وسیله‌ی کاربر به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

این نرم‌افزار، گزینه‌ها و الگوهای گوناگونی را برای اصلاح جریان به کاربر پیشنهاد کرده و فرایند انتخاب شده به‌وسیله‌ی کاربر را ارزش‌گذاری اقتصادی می‌کند.

به‌وسیله‌ی این نرم‌افزار می‌توان چندین فرایند را باهم مقایسه و ارزیابی کرده و با توجه به معیارهای مدیریتی، فرایند مورد نظر را انتخاب کرد. در مدیریت هیدروژن می‌توان برای مقایسه و ارزیابی فرایند (در حالت بهینه) نکاتی را در نظر گرفت که عبارت‌اند از: عملکرد اقتصادی، توسعه پایدار صنعتی، بهداشت محیط و ایمنی، روان بودن عملیات، انعطاف‌پذیری طرح و دسترسی آسان به تجهیزات مورد نیاز طرح [۸].

معرفی فرایندهای مرتبط با هیدروژن

در این قسمت به‌طور مختصر، واحدهای عمده‌ی پالایشگاهی که در آنها هیدروژن تولید، مصرف و تصفیه می‌شود، معرفی شده است. از منابع هیدروژن می‌توان جریان‌های گازی حاوی هیدروژن خروجی از واحدهای فرایندی مانند واحد تبدیل کاتالیستی (هدف اصلی این واحد افزایش عدد اکتان بنزین است)، فرایند کراکینگ کاتالیستی با بستر سیال و فرایند کراکینگ گرمایی را نام برد. از فرایندهای تولید هیدروژن می‌توان فرایند تبدیل و تغییر شکل با بخار[۱]، فرایند اکسایش ناقص‌غیرکاتالیستی[۲] و تجزیه آب به‌وسیله‌ی الکتریسیته را نام برد. البته مناسب‌ترین واحد تولید هیدروژن از نظر هزینه و آلودگی محیط زیست فرایند تبدیل و تغییر شکل با بخار است.

از عمده‌ترین مصرف کنندگان هیدروژن در پالایشگاه، می‌توان به فرایندهای هیدروتریتینگ (واحدهایی که در آنها تحت شرایط خاص و در مجاورت کاتالیست، آلاینده‌های موجود در فرایندهای نفتی از جمله گوگرد به‌وسیله‌ی هیدروژن تصفیه می‌شود)، هیدروکراکینگ (واحدهایی که در آنها تحت فشار زیاد در اتمسفر هیدروژن، برش‌های نفتی سنگین و کم ارزش به برش‌های سبک‌تر و با ارزش‌تر تبدیل می‌شود) و هیدروپروسسینگ (مشابه با فرایند هیدروکراکر بوده با این تفاوت که خوراک آن به‌وسیله‌ی باقی‌مانده تقطیر تأمین می‌شود و از نظر نوع کاتالیست و شرایط عملیاتی متفاوت است).

از سیستم‌های بازیافت هیدروژن می‌توان فرایند جذب با نوسانات فشار OR@' [۳]، فرایند غشایی[۴]، فرایند سرمازایی[۵] و فرایند تماس مایع ـ گاز را نام برد. متداول‌ترین سیستم بازیافت هیدروژن در پالایشگاه‌ها OR@ است. اساس این روش جذب سطحی بوده و جذب ناخالصی‌ها از جمله هیدروکربن‌ها و بازیافت هیدروژن در فشار زیاد و کاهش کاتالیست‌ها در فشار کم صورت می‌گیرد. معیارهای انتخاب تکنولوژی سیستم‌های بازیافت در جدول ۱ نشان داده شده است.

فناوری گلوگاهی

فناوری گلوگاهی هیدروژن، توسط *G`kk`kd* [۵] و *@kudr+ Snv kdq* [۴] بر اساس مشابه‌سازی فناوری پینچ حرارتی [۱۰] بنا نهاده شده است. در فناوری پینچ هیدروژن، چشمه و چاه هیدروژن با جریان‌های گرمایشی و سرمایشی در شبکه مبدل‌های حرارتی مشابه‌سازی شده است. برای تعیین حداقل مقدار هیدروژن مورد نیاز در شبکه (در تولید کنندگان هیدروژن که فراورده‌ی آنها قابل تغییر است مانند واحد تولید هیدروژن) می‌توان از این روش استفاده کرد. یکی از پارامترهایی که در این روش به‌دست می‌آید، گلوگاه[۶] شبکه هیدروژن است. که می‌توان به‌وسیله‌ی این پارامتر محل نصب سیستم‌های بازیافت را مشخص کرد [۶].

با تهیه نمودارهای مربوط به فناوری پینچ هیدروژن در شبکه‌ی توزیع هیدروژن، می‌توان مسایل شبکه را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این روش، مسأله قیدهای فشار و هزینه‌ها در نظر گرفته نشده است. با توجه به اهمیت فناوری پینچ در تصمیم گیری‌های اصلاح شبکه، در نرم‌افزار ارایه شده، محیطی برای فناوری پینچ طراحی شده است.

برای این منظور ابتدا باید منابع (چشمه‌ها[۷]) و مصرف کننده‌های

(۱) Steam reforming
(۲) Partial oxidation (POX)
(۳) Pressure swing adsorption
(۴) Membrane
(۵) Cryogenic
(۶) Pinch
(۷) Sources

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ـ مقایسه سیستم‌های بازیافت هیدروژن [۹].

مبنای مقایسه	جذب سطحی (@OR)	غشاء	سرمازایی
خلوص هیدروژن (درصد)	۹۹/۹+	۹۰–۹۸	۹۰–۹۶
میزان بازیافت هیدروژن (درصد)	۷۵–۹۲	۸۵–۹۵	۹۰–۹۸
فشار خوراک (a`qf)	۱۰–۴۰	۲۰–۱۶۰	۵–۷۵
حداقل درصد هیدروژن در خوراک	۴۰	۲۵	۱۰
فشار محصول هیدروژن	نزدیک به فشار خوراک	بسیار کمتر از فشار خوراک	نزدیک به فشار خوراک
ظرفیت واحد (j MI ^{2}.gq)	۱–۲۲۵	۱–۵۰	۱۰–۷۵+
نیاز به پیش خالص نمودن خوراک	خیر	به‌مقدار کم	حذف BN_1+G_1N
محصولات چندگانه	خیر	ممکن است	بله
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری	متوسط	کم‌ترین	بیشترین
با صرفه بودن در مقیاس بزرگ	مناسب	به‌صورت واحدهای قابل تکثیر است	خوب

(چاه‌ها[۱]) هیدروژن را در سیستم توزیع هیدروژن شناسایی و تعریف کرد. چشمه، جریانی است که هیدروژن را در دسترس شبکه قرار می‌دهد و چاه عبارت است از جریانی که آن را از شبکه می‌گیرد. در شکل‌های ۱ و ۲ نحوه‌ی مشخص کردن چشمه‌ها و چاه‌ها و تعیین نقطه‌ی گلوگاه نمایش داده شده است.

اقتصاد تجهیزات فرایند بازیافت

هیدروژن موجود در گازهای خروجی از پالایشگاه بیشتر به‌وسیله‌ی سیستم‌های بازیافت از جمله غشاء و @OR بازیابی می‌شود. رابطه‌های مشخص و عام برای برآورد هزینه‌ی این فرایندها وجود ندارد. در اینجا هزینه این فرایندها با توجه به طراحی پایه آنها و قیمت و عملکرد و داده‌های موجود در مقاله‌ها به‌دست آمده است. هزینه بازیافت هیدروژن C_H، عبارتست از [۱۱]:

$$C_H < C_F + C_W + C_R \qquad (۱)$$

C_H : هزینه بازیافت هیدروژن
C_F : ارزش سوخت هیدروژن بازیافتی
C_W : هزینه عملیاتی کمپرسور برای تأمین فشار فرایند بازیافت
C_R : هزینه عملیاتی فرایند بازیافت

C_F به این معناست که هیدروژنی که بازیافت می‌شود و به سیستم سوخت نمی‌رود، به‌جای آن باید هزینه‌ای برای سوخت جای‌گزین شود که با C_F نشان داده شده است. این مقدار بستگی به موازنه‌ی سوخت پالایشگاه دارد و از صفر تا معادل قیمت گاز طبیعی متغیر است. در صورتی که پالایشگاه دارای سوخت اضافی باشد، C_F برابر صفر است و در صورتی که با کمبود سوخت مواجه باشد، C_F، برابر ارزش و قیمت گاز طبیعی است. با توجه به این مسأله، نرم‌افزار ایجاد شده طوری طراحی شده است که قابلیت دریافت قیمت سوخت با توجه به شرایط حاکم در پالایشگاه را از کاربر داراست. برای تعیین هزینه‌های مربوط به فرایند بازیافت، محاسبه‌ی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی مربوط به کمپرسور، فرایند غشاء [۱۱ و۱۲]، @OR [۵ ، ۱۱–۱۳]، ارزش سوخت [۵ و ۱۴] و لوله‌کشی [۵ و۱۳] لازم‌است. در مورد کمپرسور، یکی از عامل‌های تأثیر گذار در محاسبه توان و هزینه‌ها، کمیت چگالی است که در بیشتر محاسبه‌ها، به‌علت راه‌حل طولانی از آن صرف نظر می‌شده، اما در نرم‌افزار ایجاد شده، به‌کمک معادله‌های حالت این مشکل رفع شده است. با در نظر گرفتن این‌گونه مسایل می‌توان به پاسخ دقیق‌تر دست یافت. از آنجا که اساس کار نرم‌افزار، تصمیم‌گیری مرحله به مرحله است، برای تعیین هزینه‌ها و شرایط عملیاتی با توجه به شرایط موجود در پالایشگاه و آینده‌نگری در مورد طراحی، نرم‌افزار اطلاعات مورد نیاز را مرحله به مرحله از کاربر دریافت می‌کند. از این راه می‌توان به طرح‌های عملی‌تری در پالایشگاه‌های داخل کشور دست یافت.

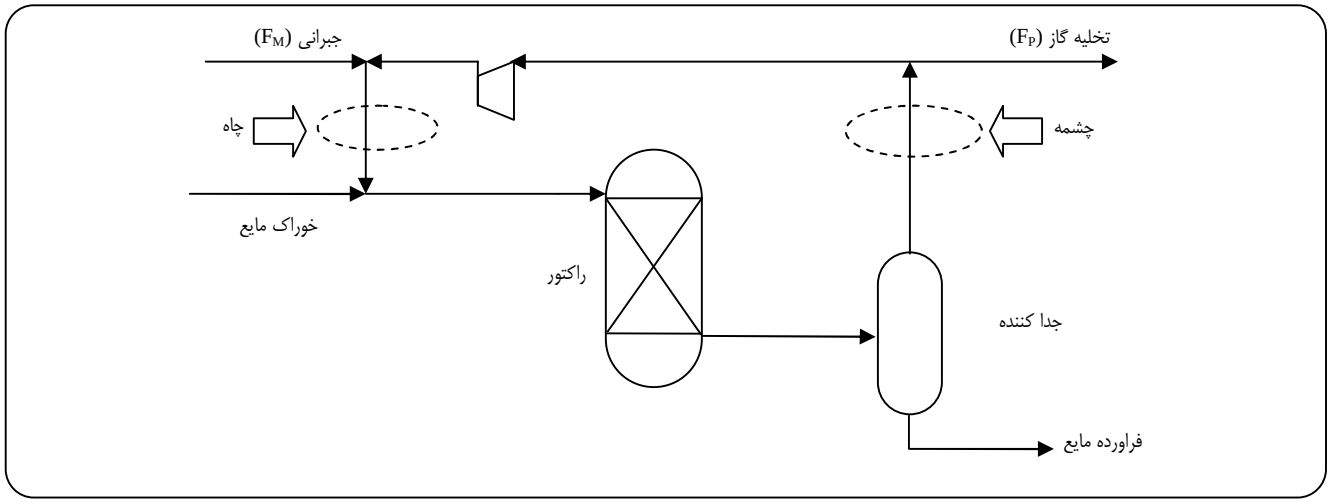
نحوه عملکرد نرم‌افزار

با توجه به اهمیت و ضرورت وجود هیدروژن کافی در پالایشگاه، راه‌حل‌هایی عملی برای توزیع مناسب هیدروژن در

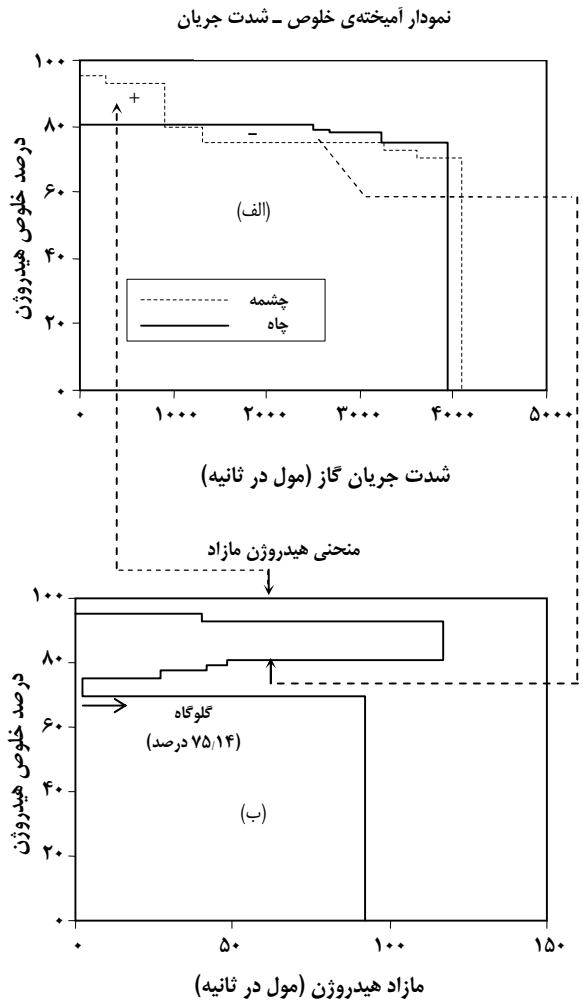
(۱) Sinks

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۱ـ شماتیک ساده از یک مصرف کننده هیدروژن که در آن محل چشمه و چاه مشخص شده است [۵].



شکل۲ـ الف) نمودار خلوص ـ شدت جریان و ب) نمودار هیدروژن مازاد وتعیین نقطه‌ی گلوگاه.

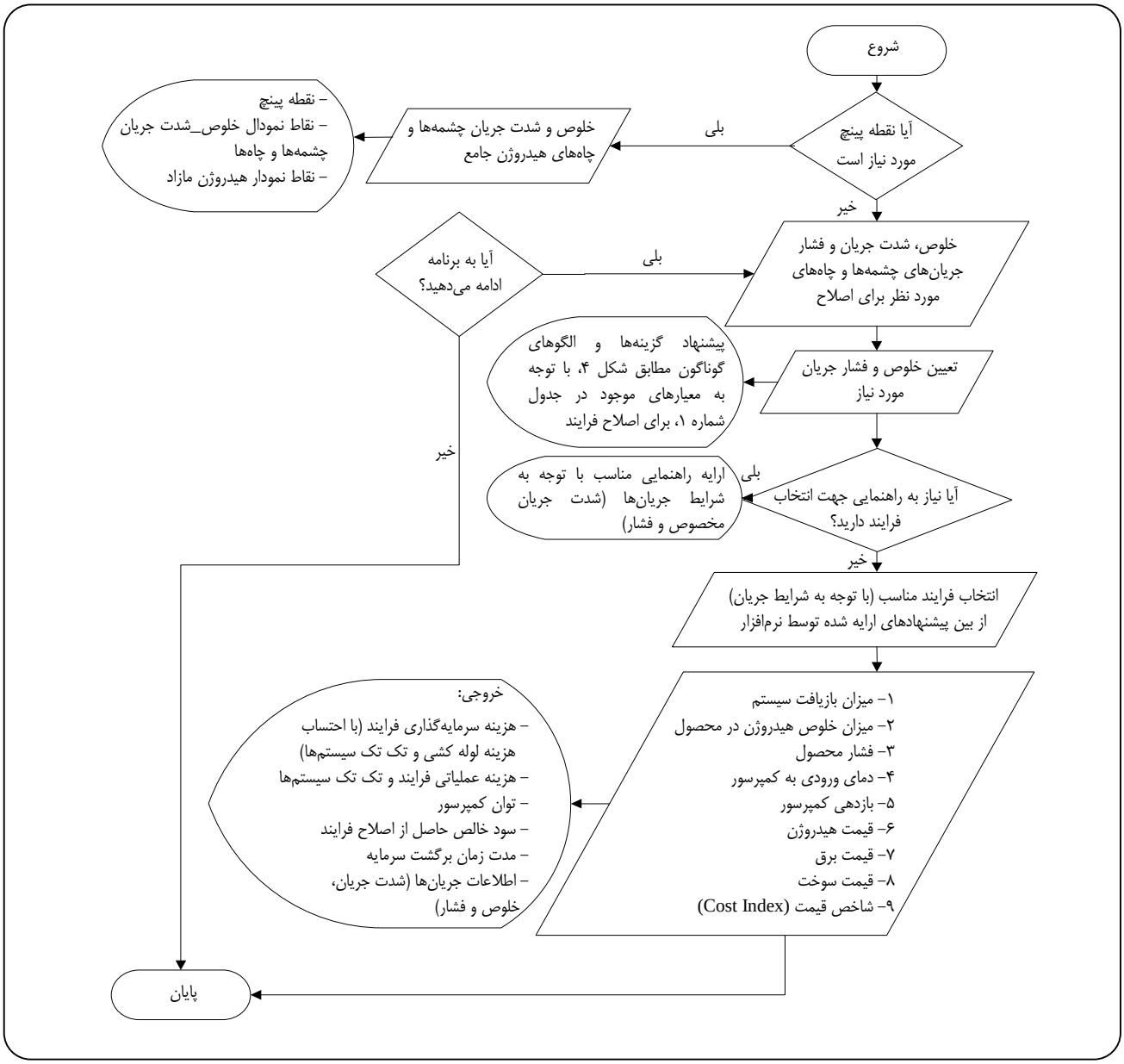
شبکه‌ی هیدروژن پالایشگاه مورد نیاز است. مدیریت هیدروژن در یک مجتمع صنعتی مانند پالایشگاه نفت، مستلزم شناخت منابع بالقوه تولید و مصرف کننده‌های هیدروژن در آن مجتمع و انتخاب بهترین شیوه و الگوی مرتبط کردن منابع و مصارف هیدروژن است. با توجه به تعدد الگوهای ممکن ارتباط در مقیاس صنعتی، و نیاز به برآوردهای اقتصادی برای انتخاب بهترین الگو، وجود یک نرم‌افزار که محاسبه‌های مربوط و انتخاب را بتوان به‌کمک آن انجام داد ضروری است. چنین نرم‌افزاری، تاکنون در منابع علمی بین‌المللی معرفی نشده است.

در این مقاله برای حل شبکه، یک نرم‌افزار که در محیط Visual Basic ۶/۰ ایجاد شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در این نرم‌افزار از روش گرافیکی برای مشخص کردن نقطه‌ی پینچ به منظور مشخص کردن محل نصب سیستم بازیافت با در نظر گرفتن محدودیت‌های فرایندی استفاده شده است. برای اصلاح جریان‌های مورد نظر، وجود سیستم بازیافت و گاهی کمپرسور (بسته به فشار موجود) لازم است. انتخاب نوع سیستم بازیافت و مسیر فرایند با توجه به شرایط خوراک و فراورده‌ی مورد نظر صورت می‌گیرد.

برای تعیین الگوی مناسب فرایندی (شکل ۴) برای بازیافت هیدروژن، نرم‌افزار با توجه به محدودیت‌ها، ازجمله شرایط خوراک و فراورده، فرایندهای گوناگون را پیشنهاد می‌کند و بهترین گزینه‌ها با توجه به شرایط موجود پالایشگاه و تجربه کاربر، به‌وسیله‌ی کاربر انتخاب می‌شود. برای تعیین گزینه‌ی مناسب یکی از معیارهای مهم، هزینه‌های فرایند بازیافت است.

www.SID.ir

Archive of SID



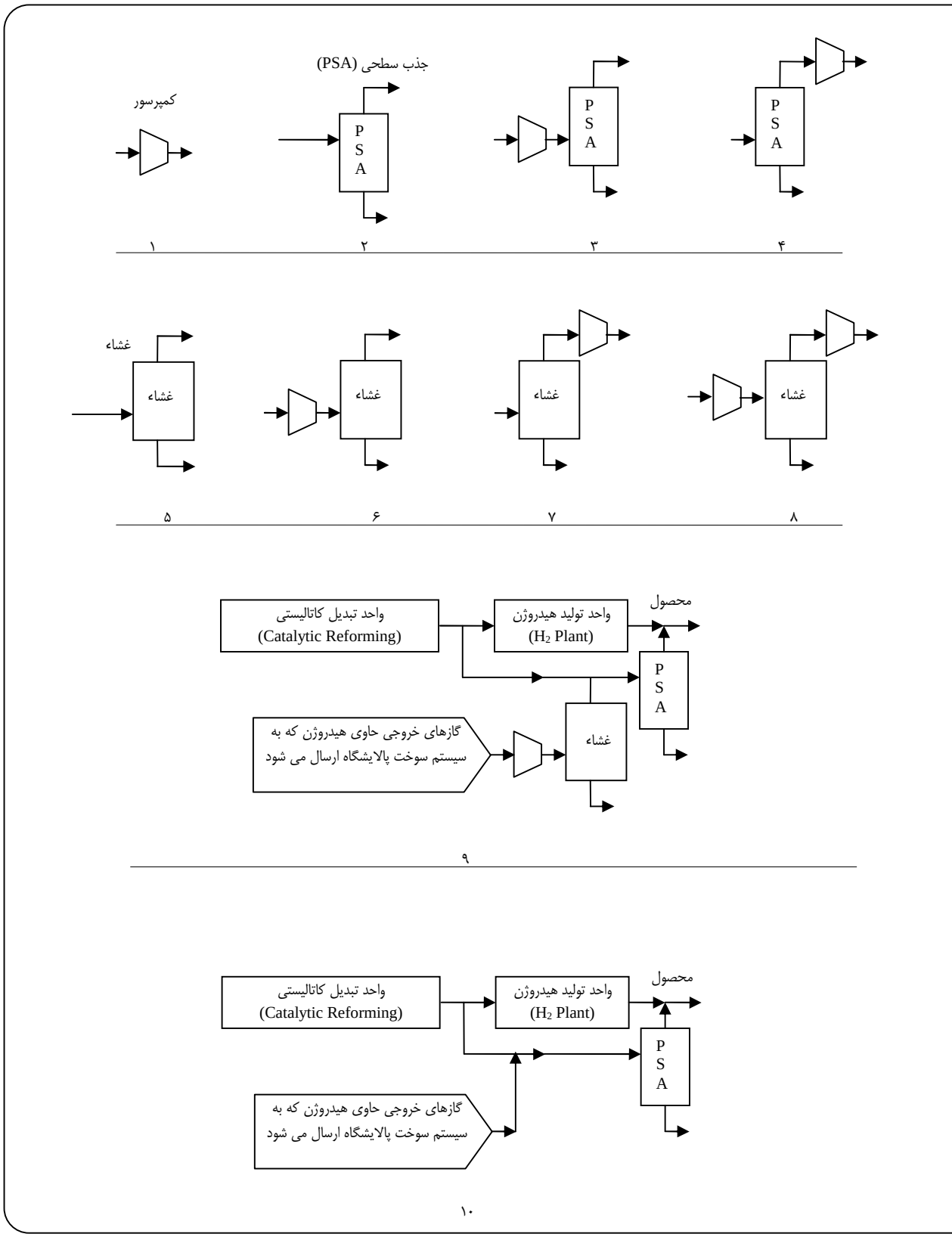
شکل۳ـ شمای نرم‌افزار مدیریت هیدروژن.

برای این منظور باید هزینه‌های فرایندهای متفاوت را محاسبه و باهم ارزیابی نموده و بهترین گزینه را تعیین کرد. به‌وسیله‌ی نرم‌افزار ایجاد شده می‌توان در مدت زمان کوتاهی هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه عملیاتی، سود خالص و مدت زمان برگشت سرمایه‌ی مربوط به فرایند انتخاب شده برای اصلاح جریان را محاسبه کرد.

برای کار با این نرم‌افزار، دانستن قیمت‌های هیدروژن، سوخت و برق، شاخص قیمت، میزان بازیافت سیستم‌های بازیافت کننده، بازده کمپرسور و دمای جریان ورودی به کمپرسور لازم است. بدین منظور در نرم‌افزار، پیش فرض‌هایی که مطابق با اطلاعات جدید در مورد قیمت‌ها و میزان بازیافت و موردهای مهم دیگر بوده و به‌وسیله‌ی کاربر قابل تغییر است، لحاظ شده است و این امکان را به کاربر می‌دهد که با انتخاب فرایندهای متفاوت و تغییر در اطلاعات سیستم‌های موجود در فرایند انتخاب شده، موقعیت‌های متفاوت را در مدت زمان کوتاه مقایسه و ارزیابی کند. رابطه‌های موجود برای هزینه‌های مربوط به تجهیزات که در

www.SID.ir

Archive of SID



شکل٤ـ الگوهای اصلاح جریان‌های حاوی هیدروژن موجود در نرم‌افزار.

www.SID.ir

Archive of SID

نرم افزار لحاظ شده است، به‌طور کامل دقیق نیستند (رابطه‌ها از مقاله‌های معتبر برای فرایند غشاء [۱۱ و۱۲]، @OR [۵ و ۱۱-۱۳]، ارزش سوخت [۵ و ۱۴] و لوله کشی [۵ و۱۳] تهیه شده است) و به‌طور قطع دارای درصدی خطا خواهند بود. برای کاهش خطای مربوط به هزینه‌ها، توصیه می‌شود به محدودیت‌های موجود در رابطه‌های مربوط بـه هزینه‌هـا کـه در نـرم‌افزار لحاظ شـده توجه شود.

این نرم‌افزار انعطاف‌پذیر بوده و در صورت داشتن اطلاعات دقیق‌تر نسبت به رابطه‌های هزینه‌ها با توجه به این‌که کُد آن، در دسترس است می توان آن‌را به روز کرد. نحوه‌ی عملکرد نرم-افزار مورد بحث، در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این نرم‌افزار، تمام الگوهای ممکن برای اصلاح جریان حاوی هیدروژن (بازیافت هیدروژن) در نظر گرفته شده است که در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. به‌طور مثال، در صورتی‌که جریان مورد مطالعه، فقط نیاز به ارتقای فشار داشته باشد، فرایند شماره ۱ از شکل ۴ مناسب است. معیار انتخاب هر یک از فرایندهای غشاء و@OR، در جدول ۱ نشان داده شده است.

الگوهای شماره ۹ و ۱۰ در شکل ۴، با توجه به فرایندهای پالایشگاه‌های قدیمی (مانند پالایشگاه تهران [۱۵] و تبریز) انتخاب و در نرم‌افزار لحاظ شده است. در این پالایشگاه‌ها به‌علت نوع طراحی، با تغییر خلوص هیدروژن و شدت جریان گاز خروجی واحد تبدیل کاتالیستی که به‌عنوان خوراک به‌همراه گاز طبیعی به واحـد تولیـد هیدروژن ارسال می‌شود، فراورده‌ی خروجی از واحـد تولید هیدروژن تغییر می‌کند. در صورتی که هیدروژن بازیافتی (که به سیستم سوخت فرستاده می‌شده) به شبکه‌ی هیدروژن تزریق شود، ظرفیت واحد تولید هیدروژن کاهش خواهد یافت.

این امر باعث کاهش خوراک واحد تولید هیدروژن می شود و در نتیجه جریان حاوی هیدروژن مازاد بر خوراک واحد تولید هیدروژن خروجی از واحد تبدیل‌کاتالیستی نیز بازیافت شده و به شبکه تزریق می شود. مزیت این ساختار این است که در صورت بروز مشکل و تعمیر سیستم بازیافت، می توان شبکه را به‌طور موقت یا طولانی به حالت قبل برگرداند.

مثال ۱

در یک پالایشگاه فرضی، دو جریان با نام‌های GCS Nee, F`r(گازهای خروجی از واحد هیدروتریتر) و GO @l hmd (گاز خروجی از واحد آمین) با شرایط ارایه شده در جـدول ۲ و شکل ۵

جدول۲ـ اطلاعات جریان مثال۱.

جریان	شدت جریان MMscfd	خلوص هیدروژن Y_{H_2} (درصد H_2)	فشار (psia)
HP Amine	۷	۳۰	۴۰۰
HDT Off-Gas	۵	۵۰	۸۰۰

به سیستم سوخت ارسال می‌شوند (L L rbec نمایان‌گر یک میلیون فوت مکعب استاندارد در روز است).

این پالایشگاه دارای واحد تولید هیدروژن است که خوراک آن گاز طبیعی و جریان حاوی هیدروژن با خلوص ۷۲ درصد است که به‌وسیله‌ی واحد تبدیل کاتالیستی تأمین می‌شود. این مثال مطابق با شرایط پالایشگاه‌های داخل کشور مانند پالایشگاه تهران که به‌وسیله‌ی شرکت آمریکایی TNO طراحی شده [۱۵] و یا پالایشگاه تبریز، ارایه شده است.

در این پالایشگاه‌ها، خوراک واحدهای تولید هیدروژن، گاز طبیعی و گاز خروجیِ حاوی هیدروژنِ واحد تبدیل کاتالیستی است. در صورتی که این پالایشگاه نیاز به جریان حاوی هیدروژن با خلوص ۹۹ درصد و فشار orh ۲۰۰ (برای تغذیه واحد هیدروکراکر) داشته باشد، نرم‌افزار با در نظر گرفتن معیارهای موجود در جدول ۱ ، شرایط الگوی شماره‌ی ۹ از شکل ۴ را به‌عنوان بهترین گزینه پیشنهاد می‌کند. تخمین هزینه‌ها به‌کمک نرم‌افزار انجام شده که نتیجه‌های آن در شکل ۶ دیده می‌شود.

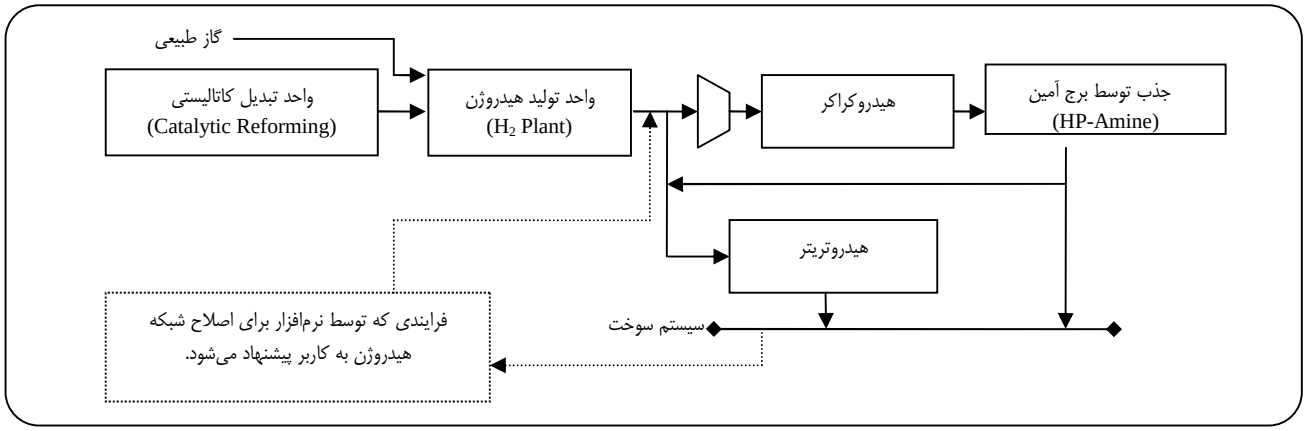
مثال ۲

در یک پالایشگاه فرضی، جریانی حاوی ۵۰ درصد هیدروژن با شدت جریان L L rbec ۱۰ و فشار orh ۴۰۰ به سیستم سوخت ارسال می‌شود. برای اصلاح جریان ارسالی به سیستم سوخت برای کاهش تولید هیدروژن در واحد تولید هیدروژن سیستم بازیافت مـورد نیـاز است. درصورتـی کـه خروجی از واحـد تولیـد هیدروژن (و یا یک مصرف کننده نیازمند به هیدروژن) با خلوص ۹۵ درصد هیدروژن و فشار orh ۳۰۰ باشد، نرم‌افزار فرایندهای شماره‌ی ۲ و ۶ از شکل ۴ را پیشنهاد می‌کند.

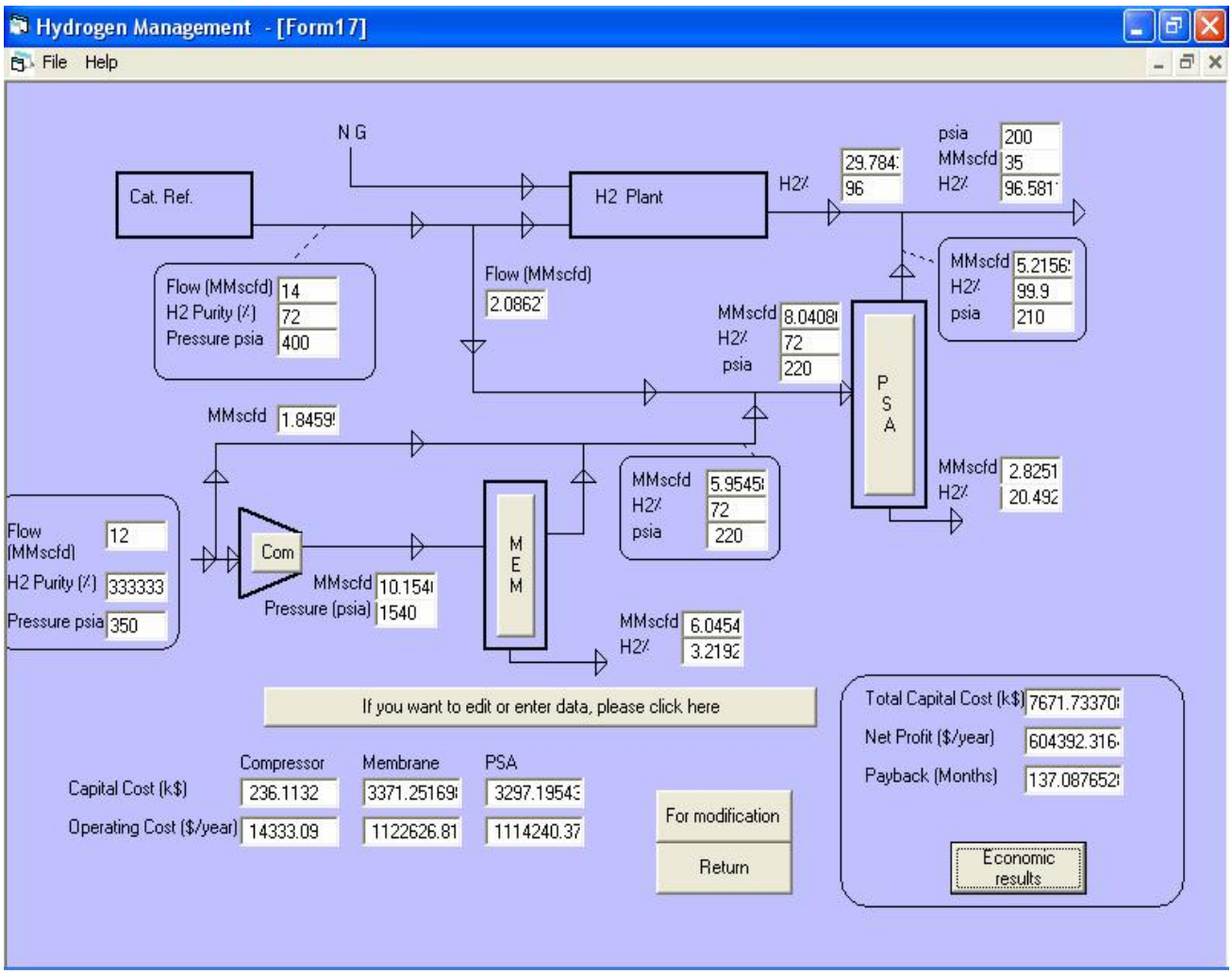
برای انتخاب گزینه‌ی مورد نظر (با توجه به محدودیت‌های تصفیه‌کنندگان که در نرم‌افزار لحاظ شده است) مسأله‌ی باصرفه و عملی بودن طرح را باید بررسی کرد. مسأله صرفه اقتصادی طرح را می‌توان در مدت زمان کوتاه (به‌وسیله‌ی نرم افزار) با مقایسه هزینه‌های فرایندهـای گوناگـون تخمین زد. در این مثال، قیمـت

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۵ـ شمای شبکه‌ی هیدروژن مثال ۱.



شکل ٦ـ خروجی نرم‌افزار مربوط به مثال ۱.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ـ خروجی نرم افزار با توجه به اطلاعات مربوط به مثال ۲.

زمان برگشت سرمایه (ماه)	سود خالص ($/yr)	هزینه‌ی عملیاتی ($/yr)	کل هزینه‌ی سرمایه گذاری (k$)	
۸/۲	۲۳۲۵۵۴۳	۴۱۱۹۶۵/۸	۱۵۹۰/۵۷	فرایند شماره‌ی (۶) از شکل (۴)
۳۸/۶	۱۳۱۷۵۴۲	۱۲۸۹۳۵۱	۴۲۳۹/۳	فرایند شماره‌ی (۲) از شکل (۴)
۱۹/۵	۲۶۰۶۸۹۴	۰	۴۲۳۹/۳	فرایند شماره‌ی (۲) از شکل (۴)، بدون در نظر گرفتن هزینه عملیاتی @OR

هیـدروژن برابر بـا ۲۰۰۰/MMscf دلار، قیمت سوخت برابر بـا ۵۰۰ /MMscf دلار، قیمت برق ۰٫۰۳/kWh دلار، شاخص قیمت برای غشاء با توجه به این که در سال ۱۹۹۴ میلادی [۱۲] قیمت‌گـذاری شـده بـرابـر است بـا (۱٫۱۸۶=۱۷۸٫۵/۹۹۳٫۴, $M\&S_{۲۰۰۴}/M\&S_{۱۹۹۴}=۱$) ، شاخص قیمت برای قیمت @OR با توجه به این که در سال ۲۰۰۱ [۵] قیمت گذاری شده برابر است با (۱٫۰۷۷۳=۱۷۸٫۵/۱۰۹۳٫۲, $M\&S_{۲۰۰۴}/M\&S_{۲۰۰۱}=۱$)، هزینه‌ی لوله کشی برابر ۱۰ درصد کل سرمایه‌گذاری و بازدهی کمپرسور ۰٫۸۵، بازدهی سیستم غشاء ۹۵ درصد و بازدهی سیستم @OR ۹۰ درصد قرار داده شده است.

به‌کمک نرم‌افزار ایجاد شده در این مقاله و با وارد کردن اطلاعات لازم (که در مثال ۲ ذکر شد) نتیجه‌های نشان داده شده در جدول ۳ به‌دست می‌آید. متأسفانه اطلاعات موجود در مورد هزینه عملیاتی @OR [۱۱و۱۲] معقول به نظر نمی‌رسند. با صرف‌نظر کردن از هزینه عملیاتی مربوط به @OR می‌توان به نتیجه‌های معقول‌تری رسید که در جدول ۳ نشان داده شده است.

مثال ۳

در یک پالایشگاه فرضی، شبکه‌ی هیدروژن، مطابق شکل ۷ وجود دارد. شبکه‌ی هیدروژن موجود، حاوی یک واحد تولید هیدروژن و دو واحد مصرف‌کننده هیدروژن)A+@' است. هر یک از این دو واحد مصرف‌کننده نیز دارای یک ورودی خوراک و یک جریان برگشتی هیدروژن است. هیدروژن تولیدی در واحد هیدروژن ۲۰۰ L L rbec است.

برای اصلاح شبکه به دو روش عمل شده است. در روش اول، شبکه‌ی هیدروژن، به‌کمک برنامه‌ریزی غیرخطی اصلاح شده و نتیجه‌های به‌دست آمده در شکل ۸ نشان داده شده است. در روش دوم، شبکه هیدروژن به‌کمک نرم‌افزار با به‌کارگیری سیستم بازیافت اصلاح شده و نتیجه‌های حاصل در شکل ۹ نشان داده شده است. نتیجه‌های اقتصادی دو روش نیز در جدول ۴ ارایه شده است که برتری راه‌حل دوم را نشان می‌دهد.

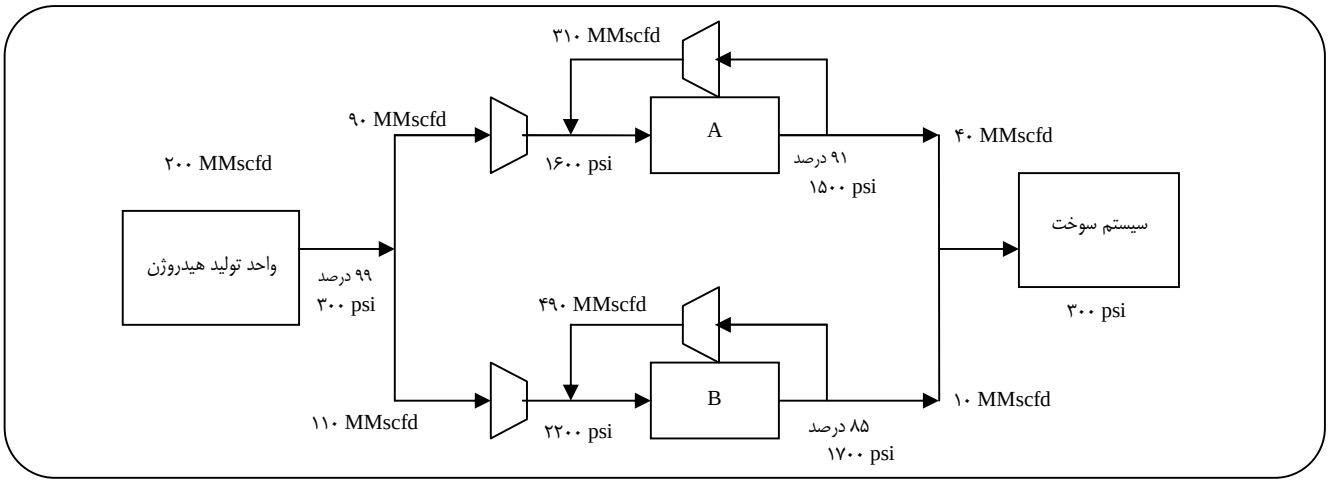
نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به بررسی‌های به‌عمل آمده در مورد شبکه‌های هیدروژن پالایشگاه‌های داخل کشور، روش مناسب برای بهینه استفاده کردن از هیدروژن، نصب سیستم‌های بازیافت است. بنابراین، محاسبه هزینه‌های نصب واحدهای بازیافت هیدروژن لازم است. در این مقاله، الگوهای ممکن و قابل اجرا و هزینه‌های مربوط به سیستم‌های بازیافت، مورد بررسی قرارگرفته است. با توجه به این‌که محاسبه‌های مربوط به هزینه‌ها و انتخاب مناسب از بین الگوهای ممکن، با در نظر گرفتن تعدد معیارهای انتخاب فرایند بازیافت، بسیار طولانی بوده و امکان اشتباه کردن در محاسبه‌ها نیز وجود دارد، به این منظور برای رسیدن به نتیجه-های الگوهای انتخابی، وجود یک نرم‌افزار که محاسبه‌ها را بتوان به‌کمک آن انجام داد، ضروری است.

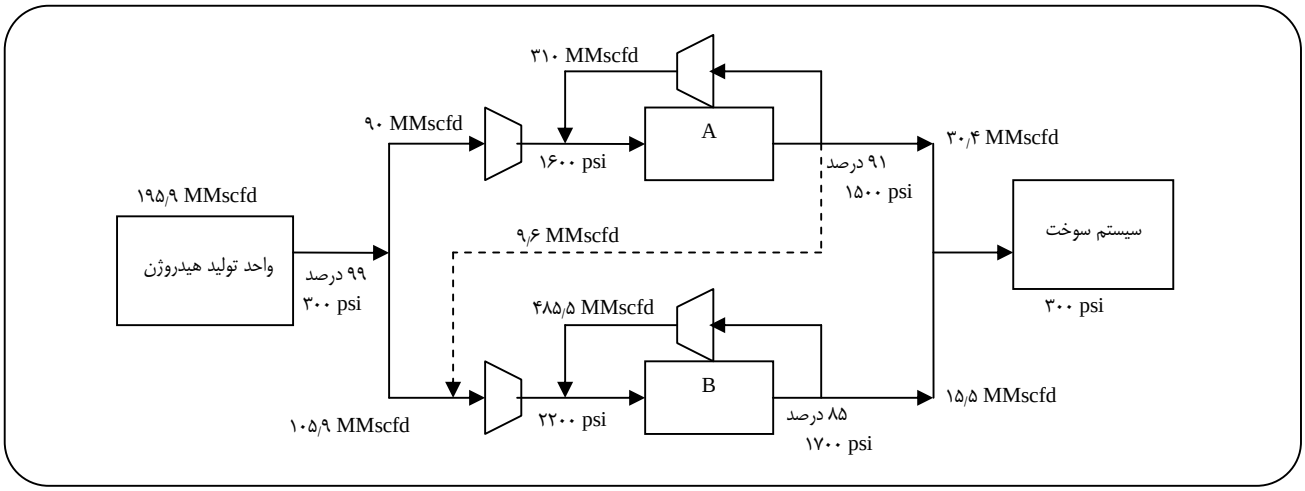
با داشتن اطلاعات دقیق از هزینه‌ها، جریان‌ها (از جمله شدت جریان، خلوص و فشار) و مسیر جریان‌ها می‌توان فرایند مناسبی برای حل شبکه به‌وسیله‌ی نرم‌افزار انتخاب کرد. بعد از مشخص شدن نوع فرایند که توسط کاربر از میان گزینه‌ها و الگوهای پیشنهادی ارایه شده به‌وسیله‌ی نرم‌افزار انجام می‌گیرد، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، سود خالص و زمان برگشت سرمایه و پارامترهای مهم دیگر به‌وسیله‌ی نرم‌افزار تعیین می‌شود. نرم‌افزار طوری طراحی شده که حل شبکه به‌صورت تصمیم گیری مرحله به مرحله انجام می‌گیرد و در هر مرحله توسط کاربر تصمیم گیری می‌شود. در نتیجه، با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری مناسب می‌توان سوددهـی پالایشگاه را افـزایش داد. کاهش ظـرفیت واحـد تولیـد

www.SID.ir

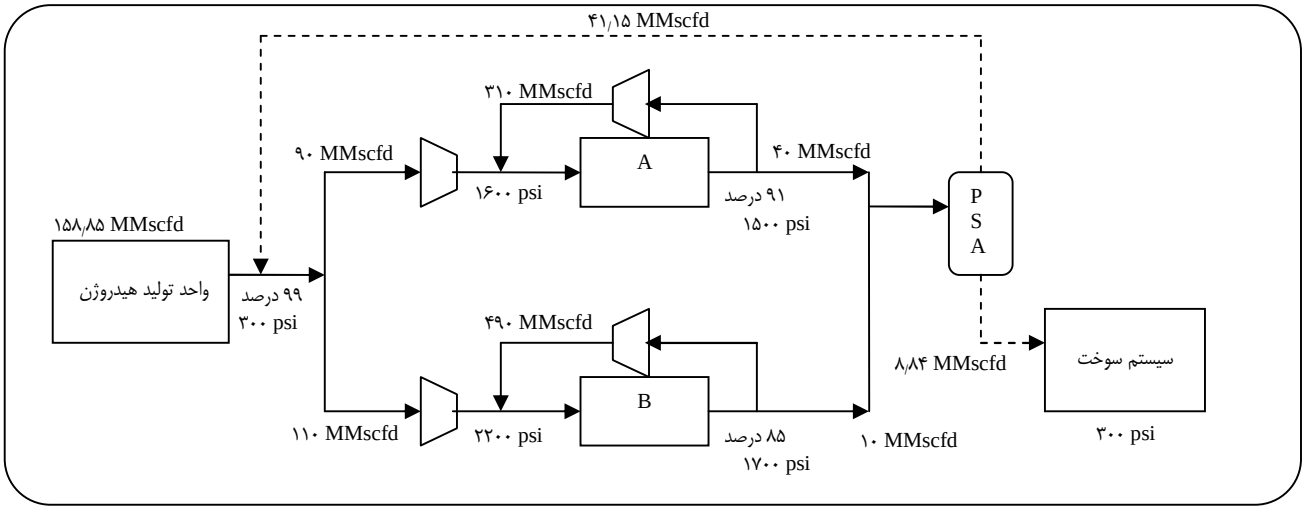
Archive of SID



شکل ۷ ـ شبکه‌ی هیدروژن مورد مطالعه [۵].



شکل ۸ ـ شبکه‌ی هیدروژن اصلاح شده به‌کمک برنامه ریزی غیرخطی [۵].



شکل ۹ـ شبکه‌ی هیدروژن اصلاح شده به‌کمک نرم افزار ارایه شده در مقاله.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤ ـ نتیجه‌های اقتصادی مربوط به مثال ۳.

سود خالص ($/yr)	کل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (k$)	
۲۹۹۳۰۰۰	برابر هزینه لوله‌کشی	اصلاح شده به‌کمک برنامه‌ریزی غیرخطی
۱۶۹۲۰۳۲۶	۱۸۴۴۴	اصلاح شده به‌کمک نرم‌افزار

هیدروژن منجر به کاهش احتراق در واحدهای تولید هیدروژن شده و نتیجه‌های مثبت زیست محیطی نیز بر این کار مترتب است. با توجه به این‌که در این نرم‌افزار، می‌توان قیمت‌ها را مطابق شرایط زمان و شرایط حاکم بر پالایشگاه (مانند در دسترس بودن سوخت با قیمت مناسب) تعویض کرد، امکان یافتن گزینه‌ی مناسب از نظر اقتصادی وجود دارد.

تاریخ دریافت: ۸٤/ ۱۰/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/ ۱/۲۸

مراجع

[1] Stoll, R. E. and von Linde, F., "Hydrogen-What Are the Costs?", Hydrocarbon Processing, pp. 44-46, (2000).

[۲] ربیعی، زهرا؛ بازیافت و بهینه سازی هیدروژن در صنایع فرایندی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۲).

[۳] کاشی، اسلام؛ بهینه سازی مصرف هیدروژن در پالایشگاه‌ها به روش انتگراسیون فرایندها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی، (۱۳۸۳).

[4] Alves, Joao J. and Towler, Gavin. P., "Analysis of Refinery Hydrogen Distribution Systems", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41** (23), p. 5759 (2002).

[5] Hallale, Nick and Liu, Fang, "Refinery Hydrogen Management for Clean Fuels Production", Advances in Environmental Research, **6** (1), pp. 81-98, (2001).

[6] Hallale, Nick, Moore, Ian, and Vauk, Dennis, "Hydrogen: Liability or Asset?" CEP, pp. 66-75, (2002).

[۷] شهرکی، فرهاد؛ کاشی، اسلام: رشتچیان، داود؛ توزیع هیدروژن در پالایشگاه‌ها به کمک برنامه ریزی غیرخطی، نهمین کنگرهٔ ملی مهندسی شیمی ایران، تهران،۳–۵ آذر ماه (۱۳۸۳).

[8] Douglas, James M., "Conceptual Design of Chemical Processes", McGraw-Hill, (1988).

[9] Patel, Nitin M., Baade, William F., Fong, Leong Wah and Khurana, Vinay, "Creating Value through Hydrogen Management", PTQ, pp. 35-45, (2003).

[10] Linnhoff, Bodo, Townsend, D. W. and Boland, D., "User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy", *IChemE*, Rugby, UK, (1982).

[11] Towler, Gavin P., Mann, Reg., Serriere, Arnauld J-L. and Gabaude, Cecile M. D., "Refinery Hydrogen Management: Cost Analysis of Chemically-Integrated Facilities", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35** (7), p. 2378, (1996).

[12] Ratan, S., "Hydrogen Management System", KTI, Newsletter, Fall, 24-32, (1994).

[13] Peters, Max S. and Timmerhaus, Klaus. D., "Plant Design & Economics for Chemical

www.SID.ir

Archive of SID

Engineers", Fourth Edition, McGraw-Hill, (1990).

[14] Boyce, Clay A., Crews, M. Andrew and Ritter, Robin, "Time for a New Hydrogen Plant", Hydrocarbon Engineering, Feb., pp. 67-70, (2004).

[۱۵] شرکت پالایش نفت تهران، امور بررسی و برآورد طرح‌ها، گزارش آشنایی با پالایشگاه تهران، (۱۳۶۹).

www.SID.ir