



Investigating the Production Management and Optimization of Hydrogen Gas

Parvaneh Naroui Mohammad¹, Mir Mohammad Khalilipour^{2*}, Farhad Shahraki³, Mohammad Reza Sardashti Birjandi², Mahmood Jamili⁴

¹ M.Sc Student, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

³ Professor Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

⁴ Fuel refining and combustion engineer, Abadan oil refining company

Received: 2 Nov 2022 Accepted: 8 Jan 2023

Abstract

Heavy crude oil cracking units (hydrocracker) and crude oil desulfurization (hydrotreater) are the two most important hydrogen-consuming units in the refinery. Affected parameters such as hydrogen consuming units and environmental rules increase the necessity of optimization the hydrogen network in the refinery. In this article, we intend to obtain the optimal hydrogen network structure in Abadan Refinery using the superstructure method. The superstructure method includes a mathematical model that is able to provide the hydrogen necessity by consumers and design the optimal hydrogen network with the lowest cost. The results of optimization show the hydrogen from RPS CRU and COLD-SEP CRU streams, which were sent to the fuel system before optimization can be recovered and reused in the network. RPS CRU and COLD-SEP CRU flow rates of 5000 and 3600 (kg/h), respectively, with relatively high purity of hydrogen, can be sent to the PSA purifier for the recovery. In addition, regarding to the recovery there is no necessity to utilize the hydrogen production unit (U-57) and it will be taken out of service, and as a result, the purchase cost of the hydrogen production unit will be removed from the network.

Keyword: Refinery, Optimization, Hydrogen Network, Hydrogen Recovery, Pressure Swing Adsorption (PSA)

* a.khalilipour@eng.usb.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Naroui Mohammad, P., Khalilipour, M.M., Shahraki, F., Sardashti Birjandi, M.R., Jamili, M., "Investigating the Production Management and Optimization of Hydrogen Gas in Abadan Refinery", Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 80, pp. 19-38, In Persian, (2023).

بررسی مدیریت تولید و بهینه سازی گاز هیدروژن

پروانه نارویی محمد^۱، میر محمد خلیلی پور^{۲*}، فرهاد شهرکی^۳، محمد رضا سردشتی بیرجندی^۴، محمود جمیلی^۴
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۳ استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۴ مهندس پالایش سوخت و احتراق، شرکت پالایش نفت آبادان، آبادان، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

چکیده

واحدهای شکست نفت خام سنگین (هیدروکراکر) و گوگردزایی از نفت خام (هیدروتریتر) دو واحد مهم مصرف کننده هیدروژن در پالایشگاه هستند. عواملی تاثیر گذاری همچون واحدهای مصرف کننده هیدروژن و قوانین زیست محیطی، نیاز به بهینه سازی شبکه هیدروژن در پالایشگاه را افزایش می دهد. در این مقاله قصد داریم با استفاده از روش ابر ساختار بهینه ترین ساختار شبکه هیدروژن در پالایشگاه آبادان را به دست آوریم. روش ابر ساختار شامل مدلی ریاضی که قادر به تأمین هیدروژن مورد نیاز مصرف کننده ها و نیز طراحی شبکه بهینه ی هیدروژن با کمترین هزینه می باشد. نتایج بعد از بهینه سازی، استفاده مجدد از هیدروژن دو جریان RPS CRU و COLD-SEP CRU که قبل از بهینه سازی به سیستم سوخت ارسال می گردید، را نشان می دهد. مقدار جریان RPS CRU و COLD-SEP CRU به ترتیب ۵۰۰۰ و ۳۶۰۰ (kg/h) با خلوص نسبتا بالا از هیدروژن، برای بازیابی به تصفیه کننده PSA فرستاده می شود. همچنین بنا بر نتایج شبیه سازی نیازی به واحد تولید هیدروژن (U-57) نبوده و هزینه خرید واحد تولید هیدروژن از شبکه حذف می گردد.

کلمات کلیدی: پالایشگاه، بهینه سازی، شبکه هیدروژن، بازیابی هیدروژن، تصفیه کننده PSA

* a.khalilipour@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

مجموعه‌ای از عوامل مختلف از جمله محدودیت منابع فسیلی، تأثیرات منفی زیست محیطی، بهره‌گیری از منابع هیدروکربنی، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، منازعات سیاسی و تأثیرات آن بر روی ارائه انرژی پایدار از جمله دلایلی هستند که بسیاری از سیاستمداران و متخصصین مباحث انرژی و محیط زیست را در حرکت به سوی ایجاد ساختاری نوین مبتنی بر امنیت ارائه انرژی، حفظ محیط زیست، ارتقاء کارایی سیستم انرژی وادار نموده است. بر این اساس هیدروژن یکی از بهترین گزینه‌ها جهت ایفای نقش حامل انرژی در سیستم جدید تولید انرژی می‌باشد. همزمان با گسترش استفاده از نفت خام سنگین در پالایشگاه‌ها میزان استفاده‌ی هیدروژن نیز افزایش یافته است. نفت خام سنگین به خاطر نزدیک بودن به سطح زمین هزینه‌ی حفاری کمتری دارد و در نتیجه استفاده از آن به عنوان یک ماده‌ی خام کم هزینه مورد استقبال قرار گرفته است. اما این نوع نفت دارای مقدار سولفور زیادی بوده و می‌بایست عملیات عمل آوری با هیدروژن (هیدروتریٹینگ^۱) بر روی آن صورت گرفته تا ترشی آن کاهش یابد. از طرفی هر روزه قوانین سخت‌تری بر روی مقدار مواد مضر موجود در نفت تولیدی و همچنین آلودگی خروجی از پالایشگاه اعمال می‌شود. در این قوانین مقدار گوگرد نفت سبک تولیدی به طور پیوسته کاهش می‌یابد و در نتیجه عملیات هیدروتریٹینگ و مصرف هیدروژن افزایش می‌یابد. علاوه بر این نفت خام سنگین در پالایشگاه‌ها توسط هیدروکراکینگ^۲ به محصولات با ارزش سبک تبدیل می‌شود تا بتوان آن را به بازار عرضه کرد [۱ و ۲]. تمامی این فاکتورها، نیاز مدیریت هیدروژن و بهینه‌سازی شبکه‌ی هیدروژن را افزایش می‌دهد. در واقع مدیریت هیدروژن باعث کاهش مقدار مصرف یوتیلیتی‌های هیدروژن، بهینه‌سازی شبکه هیدروژن و کاهش هزینه‌های اضافی در پالایشگاه می‌شود. در واقع شبکه هیدروژن با اهمیت بالایی که در صنعت پالایشگاه دارد، نیازمند آن است که نگاه مفهومی‌تر و مناسب‌تر به آن داشت و رویکرد جدیدی در مدیریت هیدروژن و بهینه‌سازی شبکه هیدروژن ارائه نمود [۳ و ۴].

هدف از این مقاله، بهینه‌سازی شبکه هیدروژن برای پالایشگاه نفت آبادان به کمک روش بازیابی هیدروژن می‌باشد. در این تحقیق ابتدا کل ساختار شبکه هیدروژن شامل واحدهای مصرف کننده، تولید کننده هیدروژن، کمپرسورها به روش ابرساختار مدل‌سازی می‌گردد. سپس معتبرترین مدل ریاضی ارائه شده برای واحدهای تصفیه کننده هیدروژن (PSA^3) به ساختار ابرساختار اضافه می‌گردد. در انتها، بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌سازی انجام شده با هدف کاهش تولید هیدروژن تازه در شبکه انجام گردیده است.

۲- مروری بر کارهای گذشته

در دو دهه گذشته، با توجه به اهمیت شبکه هیدروژن در پالایشگاه، پژوهش‌ها و مطالعات در زمینه مدیریت هیدروژن در حال پیشرفت می‌باشد. مدیریت هیدروژن باعث کاهش مقدار مصرف یوتیلیتی‌های هیدروژن، بهینه‌سازی شبکه هیدروژن و کاهش هزینه‌های اضافی در پالایشگاه می‌گردد. به طور کلی برای مدیریت و انتگراسیون شبکه‌ی هیدروژن در پالایشگاه دو دیدگاه مورد استفاده قرار گرفته است [۵]:

¹ Hydrotreating

² Hydrocracking

³ Pressure Swing Adsorption

- ۱- استفاده از رویکردهای مفهومی (تحلیلی)^۴
 ۲- استفاده از رویکردهای برنامه ریزی ریاضی^۵

۲-۱- استفاده از رویکردهای تحلیلی

موازنه جرم و انتخاب مناسب منابع و چاهک‌ها، مبنای این روش است. هدف اصلی روش‌های گرافیکی/تحلیلی کاهش مصرف هیدروژن تازه با حداکثر استفاده از بازیافت و استفاده مجدد درون شبکه هیدروژن می‌باشد. می‌توان با یک روش ساده تحلیلی (مانند روش گرافیکی)، حداکثر هیدروژن بازیابی قابل دسترس را قبل از جستجوی شبکه‌های جایگزین، بدست آورد. متأسفانه، در این روش‌ها نمی‌توان وجود محدودیت فشار و دیگر مسائل عملیاتی و محدودیت‌های فیزیکی از جمله فاصله بین واحدهای فرآیند یا حداکثر غلظت مجاز H_2S در هر راکتور، را در نظر گرفت. اولین بار روش گرافیکی برای ارزیابی منابع هیدروژن توسط تیلور و همکاران ارائه گردید [۶]. تیلور^۶ شبکه‌ی هیدروژن را با استفاده از ملاحظات اقتصادی مورد آنالیز و بررسی قرار داد. او همچنین مقایسه‌ای بین هزینه‌های بازیابی هیدروژن و افزودن واحد جدید هیدروژن نمودند. تکنیک بکار برده شده برای بهینه‌سازی شبکه هیدروژن، استفاده از نمودار ترکیبی^۷ و آنالیز پینچ بوده است. در ادامه الویز^۸ با استفاده از نظریه اقتصادی پیشنهاد شده تیلور و نظریه آنالیز پینچ هیدروژن^۹ توانست تکنیکی جدیدی برای مدیریت هیدروژن ارائه دهد [۷]. آنالیز پینچ هیدروژن از پروفیل خلوص و نمودار مازاد هیدروژن برای تعیین هیدروژن قابل دسترس در پالایشگاه استفاده می‌کند. در ادامه تحقیقات در این زمینه، دینگ^{۱۰} و همکاران [۸] توانستند قید فشار را با استفاده از پروفیل‌های فشار متوسط در نظر بگیرند. فو^{۱۱} و مانان [۹] از آنالیز Gas Cascade برای تنظیم یوتیلیتی هیدروژن استفاده نمودند. ژائو^{۱۲} و همکاران [۱۰] توانستند با استفاده از روش آنالیز پینچ هیدروژن پیشنهاد شده توسط الویز و تیلور [۱۱] و نمودار خلوص موجود در شبکه هیدروژن، شبکه هیدروژن را اصلاح و مصرف یوتیلیتی را کاهش دهند. ابزار گرافیکی و تحلیلی که برای اجرای این روش مورد نیاز است، عبارتند از:

- ۱- نمودار خلوص
 ۲- نمودار هیدروژن اضافی

۲-۲- استفاده از رویکردهای برنامه ریزی ریاضی

با توجه به مشکلات روش‌های گرافیکی/تحلیلی، بهترین راهکار برای تجزیه و تحلیل شبکه هیدروژن، طراحی شبکه هیدروژن به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی، با استفاده از یک زبان برنامه نویسی مناسب ریاضی می‌باشد. این رویکرد بهینه‌سازی بر اساس برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً شامل یک تابع هدف، متغیرهای تصمیم‌گیری، مجموعه‌ای از محدودیت‌ها و محدودیت‌های عملیاتی و یک ساختار شبکه‌ای که تمامی اتصالات قابل اعتماد را محاسبه می‌کند.

⁴ Insight-based approaches

⁵ Mathematical programming approaches

⁶ Towler

⁷ Composite Curve

⁸ Alves

⁹ Hydrogen Pinch Analysis

¹⁰ Ding

¹¹ Foo

¹² Zhao

تابع هدف یک مسئله طراحی شبکه هیدروژن معمولا شامل کاهش تولید هیدروژن و کاهش هزینه سالیانه کل می‌باشد. محدودیت‌های عملی هم عموما شامل محدودیت‌های عملکرد واحد، نیازهای خلوص، محدودیت‌های فشار و محدودیت اتصال می‌باشد. علاوه بر تجزیه و تحلیل پینچ هیدروژن، الویز [۷] یک روش بر پایه برنامه ریزی ریاضی برای طراحی بهینه شبکه هیدروژن با استفاده از برنامه ریزی خطی توسعه داد. در برنامه ریزی خطی تابع هدف کاهش کل هزینه‌های سالیانه که در اینجا تنها هزینه تولید هیدروژن و هزینه توزیع و هزینه سوخت سوخت را شامل می‌شود، در نظر گرفته شده بود. این تابع هدف بیش از حد ساده شده بود، زیرا تعداد از کمپرسورهای جدید و اتصالات لوله کشی برای نصب را در سیستم توزیع در نظر نمی‌گرفت. به دلیل محدودیت‌های قبلی، لیو و هلاله^{۱۳} [۱۲ و ۱۳] یک رویکرد بهینه سازی مبتنی بر روش ابر ساختار^{۱۴} را با استفاده از به یک مسئله^{۱۵} MINLP برای در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف شبکه، از قبیل فشار، ظرفیت تجهیزات، محدودیت‌های تولید و مشخصات کیفیت در طراحی شبکه توسعه دادند. سپس لیو و ژانگ^{۱۶} [۱۴-۱۶] بر مبنای رویکرد ابر ساختار، یک روش سیستماتیک برای انتخاب بهینه و انتگراسیون تصفیه کننده‌های هیدروژن درون شبکه هیدروژن ارائه دادند. طراحی شبکه بهینه با روش MINLP محاسبه گردید.

بهینه سازی چند دوره‌ای سیستم‌های هیدروژن نیز توسط کوو و چانگ^{۱۷} [۱۷ و ۱۸] مورد توجه قرار گرفته است. آن‌ها توانستند مدل‌های دقیق از واحدهای مصرف کننده‌ی با در نظر گرفتن با هم توانایی عملیاتی انعطاف پذیر و غلظت‌ها و همچنین مدل‌سازی واحد هیدروژن و واحد های تصفیه‌سازها برای شبکه هیدروژن ارائه دهند. همچنین بیان جدیدی برای محاسبه هزینه‌های سوخت پیشنهاد دادند، به علاوه یک روش اکتشافی جایگزین^{۱۸} براساس یک روش تقسیم زمانی برای بررسی شبکه‌های هیدروژن انعطاف پذیر ارائه دادند. جیائو^{۱۹} و همکاران [۱۹] دو روش برای بهینه سازی شبکه‌های هیدروژن ارائه دادند. روش اول براساس یک رویکرد بهینه سازی دو مرحله ای متوالی است و دومین راهبرد یک بهینه سازی همزمان است. رویکرد بهینه سازی دو مرحله‌ای متوالی مسئله MINLP اصلی را به دو قسمت نسبتا کوچک MINLP تقسیم می‌کند. این کار برای کاهش تلاش محاسباتی مورد نیاز برای پیدا کردن راه حل‌های بهینه مطلوب یا جواب‌های محلی بهینه می‌باشد. در اینجا، ابتدا سیستم تصفیه هیدروژن بهینه شده و سپس به دنبال آن شبکه هیدروژن می‌شود. دقیقا برعکس آن، رویکرد بهینه سازی همزمان، مسئله اصلی را به دو مسئله کوچکتر تقسیم نمی‌کند، بلکه کل شبکه توزیع هیدروژن یکجا بهینه می‌کند. آنها همچنین مقدار اولیه برای حل مدل MINLP، از حل مدل^{۲۰} MILP آزاد شده^{۲۱} استفاده نمودند. بررسی کامل شبکه هیدروژن براساس یک ابر ساختار جامع که تمامی واحدهای تولید کننده هیدروژن و واحدهای مصرف کننده هیدروژن و سیستم سوخت و

¹³ Hallale and Liu

¹⁴ Super structure method

¹⁵ Mixed Integer Non Linear Programming

¹⁶ Liu and Zhang

¹⁷ Kuo and Chang

¹⁸ Alternative Heuristic Procedure

¹⁹ Jiao

²⁰ Mixed Integer Linear Programming

²¹ Relaxed MILP

کمپرسورها و تصفیه سازه‌ها و ارتباط بین آنها رو در نظر می‌گرفت، توسط دنگ^{۲۲} و همکاران انجام گرفت [۲۰ و ۲۱]. دو طرح کلی برای واحدهای مصرف کننده هیدروژن ارائه گردید و این دو طرح با در نظر گرفتن تعداد کل اتصالات و هیدروژن مورد نیاز مقایسه گردیدند. لیا^{۲۳} و همکاران [۲۲] یک رویکرد اصولی برای طراحی شبکه‌های هیدروژن معرفی کردند. رویکرد ابر ساختار آنها شامل ارتباط سه جعبه می‌شود و همچنین آنها این رویکرد را با در نظر گرفتن کمپرسورهای و تصفیه کننده‌ها در مدل بهینه سازی MINLP ارائه نمودند. یکی از جعبه‌ها مربوط به شبکه توزیع هیدروژن می‌باشد که شامل تمام منابع هیدروژن داخلی و مصرف کننده هیدروژن، واحدهای تولید کننده هیدروژن، سیستم سوخت و اتصالات بین آنها می‌باشد. دو جعبه دیگر شامل کلیه کمپرسورها و تصفیه کننده‌ها موجود و اضافه شدن کمپرسورها و تصفیه کننده‌ها جدید می‌باشد. تعداد بهینه کمپرسورهایی که قرار است نصب شوند بر اساس یک روش گام به گام تعیین می‌شود. در این روش تعداد کمپرسورها تا زمانی که تفاوت هزینه عملیاتی بین دو مرحله متوالی به صفر برسد، افزایش می‌یابد. فرایند سولفورزدایی به شبکه هیدروژن و بهینه سازی فرآیند به همراه شبکه هیدروژن توسط ژو^{۲۴} و همکاران [۲۳ و ۲۴] مورد بررسی قرار گرفت. آنها یک ساختار شبیه به رویکرد پیشنهاد شده توسط لیا^{۲۵} و همکاران [۲۲] برای ارتباط فرایند سولفورزدایی و عناصر شبکه هیدروژن (مانند واحدهای تولید هیدروژن، فرآیندهای مصرف کننده هیدروژن، واحد تبدیل کاتالیستی، تصفیه کننده‌ها و کمپرسورها) ارائه دادند. ساختار شبکه آنها شامل چهار جعبه متصل شده، به همراه اتصالات درونی و مدل‌های ریاضی مربوطه هر یک از آنها مشخص گردید. در این ساختار توزیع واحدهای سولفورزدایی در شبکه هیدروژن بر اساس فشار انجام می‌گرفت تا از افت فشار قابل توجه در سیستم جلوگیری شود. بنابراین برای فرآیندهای مصرف کننده هیدروژن نه تنها با مجموعه‌ای از شرایط عملیاتی مانند فشار عملیاتی، بار هیدروژنی و حداقل خلوص هیدروژن ورودی وجود داشت، بلکه حداکثر غلظت مجاز H₂S نیز تعریف می‌گردید. در نهایت، علاوه بر شرایط هزینه‌ای که قبلاً اشاره شد برای مثال مرجع‌های [۱۲ و ۱۴]، در این ساختار تابع هدف همچنین شامل هزینه‌های عملیاتی سولفورزدایی و نیز سرمایه‌گذاری در اضافه کردن واحد جذب H₂S هم خواهد بود. گیراردین^{۲۶} و همکاران [۲۵] توانستند یک روش بهینه سازی چند هدفه برای طراحی سیستم شبکه هیدروژن که در آن انتخاب یک تصفیه کننده هیدروژن به طور جداگانه انجام می‌گرفت را ارائه دهند. در اولین قدم در این روش یک تصفیه کننده هیدروژن مناسب برای شبکه انتخاب می‌شود. پس از آن تابع هدف که کاهش شدت جریان هیدروژن تازه هست مشخص می‌شود. در ادامه مدل اصلی MINLP به دو مدل کوچکتر: یک مدل شامل MILP و دیگری یک الگوریتم تکمیلی برای در نظر گرفتن ویژگی‌ها و شرایط عملیاتی مطلوب برای تصفیه کننده‌های هیدروژن تقسیم می‌گردد.

بهینه‌سازی شبکه‌های هیدروژن بر اساس مفهوم آگرزژی توسط وو^{۲۷} و همکاران [۲۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. در روش آنها دو مدل ریاضی و یک استراتژی بهینه سازی پیوسته برای بررسی شبکه‌های هیدروژن با حداقل مصرف آگرزژی (به عنوان مثال، هیدروژن و الکتریسیته) و حداقل تعداد کمپرسورها استفاده گردیده است. همچنین وو و

²² Deng

²³ Liao

²⁴ Zhou

²⁵ Liao

²⁶ Girardin

²⁷ Wu

همکاران [۲۷] توانستند شبکه هیدروژن را با ادغام تصفیه کننده‌های هیدروژن در ساختار ابر ساختار شبکه، بهینه کنند. علاوه بر این، وو و همکاران [۲۸] با استفاده از مفهوم آگرژی به بررسی سیستم‌های توزیع هیدروژن با حداقل هیدروژن و الکتریسیته مورد نیاز پرداختند. در این روش آنها از نمودارهایی بر اساس میزان هیدروژن و خلوص مورد نیاز برای هر فرآیند مصرف کننده هیدروژن استفاده نمودند. هانگ و لیو [۲۹]، با بکارگیری مدل‌های دقیق راکتور- جداکننده-تصفیه کننده‌ها، به بهینه‌سازی ساختار شبکه هیدروژن پرداختند. در این مدل‌های دقیق اثر پارامترهای عملیاتی دما، فشار و غیره بر روی دبی و غلظت هیدروژن مورد بررسی قرار گرفت. در این بهینه سازی تابع هدف بهینه سازی، کاهش مصرف هیدروژن تازه بوده است. نتایج حاصل از بهینه سازی کاهش ۱۷/۷۰ درصد مصرف برق را نشان می‌دهد. هانگ و همکاران [۳۰]، با ارائه یک مدل ریاضی جدید برای کمپرسورها در شبکه هیدروژن، به بهینه‌سازی و کاهش کل هزینه‌های سالیانه شبکه هیدروژن پرداختند. مدل ارائه شده مربوط به هزینه توان تراکمی و هزینه سرمایه گذاری خرید کمپرسور بوده است. مدل پیشنهاد شده بر روی سه شبکه هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج کاهش زمان محاسبات و کاهش ۳/۳۸-۸/۴۶ درصد هزینه کل کمپرسورها را نشان می‌دهد. استرب و مازوتی [۳۱] با ارائه یک مدل یک بعدی برای واحد تصفیه هیدروژن و جذب CO₂ به بهینه سازی شبکه هیدروژن پرداختند. مدل پیشنهادی برای ترکیب خوراک های مختلف اثر چهار نوع ناخالصی را در نظر می‌گیرد. بهینه سازی شبکه هیدروژن بر اساس حل شبکه عصبی بوده است. نتایج حاصل از بهینه سازی خطای کمتر از ۵ درصد مدل پیشنهاد شده برای تصفیه کننده را نسبت به مدل قبلی را نشان می‌دهد.

۳- شبکه هیدروژن

به طور کلی هر شبکه هیدروژن در پالایشگاه‌ها از سه قسمت اصلی تشکیل شده است [۱۱]:

۱- منابع هیدروژن^{۲۸} (چشمه‌ها)

۲- مصرف کننده های هیدروژن^{۲۹} (چاه‌ها)

۳- هیدروژن برگشتی^{۳۰} (بازیافتی)

در واقع ارتباط بین این سه قسمت شبکه هیدروژن را تشکیل می‌دهد به نحوی که برای مدیریت هیدروژن در پالایشگاه باید بهینه‌ترین ارتباط بین عناصر شبکه و موثرترین ساختار در شبکه به وجود آید. در ادامه روابط و معادلات ریاضی حاکم بر قسمت‌های مختلف شبکه‌ی هیدروژن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- منابع هیدروژن

به کلیه جریان‌هایی که می‌توانند هیدروژن را به مصرف کننده‌ها ارسال نمایند منابع هیدروژن گفته می‌شوند. بنابراین میزان ارسال به چاه‌ها (مصرف کننده‌ها) می‌بایست با میزان خروجی از چشمه‌ها برابر باشد [۱۲].

$$F_{source,k} = \sum_j F_{i,j} \quad (1)$$

²⁸ Sources

²⁹ Sinks

³⁰ Hydrogen Recovery

۲-۳- مصرف‌کننده‌های هیدروژن

مهم‌ترین مصرف‌کننده‌های هیدروژن شامل هیدروتربیترها و هیدروکراکرها است. به منظور حفظ عملکرد کلیه مصرف‌کنندگان (چاه‌ها)، مقدار و درجه‌ی خلوص هیدروژن ورودی در این واحدها می‌بایست ثابت نگه داشته شود [۱۲].

$$F_{\text{sink},j} = \sum_i F_{i,j} \quad (2)$$

$$F_{\text{sink},j} y_{\text{sink},j} = \sum_j F_{i,j} y_i \quad (3)$$

۳-۳- تصفیه‌کننده‌ها^{۳۱}

پرکاربردترین واحدهای تصفیه‌ی هیدروژن، PSA و غشا می‌باشند. این واحدها می‌توانند هیدروژن را از چندین جریان با خلوص متفاوت دریافت نموده و با خلوص بالا به چندین مصرف‌کننده ارسال نمایند. عموماً یک واحد خالص‌ساز به صورت یک چاه (ورودی تصفیه‌کننده) و دو چشمه (خروجی محصول با درصد خلوص بالا و جریان دور ریز^{۳۲}) در سیستم شبکه‌ی هیدروژن در نظر گرفته می‌شود. این موضوع در شکل ۱، به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۱- واحد تصفیه‌ی هیدروژن، با یک چاه و دو چشمه [۹]

جریان خوراک ورودی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$F_{\text{in},pur} = \sum_i F_{i,pur} \quad (4)$$

درصد خلوص خوراک نیز با معادله ۵، بیان می‌گردد:

$$\sum_i F_{i,pur} y_{i,pur} = \sum_i F_{i,pur} y_i \quad (5)$$

شدت جریان خروجی محصول با:

$$F_{\text{prod},pur} y_{\text{prod},pur} = R \times F_{\text{in},pur} y_{\text{in},pur} \quad (6)$$

شدت جریان خروجی دور ریز:

$$F_{\text{prod},pur} = F_{\text{in},pur} - F_{\text{prod},pur} \quad (7)$$

خلوص خروجی دور ریز:

$$F_{\text{resid},pur} y_{\text{resid},pur} = (R-1) F_{\text{in},pur} y_{\text{in},pur} \quad (8)$$

که R درصد هیدروژن برگشتی است. این درصد وابسته به متغیرهای خالص‌ساز همچون خلوص ورودی، خلوص محصول و میزان جریان ورودی می‌باشد. در طراحی تصفیه‌کننده‌ها، می‌بایست به سه نکته‌ی کلیدی شامل خلوص و فشار محصول و میزان بازیافت هیدروژن توجه کرد [۱۴].

³¹ Purifiers

³² Residual

۴-۳-کمپرسورها

اصولا منابع هیدروژن باید فشاری برابر یا بزرگتر از مصرف کننده داشته باشند. از اینرو برای تأمین فشار از کمپرسورها بهره گرفته می شود. کمپرسورها همزمان به عنوان چشمه و چاه در نظر گرفته می شوند؛ در حالی که رفتار آنها با چشمه ها و چاه های هیدروژن متفاوت است. لازم به ذکر است میزان دبی و درصد خلوص هر کمپرسور، می تواند متغیر باشد، در حالی که در چاه های هیدروژن این دو پارامتر (دبی و درصد خلوص) ثابت در نظر گرفته می شوند. همچنین میزان جریان ورودی و خروجی به/از کمپرسورها می بایست برابر باشد لذا مطابق معادله ۹ خواهیم داشت:

$$\sum_i F_{compj} = \sum_i F_{i,comp} \quad (9)$$

هیدروژن ورودی به کمپرسور نیز می بایست برابر میزان هیدروژن خروجی از آن باشد:

$$\sum_i F_{compj} Y_{comp} = \sum_i F_{i,comp} Y_i \quad (10)$$

عموما یک قید برای بیشینه ی دبی برای هر کمپرسور به شکل معادله (۱۱) لحاظ می شود:

$$\sum_i F_{i,comp} \leq F_{max,comp} \quad (11)$$

۵-۳-افزودن تجهیزات جدید

گاهی برای بهینه سازی شبکه هیدروژن نیازمند به افزودن تجهیزات جدید می باشیم. از این تجهیزات می تواند شامل کمپرسور، تصفیه کننده ها و لوله یا غیره باشد. البته پر واضح است افزودن تجهیزات اضافی بر اساس تأمین منابع سرمایه ای پالایشگاه انجام می گیرد. مدل ریاضی برای این تجهیزات به صورت متغیرهای دودویی^{۳۳} به کل مدل شبکه هیدروژن افزوده می شود و به صورت معادلات زیر نمایش داده می شوند [۲۶]:

$$\sum_i F_{i,new\ equipment} - Y_n UP \leq 0 \quad (12)$$

$$\sum_i F_{i,new\ equipment} - Y_n UP \geq 0 \quad (13)$$

$$Y_n (\text{New equipment}) \in \{0, 1\} =$$

که در این معادلات Y_n همان متغیر دودویی (وجود/عدم وجود تجهیزات جدید) که براساس تابع هدف به دو شکل مقداری صفر و یا یک در بهینه سازی ظاهر می شود و UP حداکثر شدت جریان ممکن برای واحد مورد بررسی است.

۴-مدل ابرساختار^{۳۴}

بهینه سازی ساختار شبکه هیدروژن شامل مراحل زیر می باشد [۱۲ و ۱۳]:

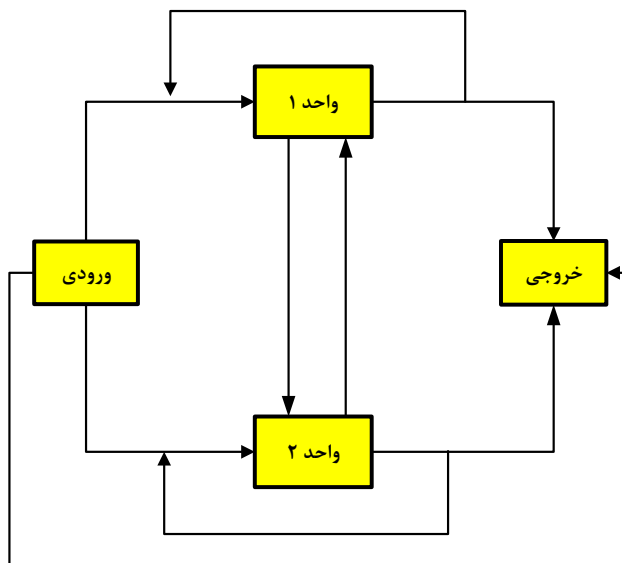
مرحله اول: مدل ریاضی ابرساختار

تمامی حالت های ممکن و موجود برای طراحی فرآیند در قالب یک ابرساختار ترسیم می شود تا ساختار بهینه از بین تمامی ساختارهای موجود در ابرساختار انتخاب شود. یک ابرساختار شامل تعدادی از واحدهای فرآیندی و خطوط

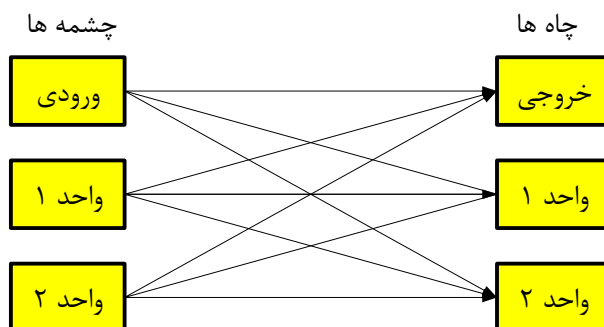
³³ Binary

³⁴ Super Structure

ارتباطی بین آن‌ها می‌باشد. خطوط ارتباطی بین واحدهای فرآیندی بصورت دو طرفه و خطوط ارتباطی خروجی‌ها و ورودی‌ها یک طرفه می‌باشد. شکل ۲، تمام جریان‌های ممکن برای یک سیستم (شامل دو واحد فرآیندی، یک ورودی و یک خروجی) چهار عضوی را نشان می‌دهد. این ابرساختار را به صورت دیگری می‌توان نشان داد به نحوی که هر جزء موجود در ابرساختار در حقیقت به عنوان یک چشمه یا یک چاهک و یا هر دوی آنها عمل می‌کند. هر واحد ورودی مانند یک چشمه، هر واحد خروجی مانند یک چاهک و هر واحد فرآیندی بطور همزمان به منزله یک چشمه و یک چاهک عمل می‌کند. بنابراین ابرساختار متناظر با سیستم بالا را می‌توان بصورت شکل ۳، نشان داد.



شکل ۲- جریان‌های ممکن در یک سیستم چهار عضوی شامل دو واحد فرآیندی، یک ورودی و یک خروجی [۱۰]



شکل ۳- ابرساختار با سیستم چهار عضوی شامل دو واحد فرآیندی، یک ورودی و یک خروجی [۱۰]

مرحله دوم: مدل ریاضی ابرساختار

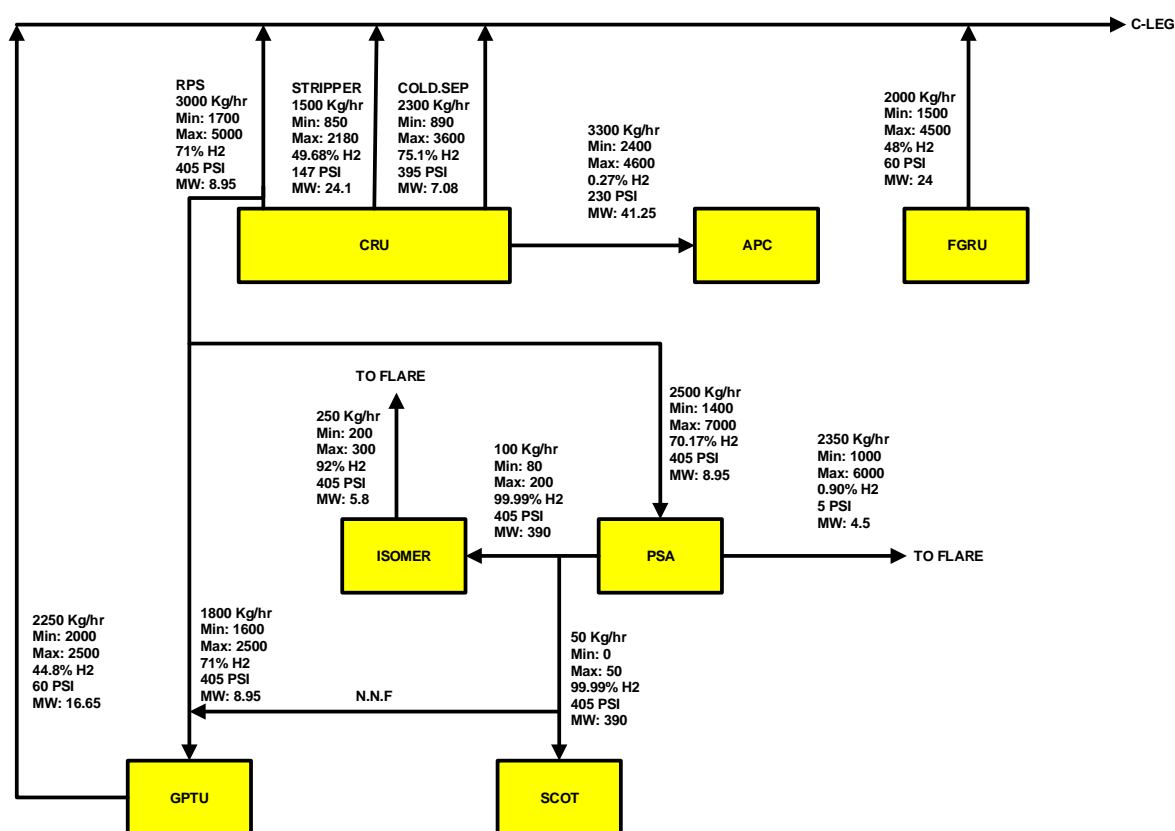
مدل ریاضی کلی ابر ساختار ارائه شده در این مرحله دارای مخلوطی از متغیرهای دودویی (۰ و ۱) و متغیرهای پیوسته و نتیجه یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی چند متغیره می‌باشد. در این روش، یک تابع هدف، مانند هزینه‌ها مشخص می‌شود که این تابع هدف می‌بایست کمینه یا بیشینه شود. اما به منظور واقعی کردن مدل ریاضی فرآیندها، یک سری محدودیت^{۳۵} بر متغیرهای مدل اعمال می‌شوند. محدودیت‌ها به صورت مساوی یا نامساوی می‌باشند. اگر

³⁵ Constrain

تابع هدف و محدودیت‌ها همه خطی باشند، مدل بهینه‌سازی، خطی "LP"^{۳۶} است. اما اگر یکی از قیدها یا تابع هدف غیرخطی باشند، مدل بهینه‌سازی، غیرخطی "NLP"^{۳۷} است. اگر در مدل خطی، متغیرهای مدل صحیح یا دودویی باشند، نام روش حل "MILP" است. همچنین اگر در مدل غیرخطی، متغیرهای مدل صحیح یا دودویی باشند، نام روش حل "MINLP" می‌باشد.

۵- شبکه هیدروژن موجود پالایشگاه آبادان

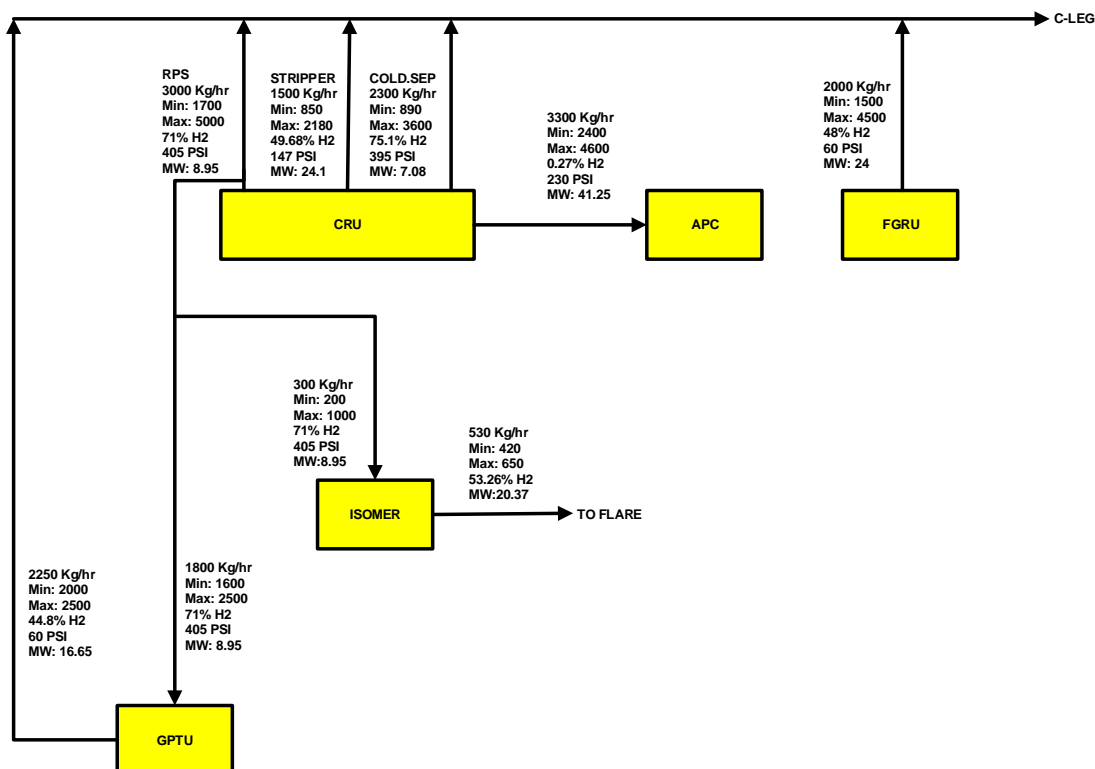
دو نمای کلی برای شبکه هیدروژن در پالایشگاه آبادان در شکل های ۴ و ۵، نمایش داده شده است. شکل ۴، مربوط به زمانی است که واحد SCOT (گوگرد سازی) در حال کار می‌باشد. در حالی که شکل ۵، مربوط به زمانی است که SCOT در سرویس نباشد و در حالت خاموش (shut down) باشد. در حالت کلی، واحد CRU (واحد تبدیل کاتالیستی)، هیدروژن مورد نیاز چهار واحد APC (شرکت پتروشیمی آبادان)، GPTU (واحد شیرین سازی بنزین)، ISOMER (ایزومریزاسیون) و SCOT (گوگرد سازی) را تامین می‌کنند. همان طور که در شکل دیده می‌شود بیش از ۵ جریان off-gas با خلوص نسبتاً بالا به سیستم سوخت فرستاده می‌شوند. در این تحقیق برای بررسی محاسبات و بهینه‌سازی از نرم افزار GAMS استفاده شده است. داده‌های فرآیندی مربوط به واحدهای موجود در شکل‌های ۴ و ۵، و جداول ۱ تا ۴ آورده شده است.



شکل ۴- شبکه‌ی هیدروژن موجود پالایشگاه در حالت استفاده از واحد SCOT

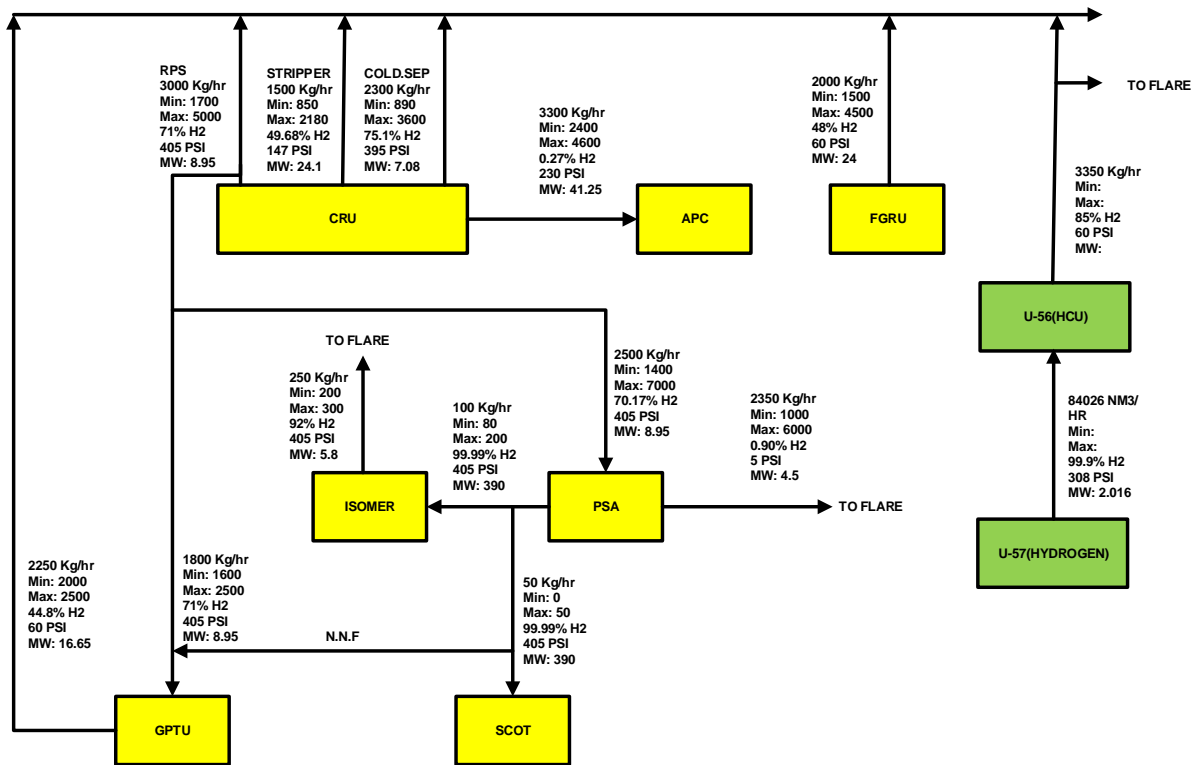
³⁶ Linear programming

³⁷ Non Linear Programming



شکل ۵- شبکه‌ی هیدروژن موجود پالایشگاه در حالت عدم استفاده از واحد SCOT

همان طور که در جدول ۲، و شکل های ۴ و ۵ نمایش داده شده است مقدار بسیار زیادی از Off-gas با خلوص بسیار بالا به سیستم سوخت ارسال می‌گردد و این موضوع منطقی نمی‌باشد. بنابراین بهترین مدیریت هیدروژن در شبکه هیدروژن آبادان، استفاده مجدد از هیدروژن و بازیافت هیدروژن می‌باشد. با بررسی‌های انجام گرفته شده و اضافه شدن یک واحد HCU (هیدروکراکر) به شبکه هیدروژن، برای تامین هیدروژن مورد نیاز واحد HCU تاسیس یک واحد تولید هیدروژن ضروری به نظر می‌رسد. نمای کلی شبکه هیدروژن پالایشگاه بعد از افزودن واحد HCU و تولید هیدروژن (U-57) به صورت شکل ۶، می‌باشد.



شکل ۶- نمای کلی شبکه هیدروژن با افزودن یک واحد تولید هیدروژن و واحد HCU

جدول ۱- اطلاعات تأمین کننده های هیدروژن

منابع هیدروژن	شدت جریان (Kg/h)	ماکزیم شدت جریان (Kg/h)	خلوص (%)	فشار (Psi)
واحد CRU	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۷۱	۴۰۵

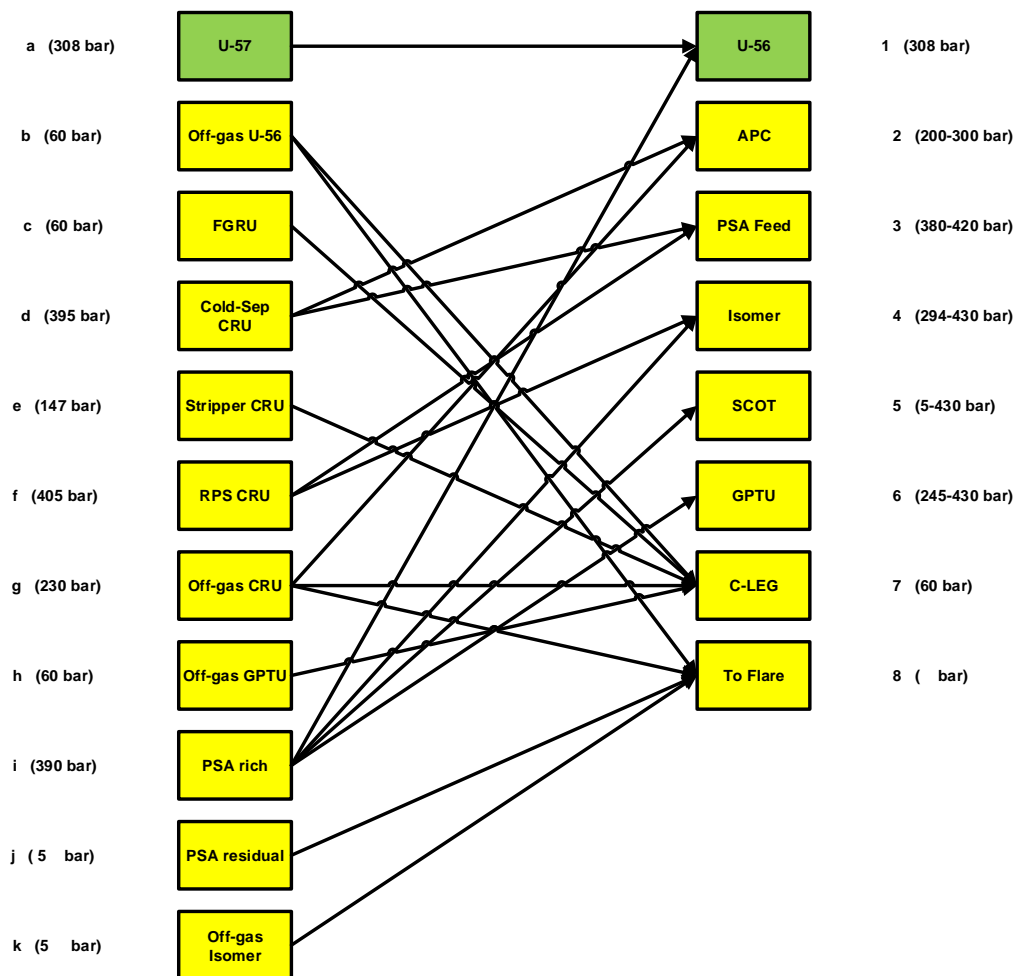
جدول ۲- داده های مربوط به منابع هیدروژن (Off - Gas)

منابع	شدت جریان (Kg/h)	خلوص (%)	فشار (Psi)
RPS	۳۰۰۰	۷۱	۴۰۵
STRIPPER	۱۵۰۰	۴۹/۶۸	۱۴۷
COLD.SEP	۲۳۰۰	۷۵/۱	۳۹۵
Off-gas (FGRU)	۲۰۰۰	۴۸	۶۰
Off-gas (GPTU)	۲۲۵۰	۴۴/۸	۶۰
Off-gas (ISOMER)	۲۵۰	۹۲	۴۰۵
Off-gas (PSA)	۲۳۵۰	۰/۹	۵



a (308 bar)	U-57	U-56	1 (308 bar)
b (60 bar)	Off-gas U-56	APC	2 (200-300 bar)
c (60 bar)	FGRU	PSA Feed	3 (380-420 bar)
d (395 bar)	Cold-Sep CRU	Isomer	4 (294-430 bar)
e (147 bar)	Stripper CRU	SCOT	5 (5-430 bar)
f (405 bar)	RPS CRU	GPTU	6 (245-430 bar)
g (230 bar)	Off-gas CRU	C-LEG	7 (60 bar)
h (60 bar)	Off-gas GPTU	To Flare	8 (bar)
i (390 bar)	PSA rich		
j (5 bar)	PSA residual		
k (5 bar)	Off-gas Isomer		

شکل ۷- شمای کلی از تمامی چشمه‌ها و چاه‌های موجود در شبکه



شکل ۸- اتصالات ممکن بین چشمه‌ها و چاه‌ها

جدول ۳- داده‌های مربوط به مصرف‌کننده‌های هیدروژن

Sinks	Flow rate (Kg/h)	Purity (%)	Pressure (Psi)	
APC	Min	۲۴۰۰	۰/۲۴	۲۳۰
	Max	۴۶۰۰		
GPTU	Min	۱۶۰۰	۷۱	۸/۹۵
	Max	۲۵۰۰		
SCOT	Min	۰	۹۹/۹۹	۴۰۵
	Max	۵۰		
ISOMER	Min	۸۰	۹۹/۹۹	۴۰۵
	Max	۲۰۰		
TO FLARE	—	—	۵	

جدول ۴- داده‌های مربوط به واحدهای PSA

Unit	Feed (max) (Kg/h)	R (Recovery %)
PSA	۷۰۰۰	۸۰-۹۰

بیشترین هزینه در شبکه مربوط به سرمایه‌گذاری جهت ایجاد واحدهای اضافی تولید هیدروژن می‌باشد. علاوه بر این خرید هیدروژن از بیرون نیز اغلب گرانقیمت می‌باشد. در نتیجه پالایشگاه‌ها مجبور به کنترل و مدیریت شبکه هیدروژن می‌باشند. بنابراین در این مقاله مدیریت هیدروژن بر اساس کاهش تولید هیدروژن تولیدی (در صورت امکان حذف واحد تولید کننده هیدروژن) و استفاده مجدد از هیدروژن و تصفیه آن خواهد بود. حال با استفاده از اصول مدل ابرساختار شبکه هیدروژن را به صورت شکل ۷، مرتب می‌کنیم. به عبارت دیگر، تمامی چشمه‌ها و چاه‌ها را در شبکه هیدروژن نشان داده شده است. برای سادگی معادلات حاکم برای مدل ابرساختار، چشمه‌ها را با حروف (m-a) و چاه‌ها را با اعداد (۱-۱۱) مشخص می‌کنیم. در ادامه تمامی اتصالات ممکن بین چشمه‌ها و چاه‌ها را در شکل ۸، نشان داده‌ایم. در اینجا با استفاده از حالت‌های عملی، واقعی و اقتصادی ارتباط بین چشمه‌ها و چاه‌ها شبکه هیدروژن مورد بررسی، مدل ابرساختار را کاهش دادیم. با توجه به شکل ۸، کلیه معادلات حاکم در روش ابرساختار به صورت جدول ۵ نوشته می‌شوند.

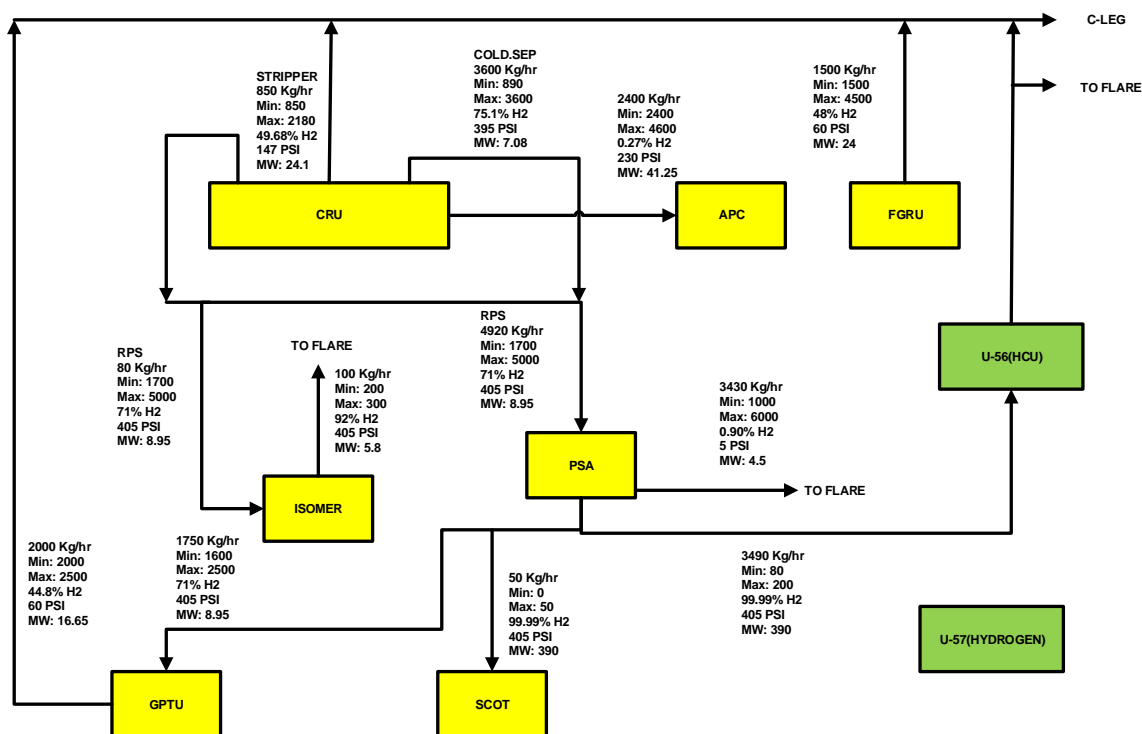
جدول ۵- معادلات حاکم و قیود مسئله

خروجی چشمه‌ها		
$b_7 + b_8 \leq 3350;$	$e_7 \leq 2180;$	$g_2 + g_7 + g_8 \geq 2400;$
$c_7 + c_8 \leq 4500;$	$e_7 \geq 850;$	$h_7 \leq 2500;$
$c_7 + c_8 \geq 1500;$	$f_3 + f_4 \leq 5000;$	$h_7 \geq 2000;$
$d_2 + d_3 \leq 3600;$	$f_3 + f_4 \geq 3700;$	$K_8 \geq 100;$
$d_2 + d_3 \geq 890;$	$g_2 + g_7 + g_8 \leq 4600;$	
ورودی چاه‌ها		
$a_1 + i_1 \geq 3500;$	$f_4 + i_4 \leq 400;$	$I_6 \geq 1600;$
$d_2 + g_2 \leq 4600;$	$i_5 \leq 50;$	$b_7 + c_7 + e_7 + g_7 + h_7 \leq 12000;$
$d_2 + g_2 \geq 2400;$	$i_6 \leq 2500;$	$b_8 + g_8 + j_8 + k_8 \leq 6000;$
$f_4 + i_4 \geq 80;$		
سیستم PSA تصفیه کننده		
$d_3 + f_3 \leq 9000;$	$(d_3 + f_3) * yfI = 0.751 * d_3 + 0.71 * f_3;$	
$d_3 + f_3 \geq 1400;$	$ypI = 0.999;$	$yfI \leq ypI;$
$d_3 + f_3 = i_1 + i_4 + i_5 + i_6 + j_8;$	$yfI \geq yrI;$	$yrI \leq 1;$
$(d_3 + f_3) * yfI * (RI) = (i_1 + i_4 + i_5 + i_6) * ypI;$		$(d_3 + f_3) * yfI * (1 - (RI)) = j_8 * yrI;$
تابع هدف		
$Min(a_1);$		

با توجه به ساختار شبکه و میزان off-gas‌هایی با خلوص بالای هیدروژن که به سیستم سوخت فرستاده می‌شود، در اینجا هدف استفاده مجدد از جریان‌های off-gas و استفاده از تصفیه کننده موجود (PSA) در شبکه می‌باشد. بنابراین تابع هدف را کاهش جریان ارسالی به واحد U-56 خواهد بود. زیرا با این تابع هدف قصد داریم که شبکه از تصفیه جریان‌ها دوریز استفاده کند و در صورت امکان از واحد U-57 استفاده نشود. در این ساختار ماکزیمم میزان جریان ورودی به U-56 (Kg/h) ۳۵۰۰ و ماکزیمم میزان جریان ورودی PSA (Kg/h) ۹۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۶- بهینه‌سازی بدون افزودن واحد جدید و روش ابر ساختار

نتایج حاصل از بهینه‌سازی در شکل ۹ و جداول ۶ تا ۷ نشان داده شده است. میزان هیدروژن تولیدی از واحد U-57 به صفر رسیده است یعنی می‌توان بدون احداث واحد U-57 میزان هیدروژن شبکه را تامین نمود. همچنین میزان جریان‌های فرستاده شده به سیستم سوخت و C-LEG نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۹- شبکه بهینه در حالت استفاده از روش ابر ساختار

جدول ۶- نتایج حاصل از بهینه‌سازی مربوط به تصفیه کننده

شبکه هیدروژن موجود	شبکه هیدروژن بهینه شده با روش ابر ساختار		
۴۵/۳	۸۲	RI (%)	PSA
۹۹/۹	۹۹/۹	y _p I (%)	
۰/۹۰	۳۲/۵	y _r I (%)	
۷۰/۱۷	۷۲/۷	y _f I (%)	

جدول ۷- نتایج حاصل از بهینه سازی مربوط به شدت جریان‌ها شبکه هیدروژن

شدت جریان شبکه هیدروژن موجود	شدت جریان شبکه هیدروژن بهینه شده با روش ابر ساختار	
۸۴۰۲۶ Kg/h	۰	U-57
۲۰۰۰	۱۵۰۰	FGRU
۲۳۰۰	۳۶۰۰	cold-sep CRU
۱۵۰۰	۸۵۰	stripper CRU
۵۰۰۰	۵۰۰۰	RPS CRU
۱۵۰	۵۰۰۰	PSA product
۸۴۰۲۶ Kg/h	۳۴۹۰ Kg/h	U-56
۳۳۰۰	۲۴۰۰	APC
۳۰۰	۸۰	ISOMER
۵۰	۵۰	SCOT
۱۸۰۰	۱۷۵۰	GPTU

جریان COLLD-SEP CRU و RPS CRU دیگر به سیستم سوخت و C-LEG فرستاده نمی‌شود و برای خالص‌سازی به PSA فرستاده می‌شود. همچنین مقدار (Kg/h) ۳۴۹۰ با خلوص ۹۹/۹٪ به واحد U-56 فرستاده می‌شود.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش ابر ساختار بهینه ترین ساختار شبکه هیدروژن در پالایشگاه آبادان پیشنهاد گردید. روش ابر ساختار شامل مدلی ریاضی است که همزمان قادر به تأمین هیدروژن مورد نیاز مصرف کننده‌ها و طراحی شبکه بهینه‌ی هیدروژن با کمترین هزینه می‌باشد. تابع هدف مورد استفاده در شبکه بهینه شده کاهش میزان جریان هیدروژن تولیدی از واحد تولید هیدروژن در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه سازی، استفاده مجدد از هیدروژن ارسالی به سوخت را نشان می‌دهد. همچنین جریان COLD-SEP CRU با خلوص نسبتاً بالا از هیدروژن، برای بازیابی به تصفیه کننده PSA فرستاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به تأمین هیدروژن مصرف کننده از طریق بازیابی هیدروژن دورریز، واحد تولید هیدروژن (U-57) می‌تواند به حالت shutdown باشد و از سیستم خارج گردد. در ساختار شبکه بهینه جریان واحد RPS CRU با خلوص نسبتاً بالای هیدروژن که قبلاً مقدار زیادی از جریانش به سیستم سوخت ارسال می‌گردید، بعد از بهینه سازی به واحدهای PSA و Isomer ارسال می‌شود. این در حالی است که واحد PSA در ماکزیمم ظرفیت خود در حال کار می‌باشد. خروجی بهینه سازی موارد زیر را در واحد مشخص نموده است:

۱. پالایشگاه با توجه به اضافه نمودن واحد مصرف کننده هیدروژن (U-56) در شرایط بهینه بدست آمده برای جریان‌ها، نیازی به ساخت و خرید واحد تولید هیدروژن نخواهد داشت در نتیجه مقدار ۸۴۰۲۶ Kg/h هیدروژنی تولیدی توسط شبکه بهینه شده از سایر منابع تأمین شده است.
۲. مقدار هیدروژن ارسالی با خلوص قابل توجه جهت مصرف سوخت قبل از بهینه سازی ۴۱۰۰ kg/h و بعد از بهینه سازی ۸۵۰ kg/h تقلیل یافته است.

۸- منابع

- [1] C. Deng, Y. Zhou, W. Jiang, X. Feng, "Optimal design of inter-plant hydrogen network with purification reuse/recycle", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42(31), pp. 19984-20002, 2017.
- [2] A. Mahmoud, A.S.M. Adam, J. Sunarso, S. Liu, "Modeling and optimization of refinery hydrogen network – a new strategy to linearize power equation of new compressor", *Asia-Pac. J. Chem. Eng*, 2017. Published online in Wiley Online Library, DOI: 10.1002/apj.2131.
- [3] M. Khajepour, F. Farhadi, M.R. Pishvaie, "Nonlinear Optimization of Hydrogen Management of Refinery". *Master's Thesis to Sharif University of Technology, Tehran, Iran*, 2008.
- [4] F. Thomas Edgar, D.M. Himmelblau, "Optimization of chemical processes". *McGraw-Hill*, 2001.
- [5] Q. Zhang, G. Liu, X. Feng, K.H. Chu, C. Deng, "Hydrogen networks synthesis considering separation performance of purifiers". *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 39(16), pp. 8357-8373, 2014.
- [6] G.P. Towler, R. Mann, A.J.L. Serriere, C.M.D. Gabaude, "Refinery hydrogen management: cost analysis of chemically integrated facilities". *Ind Eng Chem Res*, Vol. 35, pp. 2378-2388, 1996.
- [7] J.J. Alves, "Analysis and Design of Refinery Hydrogen Distribution Systems", *Manchester, UK: University of Manchester Institute of Science and Technology; Ph.D. thesis*, 1999.
- [8] Y. Ding, X. Feng, K.H. Chu, "Optimization of hydrogen distribution systems with pressure constraints". *J Clean Prod*, Vol. 19, pp. 204-211, 2011.
- [9] D.C.Y. Foo, Z.A. Manan, "Setting the minimum utility gas flowrate targets using cascade analysis technique". *Ind Eng Chem Res*, Vol. 45, pp. 5986-5995, 2006.
- [10] Z. Zhao, G. Liu, X. Feng, "The integration of the hydrogen distribution system with multiple impurities". *Chem Eng Res Des*, Vol. 85, pp. 1295-1304, 2007.
- [11] J.J. Alves, G.P. Towler, "Analysis of refinery hydrogen distribution systems", *Ind Eng Chem Res*, Vol. 41, pp. 5759-5769, 2002.
- [12] N. Hallale, F. Liu, "Refinery hydrogen management for clean fuels production", *Adv Environ Res*, Vol. 6, pp. 81-98, 2001.
- [13] F. Liu, N. Hallale, R. Gani, S.B. Jorgensen, "Retrofit of refinery hydrogen systems", *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, pp. 445-50, 2001.
- [14] F. Liu, N. Zhang, "Strategy of purifier selection and integration in hydrogen networks", *Chem Eng Res Des*, Vol. 82, pp. 1315-1330, 2004.
- [15] J.P. Marques, H.A. Matos, N.M.C. Oliveira, C.P. Nunes, "State-of-the-art review of targeting and design methodologies for hydrogen network synthesis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42(1), pp. 376-404, 2017.
- [16] M.I. Ahmad, N. Zhang, M. Jobson, "Modelling and optimization for design of hydrogen networks for multi-period operation". *J Clean Prod*, Vol. 18, pp. 889-899, 2010.
- [17] C.C. Kuo, C.T. Chang, "Improved model formulations for multiperiod hydrogen network designs". *Ind Eng Chem Res*, Vol. 53, pp. 20204-20222, 2014.
- [18] C.T. Chang, C.C. Kuo, "Improved design strategies for flexible hydrogen networks". *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 37, pp. 1007-1012, 2015.
- [19] Y. Jiao, H. Su, W. Hou, "Improved optimization methods for refinery hydrogen network and their applications". *Control Eng Pract*, Vol. 20, pp. 1075-1093, 2012.
- [20] C. Deng, H. Pan, Y. Li, Y. Zhou, X. Feng, "Comparative analysis of different scenarios for the synthesis of refinery hydrogen network". *Appl Therm Eng*, Vol. 70, pp. 1162-1179, 2014.

- [21] C. Deng, W. Li, X. Feng, "Refinery hydrogen network management with key factor analysis", *Chem Eng Trans*, Vol. 35, pp. 61-66, 2013.
- [22] Z. Liao, J. Wang, Y. Yang, G. Rong, "Integrating purifiers in refinery hydrogen networks: a retrofit case study", *J Clean Prod*, Vol. 18, pp. 233-241, 2010.
- [23] L. Zhou, Z. Liao, J. Wang, B. Jiang, Y. Yang, "Hydrogen sulfide removal process embedded optimization of hydrogen network", *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 18163-18174, 2012.
- [24] L. Zhou, Z. Liao, J. Wang, B. Jiang, Y. Yang, "Simultaneous optimization of hydrogen network with desulfurization processes embedded", *Computer aided chemical engineering. Elsevier*, pp. 215-219, 2012.
- [25] L. Girardin, F. Marechal, P. Tromeur, W.M.C. Pantelides, "Methodology for the design of industrial hydrogen networks and the optimal placement of purification units using multi-objective optimisation techniques", *Computer aided chemical engineering. Elsevier*, pp. 1765-1770, 2006.
- [26] S. Wu, Z. Yu, X. Feng, G. Liu, C. Deng, K.H. Chu, "Optimization of refinery hydrogen distribution systems considering the number of compressors", *Energy*, Vol. 62, pp. 185-195, 2013.
- [27] S. Wu, Y. Wang, X. Feng, "Unified model of purification units in hydrogen networks", *Chin J Chem Eng*, Vol. 22, pp. 730-733, 2014.
- [28] S. Wu., G. Liu, Z. Yu, X. Feng, Y. Liu, C. Deng, "Optimization of hydrogen networks with constraints on hydrogen concentration and pure hydrogen load considered", *Chem Eng Res Des*, Vol. 90, pp. 1208-1220, 2012.
- [29] L. Huang, G. Liu, "Optimization for refinery hydrogen networks with detailed reactor-separator-purifier modeling", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 304, pp. 127136, 2021.
- [30] L. Huang, D. Li, N. Li, G. Liu, "A novel mathematical model for integrating the hydrogen network of refinery with compressor allocation considered", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47(41), pp. 18067-18079, 2022.
- [31] A. Streb, M. Mazzotti, "Performance limits of neural networks for optimizing an adsorption process for hydrogen purification and CO₂ capture", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 166 pp. 107974, 2022.