مدل‌سازی شبکه توزیع هیدروژن به‌منظور بهبود شبکه و بهینه‌سازی مصرف هیدروژن در واحدهای پالایشی

عزتا.. غلامی* [۱]، امید فدوی اردستانی [۲]، روحا... قانعی [۳]، سید علی آل‌یاسین [۴]

[۱] مدیر عملیات، شرکت پالایش نفت امام‌خمینی(ره) شازند، اراک، ایران

[۲] رئیس پژوهش و توسعه، شرکت پالایش نفت امام‌خمینی(ره) شازند، اراک، ایران

[۳] استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فراهان

[۴] کارشناس ارشد مهندسی فرآیند، ستاد مرکزی شرکت ملی پالایش و پخش، تهران، ایران

نوع مقاله: **ترویجی**

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵

چکیده

در حال حاضر افزایش ظرفیت در یک پالایشگاه با نگاه بر ظرفیت تولید هیدروژن مورد نیاز برنامه‌ریزی می‌شود و عدم‌تعادل بین عرضه و تقاضای هیدروژن بایستی بر پایه یکپارچه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه هیدروژن باشد به‌طوری‌که توجه به تأثیرات زیان‌بار ترکیباتی همچون بنزن، آروماتیک‌ها، اولفین‌ها و ترکیبات گوگرددار در سوخت‌های هیدروکربنی بر سلامت انسان و محیط‌زیست و اولویت حذف آن‌ها، اهمیت مدیریت مصرف بهینه هیدروژن در صنایع پالایش نفت را ضرورت می‌بخشد. امروزه مدیریت شبکه هیدروژن برای پالایشگاه‌ها به‌منظور رقابت‌پذیری و سودآوری بسیار حیاتی است، هدف از این تحقیق بهینه‌سازی و بهبود شبکه هیدروژن پالایشگاه نفت امام‌خمینی(ره) شازند بوده است. در این مدل‌سازی ابتدا شبکه توزیع هیدروژن پالایشگاه ترسیم و مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و شرایط بهینه تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها تعیین می‌شود. سپس باتوجه به پتانسیل‌های موجود در پالایشگاه به اعمال تغییرات فرایندی در شبکه توزیع جهت بهبود شبکه هیدروژن و همچنین به‌طور اختصاصی به بررسی و ارائه مدل ریاضی مناسب با دقت بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌سازی‌ها برای واحدهای مصرف‌کننده هیدروژن پرداخته می‌شود. مدل ارائه شده اخیر تمامی مشکلات و فرضیات اشتباه مدل‌های قبلی در این زمینه را مرتفع کرده است. در انتها نیز پس از بررسی و بهینه‌سازی شبکه توزیع هیدروژن چندین مسیر که طی سال‌های اخیر اجرا شده و منجر به تغییرات عملیاتی مفید و باارزشی در شبکه توزیع هیدروژن شده است پیشنهاد گردید. مهم‌ترین دستاورد این پژوهش حاصل از اجرای کامل مدل بهینه‌سازی، عدم نیاز به تولید هیدروژن واحد تولید هیدروژن فاز یک پالایشگاه است و بر اساس برآوردهای اقتصادی، میزان صرفه‌جویی حاصل از بسته شدن واحد مذکور بیش از ۲ هزار میلیارد ریال در سال خواهد بود و بدون شک یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای صنایع پالایش نفت کشورمان محسوب می‌شود که در سال گذشته با موفقیت کامل محقق گردید.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع هیدروژن، مدل‌سازی ریاضی، بهینه‌سازی فرایند، پالایشگاه نفت امام‌خمینی(ره) شازند

* ezatgholami@gmail.com

مقدمه

هیدروژن یک ماده باارزش و گران‌بها در صنایع پالایش نفت محسوب می‌شود. در گذشته پالایشگاه‌ها تنها با جداسازی قسمت‌های مختلف نفت خام در برج‌های تقطیر و فروش آن‌ها در بازارهای مختلف سودآور بودند ولی امروزه وضعیت متفاوت است و قوانین سخت زیست‌محیطی باعث شده هیدروژن مصرفی در پالایشگاه‌ها به‌طور عمده جهت حذف ترکیبات گوگردی و نیتروژن‌دار قبل از فروش محصولات و همچنین تولید محصولات تصفیه شده جهت استفاده در واحدهای زیرمجموعه مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه اگر پالایشگاه بخواهد سود ده باشد باید هیدروکربن‌های سنگین به محصولات سبک‌تر تبدیل شوند و عملیات حذف گوگرد و شکستن هیدروکربن‌ها و تبدیل آن به محصولات سبک‌تر معمولاً با استفاده از هیدروژن انجام می‌شود. بنابراین هیدروژن به یکی از مواد اصلی در فرایند پالایشگاه‌های نفت تبدیل شده که مدیریت صحیح در میزان مصرف آن و بهینه‌سازی شبکه توزیع، سبب کاهش هزینه‌های تولید عملیاتی در پالایشگاه می‌گردد. هیدروژن، چه به‌صورت داخلی و چه خارجی تولید شده باشد، از طریق شبکه توزیع به واحدهای مختلف پالایشگاه که به این گاز احتیاج دارند، منتقل می‌شود. هیدروژن یک منبع مشترک است که فعالیت همه‌ی واحدها را محدود می‌کند به‌طوری‌که مدیریت صحیح شبکه مستلزم آن است که مقدار تولید هیدروژن با تقاضا که بسیار متغیر است، هماهنگ باشد. برای اینکه بتوان به‌طور پیوسته پاسخگوی تقاضای بازار بود، هیدروژن در مقادیر بالاتری تولید و درنتیجه مقداری از این گاز در موارد دیگر مثلاً به‌عنوان شبکه‌ی سوخت گازی در کوره‌ها و بویلرها استفاده می‌شود.

ازآنجاکه تولید هیدروژن هزینه‌ی زیادی دارد، از لحاظ اقتصادی مدیریت صحیح شبکه به این مفهوم است که نظارت بر توزیع این گاز باید به‌گونه‌ای انجام شود تا مقادیر کمی از آن وارد شبکه سوخت گازی شود. شبکه‌های هیدروژن در پالایشگاه‌های بزرگ، بسیار پیچیده هستند چراکه واحدهای زیادی با نیازهای متفاوت را به هم متصل می‌کند و درعین‌حال اطلاعات کمی در مورد متغیرهای اصلی در اختیار قرار می‌دهند. به همین دلیل تصمیم‌گیری در این فضا کار ساده‌ای نیست. علاوه بر این، عملیات شبکه نمی‌تواند مستقل از عملکرد واحدهای متصل به آن باشد. علاوه بر تولید و پخش در شبکه، بهینه‌سازی استفاده از هیدروژن در واحدهای مصرف‌کننده قسمتی از راه‌حل برای مدیریت مطلوب هیدروژن در پالایشگاه به شمار می‌رود [۱].

۲-پیشینه تحقیق

مطالعات پیشین در این زمینه بیشتر معطوف به جنبه‌های طراحی بوده‌اند تا عملیات گسترده در سطح پالایشگاه. در طی چند ساله اخیر نیز تحقیقات متعددی در خصوص بهینه‌سازی شبکه‌های هیدروژن در پالایشگاه‌های ایران انجام پذیرفته که به چند نمونه از مهم‌ترین این تحقیقات اشاره می‌گردد:

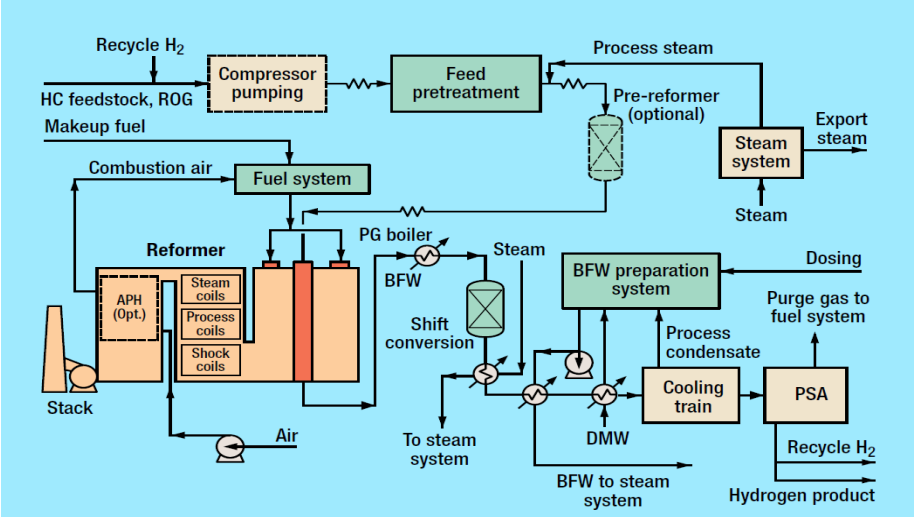
محمدرضا سردشتی بیرجندی و همکاران از دانشگاه زاهدان در سال ۲۰۱۴ با اعمال روش بهینه‌سازی با استفاده از نامعادلات غیرخطی در یک برنامه‌ریزی خطی موفق به حذف یک کمپرسور و افزایش بازدهی سیستم خالص‌سازی تا ۹۰٪ و کاهش هزینه سالیانه به مبلغ حدود ۹ میلیون دلار در سال در یک واحد پالایشگاهی در ایران گردیدند [۲].

شریعتی و همکاران از دانشگاه تهران در سال ۲۰۱۳ با رویکردی متفاوت بر مدیریت هیدروژن در مجتمع‌های پتروشیمی و با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، مقدار مصرف گاز هیدروژن را در یک مجتمع در مرحله اول تا ۱۶/۷ درصد و پس از یکپارچه‌سازی دو مجتمع مصرف هیدروژن را تا ۲۴/۶ درصد کاهش دادند [۳].

خواجه پوری و همکاران از دانشگاه شریف در سال ۲۰۰۹ نشان دادند استفاده از روش و مدل Reduced Superstructure به‌جای Superstructureها می‌توان تعداد متغیرهای مورد مطالعه را کاهش داد و حتی بدون اضافه کردن هیچ تجهیزی و تنها با تنظیم[1] متغیرهای فرایندی موجب صرفه‌جویی‌های میلیون دلاری در سال گردید [۴]. در حال حاضر تعداد معدودی تحقیق یافت می‌شود که به عملیات Real time شبکه مرتبط باشد و همان‌طور که گفته شد در تمامی کارهای صورت گرفته گذشته، کم‌تر به‌صورت عملی به بهینه‌سازی شبکه هیدروژن پرداخته شده است.

۳- واحدهای تولید هیدروژن فاز یک و دو پالایشگاه امام‌خمینی(ره) شازند

شرکت پالایش نفت امام‌خمینی(ره) شازند دارای دو واحد تولید هیدروژن یکی با ظرفیت ۵۰ میلیون فوت مکعب در روز (فاز یک) و دیگری با ظرفیت ۱۳۵ میلیون فوت مکعب در روز (فاز دو) است.



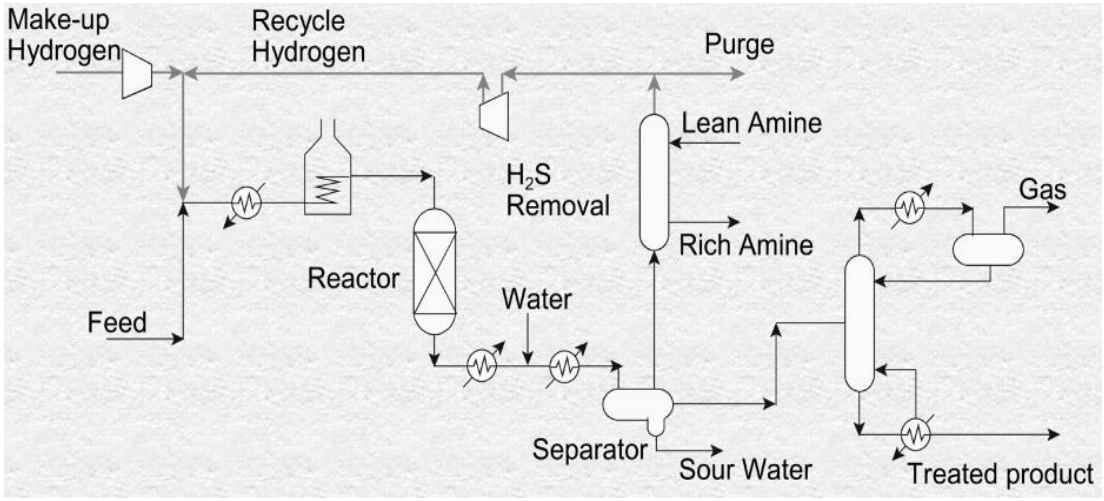
شکل ۱- دیاگرام فرایند واحد تولید هیدروژن [۵]

در این واحدها با استفاده از واکنش گاز طبیعی و بخارآب در دمای حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد هیدروژن مورد نیاز واحدهای پالایشی به‌ویژه واحدهای تصفیه هیدروژنی تولید می‌شود. پس از تولید گاز هیدروژن جهت افزایش درجه خلوص آن از سیستم جذب تدریجی ناخالصی‌ها تحت فشار PSA استفاده می‌شود که امکان افزایش خلوص گاز هیدروژن تولیدی را تا ۹۹/۹ درصد فراهم می‌نماید. ازنقطه‌نظر عملیات و بهره‌برداری این واحد دربرگیرنده دو بخش اصلی فرایندی تبدیل ریفورمینگ و جذب سطحی است [۵].

۴- شبکه توزیع هیدروژن پالایشگاه امام‌خمینی(ره) شازند

برخی فرآیندها در پالایشگاه‌های نفت، مصرف‌کننده هیدروژن هستند مانند هیدروتریتینگ، هیدروکراکینگ، ایزومریزاسیون و فرایندهای خالص‌سازی (PSA) و در مقابل برخی تولیدکننده هیدروژن هستند (فرایند ریفورمینگ و...)، مجموع این فرایندها شبکه هیدروژن را تشکیل می‌دهند. در شبکه هیدروژن منبع[2] جریانی هست که هیدروژن را در اختیار شبکه قرار می‌دهد. منابع تولید هیدروژن شامل واحدهای تولیدکننده هیدروژن و گازهای زائد حاصل از فرایندهای مصرف‌کننده‌های هیدروژن و یا هیدروژن ورودی به سیستم است.

[1] Tuning
[2] Source



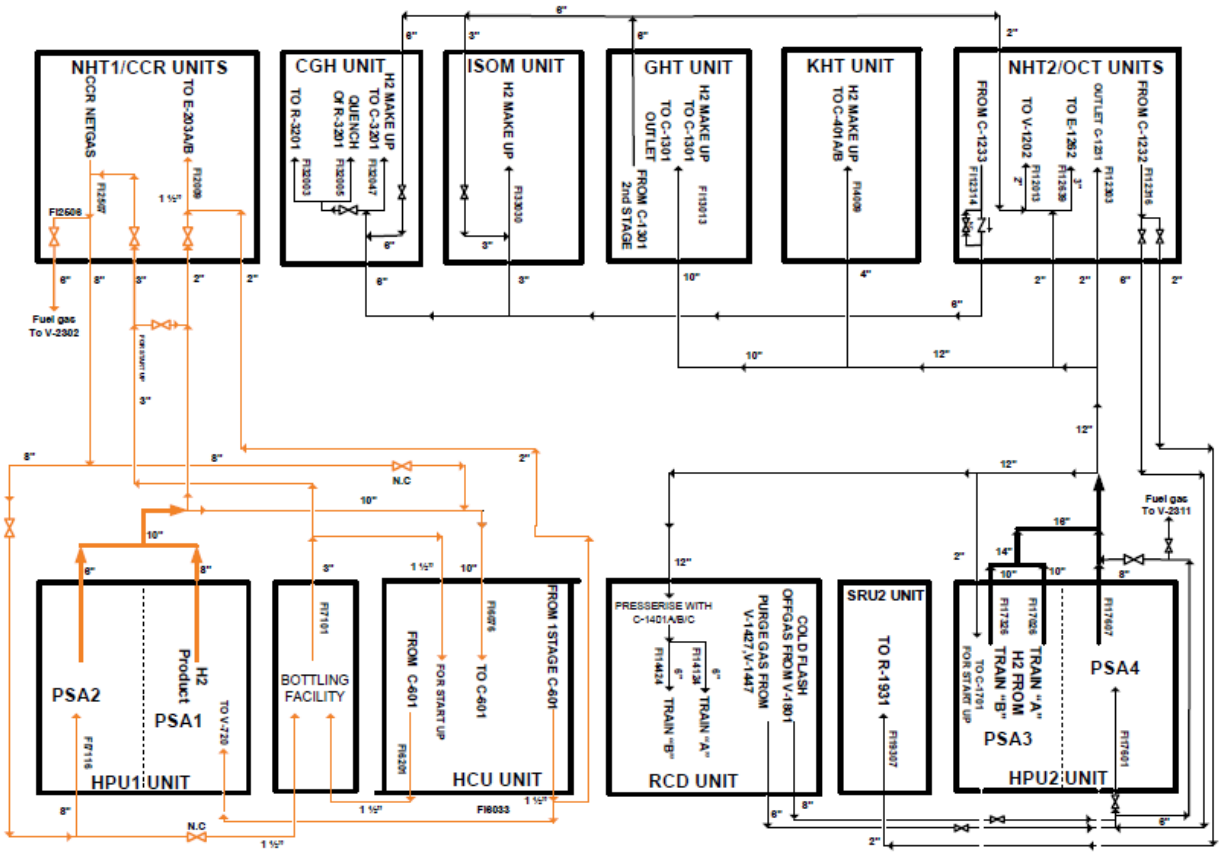
شکل۲- نمایی کلی از واحدهای مصرف‌کننده هیدروژن[۵]

تأمین هیدروژن مصرفی در پالایشگاه اغلب یک گره اساسی برای تولید است و به‌عنوان یک عامل محدودکننده مطرح است. میزان هیدروژن در گازهای سبک گازی به همراه مقادیر فراوانی هیدروژن است که از عمدتاً واحدهای مختلف پالایشگاه جمع‌آوری و نهایتاً به فلر منتقل شده و می‌سوزد. در جدول ۱ لیست کلیه واحدهای تولیدکننده و مصرف‌کننده هیدروژن که باید در مدل کلی توزیع هیدروژن در نظر گرفته شوند، ارائه شده است[۶]. بر اساس داده‌های طراحی شبکه اولیه توزیع هیدروژن در واحدهای فاز ۱ و ۲ پالایشگاه امام‌خمینی(ره) شازند در دیاگرام شکل ۳ ترسیم شده است.

جدول۱- میزان تولید و مصرف هیدروژن واحدهای فرایندی پالایشگاه شازند

Units of Shazand Refinery	H_2 Consumption	H_2 Production	H_2 Purity
	NM^3/hr	NM^3/hr	%mol
NHT1		-	-
CCR	-	34000	91.6
NHT2		-	-
OCT	-	28300	97.3
KHT	3971	-	-
GHT	20913	-	-
CGH	7890	-	-
ISOM	2541	-	-
SRU	0	-	-
HCU	44649	-	-
RCD	82013	-	-
HPU1	-	25664	99.9
HPU2	-	82186	99.9

شکل۳- شبکه اولیه توزیع هیدروژن در واحدهای فاز ۱ و ۲ پالایشگاه شازند (قبل از تغییرات بهینه‌سازی)



۵- محدودیت‌های بهینه‌سازی مصرف هیدروژن

برای بیان مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره، تعداد زیادی محدودیت باید در نظر گرفته شوند، مانند محدودیت‌های مصرف هیدروژن، محدودیت‌های منبع هیدروژن، محدودیت‌های ناخالصی، محدودیت کمپرسورها و محدودیت سیستم خالص‌سازی. متغیرهای عددی برای نمایش کمپرسورها، واحدهای خالص‌سازی و لوله‌های به‌کاررفته و تمامی مسیرهای ممکن موجود بین منابع و مصرف‌کننده‌ها باید در نظر گرفته شوند. به‌عبارت‌دیگر شبکه توزیع هیدروژن با به‌کارگیری امکانات موجود به بهترین نحو و نصب تجهیزات جدید و اصلاح ساختار جریان‌های فرایندی بهینه‌سازی می‌شود تا با کمترین هزینه، بیشترین میزان تولید هیدروژن خالص را تأمین کند [۷].

۶- مدل‌سازی ریاضی شبکه هیدروژن

در مورد رابطه‌ی میان تولیدکننده و مصرف‌کننده هیدروژن در پالایشگاه، محدودیت‌هایی که مصرف‌کننده‌ها به وجود می‌آورند قابل تغییر نیست. درنتیجه منابع تولیدکننده باید هیدروژن کافی در اختیار هر مصرف‌کننده قرار دهند. هر مصرف‌کننده به یک حداقل هیدروژن خالص نیاز دارد تا بتواند تولید معمول خود را داشته باشد، و خلوص هیدروژن در هر مصرف‌کننده باید بیشتر و یا برابر با حداقل خلوص مورد نیاز باشد.

$$\sum_{j} F_{j,k} = F_k \quad \forall j \in J, k \in K \qquad (۱)$$

$$\sum_j F_{j,k}.y_k = F_k.y_k \quad \forall j \in J, k \in K \tag{۲}$$

$$F_k.y_k \geq F_k^{min} \quad \forall k \in K \tag{۳}$$

$$y_k^{min} \leq y_k < 1 \quad \forall k \in K \tag{۴}$$

میزان گاز تولیدی منابع تولیدکننده باید بیش‌تر و یا برابر با مجموع مقدار گازهایی باشد که به سمت مصرف‌کننده‌ها فرستاده می‌شود. که در آن‌ها j منابع هیدروژن و K مصرف‌کننده‌های هیدروژن هستند.

$$\sum_k F_{j,K} \leq F_j \quad \forall j \in J, \quad k \in K \tag{۵}$$

کاتالیست تولید هیدروژن به ناخالصی زیاد احتیاج دارد لازم است ناخالصی منابع و تأثیر آن روی کاتالیست مورد بررسی قرار گیرد. در بهینه‌سازی، ارتباط بین برخی تجهیزات باید محدود شود. محدودیت‌های ناخالصی به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$X_{j,k} = 0 \quad \forall (j,k) \in O_{forbidden} \tag{۶}$$

۶-۱- معادلات موازنه جرم

طبق نظر حلاله و لیو، خالص‌سازها نظیر PSA و جداسازهای غشایی می‌توانند یک مصرف‌کننده در ورودی جریان و دو تولیدکننده (محصول اصلی فرایند و گازهای زائد) داشته باشند [۸]. موازنه شدت جریان و موازنه هیدروژن برای خالص سازها به شرح زیر است.

$$F_{p,f} = F_p^p + F_p^R \quad \forall p \in N \tag{۷}$$

$$F_{p,f}.y_f.R = F_p^p.y_p^p \quad \forall p \in N \tag{۸}$$

$$F_{p,f}.y_f = F_p^p.y_p^p + F_p^R.y_p^R \quad \forall p \in N \tag{۹}$$

$$\sum_i F_{j,p} = F_{p,f} \quad \forall i \in M, p \in N \tag{۱۰}$$

$$\sum_i F_{j,p}.y_i = F_{p,f}.y_f \quad \forall i \in M, p \in N \tag{۱۱}$$

که در آن $F_{p,f}$ شدت جریان ورودی خالص‌ساز p و F_p^R شدت جریان گاز زائد از خالص‌ساز است و F_p^P گاز خالص خروجی از خالص‌ساز است. بازده (R) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R = f\left(F_{p,f}, y_{p,f}, y_p^p\right) \tag{۱۲}$$

این رابطه از روابط تئوری و مطالعات آزمایشگاهی به‌دست آمده است. نتایج آزمایشگاهی معمولاً توسط شرکت‌های سازنده سیستمی خالص ارائه و یا به‌وسیله اطلاعات روزانه آزمایشگاه در پالایشگاه فراهم می‌شود.

۶-۲- محدودیت خلوص و ظرفیت هیدروژن

خلوص خوراک ورودی بین خلوص محصول و گازهای زائد است.

$$y_p^R \leq y_f < y_p^p \tag{۱۳}$$

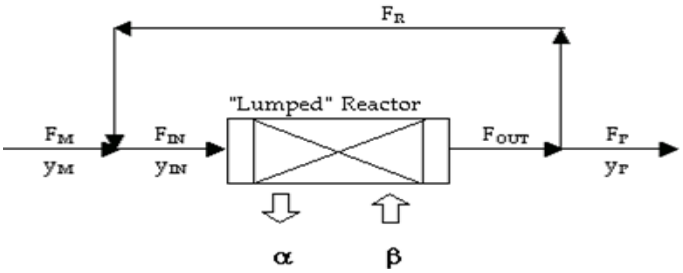
سیستم خالص‌ساز موجود برای شدت جریان مشخصی طراحی شده است و برای هرکدام محدودیت بالاترین شدت جریان تعریف شده است.

$$\sum_i F_{j,p} \le F_p^{max} \quad \forall i \in M, p \in N \qquad (۱۴)$$

همچنین برای هر سیستم خالص‌سازی محدودیت کم‌ترین خلوص جریان ورودی تعریف شده است.

$$y_i \ge y_p^{min} \quad \forall i \in M, p \in N \qquad (۱۵)$$

متغیرهای مصرف هیدروژن در یک راکتور کاتالیستی به‌عنوان یک مدل ساده از واحدهای تصفیه هیدروژنی در پالایشگاه در شکل(۴) نمایش داده شده است.



شکل۴- شماتیک و نمایش متغیرهای مصرف هیدروژن در یک راکتور کاتالیستی [۹]

به‌طوری‌که: F_M شدت جریان گاز جبرانی، Y_Mخلوص گاز جبرانی، F_P شدت جریان گاز زائد خروجی از ظرف جداکننده فشار بالا، Y_P خلوص گاز زائد خروجی از ظرف جداکننده فشار بالا، Y_{IN} شدت جریان گاز ورودی به راکتور، F_{OUT} شدت جریان گاز خروجی از راکتور، Y_R خلوص گاز برگشتی، β شدت خالص هیدروژن مصرف شده و نهایتاً α شدت خالص هیدروژن تولید شده است.

۶-۳- مزایا و برتری‌های مدل‌سازی جدید

برخلاف مدل‌سازی‌های انجام گرفته قبلی که مقادیر Y_Pو Y_R را ثابت و برابر در نظر می‌گرفتند در این مدل جدید این سناریو بر مبنای تعریف پارامتر جدید γ و محاسبه آن با داده‌های حاصل از آنالیز گازهای Purge در واحدهای پالایشی تغییر می‌کند. به‌طوری‌که مقدار Y_R برای واحدهای مصرف‌کننده هیدروژن در پالایشگاه شازند بر مبنای نظر سازندگان کاتالیست در بازه (۰/۹۵-۰/۹) و نیز مقدار پارامتر γ برای هر واحد متفاوت بوده و مطابق محاسبات مهندسی پالایش برای هر واحد و مطابق جداول زیر به‌طور جداگانه محاسبه شده است. مشاهده می‌گردد این پارامتر در محدوده (۰/۵-۰/۲) قرار دارد که قابل‌توجه بوده و دلیل اصلی ایجاد خطا در مدل‌سازی‌های انجام گرفته تا به امروز است به‌طوری‌که در این مدل جدید ضمن در نظر گرفتن آن در معادلات مدل، به‌دلیل رساندن درجه آزادی معادلات مدل‌سازی به صفر، مقدار آن نیز بر مبنای محاسبات و آنالیز گازهای خروجی از واحد محاسبه شده است.

جدول ۲- محاسبه پارامتر جدید γ در واحدهای مصرف‌کننده هیدروژن در پالایشگاه شازند

Units of Refinery	$\gamma = Y_R - Y_P$
NHT1	0.2
NHT2	0.2
KHT	0.2
GHT	0.2

CGH	0.4
ISOM	0.4
HCU	0.4
RCD	0.4

از دیگر فرضیاتی که در مدل‌سازی‌های گذشته ارائه شده و منجر به ایجاد کمی خطا در محاسبات نهایی بهینه‌سازی مصرف هیدروژن می‌گردد یکسان فرض کردن مقادیر Y_m و Y_R است که در این تحقیق بر اساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده در تمامی واحدهای تصفیه هیدروژنی میان پارامترهای فوق همواره اختلاف اندکی وجود دارد که در مدل‌سازی جدید ارائه شده در این تحقیق، مقدار اختلاف این دو پارامتر بر اساس داده‌های متوسط عملیاتی در واحدهای فرایندی محاسبه و در مدل ارائه شده اعمال گردید و می‌توان ادعا نمود که نتایج این مدل‌سازی جدید دارای کمترین خطای محاسباتی بوده و برخلاف مدل‌های گذشته، قابل صرف‌نظر است.

در بخش حل معادلات و مجهولات ارائه شده در مدل بهینه‌سازی پارامتر F_M با استفاده از محاسبات بخش Solver نرم‌افزار اکسل و با معلوم بودن خوراک و مصرف بهینه هیدروژن در هر واحد محاسبه می‌شود که ابتدا با محاسبه پارامترهای α و β برای هر واحد F_P تعیین و با داشتن Y_P, F_p به‌دست می‌آید.

اشاره گردید که مهم‌ترین اشکالی که مدل‌های ارائه شده قبلی دارند این است Y_p در آن‌ها ثابت فرض شده درحالی‌که در مدل ارائه شده اخیر Y_p ثابت نبوده و تابعی از Y_M است یعنی با تغییرات ترکیب درصد ورودی (میزان هیدروژن) با فرض ثابت بودن شرایط دما و فشاری ظروف جداکننده Y_P تغییر می‌کند.

این شرایط از مزایای مدل ارائه شده جدید است و همچنین در مدل‌های ارائه شده قبلی Y_R نیز ثابت فرض شده بود. درحالی‌که مدل ارائه شده Y_R تابعی از Y_M بوده و بر اساس نتایج و داده‌های تجربی به‌دست آمده از واحدهای پالایشگاه است و از رابطه زیر به دست می‌آید. همچنین F_R در این مدل ثابت فرض شده ولی بعد از انجام پروژه باید با منحنی عملکرد کمپرسور چک و مطابقت داده شود. پارامترX معرف میزان انحراف فرمول ارائه شده با استفاده از داده‌های تجربی، برای واحدهای مختلف عملیاتی پالایشگاه بر اساس اطلاعات تجربی محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- محاسبه پارامتر جدید X در واحدهای فرایندی پالایشگاه شازند

Units of Refinery	$X = Y_R - Y_M$
NHT.1	0.01
NHT.2	0.01
KHT	0.01
GHT	0.009
CGH	0.01
SRU	0.01
ISOM	0.01
HCU	0.07
RCD	0.03

۷- نتایج و تحلیل مدل‌سازی

به‌منظور حل معادلات و آنالیز جواب‌های معادلات مدل‌سازی می‌توان با برنامه‌نویسی در نرم‌افزارهایی نظیر Excel در بخش Solver Function بهره گرفت. بر این اساس ابتدا کلیه متغیرها و پارامترهای معادلات مدل‌سازی در نرم‌افزار مطابق با منابع تولید و مصرف هیدروژن در پالایشگاه که داده‌های کامل آن‌ها در جداول ۴ و ۵ ارائه شده، تعریف

گردید. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، منابع تولید هیدروژن و پتانسیل‌های موجود در پالایشگاه به‌طور کامل شناسایی و به همراه میزان خلوص، فشار و دبی جریان بیان شده است. در جدول ۵ نیز منابع مصرف هیدروژن یعنی کلیه واحدهای تصفیه هیدروژنی اعم از هیدروکراکر، تصفیه برش‌های سنگین نفت، واحد تصفیه بنزین، واحد ایزومریزاسیون، تصفیه هیدروژنی نفت سفید و دیزل، واحد بازیافت گازهای زائد و پتروشیمی، به همراه داده‌ها و متغیرهای محاسبه شده برای حل معادلات مدل‌سازی به‌طور جداگانه برای هر واحد ارائه شده است. همچنین واحدهای خالص‌سازی شامل واحدهای PSA شماره ۲ و PSA شماره ۴ هستند. در جدول۶ نتایج حاصل از معادلات مدل‌سازی در نرم‌افزار با در نظر گرفتن امکان و یا عدم امکان اعمال تغییرات جهت بهینه‌سازی شبکه هیدروژن ارائه شده و مطابق جدول مذکور محدودیت‌ها به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

۱: امکان ارتباط غیرممکن است، ۲: به علت مشکل خلوص امکان ارتباط میسر نیست، ۳: با ایجاد مسیر کوتاه امکان اتصال وجود دارد، ۴: به علت محدودیت فشار امکان ارتباط ممکن نیست و نهایتاً ۵: به علت طولانی بودن مسیر امکان ارتباط سخت است.

با مطالعه و ارزیابی دقیق شبکه هیدروژن قبل از اجرای نرم‌افزار محدودیت‌های مذکور تعیین شده و مسیرهای ناممکن قبل از اجرا از اختیار نرم‌افزار در بخش Solver خارج می‌گردد. سپس نرم‌افزار با محدودیت‌ها و معادلات تعریف شده (۱ تا ۱۵) در مدل ریاضی اجرا می‌شود. در صورت تخصیص مقدار به مسیرهای ممکن با امکان‌سنجی و بررسی اقتصادی امکان اجرای مسیرهای جدید جهت بهینه کردن شبکه هیدروژن بر اساس اولویت اجرا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۴- ۱- منابع تولید هیدروژن در پالایشگاه

Source	Q	H_2	P
	NM^3/HR	VOL%	Barg
CCR	34000	91.6	26
HPU	25664	99.9	16.8
HPU(A)	47000	99.9	17.7
HPU(B)	35186	99.9	17.7
OCT	28300	95.7	30
HP PURGE (HCU,LPG)	750	75	23
HP PURGE (RCD)	0	78	18
LP PURGE (HCU,CCR)	1750	40	4
LP. PURGE (NHT,GHT,RCD)	0	80	4.5
HP PURGE (RCD)	0	85	180

جدول ۴- ۲- سیستم خالص‌سازی تولید هیدروژن در پالایشگاه

PSA				
PSA	Prod	H_2	P	Recovery
	NM^3/HR	VOL%	Barg	
H_2 PROD PSA2	26186.7	99.9	22	0.84
PSA2 OFF GAS	7812.9	63.7	0.3	
H_2 PROD PSA4	17061.6	99.9	16.7	0.84
PSA4 OFF GAS	4382.8	74.1	0.3	

جدول ۵- منابع مصرف هیدروژن و محاسبه پارامترهای اولیه مدل‌سازی در واحدهای پالایشی

Sink		Feed	α	ß	H_2 min	Y_p	F_m	F_p	Y_R
		m^3/hr	Nm^3/m^3	Nm^3/m^3	Nm^3/hr	vol%	Nm^3/m^3	Nm^3/m^3	vol%
M1	HCU	170	240	25	44650	0.47	263.1	48.1	0.93
M2	RCD	443	164	7.5	82013	0.72	183.5	27.0	0.97
M3	CGH [SHU]	300	2.4	2.5	1470	0.51	5.0	5.1	0.95
M4	CGH [HDS]	300	17.1	1.33	6420	0.66	22.5	6.6	0.95
M5	ISOM	55	42.5	2.65	2541	0.52	49.7	9.9	0.95
M6	KHT	175	17.6	1.85	3970	0.72	22.5	6.8	0.99
M7	GHT	300	65	0.75	20913	0.85	69.6	5.4	0.99
M8	SRU	0	20	0	0	-	-	-	-
M9	FUEL	-	-	-	-	-	-	-	-
M10	PETRO	-	-	-	5000	-	-	-	-

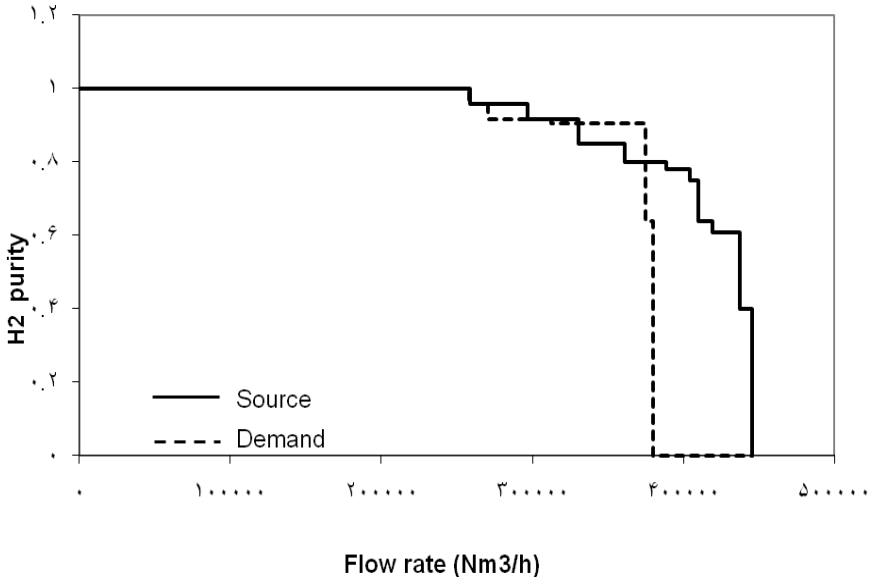
نتایج حاصل از بهینه‌سازی مصرف هیدروژن مربوط به پتانسیل تولید و مصرف هیدروژن در پالایشگاه با استفاده از داده‌های طراحی در جدول ۷ بیان شده به‌طوری‌که دربرگیرنده مقادیر دبی حجمی و درصد خلوص به‌طور جداگانه ارائه شده است. در نمودار شکل ۵ میزان منابع و نیاز هیدروژن پالایشگاه بر مبنای داده‌های طراحی تحت عنوان پتانسیل تولید هیدروژن در پالایشگاه ترسیم شده است.

جدول ۶- نتایج حاصل از نرم‌افزار با در نظر گرفتن امکان و یا عدم امکان ایجاد تغییرات جهت بهینه‌سازی شبکه هیدروژن

Sink	P1	P2	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Source	PSA2	PSA4	HCU	RCD	CGH [SHU]	CGH [HDS]	ISOM	KHT	GHT	SRU	FUEL	PETRO
CCR	34000	3	0	0	0	4	0	2	2	2	0	3
HPU.1	1	1	31374	0	1471	4	4	0	0	3	0	1
HPU.2(A)	1	1	0	52164	4	4	4	0	0	3	0	1
HPU.2(B)	1	1	0	0	4	4	4	3974	20933	3	0	4
OCT	0	19285	0	0	0	6708	2306	2	2	0	3	5
HP PURGE (HCU,LPG)	3	5	2	2	2	2	2	2	2	2	4903	3
HP PURGE (RCD)	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	8680	6
LP PURGE (HCU,CCR)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5740	3
LP PURGE (NHT,GHT,RCD)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5377	5
HP PURGE (RCD)	3	2159	2	0	4	0	394	0	0	0	0	0
PSA2 PRODUCT	1	1	13318	12868	4	4	4	0	0	3	0	1
PSA2 OFF GAS	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	7813
PSA4 PRODUCT	1	1	0	17062	4	4	4	0	0	3	3	1
PSA4 OFF GAS	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	4383	3

جدول۷ - مقادیر بهینه تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌های هیدروژن بر مبنای داده‌های طراحی

NO	SOURCE Stream Name	H_2 Source (inlet)	Flow Rate Nm^3/h	SINK Stream Name	Flow Rate Nm^3/h	H_2 percentage v%
1	HPU.2(A)	75420	99.9	RCD	146600	99.9
2	HPU.2(B)	75420	99.9	GHT	53274	99.9
3	PSA4 PRODUCT	44697	99.9	HCU	48664	99.9
4	HPU.1	32848	99.9	KHT	6364	99.9
5	PSA2 PRODUCT	30644	99.9	CGH[SHU]	3456	99.9
6	OCT	37491	95.7	ISOM	6214	95.7
7	CCR	34000	91.6	CGH[HDS]	5966	95.7
8	HP PURGE.1 (RCD)	30586	85	PSA2	40000	91.6
9	LP PURGE (NHT,GHT,RCD)	27227	80	SRU	1945	91.6
10	HP PURGE.2 (RCD)	16168	78	PSA4	62457	90.6
11	HP PURGE (HCU,LPG)	5475	75	FUEL	0	-
12	PSA2 OFF GAS	9356	63.8	PETRO	5000	63.8
13	PSA4 OFF GAS	17760	60.7			
14	LP PURGE (HCU,CCR)	8413	40			

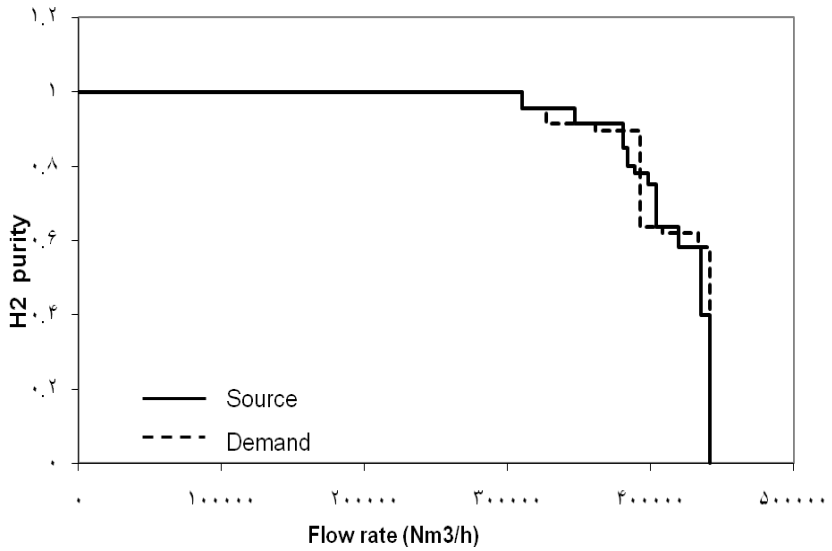


شکل ۵- نمودار میزان منابع و نیاز هیدروژن پالایشگاه بر مبنای داده‌های طراحی

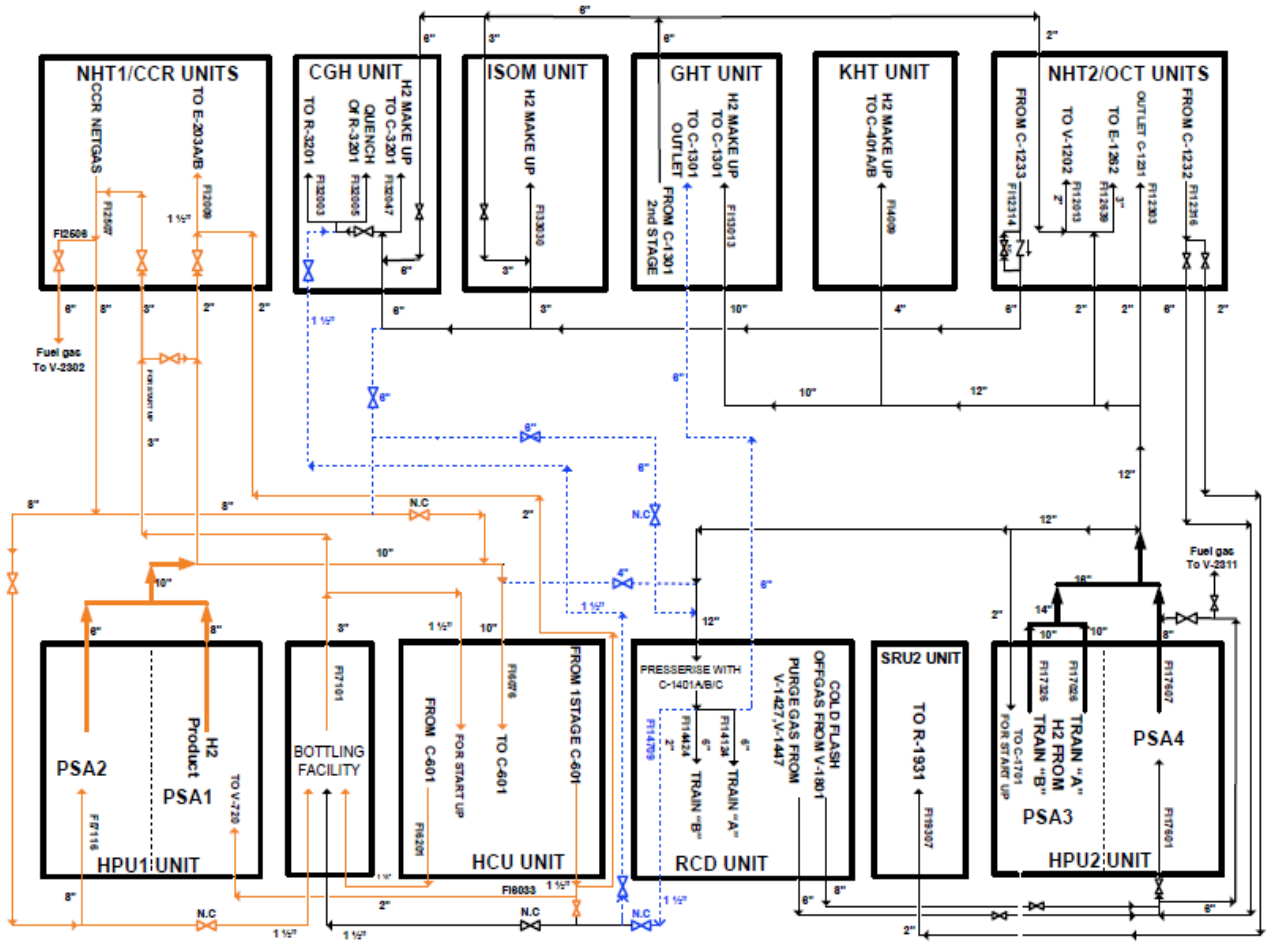
مشابه قبل اما بر مبنای داده‌های واقعی و عملیاتی، نتایج حاصل از بهینه‌سازی مصرف هیدروژن مطابق جدول ۸ محاسبه گردید به‌طوری‌که دربرگیرنده مقادیر دبی حجمی و درصد خلوص به‌طور جداگانه است. در نمودار شکل ۶ نیز میزان منابع و نیاز هیدروژن پالایشگاه بر مبنای داده‌های واقعی و عملیاتی در پالایشگاه ترسیم شده است.

جدول ۸- نتایج حاصل از بهینه‌سازی مصرف‌کننده‌ها و تولیدکننده‌های هیدروژن با اعمال داده‌های واقعی واحدها

NO	SOURCE Stream Name	Flow rate Nm^3/h	H_2 percentage v%	SINK Stream Name	Flow rate Nm^3/h	H_2 purity v%
1	HPU.2(A)	47000	99.9	M1	44733	99.9
2	HPU.2(B)	35186	99.9	M3	1500	99.9
3	PSA4 PRODUCT	26187	99.9	M7	20889	99.9
4	HPU.1	25664	99.9	M6	3946	99.9
5	PSA2 PRODUCT	21217	99.9	M2	81292	99.9
6	OCT	28300	95.7	M5	2736	95.7
7	CCR	34000	91.6	M4	6744	95.7
8	HP PURGE.1 (RCD)	2392	85	P1	34000	91.6
9	LP PURGE (NHT,GHT,RCD)	5280	80	M8	0.10	91.6
10	HP PURGE.2 (RCD)	8135	78	P2	27866	90.6
11	HP PURGE (HCU,LPG)	4923	75	M9	16584	64.0
12	PSA2 OFF GAS	7813	63.8	M10	7800	63.8
13	PSA4 OFF GAS	6649	60.7			
14	LP PURGE (HCU,CCR)	5760	40			



شکل۶- نمودار میزان منابع و نیاز هیدروژن پالایشگاه بر مبنای داده‌های واقعی و عملیاتی



شکل ۷- شبکه جدید توزیع هیدروژن در واحدهای فاز۱ و۲ پالایشگاه شازند (بعد از اعمال تغییرات بهینه‌سازی)

پس از بررسی پتانسیل هیدروژن در این مطالعه ازآنجاکه اضافه کردن کمپرسور و سیستم خالص‌سازی از جهت بالا بودن هزینه اقتصادی، قابل‌اجرا نیستند، تمرکز اصلی بر روی شبکه توزیع و افزودن مسیرهای جدید در راستای بهینه

کردن مصرف هیدروژن قرار داده شد. به همین منظور بر مبنای نتایج بهینه‌سازی و نیز رفع مشکلات فرایندی واحدهای مصرف‌کننده هیدروژن چندین مسیر جدید به شبکه هیدروژن پالایشگاه اضافه گردید که ۲ تا از مسیرها جهت ارتباط مسیرهای اصلی توزیع هیدروژن در فاز یک و دو بوده و در شرایط عملیاتی مورد نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. مسیر سوم که از کمپرسورهای C-601 در واحد هیدروکراکر گرفته شده جهت استفاده از واحدهای ایزومریزاسیون و تصفیه بنزین فاز دو در صورت از سرویس خارج شدن کمپرسور C-1233 در واحد اکتانایزر فاز ۲ و یا در زمان تعمیرات اساسی این واحد مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در دیاگرام شکل شماره ۷ مسیرهای جدید با خط‌چین به‌طور واضح قابل مشاهده است.

۸- نتیجه‌گیری نهایی

در این تحقیق پس از ترسیم و محاسبه شبکه هیدروژن پالایشگاه امام‌خمینی(ره) شازند، پتانسیل تولید و مصرف هیدروژن تعیین شده و پس‌ازآن مدل ریاضی مناسب و جدیدی برای واحدهای مصرف‌کننده هیدروژن پالایشگاه به‌منظور بهینه‌سازی شبکه توزیع ارائه گردید.

با تعیین پارامترهای جدید تعریف شده در راستای افزایش دقت مدل‌سازی، حل معادلات مدل توسط نرم‌افزار Excel، مقادیر بهینه مصرف هیدروژن واحدهای فرایندی پالایشگاه با استفاده از بخش Solver در نرم‌افزار Excel محاسبه و مورد ارزیابی و آنالیز قرار گرفت. همچنین به‌طور جداگانه داده‌های حاصل از شرایط عملیاتی و واقعی مصرف هیدروژن با داده‌های حاصل از شرایط طراحی مقایسه گردید.

شایان ذکر است مدل اخیر تمامی اشکالات و فرضیات اشتباه سایر مدل‌های ارائه شده در این زمینه را مرتفع کرده که در نوع خود اولین مدل ارائه شده و کاربردی در این زمینه است. از نتایج آنالیز حساسیت داده‌های حاصل از مدل نرم‌افزاری نیز مشخص گردید با تغییر در محدوده اندک فشار جزئی هیدروژن مصرفی واحدها، مقدار جریان گردشی ثابت اما در جریان‌های Purge و گاز گردشی تغییر اندکی به وجود می‌آید که محسوس است.

برای ساده‌سازی مدل در فرآیندهای هیدروژنی فرض اینکه تغییر در محدوده اندک فشار جزئی هیدروژن تأثیری روی کارایی مصرف‌کننده‌های هیدروژن در مواردی مانند (درصد محصول، شرایط عملیاتی، جریان و خلوص گاز گردشی) ندارد فرضی قابل‌قبول و مورد تائید سازندگان و کارشناسان فنی کاتالیست است.

اشاره به این نکته مهم است که چنین فرضیاتی باید توسط مهندسین فرآیند مربوطه تائید و برای فرایندهای خاص در پالایشگاه باید فرضیات متفاوتی اعمال شود. در انتهای تحقیق پس از تحلیل نتایج بهینه‌سازی و در راستای رفع مشکلات عملیاتی و فرایندی واحدهای تصفیه هیدروژنی پالایشگاه امام‌خمینی(ره) شازند اقدام به ایجاد تغییراتی در شبکه توزیع هیدروژن از طریق افزودن چندین مسیر جدید به شبکه هیدروژن گردید.

بهره‌برداری از طرح که در طی سال گذشته به‌طور کامل به مرحله اجرا درآمد، منجر به تغییرات عملیاتی مفید و بسیار ارزشمندی در شبکه توزیع هیدروژن گردید که مهم‌ترین دستاورد این پژوهش حاصل از اجرای کامل مدل بهینه‌سازی، عدم نیاز به هیدروژن تولیدی واحد تولید هیدروژن فاز یک در شبکه مصرف هیدروژن پالایشگاه بوده است.

بر اساس برآوردهای اقتصادی، میزان صرفه‌جویی حاصل از بسته شدن واحد مذکور تنها با احتساب صرفه‌جویی در مصرف خوراک گاز طبیعی (حدود ۵ هزار نرمال مترمکعب بر ساعت به قیمت ۲۰ هزار ریال در هر نرمال مترمکعب،

معادل ۸۸۰ میلیارد ریال در سال) و نیز قطع هزینه‌های جاری سالیانه واحد فوق پس از بسته شدن واحد بدون در نظر گرفتن هزینه تعمیرات اساسی و خرید کاتالیست (حدود ۱۰۰۰ میلیارد ریال در سال)، مجموعاً حدوداً ۲ هزار میلیارد ریال در سال خواهد بود و بدون شک یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای صنایع پالایش نفت کشورمان هم ازلحاظ فنی و هم از جهت اقتصادی محسوب می‌شود که در سال جاری با موفقیت کامل محقق گردید.

۹- منابع

[1] Towler G.P., Mann R., Serriere A.J-L., Gabaude C.M.D. "Refinery hydrogen management: Cost analysis of chemically-integrated facilities". Ind. Eng. Chem. Res., 35 (7), pp. 2378-2388, 1996.

[2] M.R Sardashti Birjandi, F. Shahraki, M. Sardashti Birjandi, M. Sinaei, Application of global optimization strategies to refinery hydrogen network, Volume 39, Issue 27, 12 September 2014, pp. 14503-14511.

[3] M. Shariati, N. Tahouni, M.H Panjeshahi, International Journal of Hydrogen Energy 38, 2013, pp. 3257-3267.

[4] M. Khajehpour, F. farhadi, M. Pishvaie, Reduced superstructure solution of MINLP problem in refinery hydrogen management, International Journal of Hydrogen Energy 34(22), 2009, pp. 9233-9238.

[5] W.F.Baade, N.Patel, R.J.Jordan, S.Sekhri, "Integrated Hydrogen Supply –Extend Your Refinery's Enterprise", NPRA Annual Meeting, March (2008).

[6] Fonseca A., Sá V., Bento H., Tavares M. L.C., Pinto G. , Gomes L. A.C.N., "Hydrogen distribution network optimization: a refinery case study", Journal of Cleaner Production, 2009, (16), pp. 1755-1763.

[7] Ahmada M. I., Zhangb N., "Modelling and optimization for design of hydrogen networks for multi-period operation", Journal of Cleaner Production, (18), 9, 2010, pp. 889-899.

[8] Hallale N., Liu F., Refinery hydrogen management for clean fuels production, Advances in Environmental Research, 6, 2001, pp.81-98.

[9] Ding Y., Feng X., Chu K. H., "Optimization of hydrogen distribution systems with pressure constraints" Journal of Cleaner Production, (19), 2-3, 2011, pp. 204-211.