



نقش تکنولوژی پینچ در یکپارچه سازی شبکه هیدروژن و تاثیرات آن بر واحدهای مصرف کننده هیدروژن در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهی

نویسنده اول عمادشاهری دواتگر

1- گروه فنی مهندسی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران Email:

emadshahrokhi1989@gmail.com

امروزه پالایشگاههای نفت در حال اجرا و توسعه پروژههایی هستند تا بتوانند سوخت بنزین و دیزل را در آینده به استانداردها و ویژگیهای قابل قبولی برسانند که جهت رسیدن به این هدف به مصرف بیشتر هیدروژن نیازمندیم و با توجه به تقاضای در حال افزایش برای هیدروژن این اجبار به وجود آمده است که این استانداردها برای سوختهای مذکور مد نظر قرار گیرد. لذا برای برآورده ساختن این تقاضای در حال افزایش که در سطوح گوناگون وجود دارد بعضی از پالایشگاهها و پتروشیمیها در حال اجرای تکنیکی خاص به نام هیدروژن پینچ هستند تا بتوانند با اجرای یک مدیریت کارآمد روی هیدروژن و منابع مختلف تامین آن میزان هزینههای سرمایه گذاری را به حداقل برسانند و با صرفه جویی در این هزینههای کاهش یافته به سود و منفعتی در کوتاه مدت نیز دست یابند و از طرف دیگر نیز توانسته اند هزینههای سرمایه گذاری دراز مدت را نیز کاهش دهند (Smith, 2005).

کلمات کلیدی: صرفه جویی در انرژی، پینچ هیدروژن، مصرف کننده های هیدروژن، پتروشیمی، پالایشگاه

1. مقدمه

در دنیای امروز، تقاضا برای بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی در صنایع فرآیندی به شدت افزایش یافته است. صنایع نفت و پتروشیمی، به عنوان یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی و تولیدکنندگان محصولات با ارزش افزوده بالا، با چالشهای متعددی در زمینه افزایش بهره وری و کاهش هزینههای عملیاتی مواجه هستند. یکی از مواد حیاتی که نقش کلیدی در این صنایع ایفا می کند، هیدروژن است. هیدروژن به عنوان یک واکنش گر و حامل انرژی در فرآیندهایی مانند هیدروکراکینگ، هیدروژناسیون، گوگردزدایی و سایر عملیات پالایشگاهی به کار می رود. به دلیل اهمیت و هزینه بالای تولید هیدروژن، مدیریت و بهینه سازی شبکه های هیدروژنی از اولویتهای مهم در طراحی و بهره برداری از این واحدها محسوب می شود. یکپارچه سازی شبکه هیدروژن به معنای بهبود توزیع و استفاده مجدد هیدروژن در واحدهای مختلف یک پالایشگاه یا مجتمع پتروشیمی است. این کار می تواند منجر به کاهش مصرف خالص هیدروژن، کاهش هزینه های تأمین هیدروژن و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه ای مرتبط با تولید و مصرف آن شود. با این حال، طراحی بهینه شبکه های هیدروژنی چالشی پیچیده است که نیاز به ابزارهای تحلیلی و روش های پیشرفته دارد.



یکی از روش‌های پیشرفته که در سال‌های اخیر توجه زیادی به خود جلب کرده است، تکنولوژی پینچ (Pinch Technology) است. این تکنولوژی که در ابتدا برای بهینه‌سازی شبکه‌های تبادل حرارت توسعه یافته بود، اکنون به‌طور گسترده‌ای در بهینه‌سازی شبکه‌های مواد مانند هیدروژن نیز به کار گرفته می‌شود. تکنولوژی پینچ با تحلیل جریان‌های حرارتی و جرمی در یک سیستم، نقاط بهینه‌ای را برای کاهش مصرف انرژی، کاهش تلفات و افزایش بازایی منابع شناسایی می‌کند. این تکنیک امکان بهینه‌سازی فرآیندها را به گونه‌ای فراهم می‌کند که از کمترین منابع ممکن برای دستیابی به اهداف عملکردی استفاده شود (Linnhoff, 1993).

در این مقاله، به بررسی تأثیر تکنولوژی پینچ در یکپارچه سازی شبکه هیدروژن و تأثیرات آن بر واحدهای مصرف کننده هیدروژن پرداخته خواهد شد. ابتدا مفاهیم پایه و اصول تکنولوژی پینچ معرفی می‌شود و سپس کاربردهای آن در بهینه‌سازی شبکه‌های هیدروژنی بررسی خواهد شد. همچنین، مزایا و محدودیت‌های این تکنولوژی در بهینه‌سازی مصرف هیدروژن و کاهش هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج حاصل از استفاده از این روش در یک مطالعه موردی ارائه می‌شود تا نشان داده شود چگونه تکنولوژی پینچ می‌تواند به بهبود عملکرد کلی واحدهای هیدروژن کمک کند.

2. واحدهای تولید کننده هیدروژن

قسمت عمده مصرف هیدروژن واحدهای فرآیندی از طریق یکی از دو فرآیند رفرمینگ هیدروکربن‌های سبک (متان) توسط بخار و یا اکسیداسیون جزیی غیر کاتالیستی هیدروکربن‌های سنگین (نفت سوخت) تامین می‌شود. هیدروژنی که از روش بازآرایی هیدروکربن‌ها توسط بخار بدست می‌آید ارزانتر از نوع دیگر است زیرا در بیشتر مناطق قیمت متان از نفت سوخت کمتر است. هیدروژن اضافی مورد نیاز در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها با استفاده از سه فرآیند جداسازی هیدروژن به دست می‌آید. این فرآیندها عبارتند از جذب سطحی با فشار نوسانی (PSA)، سیستم‌های غشایی و جداسازی برودتی (کرایونیک) که به وسیله‌ی آنها از جریان‌های مختلف گازهای خروجی واحدها و هم چنین از گاز سنتز خام واحدهای تولید مستقیم هیدروژن، هیدروژن را با خلوص بالایی بازیافت می‌کنند.

گاز طبیعی عمده ترین ماده اولیه برای تولید هیدروژن می باشد، چون به صورت گسترده ای قابل دستیابی بوده و در خیلی از کشورها مقرون به صرفه است. بسته به فن آوری تولید، مواد خام دیگری مثل گازهای نفتی مایع شده (LPG)، نفت سوختی سنگین، نفتا، کک و زغال سنگ نیز می توانند استفاده شوند. با حرکت از گاز طبیعی به سمت هیدروکربن‌های مایع و مواد اولیه جامد، عملیات مشکل تر شده و هزینه‌های تولید افزایش می یابند. آب یک واکنش دهنده ضروری برای تولید هیدروژن در هر دو روش رفرمینگ بخار و اکسیداسیون جزیی می‌باشد و وقتی خوراک فرآیند از مواد سنگین تر مورد استفاده قرار گیرد، منبع اصلی هیدروژن در تولید می باشد. اگر چه فرآیندهایی وجود دارند که هیدروژن را مستقیماً از آب استخراج می کنند ولی از لحاظ انرژی مقرون به صرفه نبوده و رایج نمی‌باشند.

قسمتی از هیدروژن مورد نیاز از واحد رفرمینگ کاتالیزوری تامین می شود. به طور کلی هیدروژن به عنوان محصول فرعی عمل رفرمینگ می باشد. رفرمینگ کاتالیزوری یکی از واحدهای اساسی هر پالایشگاه است، که هدف آن افزایش عدد اکتان بنزین، و افزایش راندمان تولید بنزین و ترکیبات قابل اختلاط با آن است. به همین دلیل، به فرآیند اکتان معروف است (McQueen et al., 2020).



3. تعدادی از واحدهای مصرف کننده هیدروژن

1-3 فرآیند تصفیه هیدروژنی

در نفت خام و برش های نفتی، مقداری ترکیبات گوگردی، نیتروژن دار، اکسیژن دار، فلزات و ترکیبات سیر نشده وجود دارند که میتوانند نقش مهمی در آلودگی محیط زیست، مسمویت های کاتالیزورها، خوردگی دستگاه ها و غیره داشته باشند. از جمله اهداف این واحد می توان به، حذف گوگرد و نیتروژن، اشباع اولفین ها و آروماتیک ها و حذف فلزات (مانند آهن، نیکل، وانادیوم)، اشاره نمود. به طور کلی، هدف اصلی این واحد، حذف ناخالصی ها از جریان های فرآیندی می باشد.

2-3 فرآیند شکست هیدروژنی (آیزوماکس)

هدف از این عملیات، حذف ناخالصی ها و بهبود کیفیت خوراک ورودی (همانند عملیات تصفیه هیدروژنی) بوده، به علاوه از هیدروژن جهت شکستن مولکول های سنگین خوراک و تشکیل محصولات با نقطه جوش پایین تر، استفاده می شود. واحد شکست هیدروژنی در قیاس با واحد تصفیه هیدروژنی، شرایط عملیاتی سخت تری دارد، هم چنین، میزان مصرف هیدروژن در واحد شکست هیدروژنی، از واحد تصفیه هیدروژنی بیشتر است. عملیات شکست هیدروژنی، به صورت ترکیبی از عملیات شکست کاتالیستی و هیدروژن دار کردن ترکیبات می باشد. عمل شکست کاتالیستی، پیوند کربن-کربن را می شکند و عمل هیدروژنه کردن، هیدروژن را به باند دوگانه کربن-کربن اضافه می کند.

3-3 فرآیند هیدروپروسسینگ

عمل هیدروپروسس خوراک و محصولات، عملی است که از طریق یک واکنش، هیدروژن مصرف می کند. این فرآیند ها برای خالص سازی و بهبود و اصلاح محصولات مختلف از جمله بنزین (گازوئیل)، نفتا، محصولات میان تقطیر، نفت گازی تحت خلاء، جریان های باقی مانده پالایش سنگین به کار می رود. میزان مصرف هیدروژن، بسته به کیفیت خوراک و سختی عملیات می تواند متغیر باشد.

4-3 فرآیند ایزومریزاسیون

در عملیات ایزومریزیشن، واکنش در حضور هیدروژن (جهت کاستن میزان تشکیل کک)، صورت می گیرد. همان طور که اشاره شد حضور هیدروژن باعث کم شدن میزان کک تشکیل شده در فرآیند می شود. این فرآیند باعث افزایش عدد اکتان نفت سبک می شود. این فرآیند با نو آرایی نرمال الکان های سبک (6C و 5C) به فرم شاخه دار (ISO) باعث می شود تا تغییر عمده ای در عدد اکتان این ترکیبات به وجود آید و به صورت چشم گیری افزایش یابد. این واکنش بر روی یک فلز نادر (مانند پلاتین) که بر روی یک پایه قرار دارد، صورت می گیرد.

5-3 فرآیند تولید روغن های روان ساز

این فرآیند از چهار مرحله تشکیل شده است، ابتدا خوراک (باقی مانده تقطیر) وارد واحد آسفالت زدایی به کمک پروپان می گردد. در این واحد، آسفالت از خوراک جدا می شود. خوراک آسفالت زدایی شده، به همراه گازوئیل خلاء وارد فرآیند



استخراج به کمک حلال می شوند، در این فرآیند، آروماتیکها از ترکیب خوراک خارج می شوند. در مرحله سوم، محصول واحد استخراج، وارد فرآیند واکس زدایی می شود. واکس (چربی ها) به کمک فرآیند شکست هیدروژنی خارج می شوند و نهایتاً در مرحله چهارم محصول واحد واکس زدایی، وارد فرآیند تکمیل می شود که در واحد های فرآیندی مدرن این عملیات، توسط فرآیند تصفیه هیدروژنی صورت می پذیرد. بنابراین پروسه تولید روغن های روان کننده، مصرف کننده ی هیدروژن می باشد.

4. طراحی شبکه هیدروژن

در پالایشگاه ها و پتروشیمی ها، علاوه بر شبکه جریان های مایع، شبکه جریان های گاز غنی از هیدروژن (شبکه هیدروژن) نیز وجود دارد. این شبکه از فرآیند های تولید کننده (چشمه ها) و مصرف کننده هیدروژن (چاه ها) تشکیل شده است. تامین هیدروژن مورد نیاز اغلب به عنوان گره ی تولید و عامل محدود کننده افزایش ظرفیت، مطرح است. میزان هیدروژن در گاز های تخلیه، حدوداً 80 درصد می باشد. این گاز ها، مخلوطی از هیدروکربن های سبک گازی به همراه مقادیر فراوانی هیدروژن می باشند. قسمت اعظم هیدروژن مصرفی در واحدهای فرآیندی امروزی، توسط واحد رفرمینگ کاتالیستی، تولید می شود. شبکه توزیع هیدروژن، به صورت آبشاری از واحدهای چند گانه ی پردازش هیدروژنی، می باشد که در آن، مصرف کننده های سطوح بالاتر خلوص و فشار هیدروژن، گاز های خروجی خود را، به مصرف کننده های سطوح پایین تر می فرستند. نهایتاً گاز های خروجی که حاوی هیدروژن باقیمانده هستند، جهت سوخت به واحد مربوطه ارسال می شوند. به علاوه، تعدادی کمپرسور جهت انتقال هیدروژن جبرانی و برگشتی به واحدهای تصفیه هیدروژنی و شکست هیدروژنی، وجود دارد. واحدهای مختلف پردازش هیدروژنی، با مصرف هیدروژن، باعث حذف گوگرد و نیتروژن می شوند. این واحدها، سبب کاهش آروماتیک های اشباع، در جریان مایع پالایشی شده، و به طور کلی، نقطه جوش ترکیبات را کاهش می دهند. گزینه های استفاده بهینه و سودمند از گاز های تخلیه، عبارتند از: 1. ارسال مستقیم به فرآیند های کم فشار 2. ارسال به فرآیندهای پرفشار پس از تراکم پذیری توسط کمپرسور 3. اختلاط با جریان های فرآیندی، جهت افزایش دبی جریان ها 4. افزایش خلوص جریان ها توسط واحدهای بازیافت و خالص سازی هیدروژن 5. ارسال به واحد تولید هیدروژن (مانند رفرمینگ متان با بخار) 6. مصرف در واحدهای پشتیبان (مانند جوش آور ها) و نهایتاً ارسال به مشعل (Rostrup-Nielsen and Hansen, 2011).

4-1 تکنولوژی پینچ هیدروژن

واحدهای تولید کننده و مصرف کننده هیدروژن، از طریق شبکه توزیع هیدروژن با یکدیگر در ارتباط هستند. تکنولوژی پینچ هیدروژن، جهت هدف گذاری و طراحی سیستم های هیدروژن در کمترین میزان مصرف هیدروژن می باشد. روال تجزیه و تحلیل های پینچ هیدروژن بدین صورت است که، واحدهای پشتیبان را تحت عبارات کمیت و کیفیت تحلیل کرده تا فرصت های بازیافت درونی شناسایی شده و نهایتاً موجب کاربرد کمینه واحدهای پشتیبان خارجی شود. برای مثال تحلیل پینچ انرژی، کمترین هزینه واحد پشتیبان گرم را شناسایی می کند. این کار از طریق کمینه کردن آبشار حرارتی، از دمای بالا به دمای محیط انجام می شود. در تحلیل های پینچ هیدروژن، آبشار هیدروژن در یک واحد فرآیندی، از واحدهای تولید کننده هیدروژن به سیستم سوخت واحد و یا مشعل می باشد. هنگام به کارگیری شیوه های مدیریت و انتگراسیون هیدروژن در پتروشیمی ها، موارد زیر می بایست در نظر گرفته شوند. (1) مشکلات جامع، (2) تنظیمات عملیاتی مجدد، (3) لوله کشی مجدد، (4) تغییرات در عملکرد کمپرسور، (5) واحد بازیافت، (6) هزینه های عملیاتی و سرمایه گذاری، (7) ناخالصی های هیدروژن، (8) تاثیر خلوص بر راندمان عملیاتی، (9) فعل و انفعالات سوخت گذاری و غیره. چنانچه چشمه ها و چاه های



هیدروژن، به درستی و بر طبق معیارهای صحیح کیفیت، با یکدیگر ارتباط داشته باشند، آبشار کیفیت گاز (هیدروژن) از بالا به پایین، می تواند کاهش یافته و حتی حذف شود. بدین وسیله، میزان خرید گازهای جبرانی و هم چنین میزان تلفات، که به مشعل ارسال می شوند و یا به عنوان سوخت کم ارزش، مورد مصرف قرار می گیرند، کمینه می شود. تفاوت اصلی بین پینچ انرژی و پینچ هیدروژن، در چند بعدی بودن پینچ هیدروژن است. در پینچ انرژی، دما تنها پارامتر کیفیت بوده ولی در جریانهای گازی حاوی هیدروژن، کیفیت چند بعدی است. چندین پارامتر لازم است تا کیفیت تعریف شود. در این راستا می توان به، خلوص هیدروژن، ناخالصیهای مخصوص، فشار، میزان گرمایی و غیره، به عنوان پارامترهای تعریف کیفیت اشاره نمود. به علاوه، هیدروژن دارای ارزش مالی مختلفی می باشد که به ذاتِ بارِ فرآیندی آن، در محل داد و ستد بستگی دارد. تمام روشهای بهینه سازی تولید و مصرف هیدروژن، می بایست، به طور هم زمان، تمامی پارامترهای وابسته به کیفیت را بهینه سازد. گام دوم در بهینه سازی، تحلیل پینچ هیدروژن است که در آن، بر اساس تعداد معیار وابسته به کیفیت، منحنیهای پینچ هیدروژن، ترسیم می شوند. این منحنیها برای هر پارامتر کیفیت، ترسیم می شوند. و به مهندس یک درک اولیه از طبیعت مساله می دهند. تکنیکهای پینچ هیدروژن، جهت بهینه سازی تعادلهای هیدروژن و کمینه سازی میزان هزینه سرمایه گذاری به کار می روند. اگر چه این تکنیکها، دیدگاههای ارزشمندی را پیشنهاد می کنند ولی تارگتهای پیشنهادی می توانند بسیار خوش بینانه بوده و اساساً ناصحیح باشند (Linnhoff, 1993).

4-2 ملاحظات طراحی شبکه توزیع هیدروژن

هنگام طراحی شبکه توزیع هیدروژن در پالایشگاه ها و پتروشیمی ها، تقابل بین عوامل مختلف طراحی، می بایستی در نظر گرفته شود. از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- تراکم فرآیندها در مقابل تراکم شبکه.

۲- انعطاف پذیری فرآیندها در مقابل هزینه های سیستم.

۳- بهره بازیافت در مقابل هزینه های بازیافت هیدروژن.

۴- هزینه های بازیافت هیدروژن در مقابل هزینه های فشرده سازی.

معمولاً از شبکه طراحی هیدروژن، جهت بهبود عملکرد فرآیندها استفاده می شود. می توان توسط یک شیوه منظم (پینچ هیدروژن)، سیستم توزیع هیدروژن را طراحی کرد. تغییر در نوع خوراک و یا تغییر در مشخصه های محصول، باعث تغییر در مصرف هیدروژن می شود. جهت بهبود عملکرد سیستم هیدروژن، خلوص هیدروژن در فرآیندها می بایست ثابت نگه داشته شده و میزان هیدروژن جبرانی و اتلاف گازهای تخلیه کاهش یابد. به علاوه، میزان بازیافت می تواند ثابت در نظر گرفته شود. جهت بهبود عملکرد یک فرآیند، خلوص هیدروژن می بایست افزایش یابد. به عبارت دیگر، با کاهش میزان بازیافت، سیستم بهبود یافته و با افزایش فشار جزئی هیدروژن، سرعت واکنشها افزایش می یابد (Smith, 2005).

4-3 انتگراسیون گازهای خروجی پالایش با چشمه های هیدروژن



جریان‌های غنی از هیدروکربن، پس از پیش تصفیه شدن، جهت حذف مقادیر غیر قابل قبول گوگرد، اولفین و کک می‌توانند به عنوان قسمتی از خوراک واحد رفرمینگ، مورد مصرف واقع شوند. گازهای خروجی پالایش، مانند گازهای واحدهای کک سازی، ایزومریزاسیون، فلکسی ککر، هم چنین بوتان، پروپان و گازهای خروجی از واحدهای پردازش هیدروژنی، به عنوان خوراک‌هایی مطرح هستند که اخیراً به عنوان مکمل گاز طبیعی مورد مصرف قرار می‌گیرند. خوراک واحد هیدروژن شامل، 5 الی 60 درصد هیدروژن، اولفین‌ها (به میزان 10 درصد) و باقیمانده هیدروکربن‌های سنگین (به همراه 5 درصد) هیدروکربن‌های پنج کربنه (C_5^+) می‌باشد. گاز نفت مایع، به عنوان یک خوراک جایگزین می‌باشد که می‌تواند از قطع جریان گاز طبیعی، جلوگیری به عمل آورد. به طور معمول، 800 الی 1000 بشکه در روز از این گاز می‌تواند حدود 11 هزار متر مکعب در ساعت هیدروژن تولید کند. خوراک طراحی شده واحد جذب با نوسانات فشار، شامل 72 درصد هیدروژن به همراه هیدروکربن‌های پنج کربنه (C_5^+)، ناخالصی‌های سولفید هیدروژن (H_2S) و آمونیاک بوده و محصول این واحد، هیدروژن با خلوص بالای 99/9 درصد است.

واحد جذب با نوسانات فشار، حاوی چندین جاذب بوده که به صورت پی در پی آرایش یافته‌اند. این امر سبب می‌شود که میان بازیافت هیدروژن و عمر جاذب، تعادل برقرار شود. شرایط خوراک نسبت به محتوی هیدروژن درونی خود، متغیر بوده و در محدوده 72 الی 85 درصد قرار دارد. تنظیم‌های دوره‌ای خودکار (تا هنگامی که از حضور ناخالصی‌ها در ترکیب خوراک، ممانعت به عمل می‌آورند) می‌تواند عملکرد این واحد را بهینه سازد. تغییرات ترکیب خوراک، گاهی به نوسانات بنزن، تلوتن و زایلن (BTX) در گاز دنباله سوختی مربوط می‌شود. گاز باقیمانده و هیدروژن در کمپرسورها فشرده شده و به پالایشگاه برگردانده می‌شود. انتظار می‌رود که، برای خوراک‌های هیدروکربنی سبک، تکنولوژی رفرمینگ بخار، به عنوان تکنولوژی تولید هیدروژن در پتروشیمی، باقی بماند. این تکنولوژی، ساده و کارآمد بوده و انعطاف پذیری زیاد آن هنگام عمل با خوراک‌های هیدروکربنی سبک متفاوت، به خوبی اثبات شده است. این واحدها گاهی می‌توانند طوری آرایش یابند که بخار، برق و یا دی اکسید کربن را به عنوان محصول فرعی خود تولید کنند. ارزش دهی صحیح به محصولات فرعی، می‌تواند هزینه تولید هیدروژن را به میزان 10 درصد کاهش دهد. اکسیداسیون جزئی باقیمانده‌های سنگین و کک نفت، در شرایط خاص، می‌تواند هیدروژن را با هزینه کمتر از واحد رفرمینگ بخار تولید کند. فاکتورهای کلیدی در این ارزیابی عبارتند از؛ (1) هزینه‌های نصبی خوراک (2) اکسیژن و گاز طبیعی. خوراک‌های سنگین در قیاس با گاز طبیعی، به طور عمده، از ارزش سوختی پایین‌تری برخوردار هستند. هزینه سرمایه گذاری بالاتر یک واحد اکسیداسیون نسبی را می‌توان به تجهیزات اضافی مربوط به ذخیره سازی و حمل خوراک، بازیافت دوده و فلز، بار افزوده انتقال گاز آب، تجهیزات اضافی در محاسبه منابع قابل اطمینان و بازیافت یا حذف گوگرد نسبت داد. بسته به ارزش مشخص شده خوراک، این هزینه‌های سرمایه گذاری بالاتر و هزینه اکسیژن، می‌توانند از سود ناشی از کمتر بودن هزینه خوراک سنگین تر باشند، که نتیجه آن، بالاتر بودن هزینه جامع تولید هیدروژن است.

4-4 تئوری پینچ هیدروژن و هزینه بازیافت

جهت بررسی و تحلیل توزیع منابع هیدروژن با استفاده از تکنیک‌های مشابه با آنالیز پینچ، باید نیروی محرکه در انتقال بار هیدروژن از فرآیند‌های تولید کننده هیدروژن (چشمه) به فرآیند‌های مصرف کننده هیدروژن (چاه) مشخص گردد. در شبکه‌های مبدل‌های حرارتی (پینچ حرارتی)، شرایط لازم جهت انتقال حرارت، بالاتر بودن دمای جریان گرم از دمای جریان سرد می‌باشد. گازی که شامل هیدروژن است، می‌تواند کاملاً خالص‌سازی شده و در واحد‌های مصرف کننده هیدروژن مصرف گردد. البته این عمل در صورت بالا بودن هزینه بازیافت، منتفی است.



در بازایافت هیدروژن، نیروی محرکه بر اساس مسائل اقتصادی معین و تعریف می شود. با تغییر مصرف هیدروژن در فرآیندهای مصرف کننده، ارزش افزوده محصول ممکن است تغییر نماید. بنابراین، اختلاف هزینه بازایافت و ارزش افزوده، بیانگر یک نیروی محرکه در انتقال و بازایافت هیدروژن می باشد. بازایافت هیدروژن در صورتی انجام می شود که یک انگیزه اقتصادی جهت انجام آن وجود داشته باشد. به این معنی که قیمت تمام شده محصول در یک فرآیند مصرف کننده هیدروژن، باید همه هزینه های مربوط به بازایافت هیدروژن را بپوشاند و جبران نماید. هر چه میزان بازایافت تولید هیدروژن بیش تر شود، هزینه مربوط به آن نیز افزایش می یابد.

واحد تولید هیدروژن در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهی، به عنوان یک واحد تسهیلات خارجی عمل می کند که اندازه آن در طراحی ثابت در نظر گرفته می شود. هزینه های تولید هیدروژن از واحد تولید هیدروژن، در واقع، تابعی از قسمت خوراک است و به اندازه بستگی زیادی ندارد. در بسیاری از موارد، هیدروژن، حتی خریداری می شود که در این صورت، قیمت ثابتی، بدون توجه به مقدار، خریداری شده، برای آن در نظر گرفته می شود. اغلب، تمایلی به بازایافت هیدروژن با قیمتی بیشتر از تولید هیدروژن توسط واحد تولید کننده آن وجود ندارد و بنابراین هر ناحیه از منحنی بازایافت هیدروژن که قیمتی بالاتر از واحد تولید هیدروژن دارد، به عنوان بخشی از هیدروژن که بازایافت آن مقرون به صرفه نیست، در نظر گرفته شده و به سیستم سوخت فرستاده می شود. در واقع، ارزش محصول فرآیند بازایافت منهای هزینه خوراک (بدون در نظر گرفتن هیدروژن) و هر هزینه سرمایه ای دیگر و هزینه های عملیاتی، مقدار ارزش افزوده را به دست می دهد که باید همگی بر نرخ مصرف هیدروژن تقسیم شود (2002Alves and Towler).

$$V_{AH} \cdot Q' = \sum_i W_i \cdot P_i - \sum_i V_j \cdot F_j - \sum_k OC_k - CC$$

که در آن:

V_{AH} = مقدرا ارزش افزوده محصول تولیدی به ازاء واحد هیدروژن مصرفی (\$/kmol)

Q' = شدت جریان هیدروژن مصرفی (kmol/day)

P_i = شدت جریان محصول i تولیدی در واحد (m^3/day)

W_i = قیمت محصول i (\$/m³)

F_j = شدت جریان خوراک j مصرفی در واحد (m^3/day)

V_j = هزینه خوراک j (\$/m³)

OC_k = هزینه عملیاتی تسهیلات k مصرفی در واحد (\$/day)

CC = هزینه سرمایه گذاری (\$/day)



هزینه خوراک شامل دو جزء است:

$$V_j = W_c + U_j$$

که در آن:

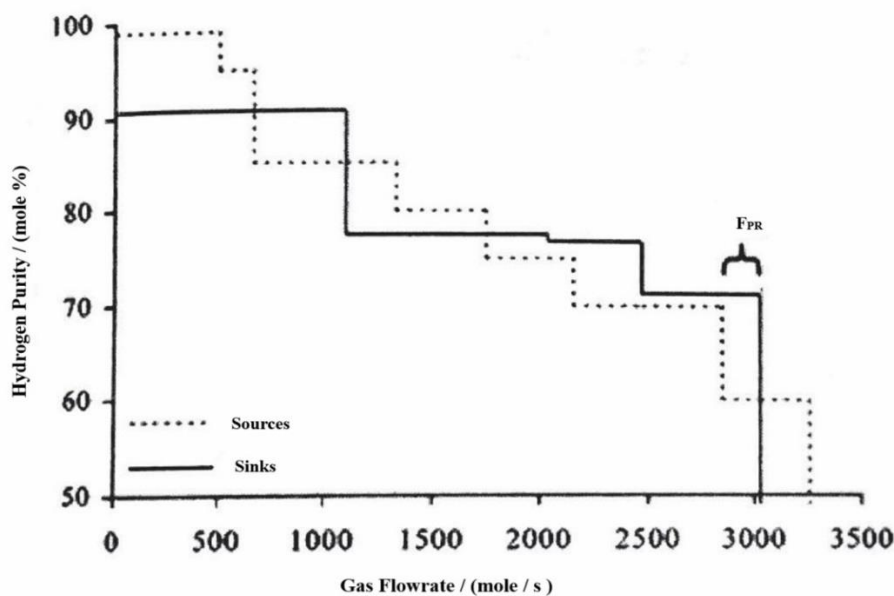
$$W_c = \text{قیمت نفت خام } (\$/m^3)$$

$$U_j = \text{هزینه فرآیندی تحمیلی به واحدهای بالا دستی } (\$/m^3)$$

برای اهداف این مطالعه، هزینه های تقطیر نفت خام و نمک زدایی آن می تواند بین برش های نفتی بر مبنای حجمی تقسیم گردد. هزینه های تقطیر در خلاء نیز می تواند بین گازوئیل خلاء و پسماند تقسیم گردد. مساله قابل توجه این است که این یک مبنای نامناسب است و این که برش های سبک تر پایه، بخش بیشتری از هزینه ها را به خود اختصاص دهند و این یک مساله مهم است و باید هنگامی که این روش به صورت صنعتی به کار گرفته می شود به طور دقیق، مورد ملاحظه قرار گیرد. ولیکن، تخصیص تساوی هزینه در این جا مناسب است. در جایی که، محصولات یک فرآیند، خودشان نسبت به محصولات نهایی، محصول میانی هستند، مثلاً، در هیدروتريتينگ نفتای سنگین، قبل از تبدیل کننده کاتالیستی، ارزش محصول با در نظر گرفتن هزینه های واحدهای پایین دستی با یک روش مناسب به دست می آید. برای مثال، در مورد هیدروتريتر نفتا، ارزش محصول، به صورت ارزش قیمت بنزین منهای هزینه های تبدیل کننده کاتالیستی به دست می آید و اثر استفاده از روش های متفاوت جهت ارزیابی جریان های میانی در زیر توضیح داده خواهد شد. ارزش افزوده به ازاء واحد هیدروژن مصرفی برابر سود کل سود عملیاتی فرآیند با در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی و هزینه سرمایه ای بدون در نظر گرفتن هزینه هیدروژن مصرفی می باشد. اگر هزینه خوراک هیدروژن ورودی به فرآیند کم تر از ارزش افزوده باشد، در این صورت، فرآیند قادر به تولید سودی اضافه بر سود موجود، می باشد. برای یک فرآیند معمول، اغلب به استفاده از مقدار مینیمم خاصی از هیدروژن نیاز است و میزان ارزش افزوده به ازاء واحد هیدروژن در سطوح بالاتری از مصرف هیدروژن، کاهش می یابد (به عنوان مثال، در هیدروتريتينگ در صورتی که مقدار گوگرد، کم تر از حد مرود نیاز شود، سرمایه برگشتی افزایش نخواهد یافت) می توان (مشابه با منحنی های آمیخته حرارتی) در هر فاصله هزینه ای، منحنی های هزینه کلیه منابع هیدروژن در پتروشیمی را، با افزوده مقدار هیدروژن در دسترس در هر فاصله، با یکدیگر ترکیب نموده و به این ترتیب منحنی آمیخته منبع هیدروژن (چشمه) به دست می آید. به صورت مشابهی با ادغام منحنی های مصرف کننده، منحنی آمیخته مصرف کننده ها (چاه) به دست می آید که در هر دو منحنی را در یک گراف می توان رسم نمود (2002Alves and Towler).

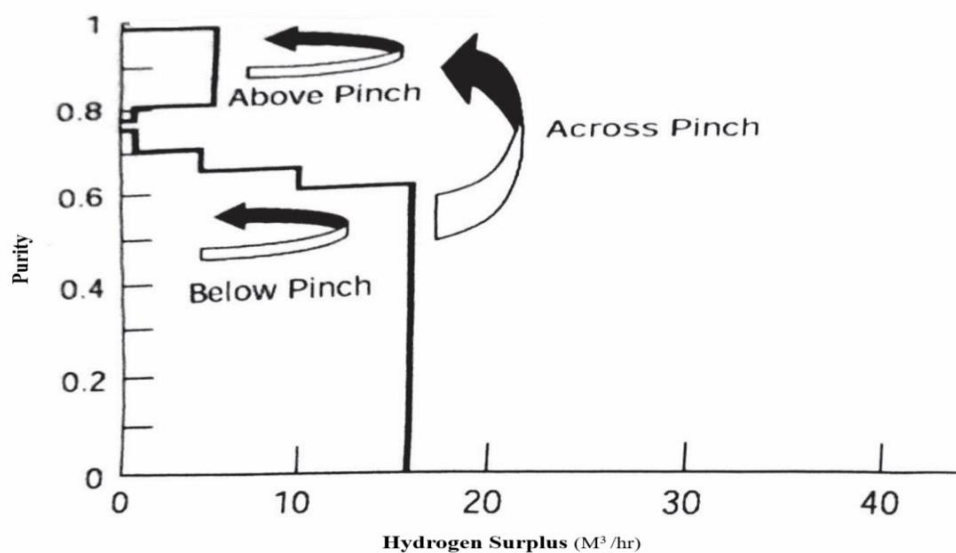
5-4 پینچ هیدروژن

پینچ هیدروژن در انتهای یک محدوده در پروفایل خلوص، جایی که کمبود هیدروژن وجود دارد، اتفاق می افتد. این نقطه، با یک پیوستگی در منحنی چاه، جایی که یک چاه هیدروژن که در بالای منحنی چشمه قرار دارد خاتمه پیدا می کند و چاه دیگر در زیر منحنی چشمه شروع می شود، مطابقت دارد (شکل 1).



شکل 1- تعیین نقطه پینچ در نمودار مازاد هیدروژن

به دلیل ناپیوستگی مذکور در منحنی چاه، یک ناحیه عمودی در مازاد برابر صفر، پینچ را نتیجه می دهد (شکل 3). این ناحیه، بین مقادیر خلوص چشمه هیدروژن در نقطه پینچ و چاه هیدروژن بعد از پینچ است. این مفهوم، مبین این حقیقت است که پینچ، سیستم توزیع کلی هیدروژن را به یک بخش بالای نقطه پینچ و یک قسمت پایین نقطه پینچ تقسیم می کند.



شکل 3- نقطه پینچ و منطقه بالا و پایین پینچ



خلوص هیدروژن در نقطه پینچ، عبارت است از خلوص منبع هیدروژن در نقطه پینچ است. میزان مازاد هیدروژن در بالاترین خلوص برابر صفر است. میزان مازاد هیدروژن در بالاترین نقطه خلوص، عبارت از مازاد در شدت جریان صفر که همواره برابر صفر خواهد بود (مطابق معادله 1). به این دلیل که نقطه هرگز نمی تواند H مثبت داشته باشد، با توجه به موجودی صفر هیدروژن، این نقطه یک پینچ نیست. ولیکن، نقطه پینچ می تواند در بالای شبکه واقع شود. در این حالت، دیاگرام مازاد هیدروژن ناحیه ای را در میزان مازاد برابر صفر نشان می دهد که از خلوص منبع اولیه شروع و به خلوص نزدیکترین چاه خاتمه می یابد. شرط تحلیلی برای وجود نقطه پینچ عبارت است از:

$$\exists F_{Pinch} \in [0, F_{SK}]: H = \int_0^{F_{Pinch}} (y_{SR} - y_{SK}) dF = 0 \quad (1)$$

که در آن F_{Pinch} عبارت است از شدت جریان در جایی که انتگرال فوق صفر است، یعنی در نقطه پینچ، ناحیه بالای نقطه پینچ شامل برگشتی پینچ است که عبارت است از بخشی از چشمه هیدروژن با خلوص پینچ که متعلق به ناحیه بالای نقطه پینچ است. شدت جریان برگشتی پینچ یا F_{PR} ، بیانگر مقدار گاز خروجی است که باید جهت دست یابی به مقدار نهایی هیدروژن مورد نیاز، از منبع تولید کننده هیدروژن در نقطه پینچ به وسیله چاه ها یا فرآیندهای مصرف کننده بالای نقطه پینچ مورد استفاده مجدد قرار گیرد. اگر اضافه بر این مقدار، گاز زیر نقطه پینچ در بالا دوباره استفاده شود، در این صورت، باید جهت دستیابی به موازنه جرم، به همان مقدار، از گازی که با خلوص بالاتر در بالای نقطه پینچ است به چاه زیر نقطه پینچ ارسال گردد. این عمل، مازاد هیدروژن بالای پینچ را کاهش می دهد و جهت عملی نگه داشتن سیستم، باید جریمه ای در تامین هیدروژن پرداخته شود. بنابراین، یک قانون ساده جهت طراحی یک سیستم هیدروژن در تامین میزان نهایی مینیمم هیدروژن این است که گاز، هرگز نباید در عرض نقطه پینچ تبادل شود. این موضوع، راهنما و دستور العمل اصلی طراحی است که با روش هدف گذاری به دست آمده است. این مفهوم، با قانون طراحی پینچ در آنالیز شبکه مبدل های حرارتی مطابقت کند (Alves and Towler, 2002, Zhao et al., 2006).

4-6 یافتن مقدار نهایی هیدروژن مورد نیاز (هدف)

در روش اعمالی جهت محاسبه هدف تامین، نیاز است که شدت جریان گاز تامین شده برای سیستم تا زمانی که پینچ هیدروژن یافت نشده است، متغیر باشد. تعداد کمی از منابع هیدروژن در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهی شدت جریان های متغیر دارند. جریان های حاوی هیدروژن خروجی از فرآیندهای مصرف کننده هیدروژن، شدت جریان هایی دارند که با عملیات نرمال این فرآیندها تعیین می شود. این شدت جریان ها با بهینه سازی پتروشیمی یا پالایشگاه تعیین خواهد شد و می توان آن ها را برای مساله طراحی شبکه هیدروژن، ثابت فرض کرد. واحدهای خالص ساز، اغلب هزینه های عملیاتی پایین دارند و به محض نصب، باید در ماکزیمم ظرفیت عمل کنند. بنابراین جریان های گاز خروجی از آنها نیز منابع ثابتی از هیدروژن می باشند. منابع هیدروژن که نسبت به شدت جریان انعطاف پذیرند آن هایی هستند که از منابع خارجی وارد می شوند و فرآیندهایی که هیدروژن را به عنوان محصول اصلی تولید می کنند (تبدیل کننده بخار یا واحدهای اکسیداسیون نسبی). این منابع واحدهای تسهیلاتی هیدروژن عمل می کنند.

روش هدف گذاری برای یک سیستم عملی که در ابتدا در راندمان پایین عمل می کند یا برای یک سیستم شامل مجموعه ای از چشمه ها و چاه ها که در ابتدا غیر عملی بوده است شبیه به هم است. به این صورت که، با ماکزیمم شدت جریان همه



تسهیلات باید شروع کرد و یکی از پر هزینه ترین آن ها را مینیمم نمود. اگر این یوتیلیتی قبل از این که سیستم در میزان مینیمم هیدروژن مورد نیاز قرار گیرد، حذف شود، در این صورت، این روش با مینیمم سازی شدت جریان یوتیلیتی بعدی ادامه می یابد. کاهش شدت جریان یوتیلیتی را تا زمانی که نقطه پینچ در دیاگرام مازاد هیدروژن به دست می آید نشان می دهد (Alves and Towler, 2002).

5. نتیجه گیری

بهینه سازی شبکه هیدروژن به دلایل زیر از اهمیت به سزایی برخوردار است:

۱- بیشینه ساختن میزان تولید سوخت های حمل و نقل با ارزش.

۲- کمینه ساختن هزینه سرمایه گذاری در جهت تولید سوخت های پاک، و به طور کلی، افزایش دادن میزان سود دهی.

می بایست ارزش هیدروژن درون گازهای خروجی را به خوبی درک کرده تا بتواند خلوص مورد نیاز عملیات پردازش درونی را بهبود بخشند. به علاوه آنها می بایست گزینه های جدید تولید هیدروژن را در نظر داشته باشند. راه های بهینه ای که در این راستا می توان به آن ها اشاره نمود، عبارتند از: 1. قرارگیری تجهیزات جدید و پیشرفته خالص سازی و بازیافت هیدروژن. 2. یکپارچگی گازهای خروجی و گاز نفت مایع با هیدروژن تولیدی. 3. یکپارچگی فرآیند های پالایشگاهی با عملیات پتروشیمی. 4. بهبود راندمان واحد هیدروژن. 5. گسترش و یا جایگزینی ظرفیت موجود واحد تولید هیدروژن. 6. فراهم آوردن هیدروژن جدید، توسط خطوط لوله.

جهت مدیریت صحیح در مصرف هیدروژن، می بایست نکات زیر را در نظر گرفت:

1. درک سیستم هیدروژن، زیرا فهم صحیح از شبکه، تاثیر به سزایی بر مدیریت هیدروژن خواهد داشت.

2. بهبود بخشیدن به میزان بازیافت و توزیع هیدروژن، به کمک اصلاحات عملی و سودمند و با کمترین هزینه.

3. کمینه ساختن میزان تولید و واردات هیدروژن.

4. ایجاد کم ترین میزان وابستگی به بیرون واحد (در هر زمینه ای).

5. انتخاب بهترین گزینه های خالص سازی هیدروژن.

6. رسیدن به مشخصه مورد نظر، با کمترین میزان هزینه سرمایه گذاری و یا حتی بدون هزینه سرمایه گذاری.

7. استفاده از هیدروژن در فرآیندهایی که سود کلی را بیشینه می سازد.

8. اعمال فشار در جهت دستیابی به بالاترین میزان تولید و ارزش افزوده در واحدها



3rd International Congress for
**Chemical Engineering and
Petroleum Industry students**

www.cco.cdsts.ir



سومین کنگره بین المللی
**دانشجویان مهندسی
شیمی و صنعت نفت**

گزینه‌های کلیدی جهت کاهش مصرف هیدروژن در عملیات پالایش عبارتند از:

- ۱- مصرف مجدد از هیدروژن خارج شده از یک فرآیند، در فرآیندی دیگر به صورت مستقیم.
- ۲- اختلاط جریان‌های هیدروژن با ترکیب درصدهای مختلف، جهت فراهم آوردن جریانی که مناسب مصرف مجدد باشد.
- ۳- تطبیق دادن مفهوم مصرف مجدد، که شامل ارتقاء چشمه‌های هیدروژن، قبل از مصرف مجدد آن‌ها می باشد.

6. مراجع

- ALVES, J. J. & TOWLER, G. P. 2002. Analysis of refinery hydrogen distribution systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41, 5759-5769.
- LINNHOFF, B. 1993. Pinch analysis-a state-of-the-art overview. *Chemical Engineering Research and Design; (United Kingdom)*, 71.
- MCQUEEN, S., STANFORD, J., SATYAPAL, S., MILLER, E., STETSON, N., PAPAGEORGOPOULOS, D., RUSTAGI, N., ARJONA, V., ADAMS, J. & RANDOLPH, K. 2020. Department of energy hydrogen program plan. US Department of Energy (USDOE), Washington DC (United States).
- ROSTRUP-NIELSEN, J. & HANSEN, J. B. 2011. Steam reforming for fuel cells. *Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing*. Elsevier.
- SMITH, R. 2005. *Chemical process: design and integration*, John Wiley & Sons.
- ZHAO, Z., LIU, G. & FENG, X. 2006. New graphical method for the integration of hydrogen distribution systems. *Industrial & engineering chemistry research*, 45, 6512-6517.