

## کاربرد آنالیز ردیاب در محاسبه حجم فضای خالی مؤثر سنگ مخزن

سید مجید هاشمی\*، محمد رضا اصفهانی و حسن کریمیایی

مرکز مطالعات اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت

hashemism@ripi.ir

### چکیده

معادلات مختلف به کار گرفته شده در مدل سازی جابجایی امتزاجی نفت در محیط متخلخل سنگ مخزن، شامل عامل های اساسی می باشند که تعیین مقدار دقیق آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مهمترین این عوامل عبارتند از: ضریب نفوذ (ضریب دیفیوژن)، ضریب پراکندگی (ضریب دیسپژن) و حجم فضای خالی قابل دستیابی [۱]. حجم فضای خالی قابل دستیابی یکی از مهمترین عامل های فوق می باشد که روش های مختلفی برای اندازه گیری آن پیشنهاد شده است [۲]. از جمله این روش ها می توان به نتایج حاصل از مطالعات X-Ray، مقاطع نازک، مدل سازی شبکه ای و پراکندگی قطر نازک و روش های آماری اشاره کرد. در این مطالعه از روش تجربی و آزمایشگاهی آنالیز ردیاب برای تعیین عامل فوق استفاده شد. در این روش به دلیل استفاده از نمونه واقعی سنگ و نیز به کارگیری سیال مشابه سیال مخزن، نتایج به دست آمده از درجه اعتبار بالایی برخوردار می باشد. از مزایای به کارگیری این روش، سهولت انجام آزمایشات است.

### مقدمه

گسترش ناحیه امتزاج یا مخلوط شده دو سیال در مکانیزم جابجایی امتزاجی وابسته به عواملی از قبیل ضرایب پراکندگی و نفوذ، تفکیک ثقلی<sup>۱</sup>، افزایش سرعت، پدیده انگشتی حاصل از گرانش<sup>۲</sup> و حجم فضای خالی قابل دستیابی از محیط متخلخل می باشد [۳]. مدل های ریاضی متفاوتی

مدل معکوس- ماتریس - دیفیوژن<sup>۶</sup> و مدل کره متخلخل<sup>۷</sup> در تمامی مدل های فوق اثر ناهمگونی و فضای خالی قابل دستیابی، لحاظ شده است. تاثیر مجموعه ای از عوامل فوق در مدل پراکندگی - ظرفیت به شکل زیر توسط اسمیت و کوتس<sup>۸</sup> بیان شده است

[۶]:

(۱)

$$K_D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - x \frac{\partial C}{\partial x} = f \frac{\partial C}{\partial t} + (1-f) \frac{\partial C^*}{\partial t}$$

(۲)

$$(1-f) \frac{\partial C^*}{\partial t} = K_M (C - C^*)$$

برای مدل سازی جابجایی امتزاجی و اثر

عامل های فوق بر روی راندمان جابجایی پیشنهاد شده است. برخی از این مدل ها

عبارتند از: مدل های پراکندگی [۴]، حرکت

توده ای<sup>۳</sup> [۵]، حرکت توده ای-کانالی<sup>۴</sup>،

حرکت توده ای - پراکندگی - ماتریس<sup>۵</sup>،

### واژه های کلیدی

آنالیز ردیاب، فضای خالی قابل دستیابی، همرفت-پراکندگی، جابجایی امتزاجی، ضریب پراکندگی، ضریب نفوذ

6. Transverse-Matrix-Diffiusion Model

7. Porous-Sphere Model

8. Coats and Smith

1. Gravity Segregation

2. Viscosity Fingering

3. Advection

4. Advection-Channeling

5. Advection-Dispersion-Matrix

این صورت منحنی غلظت سیال خروجی به صورت S شکل بوده که تصویر آینه ای حول محور یک حجم فضای خالی تزریق خواهد بود. باید توجه داشت که دو سیال دارای گرانش و چگالی و کشش میان رویه<sup>۱</sup> یکسانی باشند. در صورتی که هیچگونه عمل مخلوط شدن در این عمل انجام نپذیرد، آنگاه منحنی غلظت سیال خروجی به صورت یک تابع پله ای در محور یک حجم فضای خالی خواهد بود. در حقیقت مسیر عبور سیال ها در یک محیط متخلخل طبیعی از یک سری کانال ها و خلل و فرج بسیار کوچک تشکیل یافته که همین امر سبب می شود تا دو سیال در سطوح بسیاری در تماس با یکدیگر قرار گرفته و پدیده های پراکندگی و نفوذ مولکولی انجام پذیرد. این پدیده ها موجب مخلوط شدن دو سیال شده و در نتیجه منحنی خروجی به شکل S می شود [۱۰]. هر گونه تغییر در ضرایب پراکندگی و نفوذ، همچنین تغییر در فضای خالی قابل دستیابی موجب تغییر در عمل مخلوط شدن دو سیال شده و در نتیجه بر روی شکل منحنی غلظت سیال خروجی تأثیر خواهد گذاشت و موجب انحراف آن از حالت پله ای می شود [۳].

نظر به این که ویژگی های هر محیط متخلخل وابسته به چگونگی رسوب ذرات، دانه بندی، قطر منافذ و جنس سنگ می باشد، لذا هر سنگ با ساختار خاص خود دارای ضرایب ویژه ای می باشد که باید اندازه گیری و مشخص شود.

### چگونگی انجام محاسبات

#### چگونگی محاسبه ضرایب پراکندگی و نفوذ

یکی از روش های تجربی برای محاسبه ضرایب پراکندگی، استفاده از رابطه زیر می باشد:

(۳)

$$D = \frac{1}{4\pi} VL \frac{1}{\left( \frac{\partial C}{C_o} / \frac{\partial V}{V_o} \right)_{V/V_o=1}}$$

در معادله بالا C و C\* به ترتیب غلظت سیال در نواحی در حرکت و راکد می باشند. K<sub>D</sub> ضریب دیسپژن یا پراکندگی، K<sub>M</sub> ضریب انتقال جرم و (1-f) نیز بیانگر کسری از حجم فضای متخلخل بوده که به صورت راکد می باشد.

بسیاری از محققین در مطالعات خود از مقاطع نازک و پراکندگی قطر منافذ برای تعیین بخش موثر در جریان در فضای متخلخل سنگ مخزن استفاده کرده اند. هلر نیز از یک روش آماری برای محاسبه تراوایی تصادفی در جابجایی امتزاجی استفاده کرد.

### تئوری

تحقیقات بسیاری پیرامون ناحیه راکد از فضای خالی محیط متخلخل انجام پذیرفته و اثر آن بر روی راندمان جابجایی امتزاجی سیالات مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که ضریب پراکندگی اندازه گیری شده در مخزن، از مقدار به دست آمده در آزمایشگاه بیشتر است [۷]. همچنین نتایج حاصل از مدل سازی اثر رفتار سیالات در بخش راکد از محیط متخلخل نشان دهنده کاهش راندمان جابجایی امتزاجی در اثر وجود این ناحیه می باشد [۸].

محیط متخلخل سنگ های مخزن دارای پیچیدگی هایی بوده که آنها را از یکدیگر متمایز می کند. نظر به این که پدیده های پراکندگی، نفوذ مولکولی و نیز فضای خالی قابل دستیابی وابسته به چگونگی دانه بندی، قطر منافذ و نوع سنگ می باشد، لذا این عامل ها در سنگ های مختلف متفاوت می باشد. یکی از روش های اصلی برای تعیین عوامل فوق روش آنالیز ردیاب می باشد [۹]. در این روش با استفاده از رفتار دو سیال قابل امتزاج می توان خصوصیات ویژه محیط متخلخل را تعیین کرد.

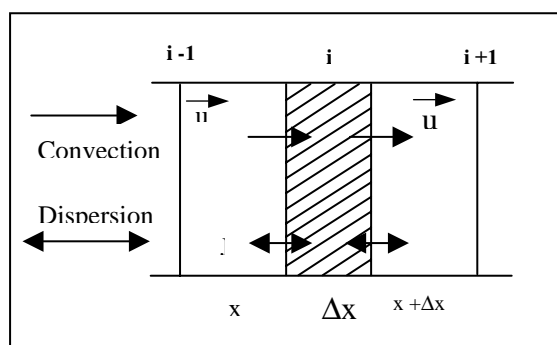
### آنالیز ردیاب

فرض کنید در زمان t=0 یک سیال قابل امتزاج به یک نمونه مغزه که با سیال قابل امتزاج دیگر اشباع شده، تزریق شود. در

محیط از سیال قابل امتزاج دیگر اشباع شده، وارد شود. برای درک بهتر مفهوم، یک المان از محیط را به صورت شکل ۱ در نظر می گیریم.

همانگونه که مشاهده می شود سیال تزریقی با سرعت  $u$  از سمت چپ به محیط وارد شده و بین سیال موجود در بلوک  $i$  و بلوک های مجاور انتقال جرم صورت می گیرد. تغییرات جرمی در طی زمان برای بلوک  $i$  به صورت زیر خواهد بود:

$$A\Delta x\phi(C|_{t+\Delta t} - C|_t) = A\Delta t[-u(C|_{x+\Delta x} - C|_x) - (J_{x+\Delta x} - J_x)]$$



شکل ۱- یک المان از محیط متخلخل

که در آن:

$C$ : غلظت، (جرم بر حجم سیال)

$u$ : سرعت داری،  $Q/A$

$J$ : فلاکس جرمی حاصل از دیسپرژن

$A$ : سطح مقطع

$\phi$ : تخلخل

در صورتی که سرعت را به صورت سرعت در محیط متخلخل یا سرعت واقعی  $V = u/\phi$  در نظر بگیریم آنگاه پس از ساده سازی معادله (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{\phi} \frac{\partial J}{\partial x} \quad (5)$$

از طرفی معادله دیفیوژن فیکس<sup>۳</sup> به صورت زیر بیان شده است:

که در آن  $V$  سرعت در محیط متخلخل بوده و از رابطه  $V = q/Af$  به دست می آید.  $L$  طول نمونه و مخرج کسر دوم عبارتست از شیب منحنی تغییرات غلظت نسبت به مقدار حجم منافذ تزریقی<sup>۱</sup> که از آزمایش آنالیز ردیاب به دست می آید. لذا با توجه به نتایج حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب می توان ضریب پراکندگی را نیز برای محیط فوق محاسبه کرد [۱۰].

ضریب دیگری که برای حل معادله اصلی لازم است ضریب نفوذ بوده که به دو صورت می توان آن را به دست آورد. یکی در آزمایشگاه و استفاده از روش های تجربی و دیگری استفاده از منحنی های تغییرات ضریب پراکندگی. اطلاعات موجود در خصوص ضرایب نفوذ دو ماده مختلف که به صورت تجربی در محیط ایده آل و در آزمایشگاه به دست آمده است در اغلب مراجع موجود می باشد [۱۱]. این ضرایب غالباً در شرایط ایده آل و خارج از محیط متخلخل اندازه گیری شده و لذا به کارگیری مستقیم آنها در معادلات جابجایی در محیط متخلخل سبب به وجود آمدن خطا در محاسبات مربوطه می شود. روش دیگر برای به دست آوردن ضریب نفوذ استفاده از منحنی های تغییرات ضریب پراکندگی بر حسب سرعت می باشد [۱۲]. با توجه به این واقعیت که نفوذ بین دو ماده غالباً در شرایطی اتفاق می افتد که دو ماده ساکن بوده و سرعت حرکت صفر می باشد، لذا با برون یابی منحنی تغییرات فوق تا سرعت صفر، می توان ضریب نفوذ را بین هر دو ماده محاسبه کرد.

### معادله همرفت - پراکندگی

برای مدل سازی رفتار دو سیال قابل امتزاج در یک محیط همگن از معادله همرفت - پراکندگی<sup>۲</sup> استفاده می شود [۸]. فرض می کنیم که سیالی با غلظت  $C$  و با سرعت  $u$  به یک

1. Pore Volume Injection
2. Convection-Dispersion

حل معادله دیسپرژن-همرفت با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر بیان می شود [۱۴]:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc} \frac{x - V_x t}{2\sqrt{Dt}} + \exp\left(\frac{V_x t}{D}\right) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x + V_x t}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (11)$$

در رابطه بالا  $De = fD$  و  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$  می باشند. با استفاده از رابطه فوق و با مشخص بودن زمان، سرعت، طول نمونه، غلظت سیال تزریقی، غلظت سیال خروجی، ضریب دیسپرژن و به کارگیری جدول تابع خطا و روش سعی و خطا و رابطه  $De = fD$  مقدار حجم فضای خالی قابل دستیابی (f) نمونه سنگ محاسبه می شود [۱۵].

### مشخصات نمونه های سنگ و سیال مورد استفاده

برای انجام آزمایشات، ۴ نمونه از سنگ های مخازن واقع در جنوب ایران انتخاب شد (۲ نمونه ماسه سنگی و ۲ نمونه دولومیتی). پلاگ های یاد شده با قطر ۳/۷ سانتیمتر و طول ۶/۸ سانتیمتر توسط متانول و تولوئن تمیز، سپس در کوره کوچک در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. برای اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری مطلق از دستگاه اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری مطلق نسبت به هوا در شرایط محیط استفاده شده است. برای اندازه گیری حجم

$$J = -\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6)$$

که در آن D ضریب نفوذ یا پراکندگی می باشد با جایگزینی در رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$-\frac{1}{\phi} \frac{\partial J}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

لذا می توان معادله کلی همرفت - پراکندگی را به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (8)$$

جمله دوم سمت راست معادله، جمله همرفت و جمله اول، جمله پراکندگی خواهد بود. در صورتی که غلظت سیال تزریقی در ابتدای تزریق برابر  $C_0$  در نظر گرفته شود، شرایط اولیه و مرزی زیر را می توان برای حل معادله بالا به کار برد:

$$C(x, 0) = 0, \quad x \geq 0$$

$$C(0, t) = C_0, \quad t \geq 0$$

$$C(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0$$

باتوجه به شرایط مرزی و اولیه بالا حل معادله همرفت-پراکندگی به صورت زیر خواهد بود:

$$C = \frac{C_0}{2} \left( \operatorname{erfc} \frac{x - V_x t}{2\sqrt{Dt}} + \exp\left(\frac{V_x t}{D}\right) \operatorname{erfc} \frac{x + V_x t}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (9)$$

در معادله فوق  $\operatorname{erfc}$  تابع خطایی بوده که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi \quad (10)$$

جدول ۱- خواص فیزیکی نمونه های مورد استفاده

شماره نمونه	طول نمونه (cm)	قطر نمونه (cm)	درصد تخلخل (%PV)	تراوایی (mD)	حجم منافذ (cc)	جنس سنگ
۱	۶/۷۱۰	۳/۷۴۰	۱۷	۱۴۰	۱۲/۱۵	ماسه سنگی سیمان شده
۲	۶/۸۰	۳/۷۲۵	۱۹	۱۶۰	۱۴/۰۵	ماسه سنگی یکنواخت سیمان شده
۳	۶/۷۲	۳/۷۳۵	۱۲	۸۵	۸/۸۱	دولومیتی با تخلخل ماتریسی
۴	۶/۸۳	۳/۷۴۱	۸	۱۴	۶/۰۱	دولومیتی با تخلخل کابی

جدول ۲- خواص فیزیکی سیال های مورد استفاده

نام سیال	فرمول	دانسیته (gr/cc)	ویسکوزیته (cp)
نرمال هپتان	n-C7	۰/۶۸	۰/۴
نرمال دکان	n-C10	۰/۷۳	۰/۸۶۸

دلیل کالیبره نبودن، روش تیتراسیون جایگزین شد. در روش فوق برای به دست آوردن غلظت نمک، غلظت یون کلراید اندازه گیری شد. روش کار بدین ترتیب بود که مقداری از محلول کرومات پتاسیم به نمونه افزوده و سپس با نترات نقره تیتراگریدید. پس از تعیین میزان غلظت نمک در هر نمونه، با توجه به حجم سیال تزریقی، میزان پخش شدگی ردیاب در محیط اندازه گیری می شود. سپس داده های حاصله برای انجام محاسبات و تعیین اندازه f استفاده می شود.

### انجام آزمایشات جابجایی امتزاجی

در این مرحله نمونه ای که روی آن آزمایش آنالیز ردیاب انجام شده بود، شسته و کاملاً خشک شده و سپس با سیال های دکان یا دودکان اشباع می شود. سپس نمونه داخل مغزه نگهدار قرار گرفته و توسط سیال تزریقی هپتان، جابجایی امتزاجی انجام می گیرد. در این مرحله نیز برای مقدار حجم های معین از سیال خروجی، زمان اندازه گیری شده و آزمایش به همین ترتیب ادامه یافت تا حداقل دو برابر حجم منافذ، نمونه خروجی داشته باشیم. نمونه ها پس از شماره گذاری برای تعیین درصد حضور هریک از سیال ها با دستگاه گاز کروماتوگرافی<sup>۱</sup> آنالیز شد. پس از تعیین درصد غلظت هریک از عناصر، منحنی های مربوطه ترسیم شد.

### نتایج

آزمایشات آنالیز ردیاب بر روی چهار نمونه انتخاب شده از سنگ مخازن انجام شد. در شکل شماره ۱ نتایج آزمایشات آنالیز ردیاب به صورت منحنی های غلظت بدون بعد  $C/C_0$

فضای خالی هر نمونه با آب اشباع می شود. جدول ۱ خواص فیزیکی نمونه ها را نشان می دهد. همچنین در جدول ۲ نوع و مشخصات فیزیکی نمونه های سیال مورد استفاده درج شده است.

### چگونگی انجام آزمایشات

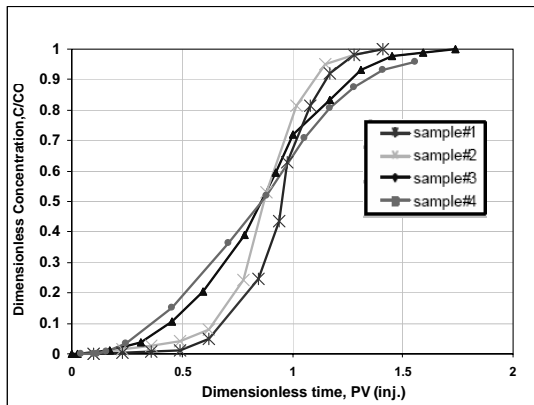
برای تعیین برخی پارامترهای مورد استفاده در مطالعه فوق نیاز به انجام آزمایشات مقدماتی و سپس آزمایشات تکمیلی می باشد. آزمایشات مقدماتی شامل آزمایش آنالیز ردیاب بوده که برای تعیین اندازه منافذ قابل دستیابی در نمونه سنگ انجام می شود. سپس آزمایشات تکمیلی که شامل آزمایش جابجایی امتزاجی می باشد، به منظور تحقیق در خصوص دقت ضرایب حاصله انجام می گیرد.

### آزمایشات آنالیز ردیاب

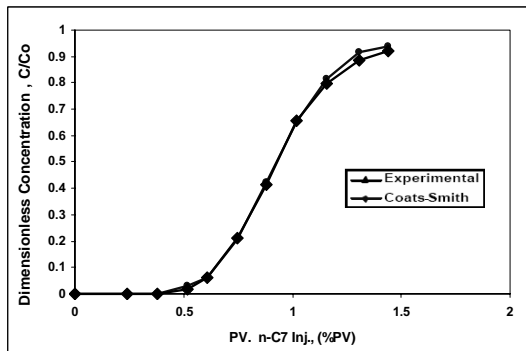
در آزمایش فوق، ابتدا نمونه با آب خالص اشباع شده و سپس یک ماده ردیاب مانند نمک طعام با درصد بسیار پائین در سیستم تزریق می شود. درصد نمک به کار رفته به گونه ای در نظر گرفته شده است که اختلاف دانسیته و ویسکوزیته دو سیال ناچیز باشد. در آزمایش فوق مقدار ppm نمک مورد استفاده ۲۰۰۰ بوده که مقداری ناچیز می باشد. سیال تزریقی که همان آب نمک می باشد به تدریج با سرعت یکنواخت به سیستم تزریق شده و در زمان های مختلف حجم های معینی از سیال خروجی نمونه گیری شده و هر نمونه شماره گذاری می شود. سپس میزان نمک خروجی توسط دستگاه جذب اتمی<sup>۱</sup> آنالیز و تعیین می شود. لازم به ذکر است که به دلیل عدم دقت در نتایج حاصل از آنالیز توسط دستگاه فوق، به

2. Gas Chromatography

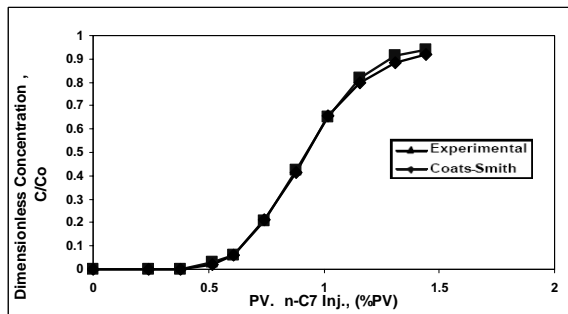
1. Atomic Adsorbition



منحنی ۱- مقایسه پروفایل غلظت خروجی حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب برای نمونه های مختلف



منحنی ۲- پروفایل غلظت خروجی سیال در آزمایش جابجایی امتزاجی برای نمونه شماره ۱



منحنی ۳- پروفایل غلظت خروجی سیال در آزمایش جابجایی امتزاجی برای نمونه شماره ۳

(حجم سیال تزریقی بر حسب حجم منافذ تزریق) رسم شده اند. همانگونه که در منحنی های آنالیز ردیاب انجام شده برای نمونه های مختلف در این مطالعه مشاهده می شود، منحنی ها دارای شیب های مختلف بوده و در یک حجم منفذ تزریق، مقادیر متفاوتی از غلظت را نشان می دهند.

با استفاده از نتایج حاصله، مقادیر ضرایب پراکندگی و نفوذ برای هر نمونه محاسبه و تعیین شد. سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده و روابط موجود، مقادیر فضاهای خالی قابل دستیابی برای هر نمونه سنگ محاسبه که در جدول ۳ نشان داده شده اند.

به منظور تحقیق در دقت نتایج حاصله، بر روی ۲ عدد از نمونه های مورد آزمایش، آزمایشات جابجایی امتزاجی انجام پذیرفت. پارامترهایی که از آزمایش آنالیز ردیاب حاصل شد، در مدل ریاضی جایگزین شد. نتایج به دست آمده از مدل ریاضی با مقادیر حاصل از آزمایش در نمودارهای ۲ و ۳ مقایسه شده اند.

### بحث و نتیجه گیری

آزمایش آنالیز ردیاب بر روی ۴ نمونه سنگ مخزن از جنس دولومیت و ماسه سنگی انجام پذیرفت. منحنی غلظت سیال خروجی رسم و پس از محاسبه ضرایب پراکندگی و نفوذ، درصد حجم فضای خالی قابل دستیابی که در مکانیزم جابجایی امتزاجی از اهمیت می باشد، محاسبه شد.

در مطالعات جابجایی امتزاجی عامل های ضریب دیسپرژن ضریب دیفیوژن و درصد حجم منافذ قابل دسترس از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و تعیین دقیق این عوامل می تواند نتایج معقول تری در مدلسازی جابجایی امتزاجی را سبب شود.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب

نمونه شماره	ضریب نفوذ محاسبه شده $K_m (\times 10^{-6}) [cm^2/s]$	ضریب پراکندگی محاسبه شده $K_D (\times 10^{-4}) [cm^2/s]$	حجم فضای خالی قابل دستیابی محاسبه شده f (%)
۱	۰/۸۹	۷/۷۶	۰/۶۶۸
۲	۰/۸۶	۶/۴۱	۰/۷۲
۳	۰/۸۱	۸/۳۸	۰/۶۲۱
۴	۰/۷۹	۹/۳۲	۰/۵۸۵

نتایج حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب نشان می دهد که منحنی غلظت سیال خروجی برای هر نمونه شکل مخصوص به خود را داشته و با توجه به جنس سنگ و چگونگی دانه بندی آن تغییر می کند.

با توجه به نتایج حاصله می توان گفت که آنالیز ردیاب می تواند به عنوان روش مناسبی برای محاسبه حجم منافذ قابل دستیابی به کار رود. علاوه بر عامل فوق، از این روش می توان برای شناخت ساختار فیزیکی محیط متخلخل و تعیین عامل های مؤثر در مدل سازی جابجایی امتزاجی که عبارتند از

ضریب پراکندگی و ضریب نفوذ نیز استفاده کرد. با استفاده از ضرایب به دست آمده از این روش، تطابق مناسبی با نتایج واقعی حاصل می شود.

در مدل های موجود، عامل فوق به عنوان عامل تطابقی مورد استفاده قرار می گرفت که این مسئله باعث بروز اختلافات فاحشی بین مقادیر پیش فرض شده و مقادیر واقعی می شود. و نهایتاً در مدل هایی که از این عامل ها استفاده کرده اند نمی توان به عنوان الگوی رفتاری مناسب برای پیش بینی جابجایی امتزاجی در محیط متخلخل استفاده کرد.

## منابع

- [1] G.H. Tang, E.O. Frind and E.A. Sudicky, *Contaminant Transport in Fractured Porous Media: An Analytical Solution for a Single Fracture*, Water Resource Research, Vol. 17, p. 555, 1981.
- [2] R.A. Greenkorn, *Fluid Flow Through Porous Media*.
- [3] R.A. Greenkorn and D.P. Kessler, *Dispersion in Heterogeneous Non-uniform Anisotropic Porous Media*, I & E.C., Vol. 61, No. 9, 1969.
- [4] J.B. Passioura, *Hydrodynamic Dispersion in Aggregated Media: I. Theory*, Soil Science, Vol. 111, pp. 339-344, 1971.
- [5] P.S.C. Rao, *Solute Transport in Aggregated Porous Media: Theoretical and Experimental Evaluation*, Soil Science Society of American Journal, Vol. 44, pp. 1139-1146, 1980.
- [6] K.H. Coats and B.D. Smith, *Dead-End Pore Volume and Dispersion in Porous Media*, SPEJ, Vol. 4, No. 2, 1964.
- [7] A. Arya, T.A. Hewett, R.G. Larson and L.W. Lake, *Dispersion and Reservoir Heterogeneity*, SPE Reservoir Eng., pp. 139-148, 1988.
- [8] A.P. Spence and R.W. Watkins, *The Effect of Microscopic Core Heterogeneity on Miscible Flood Residual Oil Saturation*, Paper Presented at the SPE Annual Meeting, Dallas, Sept. 21-24, 1980.
- [9] L. Moreno, I. Neretnieks and E. Klockars, *Evaluation of Some Tracer Tests in the Granitic Rock at Finnsjon*, KBS Tech. Rep., pp. 38-83, 1983.
- [10] I. Neretnieks, *A Note on Fracture Flow Mechanisms in the Ground*, Water Resource Research, Vol. 19, p. 364, 1983.
- [11] L. Lapidus and N.R. Amundson, *Mathematics of Adsorption in Beds*, Physical Chemistry, Vol. 56, p. 984, 1952.
- [12] R.M. Specter, *Effect of Pore Structure on Mixing in Stable Single-Phase Miscible Displacement*, M.Sc. Thesis, New Mexico Institute of Mining and Tech., Socorro. 1984.
- [13] K.K. Dai and F.M.Jr. Ow, *Prediction of CO<sub>2</sub> Flood Performance: Intraction of Phase Behavior with Microscopic Pore Structure Heterogeneity*, SPE Annual Meeting, Hoston. pp. 16-19, 1984.
- [14] J.P. Batycky, B.B. Maini and D.B. Fisher, *Simulation of Miscible Displacement in Full Diameter Carbonate Cores*, Petroleum Recovery Institute Research Report, 1980.
- [15] J.K. Jasti, R.N. Vaidya and H.S. Fogler, *Capacitance Effect in Porous Media*, SPE 16707.



# راندمان کوره های حرارتی فرایندی و بررسی پتانسیل صرفه جویی انرژی در کوره های حرارتی پالایشگاه شماره ۱ تهران مقاله مروری

علیرضا آهانگری\* و سیروس آقاجفی

شرکت ملی پالایش و پخش و دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

تهران صندوق پستی ۱۳۴-۱۸۷۹۵

ar\_ahangari@yahoo.com

## چکیده

به منظور عملکرد بهینه کوره های حرارتی فرایندی در صنایع نفت، پس از آشنایی کامل با ساختار کوره ها و روش به دست آوردن بازده حرارتی، شناسایی عوامل مؤثر در کاهش یا افزایش بازده در آنها ضروری است. با داشتن اطلاعات کامل و صحیح از شرایط عملیاتی در کوره، می توان اقدامات اصلاحی را برای بالا بردن بازده حرارتی در آنها توصیه کرد. از سوی دیگر جدای از تمرکز بر فرایند احتراق در کوره ها به منظور افزایش راندمان، فعالیت هایی از جمله انجام بازرسی های تخصصی و به موقع و ارائه برنامه های دقیق و کامل تعمیرات و نگهداری، سبب بالا رفتن بازده کاری کوره ها در سرویس های کاری ۳ ساله خواهد شد.

## مقدمه

کوره ها مهمترین جزء یک واحد فرایندی هستند. عموماً در صنایع پالایشی برای بالا بردن دمای یک ماده نفتی تا یک حد مشخص، کاربرد دارند. کوره های حرارتی بایستی به طور بهینه و کارآمد عمل کنند تا پالایشگاه بتواند با ظرفیت اسمی خود محصولات پیش بینی شده را تامین کند. در بسیاری از حالتها ممکن است عملکرد نامناسب کوره باعث شود که ظرفیت کوره با توجه به خوراک مورد نیاز ورودی محدود شود و خروج از این تنگنا یا بهبود راندمان کوره، هزینه بسیار بالایی را در بر می گیرد. عمده ترین مصرف کننده انرژی در صنایع، کوره ها هستند و صرفه جویی در آنها میلیون ها ریال صرفه جویی به ارمغان می آورد. به عنوان مثال، کل انرژی سوختی در پالایشگاه اصفهان (که به طور عمده در کوره ها به مصرف رسیده است) در سال های ۱۳۷۵، ۱۳۷۶، ۱۳۷۷ به ترتیب برابر با ۶۲، ۶۳/۲، ۶۳/۸ معادل بشکه نفت خام مصرف شده برای پالایش هر هزار بشکه نفت خام بوده است. (مقدار استاندارد رقمی در حدود ۳۵/۶ معادل بشکه نفت خام است). مشاهده می شود که تنها با افزایش ۱ درصدی راندمان، انرژی مصرفی یک پالایشگاه ۲۰۰۰۰۰ بشکه ای (تقریباً معادل ظرفیت هریک از پالایشگاههای تهران و اصفهان) در حدود ۶۲×۲۰۰×۳۳۵×۰/۰۱=۴۱۵۴۰ barrel/year بشکه معادل نفت خام در هر سال (با در نظر گرفتن زمان تقریبی یک ماهه برای تعمیرات اساسی) صرفه جویی خواهیم داشت که در حال حاضر با توجه به افزایش بی سابقه قیمت نفت و احتساب هر بشکه نفت خام معادل ۵۰ دلار، میزان این صرفه جویی در حدود ۲/۰۷۷ میلیون دلار در سال می شود که رقمی کاملاً قابل توجه است.

## واژه های کلیدی

پالایشگاه نفت،  
بازده حرارتی خالص و ناخالص،  
کوره های حرارتی فرایندی،  
کنترل کوران

همچنین

$$\text{کل تلفات حرارتی} - \text{کل حرارت ورودی} \\ \text{بازده} = \frac{\quad}{\text{کل حرارت ورودی}} \times 100$$

که در حرارت ورودی، علاوه بر حرارت خالص احتراق سوخت، مقدار حرارت ماده اتمایزر ورودی نیز در نظر گرفته می شود. دو تعریف عمومی از بازده حرارتی وجود دارد که عبارتند از:

### بازده حرارتی خالص

(۱)

$$e = \frac{(LHV + H_a + H_f + H_m) - (Q_r + Q_s)}{(LHV + H_a + H_f + H_m)} \times 100$$

### بازده حرارتی ناخالص

بازده حرارتی ناخالص یک سیستم کوره عملیاتی با جایگزینی ارزش حرارتی بالا HHV به جای ارزش حرارتی پایین LHV در معادله (۱) و با اضافه کردن یک مقدار معادل ۱۰۵۹/۷ BTU بازای هر پوند H<sub>2</sub>O به Q<sub>s</sub> ضرب در مقدار H<sub>2</sub>O تولید شده در احتراق سوخت به واحد پوند به دست می آید:

(۲)

$$e_{gross} = \frac{(HHV + H_a + H_f + H_m) - (Q_r + Q_s + H_2O \times 10597)}{(HHV + H_a + H_f + H_m)} \times 100$$

که

$$HHV = LHV + H_2O_{formed} \times 1059.7$$

با جایگزینی آن، معادله به شکل زیر در خواهد آمد:

(۳)

$$e_{gross} = \frac{(LHV + H_a + H_f + H_m) - (Q_r + Q_s)}{(LHV + H_a + H_f + H_m) + H_2O \times 10597} \times 100$$

با خلاصه سازی بیشتر داریم:

(۴)

$$e_{gross} = \frac{(LHV + H_a + H_f + H_m) - (Q_r + Q_s)}{(HHV + H_a + H_f + H_m)} \times 100$$

از عمده ترین عوامل عدم رعایت صرفه جویی انرژی در پالایشگاه ها می توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

۱- کاهش راندمان تجهیزات به علت کارکرد پالایشگاه بیش از ظرفیت طراحی

۲- عدم استفاده از فناوری های جدید مورد نیاز برای افزایش بازده تجهیزات

۳- استهلاک و فرسودگی تجهیزات و همچنین عدم عایق بندی مناسب

۴- عدم وجود دستگاه های اندازه گیری و کنترل انرژی مصرفی برای تجهیزات در پالایشگاه ها

### آشنایی با کوره های حرارتی

یک کوره از سه جزء اصلی تشکیل شده است: چرخه حرارتی، بدنه کوره، تجهیزات احتراق.

به طور کلی کوره های عملیاتی از دو قسمت عمده تشکیل شده اند:

۱- ناحیه تابشی<sup>۱</sup> ۲- ناحیه جابجایی<sup>۲</sup>. در ناحیه تابشی قسمت اعظم انتقال حرارت از طریق تابش به لوله ها منتقل می شود و در ناحیه جابجایی قسمت عمده انتقال حرارت با عبور گازهای حاصل از احتراق از لابه لای لوله های این قسمت صورت می گیرد. گازهای داغ حاصل از احتراق که به اختصار گازهای خروجی نامیده می شوند از طریق دودکش به اتمسفر محیط تخلیه می شوند. مشعل ها روی کف یا روی دیواره های جانبی نصب شده و هوای مورد نیاز برای احتراق را از اتمسفر محیط دریافت می کنند.

### بازده حرارتی در کوره های فرایندی [۷]

به طور کلی بازده حرارتی در یک کوره عملیاتی به صورت زیر بیان می شود:

$$\text{بازده} = \frac{\text{کل حرارت جذب شده}}{\text{کل حرارت ورودی}} \times 100$$

1. Radiation
2. Convection

(فرم استاندارد تلفات دودکش در ضمیمه D مرجع [۷])  
بنابراین در  $149.89^{\circ}\text{C}$ :

$$Q_s = 2692/1 \text{ kJ/kg fuel}$$

تصحیحات حرارت محسوس  $H_a$  برای هوای احتراق و  $H_f$   
برای سوخت به صورت زیر تعیین می شود:

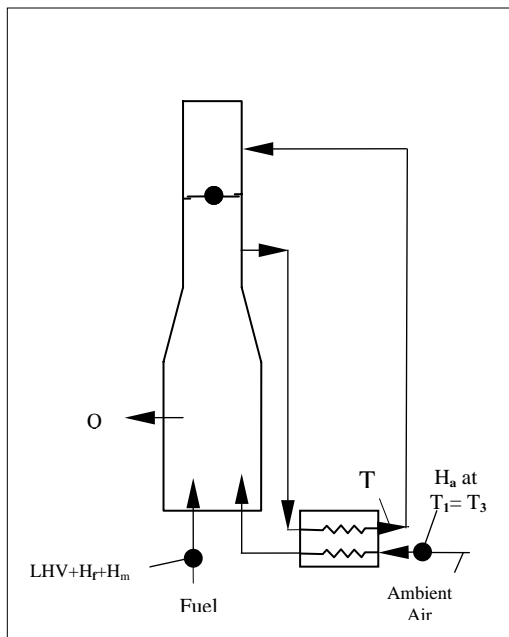
$$H_a = C_{\text{pair}} \times (T_t - T_d) \times (\text{kg air/kg fuel}) \\ = 313/1 - \text{kJ/kg fuel}$$

$$H_f = C_{\text{pfuel}} \times (T_t - T_d) = 48.8 \text{ kJ/kg fuel}$$

بازده حرارتی خالص می تواند به صورت زیر به دست آورده  
شود (معادله ۱ را ببینید):

$$e = \frac{(42147 + 313.1 + 48.8) - (1053.7 + 2692.1)}{(42147 + 313.1 + 48.8)} \times 100 \\ = 91.2\%$$

برای تعیین راندمان حرارتی ناخالص نیز از رابطه (۲)  
استفاده می شود.



شکل ۱- طرح کوره نمونه با هوای پیش گرم شده از یک منبع  
حرارتی داخلی [۷]

در این قسمت به محاسبه بازده یک کوره حرارتی گازسوز با  
هوای احتراق پیش گرم شده از یک منبع حرارتی داخلی  
می پردازیم (شکل ۱). دمای محیط  $22/2^{\circ}\text{C}$  ( $T_a$ ) و دمای هوا  
 $22/2^{\circ}\text{C}$  ( $T_t$ ) است. دمای گازهای حاصل از احتراق در خروج  
از گرمکن هوا  $148/89^{\circ}\text{C}$ ، دمای سوخت  $37/78^{\circ}\text{C}$  و  
رطوبت نسبی ۵۰ درصد است. آنالیز گازهای خروجی بیانگر  
آن است که میزان اکسیژن (بر پایه روش خشک) ۳/۵ درصد  
حجمی و میزان گازهای قابل اشتعال در خروجی صفر است.  
تلفات حرارتی تابشی ۲/۵ درصد ارزش حرارتی پایین سوخت  
است. آنالیز سوخت نشان می دهد که میزان متان سوخت  
۷۵/۴۱ درصد حجمی، میزان اتان آن ۲/۳۳ درصد حجمی،  
میزان اتیلن آن ۵/۸۰ درصد حجمی، میزان پروپان آن ۱/۵۴  
درصد حجمی، میزان پروپیلن آن ۱/۸۶ درصد حجمی، میزان  
نیترژن آن ۹/۶۶ درصد حجمی و میزان هیدروژن آن ۳/۸۲  
درصد حجمی است [۷]. ضمیمه D در همین مرجع شامل  
فرم های استاندارد احتراق است. فرم های استاندارد هوای  
اضافی و رطوبت نسبی و فرم استاندارد تلفات دودکش برای  
ثبت اطلاعات از ضمیمه B مرجع [۷] است.

LHV سوخت با وارد کردن اطلاعات مربوط به آنالیز  
سوخت در ستون اول فرم استاندارد هوای داغ و تقسیم  
حرارت های حاصل از احتراق (ستون ۵) بر وزن سوخت کل  
(ستون ۳) تعیین می شود [۷] بنابراین:

$$\text{LHV} = 335,629 / 18.523 = 18,120 \text{ Btu/ lb fuel} \\ = 42,147 \text{ kJ/kg fuel}$$

تلفات حرارتی تابشی ( $Q_r$ ) از حاصل ضرب LHV در ضریب  
تلفات حرارتی تابشی بیان شده به درصد به دست می آید.  
پس:

$$Q_r = 0.025 \times 18,120 = 453 \text{ Btu/ lb fuel} \\ = 1053.7 \text{ kJ/kg fuel}$$

تلفات حرارتی دودکش  $Q_f$  از جمع مقادیر حرارتی اجزای  
گازها در خروج از دودکش در دمای  $T_e$  به دست می آید.

۱. این درصد بستگی به نوع سوخت و ترکیبات سازنده آن دارد.

## عوامل موثر بر بازده کوره ها

### احتراق

در فرایند احتراق ۳ پارامتر اصلی که به طور مستقیم بر بازده کوره ها تاثیر دارند عبارتند از [۲]:

۱- فشار سوخت

۲- درصد هوای اضافی

۳- کوران کوره

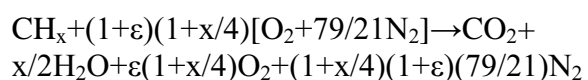
### فشار سوخت

دمای خوراک خروجی از کوره، اغلب مستقیماً به شیر کنترل سوخت مربوط می شود و فرمان لازم را از آن می گیرد. توزیع جریان در ورودی به کوره بسیار مهم است. جریان در هر یک از پاس های عبوری از کوره باید دارای مقدار معین و یکسانی از سیال عبوری باشد. لوله های کوره بایستی از نظر انسداد، گرفتگی جزئی جریان و کک گرفتگی روی آنها تحت نظارت دائمی قرار داشته باشند تا از عدم توازن جریان ناشی از گرفتگی، تقسیم نابرابر و یا گرم شدن موضعی جریان، جلوگیری به عمل آید.

### هوای اضافی

نسبت استوکیومتری، میزان اکسیژن تئوری مورد نیاز برای احتراق را مشخص می کند. هوای اضافی آن قسمت از هوای ورودی است که علاوه بر مقدار تئوری در فرایند، وارد می شود تا انجام احتراق کامل روی سوخت را اطمینان بدهد. برای محاسبه هوای اضافی، معادله زیر را داریم که همان معادله کلی برای هر سوخت هیدروکربنی است که با (ε) (جزء هوای تازه) و X که بیانگر نسبت مولی H/C است، اصلاح می شود. معادله ۵ یک معادله کلی برای احتراق هیدروکربن ها با هوا است:

(۵)



با آنالیز گازهای خروجی از دودکش، می توان چگالی اکسیژن در گازهای خروجی از دودکش و به تبع آن میزان هوای اضافی فراهم شده برای احتراق (در صورت عدم وجود نشتی هوا از خارج کوره به داخل آن) و شروع احتراق ناقص را تشخیص داد.

### زیان های افزایش هوای اضافی

به دلایل زیر وجود هوای اضافی، بازده کوره ها را کاهش می دهد.

۱- سوخت بیشتری برای گرم کردن هوای اضافی ورودی به مشعل ها مورد نیاز است.

۲- هوای اضافی دمای شعله را کاهش می دهد که سبب پایین آمدن بازده حرارتی تابش می شود.

۳- افزایش هوای اضافی، نرخ جریان گازهای خروجی را افزایش داده و یک فشار مثبت در کوره ایجاد می کند و سبب بالا رفتن افت فشار در کوره می شود. این مسئله می تواند باعث کاهش ظرفیت حرارتی کوره شود.

۴- بر اساس بررسی های به عمل آمده بر روی کوره های مختلف، به طور متوسط هر ۱۰٪ افزایش هوای اضافی، ۱٪ افزایش در مصرف سوخت ایجاد خواهد کرد.

### مزایای افزایش هوای اضافی

۱- کاهش دمای دیواره لوله ها در ناحیه تابشی (به دلیل اینکه بخشی از حرارت تولیدی توسط مشعل ها بجای انتقال به لوله ها به هوای اضافی منتقل می شود).

۲- افزایش هوای اضافی باعث انتقال حرارت همرفتی بهتری به لوله ها در ناحیه جابجایی می شود. (هوای اضافی گرم شده در قسمت تشعشع، سبب افزایش انتقال حرارت در ناحیه جابجایی می شود).

۳- در صورت وجود یک کویل حرارتی که با هوای دفعی کار می کند (مانند کویل بخار، ری بویلر، روغن داغ و ...)

## بازرسی به موقع از کوره ها و پیش بینی انجام تعمیرات لازم بر روی آنها

انجام بازرسی های به موقع و دقیق بازدهی بیشتر و ایمنی کوره را در فواصل مابین هر سرویس کاری (معمولاً سه ساله) تأمین می کند، دوره بازرسی های منظم امکان برنامه ریزی دقیق برای تعمیرات، بررسی و جایگزینی اجزای فرسوده قبل از خرابی، محافظت از لوله ها و افزایش عمر مفید آنها را فراهم می کند. همچنین سبب کم شدن و یا حذف توقف اضطراری<sup>۲</sup> واحد (که به علت توقف تولید و به کار گرفتن افراد زیاد برای تعمیر و راه اندازی مجدد، هزینه هنگفتی را تحمیل می کند) می شود.

عوامل مهمی باعث فساد در لوله ها می شوند که عبارتند از [۹]:

- ۱- نوع عملیات
  - ۲- خصوصیات خوراک مصرفی
  - ۳- سرعت جریان در پاس های کوره
  - ۴- فشار
  - ۵- درجه حرارت
- عامل مهم و اساسی در نوع و شدت فساد در لوله ها درجه حرارت است که مهم ترین انواع آنها عبارتند از:
- الف- شکم دادن<sup>۳</sup>
  - ب- خم شدن<sup>۴</sup>
  - د- خزش<sup>۵</sup> (شکل ۲)
  - ۶- تغییر متالورژیکی
  - ۷- خوردگی<sup>۶</sup> داخل لوله ها (شکل ۳)
  - ۸- خوردگی خارج لوله ها
  - ۹- تخریب یا فساد مکانیکی

افزایش انتقال حرارت در ناحیه جابجایی ناشی از افزایش هوای اضافی با ارزش خواهد بود.

## کنترل کوران

در کوره هایی که از کوران طبیعی یا اجباری استفاده می کنند، اختلاف فشار مورد نیاز با تنظیم دمپر دودکش کنترل می شود. اما در کوره هایی با کوران مکشی این اختلاف فشار به وسیله دمپرهای نصب شده در ناحیه مکش فن، کنترل می شود. برای تنظیم کوران در یک کوره عملیاتی، کورانی معادل ۰/۰۵ تا ۰/۱ اینچ آب بایستی در طاق کوره (در ناحیه تشعشی) حفظ شود.

برای یک کوره با ظرفیت ثابت و نوع سوخت مشخص، بستن دمپر دودکش اثرات زیر را در برخواهد داشت. (بستن دمپر، سبب تاخیر در گذر هوای داخل کوره خواهد شد):

- ۱- کاهش اکسیژن در گازهای خروجی
  - ۲- کاهش کوران در طاق کوره در ناحیه تشعشی
  - ۳- افزایش دمای گازهای حاصل از احتراق در خروجی از ناحیه تشعشی. (برای کوره هایی که شدت انتقال حرارت ناحیه تشعشی در آنها ثابت است وقتی مقدار هوای اضافی در آنها کاهش می یابد دمای گاز در ورودی ناحیه جابجایی افزایش می یابد).
  - ۴- کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش (هر ۳۵ درجه فارنهایت کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش معادل تقریباً ۱٪ کاهش در مصرف سوخت).
  - ۵- افزایش چگالی شارگرما<sup>۱</sup> در ناحیه جابجایی
  - ۶- افزایش راندمان کوره
- بستن دریچه ورود هوای مشعل ها، همان تاثیر را بر عملکرد کوره دارد به جز اینکه کوران را در ناحیه طاق کوره ها افزایش خواهد داد.

2. Emergency Shut down  
3. Sagging  
4. Bowing  
5. Creep  
6. Corrosion

1. Heat Flux Density

نصب شده است ولی پس از بروز اشکال در یکی از اجزای این سیستم دیگر مورد استفاده قرار نمی گرفتند. با توجه به مطالب فوق ضرورت بررسی دقیق تر مسئله صرفه جویی انرژی در پالایشگاه احساس می شد. در ادامه به علل وجود اتلاف انرژی در کوره های پالایشگاه شماره ۱ و پیشنهادات ارائه شده برای از بین بردن آنها ارایه شده است:

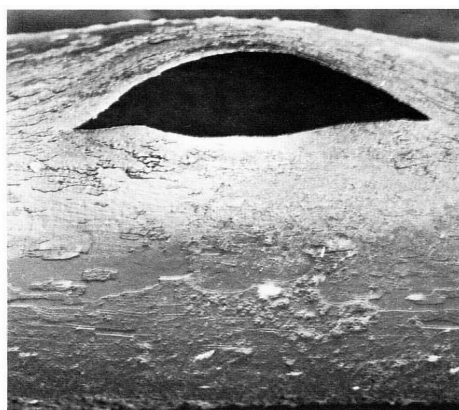
### راه های افزایش راندمان کوره های حرارتی

به طور کلی بروز اشکال در کلیه فرایندهای مرتبط با یک کوره عملیاتی از جمله احتراق ناقص سوخت، انتقال حرارت نامناسب به تیوبها، بالا رفتن دمای سطح تیوب ها، رانش ناکافی داخل کوره و یا عملکرد نامناسب تجهیزات مربوط به کوره مانند مشعل ها، دمپر، اشکال در سیستم های ابزار دقیق و کنترل، وجود ارتعاش در تیوب ها، عایق بندی نامناسب و... سبب کاهش بازده در یک کوره عملیاتی خواهد شد. از سوی دیگر نظارت دقیق بر فرایندهای فوق و همچنین پایین آوردن هزینه های جاری و تعمیرات به موجب کارکرد صحیح کوره و تجهیزات مربوط به آن و کاهش مواد آلاینده موجود در سوخت از جمله مواردی هستند که به افزایش بهره وری در عملکرد کوره منجر خواهند شد.

در راستای مطالعه انجام شده به منظور افزایش راندمان کوره ها و دستیابی به صرفه جویی در مصرف انرژی، پیشنهادات زیر ارایه شدند:

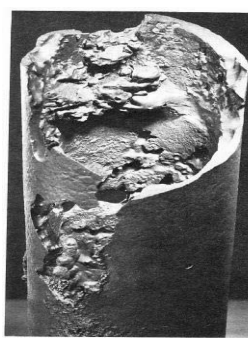
۱- جلوگیری از نشتی هوا از محفظه احتراق کوره ها از طریق دریچه های دید، کلاهک جعبه لوله ها، سوراخهای موجود روی بدنه کوره و...

۲- کاهش میزان هوای اضافی (کاهش درصد اکسیژن در گازهای خروجی حاصل از احتراق) و به تبع آن کاهش درصد اکسیژن در گازهای خروجی به منظور افزایش راندمان کوره ها با کم کردن میزان هوای اضافی، که در این مورد کارهای زیر باید انجام شود:

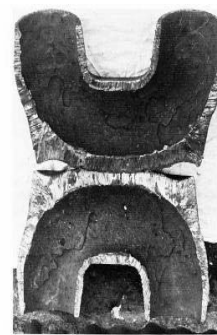


Split Tube

شکل ۲- برآمدگی، باد کردگی و پارگی در لوله ها به علت مافوق گرم شدن و یا به وجود آمدن پدیده خزش



Oxidized Tube



Corrosion of U Bends

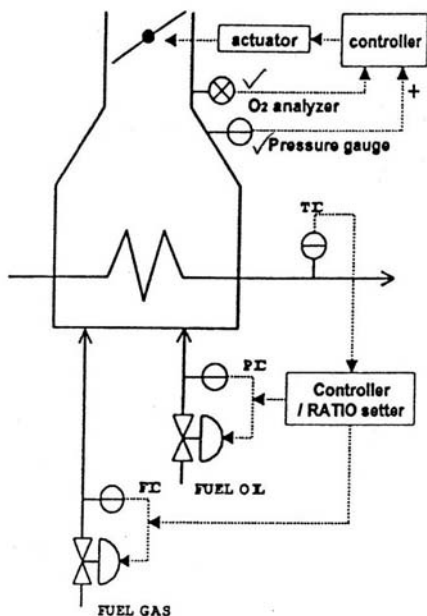
شکل ۳- خوردگی های به وجود آمده داخل تیوب ها

### مطالعه پتانسیل صرفه جویی انرژی در کوره های پالایشگاه شماره ۱ تهران و اقدامات انجام شده برای افزایش کارایی کوره ها

پالایشگاه نفت تهران که توسط دو شرکت بین المللی یو او پی و شورون<sup>۱</sup> طراحی و توسط شرکت فلورتنی سین<sup>۲</sup> ساخته شده است از سال ۱۹۶۸ میلادی تا کنون با ترکیبی از تجهیزات و سیالات مختلف کار کرده است. از آن زمان تاکنون بررسی صرفه جویی در مصرف انرژی پالایشگاه به صورت ویژه ای انجام نشده بود. از آنجایی که سیستم های ابزار دقیق آن پنوماتیکی است، کنترل بهینه ای روی سیستم ها انجام نمی شود. اگرچه آنالایزهای اکسیژن برای کوره ها تهیه و

1. UOP and Chevron Research Co.Ltd of the USA  
2. Flour Thyssen

حاصل از احتراق در این دما به بیرون رانده شوند حداقل ۲۰ درصد از مقدار گرمای تولیدی احتراق هدر می رود.



شکل ۴- شماتیکی از یک سیستم کنترل احتراق

دمای هدف برای گازهای خروجی بالاتر از دمای نقطه شبنم اسید (حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد و با توجه به شرایط عملیاتی کوره) در نظر گرفته می شود.

عمدتاً دو روش برای بازیافت حرارت محسوس گازهای خروجی حاصل از احتراق وجود دارند که عبارتند از:

الف- استفاده از سیستم WHB<sup>۱</sup>

WHBها غالباً در کوره های حرارتی کاملاً تشعشی که دمای گازهای خروجی در آنها بسیار بالاست مورد استفاده قرار می گیرند.

ب- استفاده از سیستم APH<sup>۲</sup>

در این روش بازده حرارتی می تواند تا ۹۰٪ افزایش یابد. از این روش اغلب در کوره های حرارتی با دمای ناحیه جابجایی نسبتاً بالا کاربرد دارد [۹].

۴- حرارت دفعی از دیواره ها

الف- تحت نظر داشتن عملیات کوره با داشتن مقادیر هدف مشخص و استفاده از سیستم پیشرفته کنترل توزیعی

ب- از بین بردن نشی هوا به داخل کوره

ج- کنترل و تنظیم جریان هوا که شامل تنظیم دریچه های ورود هوا، کنترل دمپره های تنظیم کوران و ثبت و کنترل میزان هوای اضافی خروجی از کوره ها می باشد

د- اندودکاری یا نشت بند کردن اتصالات با kawool یا مواد مشابه به منظور جلوگیری از نفوذ هوا

ه- استفاده از سیستم کنترل احتراق

میزان اکسیژن باقی مانده در گازهای خروجی همواره (برای نگاه داشتن آن در مقدار هدف) اندازه گیری می شود تا بتواند با یک سیستم اتوماتیک، هوای مورد نیاز برای احتراق را کنترل کند. دو روش برای انجام این کار وجود دارد:

الف- تنظیم درصد باز شدگی دمپر در خروجی کوره

ب- تنظیم کوران توسط شیر تنظیم هوای ورودی اگر یک فن اجباری وجود داشته باشد. در همان زمان فشار داخل کوره همواره برای نگهداشتن آن در یک فشار منفی ثابت برای کنترل اتوماتیک اندازه گیری می شود.

مقدار درصد اکسیژن هدف در گازهای خروجی عبارت است از:

- ۲/۵ درصد برای کوره های گاز سوز

- ۳ درصد برای کوره های دو گانه سوز (گاز و نفت)

برای رسیدن به اهداف فوق، در تنظیم هوای ورودی به کوره از سیستم کنترل گازهای حاصل از احتراق خروجی از کوره (FGSC)<sup>۱</sup> استفاده می شود. در شکل (۴) شماتیکی از این سیستم نمایش داده شده است.

۳- بازیافت حرارت از گازهای خروجی

عموماً دمای گازهای خروجی در ناحیه جابجایی در حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد است. اگر گازهای خروجی

## 1. Flue Gas System Control

2. Waste Heat Boiler
3. Air Pre Heater

سوخت مصرفی کوره ها پس از نصب سیستم های بازیاب حرارتی به منظور کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش، پیش بینی شده است.

مقدار صرفه جویی سوخت سنگین در کوره ها برابر است با:

$$ESo = 3376 \text{ kg-fuel/h}$$

مقدار صرفه جویی سوخت گاز در کوره ها برابر است با:

$$ESg = 5538 \text{ kg-fuel/h} = 3877 \text{ m}^3\text{-fuel/h}$$

با در نظر گرفتن قیمت نفت کوره با قیمت فوب فرآورده های نفتی در بازار خلیج فارس و سوخت گاز معادل با قیمت گاز طبیعی در اتحادیه اروپا (از مرجع [۳] در سال ۲۰۰۳) خواهیم داشت:

$$3376 \times 0.15806 \text{ US\$/kg} \times 24 \times 365 = 4674428 \text{ \$/y}$$

$$3877 \times 0.157 \text{ US\$/m}^3 \times 24 \times 365 = 5332115 \text{ \$/y}$$

در نهایت مقدار کل صرفه جویی ایجاد شده در سال در نتیجه انجام کارهای اصلاحی بر روی کوره های پالایشگاه شماره ۱ برابر خواهد شد با:

$$\text{Total Saving Money} = 10,066,543 \text{ \$/year}$$

که بدیهی است با توجه به افزایش قیمت نفت خام و فرآورده های آن در شرایط فعلی، مقادیر صرفه جویی بیش از مقادیر محاسبه شده خواهد بود.

همچنین برای محاسبه زمان برگشت سرمایه گذاری لازم به منظور دستیابی به مقادیر صرفه جویی سوخت که در بالا به آنها اشاره شد، مقادیر سرمایه گذاری [۱۲] برای نصب سیستم کنترل احتراق و بازیاب های حرارتی در مقابل سوخت صرفه جویی شده پس از نصب این سیستم ها در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. زمان برگشت سرمایه گذاری در مورد نصب سیستم های کنترل کوران و اکسیژن در حدوداً یک سال و نصب سیستم های بازیاب حرارتی در حدود ۳/۱ سال خواهد بود.

دفع حرارت از دیواره ها خیلی زیاد نیست. (۱ تا ۲ درصد از مقدار حرارت کل احتراق) در حالتی که دمای دیواره خارجی به علت شکستن آجرها و وجود ترک در سیمان دیواره کوره از ۲۰۰ درجه سانتیگراد فراتر رود، دفع حرارتی بالا می رود و نیاز به تعمیرات و یا تقویت عایق بندی وجود خواهد داشت. در چنین حالتی می توان از قالب های بتنی نسوز سبک یا سرامیک فایبر با خواص عایق کاری بالا به عنوان مصالح دیواره استفاده کرد.

## جمع بندی و نتیجه گیری

### جداول ضمیمه

جداول ۱ و ۲ مربوط به میزان راندمان افزایش یافته در اثر کاهش میزان هوای اضافی و بازیاب حرارت از گازهای خروجی از کوره ها می باشد. در این جداول، مقادیر راندمان محاسبه شده و به تبع آن مقادیر کاهش یافته سوخت مصرفی در اثر کاهش میزان هوای اضافی و بازیاب حرارت از گازهای خروجی از کوره ها با شرایط قبلی کوره ها در سال ۱۹۹۹ میلادی مقایسه شده است. در جداول ۳ هزینه سرمایه گذاری برای نصب آنالایزر اکسیژن با توجه به میزان سوخت صرفه جویی شده و زمان برگشت سرمایه گذاری ارایه شده است. در جدول ۴ نیز هزینه سرمایه گذاری برای نصب APH و WHB در واحدهای تقطیر، تبدیل کاتالیستی و آیزوماکس با توجه به میزان صرفه جویی سوخت در کوره های این واحد و زمان برگشت این سرمایه گذاری ها مورد بررسی قرار گرفته است.

### محاسبه مقادیر صرفه جویی در مصرف سوخت

#### کوره ها

در جدول ۱، مقادیر مصرف سوخت پس از بهبود شرایط ناشی از کاهش درصد اکسیژن در گازهای خروجی از دودکش پس از محاسبه آورده شده است. در جدول ۲ مقادیر کاهش یافته



## جدول ۱- افزایش بازده کوره های پالایشگاه شماره ۱ تهران در اثر کاهش میزان هوای اضافی

اطلاعات کوره های پالایشگاه شماره ۱ تهران قبل و بعد از انجام اقدامات اصلاحی و کاهش اکسیژن موجود در گازهای خروجی												
واحد	کوره	شرایط موجود اکتبر ۱۹۹۹										
		میزان خوراک	انرژی دریافتی کوره	هوای اضافی	درصد $O_2$ فعلی $\rightarrow$ درصد $O_2$ هدف	دمای سوخت گاز	راندمان	مصرف سوخت سنگین	مصرف سوخت گاز	راندمان	مصرف سوخت سنگین	مصرف سوخت گاز
					BSPD	MMKcal/h		$^{\circ}C$	%	Kg-fuel/h	Kg-fuel/h	%
تقطیر در اتمسفر	H-۱۰۱	۱۱۸۰۰۰	۵۵/۲۸	۱/۳۳	۴/۹ $\rightarrow$ ۲/۵	۴۵۵	۷۵	۷۵۱۷	-	۷۷/۷	۷۲۶۳	-
	H-۱۰۲	۱۱۸۰۰۰	۴/۶۶	۱/۳۴	۵/۰ $\rightarrow$ ۲/۵	۵۵۶	۶۹/۵	۶۸۴	-	۷۳	۶۵۲	-
تقطیر در خلأ	H-۱۵۱	۴۷۲۶۰	۱۶/۷۲	۱/۶۷	۸/۰ $\rightarrow$ ۳/۰	۵۵۳	۶۳/۷	۲۶۷۳	-	۷۲/۵	۲۳۵۵	-
کاهش گرانیروی	H-۳۰۱	۱۵۰۰۰	۸/۶۳	۳/۸	۱۵/۱ $\rightarrow$ ۲/۰	۲۶۹	۶۴/۲	۱۳۵۵	-	۸۶/۷	۱۰۱۶	-
تبدیل کاتالیستی	H-۲۰۱	۱۶۰۵۰	۶/۴۰	۱/۱۷	۲/۸ $\rightarrow$ ۲/۵	۳۷۷	۸۱/۳	-	۶۸۸	۸۱/۶	-	۶۸۶
	H-۲۰۲	۱۶۰۵۰	۴/۲۵	۲/۱۲	۱۰/۶ $\rightarrow$ ۲/۵	۳۲۴	۷۳/۷	-	۵۰۳	۸۴/۵	-	۴۴۰
	H-۲۰۳	۱۶۰۵۰	۵/۳۲	۱/۱۴	۶/۱ $\rightarrow$ ۲/۵	۸۷۱	۵۷/۲	-	۸۱۴	۵۷/۲	-	۸۱۴
پلات فرمر	H-۲۵۱	۱۵۵۶۰	۱۰/۶۴	۱/۴	۵/۶ $\rightarrow$ ۲/۵	۷۷۷	۵۴/۹	-	۱۶۶۷	۶۱/۷	-	۱۴۸۳
	H-۲۵۵	۱۵۵۶۰	۸/۳۳	۱/۷۲	۸/۳ $\rightarrow$ ۲/۵	۷۵۰	۴۸/۲	-	۱۵۱۱	۶۳/۷	-	۱۱۴۴
	H-۲۵۲	۱۵۵۶۰	۱/۵۹	۳/۵۹	۱۴/۷ $\rightarrow$ ۲/۵	۶۲۶	۱۷/۲	-	۸۰۴	۶۹/۴	-	۲۰۰
	H-۲۵۴	۱۵۵۶۰	۴/۹۹	۲/۹۱	۱۳/۳ $\rightarrow$ ۲/۵	۳۰۶	۶۶/۸	-	۸۱۶	۸۴	-	۶۵۰
آیزوماکس	H-۴۳۰	۵۴۲۰	۴/۱۳	۱/۳۱	۴/۶ $\rightarrow$ ۲/۵	۵۰۱	۷۲/۹	-	۴۹۵	۷۵/۶	-	۴۷۸
	H-۴۳۱	۵۴۲۰	۴/۳۲	۱/۱۷	۲/۸ $\rightarrow$ ۲/۵	۴۸۲	۷۶/۲	-	۴۹۶	۷۶/۵	-	۴۹۴
	H-۴۳۲	۵۴۲۰	۴/۳۲	۱/۳۰	۴/۵ $\rightarrow$ ۲/۵	۴۸۴	۷۴	-	۵۱۱	۷۶/۴	-	۴۹۴
	H-۴۳۳	۲۰۰۰۰	۲۳/۳۲	۱/۳۰	۴/۵ $\rightarrow$ ۲/۵	۴۳۲	۷۶/۳	-	۲۶۵۷	۷۸/۹	-	۲۵۸۴
هیدروژن	H-۸۰۱	۲۷ MSCFMPD	۴۲/۰۵	۱/۸۳	۹/۰ $\rightarrow$ ۲/۵	۳۸۹	۷۰/۸	-	۵۱۹۰	۷۸/۹	-	۴۶۶۲
مصرف سوخت کل								۱۲۲۲۹	۱۶۱۵۲	-	۱۱۲۸۶	۱۴۱۲۹
LHV سوخت سنگین: ۹۷۲۲kcal/kg: LHV سوخت گاز: ۱۱۴۱۲kcal/kg												

پس از ارزیابی پیشنهادات مختلف توسط مشاوران داخلی و خارجی و کارشناسان شرکت پالایش نفت تهران و بررسی آنها توسط مدیریت به لحاظ امکان اجرا، هزینه های مربوطه و زمان مورد نیاز برای انجام آنها، پروژه های مختلفی در این زمینه ها تعریف شدند که اهم کارهای انجام شده از حدود سال ۱۳۸۰ تاکنون به شرح زیر است:

### نصب سیستم آنالایزر گازهای خروجی از دودکش

تقریباً روی خروجی تمامی کوره های پالایشگاه تهران یک سیستم آنالایزر گازهای خروجی از دودکش برای تعیین درصد گازهای خروجی از دودکش نصب شده است.

### بهینه سازی مصرف انرژی و کارهای انجام شده بر روی کوره های پالایشگاه شماره ۱ تهران در جهت کارایی عملکرد کوره ها و کاهش مصرف سوخت

در سال های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه کاهش مصرف انرژی و گازهای آلاینده هوا بر روی واحد های فرایندی پالایشگاه تهران انجام شده است. مهمترین کار انجام شده در این زمینه که در سال ۱۳۷۹ آغاز شد، بررسی پتانسیل صرفه جویی در کوره های پالایشگاه ۱ بوده است. خلاصه نتایج این مطالعه توسط نویسندگان این مقاله در بخش های ابتدایی و جداول آورده شده است.

### تغییر سوخت مشعل های کوره ها از سوخت سنگین به سوخت گاز

با نصب یک ایستگاه تقلیل فشار گاز در پالایشگاه جنوبی و تامین گاز مصرفی کوره ها از شبکه فشار قوی گاز کشور، سوخت اکثر کوره های پالایشگاه از سوخت سنگین به سوخت گاز تغییر یافت. در حال حاضر تقریباً تمامی مشعل های کوره های پالایشگاه امکان کار با دو سوخت گاز و سوخت سنگین را دارا می باشند.

### کوره واحد تقطیر اتمسفریک H-101

کوره واحد تقطیر اتمسفریک پالایشگاه تهران همواره دارای مشکل بالا بودن دمای سطحی تیوبها بود که در یک مورد منجر به باد کردگی شدید یکی از تیوب ها شد که سبب از سرویس خارج کردن کوره و تعویض تیوب معیوب شد. در شرایط واقعی عملیات کوره، نشتی هوا از دریچه های دید، هدر باکس تیوب ها، سوراخ های موجود روی دیواره کوره و... وجود داشت که نیاز به تعمیر داشتند. به علت کارکرد نامناسب مشعل ها و بلند بودن طول شعله ها نگهدارنده های

جدول ۲- افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت کوره های پالایشگاه شماره ۱ تهران در اثر بازیاب

حرارت از گاز های داغ خروجی از کوره ها

اطلاعات کوره های پالایشگاه شماره ۱ تهران قبل و بعد از نصب پیش گرمکن هوا و بازیاب حرارتی گازهای خروجی													
واحد	کوره	میزان خوراک	انرژی دریافتی کوره	APH & WHB	هوای اضافی	دمای گازهای خروجی		راندمان		مصرف سوخت سنگین Kg-fuel/h		مصرف سوخت گاز Kg-fuel/h	
		BSPD	MMKcal/h			قبل C°	بعد C°	قبل %	بعد %	قبل	بعد	قبل	بعد
تقطیردر اتمسفر	H-۱۰۱	۱۱۸۰۰۰	۵۵/۲۸	APH	۱/۳۳	۴۵۵	۱۷۰	۷۵	۹۰	۷۵۱۷	۶۲۳۸	-	-
	H-۱۰۲	۱۱۸۰۰۰	۴/۶۶	-	۱/۳۴	۵۵۶	۵۵۶	۶۹/۵	۷۳	۶۸۴	۶۵۲	-	-
تقطیر در خلأ	H-۱۵۱	۴۷۲۶۰	۱۶/۷۲	APH	۱/۶۷	۱۷۰	۱۷۰	۶۳/۷	۹۰	۲۶۷۳	۱۸۹۰	-	-
کاهش گرانیروی	H-۳۰۱	۱۵۰۰۰	۸/۶۳	-	۳/۸	۲۶۹	۲۶۹	۶۴/۲	۸۶/۷	۱۳۵۵	۱۰۱۶	-	-
تبدیل کاتالیستی	H-۲۰۱	۱۶۰۵۰	۶/۴۰	-	۱/۱۷	۳۷۷	۳۷۷	۸۱/۳	۸۱/۶	-	-	۶۸۸	۶۸۶
	H-۲۰۲	۱۶۰۵۰	۴/۲۵	-	۲/۱۲	۳۲۴	۳۲۴	۷۳/۷	۸۴/۵	-	-	۵۰۳	۴۴۰
	H-۲۰۳	۱۶۰۵۰	۵/۳۲	-	۱/۱۴	۳۵۰	۳۵۰	۵۷/۲	۸۳	-	-	۸۱۴	۵۶۱
پلات فرمر	H-۲۵۱	۱۵۵۶۰	۱۰/۶۴	WHB	۱/۴	۲۵۰	۲۵۰	۵۴/۹	۸۷	-	-	۱۶۶۷	۱۰۴۶
	H-۲۵۵	۱۵۵۶۰	۸/۳۳	WHB	۱/۲۲	۲۵۰	۲۵۰	۴۸/۲	۸۷	-	-	۱۵۱۱	۸۲۵
	H-۲۵۲	۱۵۵۶۰	۱/۵۹	WHB	۳/۵۹	۲۵۰	۲۵۰	۱۷/۲	۸۷	-	-	۸۰۴	۱۵۹
	H-۲۵۴	۱۵۵۶۰	۴/۹۹	-	۲/۹۱	۳۰۶	۳۰۶	۶۶/۸	۸۴	-	-	۸۱۶	۶۵۰
آیزوماکس	H-۴۳۰	۵۴۲۰	۴/۱۳	WHB	۱/۳۱	۲۵۰	۲۵۰	۷۲/۹	۸۷	-	-	۴۹۵	۴۱۳
	H-۴۳۱	۵۴۲۰	۴/۳۲	WHB	۱/۱۷	۲۵۰	۲۵۰	۷۶/۲	۸۷	-	-	۴۹۶	۴۳۲
	H-۴۳۲	۵۴۲۰	۴/۳۲	WHB	۱/۳۰	۲۵۰	۲۵۰	۷۴	۸۷	-	-	۵۱۱	۴۳۲
	H-۴۳۳	۲۰۰۰۰	۲۳/۳۲	WHB	۱/۳۰	۲۵۰	۲۵۰	۷۶/۳	۸۷	-	-	۲۶۵۷	۲۳۳۱
هیدروژن	H-۸۰۱	۲۷ MSCF MPD	۴۲/۰۵	-	۱/۸۳	۳۸۹	۳۸۹	۷۰/۸	۷۸/۹	-	-	۵۱۹۰	۴۶۶۲
مصرف سوخت کل										۱۲۲۲۹	۹۷۹۶	۱۶۱۵۲	۱۲۶۳۷
LHV سوخت سنگین: ۹۷۲۲kcal/kg LHV سوخت گاز: ۱۱۴۱۲kcal/kg													

## جدول ۳- نصب آنالایزر اکسیژن و سیستم کنترل افت در جهت بهبود عملکرد کوره ها و افزایش کارایی

نصب سیستم کنترل گاز اکسیژن خروجی <sup>۱</sup>						
کوره	واحد	صرفه جویی سوخت		مقدار صرفه جویی	سرمایه گذاری	بازگشت سرمایه
		سنگین (۱۰ <sup>۳</sup> تن/سال)	گاز (۱۰ <sup>۳</sup> تن/سال)	۱۰ <sup>۳</sup> US\$	۱۰ <sup>۳</sup> US\$	سال
H-۱۰۱	تقطیر در اتمسفر	۲۵۴	-	۴۰/۱	۱۷۰	۴/۲
H-۱۰۲	تقطیر در اتمسفر	۲۸۰	-	۴۴/۲	۱۷۰	۳/۹
H-۱۵۱	تقطیر در خلأ	۳۱۸	-	۵۰/۲	۱۷۰	۳/۴
H-۳۰۱	کاهش گرانیروی	۳۳۹	-	۵۳/۶	۱۷۰	۳/۲
H-۲۰۱	تبدیل کاتالیستی	-	۱۲/۳	۱/۹۳	۱۷۰	۸۸
H-۲۰۲	تبدیل کاتالیستی	-	۳۸۶	۶۰/۶	۱۷۰	۲/۸
H-۲۰۳	پلات فرمر	-	۱۵۵۱	۲۴۳/۶	۱۷۰	۰/۷
H-۲۵۱	پلات فرمر	-	۳۸۰۸	۵۹۸	۱۷۰	۰/۳
H-۲۵۵	پلات فرمر	-	۴۲۰۶	۶۶۰/۳	۱۷۰	۰/۲
H-۲۵۲	پلات فرمر	-	۱۰۱۸	۱۵۹/۸	۱۷۰	۱
H-۲۵۴	پلات فرمر	-	۱۰۱۸	۱۵۹/۸	۱۷۰	۱
H-۴۳۰	آیزوماکس	-	۵۰۳	۷۹	۱۷۰	۲/۱
H-۴۳۱	آیزوماکس	-	۳۹۲	۶۱/۶	۱۷۰	۲/۷
H-۴۳۲	آیزوماکس	-	۴۸۴	۷۶	۱۷۰	۲/۲
H-۴۳۳	آیزوماکس	-	۲۱۰۹	۳۳۱/۱	۱۷۰	۰/۵
H-۸۰۱	هیدروژن	-	۳۲۳۸	۵۰۸/۳	۱۷۰	۰/۳
مجموع		۱۱۱۹	۱۸۷۲۸	۳۱۲۸/۱	۲۷۲۰	۰/۸۷

۱- هزینه سرمایه گذاری ها مربوط به سال ۲۰۰۰ میلادی است.

## جدول ۴- نصب WHB&amp;APH

نصب پیش گرمکن هوا و بازیاب حرارتی <sup>۱</sup>							
کوره	واحد	صرفه جویی سوخت		صرفه جویی به سال	سرمایه گذاری ۱۰ <sup>۳</sup> US\$	زمان بازگشت سرمایه گذاری به سال	
		سنگین (۱۰ <sup>۳</sup> تن/سال)	گاز (۱۰ <sup>۳</sup> تن/سال)				
نصب APH	H-۱۰۱	تقطیر در اتمسفر	۱۱۲۰۴	-	۱۷۷۱	۲۵۰۰	۱/۴
	H-۱۵۱	تقطیر در خلأ	۷۸۳	-	۱۲۴	۱۵۰۰	۱۲
	مجموع		-	-	۱۸۹۵	۴۰۰۰	۲/۱
نصب WHB	H-۲۵۱	پلات فرمر	-	۱۲/۲	۱/۹۲	۳۰۰۰	۲/۴
	H-۲۵۵	پلات فرمر	-	۳۸۰۳	۵۹۸		
	H-۲۵۲	پلات فرمر	-	۳۹۵۵	۶۲۱		
	H-۴۳۰	آیزوماکس	-	۵۰۱	۷۹	۲۵۰۰	۴/۷
	H-۴۳۱	آیزوماکس	-	۳۹۲/۴	۶۱/۶		
	H-۴۳۲	آیزوماکس	-	۴۸۴/۴	۷۶		
	H-۴۳۳	آیزوماکس	-	۱۹۹۹/۰	۳۱۳/۸		
مجموع		-	۱۱۱۵۲	۱۷۵۱	۵۵۰۰	۳/۱	

۱- هزینه سرمایه گذاری ها مربوط به سال ۲۰۰۰ میلادی است.

۴- تغییر مکانیزم تنظیم دمپر از سیستم اهرم دستی به سیستم چرخ و چرخ دنده

۵- تعویض کلیه ترموکوپل های سطحی شکسته شده مربوط به لوله های هر یک از پاس های کوره و ترموکوپل های سقفی

۶- پس از اجرای طرح افزایش ظرفیت پالایشگاه تهران (CROS) در سال ۱۳۸۳ کلیه سیستم های ابزار دقیق واحد تقطیر از سیستم های قدیمی پنوماتیکی به سیستم های جدید الکترونیکی تغییر یافت

۷- پس از بروز آتش سوزی سال گذشته در پالایشگاه تهران کلیه لوله های ناحیه تشعشی و جابجایی تعویض شدند همچنین اتصالات برگشتی لوله های ناحیه جابجایی کوره واحد تقطیر پالایشگاه تهران که از نوع هدری<sup>۱</sup> بودند و سابقاً به علت نشی های مکرر و بروز آتش سوزی در آنها سبب از سرویس خارج شدن کوره شده بود با اتصالات زانوی برگشتی<sup>۲</sup> تعویض شد.

#### واحد تقطیر در خلاء، کوره H-151

۱- تعویض حدود ۳۰٪ از ورق های بدنه و سیمانکاری دیواره کوره به علت سوختگی آنها به منظور جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره

۲- تغییر طراحی سقف کوره از نوع آجرهای معلق به نوع سیمانی

۳- تعویض کلیه مشعل های قدیمی کوره ها با مشعل های جدید (دوگانه سوز) Low NO<sub>x</sub> Burner با سیستم درافت طبیعی ساخت شرکت Foster Wheeler. (شکل ۵)

۴- تغییر مکانیزم تنظیم دمپر از سیستم اهرم دستی به سیستم چرخ و چرخ دنده

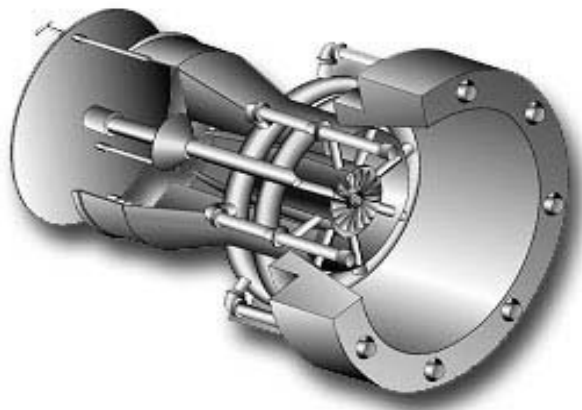
۵- تعویض کلیه ترموکوپل های سطحی شکسته شده مربوط به لوله های هر یک از پاسهای کوره و ترموکوپل های سقفی

سقفی غالباً از شدت حرارت سرخ می شدند و در هر تعمیرات اساسی لازم بود تعداد زیادی از آنها به همراه قسمت های زیادی از آجرهای سقف تعویض شوند. گازهای خروجی از دودکش نیز عمدتاً در دمای بالایی قرار داشتند و این مسئله سبب ایجاد خوردگی بر روی دمپر شده بود. از آنجایی که یک فن گریز از مرکز وظیفه تامین هوای ورودی کوره که با در افت اجباری کار می کرد را بر عهده داشت صدای زیادی در واحد ایجاد می شد و گاهی اوقات به روز اشکال در آن منجر به از سرویس خارج شدن کوره می گردید. اهم کارهای انجام شده بر روی کوره فوق در راستای حل مشکلات مذکور در سال های اخیر به شرح زیر است:

۱- تعویض حدود ۸۰٪ از ورق های بدنه و سیمانکاری دیواره کوره به علت سوختگی آنها و جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره

۲- تغییر طراحی سقف کوره از نوع آجرهای معلق به نوع سیمانی

۳- تعویض هر ۱۶ مشعل قدیمی کوره ها با ۴۸ مشعل جدید (دوگانه سوز) Low NO<sub>x</sub> Burner با سیستم در افت طبیعی ساخت شرکت Foster Wheeler (شکل ۵)



شکل ۵- یک مشعل دوگانه سوز NO<sub>x</sub> بسیار پایین [۱۳] (ULNB)

1. Header Type Bend  
2. Return Bend

**واحد کاهش گرانی، کوره H-301<sup>۱</sup>**

۱- تعویض حدود ۲۰٪ از ورق های بدنه و سیمان کاری دیواره کوره به علت سوختگی آنها به منظور جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره

۲- تعمیر و ترمیم دیواره سیمانی وسط کوره

۳- تعمیر کلیه مشعل های کوره

۴- اصلاح ساختار فرایندی واحد در راستای پایین آوردن

دمای عملیاتی کوره به میزان ۱۰۰°F

**واحد تبدیل کاتالیستی<sup>۲</sup>، کوره های H-202<sup>۲</sup>، H-203 و H-253**

واحد گوگردزایی از نفتا<sup>۴</sup>

۱- نصب ورق های فلزی روی قسمت هایی از دیواره کوره ها به صورت وصله از رو به علت سوختگی ورق های قبلی به منظور جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره

۲- ترمیم سیمان کاری قسمتهایی از دیواره و تعویض آجرهای کف کوره ها

۳- اصلاح و ترمیم دمپر کوره ها

۴- تعویض کلیه ترموکوپل های سطحی شکسته شده مربوط به لوله های هریک از پاس های کوره و تعدادی از ترموکوپل های سقفی

**واحد تبدیل نفتا، کوره های H-251, H-252, H-255**

۱- نصب ورق های فلزی روی قسمتهایی از دیواره کورها به صورت وصله از رو به علت سوختگی ورق های قبلی به منظور جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره.

۲- ترمیم سیمان کاری قسمت هایی از دیواره و تعویض آجرهای کف کوره ها.

۲- اصلاح و ترمیم دمپر کوره ها.

۳- تعویض کلیه ترموکوپل های سطحی شکسته شده مربوط به لوله های هریک از پاسهای کوره و تعدادی از ترموکوپل های سقفی.

**واحد آیزوماکس<sup>۵</sup>، کوره های H-430, H-431, H-432, H-433**

۱- تعویض حدود ۲۵٪ از ورق های بدنه کوره به علت سوختگی آنها به منظور جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره.

۲- تعویض آجرهای نسوز مخصوص دمای بالا در قسمت هایی از دیواره کوره های H-430, H-431, H-432.

۳- ترمیم سیمان کاری قسمت هایی از سقف و تعویض آجرهای کف کوره های H-430, H-431, H-432.

۴- تعویض کلیه ترموکوپل های سطحی شکسته شده مربوط به لوله های هر یک از پاسهای کوره و ترموکوپل های سقفی

**واحد تولید هیدروژن<sup>۶</sup>، کوره H-801**

۱- تعویض حدود ۲۰٪ از ورق های بدنه کوره به علت سوختگی آنها و جلوگیری از نشی هوا به داخل کوره

۲- تعویض آجرهای نسوز مخصوص دمای بالا در قسمت هایی از دیواره کوره

۳- اصلاح و ترمیم عایق کاری قسمت هایی از سرخروجی لوله ها از سقف

**پیشنهادات برای آینده**

- نصب سیستم کنترل گازهای خروجی حاصل از احتراق (FGSC<sup>۷</sup>) روی کوره ها.

- بررسی شرایط اجرایی نصب یک پیش گرمکن هوا (APH) بر روی کوره های H-101 و H-151 به نحوی که دمای گاز خروجی را به ۱۷۰ درجه سانتیگراد رسانیده و باعث صرفه جویی در سوخت مصرفی کوره شود.

- بررسی شرایط اجرایی نصب یک سیستم بازیاب حرارتی (WHB) در محل اتصال سه داکت کوره های حرارتی

5. Vacuum Gas Oil Hydro-Cracking Unit :Iso Max
6. Hydrogen Production Unit
7. Flue Gas System Control

1. Visbreaker Unit
2. CRU(Catalyst Reforming Unit)
3. NO.1 Stripper Reboiler Heating Furnace
4. Naphta Hydro-desulfurization Unit

$Q_s$ :	تلفات حرارتی محاسبه شده دودکش	(H-251, H-255, H-252) به منظور تولید بخار ۳۰۰ پوند
$H_f$ :	تصحیح حرارت محسوس سوخت	(براینج مربع) با توجه به بالا بودن دمای گازهای خروجی از
$H_a$ :	تصحیح حرارت محسوس هوا	(۶۲۶ تا ۷۷۰ درجه سانتیگراد).
$H_m$ :	تصحیح حرارت محسوس ماده اتمایزر <sup>۱</sup>	- بررسی شرایط اجرایی نصب یک سیستم بازیاب حرارتی
$T_a(^{\circ}C)$ :	دمای هوای محیط	(WHB) در محل اتصال سه داکت کوره های حرارتی واحد
$T_d(^{\circ}C)$ :	دمای مبنای طراحی	آیزوماکس (H-430, H-431, H-432, H-433) به منظور
$T_e(^{\circ}C)$ :	دمای گازهای خروجی	تولید بخار ۳۰۰ پوند (براینج مربع) با توجه به بالا بودن دمای
$T_f(^{\circ}C)$ :	دمای سوخت	گازهای خروجی از (۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد).
$T_m(^{\circ}C)$ :	دمای ماده اتمایزر	
$T_t(^{\circ}C)$ :	دمای هوا	
$\text{kJ/kg-fuel}$ :	واحد انرژی	

<b>فهرست علائم و نشانه ها</b>		
$e$ :	بازده حرارتی خالص، برحسب درصد	
$e_{\text{gross}}$ :	بازده حرارتی ناخالص، برحسب درصد	
$Q_r$ :	تلفات حرارتی تابشی	

## منابع

- [۱] مروری بر بهره‌وری انرژی در پالایشگاه‌های کشور، انتشارات مرکز مطالعات تکنولوژی دانشگاه شریف، شماره دوم، زمستان ۱۳۸۲.
- [۲] ع.م. هاشمی، بهینه‌سازی عملکرد کوره یعنی حفظ سرمایه، انتشارات اداره آموزش شرکت پالایش نفت تهران، ۱۳۸۳.
- [۳] ترازنامه انرژی سال ۸۲، معاونت امور انرژی دفتر برنامه ریزی انرژی، ۱۳۸۲.
- [۴] ج. فتحی، تجربیات نیروگاه‌های پیشرفته، جلد ۳، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول، ۱۳۷۹.
- [5] C.E. Baukal and R.E. Schwartz, *The John Zink Combustion Hand book*, CRC, 2001.
- [6] *Burners for Fired Heaters in Refinery and Petrochemical Service*, API Standard, Recommended Practice 535, 2003.
- [7] *Mesurement of the Thermal Efficiency of Fired Heaters*, API Standard, Recommended Practice 532, , 1982.
- [8] *Guide for Inspection of Refinery Equipment, Chapter IX-Fired Heaters and stacks*, API Standard, 1981.
- [9] *Air Preheat Systems for Fired Process Heaters*, API Standard, API Recommended Practice 533, 1986.
- [10] S. R. Turns, *An Intoduction to Combustion Concepts and Applications*, McGrow Hill, Inc., 1996.
- [11] A. Garg , *Optimized Fired Heater Operation Saves Money*, <http://www.heatflux.com /Papers /Optimized. pdf>, 1997.
- [12] *Energy Conservation Potential Study in Tehran Refinery*, Idemitsu Kosan Co. Ltd, 1999.
- [13] *Coen Ultra Low NOx Delta-Nox Burner*, [www.coen.com](http://www.coen.com), 2004.