

کاهش مصرف سوخت در دیگ های بخار به ازاء هر تن بخار تولیدی

فرشاد پناهی زاده^۱، شهرام هاشمی مرغزار^۲، محمود فرزانه گرد^۲، پروین فرخ فر^۳

مرکز پژوهش پتروشیمی بندر امام (ره)، تحقیقات فنی و مهندسی
f_pannahizadeh@yahoo.com

چکیده

در مقاله حاضر، ضمن بررسی عوامل موثر بر راندمان دیگ های بخار و ارائه روشهای گوناگون جهت محاسبه آنها، عملکرد دیگ های بخار مجتمع پتروشیمی بندر امام مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. هر یک از اجزاء دیگ های بخار بعنوان یک حجم کنترل مورد بررسی قرار گرفته و ضمن اعمال معادلات حاکم، بازده سیستم و بویژه بازده حاصل از موازنه انرژی آنها بدست آورده شده است. تاثیر پارامترهای مختلف ترمودینامیکی بر میزان اتلافات انرژی و نیز بازده انرژی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. بازده انرژی دیگ های بخار به دلیل نبودن انرژی در اثر بازگشت ناپذیریهای سیستم از بازده انرژی آنها کمتر است. عوامل اساسی خارجی موثر در عملکرد دیگ های بخار شامل اتلاف حرارتی، درصد هوای اضافی، آب تخلیه اضطراری و نیز رویکرد کاری اجزاء بشکل توأمان بوده، که خود به تفکیک ارزیابی شده اند. نتایج نشان می دهند که بازیافت انرژی حرارتی گازهای دودکش، نه تنها باعث صرفه جویی مالی قابل توجه شده بلکه سبب بالا رفتن راندمان انرژی و انرژی دیگ های بخار مورد مطالعه به دلیل بهره مندی بیشتر از گرمای حاصل از احتراق سوخت، کاهش آلودگی محیط زیست به دلیل مصرف سوخت کمتر و بالا رفتن ظرفیت عملی تولید بخار به واسطه افزایش یافتن سطح حرارتی می گردد. در خاتمه نیز راهکارهای جهت دستیابی به بازده انرژی بالا و بالطبع آن کاهش مصرف سوخت در دیگ های بخار ارائه شده است.

واژه های کلیدی: بازده انرژی، اتلافات انرژی، هوای اضافی، بازیافت انرژی

۱- مقدمه

صنعت پتروشیمی کشور در بین صنایع داخلی به سبب شرایط و جایگاه خاص در اقتصاد ملی، نیازمندی بیشتری به ابزار صرفه جویی انرژی برای ارتقاء و تثبیت وضعیت خود در منطقه و جهان دارد. شرکت ملی صنایع پتروشیمی با اتخاذ سیاستهای مناسب و توجه خاص به صرفه جویی انرژی و در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی، در این زمینه ها در کشور پیشرو بوده و بدون شک در مجموع شرکتهای پتروشیمی، شرکت پتروشیمی بندر امام از این حیث پیشتاز می باشد. دیگ های بخار از جمله تجهیزاتی هستند که برای تولید بخار در پتروشیمی بندر امام مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به هزینه بر بودن تولید بخار و ارزش اقتصادی آن، بررسی و بهبود عملکرد آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. بر این اساس بهبود راندمان دیگ های بخار با توجه به حجم تولید بخار و بالطبع آن کاهش مصرف سوخت و نیز اهمیت آن در فرایند تولید ضروری می نماید.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

۲- دکتری در مهندسی مکانیک

۳- کارشناس ارشد مهندسی شیمی

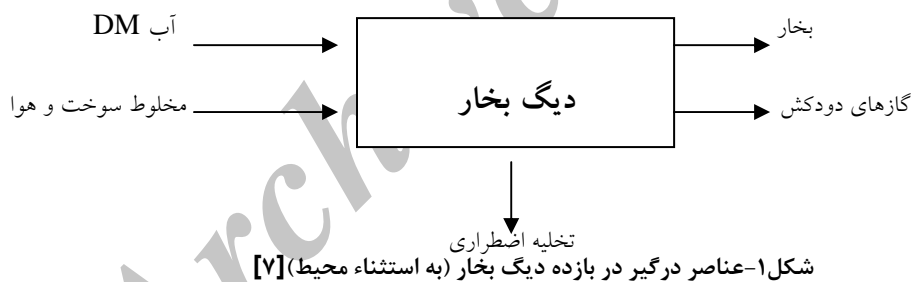
۲- مشخصات طراحی دیگ های بخار مورد مطالعه

واحد تولید آب، برق، بخار مجتمع پتروشیمی بندر امام دارای پنج دیگ بخار از نوع لوله آبی بوده که ظرفیت تولید بخار هر کدام ۳۰۰ تن در ساعت با فشار 52 kg/cm^2 در دمای 440°C می باشد. این دیگ های بخار توسط شرکت کاواساکی ژاپن ساخته شده و در سال ۱۳۶۹ با بازدهی در حدود ۸۰ درصد راه اندازی شده اند. هر دیگ بخار دارای دو پمپ توربینی و یک پمپ برقی جهت تامین آب درام بخار و یک فن مکش اجباری توربینی می باشد.

۳- روشهای محاسبه بازده دیگ های بخار

۳-۱- بازده انرژی (بازده بر اساس قانون اول ترمودینامیک)

بازده حرارتی دیگ بخار می تواند از رابطه حرارت اضافه شده به سیال عامل تقسیم بر انرژی سوخت تعریف گردد. در این بخش ضمن تعریف کامل بازده مشخص می گردد که چگونه هوای مورد نیاز احتراق، محصولات احتراق، کار مصرفی دیگ بخار و همچنین رطوبت هوا در این تعریف نقش ایفاء می نمایند. در شکل شماتیک ۱ عناصر درگیر در راندمان دیگ بخار (به استثناء محیط) نشان داده شده است [۷].



میزان راندمان قانون اول بقرار زیر قابل محاسبه می باشد.

$$\eta_{1,B} = \frac{\sum_{out} \dot{m}_v h_v - \sum_{in} \dot{m}_w h_w}{\dot{m}_f LHV \times \eta_C + \dot{m}_{dry,air} h_a + \dot{w}_{in,B} + \dot{m}_{wet,air} h_{w,a}} \quad (1)$$

عناصر اصلی رابطه فوق الذکر در ذیل تعریف شده اند.

$$\dot{m}_f, \dot{m}_w, \dot{m}_v = \text{دبی جرمی بخار خروجی، دبی آب DM ورودی و دبی جرمی سوخت ورودی،} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\frac{kg}{s} = \dot{m}_{wet,air}, \dot{m}_{dry,air}$$

دبی جرمی هوای خشک و مرطوب ورودی ،

$$\frac{kJ}{kg} = h_{w,a}, h_a, h_w, h_v$$

آنتالپی بخار خروجی ، آب ورودی ، هوا خشک و هوا مرطوب ،

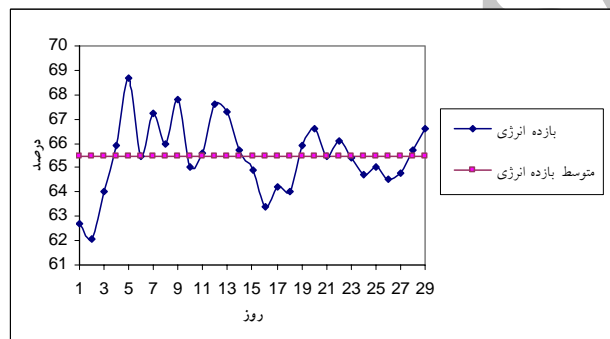
$$KW = \dot{w}_{in,B}$$

کار ورودی دیگ بخار ، η_C راندمان احتراق

$$\frac{kJ}{kg} = LHV$$

ارزش حرارتی پایین سوخت ،

در شکل ۲ میزان انحراف از متوسط بازده انرژی دیگ بخار E بر اساس ۱۵ درصد هوای اضافی (حالت طراحی) در اسفند ماه سال ۱۳۸۵ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده حداکثر $\pm 5/5\%$ انحراف از متوسط بازده انرژی می باشند.



شکل ۲- میزان انحراف از متوسط بازده انرژی دیگ بخار E

۲-۳- محاسبه بازده انرژی (بازده بر اساس قانون دوم ترمودینامیک)

مقدار بازده انرژی دیگ بخار برابر با میزان انرژی اضافه شده به سیال عامل تقسیم بر مجموع انرژی سوخت کار مصرفی دیگ بخار و انرژی ورودی هوا است. این میزان از رابطه زیر بدست می آید [۶].

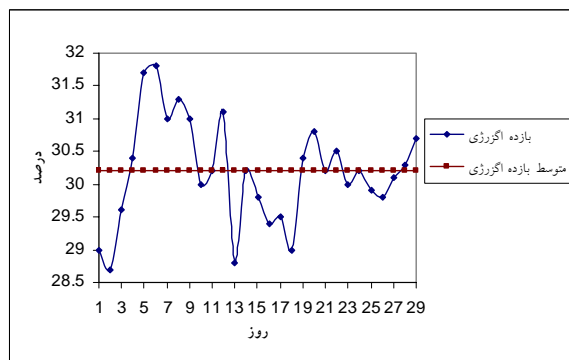
$$\eta_{II,B} = \frac{\sum_{out} \dot{m}_v e_{x,v} - \sum_{in} \dot{m}_w e_{x,w}}{\dot{m}_f e_{ch,f} + \dot{m}_{dry,air} e_{x,a} + \dot{w}_{in,B}} \quad (2)$$

در رابطه یاد شده عناصر حاضر بقرار ذیل تعریف شده اند.

$$e_{x,w}, e_{x,v} = \text{اگرژی بخار خروجی و اگرژی آب ورودی}, \frac{kJ}{kg}$$

$$e_{x,a}, e_{ch,f} = \text{اگرژی شیمیایی سوخت و اگرژی هوای ورودی}, \frac{kJ}{kg}$$

در شکل ۳ میزان انحراف از متوسط بازده اگرژی دیگ بخار E در اسفند ماه سال ۱۳۸۵ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده حداکثر $\pm 5\%$ انحراف از متوسط بازده اگرژی می باشند.



شکل ۳- میزان انحراف از متوسط بازده اگرژی بویلر E

۴- بررسی عوامل موثر بر عملکرد دیگ های بخار

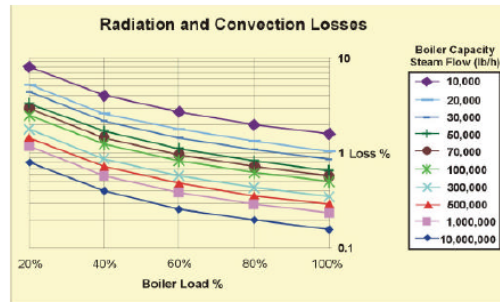
بطور کلی دیگ های بخار تحت تاثیر عوامل متفاوتی قرار دارند. به منظور شناخت مکان های هدر رفت انرژی در دیگهای بخار مجتمع پتروشیمی بندر امام، لازم است هر یک از عوامل مذکور شناسائی گردند. لذا در ادامه به معرفی این عوامل می پردازیم.

۴-۱- اتلاف حرارت از بدنه دیگ بخار

اتلاف حرارت از بدنه ناشی از دو مکانیزم انتقال حرارت تشعشی و جابجائی بوده که به علت بالاتر بودن دمای بدنه دیگ بخار از دمای محیط ایجاد می شود. انتقال حرارت تشعشی به محیط با توان چهارم دمای بدنه و همچنین ضریب صدور سطح بستگی دارد. بنابراین با کاهش دمای بدنه می توان میزان قابل ملاحظه ای از اتلاف انرژی از این طریق را کاهش داد. انتقال حرارت جابجائی به محیط نیز به اختلاف دمای بدنه و محیط و سرعت باد وابسته می باشد. در مجموع کاهش انرژی از بدنه تنها با کاهش دمای بدنه قابل دسترسی می باشد. لازم به ذکر است درصد اتلاف حرارت از بدنه دیگهای بخار بزرگ با توجه به نرخ جهانی حدود

۱ تا ۱/۵ درصد می باشد. در شکل ۴ تغییرات تلفات انتقال حرارت جابجائی و تشعشع برحسب بارهای مختلف نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می گردد در بارهای کم این تلفات بیشتر می باشند [۲]



شکل ۴- تلفات جابجائی و تشعشع دیگ های بخار [۱]

۴-۲- آب تخلیه اضطراری

آب تغذیه دیگ های بخار شامل کندانس ها و آب جبرانی می باشد. از آنجائی که در این آب ها همواره ذرات جامد غیر محلول وجود دارد، لذا برای بالابردن کیفیت عملکرد دیگ های بخار لازم است مقداری از آب در گردش دیگ بخار تخلیه شود. معمولاً تخلیه اضطراری دیگ های بخار بین ۳-۱۵ درصد ظرفیت بخار تولیدی را به خود اختصاص می دهد. مقدار انرژی تلف شده در اثر تخلیه اضطراری از رابطه (۳) محاسبه می شود [۵].

$$Blowdown_{losses} = \dot{m}_{B.D} C_{P,B.D} (T_{B.D} - T_a) \quad (3)$$

در رابطه فوق $\dot{m}_{B.D}$ دبی جرمی تخلیه اضطراری، $C_{P,B.D}$ گرمای ویژه در فشار ثابت، $T_{B.D}$ دمای بخار تخلیه اضطراری و T_a دمای محیط می باشد.

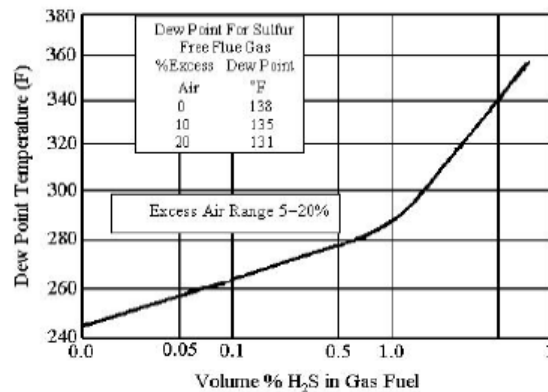
۴-۳- اتلاف حرارت از دودکش

گازهای خروجی از دودکش یکی از مهمترین پتانسیل های بازیافت انرژی در دیگ های بخار محسوب می شوند. از آنجائی که گازهای خروجی از دودکش دارای دمای نسبتاً بالایی هستند، می توان از انرژی آنها برای گرم کردن آب تغذیه یا هوای ورودی به دیگ بخار استفاده کرد. مطالعات نشان می دهند که به ازاء هر $20^{\circ}C$ کاهش دمای گازهای خروجی دودکش یک درصد به راندمان دیگ بخار اضافه می شود.

لازم به ذکر است پارامتر محدودکننده میزان کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش، دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک محصولات حاصل از احتراق می باشد.

بدیهی است که کاهش بیش از حد دما باعث ایجاد اسید سولفوریک شده و خوردگی تجهیزات را به دنبال خواهد داشت. در شکل ۵ تاثیر مقدار گوگرد موجود در سوخت گازی بر روی نقطه شبنم گازهای خروجی از دیگ بخار نشان داده شده است [۹].

$$C + 20^{\circ} = \text{دمای نقطه شبنم} = \text{حداقل دمای مجاز گازهای خروجی} \quad (۴)$$



شکل ۵- دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک حاصل از احتراق سوخت گازی [۹]

۵- راهکارهای بهبود راندمان دیگ های بخار مجتمع پتروشیمی بندر امام

۵-۱- نصب اکونومایزر جهت بازیافت انرژی حرارتی گازهای دودکش

برای مشخص سازی توجیه منطقی بودن اجرای پروژه، لازم است که میزان صرفه جوئی مربوطه به طور دقیق مشخص شود. برای این کار از آمار و اطلاعات سال ۱۳۸۵ که در جدول ۱ (میزان تولید بخار، مصرف سوخت و آب DM واحد بخار) آورده شده، استفاده می گردد.

جدول ۱- میزان مصرف سوخت، آب DM و بخار تولیدی در سال ۸۵

بخار تولیدی (TON)	آب مصرفی (TON)	سوخت مصرفی (Nm ³)
۹۲۵۵۴۴۰۰۰۰	۹۵۹۷۵۴۰۰۰۰	۷۱۰۱۴۲۱۰۰

با در نظر گرفتن متوسط راندمان ۷۰ درصد، از آنجائیکه نصب اکونومایزر ۵-۱۰ درصد راندمان را افزایش می دهد، مصرف جدید سوخت در واحد بخار، برای تولید این مقدار بخار قابل محاسبه خواهد بود. با توجه با اینکه دیگ های بخار سوخت گازی (Mixed gas) مصرف می کنند، در حالیکه مجتمع گاز طبیعی (Lean gas) را خریداری می کند، لذا برای معادل سازی این دو از ارزش حرارتی پایین آنها استفاده شده است.

قیمت گاز طبیعی مورد استفاده دیگ های بخار مجتمع ۱۱۵ ریال بر نرمال متر مکعب $\left(\frac{Rial}{Nm^3}\right)$ می باشد.

$$V_{mixed\ gas, new} = \left(\frac{\eta_{old}}{\eta_{new}}\right) V_{mixed\ gas, old} \quad (4)$$

$$V_{mixed\ gas, new} = \left(\frac{0.7}{0.8}\right) \times 710142100 = 621374338 \frac{Nm^3}{year}$$

$$\Delta V_{mixed\ gas} = V_{mixed\ gas, old} - V_{mixed\ gas, new} = 710142100 - 621374338 = 88767763 \frac{Nm^3}{year} \quad (5)$$

$$\Delta V_{lean\ gas} = \left(\frac{LHV_{mixed\ gas}}{LHV_{lean\ gas}}\right) \Delta V_{mixed\ gas} = \left(\frac{48177.328}{48315.462}\right) \times 88767763 = 88513976 \frac{Nm^3}{year} \quad (6)$$

$$Saving = 88513976 \frac{Nm^3}{year} \times 115 \frac{Rials}{Nm^3} = 10179107240 \frac{Rials}{year}$$

$$Saving \approx 1000 \frac{million\ Tomans}{year}$$

$$Payback\ Period = \frac{Investment}{Saving} \approx \frac{3000}{1000} \approx 3\ years, 36\ months$$

۵-۲- نصب مبدل بازیافت حرارت آب تخلیه اضطراری

بازیافت حرارت از آب تخلیه اضطراری از دیگر روشهای بازیافت انرژی بوده که از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. با توجه به بالا بودن دمای آب تخلیه اضطراری، می توان با قرار دادن یک مبدل از این انرژی به منظور پیش گرم کردن آب جبرانی استفاده نمود. در صورت نصب مبدل بازیافت حرارت، با توجه به شرایط کاری دیگ بخار با توجه به محاسبات ذیل حداقل به میزان ۸۱۷۱۵۸۰۱۴ ریال در سال ذیل صرفه جویی کرد.

$$\dot{m}_{blowdown} = 300 \frac{Ton}{hr} \times 0.05 = 15 \frac{Ton}{hr}$$

$$\dot{Q}_{blowdown} = \dot{m}_{blowdown} \times (h_2 - h_1) = \frac{15000}{3600} \times (1195.9 - 530.2) = 2773.972 Kw$$

$$\dot{Q}_{blowdown} = \dot{m}_{mixedgas} LHV_{mixedgas}$$

$$\dot{m}_{mixedgas} = \frac{2773.972}{48177.328} = 0.058 \frac{kg_{mixedgas}}{s} \div 1.274 \frac{Nm^3}{kg_{mixedgas}} = 0.045 \frac{Nm^3}{s} = 1425277.678 \frac{Nm^3}{year}$$

$$1425277.678 \frac{Nm^3}{year} \times \left(\frac{48177.328}{48315.462} \right) \times 115 \frac{Rials}{Nm^3} = 163431602.878 \times 5 = 817158014 \frac{Rials}{year}$$

۶- نتیجه گیری

- بازده انرژی از بازده انرژی به دلیل نبودن انرژی رخ داده در دیگ بخار کمتر است. نبودن انرژی به دلیل کاهش سریع دما بین محصولات احتراق و بخار است. بطور متوسط بازده انرژی دیگ بخار در حدود یک سوم بازده انرژی است. تلفات گاز دودکش با افزایش هوای اضافی و دمای گاز دودکش افزایش می یابد. اما اثر افزایش هوای اضافی به اندازه دمای گاز دودکش نیست. تلفات دیگر که در اثر نشر سطوح دیگ بخار و تخلیه اضطراری اتفاق می افتند خیلی کوچک هستند. بطور کلی تلفات انرژی در دیگ بخار در اثر نبودن انرژی رخ داده ناشی از بازگشت ناپذیریهای سیستم است. غیر ممکن است بتوان نرخ بازگشت ناپذیریها را در دیگ بخار بدون تغییر دادن ساختار و سیستم آن کاهش داد. اما تلفات موجود در جریان های دیگر همانند گاز دودکش، تخلیه اضطراری و نشر سطوح را می توان با تنظیم کردن پارامترهای نگهداری حداقل کرده و در شرایط بهینه نگهداشت.

- طراحی، ساخت و نصب اکونومایزر جهت بازیافت انرژی حرارتی گازهای دودکش، اجرای این طرح نه تنها باعث صرفه جویی مالی بالغ بر ۱۰ میلیارد ریال در سال شده بلکه سبب بالا رفتن راندمان انرژی و انرژی دیگ های بخار مورد مطالعه به دلیل بهره مندی بیشتر از گرمای حاصل از احتراق سوخت، کاهش آلودگی محیط زیست به دلیل مصرف سوخت کمتر و بالا رفتن ظرفیت عملی تولید بخار به واسطه افزایش یافتن سطح حرارتی می گردد. لذا اجرای این طرح نه تنها منطقی و قابل قبول بلکه نیاز روز می باشد.
- نصب سیستم بازیافت حرارت از آب تخلیه اضطراری (صرفه جوئی مالی ۸۱۷ میلیون ریال در سال)
- کنترل هوای اضافی احتراق با نصب فن دور متغیر
- از آنجائیکه درصد هوای اضافی تابع بار دیگ بخار می باشد، با نصب فن دور متغیر می توان در هر بار میزان هوای اضافی احتراق را بطور بهینه کنترل نمود.
- رسوبات در سطوح انتقال حرارت در دیگ بخار موجب افزایش مقاومت حرارتی می گردند، لذا سرویس و تمیزکاری منظم این سطوح سبب افزایش راندمان آن می گردد.

تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاس فراوان از مرکز پژوهش پتروشیمی بندر امام که حمایت مالی این تحقیق را بر عهده داشتند.

مراجع

- 1- Kaewboonsong,W., Kuprianov,I., 2006,Minimizing fuel and environmental costs for a variable-load power plant (co-firing fuel oil and natural gas,Journal of Fuel processing technology,Vol. 87,PP.1085-1094
- 2- Abdallah, A.M., Ismail,A.L., 2001,Saving energy lost from steam boiler vessels,Journal of Renewable energy, Vol. 23,PP.537-550
- 3- Pathmasiri,MMR.,Attalage RA., 2006,Exergy analysis of steam boilers in Sri Lanka,Department of mechanical engineering, university of Moratuwa
- 4- Dincer, I. and Cengel , Y., 2001, Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering ,Journal of Entropy,PP.116-149
- 5- Gunn, D. and Horton, R., 2001,Industrial Boiler ,Wiley
- 6- Bejan,A., 1996, Advanced thermodynamics ,Wiley
- 7- Wark ,K., 1998, Advanced thermodynamics for engineers,McGraw-Hill

- 8- Glassman, I., 1996, Combustion, Third edition, Academic press
- 9- Kam W. Li, A. Paul Priddy, Power plant system design, John Wiley & Sons
- 10- CRC Handbook of Thermal Engineering, 1999 by CRC press LLC
- 11- Özisik, M., 1998, Heat transfer, McGraw-Hill
- 12- Shield, D., 1981, Boilers, first published, McGraw-Hill
- 13- Aroa, V., 1985, "Cheek fired heater performance", Hyd. Proc. Journal vol. 64, PP. 85-87
- 14- Perry's, 1999, Chemical engineers, Hand book, McGraw-Hill

Archive of SID