

بررسی علل لهیدگی دندانهای چرخنده گرمکن هوای یک نیروگاه و ارائه راه حل

دکتر سید ابراهیم موسوی ترشیزی - مهندس یوسف حاصلی
واحد تخصصی تحلیل خرابی
دانشکده صنعت آب و برق
تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: چرخنده، لهیدگی، سختی، پروفیل دندانه، خستگی سطحی

چکیده:

انتخاب شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای تقویت و بهبود پایداری سطحی دندانه چرخنده، ضروریست که سطح آن سخت‌تر شده و پروفیل دندانه تصحیح گردد. طی طراحی مجدد قطعه مشخص شد که در صورت افزایش سختی سطح، انتخاب پروفیل مناسب دندانه و نیز رعایت نکات بهره‌برداری چرخنده، نظیر تنظیم صحیح آن، استحکام دندانه‌های چرخنده افزایش یافته و قطعه از تحمل مطلوبی در برابر بارهای تماسی تکرار شونده برخوردار خواهد شد.

۱- مقدمه

در هر واحد نیروگاه مورد بررسی به منظور گرمایش هوای ورودی بویلر، از دو دستگاه ژانگستروم عمودی استفاده می‌شود که دو شاخه A و B هر بویلر را تغذیه می‌کنند. بخش اصلی ژانگستروم، روتور است که مجموعه صفحاتی (Baskets) که در مسیر دود و هوا قرار می‌گیرند، روی آن

چرخنده گرمکن هوای (ژانگستروم) واحدهای یک نیروگاه که جنس آن از فولاد AISI 5135 است، به دفعات دچار تخریب می‌شود؛ بطوریکه دندانهای آن طی درگیری با پین‌های نصب شده حول روتور ژانگستروم، ساییده شده و به مرور از بین می‌روند. نتایج تحقیقات بعمل آمده در زمینه تخریب و ساییدگی دندانهای چرخنده نشان می‌دهند که تحت شرایط فعلی (از نظر سختی، ابعاد و نحوه بهره‌برداری) استحکام سطحی قطعه به نحوی است که در صورت تکرار بارهای تماسی، دندانه به مرور دچار لهیدگی شده و از بین می‌رود. این موضوع با محاسبه مجدد، توسط استانداردهای طراحی نیز تایید گردیده است. همچنین در طراحی ابعاد و پروفیل دندانه موجود از استاندارد مناسبی استفاده نشده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده و با توجه به نوع درگیری چرخنده با پین‌ها، پروفیل دندانه باید از نوع چرخ‌زنجیر

۳- هندسه و پارامترهای چرخدنده

نمای ساده‌ای از درگیری چرخدنده با پین‌های نردبانی در شکل ۲ نشان داده شده است. با بررسی اسناد نیروگاهی و اندازه‌گیریهای انجام شده از یک چرخدنده نو، ابعاد آن به شرح جدول ۱ تعیین گردیده است. درگیری چرخدنده با نردبانی مشابه درگیری چرخ و زنجیر می‌باشد. محاسبات انجام شده با فرض درگیری دو چرخدنده ساده، مقادیر متفاوتی را برای گام دنده چرخدنده و نردبانی نتیجه می‌دهد؛ در حالیکه بر اساس قانون چرخدنده‌ها این دو مقدار بایستی برابر باشند و بعبارت دیگر، طراحی آن بر اساس طرح چرخدنده‌های استاندارد صورت نگرفته است [۱].



الف) یک نمونه چرخدنده نو



ب) دندانه چرخدنده در آستانه لهیدگی بصورت مورب



ج) تخریب دندانه‌ها بصورت پله‌وار

شکل ۱ تصویری از چرخدنده نو به همراه دو نمونه از

قطعات معیوب [۱]

نصب می‌شوند. دو عدد یاتاقان در بالا و پایین محور مرکزی روتور وجود دارد که یاتاقان پایینی از نوع رولر برینگ مخروطی بوده و ثابت می‌باشد؛ ولی یاتاقان بالایی قابل تنظیم است که از آن برای تنظیم عمود بودن محور استفاده می‌شود. سرعت دوران روتور تقریباً ۲rpm است. صفحاتی که در قسمت داغ قرار دارند در نتیجه عبور گازهای حاصل از احتراق گرم شده و سپس در قسمت سرد، انرژی جذب شده خود را به هوای سرد ورودی ژانگستروم منتقل می‌نمایند و بدین ترتیب گرمایش هوا صورت می‌گیرد. عامل دوران روتور یک چرخدنده با سرعت ۲۴rpm است که در نتیجه درگیری دندانه‌های آن با پین‌های یک زنجیر ثابت (نردبانی) که دور روتور قرار دارد، حرکت روتور میسر می‌گردد. قدرت لازم برای به گردش درآوردن چرخدنده از طریق یک موتور الکتریکی با توان نامی ۳۰kw، راندمان ۸۹/۵٪ و دور نامی ۷۳۵rpm تامین می‌شود.

۲- نوع خرابی

مشاهدات و بررسی‌های بعمل آمده از چرخدنده ژانگستروم این نیروگاه حاکی است که دندانه‌های چرخدنده بطور عمده به دو گونه متفاوت سایش یکنواخت و یا سایش مورب سردنده آسیب می‌بینند [۱]. در شکل ۱ دو نمونه از چرخدنده‌های مستعمل به همراه نمونه نو از این چرخدنده نشان داده شده است. طی بازدیدهای بعمل آمده از چرخدنده‌های فرسوده موجود در کارگاه نیروگاه، ملاحظه گردید که دندانه‌های چرخدنده‌های مستعمل مطابق شکل ۱-ج بصورت پله‌پله تیز شده است. بطور کلی چرخدنده ژانگستروم هر یک از واحدهای ۱ تا ۴ نیروگاه از آغاز بهره‌برداری تاکنون، به علت لهیدگی و از بین رفتن دندانه‌ها، چندین بار تعویض گردیده است. پینهای نردبانی نیز تا به حال مشکل خاصی نداشته و فقط در یکی از واحدها به دلیل ساییدگی دو بار تعویض گردیده‌اند.

عملیات حرارتی شونده هستند [۱]. همچنین خواص مکانیکی این فولادها در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق اسناد نیروگاهی توصیه شده است که سطوح درگیری چرخنده با روش شعله‌ای و به اندازه HB ۳۷۰-۴۳۵ با ضخامت ۴-۵mm سخت گردد. به منظور اطمینان از میزان دقیق سختی سطح دندان، چندین نمونه از چرخنده‌های موجود و در نقاط مختلف، تحت آزمایش سختی سنجی قرار گرفت که نتایج بدست آمده (مقادیر متوسط) به شرح زیر می‌باشد:

چرخنده مستعمل:	۳۲۴ HB
چرخنده روسی نو:	۲۳۷ HB
چرخنده ایرانی نو:	۳۳۳ HB

جدول ۱ مشخصات هندسی چرخنده و پین (ابعاد به میلیمتر)

قطر خارجی	۸۶۶	مدول	۲۸/۲۵
قطر داخلی	۷۴۶	تعداد دندانه‌ها	۲۸
عرض دندانه	۷۰	قطر گام نردبانی	۱۰۱۷۰
قطر گام	۷۹۱	قطر پین	۴۰
عمق دندانه	۶۰	تعداد پین‌ها	۳۶۰

۴- تعیین جنس قطعه و مشخصات مکانیکی آن

نتایج بدست آمده از آزمایش کوانتومتری انجام شده بر روی پین و چرخنده نشان می‌دهد که معادل جنس پین و چرخنده در استاندارد آمریکایی AISI به ترتیب فولادهای ۱۰۴۵ و ۵۱۳۵ می‌باشد (جدول ۲) که هر دو از نوع فولادهای

جدول ۲ درصد وزنی عناصر موجود در ترکیب جنس نمونه‌های انتخاب شده از پین و دندانه و

مقایسه با ترکیب فولادهای ۱۰۴۵ و ۵۱۳۵ در استاندارد AISI. [۱]

عنصر	پین	AISI 1045	دندانه	AISI 5135
C	۰/۴۹	۰/۴۳-۰/۵۰	۰/۳۶	۰/۳۳-۰/۳۸
Si	۰/۳۰	Max ۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۱۵-۰/۳۵
Mn	۰/۷۵	۰/۶۰-۰/۹۰	۰/۶۲	۰/۶۰-۰/۸۰
P	۰/۰۲۴	Max ۰/۰۴۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵
S	۰/۰۲۲	Max ۰/۰۵۰	۰/۰۱۶	۰/۰۴۰
Cr	۰/۰۵	-	۱/۰۱	۰/۸-۱/۰۵
Ni	۰/۰۱	-	۰/۲۰	-
Mo	۰/۰۱	-	۰/۰۵	-

جدول ۳ خواص مکانیکی فولادهای معادل جنس پین و چرخنده [۱]

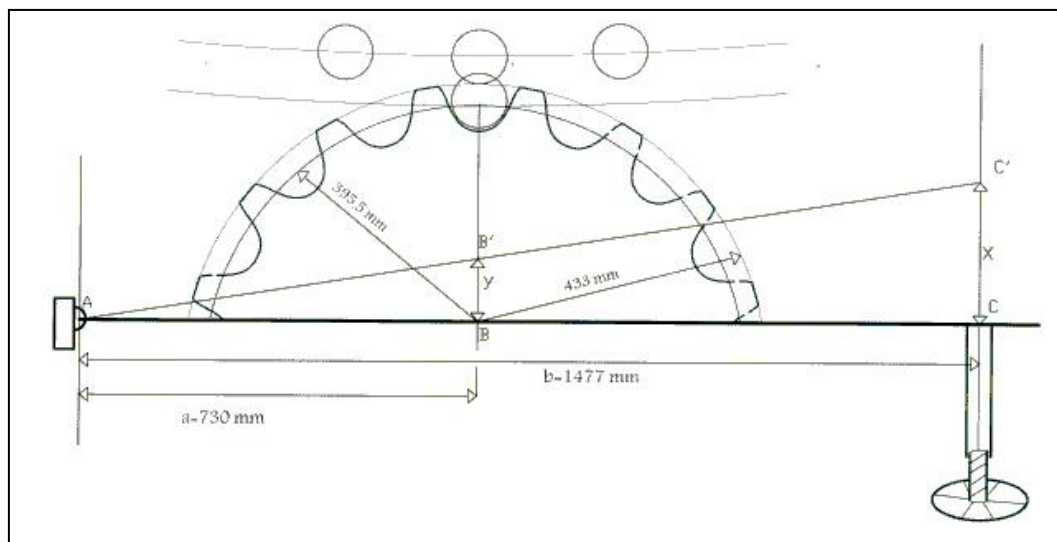
فولاد	S_y (MPa)	S_u (MPa)	کاهش طول (%)	کاهش سطح مقطع (%)
AISI 1045	۲۳۰	۶۵۰-۸۰۰	۱۶ Min	۴۰ Min
AISI 5135	۶۳۰	۸۵۰-۱۰۰۰	۱۳ Min	۴۰ Min

مماس خارج شده و پین‌ها به سردندان‌ها برخورد نمایند که این امر موجب افزایش تنش لهیدگی دندان‌ها می‌شود. طی بررسی‌ها و بازدیدهای بعمل آمده ملاحظه گردید که تنظیم چرخنده با دقت کافی صورت نمی‌گیرد. اثبات این موضوع با انجام بررسی‌هایی در محل صورت پذیرفت [۲]. بدین ترتیب که با رنگ زدن دو دندان مجاور هم و تغییر مقدار فاصله مراکز روتور و چرخنده، مقدار درگیری دندان‌های رنگ‌خورده در چندین مرحله مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳

گفتنی است که سختی دندان‌ها در تمامی موارد آزمایش یکسان نبوده و از پراکندگی وسیعی برخوردار بود ولی تمامی مقادیر کمتر از HB ۳۷۰ بودند. همچنین آزمایش انجام شده بر روی نمونه پین انتخابی، سختی آن را برابر HB ۴۱۲ نشان داد.

۵- تنظیم چرخنده

عدم تنظیم صحیح چرخنده و درگیری ناقص دندان و پین سبب می‌شود که دواير گام نردبانی و چرخنده از حالت



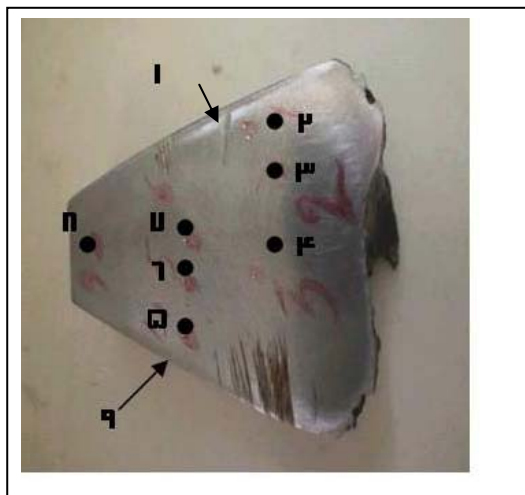
شکل ۳ سیستم تنظیم درگیری چرخنده با نردبانی [۲]

لهیدگی مورد بررسی قرار گرفت. استانداردهای مذکور برای طراحی چرخنده‌های ساده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از اینرو در بکارگیری آنها در مساله حاضر که درگیری از نوع چرخنده - پین است و با در نظر گرفتن شعاع انحناء پین، برخی از روابط تصحیح و حین محاسبات در نظر گرفته شده‌اند [۲]. برای محاسبه نیرو و تنش واقعی وارد بر دندان چرخنده لازم بود که توان الکتروموتور در حالت کارکرد دائم در دست باشد. اندازه این مقدار تحت شرایط عملکرد نامی در مدارک نیروگاهی ۳۰ kW ارائه گردیده است، اما با توجه به جریان مصرفی الکتروموتور ژانگستروم واحدهای مختلف در شرایط بهره‌برداری دائم، متوسط توان واقعی الکتروموتورهای شاخه‌های مختلف حدود ۲۰ kW اندازه‌گیری شد. محاسبات برای عمر یکسال با احتمال عدم خرابی ۹۹٪، بر مبنای سختی چرخنده روسی نو (۲۳۷HB) و

نمایش ساده‌ای از نحوه درگیری و مکانیزم تنظیم دواير گام چرخنده و نردبانی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تغییر مکان لازم پیچ تنظیم (X)، از حالت تماس پین با سردندان تا درگیری کامل دواير گام برابر ۱۱۷ mm است. تحقیق عملی این موضوع به ازاء مقادیر جابجایی ۶۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۱۷ میلی‌متر پیچ تنظیم چرخنده و بررسی میزان درگیری دندان با پین صورت پذیرفت. نتیجه بررسیها نشان می‌دهد که متناسب با افزایش مقدار جابجایی پیچ از فاصله ۶۰ mm تا ۱۱۷ mm، مقدار درگیری چرخنده با نردبانی کاملتر و ارتعاشات مجموعه نیز کمتر می‌شود.

۶- بررسی طراحی چرخنده

با بهره‌گیری از دو استاندارد معتبر AGMA [۳] و BS [۴] طراحی چرخنده از دیدگاه خستگی خمشی و خستگی



شکل ۵ نمونه تهیه شده از دندان‌ها برای انجام آزمایش

۷- بررسی امکان افزایش سختی جنس دندان

با تکیه بر نتایج بدست آمده از استانداردهای طراحی به نظر می‌رسید که برای تقویت و بهبود پایداری سطحی دندان، می‌بایست سطح آن سخت‌تر گردد. مطالعات بیشتر در این زمینه روی نمونه‌ای که از دندان یک چرخنده مستهلک تهیه شده بود، صورت گرفته است [۲]. نمونه مورد نظر (شکل ۵) تحت آزمایش سختی سنجی قرار گرفت و ملاحظه شد که بیشترین مقدار سختی در مقطع مربوط به سطح درگیری دندان (نقطه شماره ۱) است که برابر $HB 219$ می‌باشد. پس از این مرحله، قطعه طبق دستورالعمل‌های موجود [۵] در کوره آزمایشگاهی تا دمای $845^{\circ}C$ حرارت داده شده و سپس توسط روغن تندسرما می‌گردید. عملیات بازپخت قطعه بر اساس نمودار مربوطه فولاد AISI 5135 با هدف رسیدن به سختی $HB 350$ انجام پذیرفت. پس از انجام عملیات حرارتی، سختی قطعه به $HB 325$ رسید که مقدار تفاوت آن با سختی مورد انتظار ($HB 350$) می‌تواند در اثر خطاهای آزمایشگاهی (اندازه‌گیری درجه حرارت در حین عملیات حرارتی، آزمایش سختی سنجی و ...) باشد.

۸- رسم پروفیل دندان

به منظور بررسی طرح پروفیل دندان، با بهره‌گیری از استاندارد DIN 8197 (دستورالعمل طراحی پروفیل چرخ‌زن‌گیر) و با در نظر گرفتن مقادیر فعلی «تعداد دندان» و

با فرض درگیری کامل دندان و پین، استاندارد بودن مراکز چرخنده‌ها و سالم بودن اجزای سیستم چرخنده (نظیر یاتاقانها) صورت پذیرفت؛ طوریکه در تعیین تنش‌های دندان و در نهایت محاسبه ضریب اطمینان خستگی، اثرات عواملی چون توزیع بار، شکل دندان، تمرکز تنش، اثرات دینامیکی، طبیعت انتقال قدرت به سیستم چرخنده و ... لحاظ شده است [۲]. در جدول ۴ نتایج بدست آمده از استانداردهای AGMA و BS ارائه گردیده است. بطور کلی، هر دو روش عمر نامحدودی را برای دندان چرخنده از نظر خستگی خمشی پیش‌بینی می‌کنند. اما تحت شرایط بهره‌برداری موجود و با توجه به جنس، سختی، طرح پروفیل و روش تولید فعلی چرخنده، دندان تحمل بارگذاری ناشی از تنش‌های تکرارشونده سطحی را نداشته و هر دو استاندارد عمر محدودی را برای آن ارزیابی نموده و لهیدگی دندان‌های چرخنده را در اثر تکرار بارهای سطحی تایید می‌نمایند (شکل ۴).

جدول ۴ نتایج بدست آمده از استانداردهای مختلف به منظور بررسی طراحی چرخنده [۲]

استاندارد طراحی	ضریب اطمینان خستگی خمشی	ضریب اطمینان خستگی لهیدگی
AGMA	۴/۶۲	۰/۶۳
BS	۲/۷	۰/۴۷



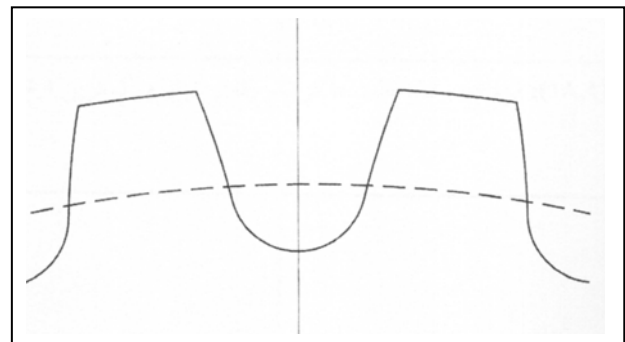
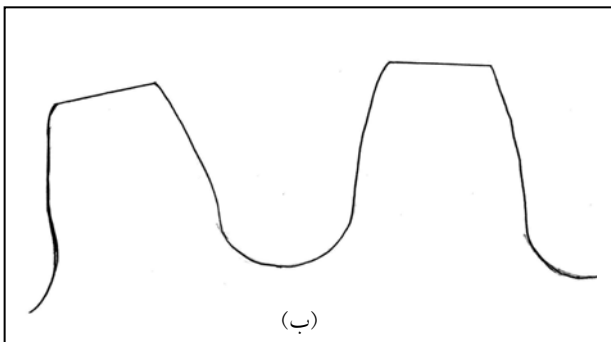
شکل ۴ نمای نزدیک از لهیدگی دندان

ارتفاع دندان‌ها است. با دقت در جدول اخیر می‌توان چنین بیان داشت که ارتفاع دندان‌ها موجود (۶۰mm) خارج از محدوده بدست آمده از استاندارد DIN (۴۱/۸۵۵/۵mm) می‌باشد. از سوی دیگر، به کمک دستورالعمل DIN، فرم دندان‌ها در حالت‌های یاد شده ترسیم گردید.

«گام دایره‌ای» چرخنده به عنوان مفروضات اولیه، منحنی دیواره دندان‌ها ترسیم و با طرح فعلی آن مقایسه گردید [۲]. در جدول ۵ ابعاد چرخنده موجود با اندازه‌های بدست آمده از استاندارد DIN برای دو حالت بیشترین و کمترین ارتفاع مجاز دندان‌ها مقایسه شده است. مقادیر ستون اول، میانگین اندازه‌های قید شده در دو ستون مربوط به ماکزیمم و مینیمم

جدول ۵ مقایسه ابعاد محاسبه شده بر اساس استاندارد DIN با مقادیر چرخنده موجود [۲]

پارامتر	دندان‌ها رسم شده (مقادیر میانی)	دندان‌ها رسم شده (با ماکزیمم ارتفاع مجاز دندان‌ها)	دندان‌ها رسم شده (با مینیمم ارتفاع مجاز دندان‌ها)	دندان‌ها موجود
قطر گام (mm)	۷۹۲/۷	۷۹۲/۷	۷۹۲/۷	۷۹۱
قطر خارجی (mm)	۸۵۰	۸۶۳/۶	۸۳۶/۳	۸۶۶
ارتفاع دندان‌ها (mm)	۴۸/۶۵	۵۵/۵	۴۱/۸	۶۰
ارتفاع سرزنده (mm)	۲۹	۳۵/۸	۲۱/۸	۳۷/۵



شکل ۶ پروفیل رسم شده بر اساس مقادیر میانی در استاندارد DIN (الف) و مقایسه آن با طرح دندان‌ها موجود (ب)

مناسب برای سختی سطحی و ابعاد قطعه صورت پذیرفت [۶]. بدین ترتیب که نخست با ثابت فرض نمودن تمامی پارامترهای موثر بر تنش دندان‌ها برای شرایط موجود چرخنده (ابعاد، بار اعمالی و ...) میزان تاثیر سختی بر ضریب اطمینان خستگی بررسی گردید که نتایج بدست آمده به ازای دو مقدار مختلف ضخامت سخت شده ۴/۵mm (متوسط ضخامت ارائه شده در اسناد نیروگاهی) و ۹mm (حد ضخامت سخت شده بر اساس استاندارد BS) در شکل ۷ ارائه گردیده است. شکل اخیر بیانگر تاثیر مطلوب سختی و ضخامت سخت شده بر پایداری سطحی دندان‌ها می‌باشد. اما با این وجود، به ازای

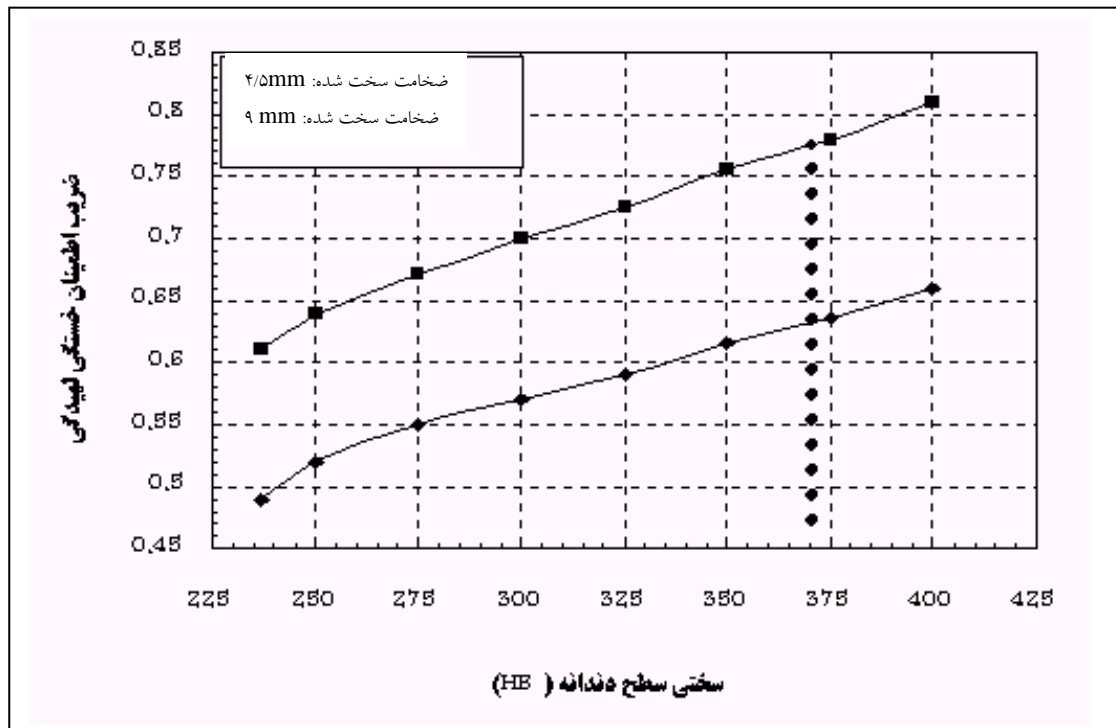
برای مثال در شکل ۶ پروفیل رسم شده بر اساس مقادیر میانی ارائه و با پروفیل فعلی دندان‌ها مقایسه شده است. پروفیل دندان‌ها رسم شده در استاندارد DIN در مشاهدات ظاهری تفاوت بارزی با دندان‌ها موجود دارد که این مساله در مراحل بعدی تحقیق بطور عمیقتر مورد توجه واقع گردید.

۹- انتخاب طرح مناسب برای چرخنده

مطابق نتایج تحقیقات بعمل آمده، به منظور جلوگیری از ساییدگی دندان‌های چرخنده و بهبود عمر و دوام قطعه، با تکیه بر استاندارد BS تحقیقی در خصوص انتخاب مقادیر

گردید و ملاحظه شد که با تصحیح پروفیل دندان‌ها و افزایش سختی تا 370HB با ضخامت 9mm ، ضریب اطمینان خستگی لهیدگی به بیش از واحد رسیده ($S_H = 1.15$) و تحمل دندان‌ها در برابر بارهای تکرار شونده خمشی نیز بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد ($S_F = 4.6$).

هیچ کدام از مقادیر سختی، مقدار دوام دندان‌ها موجود برای تحمل خستگی لهیدگی در حد مطلوب نیست (ضریب اطمینان کمتر از واحد). در گام بعدی با در نظر گرفتن سختی 370HB با ضخامت سخت‌کاری 9mm برای دندان‌ها، طراحی دندان‌ها رسم شده به کمک استاندارد DIN (شکل ۶الف) و با فرض درگیری کامل دندان‌ها و پین بررسی



شکل ۷ منحنی تغییرات ضریب اطمینان خستگی لهیدگی با سختی سطح دندان‌ها به ازای دو ضخامت سخت‌کاری [۶]

۱۰- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
 مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه تحلیل و بررسی علل خرابی دندان‌های چرخنده گرمکن هوای نیروگاه رامین نشان می‌دهد که به دلایل زیر دوام و عمر قطعه کاهش یافته و با گذشت زمان دندان‌ها به سبب لهیدگی از بین می‌روند:
سختی نامناسب دندان‌ها: توصیه می‌شود که سختکاری قطعه با همین جنس (AISI 5135) تا مقدار 370HB و ضخامت 9mm انجام پذیرد.

۱۰- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
 مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه تحلیل و بررسی علل خرابی دندان‌های چرخنده گرمکن هوای نیروگاه رامین نشان می‌دهد که به دلایل زیر دوام و عمر قطعه کاهش یافته و با گذشت زمان دندان‌ها به سبب لهیدگی از بین می‌روند:
سختی نامناسب دندان‌ها: توصیه می‌شود که سختکاری قطعه با همین جنس (AISI 5135) تا مقدار 370HB و ضخامت 9mm انجام پذیرد.

پروفیل و ابعاد دندان‌ها: استفاده از پروفیل شکل ۶الف به هنگام تولید و ساخت چرخنده ضروری است.

مراجع:
 [۱] سید ابراهیم موسوی ترشیزی، تحلیل خرابی و ارائه راه‌حل برای جلوگیری از تخریب دندان‌های چرخنده گرمکن هوای نیروگاه رامین، گزارش اول، شناخت قطعه و شناسنامه کاری،

دانشکده صنعت آب و برق، واحد تخصصی تحلیل خرابی، تیر
ماه ۱۳۸۱.

[۲] سید ابراهیم موسوی ترشیزی، تحلیل خرابی و ارائه راه‌حل
برای جلوگیری از تخریب دندانه‌های چرخنده گرمکن هوای
نیروگاه رامین، گزارش دوم، بررسی کلی سیستم و نوع خرابی،
دانشکده صنعت آب و برق، واحد تخصصی تحلیل خرابی،
مهر ماه ۱۳۸۱.

[3] Joseph E. Shigley and Charles R. Mishke,
Standard Handbook of Machine Design,
McGraw-Hill, Second edition, 1996.

[4] Alec Stokes, Gear Handbook: Design and
Calculation, Butterworth-Heinemann Ltd, First
published, 1992.

[۵] راهنمای کاربران عملیات حرارتی، مترجمین: ربیعی،
قنبری، ... انتشارات جهان نو، چاپ اول، ۱۳۷۵.

[۶] سید ابراهیم موسوی ترشیزی، تحلیل خرابی و ارائه راه‌حل
برای جلوگیری از تخریب دندانه‌های چرخنده گرمکن هوای
نیروگاه رامین، گزارش سوم، ارائه راه حل، دانشکده صنعت
آب و برق، واحد تخصصی تحلیل خرابی، آذر ماه ۱۳۸۱.