بررسی علت شکست پره روتور کمپرسور توربین گازی ۳۲ مگاواتی به کمک شواهد میدانی و مطالعات میکروسکوپیک

رامین وطندوست [۱،۲] علیرضا ترابی [۳،۴]

[۱] کارشناس ارشد پایش وضعیت C.M شرکت مدیریت تولید برق ری
[۲] مشاور و مدرس دوره های تخصصی نیروگاهی دانشگاه صنعت آب و برق ایران
a_torabi@ut.ac.ir

[۳] عضو هیات علمی دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران
[۴] مشاور شرکت مدیریت تولید برق ری
Ramin_vatandoust۶۴۴۷@yahoo.com

واژه های کلیدی: توربین گازی، پره کمپرسور، ناپایداری جریان، ارتعاشات، خستگی دور بالا، رزونانس، خوردگی حفره ای

چکیده

واحد ۵ توربین گازی نیروگاه ری در حین کار، ناگهان دچار حادثه شده و واحد از ادامه کار باز ایستاد. پس از باز نمودن واحد، مشاهده شد که یکی از پره های متحرک مرحله اول کمپرسور دچار شکست شده و تعداد زیادی از پره های متحرک مراحل مختلف نیز دچار خمیدگی و آسیب شده اند. با توجه به اینکه محل شکستگی پره بالاتر از نصف طول پره (نسبت به ریشه پره) بود، شائبه وقوع بارگذاری غیرمتداول بر روی پره شکل گرفت. جهت خمیدگی تعداد زیادی از پره ها نیز که در راستای خلاف جریان هوا بود، فرضیه وقوع ناپایداری جریان هوا در کمپرسور (از جمله سرج، ناپایداری دوار و ...) را قوت بخشید. سرانجام، مروری بر منابع علمی موجود و جستجو در میان گزارش های مربوط به حوادث مشابه بهمراه مطالعات میدانی و فنی نشان داد که شکست پره در نتیجه وقوع پدیده رزونانس و در نتیجه خستگی دور بالا برای پره بوده است. بررسی بیشتر صورت گرفته توسط میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست پره، وجود غلظت بالای عنصر کلر در متریال را مشخص نمود که می توان از این شواهد بعنوان یکی از مهمترین عوامل تضعیف کننده متریال پره و کاهش حد دوام خستگی آن یاد کرد که در نتیجه ایجاد خوردگی حفره ای بوجود آمده است.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین بخش های توربین های گازی مورد استفاده در نیروگاه ها و صنایع هوافضا، کمپرسورهای جریان محوری می باشند. مساله تعمیر و نگهداری کمپرسور در واحدهای توربین گازی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و معمولاً پس از گذشت مدت زمان معینی از عمر آنها، واماندگی و شکست در پره ها، دیسک ها و دیگر قطعات جانبی آنها رخ می دهد. دسته بزرگی از این واماندگی ها طبیعی و مطابق با انتظار صورت گرفته و برخی از آنها نیز به صورت یک حادثه زودرس جلوه می کنند به دلیل فرسوده بودن واحدهای توربین گازی در نیروگاه های ایران که عمر برخی از آنها به بیش از ۱۶۰ هزار ساعت می

Archive of SID
www.SID.ir

رسد، تاکنون حوادث زیادی در مورد این واحدها گزارش شده که در برخی از این حوادث، واحد قابل تعمیر نبوده و حادثه منجر به خروج دائمی واحد از مدار شده است.

کرمانپور و همکاران [۱] به تحلیل علت شکست پره های کمپرسور یک واحد توربین گازی در نیروگاه هسا (اصفهان) از جنس آلیاژ تیتانیوم پرداخته و دریافتند که شکست پره ها ناشی از تماس بین ریشه پره و دیسک، در محل دم چلچله ای و همینطور، استحکام ضعیف ریشه پره در برابر سایش بوده است. اخیراً، حادثه ای برای یک واحد توربین گازی GE Frame ۶ رخ داده است که در طی آن، پره متحرک مرحله اول کمپرسور دچار شکست ناگهانی شده است [۲]. بررسی فنی علت حادثه نشان داد که شکست پره به دلیل وقوع ناپایداری دوار در جریان هوای کمپرسور و در نتیجه، وقوع رزونانس و خستگی دور بالا بوده است [۲]. حادثه فاجعه بار دیگری برای یکی از واحدهای توربین گازی ۳۲ مگاواتی نیروگاه گازی ری رخ داد که طی آن، دیسک های مراحل ۱۶ و ۱۷ کمپرسور دچار شکست شده و ترک های زیادی با اندازه های مختلف (۱۰ تا ۳۰۰ میلی متر) در آنها مشاهده شد. مشاهدات میدانی و مطالعات علمی انجام شده توسط فرهی و همکاران [۳] بر روی این حادثه نشان داد که شکست دیسک ها ناشی از شروع ترک از محل اتصال دیسک به محور در اثر وقوع پدیده خستگی سایشی بوده است. آخرین حادثه فاجعه آمیز پیش آمده در نیروگاه ری مربوط به دیسک مرحله ۱۱ کمپرسور توربین گازی ۸۵ مگاواتی می باشد که طی این حادثه، ۳۹ ترک با اندازه های مختلف در محل اتصال پره ها به دیسک (ناحیه دم چلچله ای) مشاهده شد. بر اساس بررسی های فنی انجام شده توسط ترابی و بیاتی [۴-۵] و مطالعات آماری انجام شده بر روی شواهد موجود در آرشیو حوادث نیروگاه، علت جوانه زنی ترک های مشاهده شده، پدیده خستگی سایشی تشخیص داده شد [۵]. اخیراً، حادثه فاجعه باری برای واحد توربین گازی شماره ۵ نیروگاه ری رخ داد که طی آن یکی از پره های متحرک مرحله اول کمپرسور دچار شکست شده و تعداد زیادی از پره ها نیز در مراحل مختلف کمپرسور دچار آسیب جدی شدند. با توجه به اینکه محل شکستگی در پره به میزان قابل توجهی از ریشه پره فاصله داشت، شائبه وقوع بارگذاری غیرمتداول بر روی پره شکل گرفت (چرا که در شرایط کارکرد نرمال، محل حداکثر تنش در پره عبارتست از ریشه پره). جهت خمیدگی تعداد زیادی از پره ها نیز که در راستای عکس جریان هوا بود، فرضیه وقوع ناپایداری جریان هوا در کمپرسور (مانند سرج، ناپایداری دوار و ...) را قوت بخشید. مروری بر منابع علمی موجود [۶] و جستجو در میان گزارش های مربوط به حوادث مشابه [۲] نشان داد که شکست پره در نتیجه وقوع پدیده رزونانس و در نتیجه خستگی دور بالا برای پره بوده است که این به نوبه خود می تواند در نتیجه اغتشاش جدی در جریان هوای کمپرسور و وقوع ناپایداری جریان و همچنین بدلیل تضعیف متریال پره در اثر ایجاد خوردگی حفره ای و نهایتاً ایجاد خوردگی توام با خستگی حاصل شده باشد.

۲- گزارش حادثه و بررسی علت شکست پره

واحد ۵ توربین گازی نیروگاه ری با ظرفیت اسمی ۳۲ مگاوات در حین کارکرد با بار پایه دچار سر و صدای غیر عادی شده و دستور توقف واحد صادر شد. پس از بازکردن واحد و برداشتن پوسته ها، مشاهده شد که یکی از پره های متحرک مرحله اول کمپرسور دچار شکست شده و تعداد زیادی از پره های متحرک سایر مراحل کمپرسور نیز دچار خمیدگی و آسیب شده اند. شکل های (۱) و (۲) به ترتیب نمایی از روتور کمپرسور حادثه دیده و پره شکسته را نشان می دهند.

شکل (۱): روتور کمپرسور حادثه دیده.

Archive of SID

www.SID.ir

شکل (۲): نمایی از شکست پره ردیف اول کمپرسور.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، محل شکست پره از ریشه پره فاصله قابل توجهی داشته و لذا، شکست پره در نتیجه اتمام عمر طبیعی کارکرد آن کاملاً منتفی است. چرا که در شرایط کارکرد نرمال کمپرسور، حداکثر تنش برای پره های متحرک (مجموع تنش های ناشی از نیروی گریز از مرکز و نیروهای آیرودینامیکی پره) در ریشه آنها اتفاق می افتد. داده های اخذ شده از بخش پایش وضعیت واحد، پیرامون شرایط ارتعاشات کل واحد و همچنین، اظهارات بهره بردار نشان داد که هیچگونه ارتعاشات غیر عادی برای کل واحد توربین گازی در حین کارکرد وجود نداشته است. این اظهارات کاملاً مورد تایید واحد مهندسی نیروگاه قرار گرفت، چرا که ارتعاشات کلی سیستم به احتمال بسیار زیاد سایر اجزای توربین گازی نظیر محور، دیسک ها و غیره را نیز دچار آسیب می نمود [۳]. نویسنده اول مقاله به عنوان مشاور فنی نیروگاه، شائبه وقوع رزونانس برای پره شکسته شده را مطرح نمود، چرا که کلیه شواهد بیانگر این واقعیت بود که یک نوع بارگذاری غیرعادی بر روی پره اعمال شده است. از آنجا که عامل اصلی ارتعاشات پره متحرک کمپرسور عبارتست از جریان هوا، وقوع ناپایداری برای جریان هوای کمپرسور و در نتیجه وارد شدن بارهای آیرودینامیکی با فرکانسی برابر و یا بسیار نزدیک به یکی از فرکانس های طبیعی پره (رزونانس) به عنوان عامل اصلی شکست پره در نظر گرفته شد.

شکل های (۳) و (۴) به وضوح نشان می دهند که تعدادی از پره های متحرک کمپرسور در راستای مخالف با جریان هوا دچار خمیدگی شده (شکل (۳)) و برخی دیگر نیز دچار آسیب شده اند (شکل (۴)). با توجه به جهت دوران محور کمپرسور، خمیدگی پره ها قطعاً نمی تواند به دلیل برخورد تکه شکسته پره مرحله اول باشد، در حالی که آسیب بوجود آمده در برخی دیگر از پره ها نشانگر برخورد تکه شکسته به آنها (DOD)[۱] می باشد.

شکل (۳): خمیدگی پره های متحرک کمپرسور.

شکل (۴): آسیب پره های متحرک کمپرسور ناشی از برخورد تکه شکسته مرحله اول.

جستجو در میان منابع علمی (مرجع [۲]) نشان داد که حادثه مشابهی، پیش از این برای یک واحد توربین گازی GE Frame ۶ رخ داده است. در مرجع مذکور، علت شکست پره مرحله اول کمپرسور، وقوع پدیده رزونانس و در نتیجه خستگی دور بالا معرفی شده است که عامل اصلی ارتعاشات شدید پره، وقوع ناپایداری دوار (RI)[۲] در جریان هوای عبوری از روی پره ها بوده است [۲]. در مرجع [۲] تصریح شده است که وقوع RI در جریان هوای کمپرسور، در نتیجه ایجاد گردابه های[۳] ناشی از نشتی هوای فشرده از فاصله نوک پره ها[۴] و زاویه حمله زیاد IGV ها بوده است.

---

[۱] Domestic Object Damage (DOD)

[۲] Rotating Instability

[۳] Vortex

[۴] Tip Clearance

Archive of SID

www.SID.ir

گرچه به کمک مرجع [۲]، حدس اولیه درباره علت وقوع پدیده رزونانس برای پره (ناپایداری جریان هوا در کمپرسور) مورد تایید قرار گرفت، اما، یک تفاوت مهم مابین شواهد به جا مانده از حادثه کنونی و حادثه گزارش شده در مرجع [۲]، بیانگر تفاوت عمده در نوع ناپایداری جریان کمپرسور در این دو حادثه بود. تفاوت آشکار این بود که پره های متحرک کمپرسور در مرجع [۲] دچار خمیدگی کلی شده، حال آنکه پره ها در حادثه کنونی دچار خمیدگی نوک پره ها شده اند (شکل (۵) را ببینید).

تلاش های بسیاری برای یافتن گزارش های حوادثی با شواهد مشابه با حادثه کنونی صورت پذیرفت. خوشبختانه، یک مورد حادثه در مرجع [۶] یافت شد که شواهد به جا مانده از آن بسیار مشابه با شواهد حادثه کنونی است. شکل (۶) نمایی از پره شکسته مرحله اول کمپرسور یک نوع توربین گازی صنعتی را نشان می دهد [۶]. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، محل شکستگی پره با محل شکستگی پره مورد مطالعه در این حادثه بسیار مشابه بوده و ضمناً، خمیدگی سایر پره ها نیز به وضوح مشاهده می شود.

در مرجع [۶] به وضوح تصریح شده است که ناپایداری جریان هوا در کمپرسور از نوع سرج بوده است که ابتدا به ساکن موجب وارد شدن نیروی زیاد به پره ها و ایجاد خمیدگی در آنها شده است. خمیدگی پره ها موجب بهم ریختگی جریان عبوری از آنها شده و اغتشاش جریان در اطراف پره های خمیده موجب لرزش شدید آنها شده است. در مورد پره شکسته مرحله اول، فرکانس بسیار بالای لرزش پره با یکی از فرکانس های طبیعی پره برابر شده و موجب شکست آن در اثر خستگی دور بالا شده است [۶]. در مرجع [۶]، سطح شکست پره کمپرسور با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. تصاویر ثبت شده از سطح شکست، به وضوح نشان دهنده ردپای پدیده خستگی در پره می باشد.

۱-۵

۲-۵

شکل (۵): تفاوت عمده شواهد حادثه گزارش شده در مرجع [۲] و حادثه کنونی (پره ها در شکل ۵-۱ دارای خمیدگی کلی بوده و در شکل ۵-۲ دارای خمیدگی آشکار در راستای خلاف جهت جریان می باشند).

شکل (۶): شواهد به جا مانده از شکست پره مرحله اول کمپرسور گزارش شده در مرجع [۶].

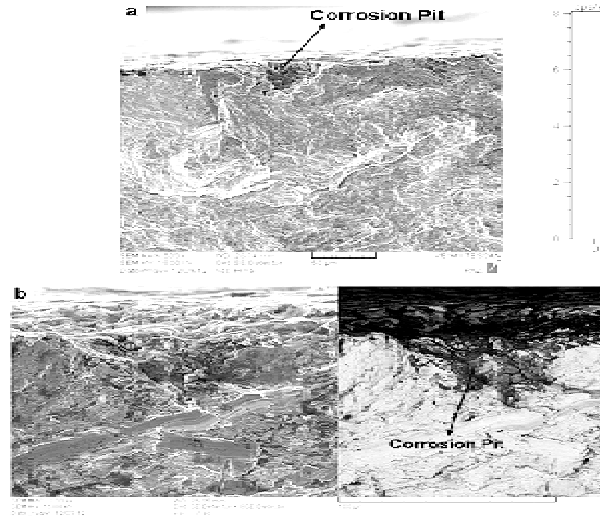
در ادامه، بررسی تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از سطح شکست پره و دنبال نمودن محل شروع ترکها، نشان دهنده وجود غلظت بالای عنصر کلر در داخل حفرات متعدد ناشی از خوردگی می باشد. وجود این حفرات و مطالعه نتایج تحلیلی به

[۵] Scanning Electron Microscope (SEM)

Archive of SID

www.SID.ir

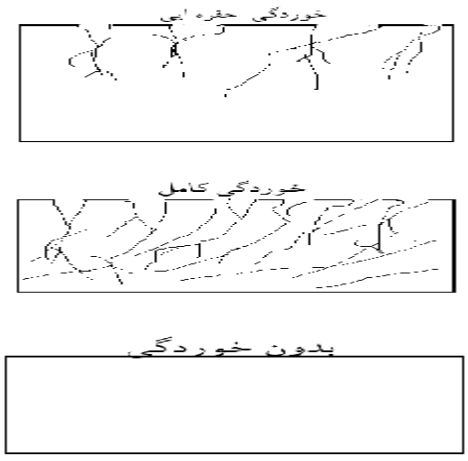
خوبی نشان دهنده ایجاد خوردگی حفره ای توسط عناصر هالوژنی و تضعیف متریال پره می باشد. حفره های ناشی از خوردگی در متریال، نقش متمرکز کننده تنش را داشته و مکان های مستعدی برای جوانه زنی ترکها و رشد آنها در نتیجه بارگذاری مکانیکی می باشند. در شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از سطح شکست پره، به وضوح نشان دهنده خوردگی حفره ای در متریال پره می باشد.



شکل (۷): (a) تصویر SEM از محل جوانه زنی ترک خستگی در سطح که نمایانگر حضور حفرات خوردگی می‌باشد. (b) تصاویر SEM الکترون برگشتی و ثانویه از محل حفره خوردگی سطحی.

در توضیح مکانیسم خوردگی حفره ای باید اشاره نمود که این نوع از خوردگی ها یکی از مخرب ترین و موزی ترین نوع خوردگی ها می باشد، بطوریکه برخلاف انواع خوردگی های معمول، هیچ گاه از تقلیل وزن، پی به این نوع خوردگی نمی توان برد، چرا که اندازه حفرات حاصل از خوردگی بسیار کوچک می باشد. این نوع خوردگی به دلیل شرایط محیطی و مواد موجود در آن و ایجاد واکنش های شیمیایی اتفاق می افتد، بطوریکه از نظر مسائل فنی عملی، اکثر انهدام های ناشی از حفره دار شدن در اثر عناصر هالوژن موجود و یون های حاصل از این عناصر ایجاد می گردد.

این نوع خوردگی شامل یک دوره موسوم به دوره آغازین یا شروع می باشد که معمولاً از نظر زمانی طولانی بوده و بسته به فلز و محیط مورد مطالعه، این دوره بین ماهها تا سالها طول می کشد. لکن، به مجرد این که حفره ها شروع شدند، با سرعت دائماً افزاینده ای به داخل جسم در معرض خوردگی نفوذ می کنند و تمایل به خالی کردن زیر سطح فلز خواهند داشت. در حقیقت خوردگی حفره ای را می توان حد فاصل بین خوردگی کامل و مقاومت در مقابل خوردگی دانست.



شکل (۸): روند حد واسط خوردگی حفره ایی

- ***طبیعت اتوکاتالیتی حفره دار شدن*** :

حفره دار شدن در اثر یک واکنش آندی منحصر بفرد انجام می گیرد که این نوع خوردگی را اتوکاتالیک می نامند. در واقع، واکنش های خوردگی در داخل حفره، شرایطی را بوجود می آورند که محرک ادامه خودشان هستند.

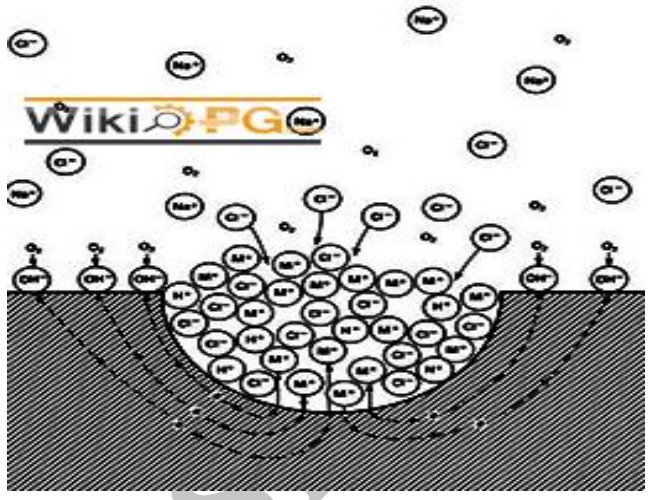
در شکل زیر، فلز در معرض محیط دارای اکسیژن و محلول یون های کلر قرار گرفته است. انحلال سریع فلز در داخل حفره انجام شده، در حالیکه احیاء اکسیژن روی سطح مجاور انجام می شود. این نوع خوردگی از نوع خوردگی خود انگیزه ای می باشد که انحلال سریع فلز در داخل حفره باعث ایجاد بار مثبت اضافی در این ناحیه شده، در نتیجه، برای برقراری تعادل الکتریکی، یون های کلرید ایجاد می گردد. لذا، در نتیجه هیدرولیز، MCL به داخل حفره مهاجرت کرده و بدین ترتیب، در داخل حفره، غلظت بالایی از HCL بر طبق واکنش ذیل ایجاد می گردد که این ماده باعث تسریع انحلال فلز و آلیاژ مورد نظر می شود.

$$M^{+}CL^{-} + H_2O \longrightarrow MOH + H^{+}CL^{-}$$

نکته قابل توجه آن است که چون قابلیت انحلال اکسیژن در این قسمت تقریباً برابر با صفر بوده و هیچگونه انحلال اکسیژنی در داخل

Archive
www.SID.ir

حفره صورت نمی گیرد، واکنش کاتدی احیاء اکسیژن روی سطح خارجی حفره، باعث حفاظت آن سطوح در مقابل خوردگی شده و به عبارتی، باعث حفاظت کاتدی سطح باقیمانده فلز می گردد.



شکل (۹) : روند ایجاد و ادامه خوردگی حفره ای.

۳- نتیجه گیری

مهم ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارتند از:

۱- پره مرحله اول کمپرسور دچار شکست زودرس شده است، چرا که محل وقوع شکست در پره با محل مورد انتظار در شرایط کارکرد عادی توربین گازی متفاوت است.

۲- وقوع شکست غیرعادی در پره به منزله اعمال بارگذاری غیرعادی بر روی پره بوده که این بدون شک مربوط به جریان هوای ناپایدار در کمپرسور می باشد.

۳- نوع ناپایداری جریان هوا به احتمال بسیار زیاد از نوع RI نبوده است، چرا که محل شکست پره در نتیجه این نوع ناپایداری به میزان زیادی با محل آن در این حادثه متفاوت بوده است.

۴- نوع ناپایداری جریان هوا به احتمال بسیار زیاد از نوع سرج بوده است، چرا که گزارش های قبلی نشان می دهد که این نوع ناپایداری موجب خمیدگی پره ها شده و شکست در پره از حدود دو سوم طول پره (نسبت به ریشه) ایجاد می شود.

۵- شواهد نشان می دهد که شکست پره در نتیجه وقوع رزونانس در پره و لذا، خستگی دور بالا با فرکانس بارگذاری بسیار بالا (زمان کم) صورت گرفته است.

۶- وجود غلظت بالای کلر در متریال پره و ایجاد خوردگی حفره ای در متریال، موجب کاهش قابل توجه استحکام آن در برابر خستگی شده و شکست پره به دلیل اثرات همزمان رزونانس وخوردگی حفره ای و نهایتاً، خوردگی توام با شکست شده است.

مراجع:

۱. Kermanpur A., Sepehri Amin H., Ziaei-Rad S., Nourbakhshnia N., Mosaddeghfar M., Failure analysis of Ti۶Al۴V gas turbine compressor blades, Eng. Fail. Anal., ۱۵ (۲۰۰۸) ۱۰۵۲-۶۴.

۲. پورسعیدی اسماعیل، بابایی علمدار، جمشیدی پویا، بهروزشاد فلور، عبدلی نادر، برات زاده رضا، عربلو مسعود، محمدی ارهانی محمدرضا، "بررسی علت شکست پره کمپرسور توربین های ۶ GE Frame با رویکرد تحلیل ارتعاشی و CFD"، چهارمین کنفرانس نیروگاه های برق، پژوهشگاه نیرو، بهمن ۹۰، تهران، ایران.

۳. Farrahi G.H., Tirehdast M., Masoumi Khalil Abad E., Parsa S., Motakefpoor M., Failure analysis of a gas turbine compressor, Eng. Fail. Anal., ۱۸ (۲۰۱۱) ۴۷۴-۸۴.

۴. ترابی علیرضا، بیاتی مرتضی، "تحلیل واماندگی و ارائه یک راه کار جدید برای تعمیر دیسک کمپرسور توربین گازی"، چهارمین کنفرانس نیروگاه های برق، پژوهشگاه نیرو، بهمن ۹۰، تهران، ایران.

۵. Torabi A.R., Bayati M., Failure analysis and repair of a catastrophically damaged gas turbine compressor disk using SEM technique and CFD analysis, J. Fail. Anal. Preven., ۱۲ (۲۰۱۲) ۳۹۱-۴۰۱.

۶. Boyce M.P., Gas turbine engineering handbook, ۳rd ed., Gulf Professional Publishing, Elsevier USA, ۲۰۰۶, pp ۸۶۵.

۷. Mars G.Fontana , Norbert D.Greene, Corrosion Engineering Usa Professional Publishing, USA, ۱۹۹۵, pp ۶۵,۱۴۱

Archive of SID
www.SID.ir