فرا سوی مواد

خوردگی و آزمون غیرمخرب

- معرفی آزمون‌های غیر مخرب
- مصاحبه با دکتر الله کرم
- خارج از سیلابس؛ کار عمیق
- آنالیزنامه؛ میکروسکوپ الکترونی روبشی

دوره پنجم | شماره چهارم | بهار ۱۴۰۰

عنوان نشریه: خوردگی و آزمون غیر مخرب

صاحب امتیاز: انجمن علمی_دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران

مدیر مسئول: ابوالفضل انوری

سردبیر: مسعود خلیلی

تیم تحریریه: سید محمدحسن موسوی ، ندا عسکرزاده ، پویا نخعی اشتر ، محدثه احمدی ، مبینا شادلو ، فرزانه زمانی ، ثریا برنای زنوزی ، مهدی پناهی

ویراستار: مرجان دریابان

طراح گرافیک و صفحه‌آرا:

مائده آسا

پردیس پیروزمند

بهار ۱۴۰۰، شماره چهارم، دوره ششم

@FarasoyeMavadUT

www.farasoyemavadsj.ut.ac.ir

بخش اول
خوردگی و آزمون غیرمخرب ۶

بخش دوم
مصاحبه با دکتر الله‌کرم ۳۴

بخش سوم
خارج از سیلابس ۴۲

بخش چهارم
آنالیزنامه ۴۷

سخن مدیرمسئول

خب، تم موضوعی این شماره به یکی از پرطرفدارترین گرایش‌ها و پرکاربردترین حوزه‌های صنعت پرداخته...

بله، خوردگی؛ اینکه از کجای خوردگی برای محدوده گسترده مخاطبانمان شروع کنیم واقعا سخت بود. لذا از دوستان و بزرگان تحقیقاتی به عمل آوردیم تا هم بتوانیم محتوایی در خور کسانی که دنبال خوردگی هستند و با موضوع ناآشنا هم نیستند فراهم کنیم و هم باب موضوع را برای کسانی که تابه حال اسم خوردگی به گوششان نخورده باز کنیم.

تصمیم بر این شد که کمی از علم و پایه خوردگی بگوییم و بعد به اولین مرحله مواجهه با خوردگی در صنعت یعنی شناسایی خوردگی بپردازیم.

خوردگی و حفاظت مواد آنقدر گسترده است که در یک شماره نشریه قابل گنجاندن نیست و این موضوع پتانسیل شماره‌های دیگری هم دارد.

یک مصاحبه ارزشمند هم داریم که از دست ندهید.

اگر هم صنمی با خوردگی ندارید و نخواهید داشت از مطالب خارج از سیلابس و آنالیزنامه غافل نشوید.

راستی یادم رفت معرفی کنم...

«خارج از سیلابس»، مخاطبان نشریه...

«مخاطبان نشریه»، خارج از سیلابس.

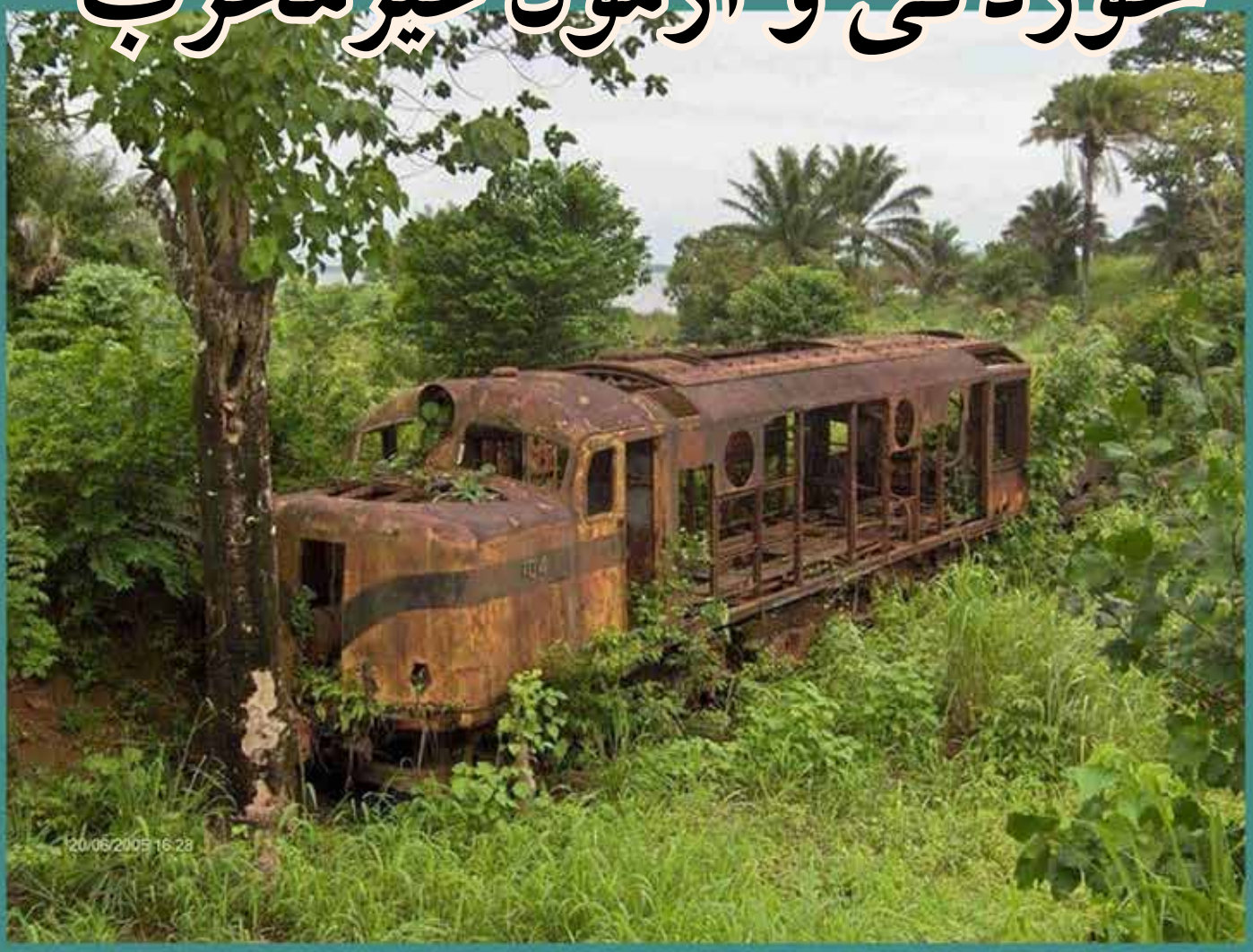
خارج از سیلابس سعی می‌کنه موضوعاتی را برایمان باز کند که در کلاس درس و دانشگاه نیستند؛ مثلا در خارج از سیلابس این شماره یک کتاب مفید معرفی کردیم و خلاصه بخش جالبی از نشریه‌ست.

زود، تند، سریع به فهرست مطالب بروید و نتیجه زحمات تیم نشریه را ببینید.

با تشکر ویژه از جناب آقای دکتر الله کرم و مهندس موسوی.

بخش اول

خوردگی و آزمون غیرمخرب



پویا نخعی اشتر

دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران

ندا عسکرزاده

دانشجوی کارشناسی ارشد الکتروسرامیک دانشگاه شیراز

سید محمدحسن موسوی

دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران

خوردگی و پایش خوردگی (نویسنده: سید محمدحسن موسوی)

ممکن است که زنگ آهن را بر سطوح مشاهده کرده باشید و این سؤال را از خود کرده باشید که علت تشکیل آن چیست؟ و یا اینکه پوشش سبزرنگ را بر روی مجسمه‌های برنزی و سکه‌های قدیمی مشاهده کرده باشید و چرایی این پدیده برایتان سؤال بوده باشد. در گذشته دانشمندان نیز با این مشاهدات آشنا بودند اما به دلیل عدم آشنایی با علم شیمی و همچنین عدم تکامل آن، از توصیف این رخدادها عاجز بودند. شاید بتوان به‌نوعی ادعا کرد که در قرن هجدهم میلادی، قوانین علم شیمی به تکامل خوبی رسیدند و از انسجام کافی جهت توصیف و توجیه این پدیده‌ها برخوردار گشتند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مطالعات مربوط به علم خوردگی از حدود دویست سال قبل شروع شده و کماکان ادامه دارد. در یونان باستان، برای ساخت کشتی از میخ‌های مسی پوشیده شده با سرب استفاده می‌شد. همچنین از قیر، قطران و... جهت پوشش دهی و حفاظت عرشه و دیگر نقاط استفاده می‌شد. شاید آن‌ها هنوز مکانیسم خوردگی را نمی‌دانستند اما تشخیص داده بودند که جفت‌های فلزی عادی در دریا و در حضور رطوبت، مستعد تخریب هستند. همچنین رومیان نیز از روش‌هایی برای حفاظت استفاده می‌کردند.

شناخت اصول بنیادین الکتروشیمی در قرن نوزدهم میلادی، زمینه‌ساز اصلی پیدایش علم خوردگی و پایهٔ این علم بود. خوردگی برای اولین بار در سال ۱۹۲۴ در انگلستان به‌عنوان یک علم آموزش داده شد. گرایش‌های اولیهٔ دانشگاهی با موضوع پدیدهٔ خوردگی تا ابتدای جنگ جهانی اول، با تمایل و نیاز صنعت به واسطهٔ بروز نقص دستگاه‌ها آغاز گردید؛ به‌طوری‌که درنهایت به توسعهٔ آلیاژهای مقاوم به خوردگی نیز انجامید. خوردگی‌هایی که در خلال جنگ جهانی اول مشکلات زیادی را ساخته بودند، در جنگ دوم دیگر مشکل خاصی نبودند.

اما خوردگی چیست؟ اصطلاح خوردگی ریشه در لاتین دارد. اصطلاح roder به معنای« از بین رفتن [1]» و corrodere به معنای «تحلیل رفتن» است. در یک تعریف نسبتاً خوب، خوردگی عبارت است از واکنش بین ماده و محیط که منجر به تخریب ماده و محیط می‌گردد.

طبق این تعریف، واژه خوردگی را می‌توان برای غیر فلزات نظیر پلیمرها، سرامیک‌ها، شیشه‌ها و... نیز بکار برد. البته عموماً واژه خوردگی برای فلزات بکار می‌رود و برای غیر فلزات از واژگانی نظیر تخریب[2]، زوال[3] و آسیب[4] استفاده می‌شود. این نکته نیز قابل ذکر است که به هر نوع واکنش بین ماده و محیط و یا هر نوع تخریب خوردگی گفته نمی‌شود؛ بلکه مقصود از واکنش خوردگی، واکنشی عموماً الکتروشیمیایی است که به تخریب ماده می‌انجامد. بحث از تخریب ماده، ما را ناگزیر به شناخت پدیدهٔ خوردگی و جلوگیری از ایجاد آن می‌کند و جلوگیری از فرآیند خوردگی نیازمند پایش و اندازه‌گیری آن و وارسی فرآیند خوردگی در کاربردهای عملی است. همچنین بعضی‌اوقات این امر به‌عنوان پیشگیری و حفاظت مواد نیز معروف است.

قلب علم خوردگی، الکتروشیمی، ترمودینامیک و سینتیک است.

[1] Gnawing
[2] Destruction
[3] Degradation
[4] Deterioration

تأثیر خوردگی

پیامدهای عمدهٔ خوردگی شامل اقتصادی، ایمنی و آسیب محیطی است. خوردگی فلزی ظاهراً بی‌خطر است اما در عمل بسیاری از بخش‌های اقتصادی کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در یک پژوهش، مؤسسه ملی استانداردهای آمریکا[۵] (NBS) در همکاری با آزمایشگاه کلمبوس باتل[۶] (BCL)، هزینه‌های خوردگی در ایالات متحده آمریکا را با استفاده از مدل ورودی/ خروجی مطالعه نمود. برخی از انواع و مقدار هزینه‌های خوردگی مورداستفاده در این مدل در زیر به‌طور خلاصه ارائه است:

هزینه‌های سرمایه‌ای
- جابه‌جایی تجهیزات و ساختمان‌ها
- ظرفیت اضافی
- تجهیزات یدکی

هزینه‌های واپایش
- تعمیر و نگهداری
- واپایش خوردگی
- مواد ساخت
- حد مجاز خوردگی
- فرآوری ویژه

هزینه‌های طراحی
- مواد ساخت
- خوردگی مجاز
- فراوری ویژه

هزینه‌های مرتبط
- کاهش محصول
- حمایت فنی
- بیمه
- قطعات موجود تجهیزات

صنعت		۱۹۷۳	۱۹۹۵	۲۰۰۵
تمامی منابع	کل	۸۲	۲۹۶	۴۰۳
	اجتناب‌پذیر	۳۳	۱۰۴	۱۴۲
اتومبیل	کل	۳۱.۴	۹۴	۱۲۵.۳
	اجتناب‌پذیر	۲۳.۱	۶۵	۸۶.۷
هواپیما	کل	۳	۱۳	۱۸
	اجتناب‌پذیر	۰.۷	۳	۴.۲
سایر	کل	۴۷.۶	۱۵۹	۲۶۰
	اجتناب‌پذیر	۹.۳	۳۶	۵۰

جدول۱. هزینه‌های خوردگی در ایالات متحده آمریکا(میلیارد دلار)

[۵] National Bureau of Standard
[۶] Battelle Columbus Laboratory

هزینه‌های مرحله‌ای خوردگی به‌طور قابل توجهی روی اقتصاد ملی تأثیر گذاشته و به‌طور ارزشمندی توجیه می‌گردد که دانشمندان و مهندسین خوردگی بایستی هزینه ناشی از اندازه‌گیری‌های واپایش خوردگی را بپذیرند، به‌طوری‌که صرفه‌جویی قابل توجهی انجام شود. هزینه‌هایی که خوردگی به ما تحمیل می‌کند، هم هزینه‌های مستقیم و هم غیرمستقیم است. علاوه بر بحث اقتصادی، بحث ایمنی نیز مطرح است و این به‌خودی‌خود از مهم‌ترین مسائل و شاید مهم‌ترین مسئله باشد؛ خوردگی می‌تواند آسیب‌زا باشد و به سلامتی افراد آسیب وارد کند؛ برای مثال پلی که دچار خوردگی شدید شده است ممکن است تخریب شود و این تخریب علاوه بر خسارت‌های مادی، خسارات جانی نیز به دنبال دارد که جبران آن با هر مبلغی غیرممکن است. بنابراین پایش و درنتیجه جلوگیری از خوردگی در جوامع، امری ضروری است.
پایش خوردگی از روش‌های متنوعی برخوردار است، هرکدام از این روش‌ها از مزایا و معایبی برخوردارند و با توجه به نیاز و هزینه باید بهترین روش و یا روش‌ها را انتخاب کرد. آزمون‌های غیر مخرب نیز یکی از مواردی است که برای تشخیص خوردگی به کار می‌رود؛ البته کاربرد این آزمون‌ها صرفاً برای تشخیص خوردگی نیست و کاربردهای فراوانی دارند.
روش‌های پایش خوردگی به تفصیل در این شماره از نشریه توضیح داده می‌شوند.

کلیت خوردگی (نویسنده: ندا عسکرزاده)

همانطور که در بخش قبلی گفته شد؛ خوردگی انهدام، تخریب تدریجی یا دگرگونی در خواص و مشخصات مواد است که در اثر واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی این مواد با محیط اطرافشان حاصل می‌شود. [۱]

پدیدهٔ خوردگی بیشتر در فلزات و آلیاژها ظاهر می‌شود؛ زیرا اغلب فلزات و آلیاژها برای رسیدن به پایداری شیمیایی، تمایل به ایجاد ترکیب شیمیایی با اتم‌ها یا مولکول‌هایی از محیط اطراف خود دارند و فقط تعداد کمی از فلزات مانند طلا یا پلاتین وجود دارند که تحت شرایط معمولی پایدار بوده و تمایلی به واکنش دهی با محیط اطراف ندارند. همچنین مواد غیرفلزی مانند مواد سرامیکی و پلیمری تحت تأثیر واکنش‌های الکتروشیمیایی قرار نمی‌گیرند؛ اما در شرایطی، واکنش‌های شیمیایی می‌توانند به‌طور مستقیم روی این مواد تأثیرگذار باشند و موجب تخریب آن‌ها شوند.

مثال‌هایی از پدیدهٔ خوردگی که در زندگی روزمره مشاهده می‌شوند، عبارت‌اند از: خوردگی لوله‌های آب، خوردگی بدنهٔ اتومبیل در هوای مرطوب، خوردگی شوفاژها با جریان آب گرم و خوردگی ماشین‌های تولید بخار و توربین‌های گازی. [۲]

انواع مختلفی از خوردگی وجود دارد که می‌توانند یک فلز را تحت تأثیر قرار دهند. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. خوردگی یکنواخت[۱]

۲. خوردگی حفره‌ای[۲]

۳. خوردگی شکافی[۳]

۴. خوردگی بین‌دانه‌ای[۴]

۵. ترک‌خوردگی تنشی[۵]

در ادامه هرکدام از انواع خوردگی را به‌طور خلاصه بررسی میکنیم.

۱. خوردگی یکنواخت

متداول‌ترین نوع خوردگی، خوردگی یکنواخت است. در این نوع، واکنش الکتروشیمیایی یا شیمیایی به‌طور یکنواخت در سطح فلز یا آلیاژ گسترش می‌یابد و به‌مرور زمان سبب نازک‌تر شدن ماده در محیط خورنده و از بین رفتن آن می‌گردد.

از آن‌جا که خوردگی یکنواخت قابل پیش‌بینی بوده و کنترل آن نسبتاً ساده است، موجب اعمال خسارات ناگهانی نمی‌شود.

برای جلوگیری از خوردگی یکنواخت از تدابیر حفاظتی سطح مانند رنگ‌آمیزی، پوشش‌دهی، آب‌کاری، روکش‌کاری یا روش‌های دیگر استفاده می‌شود.

---

[۱] Uniform Corrosion

[۲] Pitting Corrosion

[۳] Crevice Corrosion

[۴] Intergranular Corrosion

[۵] Stress Corrosion Cracking

۲. خوردگی حفره‌ای

خوردگی حفره‌ای نوعی از خوردگی موضعی است که منجر به ایجاد حفره‌هایی در سطح فلز شده که با ادامهٔ این فرایند، عمیق‌تر می‌شوند. این نوع خوردگی، بسیار مخرب است زیرا منجر به شکست یک قطعه، بدون کاهش وزن آن می‌گردد. [۱]

ناخالصی‌های غیرفلزی و ناهمگنی‌های ساختاری و شیمیایی در سطح فلز، نقاط مناسبی برای آغاز این نوع خوردگی و حفرات ناشی از آن هستند. واکنش آندی که در انتهای سطح حفره انجام می‌شود، به‌صورت زیر است(M نماد شیمیایی فلز است):

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$$

الکترون‌های آزاد شده از واکنش آندی همراه واکنش اکسیژن با آب، موجب واکنش کاتدی در سطح فلز و در مجاورت حفرهٔ ایجادشده می‌شوند که به‌صورت زیر است:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4(OH)^{-}$$

بنابراین در حالت کاتدی، فلز در اطراف حفره از خوردگی حفظ می‌شود. با وجود عناصری مثل کلر در محیط، ترکیب MCl با آب واکنش داده و هیدروکسید فلزی و اسید تولید می‌کند:

$$MCl + H_2O \rightarrow MOH + HCl$$

بدین ترتیب غلظت اسیدی بالای انتهای حفره، سبب افزایش سرعت واکنش آندی می‌گردد.

شناسایی خوردگی حفره‌ای اغلب مشکل است، زیرا تعداد و عمق حفره‌های ایجادشده متفاوت بوده و ممکن است حفرات کوچک توسط محصولات خوردگی پوشانده شوند. در نتیجه، این نوع خوردگی سبب شکست‌های غیرمنتظرهٔ قطعات شده و ارزیابی خسارات وارده را مشکل می‌سازد. [۲]

به‌کارگیری موادی که در برابر خوردگی حفره‌ای مقاوم‌تر هستند، مهم‌ترین روش پیشگیری از این مشکل است. [۱] به‌عنوان نمونه، فولاد زنگ‌نزن مناسب برای محیط‌های شامل یون کلراید، از نوع فولاد آلیاژی ۳۱۶ است. زیرا این نوع فولاد دارای عناصرآلیاژی کروم، نیکل و مولیبدن با درصدهای به ترتیب ۱۸، ۸ و ۲ درصد است که به علت وجود عنصر مولیبدن، مقاومت به خوردگی حفره‌ای آن بهتر از فولادهای زنگ‌نزن بدون مولیبدن مانند فولاد آلیاژی ۳۰۴ است. [۲]

۳. خوردگی شکافی

با قرارگیری سطوح فلز در معرض محیط خورنده، خوردگی موضعی در داخل شکاف‌ها یا مناطق محافظت‌شده صورت می‌گیرد. به‌عنوان نمونه، محل‌های مناسب این نوع خوردگی می‌تواند زیر واشرها، پین‌ها، دریچهٔ شیرها، یاتاقان‌ها، زیر رسوب‌های متخلخل و دیگر موقعیت‌های مشابه باشد و معمولاً در بسیاری از سیستم‌های آلیاژی مانند فولادهای زنگ‌نزن، آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم رخ می‌دهد.

خوردگی شکافی هنگامی صورت می‌گیرد که شکاف برای ورود مایع خوردنده به‌اندازه کافی گسترده و برای راکد نگه‌داشتن آن، به‌اندازه کافی باریک باشد. [۱]

سازوکار خوردگی شکافی تا حدودی شبیه به سازوکار خوردگی حفره‌ای است. واکنش‌های آندی و کاتدی که در سطح شکاف انجام می‌شوند، به‌صورت زیر هستند:

واکنش آندی $M \rightarrow M^{+} + e^{-}$

واکنش کاتدی $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4(OH)^{-}$

از آن‌جا که محلول موجود در شکاف راکد است، اکسیژن لازم برای واکنش کاتدی مصرف می‌شود و دیگر جایگزین نمی‌شود، اما واکنش آندی ادامه می‌یابد و غلظت بالایی از یون‌های فلز با بار مثبت را ایجاد می‌کند. برای موازنه بار، یون‌های منفی(عمدتاً یون‌های کلراید) به داخل شکاف حرکت می‌کنند و $M^{+}Cl^{-}$ شکل می‌گیرد. واکنش این ترکیب یونی با آب و الکترون‌های حاصل از واکنش آندی، موجب تشکیل هیدروکسید فلز و اسید می‌شود که به‌صورت زیر اتفاق می‌افتد:

$$M^{+}Cl^{-} + H_2O + 4e^{-} \rightarrow MOH + H^{+}Cl^{-}$$

تولید تدریجی این اسید باعث می‌شود که لایهٔ نازک تأثیرپذیر، مورد تهاجم خوردگی قرار بگیرد. [۲]

برای جلوگیری از خوردگی شکافی اقدامات زیر می‌تواند مفید باشد:

- استفاده از جوشکاری برای اتصال قطعات
- استفاده از واشرهای غیرفلزی با قابلیت جذب‌کنندگی بسیار پایین [۱]

۴.خوردگی بین‌دانه‌ای

خوردگی بین‌دانه‌ای هنگامی رخ می‌دهد که رسوب یا جدایش فاز دومی به‌صورت موضعی در مرزدانه‌ها صورت گیرد. این نوع خوردگی می‌تواند در مواردی مانند خوردگی حفره‌ای خسارات غیرمنتظره را به همراه داشته باشد. شرط انجام این نوع خوردگی وجود اختلاف‌پتانسیل الکتروشیمیایی زیاد بین مرزدانه‌ها و دانه‌هاست. آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بسیار بالا و تعدادی از آلیاژهای مس که شامل فازهای رسوبی در مرزدانه‌ها برای افزایش استحکام هستند، می‌توانند تحت شرایط معینی برای خوردگی بین‌دانه‌ای مستعد باشند. همچنین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی که در محدوده‌ی ۴۸۰° C تا ۷۸۰° C حرارت داده شده و سپس به‌آرامی سرد می‌گردند نیز مستعد این نوع خوردگی هستند؛ به‌طوری‌که در این محدوده حرارتی، کاربید کروم در مرزدانه‌ها رسوب می‌کند و از مقدار کروم در نقاط مجاور مرزدانه‌ها کاسته می‌شود؛ بنابراین در این مواضع با ایجاد آند واکنش خوردگی انجام شده و درنهایت منجر به شکست می‌شود. [۲]

برای جلوگیری از این نوع خوردگی می‌توان روش‌های زیر را پیشنهاد داد:

- می‌توان مقدار کربن فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را به کمتر از ۰.۰۳٪ کاهش داد. مانند آلیاژ L۳۰۴ که دارای حساسیت کمتری نسبت به گرما یا جوشکاری در محدودهٔ دمایی ذکرشده هستند.
- استفاده از عناصری مانند Ti و Nb که تمایل بیشتری برای ترکیب با کربن و تشکیل کاربید دارند؛ این عناصر مقدار کربن را کاهش داده و از رسوب کاربید کروم جلوگیری می‌کنند. [۱]

۵. ترک‌خوردگی تنشی

ترک ناشی از خوردگی تنشی، از تأثیر همزمان تنش‌های مکانیکی و فرآیندهای خوردگی روی فلز حاصل می‌شود. این تنش‌های مکانیکی می‌توانند ناشی از تنش‌های خارجی یا تنش‌های باقی‌مانده باشند. این نوع شکست، به‌اصطلاح ترک‌خوردگی تنشی شناخته شده که اغلب به اختصار SCC بیان می‌شود.

SCC شکلی پنهانی از خوردگی است؛ چرا که این نوع خوردگی، سبب ازدست‌رفتن قسمتی از فلز شده و استحکام مکانیکی آن را کاهش می‌دهد؛ اما این تخریب در روش‌های معمول بازرسی قابل تشخیص نبوده و شکست مکانیکی فاجعه‌بار و سریع اجزاء و ساختارها را به‌همراه دارد. از جمله این فاجعه‌ها می‌توان به گسیختگی لوله‌های انتقال گاز فشار بالا، انفجار دیگ‌های بخار و تخریب نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها اشاره کرد. [۳]

معمولاً آلیاژها بیشتر از فلزات مستعد این نوع خوردگی هستند و حتی با وجود مقدار نسبتاً جزئی از عوامل شیمیایی موثر مانند کلر در محیط رخ دهد. [۴]

رخ دادن SCC به حضور همزمان سه عامل بستگی دارد:

- یک ماده مستعد
- محیطی که موجب انجام SCC برای آن ماده می‌شود
- تنش کششی کافی

درنتیجه SCC نسبتاً به‌ندرت اتفاق می‌افتد، اما شکست ناشی از آن می‌تواند بسیار پرهزینه و مخرب باشد. [۵]

SCC توسط ترکیبی از عوامل مختلف رخ می‌دهد. در جدول ۱، فهرستی از آلیاژها و محیط‌های ایجادکنندهٔ SCC آمده‌است. این جدول سیستم‌های اثبات‌شده و مهم را برای مشکلات SCC بیان می‌کند. [۳]

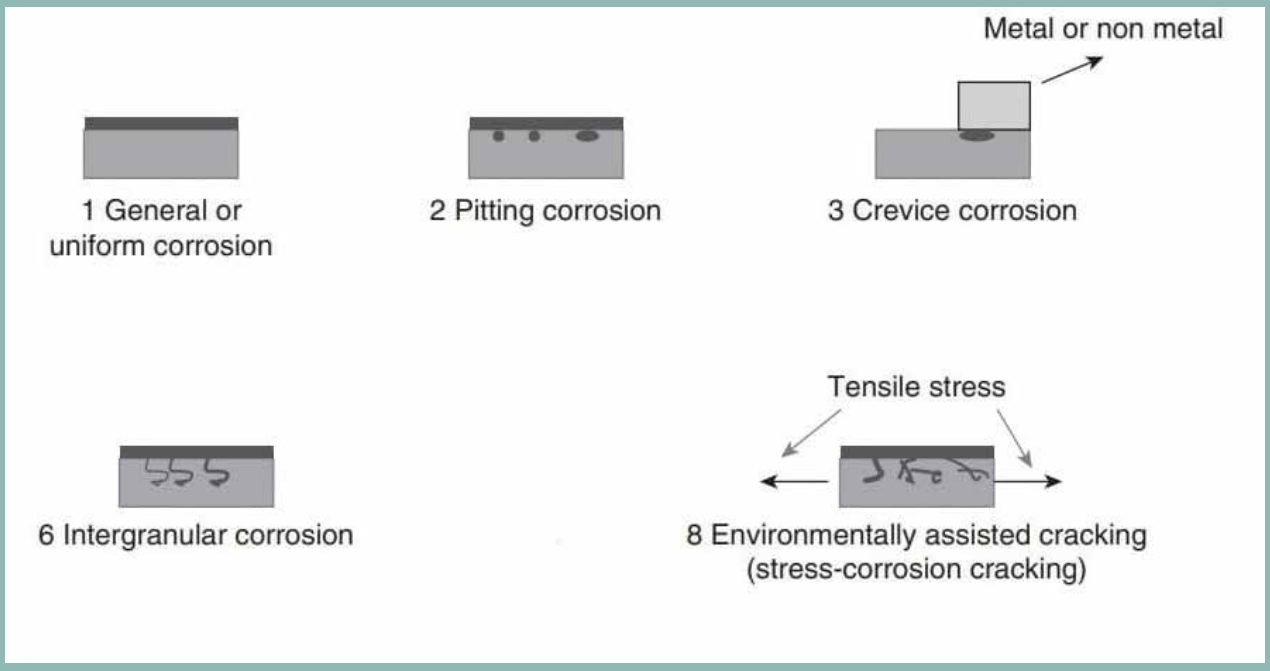
	INTERGRANULAR CORROSION	
Corrosion dominated (solution requirements highly specific)	Carbon – steels in NO_3^- solns	Intergranular fracture along pre-existing paths
	Al – Zn – Mg alloys in Cl^- solns	
	Cu – Zn – alloys in NH_3 solns	
	Fe – Cr – Ni steels in Cl^- solns	Transgranular faractur along strain-generated paths
	Mg – Al alloys in $CrO_4^{2-} + Cl^-$ solns	
	Cu – Zn alloys in NH_3 solns	
	Ti alloy in methanol	Mixed crack paths by adsorption, decohesion or fracture of brittle phase
Stress dominated (solution requirements less specific)	High strength steels in Cl^- solns	
	BRITTLE FRACTURE	

جدول ۱– فهرستی از آلیاژها و محیط‌های ایجادکنندهٔ SCC [۳]

نخستین قدم برای جلوگیری از این نوع خوردگی، انتخاب مواد مناسب است. با انتخاب ماده‌ای که خود حساس به SCC نباشد و با پردازش صحیح آن می‌توان از مشکلات SCC پرهیز کرد اما این کار همیشه ساده نیست؛ برخی محیط‌ها مانند آب با دمای بالا بسیار خورنده هستند و موجب SCC در بیشتر مواد می‌شوند. روش دیگر برای جلوگیری از SCC، حذف و یا کاهش تنش تا کمتر از حد تنش بحرانی SCC است. حذف تنش‌های اصلی امکان‌پذیر نیست اما امکان حذف تنش‌های باقی‌ماندهای که منجر به ترک می‌شوند، وجود دارد.

کنترل محیط و عوامل آن بیشترین تأثیر را در کنترل SCC دارد. اگر در سراسر محیط گونه‌های فعال وجود داشته باشد، باید آن‌ها را حذف کرد اما این کار نیز بسیار مشکل است. یکی از روش‌های حفاظت از گونه‌های فعال، پوشش‌های فلزی است. این پوشش‌ها، فلز را از محیط‌های فعال ایزوله کرده و مانع SCC می‌شود اما در مواقعی همین کار باعث ایجاد مشکلات مخرب‌تری می‌شود. [۵]

شکل۱ انواع خوردگی ذکر شده در بالا را به صورت شماتیک نشان می دهد.



شکل۱- طرح کلی برای اشکال مختلف خوردگی بر روی فلزات / آلیاژها [۶]

فاکتورهای خوردگی

۱. درجه حرارت

مانند هر واکنش دیگری، افزایش دما باعث افزایش سرعت خوردگی می‌شود. حتی در یک قطعه معین، قسمتی که دارای دمای بالاتری است نسبت به سایر نقاط مستعدتر برای خوردگی است.

۲. اختلاف پتانسیل

با قرارگرفتن فلزات غیرهم‌جنس و متصل‌به‌هم در یک محیط الکترولیت مشترک، به علت اختلاف‌پتانسیل موجود بین الکترودها، فلزی که دارای پتانسیل الکتروشیمیایی کمتری است، به عنوان آند خورده شده و فلز دیگر حفاظت کاتدی می‌شود.

۳. شرایط سطحی و ناخالصی‌های محیطی

سرعت خوردگی در سطوح صیقلی و تمیز فلزات نسبت به سطوح زبر و خشن به‌شدت تغییر می‌کند، به‌طوری که در سطوح صاف سرعت خوردگی کمتر است. وجود ناخالصی‌ها هم در محیط عامل بسیار مهمی است و اثرات گوناگونی روی نحوه و میزان خوردگی می‌گذارد.

۴. تشعشع

تاکنون در این زمینه بررسی‌های بسیار کمی صورت گرفته است اما طبق آزمایش‌های به‌عمل آمده، در حضور تشعشع میزان و شدت خوردگی افزایش می‌یابد.

۵. زمان

در برخی حالات بین زمان و میزان خوردگی رابطه‌ای خطی وجود دارد. معمولاً خوردگی با گذر زمان افزایش می‌یابد اما در شرایطی نیز کاهش میزان خوردگی مشاهده شده است.

۶. تنش

میزان تخریب مواد در قطعاتی که تحت تنش کششی و در معرض محیط‌های خورنده قرار می‌گیرند، شدیدتر می‌گردد.

۷. فشار اکسیژن و اختلاف در pH

فشار اکسیژن و pH به‌علت ایجاد مناطق آندی و کاتدی، عوامل مؤثری در واکنش‌های شیمیایی و اکسیداسیون مواد هستند.

۸. خواص فلزی

خواص و مشخصات مواد نقش بسیار مهمی در خوردگی و میزان آن دارد. مرزدانه‌ها، ساختمان بلوری، روش‌های ریخته‌گری، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی از عوامل مهم و مؤثری است که باید مدنظر قرار گیرد. [۷] عملیات حرارتی با تغییر خواص مواد، رفتار خوردگی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

[۱] K. p. balan, «corrosion,» Elsevier,2018.

[۲] س. ح. تویسرکانی, اصول علم و مهندسی مواد, دانشگاه صنعتی اصفهان, ۱۳۹۷.

[۳] L. L. Shreir, «Stress-corrosion Cracking of Ferritic Steels,» in Corrosion, Elsevier: Newnes-Butterworths,2014.

[٤] B. B. F, Stress Corrosion Cracking of Metals-A State of the Art, ASTM International,1972,p.1972.

[٥] T. S. V S Raja, Stress Corrosion Cracking, Elsevier,2011.

[٦] J. S.-S. P. Zarras, «an introduction,» in Corrosion processes and strategies for prevention, elsevier,2014,pp.3-28.

[٧] P. R.Roberge, Corrosion Engineering; Principle and Practice, McGraw-Hill Professional,2008.

اما بعد از معرفی خوردگی و انواع آن، به معرفی پایش خوردگی می‌پردازیم. گفته شد که یکی از مهم‌ترین اقدامات برای جلوگیری از خوردگی، پایش و اندازه‌گیری آن است. پایش خوردگی، فرآیندی است برای مشاهده و ارزیابی تجهیزات، سازه‌ها و امکانات با هدف شناسایی علائم ناشی از خوردگی به‌منظور کاهش هزینه‌ها، افزایش عمر و کارایی آن‌ها. روش‌های پایش خوردگی را به دو روش مستقیم (کاهش وزن، جریان خوردگی، پراب پلاریزاسیون قطبی، روش فراصوت و...) و یا غیرمستقیم (رادیوگرافی و روش‌های تحلیل شیمیایی) تقسیم می‌کنند. گاهی اوقات هم این روش‌ها می‌تواند تداخلی و یا غیرتداخلی باشد. نوعی از تقسیم‌بندی روش‌های پایش خوردگی عبارت‌اند از:

• روش‌های فیزیکی پایش خوردگی

این روش‌ها بر اساس تغییر خصوصیات فلز خورده شده هستند.

۱. روش کاهش وزن (WL): در این روش اندازه‌گیری میزان خوردگی را با توجه به کاهش وزن نمونه‌های فلزی مورد ارزیابی قرار می‌دهند.

۲. روش مقاومت الکتریکی (ER): در این روش با استفاده از یک نمونه مرجع، مقاومت قطعه را بررسی می‌کنیم و ازآنجاکه خوردگی مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد، می‌توان با مقایسه با نمونه مرجع مقدار خوردگی را ارزیابی کرد.

• کنترل محیط (روش‌های تحلیلی شیمیایی، فیزیکی و شیمیایی، فیزیکی و میکروبیولوژیکی)

این روش‌ها شامل تجزیه‌وتحلیل‌های شیمیایی و میکروبیولوژیکی محیط و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آن است.

۱. نظارت بر فعالیت میکروبی نسبت به فلزات: میکروارگانیسم‌ها عامل خوردگی در بسیاری از سیستم‌ها هستند؛ درنتیجه این روش بر اساس شناسایی و تعیین کمیت میکروارگانیسم‌ها استوار است.

۲. آزمون انباشت رسوب: میکروارگانیسم‌ها باعث کاهش انتقال حرارت می‌شوند. با اندازه‌گیری مقاومت در برابر انتقال حرارت می‌توان میزان خوردگی مورد ارزیابی قرارداد.

۳. پایش هیدروژن: برخی از واکنش‌های خوردگی منجر به تولید هیدروژن شده و باعث ایجاد ترک می‌شود. در این روش با جمع‌آوری هیدروژن با دستگاه‌های مداخله‌ای یا غیرمداخله‌ای می‌توان پایش خوردگی انجام داد.

• روش‌های الکتروشیمیایی

این روش‌ها فقط برای خوردگی فلزات در محیط‌های دارای هدایت الکتریکی بالا مناسب است.

۱. اندازه‌گیری پتانسیل واکنش اکسایس-کاهش (ORP): این روش بر اساس اندازه‌گیری فعالیت اکسیدی به حالت احیای مواد خالص در محلول‌های مایع و مقایسه با الکترود مرجع است.

۲. اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی تجهیزات فلزی: پتانسیل خوردگی اندازه‌گیری شده در یک مدار باز به‌عنوان یک مشخصه کیفی از فرآیند خوردگی در سطح فلز شناخته می‌شود و با مقایسه با الکترود مرجع پایش خوردگی ارزیابی می‌شود.
۳. روش مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR): هنگامی‌که الکترود پلاریزه شود، نرخ خوردگی آن بیشتر می‌شود و با اندازه‌گیری مقاومت پلاریزاسیون می‌توان خوردگی را بررسی کرد
۴. بررسی نویز الکتروشیمیایی (ENM): این روش بر اساس تجزیه‌وتحلیل نویز خودبه‌خودی جریان و پتانسیل الکتریکی یک الکترود خورده شده است.
۵. روش آمپرمتری مقاومت صفر (ZRA): در این روش یک جریان بین دو عنصر خورده شده در یک محیط الکترولیت اندازه‌گیری شده است.
۶. روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS): این روش یک روش الکتروشیمیایی است که در آن‌یک موج کم دامنه از پتانسیل متناوب معمولاً در پتانسیل خوردگی اعمال می‌شود.
۷. آنالیز اعوجاج هارمونیک (HDA) یا آنالیز هارمونیک (HA): این روش، اصلاح‌شده عملکرد روش LPR است که بر اساس اندازه‌گیری جریان‌های هارمونیک است.

• پایش خوردگی جو اتمسفر

در بسیاری از موارد به دلیل وجود متغیرهای خورنده مانند اکسیدهای گوگرد، نیتروژن، کلر و... اتمسفر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای پایش خوردگی جو اتمسفر از روش‌های WL و ER که قبلاً معرفی شد، استفاده می‌شود.

معرفی آزمون‌های غیر مخرّب (NDT)

(نویسنده: ندا عسکرزاده)

منظور از آزمون‌های غیر مخرّب استفاده از روش‌های فیزیکی برای شناسایی خصوصیات مواد یا آسیب‌های آن‌ها است که نیازی به تخریب قطعه و نمونه‌برداری نیست؛ به‌عبارت‌دیگر در این روش‌ها قطعه یا نمونه دچار تغییر شکل، تغییر خواص مکانیکی، تغییر سختی، تغییر خواص فیزیکی و ... نمی‌شود. [۱]انجمن آزمون و مواد آمریکا[۱] و انجمن مهندسین مکانیک آمریکا[۲]، آزمون غیر مخرّب را به ترتیب NDT[۳] و NDE[۴] نامگذاری کرده‌اند. [۲]

با استفاده از آزمون‌های غیر مخرّب می‌توان انواع عیوب ایجادشده در حین فرایند تولید و کار را شناسایی نمود. تخلخل، حفره‌های داخلی، ترک‌های ناشی از خستگی و خوردگی، ناپیوستگی‌های سطحی و داخلی و ناخالصی‌ها ازجملهٔ این عیوب هستند. با توجه به گوناگونی در منشأ عیوب، برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- حفرات گازی و انقباضی و ترک‌های تنشی ناشی از فرایند ساخت و ریخته‌گری
- ترک‌های ناشی از تنش پسماند، عیوب ماشین‌کاری و عملیات حرارتی ناشی از فرایند تولید قطعه
- عیوب ناشی از مونتاژ قطعات
- عیوب ناشی از خوردگی، خستگی، سایش، خزش و ...

پیشرفت صنایع مختلف نیازمند تولید قطعات، ماشین‌آلات و تجهیزات مناسب است و اطمینان از سلامت و کیفیت محصولات یکی از اهداف مرتبط با ساخت و تولید است، به همین منظور استفاده از آزمون‌های غیر مخرّب از مؤثرترین و کاربردی‌ترین ابزارهای شناسایی عیوب است. امروزه از آزمون‌های غیر مخرّب در صنایع مختلف مهندسی به‌منظور تشخیص کیفیت محصولات و به‌طور گسترده در بازرسی جوش، بازرسی قطعات ریختگی، قطعات آهنگری، تخمین عمر خستگی و بررسی میزان خوردگی و همچنین در زمینه‌های پزشکی استفاده می‌شود. بهره‌گیری از آزمون‌های غیر مخرّب به‌موجب پیشگیری از حوادث، کاهش هزینه‌ها و افزایش اطمینان استفاده از محصولات است. [۱]

با توجه به شرایط و خواص فیزیکی مواد انواع مختلفی از آزمون‌های غیر مخرّب به کار گرفته می‌شود که هر یک از این روش‌ها قادر به شناسایی برخی از عیوب عنوان‌شده‌اند. لازم به ذکر است که یک روش به‌تنهایی قادر به شناسایی تمامی عیوب نیست.

از انواع آزمون‌های غیر مخرّب می‌توان به موارد ذیل اشاره داشت:

۱. آزمون چشمی[۵] (VT): برای بررسی عیوب سطحی

۲. آزمون مادون‌قرمز[۶] یا ترموگرافی (IR): بررسی عیوب موجود در سیستم‌های برقی

۳. آزمون انتشار صوت[۷] (AE): برای بررسی عیوب در سازه‌های تحت بار و اجزای آن‌ها [۳]

۴. آزمون مایع نفوذی[۸] (PT): بررسی عیوب سطحی و عیوب راه‌یافته به سطح

۵. آزمون مغناطیسی[۹] (MT): بررسی عیوب سطحی و زیرسطحی تا فاصلهٔ معین از سطح

۶. آزمون رادیوگرافی[۱۰] (RT): بررسی عیوب درون حجمی

۷. آزمون جریان گردابی[۱۱] (ET): بررسی عیوب و ناهمگنی‌های سطحی و زیرسطحی در قطعات رسانا

[۱] American Society for Testing and Materials(ASTM)
[۲] American Society of Mechanical Engineers(ASME)
[۳] Nondestructive Testing(NDT)
[۴] Nondestructive Evaluation(NDE)
[۵] Visual Testing
[۶] Infra red Testing
[۷] Acoustic emission Testing
[۸] Liquid penetrant Testing
[۹] Magnetic particle Testing
[۱۰] Radiography Testing
[۱۱] Eddy current Testing

۸. آزمون التراسونیک[۱۲] (UT): بررسی عیوب درونی و صفحه‌ای [۲].

در این مقاله به معرفی یکی از روش‌های پرکاربرد و مهم در علم خوردگی، یعنی آزمون التراسونیک پرداخته شده است.

آزمون التراسونیک

آزمون التراسونیک یا آزمایش فراصوت به‌عنوان یکی از روش‌های بسیار دقیق برای بررسی عیوب سطحی و زیرسطحی ماده، مانند ترک‌های ناشی از خوردگی، حفره‌های انقباضی، منافذ و خلل و فرج‌ها کاربرد دارد. به‌منظور تولید امواج التراسونیک از پروب‌هایی که امواج صوتی با دامنه فرکانس ۰/۲ هرتز تا ۵۰ مگاهرتز اعمال می‌کنند، استفاده می‌شود.

هنگامی‌که این امواج به قطعه اعمال می‌شود، به عیوب و ناپیوستگی‌ها برخورد کرده و منعکس می‌شود و یا عبور می‌کند. این پرتوها توسط مولّد صوتی دریافت شده و تبدیل به پالس‌های الکتریکی[۱۳] می‌شوند و به‌صورت یک سیگنال بر روی صفحه‌نمایش ظاهر می‌گردند. با بررسی این سیگنال‌ها می‌توان مکان، عمق، ابعاد و نوع عیب را تشخیص داد. در همان ابتدای اعمال امواج، یک پالس بر روی آشکارساز مشاهده می‌شود که نشانهٔ سطح قطعه است. یک پالس هم در انتها که نشانهٔ سطح انتهایی قطعه است مشاهده می‌شود. حال اگر بین این دو پالس، پالس دیگری نیز مشاهده شود، بیانگر وجود عیوب در قطعه است.

این پروب‌های فرستنده و گیرنده از جنس کریستال‌های پیزوالکتریک است که معمولاً از کوارتز، سولفات لیتیم، تیتانات باریم و تیتانات زیرکونیت سرب و... برای ساخت آن‌ها استفاده می‌شود. این پروب‌ها امواج الکتریکی را به امواج صوتی تبدیل می‌کنند. [۴]

پروب‌های مورداستفاده در آزمون التراسونیک به پروب‌های تک‌کریستاله، دوکریستاله و زاویه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. پروب‌های تک‌کریستاله امواج طولی تولید می‌کند. برای افزایش مقاومت به سایش، پروب‌ها معمولاً از جنس کوارتز ساخته می‌شوند. اصولاً از پروب‌های تک‌کریستاله برای اندازه‌گیری ضخامت‌های زیاد، ناهمگنی‌های موازی با سطح و کاهش ضخامت مانند خوردگی استفاده می‌شود. در پروب‌های دوکریستاله یکی از کریستال‌ها امواج فراصوت را تولید و منتشر می‌کند و کریستال دیگر ساکن می‌ماند. از این پروب در آزمون قطعات کم ضخامت و تعیین عیوب نزدیک به سطح استفاده می‌شود و نسبت به سطح زبر حساس‌تر هستند. نوع بعدی پروب‌ها، پروب‌های زاویه‌ای هستند. در این نوع پروب‌ها از چند کریستال استفاده شده است. در این نوع پروب امواج به حالت طولی تولید و در لحظهٔ برخورد با قطعه، تبدیل به امواج عرضی می‌شوند. در پروب زاویه‌ای از تیتانات باریم استفاده می‌شود و معمولاً این پروب‌ها در سیستم‌های خودکار کاربرد دارند؛ اما جهت بررسی قطعات فولادی مناسب نیستند.

با توجه به جهت و موقعیت عیوب در قطعه، چند نوع موج می‌تواند در بازرسی آزمون التراسونیک مورداستفاده قرار گیرد. برای شناسایی عیوبی که موازی سطح هستند از امواج طولی و برای شناسایی عیوب زاویه‌دار نسبت به سطح از امواج عرضی استفاده می‌شود. در آزمون التراسونیک

---

[۱۲] Ultrasonic Testing

[۱۳] به مجموعه‌ای از امواج کوتاه که تحت اثر انرژی الکتریکی متناوبی در واحد زمان، به شکل یک دسته موج صوتی تکرار می‌گردند پالس گفته می‌شود.

فرکانس‌های پایین‌تر دارای قدرت نفوذ بیشتری دارند و توانایی دیدن عیوب کوچک را ندارند و بالعکس، فرکانس‌های بالاتر به عمق نفوذ می‌کنند و عیوب کوچک را می‌توانند شناسایی کنند. [۵]

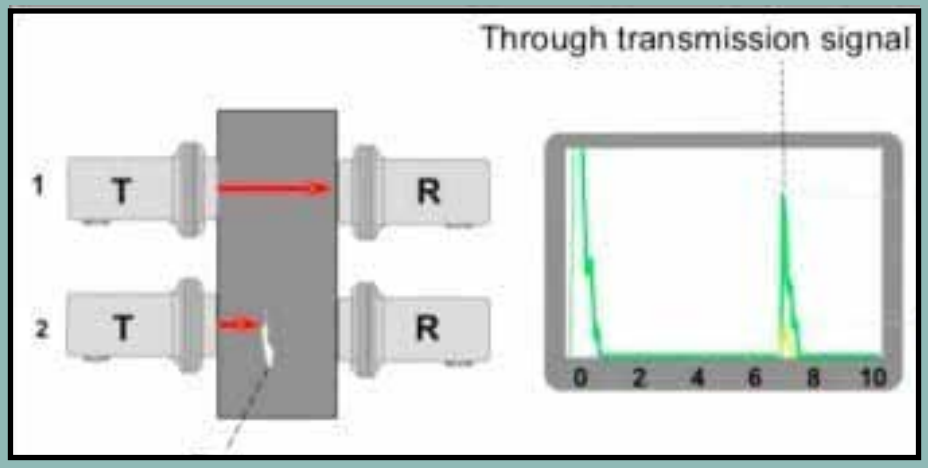
آزمون التراسونیک به دو صورت تماسی و غیرتماسی انجام می‌شود. در روش تماسی پروب به‌صورت مستقیم بر روی قطعه قرار می‌گیرد اما در روش غیرتماسی قطعه و پروب درون یک مایع(با توانایی حرکت صوت در آن) قرار می‌گیرند. در روش غیر تماسی صوت پس از عبور از مایع به قطعه رسیده و وارد آن می‌شود و درون قطعه را بررسی می‌کند.

انواع روش‌های بازرسی التراسونیک عبارت است از:

۱. عبوری[۱۴]

در این روش آن قسمتی از پرتو را که از قطعه عبور کرده است را موردبررسی قرار می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در دو طرف نمونه پروب قرار دارد که پروب روی نمونه، فرستندهٔ پرتو و پروب دیگر، گیرنده صوت است. در صورت وجود نقص شدت صوت دریافت شده کاهش پیدا می‌کند؛ باید توجه داشت که دو پروب دقیقاً باید رو به روی یکدیگر قرار گیرند.

با روش عبوری نمی‌توان تعیین کرد که عیوب در چه عمق و محلی از قطعه قرار دارد و تنها وجود و یا عدم وجود عیوب بررسی می‌شود. از این روش به‌منظور بررسی شمش‌ها و ورق‌های نوردی استفاده می‌شود. از طرف دیگر به دلیل جدایی گیرنده و فرستنده ازنظر الکتریکی تفاوتی در استفاده از پالس‌های صوتی و یا صوت پیوسته وجود ندارد. [۶]

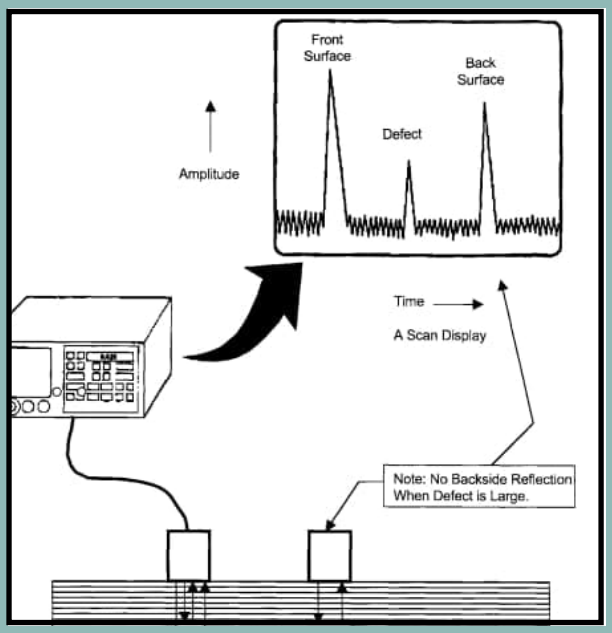


شکل۱- شماتیک طرز کار آزمون التراسونیک عبوری [۶]

[۱۴] Trough Transmission

۲. پالس اکو[۱۵]

از روش پالس اکو معمولاً برای بررسی قطعات پیچیده استفاده می‌شود. در این روش از یک پیزوالکتریک هم به‌عنوان فرستنده و هم به‌عنوان گیرنده استفاده می‌شود.

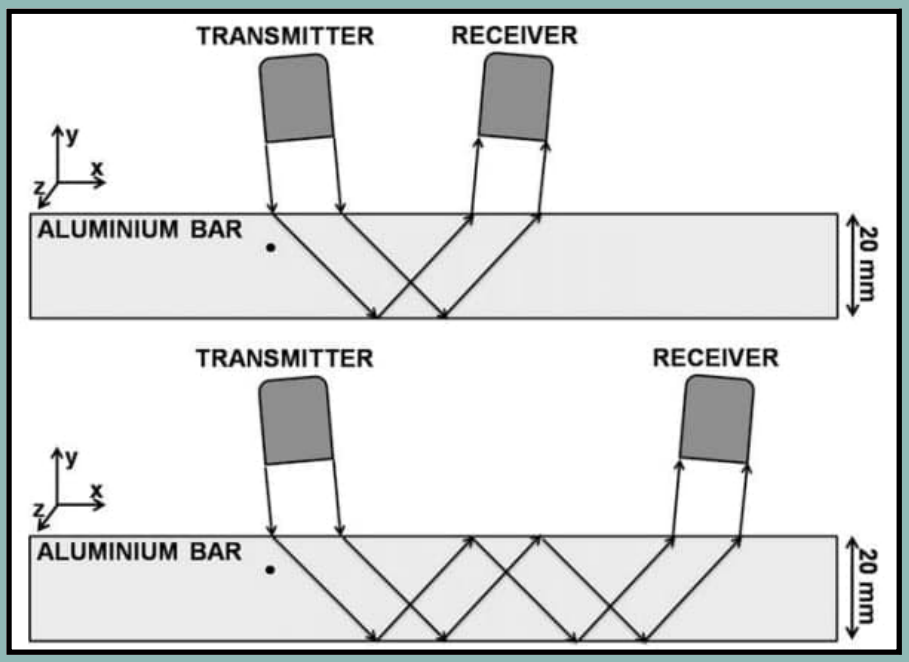


شکل۲- شماتیکی از روش التراسونیک پالس اکو

انرژی امواج دریافت شده به‌مراتب ضعیف‌تر از انرژی امواج فرستاد شده است زیرا بخشی از صوت در برخورد با عیوب بازتاب شده و بخشی دیگر در همان جهت عبور می‌کند. درنتیجه نمی‌توان از صوت پیوسته استفاده کرد و تنها از صوت پالسی استفاده می‌شود. امواجی که از داخل ماده عبور می‌کنند در صورت برخورد به یک عیب کامل یا ناقص منعکس و توسط پروب دریافت و بر روی نمایشگر یک پیک تشکیل می‌شود. در شکل۲ روش پالس اکو به‌طور کامل نشان داده‌شده است. این روش به هر دو صورت تماسی و غیر تماسی انجام می‌شود.

۳. روش عبوری همراه بازتاب[۱۶]

در روش عبوری همراه بازتاب، مانند روش عبوری از دو پروب استفاده می‌شود اما با این تفاوت که هر دو پروب در یک سمت نمونه و با فاصلهٔ معینی از هم قرار می‌گیرند. در شکل ۳ این موضوع به‌طور واضح نشان داده‌شده است.

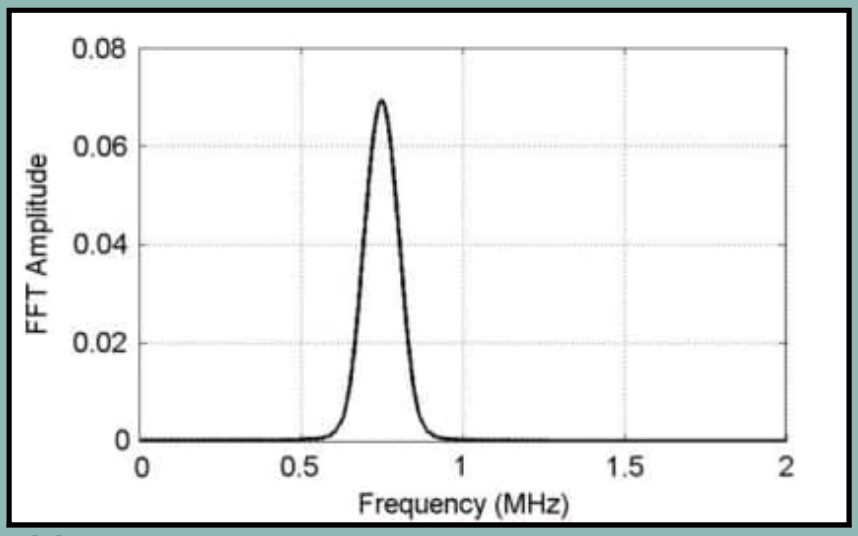


شکل۳- شماتیک روش التراسونیک عبوری همراه بازتاب [۷]

[۱۵]Pulse Echo
[۱۶]Transmission with Reflection

از این روش برای بررسی عیوب عمود بر سطح و یا زاویه‌دار استفاده می‌شود. به این صورت که صوت پس از عبور از نمونه و برخورد با عیوب منعکس شده و توسط پروب دوم دریافت می‌شود و یک پیک مانند شکل ۴ بر روی نمایشگر باقی می‌گذارد [۷].

در روش‌های پالس اکو و عبوری همراه بازتاب می‌توان فاصلهٔ عیوب از سطح و مکان دقیق عیوب را مشخص کرد به همین دلیل از این دو روش در بسیاری از موارد استفاده می‌شود [۴].



شکل۴-پیک روی نمایشگر از طریق التراسونیک عبوری هم‌زمان بازتابی [۷]

کاربردهای آزمون التراسونیک

- بررسی قطعات آهنگری
- بررسی ترک‌ها و امواج سطحی مانند پره‌های توربین
- اندازه‌گیری خودکار ضخامت
- آزمون زنگ‌زدگی
- اتصالات لحیم‌کاری
- تخمین میزان کاهش ضخامت ناشی از خوردگی
- تعیین خواص فیزیکی
- شناخت ریزساختار
- اندازه‌گیری مدول الاستیک

مزایا

- بررسی قطعات با دیواره‌های ضخیم
- بسیار حساس برای بررسی ترک‌های سطحی
- روش چندمنظوره و انعطاف‌پذیر
- عدم محدودیت در جنس برای قطعات
- تشخیص عمق و محل قرارگیری عیوب
- امکان استفاده قطعات با اشکال پیچیده

- قدرت نفوذ بالا
- دقت بسیار زیاد در تعیین شکل عیوب معایب

از مهم‌ترین معایب این روش عبارت‌اند از:

- مشکل در بازرسی قطعات نازک
- باید جهت عیوب مشخص باشد
- نسبتاً گران
- وابستگی زیاد به مهارت
- نیاز به تجهیزات پیشرفته [۵]

[۱] P. Shull, Nondestructive Evaluation-Theory and Applications, M. Dekker ,2002 , p .841.

[۲] L. Cartz, Nondestructive Testing, Materials Park, OH : ASM International ,2010.

[۳] B. R. C. Meola, Nondestructive Testing and Evaluation: Overview, Elsevier , 2016

[٤] A. Ahmad and L. J. Bond, Nondestructive evaluation of materials, Materials Park, Ohio : ASM International, 2018 .

[٥] C. H. Chen, Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, 2007.

[٦] M. T. S. M. K. G. Tamil M. Loganathan, «Sustainable Composites for Aerospace Applications,» in Ultrasonic inspection of natural fiber-reinforced composites, Elsevier,2018 ,pp.227-251.

[٧] K. V. D. A. E. B. J. D. P. L. O. B. M. Steven Delrue, «Two-dimensional simulation of the single-sided air-coupled ultrasonic pitch-catch technique for non-destructive testing ,»vol.50,no.2,p.9, 2010.

تشخیص خوردگی درون خط لوله با استفاده از سیستم بازرسی نوری غیرمخرب

(نویسنده: **پویا نخعی اشتر**)

در بیشتر صنایع برای آنکه از ورود اپراتور به داخل تانکرها یا لوله‌های حاوی سیالات جهت بازرسی جلوگیری شود، این کار با دوربین‌های مداربسته (CCTV) و از طریق آنالیز تصاویر انجام می‌شود. روش‌های بازرسی CCTV فاقد محدودیت نیستند به‌طور مثال کیفیت پایین تصاویر گرفته‌شده (به دلیل عدم وجود نور کافی) روی دقت بازرسی اثر منفی می‌گذارد. جهت غلبه بر این محدودیت‌ها از سیستم نوری استفاده می‌شود که شامل لیزر دیودی, ژنراتور نوری و دوربین مداربسته است. با استفاده از این سیستم، نقشه‌ای از سطح دیواره‌های داخلی تولید می‌شود و حفرات ناشی از خوردگی در تصاویر مشخص خواهند شد.

سیستم بازرسی نوری دارای پلتفرم متحرک مجهز به دوربین است که در سرتاسر طول خط لوله حرکت و تصویربرداری می‌کند. این دوربین توسط کابل به یک ایستگاه بازرسی متصل است و در این ایستگاه جهت بررسی ویدیوهای ضبط‌شده، یک مهندس حضور دارد که فرایندی زمان‌بر و هزینه‌بر است. علاوه بر آن تنها نقص‌های بزرگ و آشکار با چشم انسان قابل تشخیص است و نمی‌توان در مراحلِ اولیه ایجاد نقص را تشخیص داد. همچنین تشخیص عیوب با تکنیک‌های سنتی CCTV تا حدِ زیادی به تجربه و مهارت مهندس وابسته است بنابراین احتمال خطا در نتایج آن وجود دارد و برای افزایش دقت باید از سیستم بازرسی اتوماتیک استفاده کرد. ترموگرافی مادون قرمز به‌عنوان یکی از روش‌های در حال توسعهٔ بازرسی خط لوله است؛ اما این روش‌ها تاکنون نتوانسته‌اند به‌طور کاربردی جایگزین تکنیک بازرسی CCTV شوند. سیستم‌های روشن‌کننده که از حلقه یا نقاط نورانی روی دیواره‌های داخلی ایجاد می‌کنند ازجمله پیشرفت‌های صورت گرفته برای بهبود کیفیت تصاویر است. همچنین امکان استفاده از دیود لیزری به‌عنوان منبع نور به‌جای حلقه نوری نیز وجود دارد. تمام این روش‌ها تنها قادر به تشخیص عیوب ساختاری مانند حفره و ترک هستند. تشخیص و طبقه‌بندی نقص‌های سطحی داخلی با استفاده از آنالیز تصاویر دیجیتالی انجام می‌شود. بااینکه این سیستم‌ها بر نکات ضعف نسبی بازرسی با روش CCTV توسط انسان غلبه می‌کنند اما هنوز به کیفیت تصاویر خام گرفته‌شده وابسته‌اند. در این مقاله از پروفایلر لیزری(دستگاهی که شدت پرتو لیزر را ثبت می‌کند و نمایش می‌دهد) به‌منظور بهبود کیفیت تصاویر استفاده شده است. با این نوآوری بجای استفاده از اطلاعات مکانی حلقه نور، از اطلاعات شدت نور استفاده می‌شود تا تشخیص نقص بر اساس تحلیل تصویر انجام شود. این روش بازرسی، کامل‌کنندهٔ تکنیک CCTV است و امکان تشخیص و مکان‌یابی اتوماتیک نقص حاصل از خوردگی را با دقت میلی‌متری فراهم می‌کند[۱].

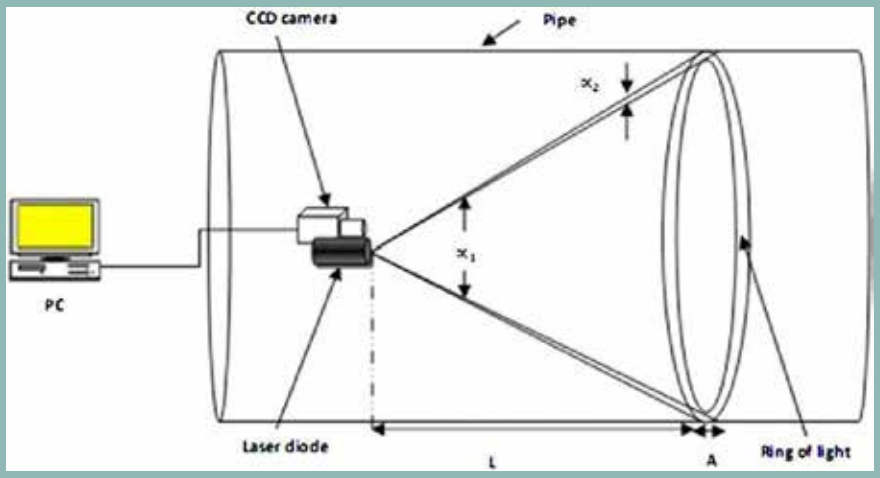
پروفایلر لیزری بر پایه CCTV

سیستم بازرسی نوری شامل دوربین کالیبره‌شده، پروژکتور حلقه نوری و یک منتشرکننده است که پرتو لیزر را درون حلقه نوری پخش می‌کند. پرتو نور تولیدی از دیود لیزری از پخش‌کنندهٔ نوری عبور می‌کند و الگوی نوری دایره‌ای شکل روی مقطعی از لوله ایجاد می‌کند. موقعیت محلی از لوله که در حال بازرسی است(نسبت به سیستم نوری) و مساحت روشن‌شده از دیواره لوله، به ترتیب عبارت‌اند از:

$$L = \frac{R}{\tan(\frac{\alpha_1}{2})}$$

$$A = R.(\frac{1}{\tan(\frac{\alpha_1}{2} - \alpha_2)} - \frac{1}{\tan(\frac{\alpha_1}{2})})$$

در این روابط R شعاع لوله و α_1 و 2α زوایای تابش از پخش‌کننده هستند. این روابط در حالت ایده‌آل برقرار هستند که در آن لیزر منطبق بر محور مرکزی لوله است. در شرایط واقعی، عدم انطباق‌های زاویه‌ای می‌تواند باعث تغییر شکل ناحیهٔ روشن‌شده از دایره به بیضی شود[۱].



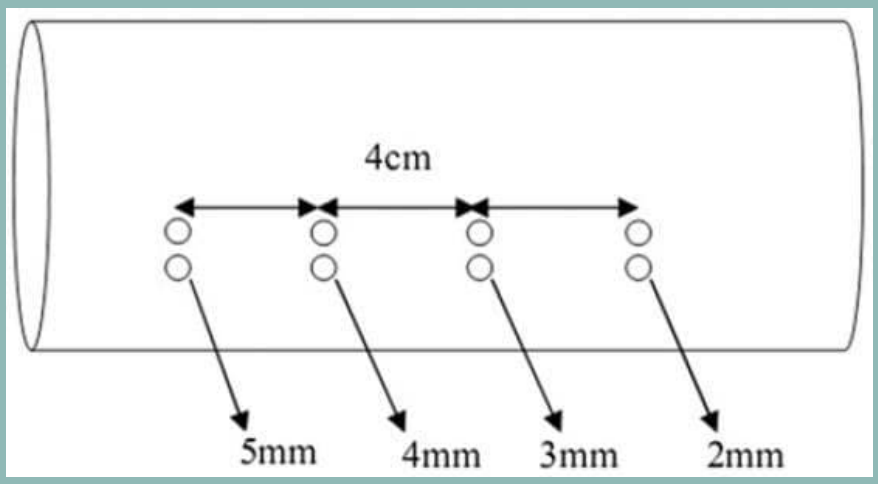
شماتیک سیستم نوری [۱]

تصویر واقعی از یک سیستم متحرک بازرسی نوری خط لوله [۲]

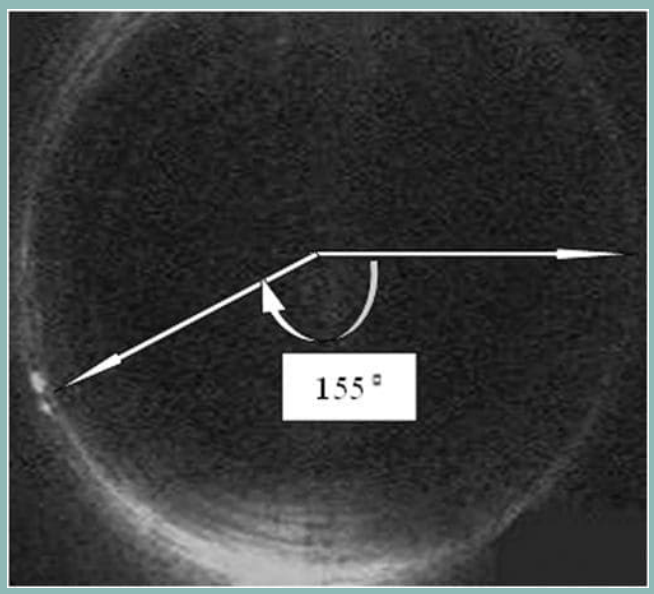
تصویر واقعی ثبت‌شده با سیستم بازرسی متحرک از درون خط لوله [۲]

آزمایش و بحث

برای آنالیز داده‌های خام به‌دست‌آمده از آزمون، از نرم‌افزار MATLAB به‌منظور پردازش تصاویر استفاده شده است. نمونه، یک لولهٔ فولادی است که حفره‌هایی جهت شبیه‌سازی خوردگی حفره‌ای، بر سطح داخلی آن ایجاد شده است. حلقه‌های نور لیزر روی دیواره داخلی لوله تابیده می‌شود و بازتاب توسط دوربین ذخیره می‌شود. در محل‌هایی که حفره و نقص وجود دارد نور لیزر پراکنده و باعث تغییر سطح شدت در تصویر می‌شود بنابراین با آنالیز سطوح شدت، می‌توان حفره‌ها و موقعیت آن‌ها را شناسایی کرد. برای بهبود کیفیت عکس و تشخیص ناحیهٔ نوری دایره/بیضی‌شکل از روش‌های پردازش تصویر استفاده می‌شود. به‌منظور تشخیص بهتر، کنتراست تنظیم و نویز کاهش داده می‌شود تا لبهٔ حلقه‌ها باقی بماند و درنهایت توسط دوربین لبه‌ها مشخص می‌شود. تابش نور دایره‌ای شکل به دوربین به دلیل عدم تطابق سیستم نوری با محور مرکزی لوله، به بیضی تبدیل می‌شود؛ بنابراین از یک الگوریتم برای تطبیق دادن این بیضی با مجموعه‌ای از نقاط که توسط دوربین لبه‌ها به‌دست‌آمده استفاده می‌شود. در نمونهٔ آزمایش، حفره‌ها در زاویه‌ی ۱۵۵ درجه نسبت به محور افق و با فاصله‌های یکسان از یکدیگر در سطح داخلی لوله تعبیه‌شده‌اند. [۱]



شماتیک حفره‌های تعبیه‌شده در سطح داخلی لوله [۱]



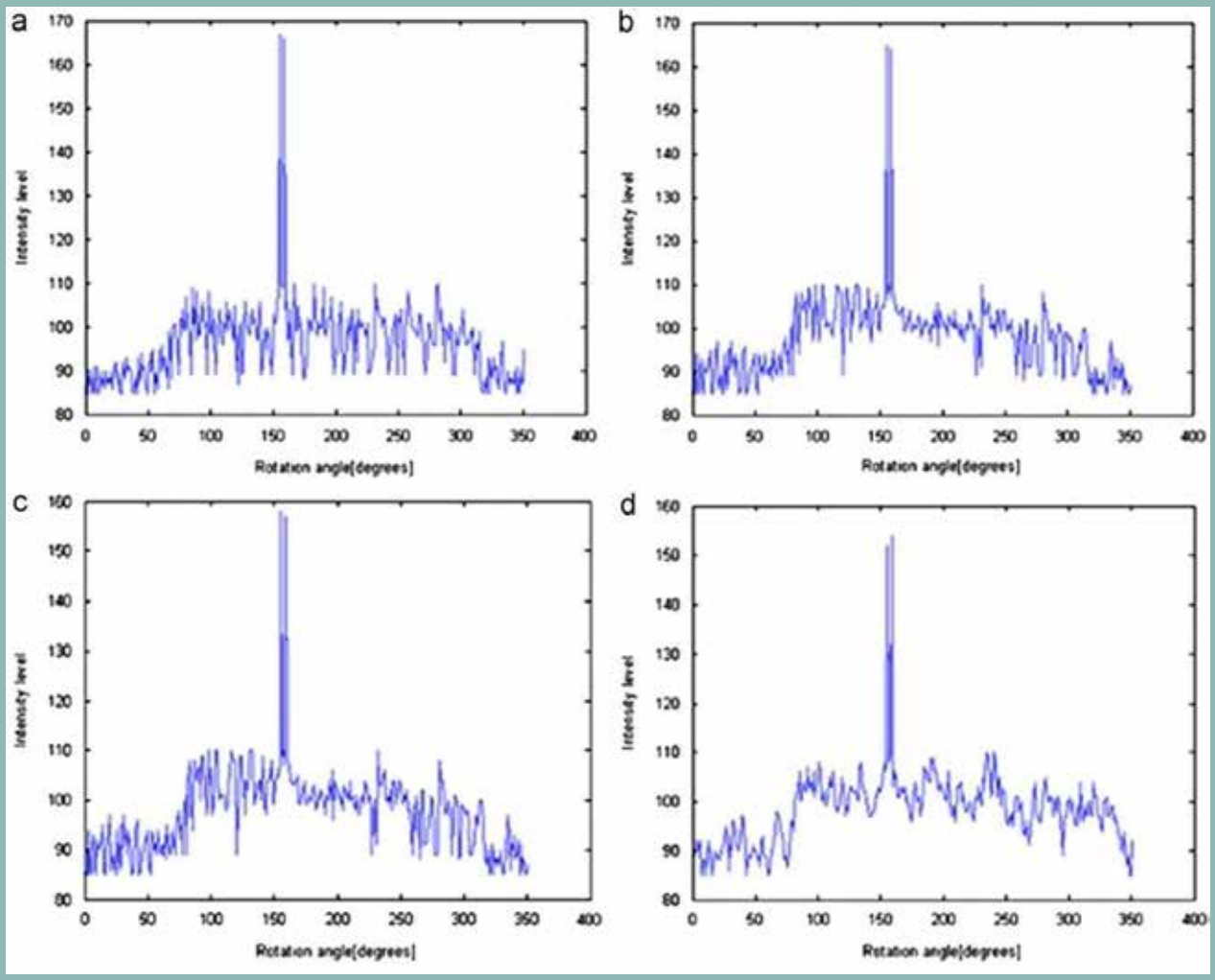
موقعیت زاویه‌ای حفره‌ها روی حلقه نوری لیزر نسبت به افق [۱]

برای تشخیص نقص‌ها، از یک الگوریتم استفاده می‌شود که میانگین شدت موضعی را در هر بیضی (نوری که به دوربین بازمی‌گردد) محاسبه می‌کند:

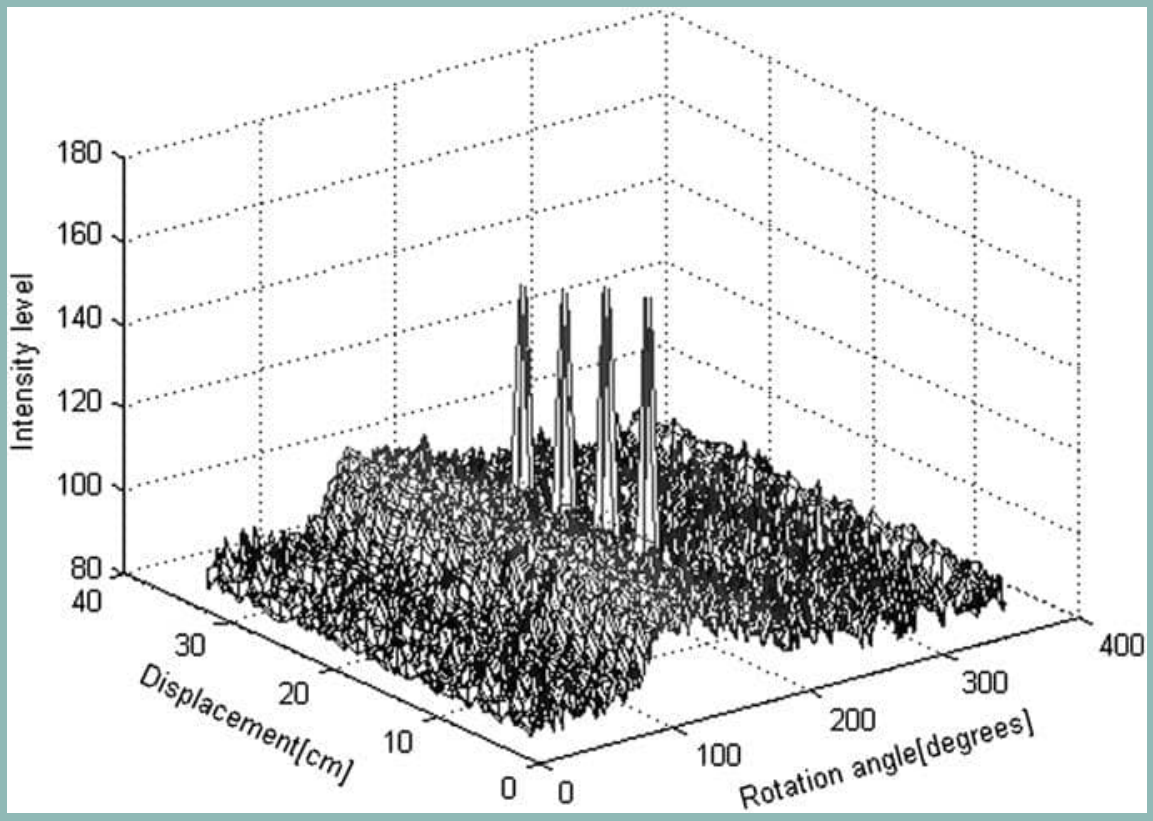
$$\mu_j = \frac{\sum i}{n \times m}$$

که در این رابطه μj میانگین شدت, i شدت سطح خاکستری یک نقطه‌ی خاص در تصویر و n*m اندازهٔ دریچهٔ اسکن‌کننده دوربین است.

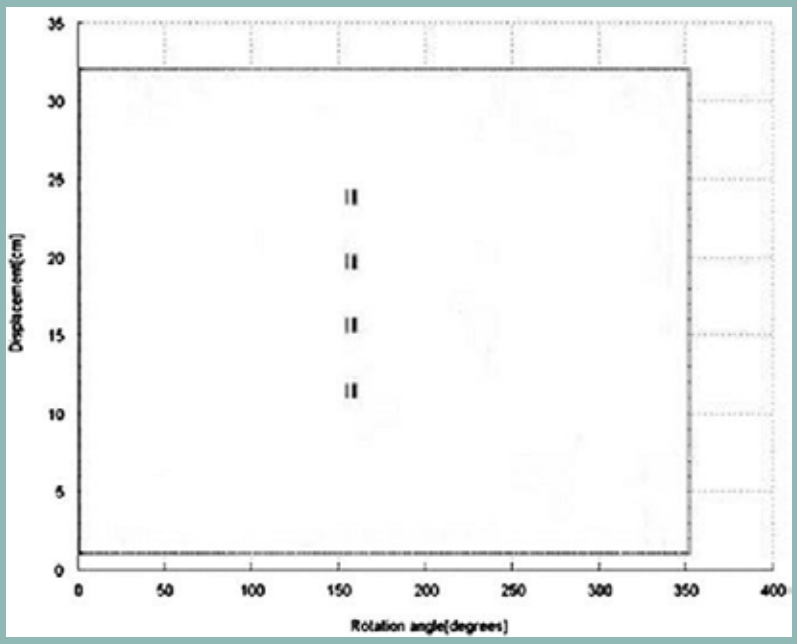
دیاگرام‌های شدت به شکل زیر هستند که در آن‌ها محور افقی نشان‌دهندهٔ زاویه روی حلقه نوری و محور عمودی نشان‌دهندهٔ شدت است. هر پیک شدت نشانگر وجود یک حفره است. در آزمون چهار پیک در زاویهٔ ۱۵۵ درجه نسبت به محور افق مشاهده می‌شود که حاکی از وجود چهار حفره در سطح داخلی لوله است:



زمانی که سیستم بازرسی درون لوله حرکت می‌کند یک نقشه از سطح داخلی لوله ایجاد می‌کند که در این نقشهٔ سطحی، ارتفاع نشانگر شدت است. با استفاده از نمای بالای نقشهٔ سطحی، لبه‌های حفرات را نیز می‌توان مکان‌یابی کرد. شدت در محل‌هایی که ناپیوستگی وجود دارد به‌شدت تغییر می‌کند. نقص‌های سطحی کوچک باعث افزایش شدت شده‌اند درحالی‌که نقص‌های سطحی بزرگ هم باعث افزایش شدت و هم کاهش آن شده‌اند؛ به این صورت که در لبه‌های نقص‌های بزرگ شدت افزایش اما درون آن‌ها شدت کاهش می‌یابد. این تغییرات در شدت به دلیل وجود تغییرات در هندسه سطح و تأثیر آن روی بازتاب نور از آن سطح است. در لبهٔ ناپیوستگی‌ها سطح از حالت افقی به مایل تغییر می‌کند و درنتیجه زاویهٔ انتشار نور تغییر می‌کند. با توجه به اینکه میزان نور بازتاب شده با زاویهٔ انتشار نور متناسب است، شدت نور بازتاب شده تغییر می‌کند. [۱]



نقشهٔ سطحی درون لوله [۱]



نقشه سطحی از نمای بالا و مشخص شدن حفرات با توجه به فاصله آن‌ها از سیستم نوری [۱]

با روش بازرسی غیر مخرب نوری، نقص‌های کوچک نیز مشخص می‌شوند حتی اگر مساحت نقص از پهنای حلقه نوری کوچک‌تر باشد. حداقل اندازه‌ی نقص قابل تشخیص توسط صافی سطح بازتاب‌کننده و حساسیت دوربین تعیین می‌شود. نقشه‌ی سطحی حاصل از سطوح صاف کنتراست بالاتری دارد و نقص‌های سطحی به‌راحتی قابل تشخیص‌اند درحالی‌که در سطوح زبر کاملاً برعکس است. کاهش زاویه 1α، شدت بازتاب بین سطوح سالم و سطوح دارای نقص را افزایش می‌دهد و تشخیص‌ها در تصویر را راحت‌تر خواهند کرد. این سیستم ساده، کارآمد و اتوماتیک می‌تواند حفرات، نقص‌ها و ناپیوستگی‌های سطح داخلی لوله را تشخیص دهد و عملکرد دقیق‌تری نسبت به تکنیک سنتی CCTV غیراتوماتیک دارد. [۱]

[۱]Corrosion detection of internal pipeline using NDT optical inspection system, M.S. Safizadeh, T. Azizzadeh, 2012.

[۲]drainskleen.com.au/cctv-drain-inspection

روش‌های بازرسی غیرمخرب تیوب (نویسنده: سید محمدحسن موسوی)

امروزه هرکجا که نیاز به تبخیر، تقطیر و سرد یا گرم کردن سیالات باشد، مبدل حرارتی به‌عنوان یکی از تجهیزات کارآمد مورداستفاده قرار می‌گیرد؛ بنابراین در چرخه‌های تولید و عملیات کارخانه یا مجتمع صنعتی را نمی‌توان یافت که فاقد مبدل‌های حرارتی باشد. مبرهن است به دلیل اهمیت اقتصادی، حصول اطمینان از سلامت لوله‌های مبدل‌های حرارتی امری بسیار مهم و حیاتی است. می‌توان به موارد ذیل به‌منظور بررسی مبدل-های حرارتی با بهره‌گیری از مزایای بازرسی‌های غیر مخرب اشاره داشت:

- ایجاد آگاهی نسبت به وضعیت کیفی و کمی، عمر مفید، نوع عیوب و خرابی‌های تجهیزات
- کاهش و تنظیم دوره‌های بازرسی و تعمیرات اساسی
- کاهش هزینه‌های مربوط به تأمین مواد، بازرسی و تعمیرات

جنس، سایز و نوع تیوب، نوع مبدل و همچنین عیوب مورد انتظار از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده و به‌عنوان یک قاعده جهت انتخاب روش بازرسی مناسب و دستیابی به بیشترین دقت در نتایج آزمایش است.

ازاین‌رو به چهار روش متداول به‌منظور بازرسی تیوب‌ها ازجمله آزمایش ادی کارنت[1]، آزمایش میدان دور[2]، آزمایش بازرسی دوار داخلی (آلتراسونیک)[3] و آزمایش نشت شار میدان مغناطیسی[4] می‌توان اشاره داشت که هرکدام از روش‌های نام‌برده دارای شرایط کاربردی، مزایا و محدودیت‌های مخصوص به خود هستند.

به‌عنوان‌مثال، آزمایش ادی کارنت تنها مختص به مواد مغناطیس بوده و حساسیت خیلی خوبی نسبت به تشخیص عیوب موضعی و کلی حاصل از خوردگی داشته است و می‌تواند بین عیوب داخلی و خارجی تیوب تمایز قائل شود. در مقابل آزمایش میدان دور تنها برای مواد فرو مغناطیس کاربرد دارد و در کنار عدم توانایی در تمایز بخشیدن بین عیوب داخلی و خارجی و محدودیت در شناسایی عیوب موضعی، سرعت‌پایین آزمایش را نیز دارا است. آزمایش التراسونیک به‌منظور بررسی تیوب‌های مغناطیسی و فرو مغناطیسی قابلیت کارکرد را دارد و در اندازه‌گیری ضخامت دیواره دارای دقت بسیار بالایی است اما در کنار سرعت‌پایین آزمایش و الزام حضور مایع واسط (کوپلنت) و نیاز به رسوب‌زدایی عالی در جهت تشخیص عیوب کوچک اعم از سوراخ‌های ریز یا ترک‌ها دارای خطا می‌باشد. آزمایش نشت شار مغناطیسی نیز همانند آزمایش‌های دیگر دارای سرعت‌پایین آزمایش بوده و بیشتر به‌عنوان آزمایش مکمل به دلیل محدودیت در تخمین اندازه عیب مورداستفاده قرار می‌گیرد. همچنین این آزمایش تنها برای مواد مغناطیسی کاربرد دارد. درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب روش آزمایش غیر مخرب مناسب، مهم‌ترین بخش در آزمایش تیوب‌ها به شمار می‌رود.

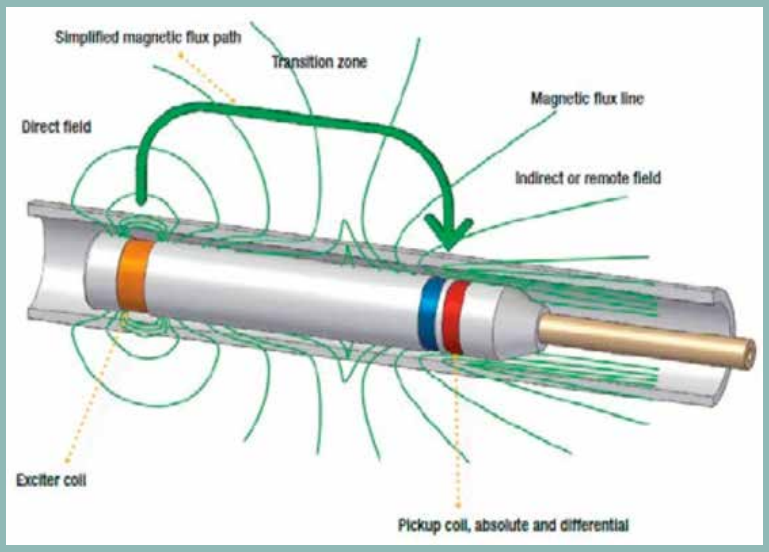
آزمایش میدان دور (RFT)

اساس این روش بر پایه‌ی عبور میدان مغناطیسی از میان جداره‌ی تیوب پایه‌گذاری شده است.

کویل مولد با دریافت جریان متناوب تحت فرکانس مناسب از منبع جریان، میدان مغناطیسی متناوبی را در اطراف تیوب تولید می‌کند. میدان مغناطیسی ایجادشده از میان جداره تیوب عبور

[1] Eddy Current Test
[2] Remote Field Test
[3] Internal Rotary Inspection System
[4] Magnetic Flux Leakage

کـرده و در سـطح خارجـی نیـز منتشـر می‌گـردد. یـک کویـل گیرنـده در ناحیـه میـدان دور (در فاصلـه‌ای معـادل ۲ تـا ۴ برابـر قطـر تیـوب دور از کویـل مولـد) قـرار دارد و تغییـرات میـدان مغناطیسـی را رصـد می‌کنـد. بـا حضـور عیـب بـر سـر راه خطـوط میـدان مغناطیسـی، ایـن میـدان دچـار اغتشـاش شـده و ایـن تغییـر توسـط کویـل گیرنـده ثبـت و گـزارش می‌گـردد. بسـته به‌انـدازه و عمـق عیـب میـزان ایـن اغتشـاش نیـز تغییـر کـرده و از ایـن طریـق انـدازه عیـب نیـز قابل‌شناسـایی خواهـد بـود. شـکل ۱ شـماتیکی از نحـوه کارکـرد آزمایـش RFT را بـه تصویـر کشـیده اسـت.



شکل۱. نحوه عملکرد پروب RFT

ایـن روش به‌ویـژه در آزمایـش تیوب‌هـای کربنـی به‌کاررفتـه اسـت و عمومـاً محـدود بـه ارزیابـی کاهـش ضخامـت دیـواره)عیـوب حجمـی (می‌شـود. توانایـی تشـخیص عیـوب موضعـی)حفره‌هـا(بـا ایـن روش محـدود بـوده اسـت بـه طوریکـه هنگامی‌کـه آزمایـش بـر روی تیـوب کالیبراسـیون تمیـز انجـام می‌شـود قابل‌مشـاهده‌اند ولـی هنگامی‌کـه آزمایـش بـر روی تیوب‌هـای مبـدل انجـام می‌گیـرد، وجـود اکسـید و رسـوبات موجـود در داخـل یـا خـارج از تیـوب نویـز ایجـاد خواهـد کـرد کـه سـیگنال‌های ناشـی از آن، سـیگنال حفره‌هـا را پوشـانده و حساسـیت ایـن روش را نسـبت بـه عیـوب موضعـی کـم می‌کنـد.

قابلیت‌های RFT

- قابل کاربرد برای تیوب‌های با خاصیت فرو مغناطیسی
- قابل کاربرد برای تشخیص خوردگی‌های کامل دیواره داخلی و خارجی تیوب (عیوب حجمی)
- توانایی تخمین مناسب اندازه عیب (عمق)

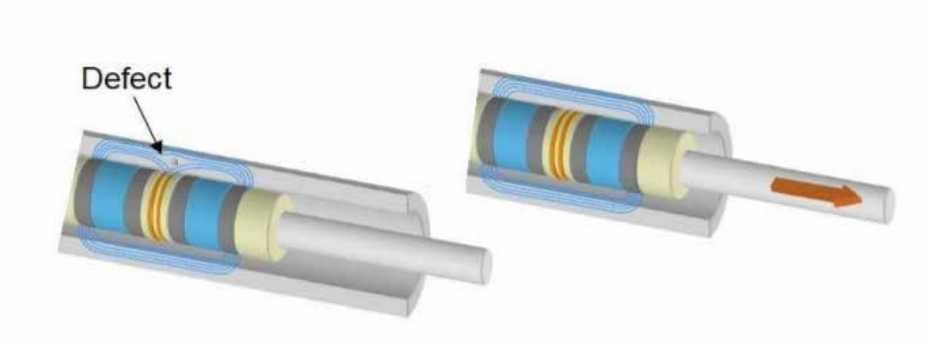
محدودیت‌های RFT

- محدودیـت شناسـایی و تعییـن سـایز عیـوب موضعـی)حفرهـای(ایجادشـده در دیـواره داخلـی و خارجـی تیو ب
- عدم شناسایی ترک‌های طولی
- عدم تشخیص عیوب سرتاسری کشیده شده از ابتدا تا انتهای تیوب مانند درز جوش

- ناتوانایی در بازرسی قسمتی از ابتدا و انتهای تیوب (فاصله‌ای به‌اندازه طول پروب)
- عدم توانایی در تفکیک عیوب داخلی خارجی
- محدودیت تشخیص و تعیین سایز ترک‌های محیطی

آزمایش نشت شار مغناطیسی(MFL)

آزمایش نشت شار مغناطیسی روشی است که صرفاً برای بازرسی تیوب‌هایی با خواص مغناطیسی ابداع و مورداستفاده قرارگرفته است. در این روش یک آهنربای الکترومغناطیسی یا دائمی وظیفه ایجاد خطوط میدان مغناطیسی را بر عهده دارد و یک حس‌گر دریافت‌کننده که بین دو قطب آهنربا قرار می‌گیرد و می‌تواند یک کویل باشد، تغییرات شار میدان را ثبت خواهد کرد (شکل ۲). قدرت آهنربا به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که دیواره تیوب در محدود ای نزدیک به حد اشباع قرار گیرد. در این حالت در جداره‌های بدون عیب هیچ موردی از تغییرات شار ناشی از نشست میدان ثبت نمی‌شود اما به‌محض آنکه یک عیب داخلی یا خارجی در محدوده قابل احساس برای پروب قرار گیرد به دلیل ایجاد مقاومت در مسیر خطوط شار مغناطیسی، نشت شار به سمت بیرون از جداره صورت گرفته است و توسط حس‌گر دریافت می‌شود که درنهایت پس از پردازش‌های سیستمی به‌صورت سیگنال عیب روی صفحه‌نمایش ظاهر می‌گردد. اندازه و مقدار نشتی به شکل، ابعاد و منطقه قرارگیری عیوب بستگی دارد و سرعت کشیدن پروب از درون تیوب نیز در کیفیت سیگنال‌های به‌دست‌آمده تأثیرگذار است. این روش عموماً به‌عنوان یک آزمایش تکمیلی در کنار آزمایش RFT مورداستفاده قرار می‌گیرد.



شکل۲. پروب و نحوه عملکرد آزمایش MFL

قابلیت‌های MFL

- قابل کاربرد برای مواد مغناطیسی
- حساسیت بالا به عیوب موضعی
- قابل‌استفاده برای تیوب‌های با جداره نسبتاً نازک
- سرعت مناسب بازرسی
- قابل کاربرد برای شناسایی ترک‌های عرضی

محدودیت‌های MFL

- عدم شناسایی ترک‌های طولی
- عدم کارکرد برای تیوب‌های غیر مغناطیس

بخش دوم

مصاحبه با دکتر الله کرم

مبینا شادلو

دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران

بخش مصاحبهٔ این شماره از نشریهٔ فراسوی مواد، به گرایش مهندسی خوردگی و آیندهٔ آن پرداخته است. در این بخش نظرات و بیانات یکی از اساتید برجستهٔ این گرایش، پیرامون سوال‌های مطرح‌شده بیان شده است. دکتر سعیدرضا الله کرم، استاد دانشکدهٔ مهندسی متالورژی و مواد پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران در سال ۱۳۵۵ برای ادامهٔ تحصیل به انگلستان عزیمت می‌کند و پس از گذراندن دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا در سال ۱۳۷۳ و بعد از انجام پژوهش‌های پسادکتری در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه امپریال کالج لندن به ایران بازمی‌گردد و در دانشگاه تهران مشغول به فعالیت می‌شود. وی در دوران فعالیت در دانشگاه، مفتخر به کسب افتخارات پژوهشی از قبیل مجری طرح کاربردی نمونهٔ دانشگاه تهران در ۱۳۸۹، پژوهشگر نمونهٔ دانشگاه تهران در سال ۱۳۹۲، پژوهشگر برتر کشور در سال ۱۳۹۳، مجری طرح کاربردی برجستهٔ دانشگاه تهران و پژوهشگر برجستهٔ دانشگاه تهران در سال ۱۳۹۷و چندین افتخارات دیگر از صنایع مختلف و موفق به انجام حدود ۸۲ پروژه پژوهشی و صنعتی شدند. تاکنون ۶ دانشجوی دکتری و حدود ۸۰ کارشناسی ارشد تحت سرپرستی دکتر الله کرم فارغ‌التحصیل شده‌اند و هم‌اکنون نیز ۵ دانشجوی دکترا و ۸ دانشجوی کارشناسی ارشد تحت نظر ایشان مشغول به فعالیت‌های پژوهشی هستند.

سؤال اول/آینده گرایش خوردگی را چگونه ارزیابی می‌کنید؛ چه حوزه‌هایی از این گرایش درحال پیشرفت و توسعه است؟ ورود به چه حوزه‌هایی را به علاقه‌مندان توصیه می‌کنید؟

کشور ایران به دلیل بهره‌مندی از صنایع عظیمی همچون صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، فولاد، مس، صنایع معدنی، صنایع کشتیرانی، هوافضا و صنایع اتمی و نیز خطوط انتقال بسیار گستردهٔ نفت، گاز و آب و همچنین توسعهٔ این صنایع در داخل و خارج از کشور و مخصوصاً در حوزهٔ دریای خزر و خلیج فارس و توسعهٔ مخازن نگهداری مواد هیدروکربنی و استفاده از انواع آلیاژهای زیست‌سازگار به عنوان ایمپلنت‌های داخل بدن در سال‌های اخیر، نیاز روزافزون و مبرم به توسعهٔ همهٔ آموزه‌های علمی و پژوهشی در همهٔ رشته‌ها و فناوری‌ها بالاخص مرتبط با علوم مواد و رشته‌های مرتبط با آن مانند خوردگی و حفاظت را دارند.

بنابراین فعالیت‌های پژوهشی و توسعه در اغلب زیرشاخه‌های این گرایش نظیر پایش و کنترل، سیستم‌های حفاظتی هوشمند، پوشش‌های نوین با ساختار نانو، کامپوزیتی یا خودترمیم، پوشش‌های ایمپلنت‌ها، پوشش‌های سد حرارتی مورداستفاده در توربین‌ها، بویلرها و هوافضا، توسعهٔ روش‌های کنترل خوردگی در بتن‌های مسلح و علاوه بر این‌ها، شبیه‌سازی و استفاده از نرم‌افزارهای مختلف و توسعهٔ آن‌ها می‌توانند از دیگر حوزه‌های در حال پیشرفت محسوب شوند.

سؤال دوم/شرایط بازارکار این

گرایش در ایران چگونه است؟ فارغ‌التحصیلان این گرایش، در ایران بیشتر در چه حوزه‌هایی می‌توانند مشغول به کار شوند؟

به دلایل ذکرشده، از آنجایی که خوردگی از معضلات اساسی صنایع ماست، لذا امکان فعالیت در اکثر صنایع تولیدی، پالایشگاهی و خدماتی برای فارغ‌التحصیلان این گرایش وجود دارد. البته متأسفانه در این چند سال اخیر به واسطهٔ تحریم‌های ظالمانه و رکود صنایع نفت و گاز، شرایط برای جذب نیرو و فعالیت‌های پژوهشی زیاد ایده‌آل نبوده است ولی از طرف دیگر این شرایط این واقعیت را به اثبات می‌رساند که ما باید بیش از پیش، خود را باور داشته و متکی به متخصصین داخلی باشیم. بنابراین من آیندهٔ روشنی را برای بازار کار این گرایش در تمامی حوزه‌های صنعتی می‌بینم.

سوال سوم/اهمیت و بازارکار این گرایش در خارج از کشور به چه صورت است؟ چه کشورهایی در زمینهٔ خوردگی شرایط پیشرفت خوبی دارند؟

خوشبختانه دانشگاه‌های ایران به واسطهٔ در اختیار داشتن شرایط مناسب برای تعلیم دانشجویان مشتاق در این گرایش، در مقایسه با کشورهای منطقه و مخصوصاً کشورهای جنوبی خلیج فارس، از نظر تعلیم و تربیت متخصص خوردگی و حفاظت از مواد در شرایط بسیار خوبی قرار دارد. بیشتر کشورهای جنوب خلیج فارس متکی بر متخصصین خارجی هستند و بسیاری از آن‌ها را متخصصین ایرانی شامل می‌شوند. بنابراین موقعیت کار برای فارغ‌التحصیلان این گرایش در همه جا مهیاست.

سوال چهارم/چه فرصت‌های برای ادامه تحصیل این گرایش، در داخل و خارج از کشور وجود دارد؟

برای ادامهٔ تحصیل نیز دانشجویان شاخص ما همیشه از امکانات بورس و کمک‌هزینه‌های تحصیلی توسط بهترین دانشگاه‌های جهان بهره‌مند بوده‌اند. خوشبختانه در این گرایش آنقدر اعتبار کسب کرده‌ایم که مدارک عالیه و شرایط برای ادامهٔ تحصیل در دانشگاه‌های داخلی بالاخص دانشگاه تهران به عنوان مهد مهندسی کشور نیز برای افراد علاقه‌مند کاملا مهیا است و به جرئت می‌توان گفت که در این زمینه در شرایط بسیار خوبی به سر می‌بریم. شاهد این مدعا هم پروژه‌های ارزشمند و مقالات علمی چاپ شده در نشریات معتبر جهانی است.

سوال پنجم/پیشنهاد شما برای افرادی که برای این گرایش هدف‌گذاری کرده‌اند چیست؟ با یادگیری چه مباحثی یا اتخاذ چه دروس اختیاری خود را از کارشناسی آماده ورود به این گرایش کنند؟

همانطور که اطلاع دارید گرایش خوردگی از دوره‌های کارشناسی ارشد به بالا آغاز می‌شود و تقریبا نسبت به دیگر گرایش‌ها از استقلال بیشتری برخوردار است. زمانی که ما در خارج از کشور تحصیل می‌کردیم خوردگی یک رشتهٔ کاملا مستقل در سطح کارشناسی ارشد بود که ذیل عنوان Corrosion Science and Engineering مطرح بود و از فارغ‌التحصیلان مواد، شیمی و حتی دیگر رشته‌ها دانشجو می‌پذیرفت.

من خودم قبل از ورود به این رشته، دورهٔ کارشناسی فیزیک کاربردی را گذرانده بودم؛ البته بعدها متوجه شدم که ضعف من دروس پایه‌ای متالوژی و مواد، گذراندن دروس رشته خوردگی را برایم قدری مشکل کرده بود اما از آنجایی که رشتهٔ فیزیک یک رشتهٔ مادر است، امکان ادامهٔ تحصیل در رشته‌های مهندسی و حتی پزشکی و پیراپزشکی برایمان وجود داشت؛ به هر جهت در ایران در دوره‌های کارشناسی ما یک درس سه واحدی اجباری خوردگی و اکسیداسیون را داریم که بیشتر سیلابس‌های آن از کتاب بسیار جامع و خوب مهندسی خوردگی که توسط فونتانا، که یکی از پایه‌گذاران این رشته بوده، نوشته شده است. این کتاب در ایران توسط جناب آقای دکتر ساعتچی استاد پیشکسوت خوردگی از دانشگاه صنعتی اصفهان ترجمه شده و در دسترس دانشجویان این گرایش هم هست. همچنین درس اختیاری دو واحدی پوشش‌دهی فلزات نیز زمینهٔ خوبی برای آشنایی دانشجویان علاقه‌مند به این گرایش است. اصولا کلیهٔ دروس پایه برمبنای شیمی، الکتروشیمی و خواص فیزیکی فلزات می‌تواند برای ادامهٔ تحصیل در این گرایش مفید واقع شود. از منابع خوب برای مطالعه دانشجویان علاقه‌مند به گرایش خوردگی می‌توان به کتبی همچون هندبوک دو جلدی خوردگی، که متعلق به شریر است، هندبوک خوردگی یولیک، کتاب دیاگرام‌های اوانس، کتاب حفاظت کاتدی پی بادی که ترجمه‌اش هم در ایران موجود است و نیز کتاب مروری بر علم خوردگی توسط مکافرتی که توسط آقای دکتر پورعلی و اینجانب ترجمه شده است، اشاره کرد.

سوال ششم/تمایز اصلی و ارجحیت گرایش مهندسی خوردگی نسبت به دیگر گرایش‌ها در چیست؟ (از نظر علمی یا مقایسه بازارکار یا هر زمینه‌ای که صلاح می‌دانید)

همانطور که قبلا عرض کردم اصولا گرایش خوردگی به عنوان یک گرایش مجزا و بین رشته‌ای متشکل از رشته‌های مهندسی مواد، متالوژی، شیمی مکانیک و فیزیک است که می‌توان گفت فصل مشترک کمتری با دیگر گرایش‌های مواد داشته و در بیشتر دانشگاه‌ها مثال دانشگاه‌های کشور انگلیس یک رشتهٔ مستقل محسوب و در عین حال بسته به شرایط تدریس این گرایش در دانشگاه‌های کشور یک گرایش کاربردی محسوب می‌شود؛ علاوه بر این پژوهش‌های آن در مرزهای دانش و به روز باعث شده است که قابلیت مقاله‌دهی پروژه‌های خوردگی و مرتبط با آن، موقعیت کاربردی آن بسیار شاخص باشد، در صورتی که ارائه مقالات علمی در ارتباط با پروژه‌های صنعتی معمولا کار ساده‌ای نیست.

مضافا این که به نظر اینجانب نیاز بازار کار به فارغ‌التحصیلان این گرایش در آینده بیش از الان خواهد بود؛ زیرا خوردگی و بازوی مدیریتی آن که ذیل عنوان مدیریت خوردگی در صنایع مطرح است، جایگاه ویژه‌ای برای متخصصین این گرایش فراهم ساخته است؛ که اهداف آن جلوگیری از خسارات جانی و مالی ناشی از خوردگی و نیز اتلاف مواد و آلیاژهایی است که صنعت برای تهیهٔ آن‌ها متحمل هزینه‌های فراوانی شده است. بنابراین مهندسی خوردگی، با افزایش راندمان تولید توأماً میزان سوددهی را نیز افزایش خواهد داد.

سوال هفتم/فضای آکادمیک حاضر، تا چه حدی می‌تواند یک مهندسی خوردگی را آماده کار در صنعت کند؟

خوشبختانه در ایران، فرایندهای علمی و پژوهشی در گرایش خوردگی همگام با کشورهای توسعه یافته پیش‌می‌رود و بسیاری از فارغ التحصیلان این گرایش به راحتی جذب صنایع مختلف می‌شوند. یکی از موضوعاتی که من به دانشجویانم متذکر می‌شوم این است که شما در مقایسه با دانشجویان دانشگاه‌های خارج از کشور نه تنها چیزی کم ندارید، بلکه در برخی موارد به راحتی پیشی می‌گیرد و این موضوع ر از زبان کسی می‌شنوید که تمامی دوران دانشگاهی خود را در دانشگاه‌های مطرح انگلستان گذرانده است؛ شاهد این مدعا حضور افتخارآمیز ایرانیان فارغ‌التحصیل دانشگاه‌های کشور در مراکز علمی و صنعتی دیگر کشورهاست، ولی به نظر اینجانب این افتخار می‌بایست نصیب کشور خودمان شود و ما بتوانیم با کوشش در جذب نیروهای داخلی، زمینه‌های لازم برای پیشرفت روزافزون آن‌ها را در مراکز علمی و صنعتی فراهم سازیم و با جدیت تلاش کنیم تا بتوانیم از انرژی شایان این افراد در جهت بهبود شرایط کشور منتفع شویم.

سوال هشتم/ارتباط بین صنعت و دانشگاه برای این گرایش چه شرایطی را دارد؟ آیا شرایطی همانند علوم و فناوری نانو که در تولید علم جزء رتبه‌های برتر دنیا هستیم ولی در جامعه چندان تاثیری از آن نمی‌بینیم، برای این گرایش نیز وجود دارد؟ اگر شما یکی از مسئولین کشور بودید چه اقدامی برای نزدیک‌تر شدن صنعت و دانشگاه به هم انجام می‌دادید؟

متاسفانه ارتباط بین صنعت و دانشگاه زیاد مساعد نیست و این به دلیل عدم اطمینان و درک متقابل از موقعیت طرفین است؛ معمولا قراردادهای پژوهش‌های صنعتی از طریق اساتید دانشگاه با صنعت منعقد می‌شود و در بسیاری از این طرح‌ها دانشجویان فعال علاقه‌مند درگیر می‌شوند که از مشکلاتی که این پروژه‌ها با آن مواجه هستند این است که بیشتر آنها در حد مطالعات و پژوهش‌های موردی(Case Study) هستند که به واسطهٔ یک معضل صنعتی و جهت حل آن مشکل(Problem Solving) به دانشگاه ارجاع داده شده است؛ بنابراین در بیشتر این پروژه‌ها به دلیل به روز نبودن این مشکلات، امکان ارائه مقالات علمی در سطح ISI از نتایج این طرح‌ها وجود ندارد؛ از طرفی اساتید برای ترفیع و ارتقا و دانشجویان برای ادامهٔ تحصیل در مقاطع بالاتر و یا جذب کار در صنعت و یافتن موقعیت بهتر نیاز به ارائه مقالات در سطح ISI دارند؛ بنابراین این معضلی‌ست که هنوز راه حلی از طرف متولیان آموزش عالی و مدیران ارشد صنایع برای آن ارائه نشده است.

در رابطه با مقالات نانو و کسب رتبه‌های برتر جهانی نیز این مشکل حتی بزرگتر است؛ زیرا در ارتباط با فناوری‌های نانو بیشتر صنایع ما هنوز بیگانه‌اند و از طرفی اکثر پروژه‌های نانو در مرزهای دانش تعریف می‌شود که فصل مشترک آن‌ها با نیازهای فعلی صنایع کشور بسیار نامحسوس است و این یکی از مشکلات اساسی در این موارد

است.
متأسفانه این مشکلات به واسطهٔ عدم توسعهٔ مشابه بین دانشگاه‌ها و صنایع کشور به وجود آمده است. در بیشتر کشورهای توسعه یافته، پروژه‌های دانشگاهی توسط نیاز صنایع آن کشورها هدایت و تأمین بودجه می‌شوند که این امر باعث ایجاد حرکت همسان مراکز علمی و صنعتی می‌شود؛ ولی در کشور ما متأسفانه بودجه‌های پژوهشی صنایع بسیار اندک است و گاهی همان میزان هم هزینه نمی‌شود. در کشورهای توسعه‌یافته ارتباط دانشگاه و صنعت در تمامی حوزه‌ها با حضور قوی‌ترین و کارآمدترین و شاخص‌ترین افراد علمی و صنعتی از هر دو طرف صورت می‌گیرد و همانطور که عرض کردم، صنعت آمادگی ارائه هزینهٔ نیازهای پژوهش‌های مرتبط با اهداف خود را دارد؛ به طوری که یک استاد دانشگاه در کشورهایی نظیر آمریکا، انگلیس ژاپن و غیره، سالیانه چیزی در حد چند صد هزار دلار تا چندین میلیون دلار به عنوان بودجهٔ پژوهشی در اختیار دارد که حداقل چند ده یا چند صد برابر در مقایسه با گرانت پژوهشی ما اساتید در ایران است.
از طرف دیگر یکی از اهرم‌های تامین گرانت در کشور ما، ارائه مقالات علمی است اما در کشورهای خارجی، ملاک توانایی افراد در انجام طرح‌هاست؛ به هر جهت تا زمانی که برنامهٔ اصولی و نگاه‌های نوین در راهبرد پژوهش و ارتباطات صنعتی دانشگاه و احیای اطمینان و همگرایی بین این دو برقرار نشود، تغییر عمده‌ای ایجاد نخواهد شد.
در ارتباط با جذب نیرو، صنایع مختلف در نشست‌ها و همایش‌های سالیانه در دانشگاه‌های خارج از کشور، اقدام به جذب نیروهای مورد نیاز خود می‌کنند؛ به طوری که در این نشست‌ها فرم‌های اولیه توسط دانشجویان مشتاق که در ترم‌های آخر هستند، تکمیل و همچنین تا زمان فارغ‌التحصیلی آنها وضعیت استخدامی‌شان نیز مشخص می‌شود و بدین صورت از اتلاف وقت و زمان بیهوده طرفین به شدت کاسته می‌شود و در واقع استخدام و جذب فارغ‌التحصیلان به صورت کاملا هدفمند انجام می‌گیرد.

سوال نهم/از بین حوزه‌های علمی و کاری گرایش خوردگی، پایش خوردگی را چگونه ارزیابی می‌کنید؟

برای رفع و جلوگیری از معضل خوردگی، شناخت و کسب اطلاعات از آن بسیار اهمیت دارد. پایش یا مانیتورینگ خوردگی یکی از روش‌های کسب اطلاعات از فرایند خوردگی جهت شناخت مکانیسم آن و نهایتا کنترل این پدیدهٔ مخرب است. برای پایش خوردگی روش‌ها و ابزار گوناگون وجود دارد که از روش سادهٔ بازرسی چشمی گرفته تا روش‌های بسیار پیشرفته که نیاز به ابزار خاص و تحلیل‌های حرفه‌ای دارد را شامل می‌شود. بنابراین پایش خوردگی می‌تواند اطلاعات مستمر و دقیقی به صورت آفلاین و یا آنلاین به شما ارائه دهد که در روند کنترل و جلوگیری از خوردگی بسیار مفید خواهد بود. در حال حاضر روش‌های پایش خوردگی بسیار متنوع و توسعه یافته است. ما در دانشگاه تهران در بکارگیری یکی از روش‌های پیشرفته مانیتورینگ تحت عنوان اندازه‌گیری نویز الکتروشیمیایی بسیار موفق بوده‌ایم؛ به طوری که از این روش توانسته‌ایم در بهینه‌سازی میزان تزریق بازدارندهٔ خوردگی در خطوط انتقال گاز در

عسلویه و همچنین پایش خوردگی لوله‌های انتقال آب و گاز در پالایشگاه‌های گاز سرخون و قشم بهره‌مند شویم.
همچنین از دیگر روش‌های پایش، استفاده از سیستم مانیتورینگ جریان‌های سرگردان و کنترل پتانسیل حفاظت کاتدی در خطوط گازرسانی شهری در بعضی از مناطق گازرسانی تهران بوده است که به خوبی از این سیستم بهره‌مند شدیم.

سوال دهم/شرایط علمی و کاری ایران در گرایش علم و مهندسی خوردگی در مقایسه با جهان چگونه است؟ آیا راه زیادی برای رسیدن به جهان درپیش داریم؟

من فکر می‌کنم ما چه به لحاظ پتانسیل علمی و چه به لحاظ پتانسیل کاری شرایط لازم را برای شانه به شانه زدن با کشورهای پیشرفتهٔ جهان در گرایش علم و مهندسی خوردگی داریم و تنها یک میزان تغییر نگرش به لحاظ طرح استراتژی‌های هدفمند بالاخص توسط مدیران ارشد کشور می‌تواند این روند را تسهیل نماید. خوشبختانه ما هم در مقایسه با کیفیت و هم کمیت در این گرایش در میان کشورهای منطقه، پیشرو هستیم و با برنامه‌ریزی صحیح و هدف‌گذاری‌های سالیانه می‌توانیم جایگاه بالایی در میان کشورهای جهان داشته باشیم و این تنها با تکیه بر نیروهای داخلی قابل دستیابی است و در صورت جذب دانشجو از کشورهای منطقه، این فرایند می‌تواند حتی تسریع شود.

سوال یازدهم/چه اقداماتی برای بهتر شدن وضعیت کشور در زمینه خوردگی، صورت گرفته و یا در حال انجام است؟

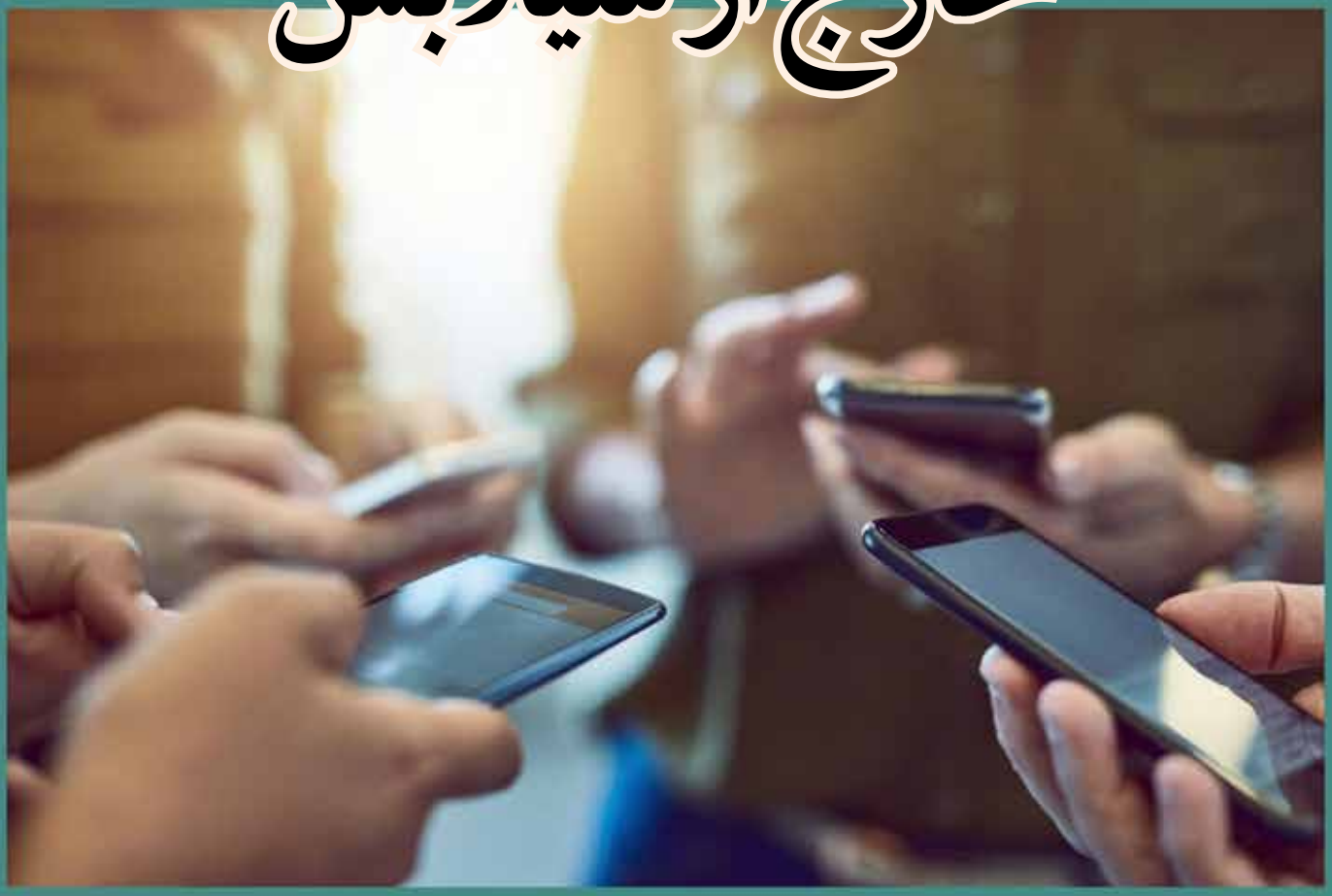
همانطور که قبلا عرض کردم، در سال‌های اخیر شرایط تحریم منابع کسب درآمدهای ما را با مشکل مواجه ساخته است و از امکانات پژوهشی ما تا حد زیادی کاسته است؛ درصورتی که تحریم‌ها می‌بایست زمینه‌ساز فعالیت‌های بیشتر پژوهشی و تحقیقات علمی در زمینهٔ خوردگی باشد. مجددا تاکید می‌کنم که تعیین اقدامات راهبردی در پیوند استراتژی علمی و پژوهشی دانشگاه و صنعت موثرترین فرایند بهینه‌سازی توسعه در زمینهٔ خوردگی است؛ به طوری که موقعیت و شرایط ما را به سمت کمال و یافتن جایگاه واقعی در جهان پیش خواهد برد.

در انتها، خیلی ممنون از وقتی که در اختیار ما قرار دادید؛ چنانچه نکته یا پرسشی هست که از نگاه ما جا مانده، خواهشمندیم بفرمایید.

من تشکر ویژه دارم از شما عزیزان که وقت و انرژی خودتان را در این اقدام شایسته گذاشته‌اید؛ امیدوارم ما اساتید نیز متقابلاً شایستگی داشته باشیم که به نیازهای علمی و فرهنگی و تحقیقاتی شما دانشجویان عزیز پاسخگو باشیم. حضور ما و شما در دانشگاه لازم و ملزوم است و این درک متقابل بایستی هر یک از ما را در انجام وظایفمان راسخ‌تر کند تا بتوانیم در راستای موفقیت کشور عزیزمان کوشا باشیم. من از شما کمال تشکر را دارم و از اینکه این وقت را در اختیار من گذاشتید بی‌نهایت سپاسگزارم و از خداوند متعال سربلندی و سرافرازی شما دانشجویان عزیز را آرزومندم.

بخش سوم

خارج از سیلابس



محدثه احمدی

دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران

مهدی پناهی

دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران

کار عمیق!

در این بخش قصد داریم به معرفی یک کتاب مفید و کاربردی به نام کار عمیق[1] بپردازیم؛ اما برای معرفی این کتاب، بهتر است ابتدا تعریف نویسنده کتاب را از کار عمیق بدانیم. نویسندهٔ این کتاب، کار عمیق را به فعالیت‌های حرفه‌ای انجام‌شده در حالت تمرکز کامل و بدون حواس‌پرتی، که توانایی‌های شناختی ما را به حداکثر می‌رساند اختصاص می‌دهد؛ از همین جهت کار عمیق ارزش‌آفرین است، مهارت‌های ما را بهبود می‌بخشد و انجام آن برای غیر، دشوار است؛ یعنی اگر یک شخص غیرمتخصص را جای شما بگذاریم(فرض می‌کنیم که شما متخصصید، مثلا) احتیاج به‌صرف زمان و انرژی قابل‌توجهی احساس می‌شود تا این فرد آموزش دیده و بتواند کار شما را به خوبی خودتان انجام بدهد.
نویسنده این کتاب، جناب کال نیوپورت[2] (که بزرگوار در نوع خود، اسم و فامیل جالبی هم دارد Cal Newport)، استاد رشته علوم کامپیوتر در دانشگاه جرج تاون است که درزمینهٔ تعامل فرهنگ و فنّاوری نیز تحقیق می‌کند و کار عمیق معروف‌ترین اثر بزرگوار و ازقضای روزگار کتاب پرفروش «مینیمالیسم دیجیتال» هم از آثار همین نویسنده است.
نویسنده در اواسط این کتاب بار ها تکرار می‌کند که مخالف تکنولوژی و شبکه‌های اجتماعی نیست و اصلاً نمی‌خواهد که این بحث را در این کتاب شرح بدهد اما ردپای تفکر ضد تکنولوژی‌اش در بعضی از نوشته‌های این کتاب و شیوه زندگی شخصی‌اش[3] کاملاً دیده می‌شود و البته که مثل تمام نویسنده‌های دیگر اینجور کتاب‌ها یک ted talk معروف از ایشون وجود دارد که در این ted talk، توضیح دادند که چه دلایلی وجود دارد که ما به خاطر آن‌ها می‌توانیم عضویت در شبکه‌های اجتماعی رو متوقف کنیم. پس اگر از عاشقان سینه‌چاک شبکه‌های اجتماعی هستید احتمالاً خیلی از مطالب کتاب به مذاق شما خوش نخواهد آمد.
در قسمت مقدمه، نویسندهٔ این کتاب توضیح می‌دهد که با مشاهده زندگی افراد موفقی مثل کارل یونگ (فیلسوف روان‌پزشک و نظریه‌پرداز علم روانشناسی)، جی کی رولینگ[4] ، وودی آلن، بیل گیتس و استیو جابز و... متوجه نقش غیرقابل‌انکار کار عمیق در موفقیت‌های این افراد و به‌طور مثال مفاهیمی به اسم هفته تفکر[5] در زندگی‌هایشان شده است.
در حقیقت نویسندهٔ این کتاب عصر حاضر را عصر اقتصاد اطلاعاتی می‌بیند و عقیده دارد که برای مطرح بودن در این روزگار باید هنر یادگیری مطالب پیچیده را با سرعت بالا و در کمترین زمان ممکن و توانایی تولید در سطح ممتاز ازنظر کیفیت و سرعت را داشته باشیم؛ به عبارتی نویسنده معتقد است که متوسط بودن در عصر حاضر شما را دچار مشکلی می‌کند که در حقیقت انگار نیستید؛ زیرا پیدا کردن جایگزین بهتر با وجود اینترنت و راه‌های ارتباطی برای مخاطبان شما بسیار سهل شده است، پس برای رسیدن به موفقیت باید عالی‌ترین چیزهایی که می‌توانید را تولید کرده و این امر مهم مستلزم انجام دادن کار عمیق است.(البته اینجا باید حواسمون باشه که در چاه کمال‌گرایی منفی نیوفتیم)۳
آقای نیوپورت در قسمت مقدمه فرضیه‌شون رو در مورد کار عمیق می‌گویند که کار عمیق در حال کمیاب شدن است و هم‌زمان با

[1] Deep Work
[2] Cal Newport

[3] یعنی همون تخت خواب و مسواک و اینا که ما کلاً همشونو با گوشی تجربه می‌کنیم
[4] اینم اگه نمی‌دونید نویسنده هری پاتره
[5] این کلمه رو دقیقاً به این خاطر در متن آوردیم که نسبت بهش کنجکاو شید و یا برید سراغ اینستای نشریه و یا حتی بهتر از این برید و کتاب رو بخونید:)))

آن، در حال ارزشمند شدن. درنتیجه افراد کمی که توانایی انجام کار عمیق را در خود پرورش می‌دهند و آن را محور اصلی زندگی کاری خود قرار می‌دهند، پیشرفت خواهند کرد. در ادامه این کتاب به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود که در بخش اول آقای کال تمام تلاشش را می‌کند تا مخاطب را متقاعد کند که فرضیه‌ای که ارائه شده کاملاً درست است و در بخش دوم با فرض اینکه شما قبول کرده‌اید که این فرضیه درست است (وقتی شروع کردید به خوندن بخش دوم پس یعنی احتمالاً درستی فرضیه رو پذیرفتین، یا شاید هم کلاً نپذیرفتید و همین‌جوری برا خودتون می‌خونید) راهکارهایی رو برای پرورش کار عمیق ارائه می‌دهد.

در فصل اول، نویسنده سراغ اثبات علمی فرضیه خود رفته و بیان می‌کند که مهارت‌های ما چه فکری و چه فیزیکی درنهایت به مدارهای مغزی ما مربوط می‌شوند و هم‌زمان با تمرکز به مدت طولانی روی یک مهارت و پیشرفت در آن لایه‌ای از چربی اطراف نورون‌های مرتبط با این فعالیت در مغز ما ایجاد می‌شود و باعث تقویت آن می‌شوند. به عبارتی، عالی بودن در مهارتی به معنای خوب بودن لایه‌های چربی عصب مربوط به آن است. وجود کارهایی که مانع از تمرکز عمیق شما می‌شوند مثل نوتیفیکیشن‌های تلگرام و توییتر و یا هر درد بی‌درمان دیگری باعث فعال شدن تعداد زیادی مدار عصبی شده و در این حالت لایه‌های چربی چندین نورون به‌طور هم‌زمان در حال افزایش خواهد بود، درنتیجه نورون‌های مربوط به کاری که می‌خواهید در آن پیشرفت کنید به مقدار کافی تقویت نخواهند شد لذا این امر تخریب‌گر تمرکز شماست.

به‌زعم نویسنده متأسفانه یا خوشبختانه ما در دوره تکنوپولی قرارگرفته‌ایم –دوره تسلط فنّاوری بر فرهنگ– و در این عصر، کار عمیق در وضعیت نامساعدی قرار دارد؛ زیرا کار عمیق بر ارزش‌هایی نظیر کیفیت، مهارت و تسلط استوار است که کاملاً کهنه شده و مغایر با تکنولوژیکی به حساب می‌آیند. در این کتاب نویسنده آهنگری را مثال میزند که احتمالاً به‌عنوان یک متالورژ (استثنائا اینجا یکی به ما متالورژها توجه کرده، دمشم گرم)، سنتی بودن کارش نظر شما را جلب می‌کند و نویسنده نیز با استفاده از توصیف کار آهنگر ثابت می‌کند که کار عمیق هدفمند است و هدفمند بودن در زندگی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای حس خوشبختی و رضایت است؛ یعنی به‌طور مثال توجه مداوم به شبکه‌های اجتماعی به دلیل دزدیدن حس هدفمندی شما، باعث ایجاد نارضایتی در زندگی‌تان خواهد شد. در اصل، کار عمیق یعنی خودمان انتخاب کنیم که توجهمان خرج چه موضوعی بشود و همین مانع از توجه ما به مسائل کوچک و ناخوشایندی شود که به‌طور مداوم و اجتناب‌ناپذیر در زندگی ما وجود دارند.

بعد از پایان این بخش با فرض پذیرفتن فرضیه کار عمیق احتیاج دارید تا راه‌کارهایی برای پرورش این مهارت آموخته و قوانینی برای خودتان در جهت متمرکزتر شدن وضع کنید؛ زیرا احتمالاً شما هم به دلیل استفاده مداوم از شبکه‌های اجتماعی توانایی خود را برای انجام کار عمیق به‌شدت کاهش داده‌اید و به همین علت در آغاز راه، در بهترین حالت حداکثر یک ساعت در

روز می‌توانید کار عمیق انجام دهید؛ اما با گذشت زمان این میزان می‌تواند به ۴ تا ۵ ساعت در روز نیز برسد.
قبل از اینکه سراغ بخش دوم کتاب برویم باید گفت که نویسندهٔ کتاب بعضی از مطالب را در این کتاب چندین مرتبه تکرار می‌کند و شاید این یکی از جنبه‌های منفی این کتاب برای شما باشد؛ اما به‌هرحال باعث خواهد شد که مطالب مهم کاملاً در ذهن شما بنشیند.
احتمالاً اگر شما کتاب عادت‌های اتمی یا کتاب‌های مدیریت زمان را خوانده باشید با این مفهوم زیاد مواجه شده‌اید که ما نیروی ارادهٔ محدودی داریم و عملکرد نیروی اراده ما کاملاً مشابه ماهیچه‌های بدنمان شکل گرفته است، پس نمی‌توانیم کل روزمان را برای تمرکز عمیق و مانع‌شدن از «حواس‌پرت‌کن»ها[۶] از اراده‌مان خرج کنیم؛ پس برای حفظ حالت تمرکز، باید برخی از کارها را تبدیل به عادت کنیم تا نیاز به استفاده بیش‌ازحد از نیروی اراده‌مان را نداشته باشیم، نیوپورت در فصل دوم قوانین و روش‌هایی برای رعایت این قوانین را ارائه می‌دهد؛ روش‌هایی که ممکن است فقط بعضی از آن‌ها مناسب ما باشند و هرکسی بایستی بسته به شخصیت خود، روش مناسب خود را برای پرورش این عادت‌ها و حفظ تمرکز پیدا کند.
طبق گفتارهای کتاب چهار روش برای عمیق بودن و مقابله با حواس‌پرت‌کن‌ها[۶] وجود دارند؛
اول؛ روش رهبانی، این مدل از انسان‌ها به‌طورکلی با تکنولوژی قهرند و اصولاً اعتقادی به استفاده از تکنولوژی ندارند(انصافاً مدل مؤثر ولی طاقت فرساییه!).

دوم؛ روش Bimodal است، این دسته یک یا دو روز در هفته یا یک هفته در ماه یا در سال روزه تکنولوژی می‌گیرند. مانند هفته تفکر بیل گیتس...!
سوم و چهارم؛ روش روزنامه‌نگاری و ریتمیک است(که برای توضیحش بهتره بروید و کتاب و بخوانید این قرار بود خلاصه کتاب باشه نه کل کتاب که!)
بعدازآن کتاب سراغ اولین قانون در بخش دو می‌رود که لازم است برای خودتان وضع کنید اولین قانون عمیق کار کردن و تصمیم‌گیری در مورد روش این کار است و روش‌هایی مانند روش 4DX برای عمل به این قانون. روش‌های دیگری نیز برای عمیق بودن وجود دارد که در ادامه به بعضی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.
• اولین و جذاب‌ترین مورد گفته‌شده در این بخش برای من روش تنبل بودن بود :) که البته بیشتر مقصود نویسنده این است که در وقت کار، کار کنید و در وقت استراحت، استراحت. چیزی که دقیقاً خلاف عادت خیلی از ما ایرانی‌هاست. اصلاً از همین اخلاق‌هایمان بود که ضرب‌المثل حسنی به مکتب نمی‌رفت وقتی می‌رفت جمعه می‌رفت به وجود آمده است.
• مورد بعدی این است که وقتی پنج دقیقه زمان اضافه بین کارها دارید بلافاصله سراغ شبکه‌های اجتماعی نروید، چون این موارد تمرکز شما را برای مدت‌زمان بیشتری ازآنچه شما خیال می‌کنید از بین می‌برند و به‌سختی می‌توانید روی موضوع دیگری که بعدازآن به سراغش می‌روید عمیق شوید، لذا توصیه کتاب این است که قانونی وضع کنید که فقط در ساعات خاصی پیام‌ها و ایمیل‌ها را چک کنید.

[۶](distractions)

به‌طور مثال از ساعت ۱۰ تا ۱۱ صبح، و دیگر خارج از آن زمان مجاز به مراجعه به شبکه‌های اجتماعی نخواهید بود. حتی اگر زمان اضافه داشته باشید.

• یک دسته کارت حافظه را به خاطر بسپارید(تکنیکی که نویسنده برای حفظ کردن کارت‌ها توصیه می‌کند احتمالاً شما را یاد شرلوک هولمز بندازه)

• خیلی ساده؛ رسانه‌های اجتماعی رو ترک کنید؛ حداقل ۳۰ روز از شبکه‌های اجتماعی خارج شده و بعد از ۳۰ روز از خودتان دو سؤال بپرسید:

۱. اگر می‌توانستید در این ۳۰ روز از شبکه‌های اجتماعی استفاده کنید روزهایتان به‌طور قابل توجهی ازلحاظ کیفی بهتر بود؟

۲. آیا برای مخاطبانتان اهمیت داشت که از این رسانه استفاده نمی‌کردید؟

اگر پاسخ شما به هردوی این سؤال‌ها خیر بود برای همیشه با شبکه‌های اجتماعی خداحافظی کنید؛ زیرا اگر به‌طور نامحدود استفاده شوند، تمام تلاش ما برای انجام کار عمیق را نابود خواهند کرد و مقاومت ما در برابر حواس‌پرتی را از بین می‌برند.

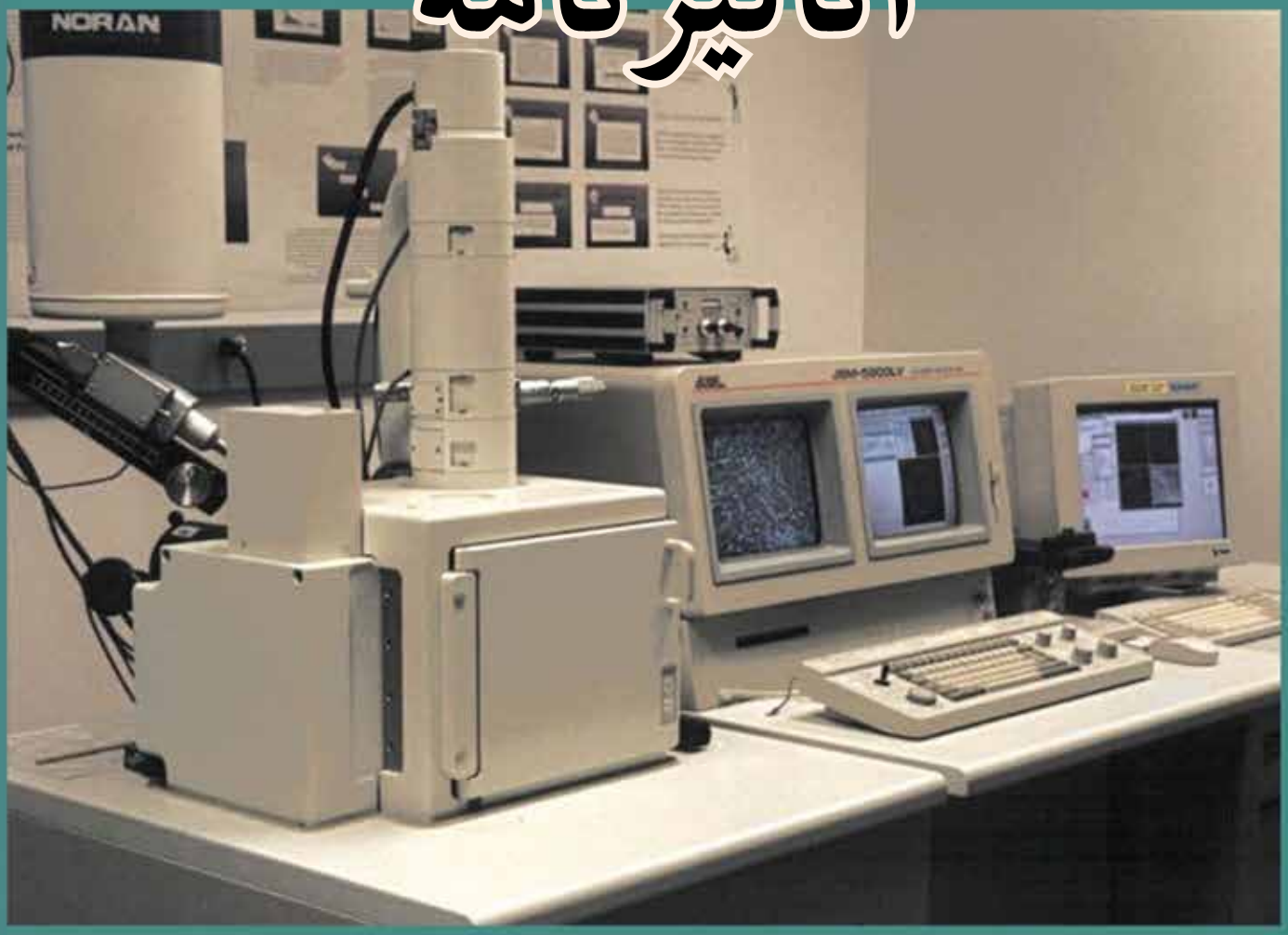
در میانه بخش چهارم کتاب احتمالاً متوجه پاسخ این سؤال جذاب خواهید شد که چرا معمولاً وقتی برای یک امتحان زمان کمی داریم نتیجه بهتری کسب می‌کنیم و در امتحاناتی با فرجه‌های طولانی اتلاف وقت بیشتری داریم.(البته این قسمت اصلاً قرار نیست سنت دو تا یا بعضاً سه تا امتحان در یک روز که در دانشکده ما خیلی باب هست را توجیه یا تأیید بکند اتفاقاً برعکس، تمرکز ما را به دو قسمت تقسیم می‌کند و تقریباً مفهوم کار عمیق را از پایه و اساس نابود می‌کند؛ برای تفصیل و اثبات این فرضیه بهتر است به کتاب مراجعه کنید. این بخش را اگر توانستید به محضر مسببین امر برسانید شاید به خود لرزیدند!)

تا اینجا نیز خلاصه مبسوطی از کتاب خدمت شما ارائه شد؛ ترجمه این کتاب خیلی عالی نیست و احتمالاً از خواندن این کتاب به زبان اصلی بیشتر لذت ببرید اما ترجمه فارسی هم حق مطلب را ادا می‌کند؛ پس اگر بعد از خواندن این خلاصه، به مبحث کار عمیق علاقه‌مند شدید برای توضیحات کامل و راهکارهایی بیشتر ازآنچه گفته شد توصیه می‌کنیم بروید و کتاب را خریداری کنید و بخوانید، بعضی از راهکارهای داخل کتاب را هم از طریق اینستاگرام نشریه در آینده مفصل‌تر توضیح می‌دهیم و بیشتر در مورد نویسنده این کتاب بحث خواهیم کرد، پس اگر شما جزوه دسته‌ای نیستید که از روش رهبانی استفاده می‌کنید لطفاً اینستاگرام نشریه را دنبال کنید.

در پایان امیدوارم که توانسته باشیم شما را به خواندن این کتاب علاقه‌مند کنیم و این مطالب برای شما مفید واقع شود!

بخش چهارم

آنالیز نامه



ثریا برنای زنوزی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی پژوهشکده مواد و انرژی

فرزانه زمانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی پژوهشکده مواد و انرژی

نشریهٔ فراسوی مواد در یکی از ویژه‌نامه‌های خود، به طور خاصی به موضوع روش‌های آنالیز مواد پرداخت؛ اما اهمیت آنالیز مواد و بررسی ساختار مواد بر هیچ مهندس موادی پوشیده نیست و بررسی ساختار مواد یکی از مهم‌ترین مواردی است که در همهٔ موضوعات و مباحث مهندسی و علم مواد وجود دارد. شما را به مطالعهٔ مقاله‌ای درمورد میکروسکوپ الکترونی روبشی، از پرکاربردترین و مهم‌ترین ابزار آنالیز مواد دعوت می‌کنیم.

میکروسکوپ الکترونی روبشی[۱] یا به‌اختصار SEM از روش‌های پرکاربرد میکروسکوپی برای مطالعه ساختار نمونه‌های حجیم در سطح یا نزدیکی سطح و تصویربرداری، برای نمونه‌های نازک و فرا نازک محسوب می‌شود که به دلیل استفاده از پرتوی الکترونی در آن، توان تفکیک بسیار خوبی قابل‌دستیابی است [۱]. اساس عملکرد آن، برهمکنش پرتو الکترونی با ماده است که نشر الکترون‌ها و فوتون‌ها از ماده را به همراه دارد. ازجمله مهم‌ترین این پرتوها که برای بررسی ماده استفاده می‌شوند، الکترون‌های ثانویه[۲] (برای بررسی ریخت‌شناسی[۳] و فراز و نشیب[۴] سطح)، الکترون‌های برگشتی[۵] (با هدف بررسی توزیع فازی) و اثر تابش کاتدی[۶] می‌باشند. این میکروسکوپ علاوه بر تهیه تصاویر بزرگنمایی شده، درصورتی‌که به تجهیزات اضافی مجهز شود می‌تواند برای آنالیز شیمیایی و دیگر بررسی‌ها نیز به کار گرفته شود. در این میکروسکوپ، نمونه آزمون، خیلی کم از باریکه الکترونی تأثیر می‌پذیرد و محدودیت توان تفکیک در حدود صد نانومتر است. این ویژگی در بررسی مدارهای یکپارچه و در زمینه‌های دیگر، همچون زیست‌شناسی مهم است [۲].

در میکروسکوپ الکترونی روبشی منبع الکترونی (تفنگ الکترونی) در بیشتر موارد از نوع رشته تنگستنی است. به‌طورمعمول، الکترون‌ها بین ۱ تا ۳۰ الکترون‌ولت شتاب داده می‌شوند، سپس دو یا سه عدسی متمرکز کننده پرتو الکترونی را کوچک می‌کنند، تا حدی که در موقع برخورد با نمونه، قطر آن (به‌طور تقریب) بین ۲ تا ۱۰ نانومتر است. سپس مجموعه‌ای از دستگاه‌های مشاهداتی و الکترونیکی برای پردازش تپ‌های[۷] الکتریکی دریافتی و ارائه آن‌ها به‌صورت تصویر، عکس و طیف نیز به کار می‌روند [۱].

[۱] Scanning Electron Microscope
[۲] Secondary Electrons
[۳] Morphology
[۴] Topography
[۵] Back Scattered Electrons
[۶] Cathodeluminesence
[۷] Pulse

کاربردهای دستگاه SEM

ازSEM می‌توان در موارد ذیل استفاده نمود [۳]:

أ. گرفتن تصویر فراز و نشیب سطح نمونه در بزرگنمایی ۱۰ تا ۱۰۵ برابر، با قدرت تفکیکی در حدود ۳ تا ۱۰۰ نانومتر (بسته به نمونه).

ب. مشاهده مرزدانه‌ها در نمونه‌های سونش شده و مشاهده حوزه‌ها[۸] در مواد فرومغناطیس.

ج. ارزیابی جهت بلورشناسی اجزایی نظیر دانه‌ها، فازهای رسوبی و دندریت‌ها بر روی سطوح آماده‌شده به‌منظور مطالعات بلورشناسی.

د. تصویر نمودن فاز دوم روی سطوح سونش نشده، البته درصورتی‌که متوسط عدد اتمی فاز دوم متفاوت از زمینه باشد.

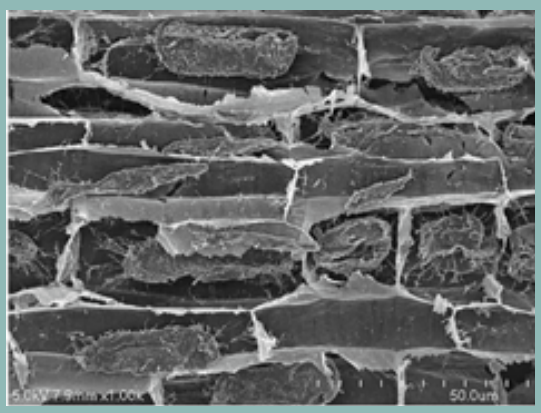
ه. بررسی نمونه‌هایی که برای متالوگرافی آماده شده‌اند، در بزرگنمایی بسیار بیشتر از میکروسکوپ نوری.

و. شناسایی مشخصات شیمیایی اجزایی به کوچکی چند میکرون روی سطح نمونه‌ها برای مثال آخال‌ها و فازهای رسوبی.

ز. همچنین می‌توان از میکروسکوپ‌های الکترونی برای کنترل کیفیت و بررسی عیوب قطعات نیمه‌هادی استفاده نمود [۳].

تصاویر فراز و نشیب سطح به کمک SEM

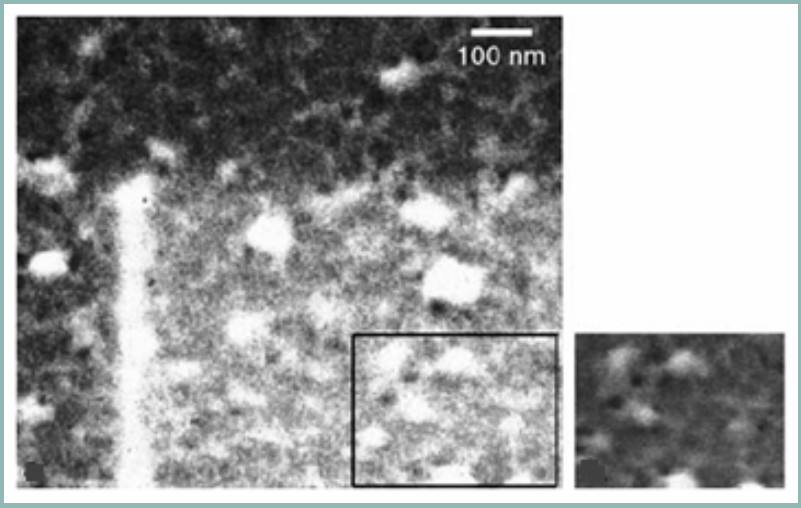
یکی از کاربردهای اصلی SEM، مطالعه ویژگی‌های سطحی نمونه یا فراز و نشیب سطح آن است. برای این منظور، الکترون‌های ثانویه و برگشتی در نظر گرفته شده است. تصاویر فراز و نشیب سطح که با استفاده از الکترون‌های ثانویه به دست می‌آیند، نظیر شکل ۱، شباهت زیادی به تصاویری دارند که در نور مستقیم دیده می‌شوند. الکترون‌های ثانویه، الکترون‌های اتم‌های نمونه می‌باشند که در اثر برهم‌کنش با الکترون‌های اولیه موجود در باریکه الکترونی، به خارج پرتاب می‌شوند. این الکترون‌ها فقط می‌توانند از منطقه‌های کم‌عمق نمونه و نزدیک به سطح آن خارج شوند [۳]. در شکل ۱ تصویر فراز و نشیب سطحی در ریشه نوعی گیاه نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر فراز و نشیب سطح با الکترون ثانویه توسط SEM از ریشه نوعی گیاه [٤].

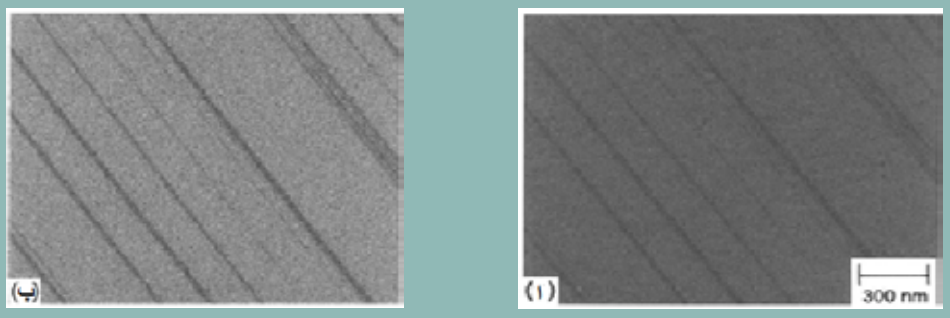
[۸] Domains

الکترون‌هـای برگشـتی، آن دسـته از الکترون‌هایـی هسـتند کـه از عمـق بیشـتری گسـیل می‌شـوند. ایـن الکترون‌هـا بـه دلیـل برخـورد کشسـان چندبـاره بـا اتم‌هـای هـدف، بـه خـارج پراکنـده می‌شـوند. انـرژی ایـن الکترون‌هـا زیـاد اسـت. درواقـع، تبایـن[۹] موجـود در تصاویـر به‌دسـت‌آمده از الکترون‌هـای برگشـتی، ناشـی از اختـلاف در عـدد اتمـی اسـت. هسـته‌های سـنگین الکترون‌هـای بیشـتری را پراکنـده می‌کننـد و درنتیجـه روشـن‌تر بـه نظـر می‌رسـند [۳]. شـکل۲ تصویـر فـراز و نشـیب سـطح بـا الکتـرون برگشـتی توسـط SEM را نشـان می‌دهـد [۴].



شکل ۲- تصویر فراز و نشیب سطح با الکترون برگشتی توسط SEM [٤].

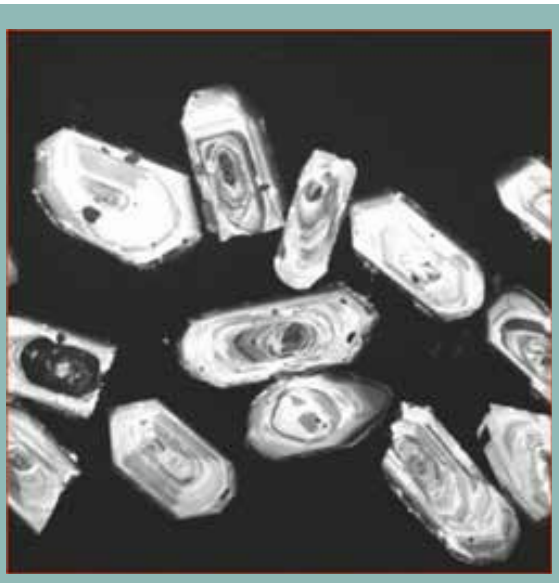
شـکل ۳ تصاویـر فـراز و نشـیب سـطح از نوارهـای دوقلویـی مکانیکـی بـا الکتـرون برگشـتی و الکتـرون ثانویـه، کـه توسـط SEM گرفتـه شـده‌اند را باهـم مقایسـه می‌کنـد.



شکل۳- مقایسه تصاویر فراز و نشیب سطح از نوارهای دوقلویی مکانیکی، در دو حالت: تصویرگیری با (ا) الکترون ثانویه و (ب) الکترون برگشتی توسط SEM [٥].

مـواد بسـیاری در زیـر بمبـاران الکترونـی، نـور منتشـر می‌کننـد و اگـر ایـن نـور آشـکار شـود، می‌تـوان تصویـر را در حالـت CL نمایـش داد؛ CL در مـواد پلیمـری و زیسـتی هـم مشـاهده می‌شـود [۶]. درواقـع اطلاعاتـی کـه از CL دریافـت می‌کنیـم، تشـخیص فازهـای غیرفلـزی و نیمه‌هـادی اسـت کـه بـرای مـواد فلـزی به‌نـدرت بـه کار مـی‌رود [۱]. شـکل ۴ تابـش کاتـدی در بلورهـای زیرکـون را نشـان می‌دهـد [۷].

[۹]Contrast



شکل٤-تابش کاتدی در بلورهای زیرکون [۷].

آنالیز شیمیایی در SEM

در میکروسکوپ‌های الکترونی روش‌های مختلفی برای ارائه نتایج آنالیز کیفی به‌دست‌آمده از نمونه‌های مناسب وجود دارد. روش مناسب بسته به اینکه چه نوع اطلاعاتی موردنیاز است، انتخاب می‌شود. این روش‌ها عبارت‌اند از [۲]:

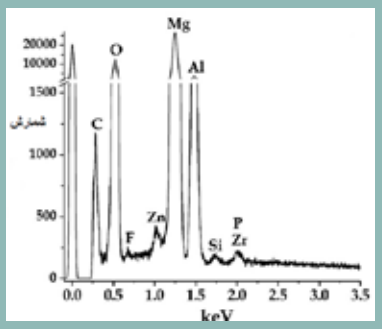
أ. آنالیز یک ناحیه خاص با ترکیب شیمیایی همگن نظیر یک فاز.

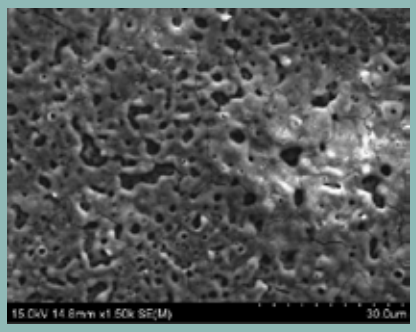
ب. آنالیز کلی تمام یا قسمتی از نمونه.

ج. آنالیز برای تعیین ترکیب شیمیایی در یک ناحیه از نمونه.

نوع اول آنالیز، با انتخاب نقطه‌ای از تصویر بر روی صفحهٔ نمایش SEM و تمرکز و ثابت کردن پرتو الکترونی بر روی نقطه مربوط بر روی نمونه انجام می‌شود که آنالیز نقطه‌ای[۱۰] نامیده می‌شود. نوع دوم آنالیز شیمیایی، به دست آوردن داده‌ها از ناحیه بزرگ‌تری از نمونه است. اندازه این ناحیه به میزان همگنی شیمیایی نمونه بستگی دارد. آنالیز شیمیایی عناصر در میکروسکوپ الکترونی به دو صورت EDX[۱۱] و WDX[۱۲] انجام می‌گیرد. برای سیستم EDX فقط نیاز به روبش پرتو الکترونی، بر روی سطح موردنظر، در حین آشکارسازی پرتو x است. در این صورت، آنالیز شیمیایی، نماینده متوسط ترکیب شیمیایی ناحیه روی صفحهٔ نمایش است. اما این کار برای سیستم WDX امکان‌پذیر نیست. EDX عناصر را از عدد اتمی ۱۱ به بالا، با دقت ۰/۱ درصد شناسایی می‌کند. شکل ۵ تصویر SEM از ساختار متخلخل اکسید منیزیم و طیف EDX آن را نمایش می‌دهد. در سیستم WDX، عناصر از طریق پدیده پراش پرتو x و بر اساس رابطه براگ و شمارش فوتون‌ها توسط شمارنده گازی[۱۳] شناسایی می‌شوند. WDX با دقتی حداکثر در حدود ۰/۰۱ درصد، عناصر را شناسایی می‌کند [۲].

[۱۰] Spot Analysis
[۱۱] Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
[۱۲] Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy
[۱۳] (Flow Proportional Counter (FPC





شکل۵- الف) تصویر SEM و ب) طیف EDX از ساختار متخلخل اکسید منیزیم [۲ و ۷]

روش دیگر نمایش اطلاعات در مورد توزیع یک عنصر، نقشه پرتو x نامیده می‌شود. در این روش، شمارنده، همانند سایر روش‌های آشکارسازی SEM کار می‌کند. در ساده‌ترین حالت، هر زمان که یک فوتون پرتو x شمارش می‌شود، تصویر روشن می‌شود. در حقیقت، تصویر متشکل از همین نقاط روشن است. چگالی این نقاط، غلظت عنصر موردنظر را به‌صورت کیفی و تصویر نقطه‌ای[۱۴] نشان می‌دهد [۱].

از دستگاه SEM می‌توان برای مطالعه ساختاری دانه‌ها و مرزدانه‌های توسعه‌یافته در فلزات و سایر مواد بلوری نیز استفاده نمود [۲].

نحوه رفع عیوب تصویری ایجادشده در SEM

عیوب موجود در حین تصویرگیری دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی شامل موارد زیر است [۱۲]:

۱. پایین بودن وضوح و کیفیت تصویر
۲. تصویر متحرک و ناپایدار
۳. تصویر نویزدار[۱۵]
۴. تصویری با لبه‌های دندانه‌دار
۵. وجود تباین غیرمعمول در تصویر
۶. تصویر اعوجاج یافته

در حین کار با دستگاه ممکن است انواع مختلفی از عیوب تصویری به وجود آید. به‌طورکلی عیوب تصویری یا به شکل نقص در ابزار موجود پدیدار می‌شود و یا بخش عمده آن مربوط به تجربه کاربر، عدم آماده‌سازی صحیح و یا عوامل محیطی است [۱۲].

عوامل مؤثر بر کیفیت تصویر SEM عبارت‌اند از [۱۲]:

۱. تأثیر برهم‌کنش الکترون‌ها و نمونه روی کیفیت تصاویر
۲. تأثیر عوامل محیطی
۳. خطاهای ابزاری

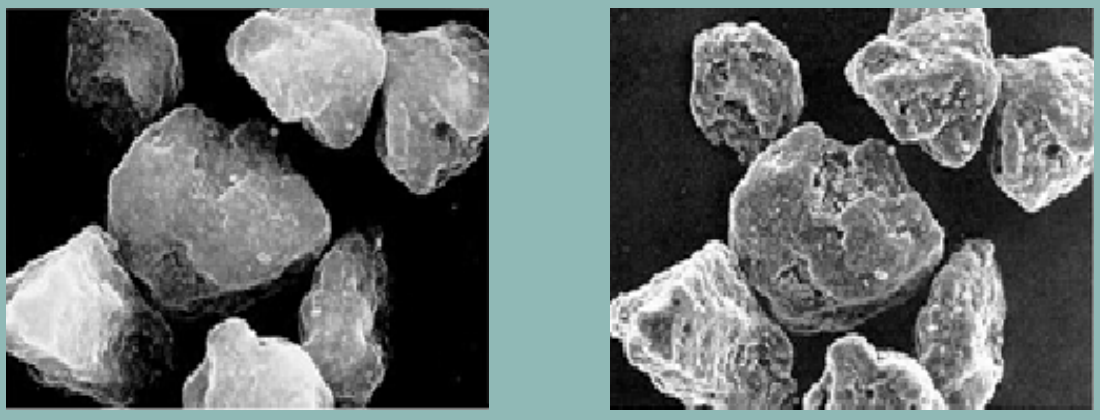
به‌طورکلی هرچقدر ولتاژ شتاب‌دهنده بیشتر شود، قطر باریکه الکترونی کوچک‌تر می‌شود. اما افزایش ولتاژ هم به نوبهٔ خود سبب اختلالاتی چون از بین رفتن جزئیات سطحی

[۱۴] Dot Maps
[۱۵] Noisy Image

نمونه، وجود اثر لبه، احتمال شارژ بیشتر و در تعاقب، تخریب نمونه می‌شود. بنابراین ولتاژ انتخابی بستگی به نوع و جنس نمونه و تا حدی به بزرگنمایی موردنظر دارد. به‌طورکلی در میکروسکوپ الکترونی روبشی، برای تصویرگیری از ساختارهای سطحی ظریف‌تر، از ولتاژ شتاب‌دهنده پایین‌تر استفاده می‌شود. در ولتاژ شتاب‌دهنده بالاتر، ناحیه نفوذ بزرگ‌تر شده و سیگنال‌های اضافی و غیرضروری از نمونه همچون الکترون‌های برگشتی بیشتر می‌شوند (جدول ۱) (شکل ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰).

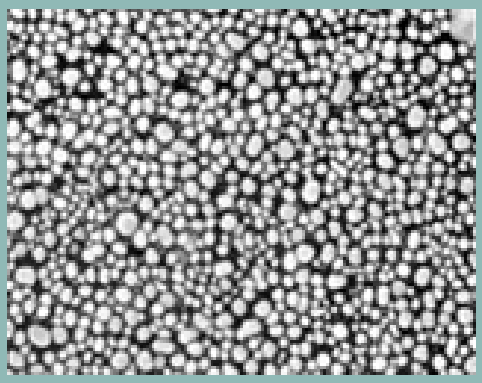
مشخصه مربوط به کیفیت تصویر	ولتاژ شتاب‌دهنده پایین ← ولتاژ شتاب‌دهنده بالا	
اطلاعات ریخت‌شناسی	جزییات سطح نمونه	جزییات لایه زیرین سطح نمونه
تفکیک‌پذیری	کم	زیاد
تخریب نمونه	کم	زیاد
آلودگی سطحی	به‌راحتی قابل‌مشاهده است	به‌راحتی قابل‌مشاهده نیست
شارژ الکتریکی	کم	زیاد
تباین	زیاد	کم

جدول ۱- رابطه بین ولتاژ شتاب‌دهنده و تصاویر SEM [۹]

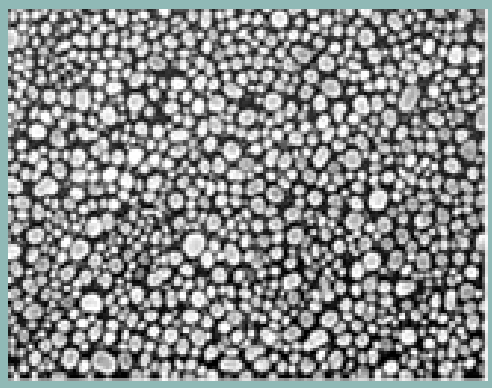


الف ب

شکل ۶- اثر ولتاژ شتاب‌دهنده بر تصویر در بزرگنمایی یکسان ۲۵۰۰ برابر الف) در ولتاژ پایین (۵کیلوولت) ریزساختارهای سطحی قابل‌مشاهده‌اند ب)در ولتاژ بالا (۳۰کیلوولت) مشاهده ساختارهای سطحی مقدور نیست و سطح نمونه شارژ دارد [۹].

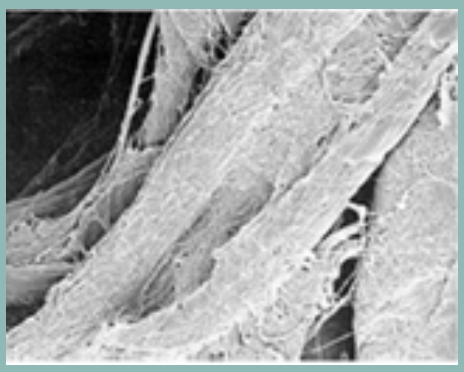


الف

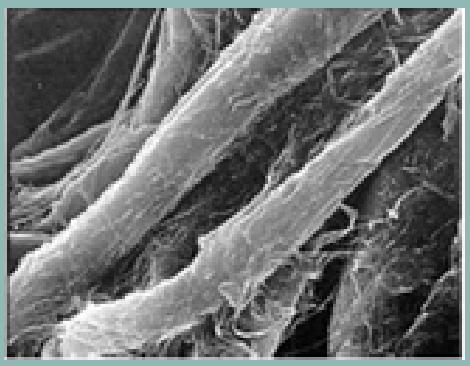


ب

شکل ۷- اثر ولتاژ شتاب‌دهنده بر کیفیت و تفکیک‌پذیری ذرات طلا در بزرگنمایی یکسان ۳۶۰۰۰ برابر الف) در ولتاژ پایین (۵کیلوولت) ب)در ولتاژ بالا (۲۵کیلوولت) در ولتاژ بالا، وضوح و تفکیک‌پذیری تصویر بیشتر است [۹].

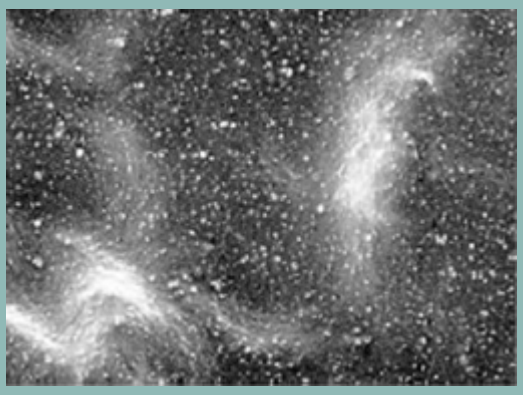


الف

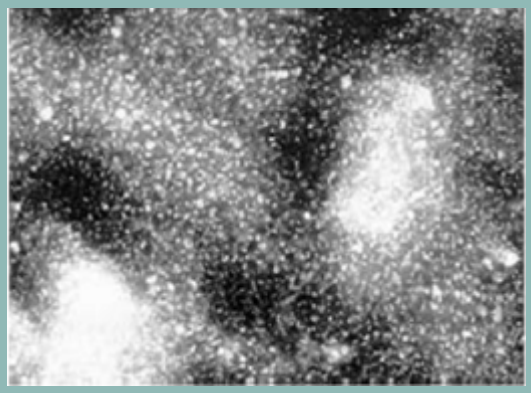


ب

شکل ۸- اثر ولتاژ شتاب‌دهنده بر کیفیت و تفکیک‌پذیری نمونه کاغذ صافی در بزرگنمایی یکسان ۱۴۰۰ برابر الف) در ولتاژ پایین (۵کیلوولت) ب)در ولتاژ بالا (۲۵کیلوولت) در ولتاژ بالا، وضوح و تفکیک‌پذیری تصویر بیشتر است [۷].

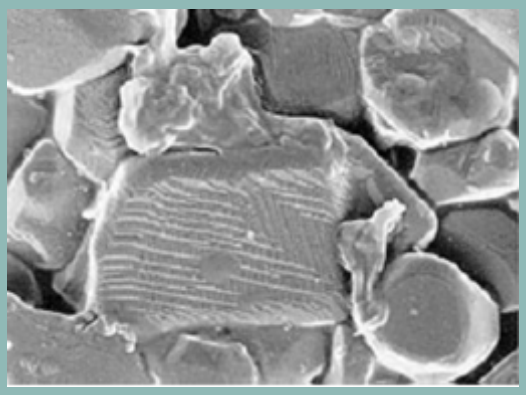


الف

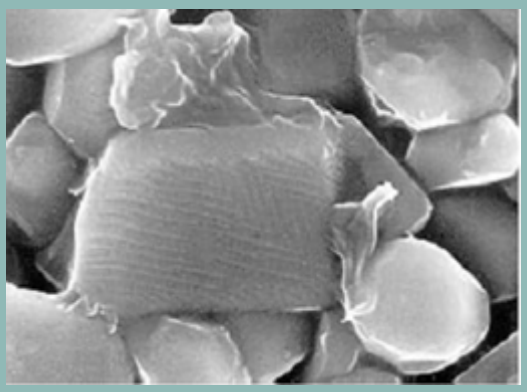


ب

شکل ۹- اثر ولتاژ شتاب‌دهنده بر تباین تصویر از نمونه پوشش رنگ در بزرگنمایی یکسان ۲۲۰۰ الف) در ولتاژ پایین (۵کیلوولت) ب)در ولتاژ بالا (۲۵کیلوولت). وقتی از ولتاژ شتاب‌دهنده بالا استفاده می‌شود، الکترون‌های بیشتری از نمونه پراکنده می‌شوند که این امر نه تنها باعث کاهش تباین ریزساختار سطحی می‌شود، بلکه به دلیل ایجاد الکترون‌های برگشتی، سبب ایجاد نوع متفاوتی از تباین می‌شود [۷].



الف



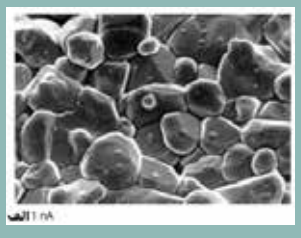
ب

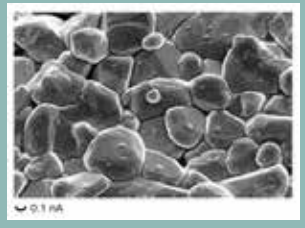
شکل ۱۰- اثر ولتاژ شتاب‌دهنده بر وضوح و کیفیت تصویر از نمونه پودر زینتر شده در بزرگنمایی یکسان ۷۲۰۰ الف) در ولتاژ پایین (۵کیلوولت) ب)در ولتاژ بالا (۲۵کیلوولت). در ولتاژ پایین بااینکه ریزساختار سطحی قابل‌مشاهده است اما دستیابی به تصویر واضح و باکیفیت در بزرگنمایی‌های بالا مشکل است. در این موارد می‌توان با استفاده از کاهش فاصله کاری و یا کاهش قطر باریکه الکترونی، تصویر خوبی ایجاد کرد [۷].

تأثیر میزان جریان باریکه الکترونی و قطر آن بر کیفیت تصویر

در میکروسکوپ الکترونی روبشی، هرچه قطر باریکه الکترونی کوچک‌تر باشد، قدرت تفکیک و وضوح تصویر بیشتر است. یکنواختی تصویر به جریان باریکه الکترونی بستگی دارد. ارتباط جریان باریکه الکترونی و قطر آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هرچه جریان باریکه الکترونی کمتر باشد، قطر آن نیز کوچک‌تر می‌شود. بنابراین انتخاب جریان مناسب برای شرایط مختلف ازنظر بزرگنمایی و وضوح (شامل ولتاژ شتاب‌دهنده، چرخش نمونه و ...) و نوع نمونه ضروری است [۱۰] (شکل ۱۲).

شکل۱۱- ارتباط بین جریان باریکه الکترونی و قطر آن [۱۰]

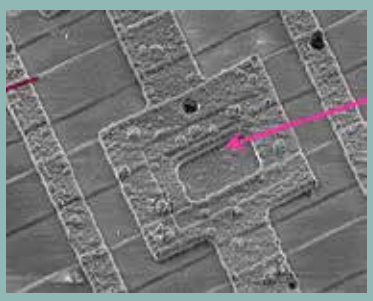




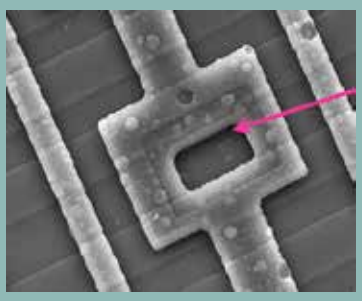
شکل۱۲- در این نمونه سرامیکی، هرچه جریان باریکه الکترونی کمتر باشد، تصویر واضح‌تر است اما صافی و یکنواختی سطح از بین می‌رود [۷].

اثر لبه روی کیفیت تصویر

سطح نمونه‌ها به‌طورمعمول ناصاف و دارای پستی‌وبلندی هست که همین امر سبب ایجاد تباین در تصاویر به‌دست‌آمده توسط الکترون‌های ثانویه می‌شود. میزان اثر لبه، به ولتاژ شتاب‌دهنده بستگی دارد. هرچه ولتاژ کمتر باشد، عمق نفوذ الکترون‌های برخوردی کوچک‌تر است که این امر باعث کاهش روشنایی لبه‌ها خواهد شد (شکل ۱۳).



الف

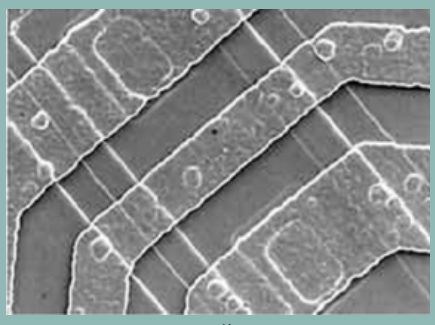


ب

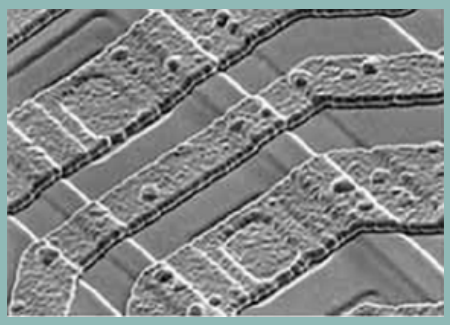
شکل ۱۳- اثر لبه بر کیفیت تصویر از پنجره Sunken در ترانزیستور در بزرگنمایی یکسان ۲۵۰۰ برابر **الف)** در ولتاژ پایین (۲کیلوولت) **ب)**در ولتاژ بالا (۲۰کیلوولت). در بزرگنمایی یکسان، هرچه ولتاژ شتاب‌دهنده بیشتر باشد، اثر لبه بیشتر بوده و لبه‌ها روشن‌تر دیده می‌شوند، درنتیجه اطلاعات مربوط به کنج‌ها، لبه‌ها و سطوح از بین می‌روند (پیکان‌ها را دنبال کنید) [۷].

چرخش نمونه

چرخش نمونه با اهدافی نظیر بهبود کیفیت تصویر الکترون‌های ثانویه و دستیابی به تصاویری بهتر از نمونه صورت می‌گیرد. شکل۱۴ تصاویر نمونه بدون چرخش و با زاویه چرخش ۴۵° را نشان می‌دهد. مقایسه دو تصویر نشان می‌دهد که نمونهٔ چرخش‌یافته، برجستگی‌ها را بهتر نشان می‌دهد. مقدار چرخش نمونه متغیر است و تا زمان پیدا کردن جایی ازنمونه که بین مقدار الکترون‌های برخوردی و مقدار الکترون‌های خروجی از نمونه تعادل برقرار شود، ادامه می‌یابد.



الف

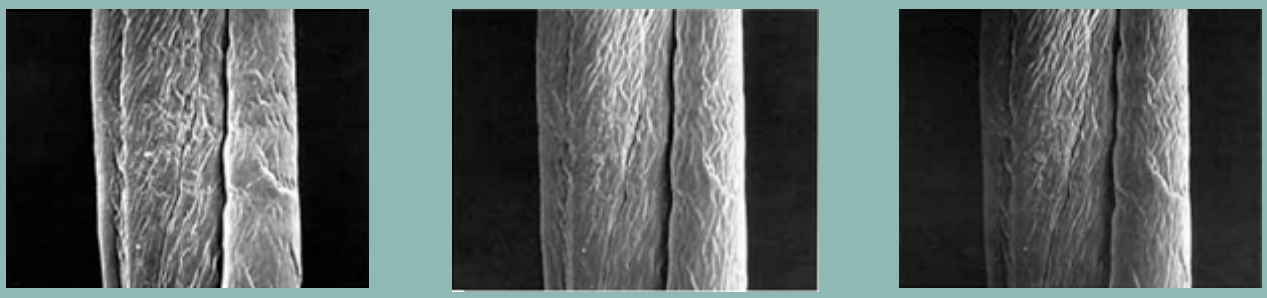


ب

شکل ۱۴- تصویر نمونه IC، الف) زاویه چرخش ۰ درجه و ب) ۴۵ درجه [۹].

همچنین بسته به اینکه نمونه چرخانده شده در جهت آشکارساز الکترون‌های ثانویه قرار داشته باشد یا روبروی آن، روشنایی تصویر نهایی متفاوت خواهد بود. در چنین مواردی، اگر محور طولی نمونه در راستای آشکارساز قرار گیرد، روشنایی یکنواخت‌تر خواهد بود.

به‌علاوه، اگر جهت چرخش سطح نمونه و موقعیت آشکارساز الکترون‌های ثانویه بر هم منطبق باشد (شکل ۱۵)، الکترون‌های برگشتی بیشتری از قسمت چرخش یافته، به‌منظور تصویرسازی ترکیب می‌شوند و باعث روشن‌تر شدن تصویر می‌گردد.



شکل۱۵- در نمونه فایبر، قرار دادن محور طولی نمونه در جهت آشکارساز الکترون‌های ثانویه باعث می‌شود سمت راست و چپ نمونه یکسان روشن شود [۷].

استفاده از سیگنال‌های الکترون برگشتی

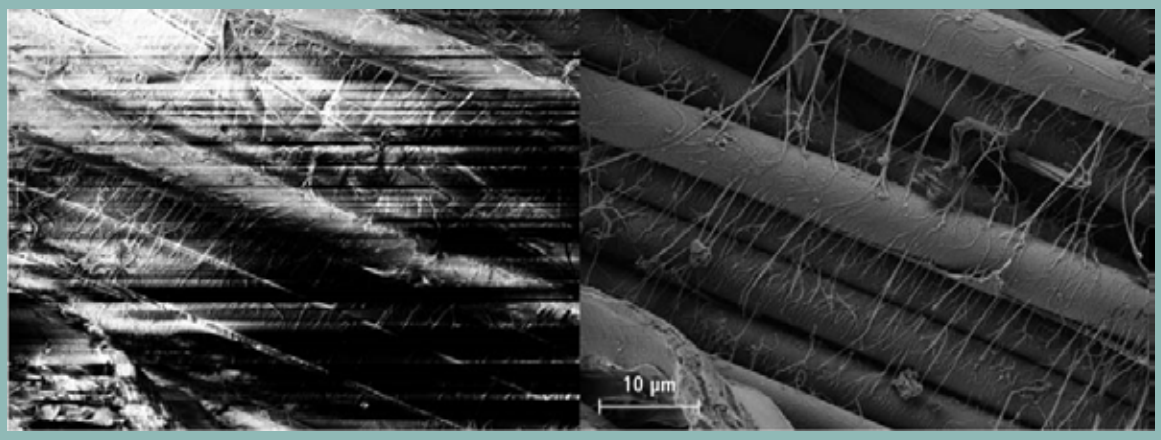
اگرچه تصاویر به‌دست‌آمده از الکترون‌های ثانویه بسیار مفید و پرکاربرد هستند اما تصاویر ناشی از الکترون‌های برگشتی نیز اطلاعات مفیدی ارائه می‌دهند. الکترون‌های برگشتی بسته به نوع ترکیب و فراز و نشیب سطحی، در مقدار و جهت، متفاوت‌اند. تباین تصویر حاصل از الکترون‌های برگشتی به موارد زیر بستگی دارد: ۱- سرعت تولید الکترون که به میانگین عدد اتمی نمونه وابسته است،۲- زاویه الکترون‌های برگشتی روی سطح نمونه، ۳- تغییر درشدت الکترون برگشتی با تغییر زاویه برخورد باریکه الکترونی الکترون به نمونه. تصاویر حاصل از الکترون‌های برگشتی شامل دو نوع اطلاعات است: یکی ترکیب و دیگری فراز و نشیب سطحی نمونه. ناحیه‌ای که الکترون‌های برگشتی تولید می‌شوند بزرگ‌تر از ناحیه‌ای است که الکترون‌های ثانویه به وجود می‌آیند. بنابراین، الکترون‌های برگشتی قدرت تفکیک‌پذیری کمتری دارند؛ اما به دلیل اینکه انرژی بیشتری دارند، کمتر تحت تأثیر شارژ نمونه و آلودگی آن قرار می‌گیرند [۱۲].

اثر شارژ الکتریکی روی کیفیت تصویر

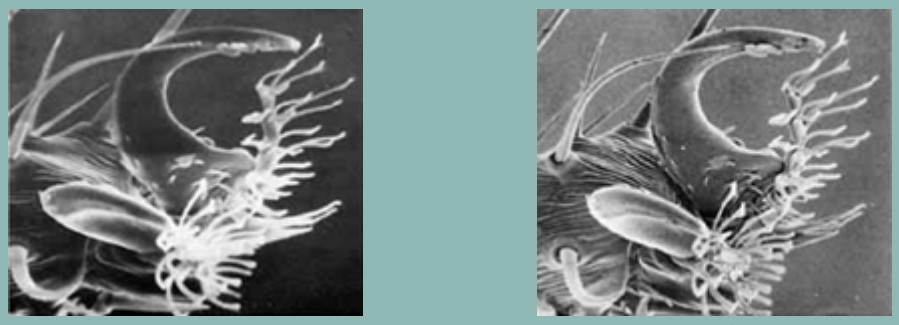
الف) شارژ الکتریکی و مقابله با آن

وقتی باریکه الکترونی به‌طور مستقیم به نمونه نارسانا برخورد کند، الکترون‌های با بار منفی آن به‌صورت موضعی تجمع کرده و بنابراین انتشار الکترون‌های ثانویه به‌درستی صورت نمی‌گیرد. این شارژ الکتریکی سبب ایجاد برخی عیوب در تصویر نظیر تباین غیرطبیعی، خطخطی شدن (شکل۱۶)، تغییر شکل و یا حرکت تصویر می‌شود (شکل ۱۷). برای اجتناب از پدیده شارژ الکتریکی، به‌طورمعمول روی نمونه‌های نارسانا یک پوشش فلزی اعمال می‌شود. اگر با اعمال پوشش، بازهم مشکل شارژ الکتریکی وجود داشته

باشـد، بـرای بهبـود کیفیـت تصویـر از روش‌هـای زیـر اسـتفاده می‌شـود [۹]:
۱- کم کـردن جریان باریکه الکترونی.
۲- کاهش ولتاژ شـتاب‌دهنده.
۳- اعمال مجدد پوشـش فلزی روی سطح نمونه.
۴- چرخـش نمونه. (میزان چرخش برای نمونه‌های مختلف، متفاوت اسـت).



شکل۱۶- اثر استفاده از جبران‌کننده شارژ الکتریکی در حذف(سمت راست) خط‌خطی‌ها (سمت چپ)در تصویرگیری از نوعی چسب [۷].



ب الف

شکل۱۷- اثر کاهش ولتاژ در کاهش شارژ الکتریکی در تصویرگیری نمونه پای ملخ، الف) نمونه بدون شارژ الکتریکی و ب) نمونه با شارژ الکتریکی [۹].

جلوگیری از شارژ الکتریکی به کمک نمونه‌برداری

تصویرگیـری از نمونه‌هـای زیسـتی، پارچـه‌ای و پـودری دشـوار اسـت؛ بـه صورتـی کـه برخـی نقـاط در تصویـر، روشـن و بعضـی دیگـر تیـره هسـتند کـه ایـن امـر بـه خاطـر وجـود شـارژ الکتریکـی در چنیـن نمونه‌هایـی اسـت. بـرای اجتنـاب از ایـن امـر بایسـتی سـطح نمونـه به‌طـور یکنواخـت، هدایـت الکتریکـی داشـته باشـد؛ بـه شـرح زیـر [۴]:
۱- بعـد از چسـباندن و ثابـت شـدن نمونـه روی نگه‌دارنـده، از چسـب هـادی (کربـن یـا مشـابه آن) اسـتفاده شـود.
۲- در مـورد پودرهـا، اگـر ذرات پـودر روی هـم قـرار گرفتـه باشـند پدیـده شـارژ اتفـاق افتـاده و

هنگام تصویرگیری، ذرات حرکت خواهند کرد. به‌منظور جلوگیری از این امر، باید پس از چسباندن پودر، با دمیدن هوا روی آن ذرات اضافی و سست را حذف کرد. همچنین نوع چسب در نگه‌داشتن پودر بسیار اهمیت دارد.

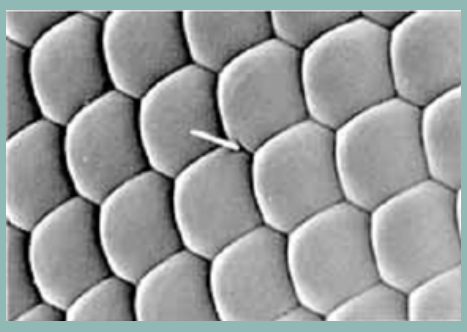
تخریب نمونه توسط باریکه الکترونی

گاهی انرژی باریکه الکترونی به‌صورت گرما در سطح نمونه و در نقطه برخورد با نمونه آزاد می‌شود. افزایش دما در نقطه برخورد به موارد زیر بستگی دارد [۵]:

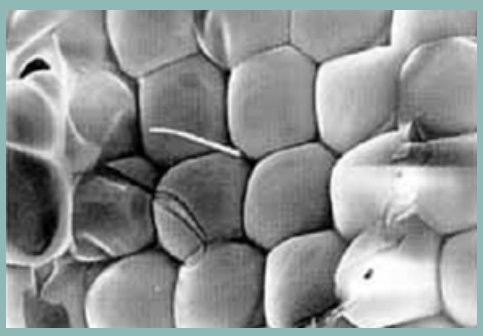
۱- مقدار باریکه الکترونی و ولتاژ شتاب‌دهنده.
۲- ناحیه روبش شده.
۳- مدت‌زمان روبش.
۴- هدایت حرارتی نمونه. مواد پلیمری و زیستی به دلیل هدایت حرارتی پایین به‌آسانی تحت تأثیر باریکه الکترونی تخریب می‌شوند.

برای ممانعت از تخریب نمونه موارد زیر را می‌توان لحاظ کرد (شکل ۱۸):

۱- استفاده از ولتاژ شتاب‌دهنده پایین.
۲- کاهش شدت باریکه الکترونی.
۳- کوتاه کردن زمان پرتودهی، حتی اگر کیفیت تصویر کاهش یابد.
۴- استفاده از بزرگنمایی‌های پایین.
۵- کنترل ضخامت پوشش فلزی اعمال‌شده روی نمونه.



الف



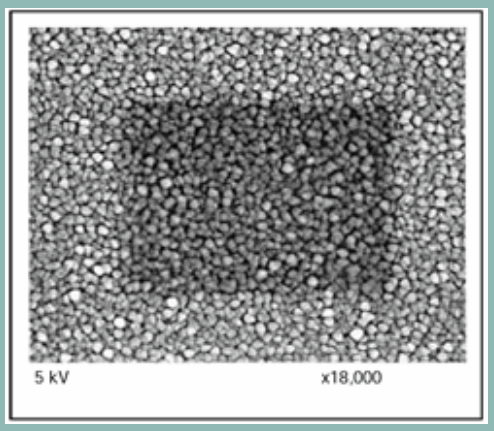
ب

شکل ۱۸- تصویر چشم حشره در بزرگنمایی بالا، الف) بدون تأثیر باریکه الکترونی و ب) تخریب‌شده توسط باریکه الکترونی پس از گذشت زمان زیاد از بررسی همان منطقه [۷].

آلودگی ناشی از برخورد باریکه الکترونی با نمونه

در اثر برخورد باریکه الکترونی به نمونه برای مدت‌زمان طولانی، ممکن است تصویر وضوح اولیه خود را از دست داده و تیره شود. این امر به سبب مولکول‌های گاز موجود در اطراف نمونه موردبررسی است (شکل۱۹). عواملی که باعث ایجاد گاز در محفظه نمونه و منجر به آلودگی می‌شوند، شامل موارد زیر است [۵]:

۱- گاز ایجادشده از خود دستگاه.
۲- گاز ایجادشده از نمونه.
برای جلوگیری از آلودگی نمونه می‌توان اقدامات زیر را به کار برد [۵]:
۱- استفاده از حداقل مقدار چسب کربن دوطرفه یا هر نوع چسب دیگر و خشک‌کردن کامل آن قبل از قرار دادن نمونه داخل دستگاه.
۲- گرم کردن و خارج کردن گاز نمونه به کمک پیش خلأ، قبل از قرار دادن نمونه داخل دستگاه.
۳- کوچک نمودن سایز نمونه‌ها تا حد ممکن.
۴- اعمال پوشش رسانای مناسب به لحاظ ضخامت.
۵- انجام تصویرگیری و روبش تصویر در حداقل زمان ممکن.
از طرفی عوامل خارجی همچون شخص کاربر، روش آماده‌سازی نمونه، روش پوشش‌دهی، وجود لرزش و یا امواج مغناطیسی در محیط کاری دستگاه SEM نیز در گرفتن تصاویر بدون نویز تأثیر زیادی دارد. شایان‌ذکر است که موارد دستگاهی و ابزاری همچون فاصله کاری، اندازه قطر روزنه شیئی، آستیگماتیسم و فیلمان و شرایط آن در کیفیت تصاویر نقش بسیار مهمی دارند.



شکل ۱۹- اثر آلودگی ناشی از برخورد باریکه الکترونی به نمونه در ولتاژ ۵ کیلوولت و بزرگنمایی ۱۸۰۰۰ برابر [۷].

[۱]تلافی نوغانی. محمد ، ابویی مهریزی. وحید ، ۱۳۹۳، «آشنایی با روش‌های نوین شناخت و آنالیز مواد»، انتشارات فدک ایساتیس.
[۲]کرباسی.م، ۱۳۸۸ ، «میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو»، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.
[۳]گلستانی فرد. فرهاد، بهره‌ور. محمدعلی، صلاحی. اسماعیل، ۱۳۹۰، «روش‌های شناسایی و آنالیز مواد»، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
[٤] Schatten Heide, Pawley James B.,2007,"Biological Low-Voltage Scanning Electron Microscopy", Springer.
[٥] Shimizu, Kenichi, Mitani, Tomoaki,2010, "New Horizons of Applied Scanning Electron Microscopy", Springer.
[٦] Oatley C.W.,1972,"The Scanning Electron Microscopy, Part1,The Instrument", Cambridge.
[۷]کاتالوگ دستگاه‌ها در پژوهشگاه مواد و انرژی.
[۸] Lamaka S.V., Knörnschild G., Snihirova D.V., Taryba M.G., Zheludkevich M.L., Ferreira M.G.S.,2009,"Complex anti corrosion coating for ZK30 magnesium alloy", Electrochimica Acta Vol.55,pp.131-141.
[۹]علیزاده. مریم ، غفرانی.سمانه، ۱۳۹۵، «مبانی کاربردی آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی»، انتشارات نخبگان شریف.
[۱۰]W.Zhou,2006," Scanning Electron Microscopy for Nanotechnology Techniques & Applications ",University of New Orleans.

نشریه فراسوی مواد

انجمن علمی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

دانشگاه تهران

@FarasoyeMavadUT

www.farasoyemavadsj.ut.ac.ir