



وزارتخانه صنعت، معدن و تجارت
سازمان ملی استاندارد ایران

آزمون‌های غیرمخرب

(مبانی، روش‌ها و کاربردها)

فرهنگ هنرور

جلد اول

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

آزمون‌های غیرمخرب

(مبانی، روش‌ها و کاربردها)

جلد اول

فرهنگ هنرور

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۱۳۹۹



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شماره ۴۹۶

سرشناسه: هنرور، فرهنگ، ۱۳۴۲ -
عنوان و نام پدیدآور: آزمون‌های غیرمخرب (مبانی، روش‌ها و کاربردها) / فرهنگ هنرور.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ج.
شابک: ج ۱ 978-622-6655-68-2
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا
یادداشت: کتابنامه
موضوع: آزمایش‌های غیرمخرب / Nondestructive testing
موضوع: آزمون ماورای صوتی / Ultrasonic testing
شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده‌بندی کنگره: TA۴۱۷/۲
رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۱۱۲۲۷
شماره کتاب‌شناسی ملی: ۷۴۱۸۰۸۶

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  press.kntu.ac.ir

عنوان: آزمون‌های غیرمخرب (مبانی، روش‌ها و کاربردها)
مؤلف: دکتر فرهنگ هنرور
نوبت چاپ: اول
تاریخ انتشار: دی ۱۳۹۹، تهران
شمارگان: ۲۰۰ جلد
ویرایش: ویراستار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
صحافی: گرنامی
چاپ: سعید
قیمت: ۶۶۰۰۰ تومان

تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی - شماره ۴۷۰ - انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲
میدان ونک - خیابان ولیعصر (عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶ - مرکز پخش و فروش انتشارات
تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): press.kntu.ac.ir

تقديم به دانشجويانم كه شوق اوج گرفتن در نگاهشان مي درخشد...

پیشگفتار

این کتاب با هدف معرفی اصول کلی، روش‌های به‌کارگیری و کاربردهای آزمون‌های غیرمخرب نگاشته شده است. آزمون یا ارزیابی غیرمخرب شامل روش‌هایی است که به کمک آنها می‌توان مواد و قطعات را بدون وارد کردن صدمه‌ای به آنها بازرسی کرد. کتاب حاضر حاصل بیش از بیست سال تدریس درس‌های مختلف کارشناسی، کارشناسی ارشد و دوره‌های کوتاه‌مدت صنعتی در موضوع آزمون‌های غیرمخرب در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشگاه تهران و صنایع مختلف کشور است. آزمون غیرمخرب مبحث نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر در دانشگاه‌ها مورد توجه قرار گرفته است و هم‌اکنون در اکثر دانشگاه‌های مهندسی کشور تدریس می‌شود. مبحث آزمون غیرمخرب شامل روش‌های متعددی است که هر یک مرتبط با مبحث فیزیکی خاصی همچون نور، الکترومغناطیس، مکانیک سیالات، الکتریسته، صوت، مغناطیس و ... است؛ بدین علت، می‌توان گفت که مبحث آزمون غیرمخرب مبحثی فرارشته‌ای است که فهم آن مستلزم آشنایی با مباحث مختلفی است. هر چند کتاب‌های زیادی در موضوع آزمون‌های غیرمخرب به دیگر زبان‌ها نگاشته شده است؛ اما کتاب‌هایی که بتوان از آنها به‌عنوان کتاب درسی استفاده کرد، بسیار محدودند. در زبان فارسی نیز، هر چند در سال‌های اخیر توجه بیشتری به ترجمه و تألیف کتاب‌هایی در زمینه آزمون‌های غیرمخرب شده است، غالب این کتاب‌ها به‌صورت کاربردی است و برای مخاطبان صنعتی نوشته شده است.

کتاب حاضر، کتابی درسی در موضوع آزمون‌های غیرمخرب است. این کتاب اولین جلد

از یک مجموعه دوجلدی است که شامل هفت فصل است و به سه روش غیرمخرب آزمون فراصوتی، آزمون مایع نافذ و آزمون ذرات مغناطیسی می‌پردازد. از آنجا که این کتاب می‌تواند هم در دوره‌های کارشناسی و هم در دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترا مورد استفاده قرار گیرد، عنوان‌های پیشرفته که متناسب با دوره‌های تحصیلات تکمیلی است، با ستاره مشخص شده‌اند. در صورت کمبود وقت، مدرسان دوره‌های کارشناسی می‌توانند از تدریس این مباحث صرف‌نظر کنند. دیگر روش‌های متداول آزمون‌های غیرمخرب، از جمله آزمون‌های پرتونگاری، جریان گردابی، نشرآوایی و دمانگاری در جلد دوم این کتاب ارائه خواهند شد که به یاری خداوند در آینده نزدیک منتشر خواهد شد.

مطالب کتاب حاضر در طول مدتی بیش از بیست سال به تدریج جمع‌آوری و آماده شده است. در طول این مدت، افراد و دانشجویان زیادی در تایپ مطالب و آماده‌سازی شکل‌های کتاب با من همکاری داشته‌اند که بدین وسیله از همه آنها صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. نسخه نهایی کتاب را آقای مهندس احسان نادریان با استفاده از نرم‌افزار LaTeX آماده کرده‌اند. بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌شائبه و دقت نظر و حسن توجه ایشان به آماده‌سازی هر چه دقیق‌تر کتاب و تکمیل بسیاری از شکل‌ها تشکر و قدردانی ویژه داشته باشم.

در پایان، خدا را شاکرم که توفیق نگارش این کتاب را عنایت فرمود. از تمامی استادان و خوانندگان محترم کتاب تقاضا دارم که مرا از نظرهای سازنده خود برای رفع کاستی‌ها آگاه فرمایند. امید که این تلاش اندک مورد توجه و استفاده استادان، دانشجویان و علاقه‌مندان به مبحث آزمون‌های غیرمخرب قرار گیرد و قدمی باشد، هر چند کوچک، در جهت گسترش دانش و فناوری آزمون‌های غیرمخرب در راستای اعتلا و پیشرفت کشور عزیزمان ایران.

فرهنگ هنرور

مهرماه ۱۳۹۹ خورشیدی

فهرست مطالب

پیشگفتار

چ

۱	فصل ۱ مقدمه
۱	۱.۱ آزمون غیرمخرب چیست؟
۳	۲.۱ نقش آزمون‌های غیرمخرب در سلامت و ایمنی
۴	۳.۱ روش‌های آزمون غیرمخرب
۷	۴.۱ کاربردهای آزمون غیرمخرب
۸	۵.۱ مدارک فنی در آزمون‌های غیرمخرب
۱۰	۶.۱ مجریان آزمون غیرمخرب
۱۲	۷.۱ توانایی‌های آزمون‌های غیرمخرب
۱۲	تمرین ۱.۱
۱۳	مراجع

فصل ۲ آزمون فراصوتی - اصول کلی

۱۵	۱.۲ مقدمه
۱۸	۲.۲ تاریخچه
۱۹	۳.۲ مزایا و معایب

۴.۲	امواج فراصوتی	۲۱
۱.۴.۲	حرکت نوسانی	۲۱
۲.۴.۲	تعاریف و مفاهیم پایه	۲۱
۳.۴.۲	حالت‌های انتشار امواج فراصوتی	۲۵
۴.۴.۲*	انتشار موج یک بعدی	۲۹
۵.۴.۲*	حل معادله موج	۳۵
تمرین ۱.۲		۳۹
۵.۲	بازتابش و شکست امواج	۴۰
۱.۵.۲*	تابش قائم موج به مرز دو محیط	۴۰
۲.۵.۲	ضریب بازتابش و ضریب عبور	۴۲
۳.۵.۲	تابش زاویه‌ای موج به مرز دو محیط	۴۶
۴.۵.۲*	اثبات قانون اسنل	۴۷
۵.۵.۲	تغییر حالت موج	۵۰
۶.۵.۲	زاویه‌های حد	۵۲
۷.۵.۲	زاویه موج ریلی	۵۴
۸.۵.۲	بازتابش و شکست امواج عرضی	۵۶
تمرین ۲.۲		۵۸
۶.۲*	پاشندگی	۶۰
۷.۲*	امواج هدایت‌شده	۶۳
۱.۷.۲	موج سطحی	۶۳
۲.۷.۲	موج ورقی	۶۶
۸.۲	تضعیف فراصوتی	۶۷
تمرین ۳.۲		۷۱
پیوست: بررسی تحلیلی دیسپرژن و سرعت گروه		۷۴
مراجع		۷۵
فصل ۳ آزمون فراصوتی- تولید امواج		
۱.۳	مقدمه	۷۷
۱.۱.۳	تراگذارهای پیزوالکتریک	۷۸
۱.۱.۱.۳	پیزوسرامیک‌ها	۸۰
۲.۱.۱.۳	پیزوالکتریک‌های پلیمری	۸۳
۳.۱.۱.۳	پیزوکامپوزیت‌ها	۸۴

۲.۱.۳	انواع کاوندهای پیزوالکتریک	۸۵
۱.۲.۱.۳	تقسیم‌بندی براساس نوع موج تولید شده	۸۵
۲.۲.۱.۳	تقسیم‌بندی براساس روش انجام آزمون	۸۷
۳.۲.۱.۳	تقسیم‌بندی براساس زاویه ارسال پرتو	۸۸
۴.۲.۱.۳	تقسیم‌بندی براساس تعداد المان‌های به‌کار رفته در کاوند	۸۹
۵.۲.۱.۳	تقسیم‌بندی براساس شکل سطح کاوند	۹۱
۶.۲.۱.۳*	تقسیم‌بندی براساس پهنای باند فرکانسی	۹۲
۳.۱.۳*	مدار الکتریکی تراگذار پیزوالکتریک	۹۲
۴.۱.۳	ساختمان تراگذارهای پیزوالکتریک	۹۳
۵.۱.۳*	تراگذارهای الکترومغناطیس آکوستیک (EMAT)	۹۵
۶.۱.۳*	تراگذارهای خازنی	۹۹
۷.۱.۳*	تولید فراصوت با استفاده از لیزر	۹۹
۱.۷.۱.۳	چگونگی تولید و دریافت امواج فراصوتی توسط لیزر	۱۰۰
۱.۳	تمرین	۱۰۳
۲.۳	میدان صوتی	۱۰۴
۱.۲.۳	منطقه‌های صوتی	۱۰۴
۲.۲.۳	گسترده‌گی پرتو	۱۰۸
۳.۳	ویژگی‌های تراگذارها	۱۱۱
۴.۳	تحریک تراگذارها	۱۱۴
۲.۳	تمرین	۱۱۶
	مراجع	۱۱۷
فصل ۴ آزمون فراصوتی-جنبه‌های کاربردی		
۱.۴	مقدمه	۱۱۹
۲.۴	بلوک‌های استاندارد	۱۱۹
۱.۲.۴	بلوک V1	۱۲۰
۲.۲.۴	بلوک V2	۱۲۲
۳.۲.۴	مجموعه بلوک‌های سطح-دامنه، فاصله-دامنه و ASTM	۱۲۳
۴.۲.۴	سایر بلوک‌ها و قطعات واسنجی	۱۲۶
۳.۴	ماده واسط	۱۲۷
۱.۴	تمرین	۱۲۹

۴.۴	انجام بازرسی فراصوتی	۱۳۰
۱.۴.۴	انتخاب متغیر مورد اندازه‌گیری	۱۳۰
۲.۴.۴	انتخاب روش تولید امواج فراصوتی	۱۳۰
۳.۴.۴	انتخاب کاوند مناسب	۱۳۱
۴.۴.۴	انتخاب نحوه انجام آزمون	۱۳۱
۵.۴.۴	ارزیابی و اندازه‌گیری ناپیوستگی‌ها	۱۳۷
۶.۴.۴	منحنی‌های DAC و DGS	۱۳۸
۷.۴.۴	روش‌های افت ۶ dB و افت ۲۰ dB	۱۴۰
۵.۴	نمایش نتایج در آزمون فراصوتی	۱۴۳
۱.۵.۴	روبش A	۱۴۳
۲.۵.۴	روبش B	۱۴۵
۳.۵.۴	روبش C	۱۴۶
۶.۴	تکنیک‌های پیشرفته آزمون فراصوتی	۱۴۷
۱.۶.۴	تکنیک آرایه فازی	۱۴۸
۲.۶.۴	تکنیک تافد	۱۴۹
۳.۶.۴	تکنیک امواج هدایت شده	۱۵۴
۲.۴	تمرین	۱۵۵
	مراجع	۱۵۷
فصل ۵ آزمون مایع نافذ		
۱.۵	مقدمه	۱۵۹
۲.۵	تاریخچه	۱۶۱
۳.۵	مزایا و معایب	۱۶۲
۴.۵	اصول اولیه	۱۶۳
۱.۴.۵	کشش سطحی	۱۶۳
۲.۴.۵	زاویه تماس و میزان ترشوندگی	۱۶۴
۳.۴.۵	خاصیت موئینگی	۱۶۵
۵.۵	مراحل انجام آزمون مایع نافذ	۱۶۸
۶.۵	تمیز کردن اولیه سطح قطعه	۱۶۹
۱.۶.۵	تمیزکاری با مواد شوینده	۱۷۰
۲.۶.۵	تمیزکردن با حلال	۱۷۰
۳.۶.۵	گریس‌زدایی با بخار	۱۷۱

۴.۶.۵	زنگ‌زدایی	۱۷۱
۵.۶.۵	تمیزکاری فراصوتی	۱۷۱
۶.۶.۵	تمیزکاری سایشی	۱۷۲
۷.۵	مایع نافذ	۱۷۲
۱.۷.۵	انواع مایع نافذ	۱۷۲
۲.۷.۵	حساسیت مایع نافذ	۱۷۳
۳.۷.۵	پاک‌کردن مایع اضافی از روی سطح	۱۷۳
۸.۵	زمان توقف	۱۷۴
۹.۵	آشکارساز	۱۷۵
۱۰.۵	انجام بازرسی و تفسیر نتایج	۱۷۸
۱۱.۵	مراحل انجام آزمون مایع نافذ	۱۷۸
۱.۱۱.۵	اندازه‌گیری نشانه‌ها	۱۸۳
۲.۱۱.۵	نور مناسب	۱۸۴
۱۲.۵	تمیز کردن نهایی قطعه	۱۸۶
۱۳.۵	کنترل کیفیت آزمون مایع نافذ	۱۸۶
۱.۵	تمرین	۱۸۸
	مراجع	۱۸۹
 فصل ۶ آزمون ذرات مغناطیسی - اصول کلی		
۱.۶	مقدمه	۱۹۱
۲.۶	تاریخچه	۱۹۲
۳.۶	مزایا و معایب	۱۹۳
۴.۶	مبانی تئوری آزمون مغناطیسی	۱۹۴
۱.۴.۶*	میدان مغناطیسی در مواد	۱۹۸
۱.۱.۴.۶	دوقطبی‌های مغناطیسی و مغناطش	۱۹۸
۲.۴.۶	خاصیت مغناطیسی مواد	۲۰۰
۵.۶	مراحل انجام آزمون ذرات مغناطیسی	۲۰۲
۶.۶	حلقه هیستریزس	۲۰۳
۱.۶.۶	میدان نشت	۲۰۸
۷.۶	مغناطش طولی، مدور و چندجهته	۲۱۰
۱.۷.۶	مغناطش طولی و مدور	۲۱۱
۲.۷.۶*	مغناطش چندجهته	۲۱۲

۲۱۴	۸.۶ انواع جریان‌های الکتریکی برای مغناطش
۲۱۷	۱.۸.۶ محاسبهٔ جریان الکتریکی در MT
۲۱۷	تمرین ۱.۶
۲۱۹	مراجع
۲۲۱	فصل ۷ آزمون ذرات مغناطیسی - جنبه‌های کاربردی
۲۲۱	۱.۷ مقدمه
۲۲۱	۲.۷ تکنیک و تجهیزات
۲۲۲	۱.۲.۷ یوغ مغناطیسی
۲۲۳	۲.۲.۷ پیچ
۲۲۵	۳.۲.۷ کابل
۲۲۵	۴.۲.۷ روش تماس مستقیم
۲۲۷	۵.۲.۷ هادی مرکزی
۲۲۸	۶.۲.۷ اتصال میله‌ای
۲۲۹	۷.۲.۷* روش جریان القایی
۲۳۰	۳.۷ وامغناطش
۲۳۳	۴.۷ ذرات مغناطیسی
۲۳۵	۵.۷ ارزیابی اندازه و جهت میدان مغناطیسی
۲۳۵	۱.۵.۷ گوس‌متر و حسگر اثر هال
۲۳۵	۲.۵.۷ نشانگر کمی کیفیت
۲۳۶	۳.۵.۷ جهت‌سنج پای
۲۳۷	۴.۵.۷ حلقهٔ کیتوس
۲۳۹	۶.۷ ارزیابی ذرات
۲۴۰	تمرین ۱.۷
۲۴۰	مراجع

فصل ۱

مقدمه

۱.۱ آزمون غیرمخرب (NDT)^۱ چیست؟

صدایی که از نواختن ضربه به یک ظرف سفالی ترک‌دار تولید می‌شود متفاوت از صدایی است که با وارد کردن همان ضربه به ظرف سفالی مشابهی که سالم است ایجاد می‌شود. بیش از هزار سال است که انسان از این آزمون برای تشخیص ترک در ظروف سفالی و چینی‌جات استفاده می‌کند. امروزه این روش سنتی در صنایع هوافضا به‌عنوان یکی از روش‌های آزمون غیرمخرب برای تشخیص عیوب در مواد کامپوزیتی به‌کار می‌رود (آزمون ضربهٔ سکه^۲).

ما در زندگی روزمره‌مان از آزمون‌های غیرمخرب دیگری نیز استفاده می‌کنیم. ضربه زدن به بعضی میوه‌جات مانند هندوانه برای تشخیص رسیده بودن آن، بازرسی چشمی اشیاء مختلف به منظور اطمینان از سالم بودن آنها، بازرسی چمدان‌های مسافران با اشعهٔ ایکس در فرودگاه و ... را می‌توان به نوعی آزمون غیرمخرب به‌شمار آورد.

به‌طور کلی، آزمون‌های غیرمخرب مجموعه‌ای از روش‌های آزمایش قطعات هستند که انجام آنها صدمه‌ای به قطعه وارد نمی‌کند. تعریف زیر توسط سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO^۳) برای

^۱Nondestructive Testing

^۲coin tap test

^۳International Standards Organization

این آزمون‌ها داده شده است [۱]:

«توسعه و به‌کارگیری روش‌های فنی برای آزمایش مواد و قطعات با هدف شناسایی، مکان‌یابی، اندازه‌گیری و ارزیابی عیوب و سنجش یکپارچگی^۱، خواص، ترکیب، و نیز اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی این مواد و قطعات، بدون وارد ساختن زیانی به کارایی و قابل استفاده بودن آنها»^۲.

هرچند در این کتاب به کاربردهای صنعتی آزمون‌های غیرمخرب خواهیم پرداخت؛ اما این آزمون‌ها کاربردهای دیگری نیز دارند که مهم‌ترین آنها معاینات پزشکی و آزمایش اشیاء هنری، و به‌طور خاص عتیقه‌جات است. در پزشکی از اصطلاح روش‌های غیرتهاجمی^۳ استفاده می‌شود که بسیاری از این روش‌ها به روش‌های آزمون غیرمخرب صنعتی شباهت دارند. برای مثال روش سونوگرافی^۴ از نظر اصول و نحوه به‌کارگیری مشابهت زیادی با آزمون فراصوتی^۵ دارد. روش پرتونگاری^۶ نیز تقریباً در هر دو کاربرد پزشکی و صنعتی یکسان است. شکل ۱.۱ تصاویری از پرتونگاری پزشکی و صنعتی را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۱.۱ (الف) پرتونگاشت صنعتی از وضعیت داخلی یک اسلحه، (ب) پرتونگاشت پزشکی از دستی که استخوان آن شکسته است.

^۱ integrity

^۲ Development and application of technical methods to examine materials or components in ways that do not impair their future usefulness and serviceability, in order to detect, locate, measure and evaluate flaws, to assess integrity, properties and composition, and to measure geometrical characteristics. (ISO/TS 18173-2005)

^۳ noninvasive methods

^۴ sonography or medical ultrasound

^۵ ultrasonic testing

^۶ radiography



(ب)



(الف)

شکل ۲.۱ (الف) تابوت یک مصری که در موزه بریتانیا در شهر لندن نگهداری می‌شود، (ب) تصویر پرتونگاری از جسد مومیایی که بدون بازکردن تابوت به دست آمده است.

شکل ۲.۱ نیز تصویری از پرتونگاری انجام شده روی یک مومیایی را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از کاربرد NDT در اشیاء هنری و عتیقه‌جات است. شکل ۲.۱ (ب) تصویر پرتونگاری این مومیایی است که بدون باز کردن تابوت گرفته شده است. این مومیایی مصری نسرنبوب^۱ نام دارد و در موزه بریتانیا^۲ در شهر لندن نگهداری می‌شود [۲].

۲.۱ نقش آزمون‌های غیرمخرب در سلامت و ایمنی

آزمون‌های غیرمخرب نقش مهمی در سلامت و ایمنی جامعه دارند و اطمینان از ایمنی بسیاری از

^۱Nesperennub

^۲British museum



شکل ۳.۱ هواپیمای بویینگ ۷۳۷ پرواز Aloha 243 که در سال ۱۹۸۸ به علت ایجاد ترک در سطح خارجی بدنه دچار سانحه شد.

تجهیزات و وسایلی که هر روز با آنها سروکار داریم با به‌کارگیری این آزمون‌ها حاصل می‌شود. از جمله این موارد می‌توان به‌کارگیری آزمون‌های غیرمخرب در اطمینان از سلامتی و ایمنی هواپیماها، قطارها، وسایل شهربازی، آسانسورها و ... را نام برد. شکل ۳.۱ مربوط به یکی از مهم‌ترین حوادث هوایی است که در سال ۱۹۸۸ در آمریکا به وقوع پیوست و در آن یک هواپیمای بویینگ ۷۳۷ به علت کنده‌شدن بخشی از بدنه مجبور به فرود اضطراری شد. شکل ۴.۱ نیز شکستگی چرخ هواپیمای فوکر ۱۰۰ را نشان می‌دهد که در شهریور ۱۳۹۵ به هنگام برخاستن هواپیما در فرودگاه مهرآباد تهران روی داد.

بدترین حادثه ریلی مربوط به خارج شدن قطاری پرسرعت از خط در نزدیکی شهر اِشده^۱ آلمان است. این حادثه در سال ۱۹۸۸ در اثر وجود عیبی در ریل قطار روی داد و در آن ۱۰۱ نفر کشته و ۸۸ نفر مجروح شدند (شکل ۵.۱).

۳.۱ روش‌های آزمون غیرمخرب

در طول سالیان گذشته، اصطلاحات مختلفی برای اشاره به آزمون‌های غیرمخرب استفاده شده است که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

^۱ Eschede



شکل ۴.۱ شکستگی چرخ هواپیمای فوکر ۱۰۰ در فرودگاه مهرآباد تهران

Nondestructive ^۱ Testing	☐ آزمون غیرمخرب (NDT)
Nondestructive Evaluation	☐ ارزیابی غیرمخرب (NDE)
Nondestructive Inspection	☐ بازرسی غیرمخرب (NDI)
Nondestructive Characterization	☐ ویژگی‌یابی غیرمخرب (NDC)
Nondestructive Examination	☐ آزمایش غیرمخرب (NDE یا NDEx)

آزمون غیرمخرب یا NDT قدیمی‌ترین اصطلاحی است که استفاده شده است. این اصطلاح معمولاً به تشخیص عیوب در مواد و قطعات اشاره دارد. اصطلاح آزمون غیرمخرب (NDT) بیشتر در جوامع صنعتی کاربرد دارد؛ در حالی که ارزیابی غیرمخرب (NDE) بیشتر در جوامع علمی و دانشگاهی استفاده می‌شود. از نظر معنا نیز NDE علاوه بر عیب‌یابی قطعات به جنبه‌های دیگر آزمون‌های غیرمخرب، که فراتر از عیب‌یابی است، اشاره دارد که مواردی چون اندازه‌گیری ویژگی‌های قطعات و مواد همچون خواص مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی را شامل می‌شود. در مورد سه ترکیب دیگر هم باید گفت که NDI از نظر معنا معادل NDT است و هر یک در صنایع خاصی استفاده می‌شود. از جمله صنایعی که در آنها اصطلاح بازرسی غیرمخرب یا NDI رایج

^۱ واژه nondestructive در انگلیسی دارای دو املا متفاوت است: nondestructive و non-destructive. مورد اول، که بدون خط فاصله است، املا آمریکایی این واژه است و مورد دوم که در آن یک خط فاصله بعد از پیشوند non وجود دارد، املا انگلیسی (British) آن است.



شکل ۵.۱ حادثه خروج قطار پرسرعت از خط در سال ۱۹۸۸ در آلمان

است، می‌توان به صنایع هوایی و فولادسازی اشاره کرد [۳]. اصطلاح ویژگی‌یابی غیرمخرب یا NDC بیشتر توسط مهندسين مواد استفاده می‌شود و دلالت بر به‌کارگیری روش‌های غیرمخرب برای شناسایی ویژگی‌های مختلف مواد همچون دانه‌بندی، تنش پسماند، نوع عملیات حرارتی و غیره دارد. اصطلاح آزمایش غیرمخرب نیز معادل آزمون غیرمخرب است.

آزمون‌های غیرمخرب به روش‌های مختلفی انجام می‌شوند. شماری از این روش‌ها، که در استاندارد INSO-ISO 9712 به آنها اشاره شده است، عبارتند از [۴]:

Acoustic Emission Testing (AT)	☐ آزمون نشر آوایی
Eddy Current Testing (ET)	☐ آزمون جریان گردابی
Infrared Thermographic Testing (TT)	☐ آزمون دمانگاری فروسرخ
Leak Testing (LT)	☐ آزمون نشت
Magnetic Testing (MT)	☐ آزمون مغناطیسی
Penetrant Testing (PT)	☐ آزمون مایع نافذ
Radiographic Testing (RT)	☐ آزمون پرتونگاری
Strain Gauge Testing (ST)	☐ آزمون کرنش سنج
Ultrasonic Testing (UT)	☐ آزمون فراصوتی
Visual Testing (VT)	☐ آزمون چشمی

در مورد تعداد آزمون‌های غیرمخرب نمی‌توان عددی را به قطعیت ذکر کرد. در مرجع [۵] به تعداد قابل توجهی از آزمون‌ها پرداخته شده است. با پیشرفت علم و فناوری، به تدریج روش‌های جدیدتری ابداع و یا روش‌های قبلی توسعه می‌یابد. برای مثال، پرتونگاری دیجیتال، که زیرمجموعه پرتونگاری است، در چند سال گذشته با ایجاد فناوری دیجیتال و توسعه رایانه‌ها مورد توجه قرار گرفته و قبل از آن مطرح نبوده است.

روش‌های آزمون غیرمخرب را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های عامل^۱ و روش‌های غیرعامل^۲ تقسیم کرد. در روش‌های عامل نوعی از انرژی به درون قطعه فرستاده می‌شود ولی در روش‌های غیرعامل هیچ‌گونه انرژی به درون قطعه ارسال نمی‌شود. برای مثال، در روش فراصوتی، انرژی صوتی به درون قطعه ارسال می‌شود و این روش یک روش عامل است ولی در روش چشمی، که یک روش غیرعامل است، هیچ نوعی از انرژی به درون قطعه فرستاده نمی‌شود و قطعه فقط با چشم مسلح یا غیرمسلح مورد بازرسی قرار می‌گیرد.

۴.۱ کاربردهای آزمون غیرمخرب

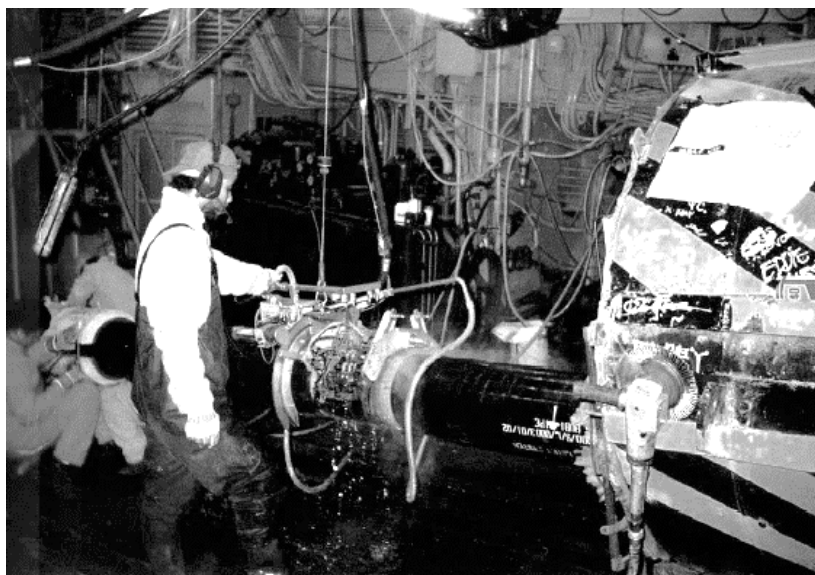
به‌طور کلی، یکی از اصلی‌ترین اهداف به‌کارگیری آزمون‌های غیرمخرب، شناسایی عیوب در مواد، قطعات و تجهیزات است. این عیوب ممکن است در ماده خام اولیه وجود داشته باشد یا در حین ساخت ایجاد شود و یا در زمان به‌کارگیری قطعه (سرویس) به‌وجود آید. صرف نظر از این که عیب چگونه و در چه زمانی ایجاد شده است، آزمون‌های غیرمخرب می‌توانند آن را شناسایی و ارزیابی کنند. به‌طور کلی، آزمون‌های غیرمخرب در تمامی مراحل تولید و ساخت قطعات و دستگاه‌ها، که در زیر آمده است، به‌کار گرفته می‌شوند:

- بازرسی مواد خام
- بازرسی در حین ساخت (اطمینان از انجام صحیح فرایند ساخت، اطمینان از مونتاژ صحیح و ...)
- بازرسی در حین کار (سرویس)
- پژوهش و تحقیق

شکل ۶.۱ بازرسی فراصوتی اتوماتیک جوش لوله‌های نفت را پس از جوشکاری و قبل از قرار گرفتن در کف دریا (بازرسی در حین ساخت) نشان می‌دهد و شکل ۷.۱ نیز نشان‌دهنده

^۱active

^۲passive



شکل ۶.۱ آزمون فراصوتی (UT) اتوماتیک جوش لوله نفت در زمان لوله‌گذاری در دریا

بازرسی چرخ هواپیما قبل از پرواز (حین کار) به روش مایع نافذ است. عیوبی که در قطعات ایجاد می‌شوند انواع و اقسام مختلفی دارند و علل ایجاد هریک از آنها نیز متفاوت است. در اینجا بد نیست که چند اصطلاح برای اشاره به انواع عیوب را مرور کنیم. واژه‌های «ناپیوستگی^۱»، «نقص^۲» و «عیب^۳» هریک مفهوم معینی دارد. وجود یک ناپیوستگی با آزمون غیرمخرب قابل تشخیص است ولی قطعه‌ای که دارای ناپیوستگی است لزوماً رد^۴ نیست. نقص نیز به معنی ناکاملی قطعه است که می‌تواند قابل رفع شدن باشد. واژه عیب به ناپیوستگی یا نقصی اطلاق می‌شود که قابل رفع شدن نیست و باعث رد شدن قطعه می‌شود. تصمیم‌گیری در مورد قبول یا رد بودن یک ناپیوستگی باید بر اساس یک استاندارد انجام شود.

۵.۱ مدارک فنی در آزمون‌های غیرمخرب

مدارک فنی مختلفی در آزمون‌های غیرمخرب استفاده می‌شود که مهم‌ترین آنها عبارت است از:

^۱ discontinuity

^۲ flaw

^۳ defect

^۴ reject



شکل ۷.۱ آزمون فراصوتی چرخ هواپیما به روش مایع نافذ (PT) [۶].

استاندارد^۱، کُد^۲، مشخصات^۳، رویه^۴ و دستورالعمل^۵. در ادامه به تشریح مختصر هر یک از این مدارک خواهیم پرداخت.

استاندارد: مدرکی است که الزامات فنی و مهندسی را برای محصولات، فعالیت‌ها و یا روش‌های آزمون غیرمخرب معین می‌سازد. استانداردهایی که در آزمون غیرمخرب بسیار مورد توجه‌اند، استانداردهای احراز شرایط و تأیید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب و استانداردهای انجام آزمون‌های غیرمخرب هستند. مهم‌ترین استاندارد احراز شرایط و تأیید صلاحیت کارکنان، استاندارد بین‌المللی ISO 9712 [۷] است که معادل ایرانی آن استاندارد INSO-ISO 9712 [۴] است.

^۱standard

^۲code

^۳specifications

^۴procedure

^۵instruction

کُد: کدها استانداردهایی هستند که جنبه قانونی یافته‌اند و رعایت آنها الزامی است. کدها مجموعه قوانینی را ارائه می‌دهند که رعایت آنها متضمن دستیابی به حداقل سطح ایمنی برای محصولات ساخته شده است. از جمله کدهایی که در NDT استفاده می‌شوند، می‌توان به کد ASME برای دیگ‌های بخار و مخازن تحت فشار [۸] و نیز کد جوشکاری ساختمان AWS-D1.1 [۹] اشاره کرد.

مشخصات: مدرکی است که معمولاً شرکت‌های خصوصی برای تعیین الزامات بیشتری نسبت به آنچه کدها و استانداردها تعیین کرده‌اند، آماده و در هنگام عقد قرارداد به کارفرما ارائه می‌کنند. **رویه:** یک رویه NDT بر اساس یک کد یا یک استاندارد یا مشخصات معینی برای انجام یک آزمون غیرمخرب خاص نوشته می‌شود و در آن تمامی متغیرهای اصلی، نحوه انجام آزمون و موارد ایمنی ذکر می‌شود. کارکنان سطح سه^۱ NDT وظیفه نگارش رویه‌ها را به عهده دارند.

دستورالعمل: یک دستورالعمل NDT معمولاً بر اساس یک رویه NDT نوشته می‌شود و در آن جزئیات انجام آزمون به صورت روشن و کامل ذکر می‌شود تا کارکنان آزمون‌های غیرمخرب با استفاده از آن بتوانند به درستی آزمون را انجام دهند. کارکنان سطح دو^۲ و یا سطح سه می‌توانند دستورالعمل انجام یک آزمون غیرمخرب را برای روشی که در آن تأیید صلاحیت شده‌اند، بنویسند.

۶.۱ مجریان آزمون غیرمخرب

آزمون‌های غیرمخرب باید توسط افرادی آموزش دیده که دارای گواهینامه معتبر برای انجام آزمون هستند، انجام شود. به طور کلی، صدور گواهینامه^۳ به دو صورت مرکزی^۴ و کارفرمایی^۵ انجام می‌شود. در روش مرکزی، گواهینامه توسط یک مرکز گواهی‌کننده معتبر^۶ صادر می‌شود و در روش کارفرمایی گواهینامه را کارفرما بر اساس استانداردها و دستورالعمل‌های معین و تأیید شده صادر می‌کند. رایج‌ترین روش صدور گواهینامه کارفرمایی بر اساس توصیه نامه SNT-TC-1A انجمن آزمون‌های غیرمخرب آمریکا (ASNT^۷) انجام می‌گیرد [۱۰]. در سال‌های اخیر، به منظور یکسان‌سازی نحوه آموزش و احراز شرایط افرادی که در زمینه آزمون‌های غیرمخرب

^۱Level III

^۲Level II

^۳certificate

^۴central

^۵employer-based

^۶authorized certification body

^۷American Society for Nondestructive Testing

فعالیت دارند، از استاندارد مرکزی ISO 9712 استفاده می‌شود [۷]. بر اساس این استاندارد، افراد می‌توانند در سه سطح آموزش دیده و گواهی‌نامه دریافت کنند. این سه سطح عبارتند از:

■ **سطح ۱-** فرد دارای گواهینامه سطح ۱ صلاحیت دارد آزمون غیرمخرب را مطابق

با دستورالعمل‌های کتبی و زیر نظر یک فرد سطح ۲ یا ۳ انجام دهد. دارنده گواهینامه

سطح ۱ باید بتواند:

☐ دستگاه را تنظیم کند؛

☐ آزمون‌ها را انجام دهد؛

☐ نتایج را بر اساس دستورالعمل‌های مکتوب ثبت و طبقه‌بندی کند؛

☐ نتایج را گزارش کند.

■ **سطح ۲-** فرد دارای گواهینامه سطح ۲ صلاحیت دارد که آزمون غیرمخرب را مطابق

با دستورالعمل‌های شناخته شده و مورد قبول هدایت کرده و یا خود انجام دهد. وظایف

وی شامل موارد زیر است:

☐ تعریف محدودیت‌های استفاده از روشی که وی گواهینامه انجام آن را دارد؛

☐ درک و تبدیل کدها، استانداردها و مشخصات آزمون‌های غیرمخرب به صورت

دستورالعمل‌های اجرایی که در انجام کارهای عملی مورد استفاده قرار گیرند؛

☐ تنظیم دستگاه و نیز تشخیص تنظیم بودن دستگاه؛

☐ انجام آزمون‌ها و نظارت بر انجام آنها؛

☐ تفسیر و ارزیابی نتایج بر اساس کدها، استانداردها و مشخصات فنی مربوطه؛

☐ تهیه دستورالعمل‌های انجام آزمون غیرمخرب؛

☐ انجام و یا نظارت بر تمامی وظایفی که یک فرد سطح ۱ به عهده دارد؛

☐ آموزش و یا راهنمایی افرادی که صلاحیت آنها کمتر از سطح ۲ است؛

☐ آماده سازی و ارائه نتایج آزمون غیرمخرب.

■ **سطح ۳-** فرد دارای گواهینامه سطح ۳ می‌تواند هرگونه فعالیتی را در رابطه با روش (های)

NDT که وی گواهینامه انجام آنها را دارد، هدایت کند. این فعالیت‌ها شامل موارد زیر

است:

☐ دارا بودن مسئولیت کامل در قبال تجهیزات و کارکنان NDT؛

☐ ارائه و یا تأیید روش‌ها و رویه‌ها؛

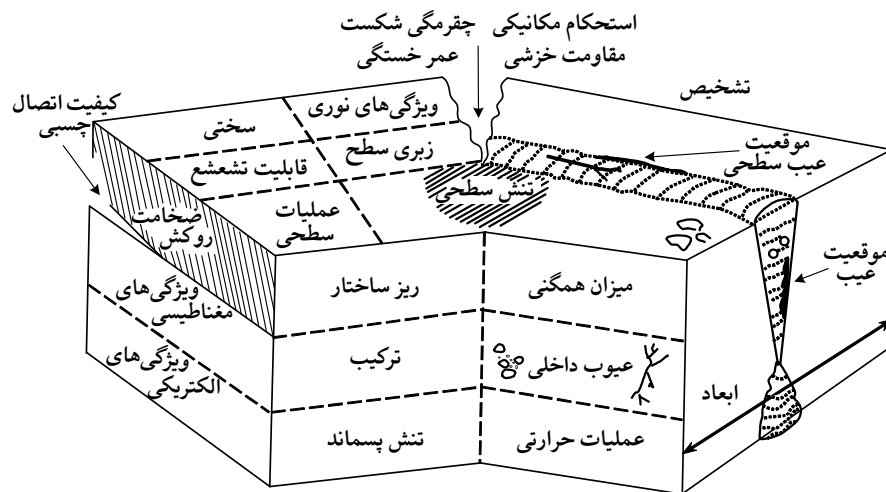
- ☐ تفسیر کدها، استانداردها، مشخصات فنی و رویه‌ها؛
- ☐ تعیین روش‌ها و رویه‌های خاصی که برای انجام عملیات NDT معینی باید استفاده شوند؛
- ☐ تفسیر و ارزیابی نتایج بر اساس کدها، استانداردها و مشخصات فنی موجود؛
- ☐ مدیریت امتحانات احراز شرایط در صورتی که مرجع معتبر احراز شرایط به وی این مجوز را داده باشد؛
- ☐ انجام و یا نظارت بر کلیه وظایفی که افراد سطح ۱ و ۲ بر عهده دارند. همچنین فرد دارای گواهینامه سطح ۳ باید:
- ☐ دارای تجربه عملی کافی در رابطه با مواد، ساخت و فناوری تولید باشد تا بتواند روش‌های انجام آزمون را انتخاب و چگونگی انجام آنها را معین کند و نیز در صورت عدم وجود مبانی قبول یا رد قطعات بازرسی شده، این مبانی را تعیین کند؛
- ☐ آشنایی کلی با سایر روش‌های NDT داشته باشد؛
- ☐ بتواند پرسنل پایین تر از سطح ۳ را آموزش داده و یا مدیریت کند.

۷.۱ توانایی‌های آزمون‌های غیرمخرب

آزمون‌های غیرمخرب توانایی‌های متنوعی دارند. از یک جنبه، آزمون‌های غیرمخرب را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد:

۱. آزمون‌های غیرمخربی که تنها می‌توانند عیوب سطحی را شناسایی کنند مانند PT و VT؛
۲. آزمون‌هایی که می‌توانند علاوه بر عیوب سطحی، عیوب زیرسطحی (در عمق کمی از سطح) را نیز شناسایی کنند، همچون MT و ET؛
۳. آزمون‌هایی که می‌توانند علاوه بر عیوب سطحی و زیر سطحی، عیوب داخلی قطعه را نیز شناسایی کنند، نظیر UT و RT.

امروزه، علاوه بر شناسایی عیوب، آزمون‌های غیرمخرب برای تشخیص و اندازه‌گیری ویژگی‌های دیگری از مواد و قطعات نیز استفاده می‌شوند که شماری از آنها در شکل ۸.۱ آمده است. البته، توانایی‌های آزمون‌های غیرمخرب تنها محدود به موارد ذکر شده در شکل ۸.۱ نیست و این توانایی‌ها با پیشرفت علم و فناوری هر روز در حال گسترش است.



شکل ۸.۱ شماری از توانایی های آزمون های غیرمخرب در تشخیص و اندازه گیری ویژگی های مواد

تمرین ۱.۱

- ۱- آزمون های غیرمخرب به جز کاربردهای صنعتی، چه کاربردهای دیگری دارند؟
- ۲- چه تفاوتی بین اصطلاحات NDT، NDE، NDI، NDC و NDEx وجود دارد؟
- ۳- چه تفاوتی بین روش های غیرمخرب عامل و غیرعامل وجود دارد؟
- ۴- آزمون های غیرمخرب چه کاربردهایی دارند؟
- ۵- چه تفاوتی بین کد و استاندارد وجود دارد؟
- ۶- رویه آزمون غیرمخرب چیست و توسط چه کسی تهیه می شود؟
- ۷- بر اساس استانداردهای رایج، آموزش کارکنان آزمون های غیرمخرب در چند سطح انجام می شود و رده بندی مهارتی این سطوح چگونه است؟
- ۸- آزمون های غیرمخرب از نظر توانایی در شناسایی عیوب سطحی و عمقی چگونه دسته بندی می شوند؟ برای هر مورد یک مثال بزنید.
- ۹- آزمون های غیرمخرب به جز شناسایی عیوب، چه ویژگی های دیگری از مواد و قطعات را می توانند تشخیص دهند. پنج مورد را نام ببرید.

مراجع

- [1] “Non-destructive testing — general terms and definitions,” Standard ISO/TS 18173, International Organization for Standardization, Switzerland, 2005.
- [2] J. H. Taylor. *Mummy: the inside story*. The British Museum Press, 2011.
- [3] *Nondestructive Testing Handbook*, vol. 10. American Society for Nondestructive Testing, 2nd ed. , 1996.
- [۴] “آزمون غیرمخرب-احراز شرایط و گواهی کردن کارکنان آزمون‌های غیرمخرب،” استاندارد ملی ایران-ایزو ۹۷۱۲، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۶.
- [5] *ASM Handbook: Nondestructive evaluation and quality control*, vol. 17. ASM International, 1989.
- [6] P. J. Shull. *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*. CRC Press, 2002.
- [7] “Non-destructive testing — qualification and certification of NDT personnel,” Standard ISO 9712, International Organization for Standardization, Switzerland, 2012.
- [8] “ASME boiler and pressure vessel code — nondestructive examination,” Code BPVC.V, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2019.
- [9] “Structural welding code — steel,” Code AWS D1.1, An American National Standard, Florida, 2020.
- [10] *Recommended Practice No. SNT-TC-1A: Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing*. American Society for Nondestructive Testisng, 2016.