

**شرکت پترو پولاد پارس**  
**((سازنده سازه های سبک و سنگین فلزی))**



Petro Poulad Pars.Co

**مروری بر انتخاب روشهای NDT**



- ۱ ..... روش های بازرسی غیر مخرب
- ۱ ..... ۱ - مفهوم بازرسی غیر مخرب
- ۳ ..... ۲ - انتخاب روش های بازرسی غیر مخرب

## روشهای بازرسی غیرمخرب

### ۱ - مفهوم بازرسی غیر مخرب

تست غیرمخرب (NDT) به روشهای بازرسی اطلاق می شود که در آن ها کارایی یک قطعه بدون تغییر یا از بین رفتن آن قطعه، مورد بررسی قرار می گیرد [۱].

تست غیرمخرب<sup>۱</sup> (NDT) در بردارنده عبارات متعددی است که برای توصیف فعالیت های متنوعی در این زمینه به کار گرفته می شوند. برخی از این عبارات، عبارتند از بررسی غیرمخرب<sup>۲</sup> (NDE)، بازرسی غیرمخرب<sup>۳</sup> (NDI) و آزمون غیرمخرب (که NDE نامیده شده ولی شاید بهتر باشد NDEX نامیده شود). این فعالیت ها مشتمل بر آزمایش، بازرسی و آزمون هستند، که شباهت آن ها از این جهت است که همگی در درجه اول با نگاه افکندن به (یا به درون) یا اندازه گیری مشخصه ای در مورد یک قطعه، به منظور تعیین برخی مشخصه های آن قطعه یا به منظور تعیین این که آیا قطعه مورد بررسی دارای نامنظمی ها، ناپیوستگی ها یا نقص هایی می باشد یا خیر، همراهند [۲].

تست های غیرمخرب به علل زیر روی قطعات جوش اعمال می شوند:

۱- افزایش قابلیت اطمینان محصول

۲- جلوگیری از حوادث با حذف محصولات معیوب

۳- تعیین قابل قبول بودن قطعه با توجه به یک کد یا مشخصه<sup>۴</sup>

۴- حصول اطلاعات برای تصمیم گیری در مورد تعمیرات

۵- کاهش هزینه با حذف فرآوری بعدی اجزاء مردود

عبارات نامنظمی، ناپیوستگی و نقص<sup>۵</sup> هر سه می توانند به جای یکدیگر برای توصیف چیزی که در یک بخش از مجموعه سؤال برانگیز می شود، به کار گرفته شوند، اما مشخصات فنی، نظام نامه ها و کاربری محلی<sup>۶</sup> می توانند سبب ارائه تعاریف متفاوتی از این عبارت ها شوند. از آنجایی که این عبارات، همگی توصیف کننده چیزی هستند که از

<sup>۱</sup>- Nondestructive Testing

<sup>۲</sup>- Nondestructive Examination

<sup>۳</sup>-Nondestructive Inspection

<sup>۴</sup>- Specification

<sup>۵</sup>- Flaw

<sup>۶</sup>- Local Usage

طریق آزمایش، بازرسی و آزمون، مورد جستجو قرار می‌گیرد، عبارت NDE (بررسی غیرمخرب) برای در بر گرفتن تمامی فعالیت‌ها NDT، NDI، NDEX مطرح شده است که به منظور یافتن، تعیین مکان و اندازه یا تعیین مشخصه‌ای در خصوص قطعه یا نقایص مورد استفاده قرار گرفته و به محقق امکان می‌دهند که درخصوص این که قطعه یا نقایص، قابل پذیرش هستند یا خیر، تصمیم‌گیری کند. نقصی که غیرقابل پذیرش ارزیابی شده باشد معمولاً به عنوان عیب<sup>۱</sup> نامیده می‌شود [۲].

روش‌های بازرسی غیرمخرب، به جز در بازرسی چشمی، شامل المان‌های زیر می‌باشند:

۱- منبع انرژی

۲- یک قطعه کار که با منبع انرژی هماهنگی داشته باشد

۳- قطعه آزمون برای اندازه‌گیری تفاوت‌ها، یا اثرات انرژی اعمالی

۴- وسیله‌ای برای نشان دادن و ثبت نتایج آزمون

۵- اپراتور آموزش دیده

۶- دستورالعمل برای انجام تست<sup>۲</sup>

۷- سیستم گزارش نتایج

مشترکات زیادی بین کاربرد آزمون‌های مخرب و غیرمخرب وجود دارد. آزمون‌های مخرب یا آزمون‌های اثباتی معمولاً برای تکمیل، تأیید یا تعیین حدود آزمون‌های غیرمخرب و تأمین اطلاعات اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نوع انرژی که می‌توان برای آزمون غیرمخرب یک قطعه جوش به کار برد، به خواص فیزیکی فلز پایه و فلز جوش و طراحی اتصال بستگی دارد. دانش دقیق در مورد هر یک از روش‌های NDT برای انتخاب صحیح روش‌های مناسب در هر کاربرد ضروری است. روش‌های متداول NDT که قابل به‌کارگیری برای بررسی قطعات جوش هستند عبارتند از:

۱- بررسی چشمی (VT)<sup>۳</sup>، با استفاده یا بدون استفاده از ابزارهای نوری کمکی

۲- مایع نافذ (PT)<sup>۴</sup>

۳- ذرات مغناطیسی (MT)<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>- Defect

<sup>۲</sup>- Procedure

<sup>۳</sup>- Visual Testing

<sup>۴</sup>- Liquid Penetrate Testing

<sup>۵</sup>- Magnetic Particle Testing

۴- رادیوگرافی<sup>۱</sup> (RT)

۵- جریان گردابی<sup>۲</sup> (ET)

۶- آلتراسونیک<sup>۳</sup> (UT)

۷- انتشار امواج صوتی<sup>۴</sup> (AET)

علاوه بر روش های ذکر شده ، روش های دیگری همچون انتقال حرارت<sup>۵</sup> و تست فریت<sup>۶</sup> وجود دارند، که در موارد خاصی مورد استفاده قرار می گیرند [۱].

## ۲- انتخاب روش های بازرسی غیر مخرب

انتخاب صحیح یک روش NDT یا تلفیقی از روش های NDT در وهله اول نیازمند آگاهی دقیق از مسأله مورد نظر می باشد. پس از آن ضروری است که از میان گزینه های مختلف، روش های NDT که مناسب تر می باشند، انتخاب شوند [۲].

راه های متعدد و متفاوتی برای مقایسه روش های NDT منتخب در این جزوه ارائه شده اند، ولی اساساً سیستم مقایسه ای که به طور کامل پذیرفتنی باشد وجود ندارد، چرا که نتایج، وابستگی بسیار زیادی به کاربرد مورد نظر دارند. بنابراین، توصیه می شود مقایسه به طور خاص برای هر بخش NDT و کاربرد مشخص بسط داده شود. اعتباریابی نهایی هر روش NDT بستگی به آزمایش های پذیرش انجام گرفته با استفاده از استانداردهای مناسب کالیبراسیون خواهد داشت.

تست غیرمخرب به آسانی می تواند به نه زمینه مجزا تقسیم گردد:

- تشخیص و بررسی (ارزیابی) نقایص
- تشخیص و بررسی نشتی
- متروлоژی (اندازه گیری ابعاد) و ارزیابی
- تعیین و بررسی مکان
- شناسایی ساختار یا ریزساختار

<sup>۱</sup>- Radiographic Testing

<sup>۲</sup>- Eddy Current Testing

<sup>۳</sup>- Ultrasonic Testing

<sup>۴</sup>- Acoustic emission Testing

<sup>۵</sup>- Heat Transfer Testing

<sup>۶</sup>- Ferrite Testing

#### • هزینه

روش های مختلف بازرسی در شرایط متفاوت هزینه های مختلفی را شامل می شوند. دو عامل اصلی هزینه که در انتخاب روش بازرسی غیر مخرب باید مد نظر قرار گیرند، هزینه تجهیزات اولیه و هزینه اجرای بازرسی می باشند. بازرسی چشمی معمولاً همیشه ارزان ترین روش است اما فقط به تشخیص ناپیوستگی های سطحی محدود می شود. به طور کلی، هزینه روش های بازرسی رادیوگرافی، آلتراسونیک و جریان گردابی بیشتر از هزینه روش های چشمی، ذرات مغناطیسی و مایع نافذ است. انتخاب روش مناسب می تواند بسیار پیچیده باشد. برای رسیدن به هدف مورد نظر و به حداقل رساندن هزینه ها، عموماً از یک تکنسین یا مهندس تست های غیر مخرب کمک گرفته می شود [۱].

#### • تشخیص و ارزیابی نقایص

تشخیص نقایص، معمولاً مهمترین جنبه NDT محسوب می گردد. رویکردهای متعددی برای گزینش روش های NDT متصور است. یکی از رویکردها چنین است که فرض شود تنها شش عامل بنیادی در انتخاب روش های NDT دخیل هستند:

- دلیل (دلایل) به کارگیری NDT
  - نوع (انواع) نقایص مورد نظر در نمونه مورد آزمایش
  - اندازه و جهت گیری نقصی که قابل رد کردن<sup>۱</sup> است.
  - مکان پیش بینی شده نقایص مورد نظر در نمونه مورد آزمایش
  - اندازه و شکل نمونه مورد آزمایش
  - ویژگی های ماده مورد ارزیابی
- مهمترین سوالاتی که باید پیش از انتخاب یک روش NDT به آن پاسخ داد، این است که دلیل (دلایل) انتخاب یک روش NDT چیست؟ در این خصوص دلایل مختلفی محتمل هستند، دلایلی از قبیل:
- تعیین این امر که آیا قطعه مفروض پس از هرگام از مراحل ساخت، قابل پذیرش است یا خیر؛ این شاخه می تواند NDT در حین فرآیند یا بازرسی در حین فرآیند نامیده شود.

<sup>۱</sup> - Reject able



- تعیین این امر که آیا قطعه مفروض برای مصرف نهایی قابل پذیرش است یا خیر، این شاخه می‌تواند NDT نهایی یا بازرسی نهایی نامیده شود.
  - تعیین این امر که آیا یک قطعه از پیش موجود که هم اکنون در حال استفاده است، برای تداوم استفاده قابل پذیرش است یا خیر؛ این شاخه می‌تواند NDT در حین سرویس یا بازرسی در حین سرویس نامیده شود.
- پس از تعیین دلایل انتخاب NDT، شخص باید انواع نقایص رد شدنی، اندازه و جهت‌گیری نقایص رد شدنی و مکان‌های نقایصی را که منجر به رد شدن قطعه می‌گردند، مشخص کند. نوع، اندازه، جهت‌گیری و مکان نقایصی که رد شدنی هستند، حتی‌الامکان می‌بایست توسط آنالیز تنش و یا محاسبات مکانیک شکست، تعیین گردد. در صورتی که انجام دقیق و قطعی محاسبات به لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نباشد، نوع، اندازه و جهت‌گیری نقایصی که منجر به رد شدن قطعه خواهند شد، می‌بایست با فاکتور ایمنی مقتضی، تخمین زده شوند.
- نوع، اندازه، جهت‌گیری و مکان نقص رد شدنی، غالباً توسط یک نظام‌نامه، استاندارد، یا مجموعه الزامات تعیین می‌گردد. از قبیل مواردی چون نظام‌نامه انجمن مهندسين مکانیک آمریکا برای مخازن تحت فشار<sup>۱</sup>، الزامات کمیسیون مقررات هسته ای<sup>۲</sup>، یا نظام‌نامه انجمن جوشکاری آمریکا برای جوشکاری سازه<sup>۳</sup>. در صورتی که یکی از این نوع نظام‌نامه‌ها یا قوانین، در خصوص قطعه موردنظر صدق کند، اطلاعات مورد نیاز در مستندات مربوطه قابل دسترسی خواهد بود [۲].

#### • نقایص حجمی و صفحه‌ای

پس از آن‌که اندازه و جهت‌گیری نقص رد شدنی معین گردید، ضروری است نوع نقایص رد شدنی تعیین گردند. به طور کلی دو نوع نقص وجود دارد: حجمی و صفحه‌ای. نقایص حجمی را می‌توان توسط سه بعد یا حجم توصیف کرد. جدول ۱ فهرستی از برخی انواع نقایص حجمی را به انضمام روش‌های NDT مقتضی جهت تشخیص آن‌ها ارائه می‌کند. نقایص صفحه‌ای در یک بعد، باریک ولی در دو بعد دیگر بزرگتر هستند.

<sup>۱</sup>- American Society for Mechanical Engineers pressure vessel code (ASME)

<sup>۲</sup>- Nuclear regulatory commission requirement

<sup>۳</sup>- American Welding Society structural welding code

جدول ۲، برخی انواع نقایص دو بعدی را به انضمام روش های NDT مقتضی جهت تشخیص آنها فهرست می کند [۲].

جدول ۱: برخی انواع نقایص حجمی و روش های NDT مناسب جهت تشخیص [۲].

<b>Volumetric flaws</b>
Porosity
Inclusions
Slag
Tungsten
Other
Shrinkage
Holes and voids
Corrosion thinning
Corrosion pitting
<b>NDE detection methods</b>
Visual (surface)
Replica (surface)
Liquid penetrant (surface)
Magnetic particle (surface and subsurface)
Eddy current
Microwave
Ultrasonic
Radiography
X-ray computed tomography
Neutron radiography
Thermography
Optical holography
Speckle metrology
Digital image enhancement (surface)

جدول ۲: برخی انواع نقایص دوبعدی و روش های NDT مناسب جهت تشخیص [۲].

<b>Planar flaws</b>
Seams
Lamination
Lack of bonding
Forging or rolling lap
Casting cold shut
Heat treatment cracks
Grinding cracks
Plating cracks
Fatigue cracks
Stress-corrosion cracks
Welding cracks
Lack of fusion
Incomplete penetration
Brazing debond
<b>NDE detection methods</b>
Visual
Replication microscopy
Magnetic particle
Magnetic field
Eddy current
Microwave
Electric current perturbation
Magnabsorption
Ultrasonic
Acoustic emission
Thermography



جدول ۳: روش های NDT مورد استفاده جهت نقایص سطحی و داخلی (۲).

Surface
Visual
Replica
Liquid penetrant
Magnetic particle
Magnetic field
Electric current
Magnabsonption
Eddy current
Ultrasonic
Acoustic emission
Thermography
Optical holography
Speckle metrology
Acoustic holography
Digital image enhancement
Acoustic microscopy
Interior
Magnetic particle (limited use)
Magnetic field
Electric current perturbation
Magnabsonption
Eddy current
Microwave
Ultrasonic
Acoustic emission
Radiography
X-ray computed tomography
Neutron radiography
Thermography (possible)
Optical holography (possible)
Acoustic holography (possible)
Acoustic microscopy (possible)

### • مکان ، شکل و اندازه نقص

علاوه بر تقسیم بندی نقایص تحت انواع حجمی و صفحه ای، ضرورت دارد که مکان نقایص در قطعه نیز مد نظر قرار گیرد. نقایص را می توان به سهولت به دو دسته نقایص سطحی و نقایص داخلی که با سطح برخورد ندارند، تقسیم بندی کرد. جدول ۳، روش های NDT مورد استفاده جهت نقایص سطحی و داخلی را فهرست می کند.

دو عامل دیگر که انتخاب روش NDT را تحت تأثیر قرار می دهند، شکل و اندازه قطعه مورد ارزیابی هستند. جدول ۴ و ۵ تکنیک های NDT را برای اندازه (ضخامت) و شکل متغیر، مورد مقایسه قرار می دهد. آن گروه از مشخصه های ماده که ممکن است انتخاب روش NDT را تحت تأثیر قرار دهد، قویاً به روش خاص NDT مورد نظر بستگی دارد. جدول ۶ فهرستی از تعدادی از روش های NDT و مشخصه های حائز اهمیت بحرانی برای هر کدام را ارائه می دهد.

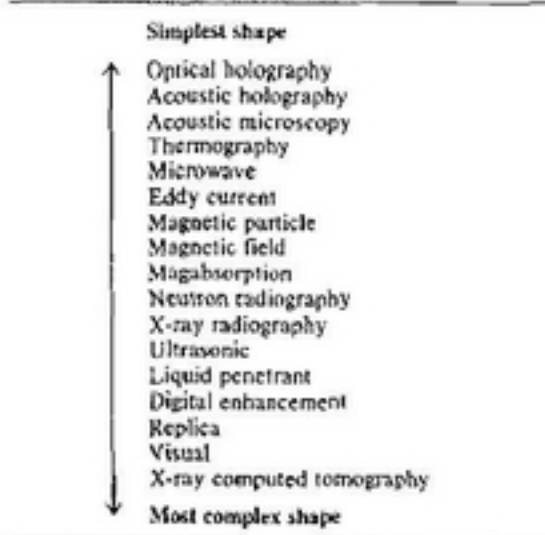
روش خاص NDT را می توان با اعمال تمام عواملی که پیش از این مورد بحث قرار گرفت انتخاب کرد. از آن جایی که هر روش NDT دارای رفتار خاص خود می باشد، غالباً مطلوب آن است که چندین روش NDT با قابلیت های تکمیلی در تشخیص مورد استفاده

قرار گیرند. به عنوان مثال، می‌توان از روش‌های آلتراسونیک و رادیوگرافی همراه با یکدیگر استفاده کرد تا از تشخیص هر دو نوع نقص صفحه‌ای (مانند ترک) و حجمی (مانند تخلخل) اطمینان حاصل شود. [۲].

جدول ۴: مقایسه روش‌های NDT بر پایه اندازه قطعات [۲].

Surface only but independent of size
Visual
Replica
Digital enhancement
Liquid penetrant
Shallow depth or thin object (thickness $\leq 1$ mm, or 0.04 in.)
Magnetic particle
Magnetic field
Magnabsorption
Eddy current
Increased thickness (thickness $\leq 3$ mm, or 0.12 in.)
Microwave
Optical holography
Speckle metrology
Acoustic holography
Acoustic microscopy
Increased thickness (thickness $\leq 100$ mm, or 4 in.)
X-ray computed tomography
Increased thickness (thickness $\leq 250$ mm, or 10 in.)
Neutron radiography(a)
X-ray radiography
Thickest (dimension $\leq 10$ m, or 33 ft)
Ultrasonic
(a) All NDE methods suitable for thick objects can be used on thin objects, except neutron radiography, which is not useful for most thin objects.

جدول ۵: مقایسه روش های NDT بر پایه شکل قطعات [۲].



جدول ۶: فهرستی از روشهای NDT و مشخصه های حائز اهمیت برای هر روش [۲].

Method	Characteristic
Liquid penetrant .....	Flaw must intercept surface.
Magnetic particle .....	Material must be magnetic.
Eddy current .....	Material must be electrically conductive or magnetic.
Microwave .....	Microwave transmission
Radiography and x-ray computed tomography .....	Changes in thickness, density, and/or elemental composition
Neutron radiography .....	Changes in thickness, density, and/or elemental composition
Optical holography .....	Surface optical properties

### • تشخیص و ارزیابی نشتی

از آنجایی که بسیاری از قطعات باید تحمل فشار را داشته باشند، تست غیرمخرب نشتی<sup>۱</sup> از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. روش NDT موسوم به تشخیص نشتی، از تکنیک‌های متعددی سود می‌برد. هر یک از تکنیک‌های نشتی، دارای محدوده کاربرد ویژه‌ای است و انتخاب تکنیک نشتی خاص، صرفاً باید پس از محاسبه دقیق فاکتورهای مشخص مربوطه صورت گیرد [۲].

### • مترولوژی و ارزیابی (بررسی)

اندازه‌گیری ابعاد که تحت عنوان مترولوژی از آن یاد می‌شود، از نظر کاربرد یکی از گسترده‌ترین فعالیت‌های NDT شمرده می‌شود. اگرچه غالباً این روش در کنار سایر فعالیت‌های مرسوم NDT از قبیل تشخیص نقایص لحاظ نمی‌شود. انتخاب سیستم مترولوژی به میزان زیادی به الزامات خاص مربوط به کاربرد مفروض بستگی دارد.

روش‌هایی از قبیل جریان گردابی، آلتراسونیک، هولوگرافی نوری و مترولوژی لکه‌ای<sup>۲</sup> غالباً کاربردهایی در زمینه مترولوژی پیدا می‌کنند [۲].

### • تعیین و ارزیابی (بررسی) مکان

یکی از مسائلی که گاهی مطرح می‌شود این است که آیا یک واحد مونتاژ شده (که حاوی قطعات متعدد می‌باشد)، واقعاً حاوی اجزای لازم هست یا خیر. این نوع از بازرسی منجر به شکل‌گیری نوعی از فعالیت NDT می‌شود که می‌تواند تعیین مکان نام گیرد. معمول‌ترین تکنیک‌های NDT مورد استفاده به منظور تعیین مکان، عبارتند از رادیوگرافی اشعه X، توموگرافی محاسباتی اشعه X و رادیوگرافی نوترونی.

### • شناسایی ساختار یا زیرساختار

یکی دیگر از زمینه‌های قابل توجه NDT، شناسایی ریزساختار است که می‌تواند به صورت درجا<sup>۳</sup> و بدون وارد آمدن آسیب به قطعه انجام گیرد. این کار از طریق

<sup>۱</sup>- Leakage

<sup>۲</sup>- Speckle Metrology

<sup>۳</sup>- in situ

میکروسکوپی به روش همتاسازی<sup>۱</sup> یا با استفاده از روش‌های سنتی میکروسکوپ نوری با تجهیزات قابل حمل شامل تجهیزات پولیش، اچ و میکروسکوپ قابل انجام است. علاوه بر این امکان شناسایی ساختار از طریق ارتباط دادن آن با نوعی از انواع اطلاعات NDT وجود دارد. به عنوان مثال، عبور انرژی آلتراسونیک، با ریزساختار چدن خاکستری ارتباط داده شده است.

ریزساختار غالباً از طریق تعیین خواص فیزیکی یا مکانیکی به وسیله تکنیک‌های NDT قابل شناسایی است، چرا که به طور معمول ارتباطاتی مابین ریزساختار، خواص و پاسخ NDT وجود دارد. شناسایی ریزساختار براساس پاسخ NDT زمینه‌ای نسبتاً جدید از کاربرد NDT بوده و پیشرفت‌های جدید بسیاری در آن در حال انجام است [۲].

#### • تخمین خواص مکانیکی و فیزیکی

همان‌طور که پیش از این مورد بحث قرار گرفت، پیش‌بینی خواص مکانیکی و فیزیکی با تکنیک‌های NDT کاربرد نسبتاً جدیدی از NDT به شمار می‌رود. پدیده‌های جریان گردابی، آلتراسونیک، رادیوگرافی اشعه X و نوترون، ترموگرافی محاسباتی، ترموگرافی، و میکروسکوپی آکوستیک، همگی از ریزساختار متأثر می‌شوند؛ این تأثیرات به نوبه خود می‌توانند به برخی خواص مکانیکی یا فیزیکی ارتباط داده شوند. علاوه بر این‌ها NDT امواج میکرو<sup>۲</sup> می‌تواند به خواص مواد پلاستیک (مواد پلاستیکی) ارتباط داده شود [۲].

#### • تعیین تنش/ کرنش و پاسخ دینامیک

کرنش موضعی در محلی معین در یک قطعه تحت مجموعه مشخصی از شرایط بارگذاری را می‌توان با استفاده از روش‌های احساس کرنش<sup>۳</sup> تعیین کرد که برخی از این روش‌ها عبارتند از: پوشش‌های فوتوالاستیک، پوشش‌های ترد، یا سنج‌های کرنش<sup>۴</sup>، در

<sup>۱</sup>- Microscopy Replication

<sup>۲</sup>- Microwave NDT

<sup>۳</sup>- Strain Sensing Methods

<sup>۴</sup>- Strain Gages

صورتی که رفتار تنش - کرنش ماده مفروضی شناخته شده باشد، این مقادیر کرنش قابل تبدیل به مقادیر تنش خواهند بود.

تعدادی از روش‌ها نیز برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در مواد، توسعه یافته‌اند. این روش‌ها شامل تفرق اشعه  $x$ ، روش‌های آلتراسونیک و روش‌های الکترومغناطیسی می‌باشند. تنش‌های پسماند سطحی را می‌توان با استفاده از اشعه  $x$  اندازه‌گیری کرد. کاربرد عملی تکنیک‌های آلتراسونیک برای شناسایی تنش‌های پسماند در حال حاضر هنوز محقق نشده‌اند. با این وجود، تعدادی از تکنیک‌های الکترومغناطیسی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

رفتار دینامیک قطعه را می‌توان با استفاده از تکنولوژی احساس کرنش، در حین سرویس واقعی یا شبیه‌سازی شده، در حالی که قطعه تحت بارگذاری دینامیک قرار دارد، مورد ارزیابی قرار داد. علاوه بر این، از شتاب‌سنج‌ها<sup>۱</sup> و ترانس‌دیوسرهای آکوستیک می‌توان به منظور تعیین پاسخگویی دینامیک ساختار / سازه در حالی که تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، استفاده کرد. این پاسخگویی دینامیک، نشان<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و ارزیابی نشان، آنالیز نشان‌ها<sup>۳</sup> نام دارد. ماهیت این نشان را می‌توان به علل متعددی از قبیل نویزهای ماشین، ارتعاشات و ناپایداری ساختاری (شکم دادن<sup>۴</sup> یا ترک خوردگی) ارتباط داد. [۲]

<sup>۱</sup> - Accelerometers

<sup>۲</sup> - Signature

<sup>۳</sup> - Signature Analysis

<sup>۴</sup> - Buckling





## مرجع :

1. "Inspection", AWS Handbook, 7<sup>th</sup> edition, vol. 5, chap. 9
2. ASM handbook, Vol. 17, 1994