

Advanced NDT

Ultrasonic Testing UT آزمون فراصوتی

آزمون فراصوتی

- صوت: صوت در اثر ارتعاش یک منبع صوتی تولید می گردد.
- انتشار صوت نیازمند وجود یک محیط مادی است.
- فرکانس امواج صوتی: 20 Hz – 20 kHz
- فراصوت: امواج صوتی که فرکانس آنها بالاتر از حد شنوایی انسان است را فراصوت مینامند.

1

Advanced NDT

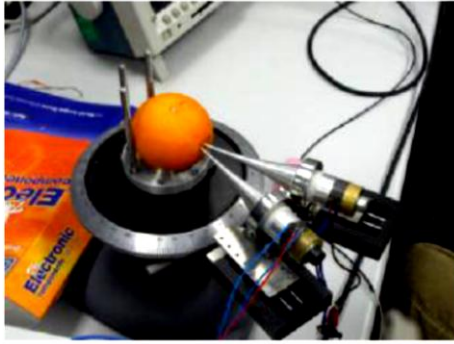
کاربردهای فراصوت

- فراصوت با شدت زیاد (High intensity):
 - ماشینکاری (ultrasonic machining)
 - جوشکاری (ultrasonic welding)
 - تمیزکاری (ultrasonic cleaning)
- فراصوت با شدت کم (Low intensity):
 - عیب یابی و ضخامت سنجی (testing and thickness gauging)
 - اندازه گیری ابعاد (dimension)
 - اندازه گیری ارتفاع مایعات در مخازن (depth)
 - اندازه گیری سرعت مایعات و گازها در لوله ها (velocity)
 - سختی سنجی (hardness)
 -

2

Advanced NDT

اندازه گیری رطوبت پوست پرتقال به کمک
امواج فراصوتی (40 MHz probes)



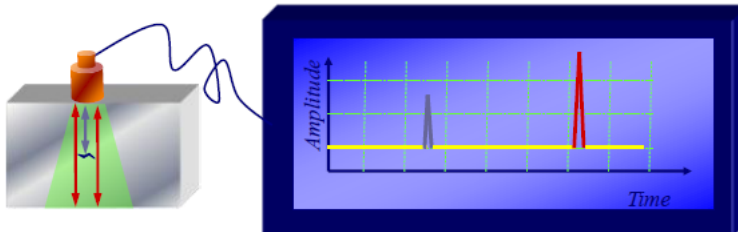
F. Camarena et. al, "Non-destructive ultrasonic test of orange dehydration," 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain, 2-7 September 2007.

3

Advanced NDT

آزمون فراصوتی (آلتراسونیک)

■ ارسال امواج صوتی فرکانس بالا (بالتر از 20 kHz) به داخل قطعه و مشاهده و تفسیر امواج دریافتی



4

Advanced NDT

دستگاههای فراصوتی



Pulser-Receiver

پالس ساز - گیرنده

Thickness Gage



ضخامت سنج فراصوتی



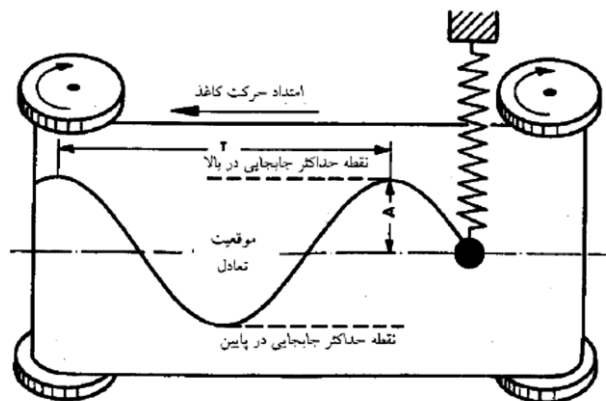
Flaw Detector

عیب یاب فراصوتی

5

Advanced NDT

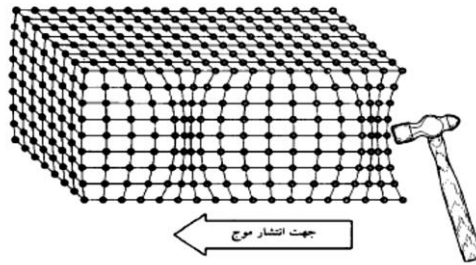
حرکت نوسانی



6

Advanced NDT

تولید موج



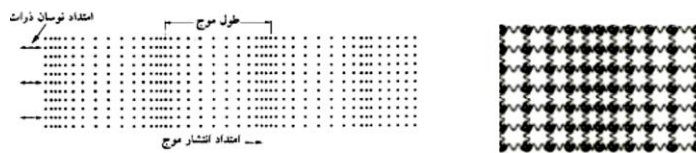
موج: خارج ساختن ماده از حالت تعادل به نحوی که اثر آن در جسم بدون انتقال ماده انتشار یابد.

7

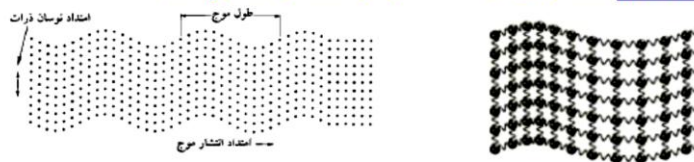
Advanced NDT

حالات موج فراصوتی

موج طولی: امتداد نوسان ذرات ماده در امتداد حرکت موج است.



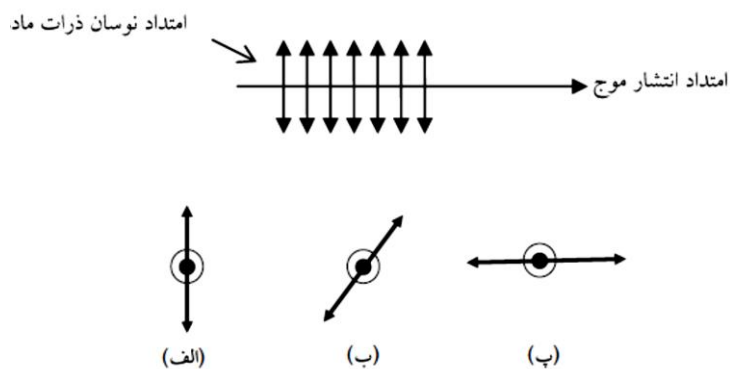
موج عرضی: امتداد نوسان ذرات ماده عمود بر امتداد حرکت موج است.



8

Advanced NDT

پلاریزاسیون امواج عرضی



9

Advanced NDT

سرعت امواج طولی و عرضی

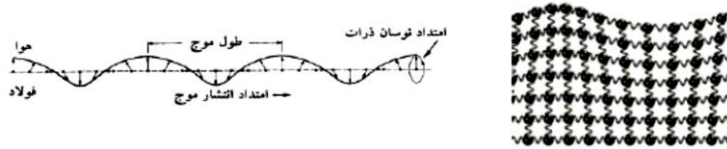
- سرعت موج طولی در یک ماده تقریباً دو برابر سرعت موج عرضی است.
- سرعت موج در یک ماده به خواص فیزیکی ماده بستگی دارد.
- سرعت موج طولی در فولاد 5920 m/s و سرعت موج عرضی 3230 m/s است.
- سرعت موج طولی در آلومینیوم 6320 m/s و سرعت موج عرضی 3130 m/s است.

10

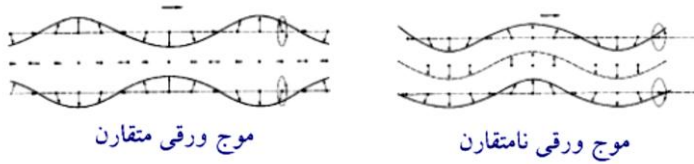
Advanced NDT

امواج سطحی و ورقی

موج سطحی (ریلی): روی سطح قطعه حرکت میکند.



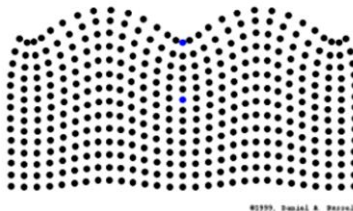
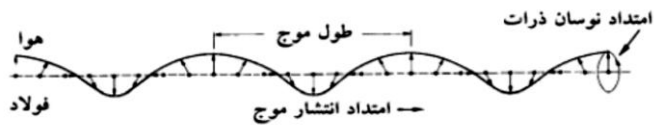
موج ورقی (لپ): در ورقهای نازک تولید میگردد و دو حالت متقارن و نامتقارن دارد.



11

Advanced NDT

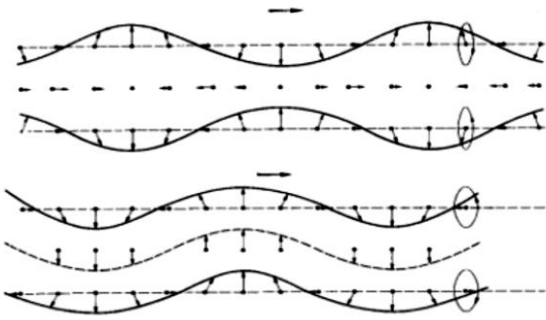
موج سطحی (ریلی)



12

Advanced NDT

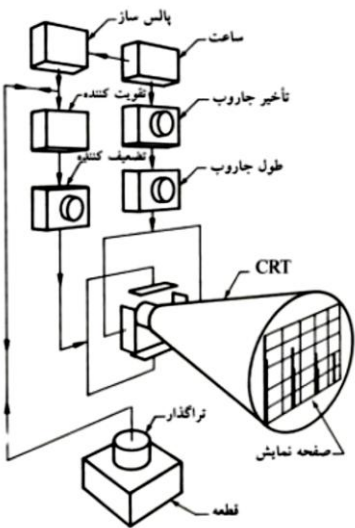
موج ورقی (لمب)



13

Advanced NDT

بخشهای مختلف یک
دستگاه عیب یاب فراصوتی:



14

Advanced NDT

مزایا و محدودیتهای UT

TABLE 3.1 Advantages and Disadvantages of Ultrasonic Testing

Advantages	Disadvantages
High penetration depth	Significant operator training
High sensitivity (detection of minute discontinuities)	Often requires contact using couplant
High accuracy (quantitative flaw sizing and positioning)	Cannot detect planar flaws perpendicular to wavefront
Rapid testing (allows automation and area scans)	Intrinsically a point-by-point measurement
Can test complex geometries	Many geometries cannot be tested
Can measure density and material properties	Can be expensive
Can test on all materials	
Portable	
Safe	

From: Shull, P. J., "Nondestructive Evaluation – Theory, Techniques, and Applications," Marcel Dekker, Inc., 2002.

15

Advanced NDT

$$c_l' = \sqrt{E / \rho} \quad \text{سرعت موج طولی:}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{سرعت موج عرضی:}$$

■ سرعت‌های موج طولی و عرضی در یک ماده را هم می‌توان به عنوان دو ثابت کشسانی آن ماده تلقی کرد.

$$E = \frac{\rho c_s^2 [3(c_l / c_s)^2 - 4]}{(c_l / c_s)^2 - 1}$$

$$\nu = \frac{(c_l / c_s)^2 - 2}{2[(c_l / c_s)^2 - 1]}$$

16

Advanced NDT

■ هر یک از این ثابت‌ها را می‌توان بر حسب دو ثابت دیگر بیان کرد.
 ضرایب لامه (Lamé constants) توسط رابطه‌های زیر بر حسب
 مدول یانگ و ضریب پواسون بیان می‌شوند:

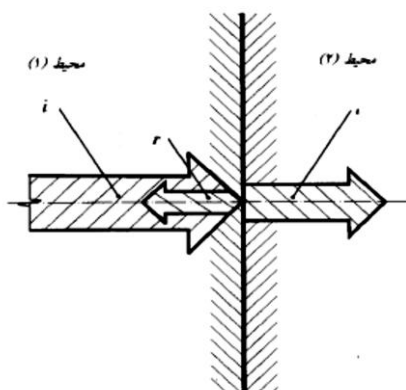
$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

17

Advanced NDT

تابش موج از محیط 1 به 2



$$u_i = U_i e^{i(\omega_1 t - k_1 x)}$$

$$u_r = U_r e^{i(\omega_1 t + k_1 x)}$$

$$u_t = U_t e^{i(\omega_2 t - k_2 x)}$$

18

Advanced NDT

$$R = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \Big|_{x=0} = -\frac{U_r}{U_i}$$

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}$$

$$T = \frac{\sigma_t}{\sigma_i} \Big|_{x=0} = \frac{E_2 k_2}{E_1 k_1} \frac{U_t}{U_i}$$

$$T = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

$Z = \rho C_L$ امپدانس صوتی

Advanced NDT

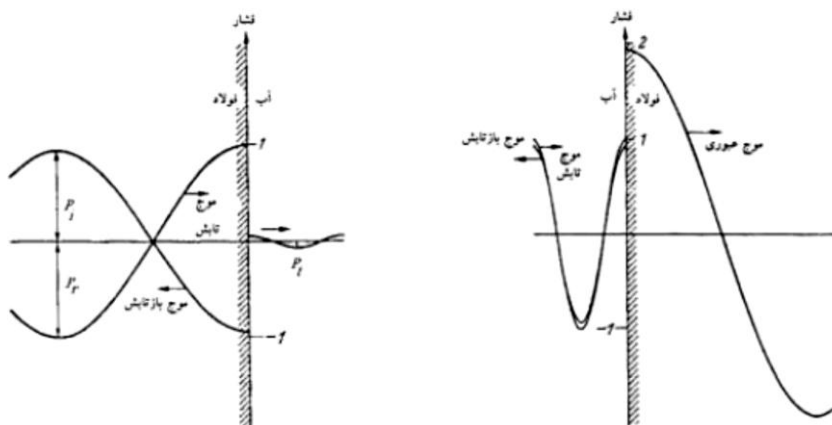
تأثير نسبت امپدانس بر ضرایب R و T

		R	T
1	$z_1 = z_2$	0	1
2	$z_1 \gg z_2$	-1	0
3	$z_1 \ll z_2$	1	2

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \qquad T = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

Advanced NDT

تابش موج از فولاد به آب و برعکس



21

Advanced NDT

سرعت در یک نقطه X تنش (فشار) = توان

$$R_e = \frac{Pwr_r}{Pwr_i} = \left[\frac{1 - \frac{z_2}{z_1}}{1 + \frac{z_2}{z_1}} \right]^2 = \left[\frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \right]^2$$

$$T_e = \frac{Pwr_t}{Pwr_i} = \frac{4 \left[\frac{z_2}{z_1} \right]}{\left[1 + \frac{z_2}{z_1} \right]^2} = \frac{4z_1 z_2}{[z_1 + z_2]^2}$$

22

Advanced NDT

تأثیر نسبت امپدانس بر ضرایب T_e و R_e

		R_e	T_e
1	$z_1 = z_2$	0	1
2	$z_1 \gg z_2$	1	0
3	$z_1 \ll z_2$	1	0

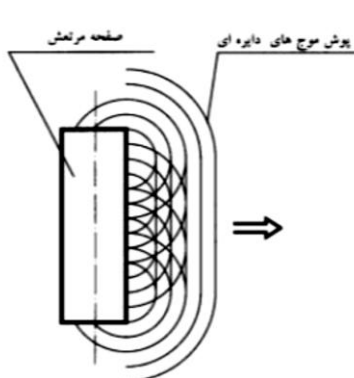
$$R_e = \left[\frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \right]^2 \quad T_e = \frac{4z_1 z_2}{[z_1 + z_2]^2}$$

23

Advanced NDT

روش ترسیمی هویگنس

(Huygen's construction)



روش هویگنس روشی تجربی برای به تصویر درآوردن انتشار یک جبهه موج یا به عبارتی سطوحی از موج که هم فاز هستند، می باشد. در یک لحظه معین، هر نقطه روی جبهه موج به عنوان منبع تولید امواج ثانویه ای که به صورت شعاعی و به طرف بیرون با سرعتی متناسب با محیط مورد نظر انتشار می یابند در نظر گرفته می شود. در لحظات بعد، جبهه موج با رسم منحنی مماس کره های (یا دایره های) حاصل از منابع ثانویه به دست می آید.

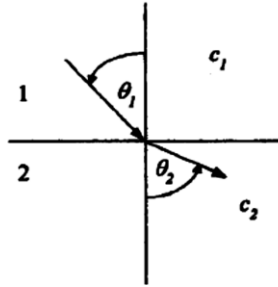
■ به این منحنی مماس پوش (envelope)

گفته می شود.

24

Advanced NDT

(Snell's Law) قانون اسنل

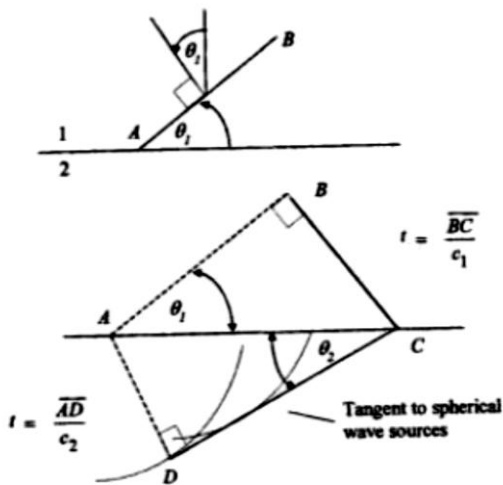


$$c_1 \sin \theta_2 = c_2 \sin \theta_1 \quad \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

25

Advanced NDT

اثبات قانون اسنل



$$\overline{BC} = c_1 t, \quad \overline{AD} = c_2 t$$

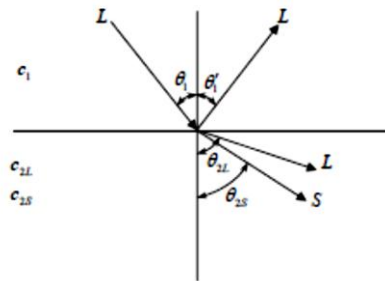
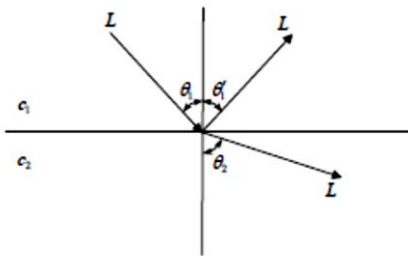
$$\sin \theta_1 = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}}, \quad \sin \theta_2 = \frac{\overline{AD}}{\overline{AC}}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\overline{BC}} = \frac{\sin \theta_2}{\overline{AD}}$$

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

26

Advanced NDT

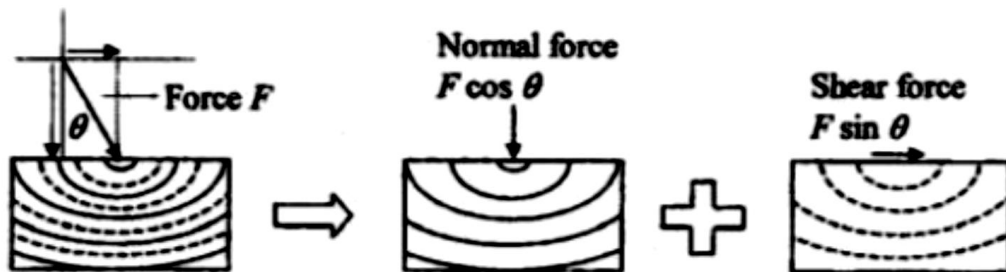
بازتابش و شکست موج

برخورد موج به سطح دو مایع

برخورد موج به سطح مایع و جامد

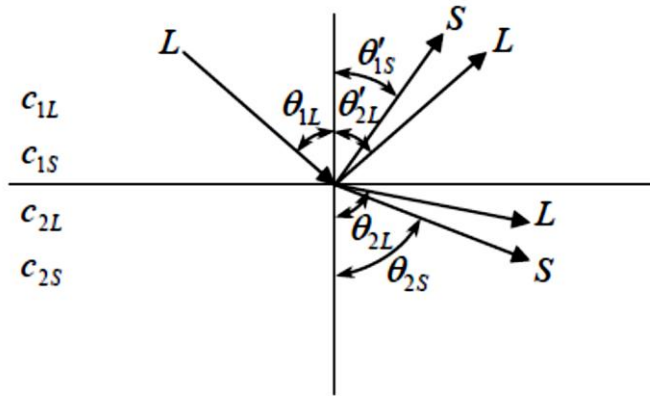
27

Advanced NDT

مفهوم تغییر حالت موج

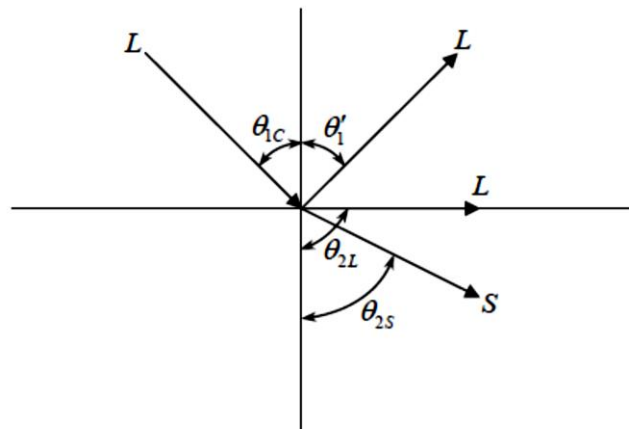
28

Advanced NDT

برخورد موج به مرز دو محیط جامد

29

Advanced NDT

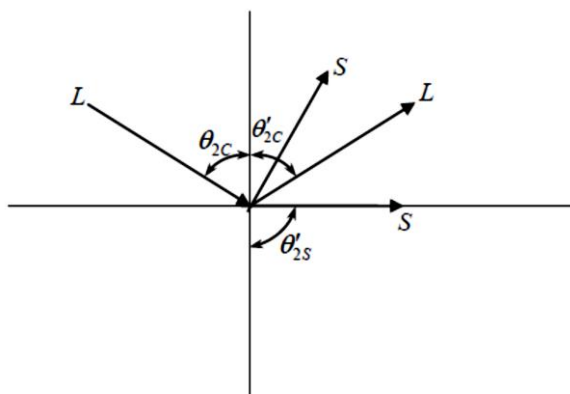
زاویه بحرانی اول

$$\theta_{c1} = \sin^{-1} \frac{c_{1L}}{c_{2L}}$$

30

Advanced NDT

زاویه بحرانی دوم

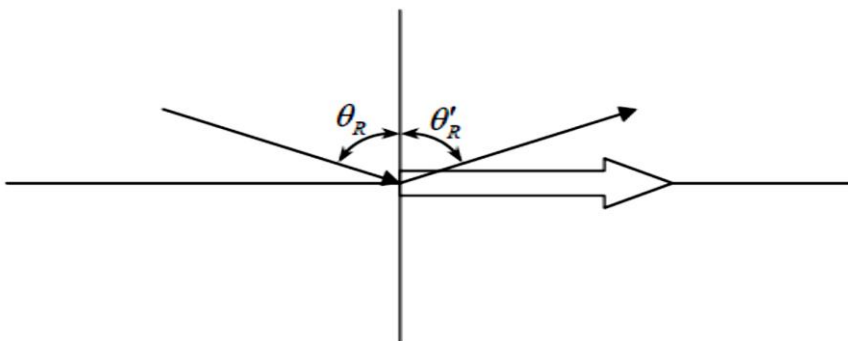


$$\theta_{c2} = \sin^{-1} \frac{c_{1L}}{c_{2S}}$$

31

Advanced NDT

زاویه موج ریلی



32

Advanced NDT

مثال: زاویه‌های بحرانی اول و دوم و زاویه موج ریلی را در تابش موج طولی از پلکسی گلاس به فولاد به دست آورید.

$$c_R = 0.9258 c_S \quad \text{در فولاد داریم}$$

حل: سرعت امواج طولی و عرضی در پلکسی گلاس و فولاد عبارتند از:

$$\begin{cases} c_{1L} = 2670 & \text{m/s} \\ c_{1S} = 1120 & \text{m/s} \end{cases} \quad \text{پلکسی گلاس}$$

$$\begin{cases} c_{2L} = 5850 & \text{m/s} \\ c_{2S} = 3230 & \text{m/s} \end{cases} \quad \text{فولاد}$$

$$\theta_{c1} = \sin^{-1} \frac{c_{1L}}{c_{2L}} = \sin^{-1} \frac{2670}{5850} = 27.2^\circ \quad \text{زاویه بحرانی اول}$$

$$\theta_{c2} = \sin^{-1} \frac{c_{1L}}{c_{2S}} = \sin^{-1} \frac{2670}{3230} = 55.8^\circ \quad \text{زاویه بحرانی دوم}$$

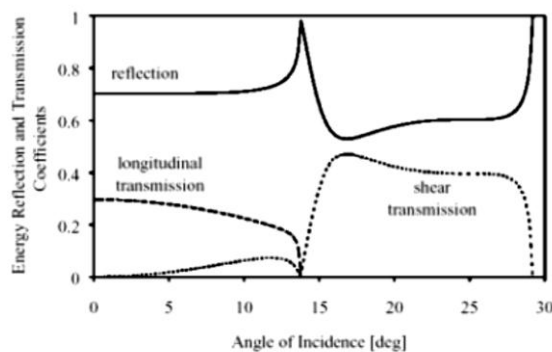
$$\theta_R = \sin^{-1} \frac{c_{1L}}{0.9258 c_{2S}} = \sin^{-1} \frac{2670}{(0.9258)3230} = 63.2^\circ \quad \text{زاویه ریلی}$$

33

Advanced NDT

منحنی بازتابش و عبور موج

■ این منحنی میزان انرژی بازتابیده و عبوری امواج طولی و عرضی را در حالتی که موج از آب به آلومینیوم وارد میشود نشان میدهد.



34

Advanced NDT

تراگذار یا پروب!

- تراگذار (transducer): یک نوع از انرژی را به نوع دیگری از انرژی تبدیل مینماید.
- پروب (probe): غلافی که تراگذار در آن قرار میگیرد.
- معمولاً در NDT دو واژه به صورت مترادف به کار میروند.

35

Advanced NDT

پروبهای فراصوتی

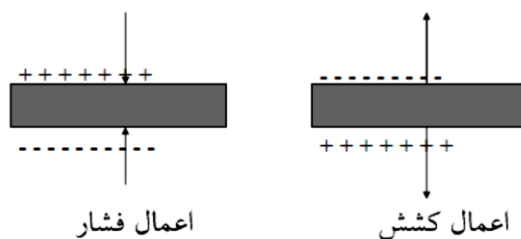
- انواع پروبهای فراصوتی
 - پیزوالکتریک (Piezoelectric)
 - خازنی (Capacitive)
 - الکترومغناطیس-آکوستیک (EMAT)
 - لیزر (Laser)
 - مگنتوستریکشن (Magnetosctriction)
 - آرایه های فازی (Phased Arrays)

36

Advanced NDT

اثر مستقیم پیزوالکتریک

- اگر مواد پیزوالکتریک تحت تنش مکانیکی قرار گیرند، یک ولتاژ الکتریکی در دو سوی آنها القا می شود (پیزو به معنای فشردن است).
- این اثر توسط برادران کوری (Jacque and Pierre Curie) در سال 1880 شناسایی شد.

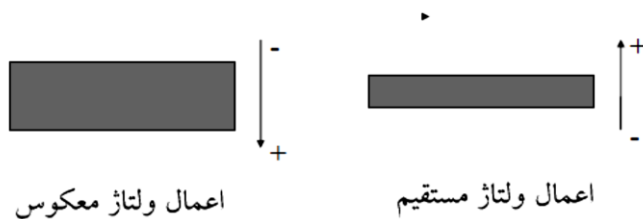


37

Advanced NDT

اثر معکوس پیزوالکتریک

- ایجاد تغییر شکل مکانیکی در ماده پیزوالکتریک هنگامی که یک پتانسیل الکتریکی به این ماده اعمال می شود.
- این اثر در سال 1880 توسط لیپمن (Lippman) شناسایی شد.



38

Advanced NDT

انواع مواد پیزوالکتریک

- مواد تک بلوره (single crystals)
- پیزوسرامیک‌ها (سرامیک‌های قطبی شده) (piezoceramics)
- مواد پلیمری (polymers)
- مواد مرکب (piezocomposites)

39

Advanced NDT

مواد تک بلوره

- مواد تک بلوره طبیعی مانند:
 - کوارتز (SiO_2)
 - تورمالین
 - نمک روشل ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_8, \text{H}_2\text{O}$)
- مواد تک بلوره که به صورت مصنوعی ساخته شده اند مانند:
 - فسفات دی هیدروژن آمونیوم
 - فسفات دی هیدروژن پتاسیم
 - سولفات لیتیم ($\text{Li}_2\text{SO}_4\text{H}_2\text{O}$)

40

Advanced NDT

مزایا و محدودیتهای کوارتز

مزایا:

- (۱) مقاومت زیاد به سایش.
- (۲) غیر قابل حل در بسیاری از مایعات (از جمله آب).
- (۳) پایداری الکتریکی و مکانیکی زیاد.
- (۴) امکان به کارگیری در درجه حرارت های بالا.

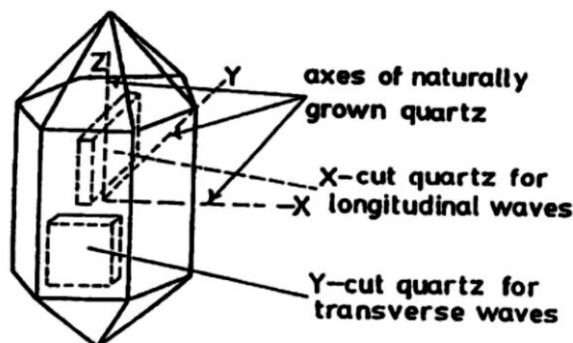
محدودیتها:

- (۱) نسبتاً گران است.
- (۲) به عنوان تولید کننده انرژی فراصوتی، بازدهی کمی را داراست.
- (۳) تغییر حالت موج در آن بوجود می آید. یک بلوره برش X -کوارتز علاوه بر تولید موج طولی، موج عرضی نیز در ماده ایجاد می کند. علت ایجاد امواج عرضی آن است که با فشردن بلوره در جهت X بلوره در جهت Y نیز ازدیاد طول یافته و موج عرضی تولید می کند. ایجاد موج عرضی موجب ظاهر شدن سیگنال های اضافی می گردد.
- (۴) نیاز به ولتاژ ورودی بالایی دارد و یا به عبارتی بازده تبدیل الکترومکانیکی آن کم است.

41

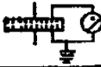

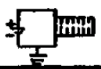
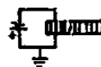
Advanced NDT

بلوره کوارتز



42





Advanced NDT

	CAUSE	SCHEDULE	EFFECT
direct piezo-electric effect	crystal being compressed		positive voltage on faces
	crystal being expanded		negative voltage on faces
inverse piezo-electric effect	positive voltage on faces		expansion of crystal
	negative voltage on faces		contraction of crystal

X بلوره برش

43

Advanced NDT

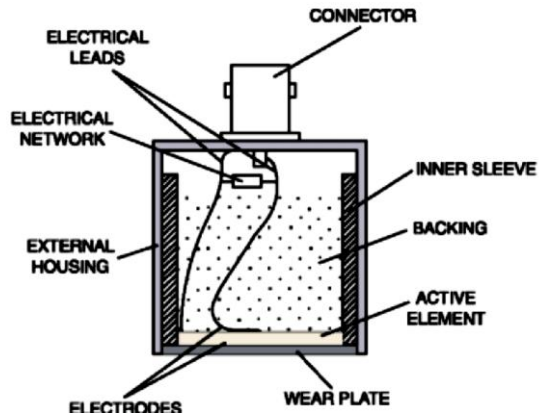
	CAUSE	SCHEDULE	EFFECT
direct piezo-electric effect	shearing strain deforms crystal to the left		positive voltage on faces
	shearing strain deforms crystal to the right		negative voltage on faces
inverse piezo-electric effect	positive voltage on faces		shearing motion of crystal to the right
	negative voltage on faces		shearing motion of crystal to the left

Y بلوره برش

44

Advanced NDT

ساختمان یک پروب قائم



45

Advanced NDT

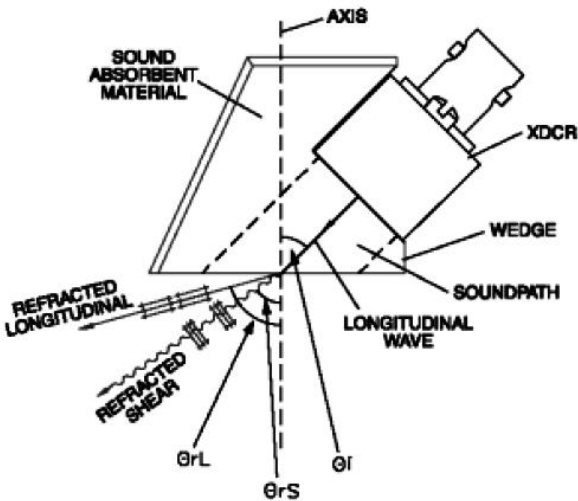
پروب قائم (نرمال)



46

Advanced NDT

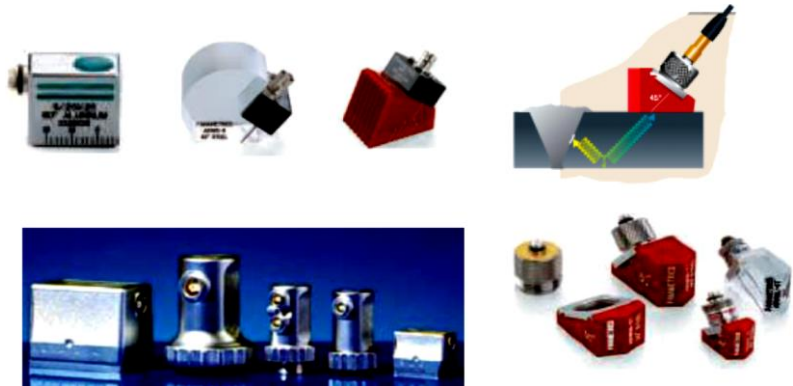
ساختمان یک پروب زاویه ای



47

Advanced NDT

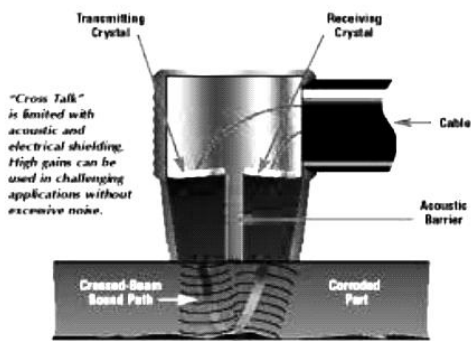
پروپهای زاویه ای



48

Advanced NDT

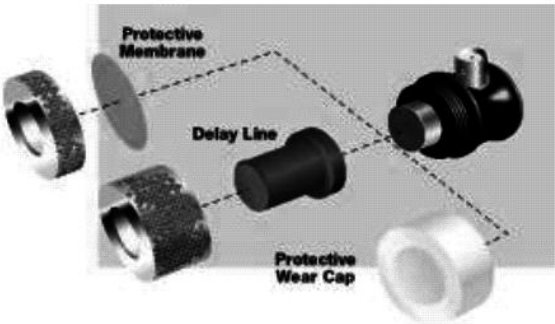
پروبه‌های دوقلو (dual element probes)



49

Advanced NDT

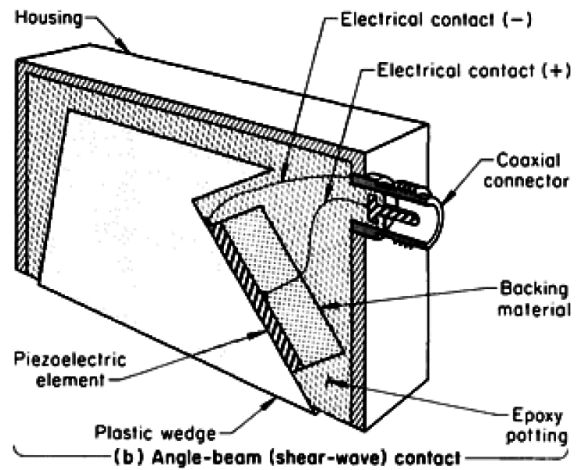
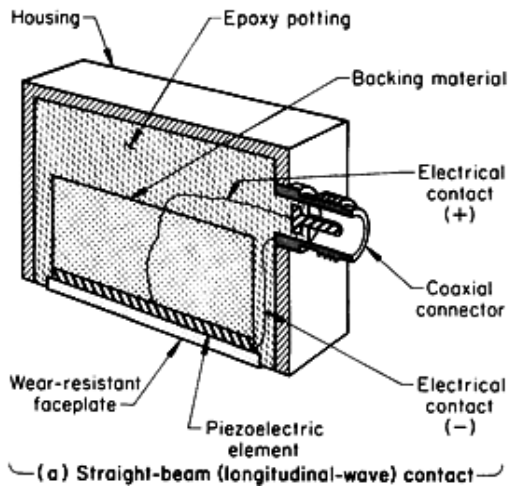
خط تاخیری و زانویی



50

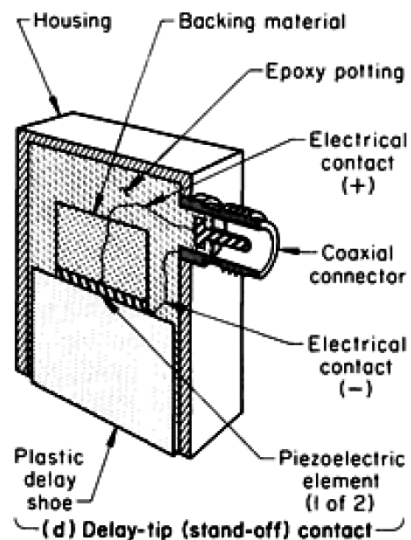
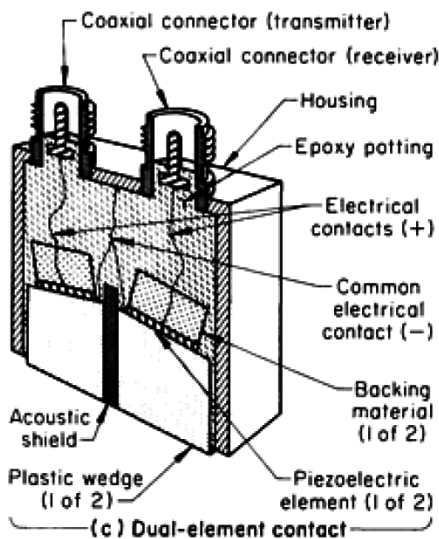
Advanced NDT

ساختمان پروبهای فراصوتی



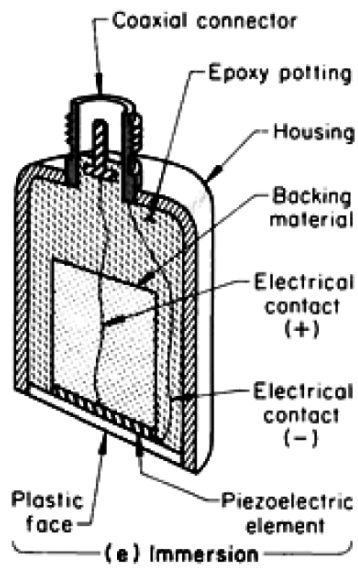
51

Advanced NDT



52

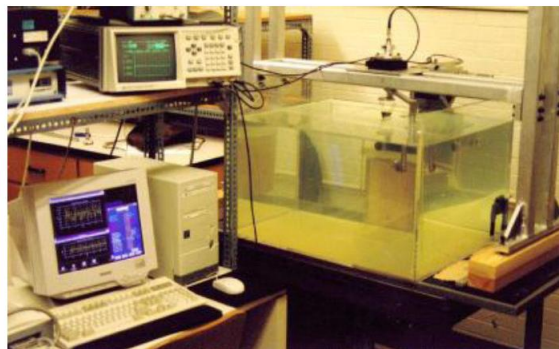
Advanced NDT



53

Advanced NDT

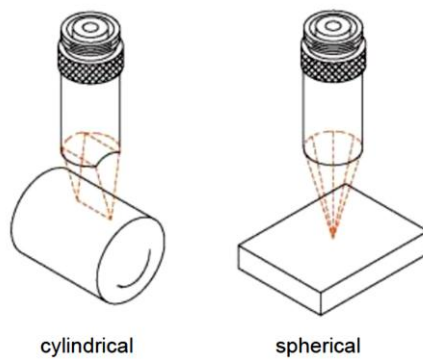
پروبهای غوطه وری



54

Advanced NDT

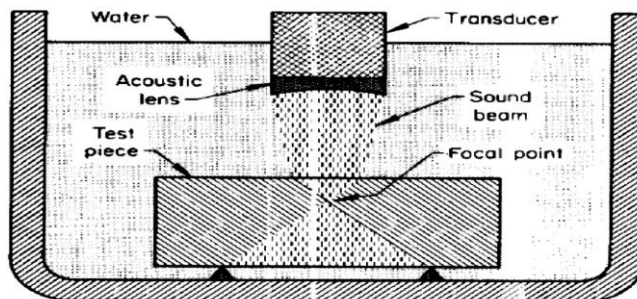
پروبهای متمرکز کننده (Focused Probes)



55

Advanced NDT

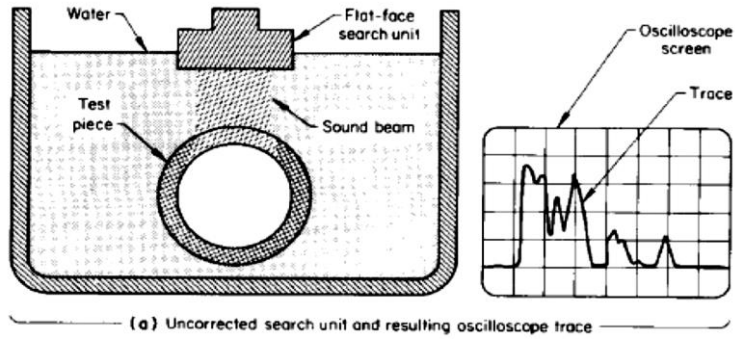
پروب متمرکز کننده



56

Advanced NDT

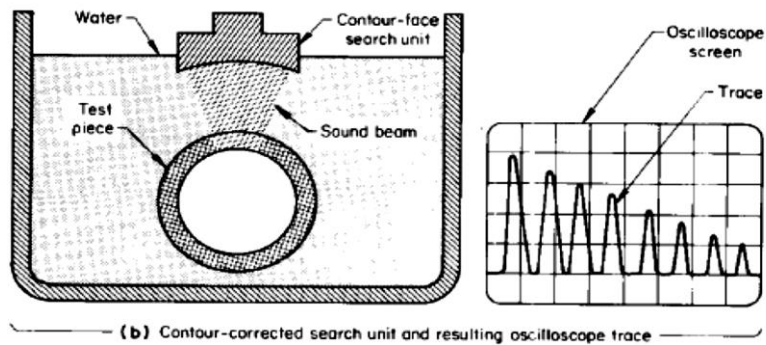
استفاده از پروب تخت در بازرسی لوله (نامطلوب) 🦋



57

Advanced NDT

استفاده از پروب متمرکز کننده در بازرسی لوله 🦋



58

Advanced NDT

پروبهای فراصوتی

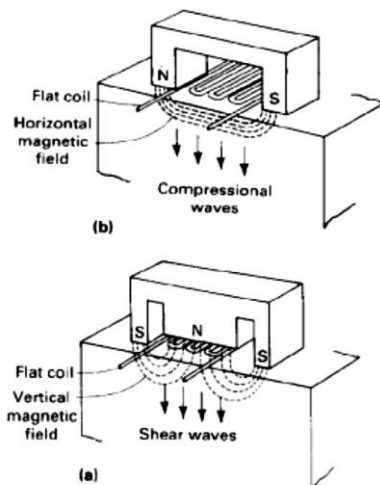
■ انواع پروبهای فراصوتی

- پیزوالکتریک (Piezoelectric)
- خازنی (Capacitive)
- الکترومغناطیس-آکوستیک (EMAT)
- لیزر (Laser)
- مگنتوستریکشن (Magnetostriction)
- آرایه های فازی (Phased Arrays)

59

Advanced NDT

پروبهای EMAT



• غیر تماسی - مناسب برای بازرسی های اتوماتیک

• یک سیم پیچ حاوی جریان در میدان یک آهنربای قوی قرار میگیرد

• بر اساس ایجاد نیروی لورنتز در فلز عمل میکنند

• نسبت سیگنال به نوفه (SNR) پایین

• فاصله هوایی حدود 1 یا 2 میلیمتر

• امکان تولید مدهای خاص مثل موج SH وجود دارد

• برای قطعات غیر فرومغناطیس مناسبتر هستند

60

Advanced NDT

آرایه های فازی (phased arrays)

- پروبهای آرایه فازی از تعداد زیادی بلوره فراصوتی که هر یک جداگانه تحریک میشود ساخته شده اند.
- زمان تحریک آرایه ها به صورت الکترونیکی کنترل میشود.
- امکان زاویه دهی و متمرکز ساختن موج وجود دارد.
- اسکن قطعه بدون حرکت دادن پروب امکان پذیر است.
- نسبتاً گران هستند.
- بسیار انعطاف پذیر هستند.

61

Advanced NDT

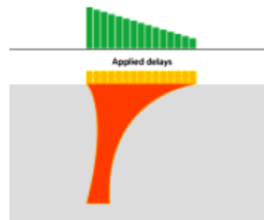
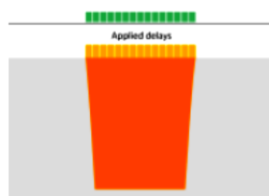
آرایه ها



Beam Focusing



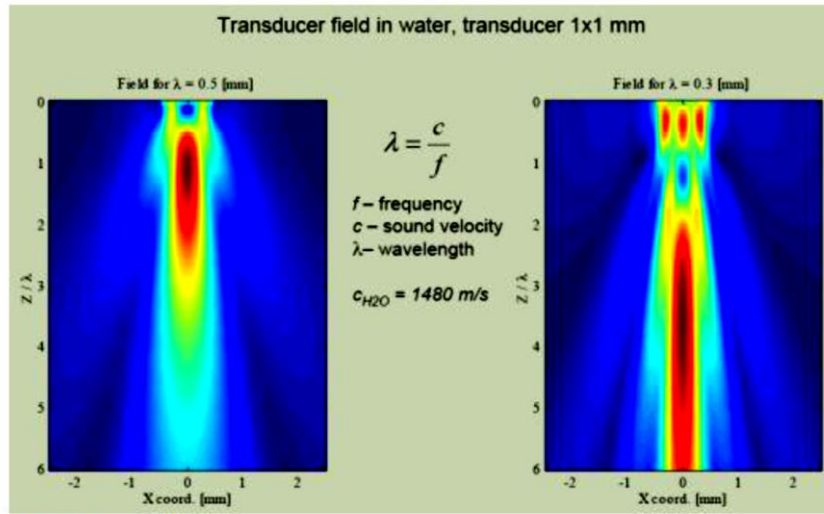
Beam Steering



62

Advanced NDT

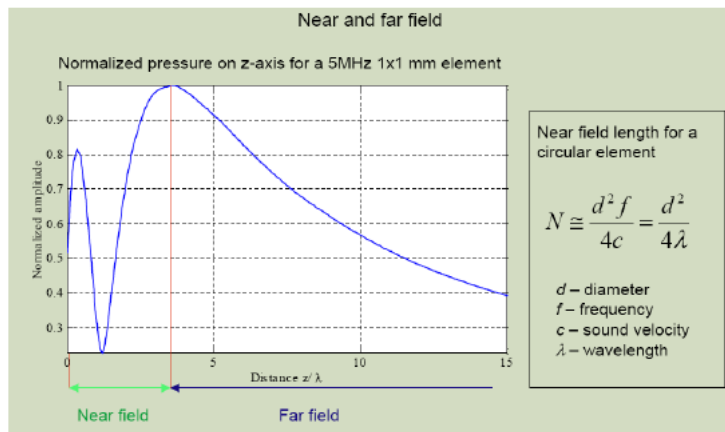
میدان صوتی پروب فراصوتی



63

Advanced NDT

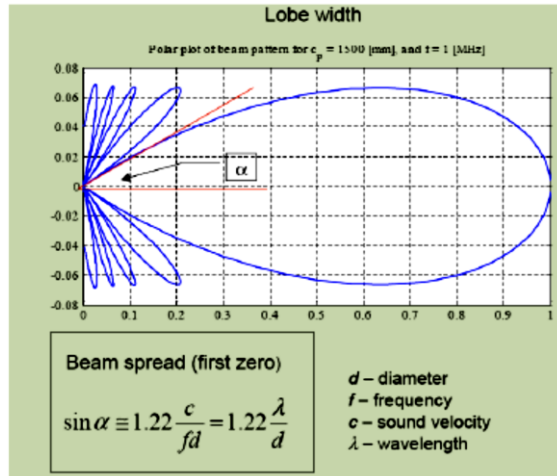
میدان دور و نزدیک



64

Advanced NDT

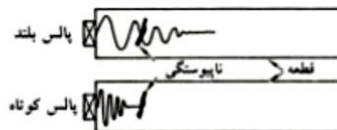
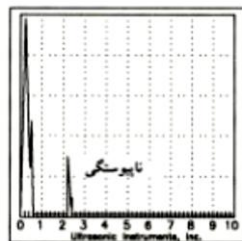
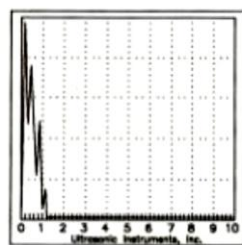
زاویه گستردگی پرتو



65

Advanced NDT

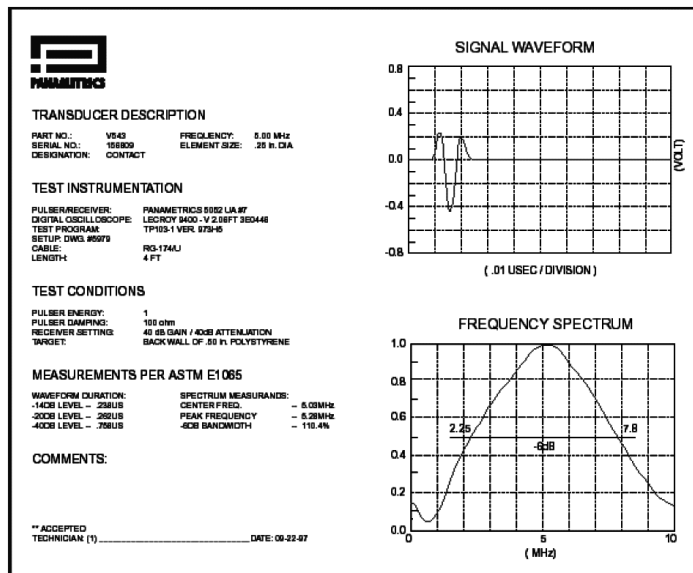
منطقه مرده (Dead Zone)



66

Advanced NDT

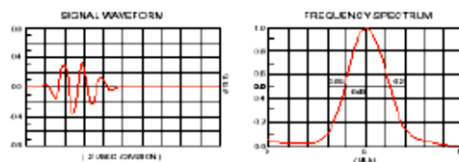
نمونه برگه کالیبراسیون پروب



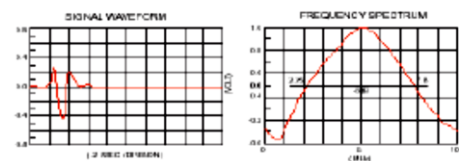
67

Advanced NDT

نقش ماده پشتی در میرایی پروب



پروب با میرایی کم



پروب با میرایی زیاد

68

Advanced NDT

تجهیزات لازم جهت انجام آزمون

- دستگاه فراصوتی
- پروب (قائم یا زاویه ای)
- ماده واسط (couplant)
- بلوک کالیبراسیون

69

Advanced NDT

ماده واسط

- ماده واسط فضای خالی بین پروب و قطعه را پر نموده و امکان انتقال موج از پروب به قطعه را فراهم می‌آورد.
- ماده واسط باید
 - سطح قطعه و پروب را کاملاً خیس کند و تمامی هوا را از فاصله دو سطح خارج سازد
 - به راحتی به سطح اعمال شود
 - عاری از حباب هوا و ذرات جامد باشد
 - آسیبی به قطعه نرساند
 - روی قطعه بماند و به آسانی نیز تمیز شود
 - امپدانس صوتی آن بین امپدانس صوتی قطعه و پروب باشد. ترجیحاً میانگین هندسی آنها باشد:

$$z_c = \sqrt{z_1 z_2}$$

70