NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

LEVEL 3 — ADVANCED ENGINEERING

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

مهندسی پیشرفتهٔ سطح‌سنج راداری FMCW

از فیزیک FMCW تا بودجهٔ عدم‌قطعیت، FMEA و راستی‌آزمایی طراحی

Advanced Engineering of the FMCW Radar Level Transmitter

راهنمای مهندسی سطح ۳ برای طراحی و راستی‌آزمایی سطح‌سنج راداری (Radar Level Transmitter) با فناوری FMCW: فیزیک انتشار و Antenna، بازتاب دی‌الکتریک، بودجهٔ Echo، اثر Nozzle، سطح شیب‌دار و جامدات، Foam ، خطای انتشار، عدم‌قطعیت GUM، حساسیت، FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی.



شکل ۱ — ترانسمیتر سطح راداری NICO: از فیزیک FMCW تا راستی‌آزمایی طراحی

شماره سند	بازنگری	سطح محتوا	تاریخ انتشار
NICO-EDU-LVL-L3-006-FA	Rev00	LEVEL 3	November 2026 — **آبان ۱۴۰۵**

سطح‌سنج راداری (Radar Level Transmitter) در عمل یک اندازه‌گیر زمان و فرکانس است که با یک مدل هندسی و الکترومغناطیسی از مخزن به سطح تبدیل می‌شود. خطای نهایی از سه منبع می‌آید: فیزیک انتشار و بازتاب، هندسهٔ نصب و داخل مخزن، و زنجیرهٔ تبدیل و خروجی. این سند سطح ۳ برای مهندس طراح ابزار دقیق، مشاور و متخصص EPC نوشته شده است و همان رابطه‌ها را قدم‌به‌قدم می‌سازد، روی چهار کاربرد صنعتی اعمال می‌کند و در پایان با FMEA، بودجهٔ عدم‌قطعیت و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی نتیجه را قابل دفاع می‌کند.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. رابطه‌های طول موج، شیب جاروب، فرکانس ضربان و فاصله را در FMCW بنویسید و وضوح فاصله را از پهنای باند حساب کنید.
2. قطر Beam Footprint و فاصلهٔ ایمن از دیواره را با زاویهٔ فرضی محاسبه و اثر نیم‌شدن زاویه بر بودجهٔ Echo را کمّی کنید.
3. بازتاب دی‌الکتریک، Signal Margin و Echo کف مخزن را برای مایع کم‌بازتاب بسنجید.
4. اثر Nozzle، شیب سطح و زاویهٔ ریزش جامد را با معادله و عدد تحلیل کنید و False Echo Mapping را در جای درست به کار ببرید.
5. خطای فشار و دمای محیط انتشار، خطای تبدیل 4–20 mA و خطای مبنای کالیبراسیون را بسنجید.
6. بودجهٔ عدم‌قطعیت را به روش GUM با $k = 2$ بسازید و ماتریس حساسیت را تفسیر کنید.
7. FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی را برای یک نصب واقعی تکمیل و موارد باز را مدیریت کنید.

DESIGN BASIS — مبنای طراحی این سند

1. فناوری: رادار موج پیوستهٔ مدوله‌شده در فرکانس (FMCW) برای مایع و جامد؛ همهٔ ترانسمیترهای ذهنی این سند ساختار «Antenna شاخی روی فلنج» دارند، مانند عکس مرجع NICO که در شکل‌ها بدون تغییر آمده است.
2. فرکانس‌های مرجع محاسبه: 6 GHz، 26 GHz و 80 GHz؛ سرعت نور در خلأ 299 792 458 m/s.
3. جاروب فرضی: پهنای باند 4 GHz و زمان جاروب 1 ms (ASSUMPTION؛ مقدار واقعی هر مدل از دستگاه خوانده می‌شود).
4. قطر دهانهٔ Antenna برای رابطهٔ زاویه: 75 mm (ASSUMPTION). زاویهٔ پرتو در سناریوها 8 deg و 4 deg است (ASSUMPTION).
5. چهار کاربرد مرجع: الف) مایع هیدروکربن با ε_r پایین، ب) مخزن همزن‌دار، پ) Nozzle بلند و باریک، ت) سیلو با جامد؛ به‌علاوهٔ یک مورد راه‌اندازی با Echo Curve در سه سطح.
6. سطح اطمینان بودجهٔ عدم‌قطعیت: $k = 2$؛ مؤلفه‌ها مستقل فرض می‌شوند.
7. هیچ مشخصهٔ عددی محصول NICO (برد، دقت، زاویه، Blocking Distance، گواهی) ادعا نشده است؛ این‌ها فقط از مدارک رسمی NICO گرفته می‌شوند.

1 فرض‌ها و برچسب‌های مبنا

ASSUMPTIONS — فرض‌های مدل (همه آموزشی)

1. سطح محصول در ناحیهٔ لکهٔ پرتو تخت و آینه‌ای است؛ برای سطح خشن یا موجی ضریب بازتاب مؤثر کمتر است.
   مبنا: ASSUMPTION
2. بازتاب با برخورد عمود و بدون اتلاف در مایع محاسبه می‌شود؛ ضریب اتلاف (تانژانت اتلاف) در نظر گرفته نشده است.
   مبنا: ASSUMPTION؛ REQUIRES VERIFICATION
3. زاویهٔ پرتو، بهره و Blocking Distance مقادیر آموزشی‌اند و از هیچ برگهٔ فنی NICO نیامده‌اند.
   مبنا: ASSUMPTION
4. رابطهٔ زاویه با دهانه و منحنی افت انحراف، تقریب‌اند و برای طراحی نهایی باید با داده سازنده جایگزین شوند.
   مبنا: ENGINEERING RECOMMENDATION؛ REQUIRES VERIFICATION
5. خطای انتشار گاز با فرض گاز شبه‌هوا و ضریب دی‌الکتریک کمتر از اتمسفر خطی محاسبه می‌شود.
   مبنا: ASSUMPTION؛ REQUIRES VERIFICATION
6. مؤلفه‌های عدم‌قطعیت مستقل‌اند و حدود هر مؤلفه فرضی است.
   مبنا: ASSUMPTION؛ روش نوع B در JCGM 100:2008

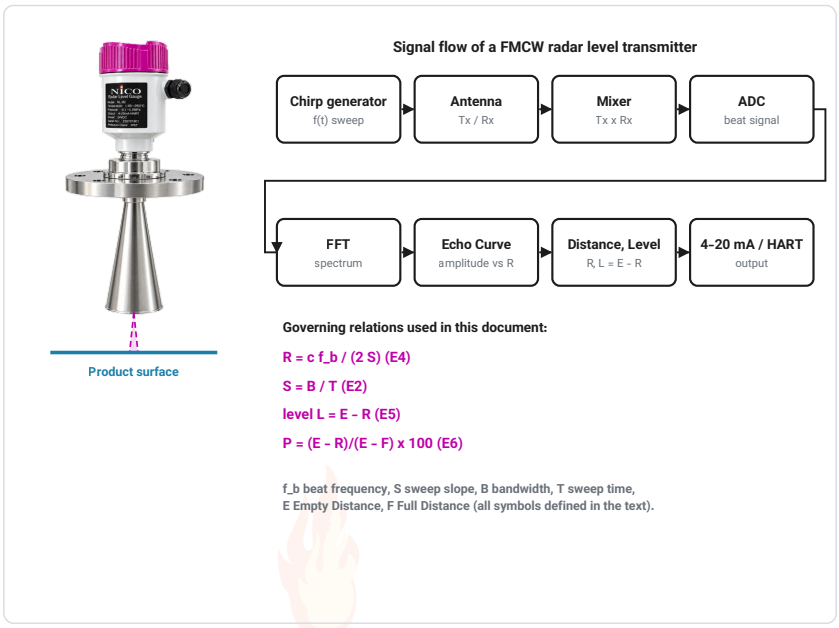
هر گزارهٔ فنی در این سند با یک برچسب مبنا مشخص می‌شود تا خواننده بداند با الزام، توصیهٔ مهندسی، داده سازنده یا فرض روبه‌روست. برچسب «الزام استاندارد» (NORMATIVE REQUIREMENT) در این سند به کار نرفته است، زیرا متن کامل استانداردهای فهرست‌شده خوانده نشده است و هیچ استاندارد واحدی عملکرد سطح‌سنج راداری را تعریف نمی‌کند.

جدول ۱ — برچسب‌های مبنا و کاربرد آن‌ها

برچسب	معنا	نمونه در این سند
NORMATIVE REQUIREMENT	الزام صریح متن استاندارد خواندهشده	به کار نرفته است
ENGINEERING RECOMMENDATION	توصیه بر پایهٔ فیزیک و رویهٔ مهندسی	فاصلهٔ ایمن از دیواره، ثبت Mapping در سطح مناسب
MANUFACTURER-SPECIFIC DATA	داده‌ای که فقط برگهٔ فنی سازنده تعیین می‌کند	زاویهٔ پرتو، Blocking Distance، حداقل eps_r
NICO DESIGN PRACTICE	رویهٔ طراحی تأییدشدهٔ NICO	در این سند هیچ مورد تأییدشده‌ای ادعا نشده است
ASSUMPTION	فرض آموزشی برای محاسبه	همهٔ اعداد مخزن، محصول و بودجه
REQUIRES VERIFICATION	باید از سند رسمی یا اندازه‌گیری تأیید شود	ویرایش استانداردها، ضریب دی‌الکتریک آب در 80 GHz

2 زنجیرهٔ اندازه‌گیری و معادلات حاکم

اندازه‌گیری راداری شش مرحله دارد: تولید جاروب فرکانس، تابش از Antenna، بازتاب از سطح، مخلوط‌کردن موج برگشتی با موج ارسالی، تبدیل فوریه و استخراج فاصله، و تبدیل فاصله به سطح و خروجی. شکل ۲ این زنجیره را همراه با رابطه‌هایی که در این سند ساخته می‌شوند نشان می‌دهد. هر رابطه یک بار با فرض و واحد معرفی می‌شود و در انتهای سند در «ثبت معادلات» جمع شده است.



شکل ۲ — زنجیرهٔ سیگنال یک سطح‌سنج راداری FMCW و رابطه‌های حاکم؛ Antenna مطابق عکس مرجع NICO است

3 طول موج و انتخاب فرکانس از دید فیزیک

طول موج در خلأ از سرعت نور و فرکانس به‌دست می‌آید. در گاز مخزن سرعت اندکی کمتر است و این اثر در بخش خطای انتشار بررسی می‌شود.

$$\lambda = c / f \quad (1)$$

lambda	طول موج در خلأ	m
c	سرعت نور در خلأ، 299 792 458	m/s
f	فرکانس مرکزی	Hz

برای 6 GHz طول موج 50.0 میلی‌متر، برای 26 GHz برابر 11.5 میلی‌متر و برای 80 GHz برابر 3.75 میلی‌متر است. چون طول موج با فرکانس کوچک می‌شود، با همان قطر Antenna پرتو باریک‌تر می‌شود؛ ولی همان طول موج کوچک باعث می‌شود لایه‌های ریز میعان و ذرات هم در مقیاس طول موج مؤثر شوند. نکتهٔ مهندسی این است که فرکانس بالاتر «بهتر» نیست؛ جابه‌جایی بین پرتو باریک، حساسیت به میعان، رفتار در Nozzle و Foam است.

جدول ۲ — طول موج و اثر فیزیکی فرکانس‌های مرجع

فرکانس	طول موج (mm)	اثر اصلی بر طراحی
6 GHz	50.0	پرتو پهن‌تر با همان قطر Antenna؛ کم‌حساس به میعان و Foam؛ Nozzle باید گشادتر باشد
26 GHz	11.5	تعادل بین پرتو و اثرات سطحی؛ پرکاربرد برای مایع و جامد
80 GHz	3.75	پرتو باریک با Antenna کوچک؛ حساس‌تر به لایهٔ میعان و ذرات؛ وضوح فاصله معمولاً بهتر

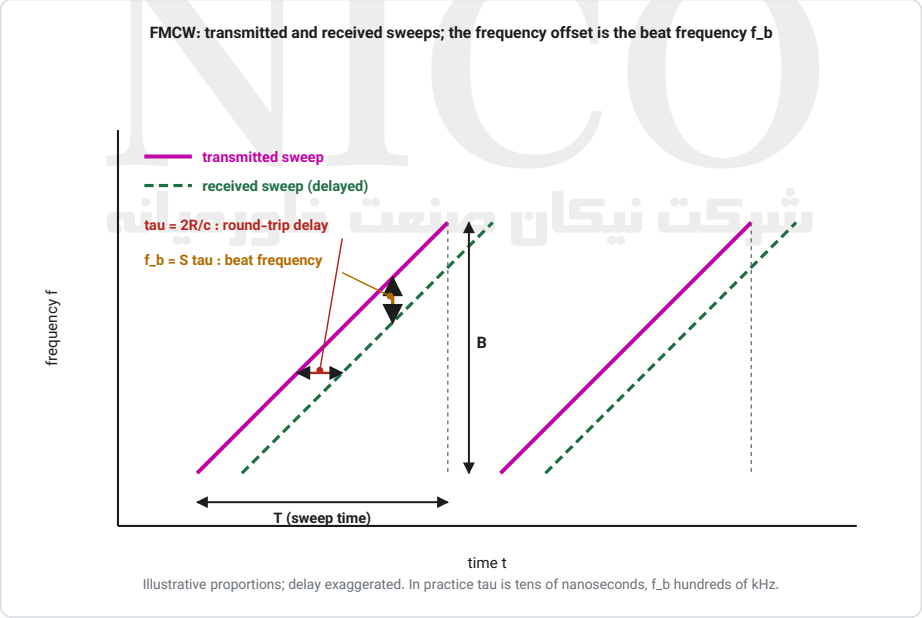
جدول فقط فیزیک عمومی را نشان می‌دهد؛ باند مجاز، فرکانس و Antenna هر مدل از برگهٔ فنی و مقررات رادیویی محل نصب خوانده می‌شود. MANUFACTURER-SPECIFIC DATA

4 فیزیک FMCW: جاروب، Beat Frequency و وضوح فاصله

در FMCW فرکانس موج ارسالی در مدت T به‌صورت خطی به‌اندازهٔ پهنای باند B بالا می‌رود. شیب جاروب ثابت است:

$$S = B / T \tag{2}$$

موج بازتابیده با تأخیر $\tau = 2R / c$ برمی‌گردد. چون در این فاصلهٔ زمانی فرکانس موج ارسالی بالا رفته است، تفاضل فرکانس موج ارسالی و دریافتی ثابت می‌ماند و برابر شیب ضرب در تأخیر است (شکل ۳). این تفاضل «فرکانس ضربان» (Beat Frequency) نام دارد:



شکل ۳ — جاروب ارسالی و دریافتی در FMCW؛ تفاضل فرکانس، Beat Frequency است و با فاصله متناسب است

$$f_b = S \times \tau = 2 R S / c \tag{3}$$

$$R = c f_b / (2 S) \tag{4}$$

S	شیب جاروب	Hz/s
B	پهنای باند جاروب	Hz
T	زمان یک جاروب	s
tau	تأخیر رفت‌وبرگشت	s
f_b	Beat Frequency	Hz
R	فاصلهٔ Reference Point تا سطح	m

با پهنای باند فرضی B = 4 GHz و T = 1 ms شیب جاروب $S = 4 \times 10^{12}$ Hz/s است. برای R = 10 m تأخیر برابر 0.0667 µs و فرکانس ضربان برابر 266.9 kHz می‌شود. این فرکانس بسیار پایین‌تر از فرکانس حامل است و به همین دلیل با مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) معمولی قابل پردازش است؛ همین مزیت اصلی FMCW است. هر هرتز فرکانس ضربان معادل 37.5 µm فاصله است؛ بنابراین خطای فرکانس یک نمونه به‌سادگی به خطای فاصله تبدیل می‌شود.

4.1 وضوح فاصله و حد تفکیک دو Echo

پردازش فوریه روی یک جاروب به‌اندازهٔ 1/T هرتز وضوح فرکانسی دارد. این وضوح با c/(2S) متر بر هرتز ضرب می‌شود و نتیجه به پهنای باند وابسته می‌شود، نه به فرکانس حامل:

$$dR = c / (2\,B) \tag{5}$$

برای B = 4 GHz مقدار dR = 37.5 mm است. پنجرهٔ وزن‌دهی که برای کاهش لوب‌های جانبی طیف به کار می‌رود، لوب اصلی را پهن می‌کند؛ با ضریب فرضی 1.5 وضوح عملی حدود 56.2 mm می‌شود. دو Echo با فاصلهٔ کمتر از این مقدار به‌صورت یک قله دیده می‌شوند (شکل ۴). این مقدار حد فیزیکی تفکیک است، نه دقت اندازه‌گیری؛ دقت یک قلهٔ تنها با درون‌یابی قله می‌تواند بسیار بهتر از وضوح باشد، به شرط آنکه قله از Echoهای دیگر جدا باشد.

شکل ۴ — طیف فرکانس ضربان و تفکیک دو Echo نزدیک؛ وضوح به پهنای باند وابسته است نه به فرکانس حامل

4.2 از فاصله تا سطح و خروجی

ترانسمیتر فاصلهٔ R را از Reference Point می‌دهد، اما سطح از کف یا از یک تراز مرجع تعریف می‌شود. با فاصلهٔ خالی E (Empty Distance):

$$L = E - R \tag{6}$$

مثلاً برای E = 12.0 m و R = 10.0 m سطح L = 2.0 m است. درصد سطح و جریان خروجی با فاصلهٔ پر F (Full Distance) چنین است:

$$P = (E - R) / (E - F) \times 100 \;;\; I = 4 + 16 \times P / 100 \tag{7}$$

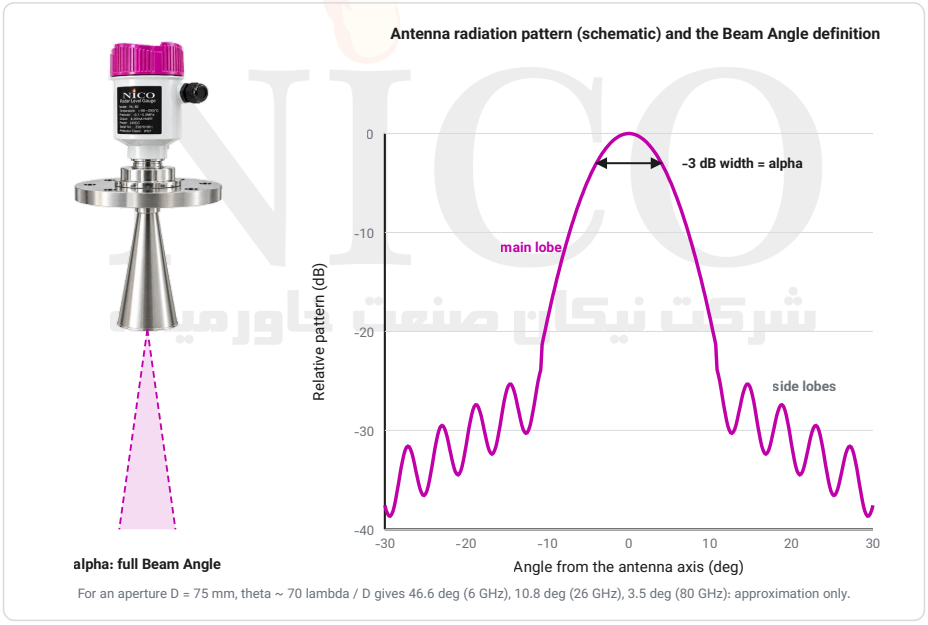
E	Empty Distance از Reference Point تا کف یا تراز صفر	m
F	Full Distance از Reference Point تا سطح پر	m
L	سطح از تراز صفر	m
P	درصد سطح در محدودهٔ کالیبره	%
I	جریان خروجی حلقه	mA

ENGINEERING TIP — حساسیت یک نسبت به E

خطای E مستقیماً به همان اندازه به خطای سطح می‌رسد و ضریب حساسیت آن یک است؛ بنابراین یک اندازه‌گیری نادقیق فاصلهٔ خالی را هیچ ویژگی ترانسمیتر جبران نمی‌کند (بخش کالیبراسیون و مبنای مرجع).

5 فیزیک Antenna: زاویهٔ پرتو، لکهٔ پرتو و بهره

Antenna شاخی هم‌زمان فرستنده و گیرنده است. الگوی تابش آن یک لوب اصلی و چند لوب جانبی دارد (شکل ۵). «زاویهٔ پرتو» (Beam Angle) معمولاً پهنای کامل لوب اصلی در نقطهٔ 3- dB تعریف می‌شود؛ اما تعریف دقیق هر سازنده در برگهٔ فنی همان مدل آمده است MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.



شکل ۵ — الگوی تابش شماتیک Antenna و تعریف Beam Angle؛ Antenna مطابق عکس مرجع NICO است

برای دهانهٔ دایره‌ای به قطر D یک تقریب شناخته‌شدهٔ پهنای نیم‌توان، متناسب با نسبت طول موج به قطر است:

$$\text{theta} \approx 70 \times \text{lambda} / D \quad (8)$$

theta	پهنای کامل لوب اصلی در نیم‌توان (تقریب)	deg
lambda	طول موج	m
D	قطر دهانهٔ مؤثر Antenna	m

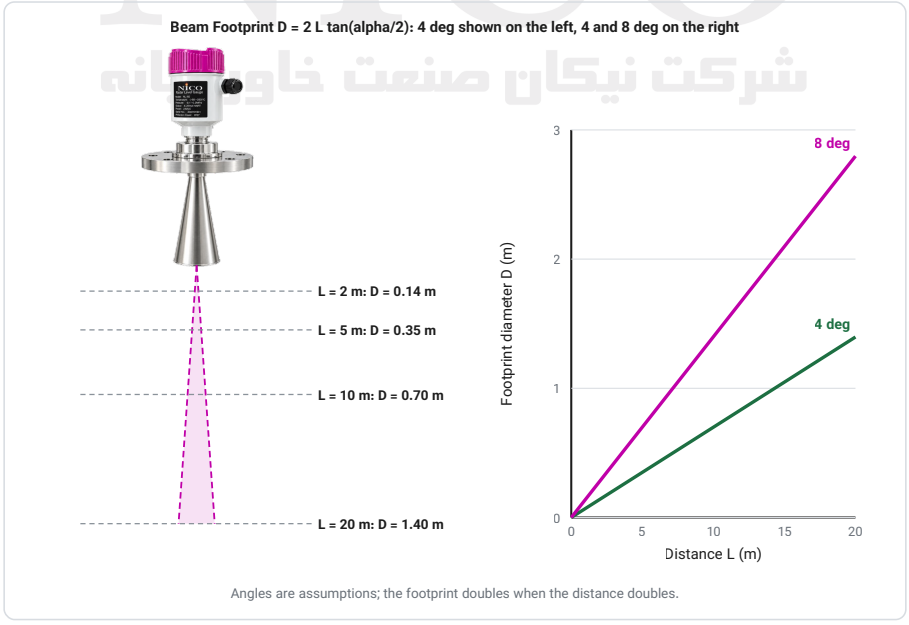
با D = 75 mm (فرضی) رابطه برای 6 GHz مقدار 46.6 درجه، برای 26 GHz مقدار 10.8 درجه و برای 80 GHz مقدار 3.5 درجه می‌دهد. این تقریب برای طراحی نهایی کافی نیست REQUIRES VERIFICATION؛ ارزش آن در نشان‌دادن مقیاس است: پهنای پرتو در یک قطر ثابت تقریباً با فرکانس نسبت عکس دارد، و به همین دلیل Antenna بزرگ‌تر یا فرکانس بالاتر پرتو را باریک می‌کند. همچنین بهرهٔ Antenna تقریباً با عکس مجذور زاویه تغییر می‌کند. چون توان Echo شامل یک بار تابش و یک بار دریافت است، با نصف‌شدن زاویه توان Echo حدود 12.0 dB زیاد می‌شود ($40 \log_{10}(2)$)؛ این بهبود فقط وقتی واقعی است که سطح محصول و نصب با پرتوی باریک سازگار باشند.

5.1 لکهٔ پرتو و فاصلهٔ ایمن از دیواره

لکهٔ پرتو در فاصلهٔ d از Antenna قطر زیر را دارد:

$$D_{fp} = 2 \times d \times \tan(alpha / 2) \quad (9)$$

D_{fp}	قطر Beam Footprint روی سطح	m
d	فاصلهٔ Antenna تا سطح	m
alpha	زاویهٔ کامل پرتو	deg



شکل ۶ — هندسهٔ Beam Footprint و فاصلهٔ ایمن از دیواره؛ فاصله باید برای بیشینهٔ فاصلهٔ سطح تا Antenna کنترل شود

جدول ۳ — قطر Beam Footprint (m) برای دو زاویهٔ فرضی

زاویهٔ کامل پرتو	d = 2 m	d = 5 m	d = 10 m	d = 20 m
4°	0.14	0.35	0.70	1.40
8°	0.28	0.70	1.40	2.80

برای alpha = 8° و d = 10 m قطر لکه 1.40 متر و شعاع آن 0.70 متر است. با حاشیهٔ مهندسی 0.30 m (ENGINEERING RECOMMENDATION) Antenna باید دست‌کم 1.00 متر از دیواره، نردبان یا لولهٔ داخلی فاصله داشته باشد. این معیار روی بیشینهٔ فاصلهٔ سطح تا Antenna (مخزن تقریباً خالی) اعمال می‌شود؛ زیرا در همان سطح لکه بزرگ‌ترین قطر را دارد.

6 بازتاب دی‌الکتریک و مایعات کم‌بازتاب

در برخورد عمود موج از هوا (با $eps_r \approx 1$) به یک دی‌الکتریک بدون اتلاف، کسر توان بازتابیده تابعی فقط از ضریب دی‌الکتریک نسبی eps_r است:

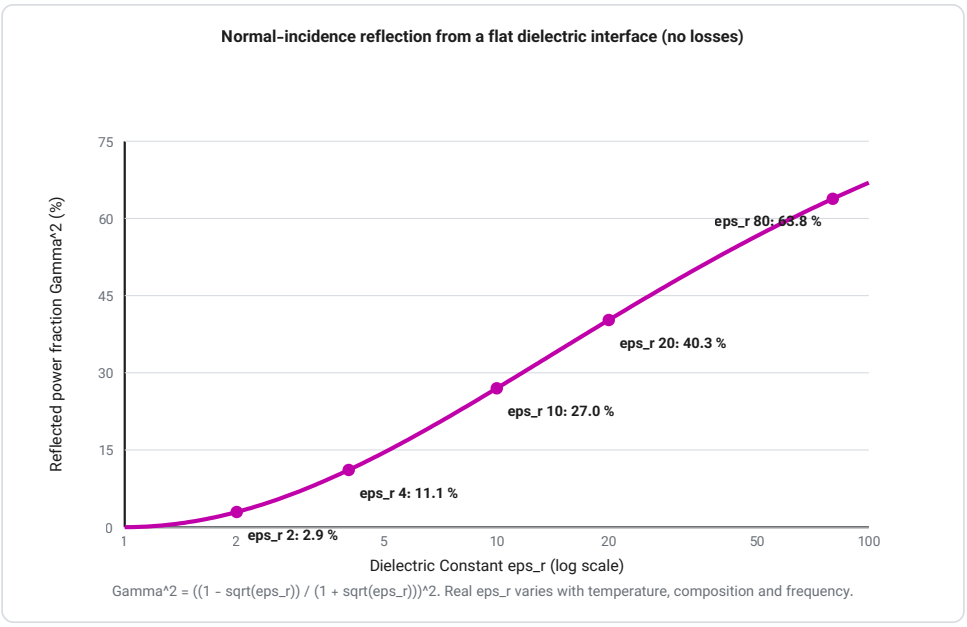
$$Gamma^2 = ((1 - sqrt(eps_r)) / (1 + sqrt(eps_r)))^2 \quad (10)$$

$Gamma^2$	کسر توان بازتابیده (برخورد عمود، بدون اتلاف)	—
eps_r	ضریب دی‌الکتریک نسبی محصول در فرکانس و دمای کاری	—

جدول ۴ — بازتاب نسبی برای چند مقدار فرضی eps_r (مبنا: آب با مقدار فرضی 80)

eps_r	کسر توان بازتابیده (%)	نسبت به آب (dB)
1.5	1.02	-18.0
2	2.94	-13.4
3	7.18	-9.5
5	14.59	-6.4
10	26.99	-3.7
20	40.26	-2.0
80	63.82	0.0

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه



شکل ۷ — توان بازتابیده بر حسب eps_r؛ منحنی در مقادیر پایین شیب تندی دارد و حاشیهٔ سیگنال را بیشترین حساسیت می‌دهد

مهم‌ترین نتیجه این است که بازتاب با eps_r پایین به‌شدت کم می‌شود: برای $eps_r = 2$ کمتر از سه درصد توان بازمی‌گردد و Echo حدود 13.36 dB از آب ضعیف‌تر است. ضریب دی‌الکتریک آب به فرکانس و دما وابسته است و مقدار 80 فقط یک مرجع ساده برای مقایسه است REQUIRES VERIFICATION؛ در طراحی واقعی باید مقدار محصول در دمای کاری از مأخذ معتبر یا آزمایش گرفته شود. همچنین اگر مایع اتلاف دارد، بخشی از موج جذب می‌شود و بازتاب از رابطهٔ بالا کمتر خواهد بود؛ رابطه حد بالای بازتاب را می‌دهد.

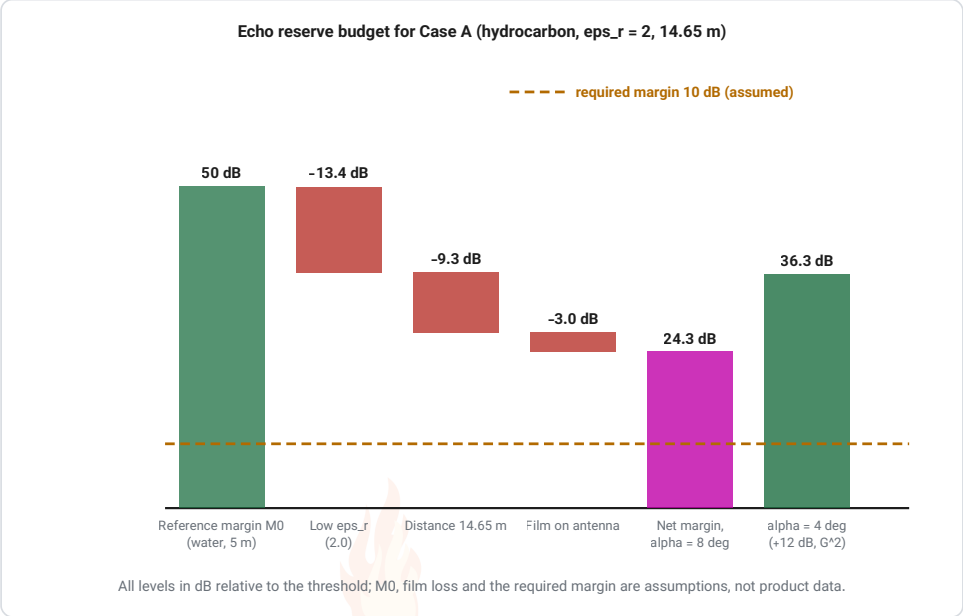
7 بودجهٔ Echo و حاشیهٔ سیگنال

حاشیهٔ سیگنال (Signal Margin) فاصلهٔ Echo محصول تا آستانهٔ آشکارسازی است. یک مدل ساده برای مقایسهٔ حالت‌ها، سطح مرجع M_0 را در شرایط مرجع (آب، فاصلهٔ مرجع) می‌گیرد و تغییرات را به‌صورت دسی‌بل جمع می‌زند:

$$M = M_0 + 10 \log_{10}(Gamma^2 / Gamma_w^2) - 20 \log_{10}(d / d_{ref}) - A_f \quad (11)$$

M	حاشیهٔ سیگنال نسبت به آستانه	dB
M_0	حاشیهٔ مرجع برای آب در فاصلهٔ d_{ref} (فرضی)	dB
$Gamma_w^2$	کسر توان بازتابیده برای آب مرجع	—
d, d_{ref}	فاصلهٔ کاری و فاصلهٔ مرجع	m
A_f	اتلاف دوطرفهٔ لایهٔ میعان و Foam و سایر موانع	dB

فرض کنید در مخزن هیدروکربن (eps_r = 2) M_0 = 50 dB در d_{ref} = 5 m، لایهٔ میعان A_f = 3 dB و حاشیهٔ لازم 10 dB باشد (همه ASSUMPTION). در بیشینهٔ فاصلهٔ 14.65 m: افت بازتاب 13.36 dB-، افت فاصله 9.34 dB- و حاشیه M = 50 -13.36 -9.34 - 3 = 24.3 dB است که از حاشیهٔ لازم بیشتر است. با زاویهٔ 4° به‌جای 8° حاشیه 36.3 dB می‌شود؛ اما لکهٔ پرتو در همان فاصله از 2.05 به 1.02 متر می‌رسد و این فقط وقتی سودمند است که نصب به پرتو باریک نیاز داشته باشد. شکل ۸ همین بودجه را به‌صورت نمودار پله‌ای نشان می‌دهد.



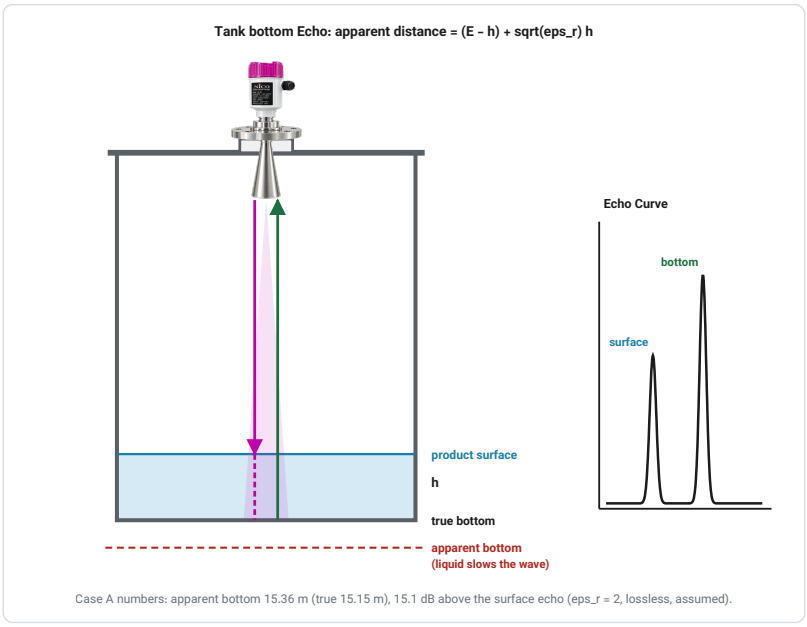
شکل ۸ — بودجهٔ Echo برای مخزن هیدروکربن (مورد الف)؛ همهٔ مقادیر فرضی‌اند

7.1 Echo کف مخزن

موج در مایع کند می‌شود: سرعت آن c / sqrt(eps_r) است. اگر سطح مایع در ارتفاع h از کف باشد، فاصلهٔ ظاهری Echo کف از Antenna این‌گونه می‌شود:

$$d_b = (E - h) + \mathrm{sqrt}(eps_r) \times h \quad (12)$$

برای مورد الف با E = 15.15 m و h = 0.5 m فاصلهٔ ظاهری 15.36 متر است، یعنی 0.21 متر بیشتر از کف واقعی. فاصلهٔ آن تا سطح فقط 0.71 متر است و چون موج در مایع بیش از آنکه بازتاب شود عبور می‌کند، Echo کف فلزی حدود 15.1 dB قوی‌تر از Echo سطح می‌شود ($(1 - Gamma^2)^2 / Gamma^2$)، فرض کف فلزی بازتاب‌کامل و بدون اتلاف). در سطح پایین، نزدیکی دو Echo و قوی‌بودن Echo کف ریسک اصلی انتخاب Echo اشتباه است (شکل ۹).



شکل ۹ — Echo کف مخزن؛ فاصلهٔ ظاهری به‌خاطر کندی موج در مایع بیشتر از فاصلهٔ واقعی است

COMMON MISTAKE — Echo کف به‌عنوان مرجع سطح

تفسیر Echo کف به‌عنوان «تأیید سطح پایین» یا استفاده از آن برای مقایسه با Echo سطح بدون در نظر گرفتن eps_r. فاصلهٔ ظاهری کف با eps_r و h تغییر می‌کند و باید با رابطهٔ بالا بررسی شود.

8 Echo Curve، False Echo و Echo چندمسیره

خروجی خام پردازش، منحنی دامنهٔ Echo برحسب فاصله است (Echo Curve). هر شیء قابل‌بازتاب در مسیر پرتو یک قله می‌سازد: سطح محصول، Nozzle، نردبان، لولهٔ داخلی، کویل، جوش دیواره و کف. ترانسمیتر باید از میان این قله‌ها قلهٔ محصول را انتخاب کند. قله‌های ثابت که محصول نیستند False Echo نام دارند. False Echo Mapping دامنهٔ آن‌ها را در حالت معلوم ثبت و آستانه را برای آن فاصله‌ها بالا می‌برد؛ ولی این کار «اصلاح نصب» نیست، زیرا قلهٔ محصول نیز اگر با قلهٔ ثابت یکی شود از بین می‌رود.

8.1 Echo چندمسیره (Multiple Reflection)

موج می‌تواند پس از بازتاب از سطح دوباره از سقف یا Antenna بازتاب شود و بار دیگر به سطح برسد. نتیجه Echo در مضرب صحیح فاصله است:

$$d_k = k \times R \,,\; k = 2, 3, \ldots \tag{13}$$

d_k	فاصلهٔ ظاهری Echo مرتبهٔ k	m
k	تعداد رفت‌وبرگشت کامل بین سطح و بازتاب‌دهندهٔ بالا	–

برای محصول در فاصلهٔ R = 7.0 m از Reference Point و مخزن با Echo E = 15.15 m دوم در 14.0 m ظاهر می‌شود؛ پس هر دو Echo در برد اندازه‌گیری‌اند. در سقف تخت و سطح بسیار بازتاب‌دهنده (آب، فلز) Echo دوم می‌تواند قوی باشد؛ در سقف کروی یا مخروطی، یا وقتی سطح موج دارد، معمولاً ضعیف‌تر و پراکنده است. اگر ترانسمیتر قلهٔ اصلی را از دست بدهد و قلهٔ دوم را بگیرد، مقدار سطح اشتباه ولی کاملاً پایدار گزارش می‌شود؛ این یکی از بدترین حالت‌های خطا است، چون اندازه‌گیری «سالم» به نظر می‌رسد. رد Echo چندمسیره با بررسی نسبت فاصله‌ها در Echo Curve و تنظیم آستانهٔ مناسب انجام می‌شود، و هنگام Mapping باید روی سطح معلوم تأیید شود.

9 اثر الکترومغناطیسی Nozzle

Nozzle یک لولهٔ فلزی بسته است که پرتو را در بخشی از مسیر هدایت می‌کند. اگر قطر آن با طول موج قابل‌مقایسه یا بزرگ‌تر از چند طول موج باشد، چند مود انتشار در آن ممکن است و بخشی از انرژی در آن بازتاب‌های رفت‌وبرگشتی می‌سازد. فرکانس قطع پایین‌ترین مود (TE11) در لولهٔ دایره‌ای به قطر D_n از رابطهٔ زیر می‌آید:

$$f_c = 1.8412 \times c / (pi \times D_n) \quad (14)$$

f_c	فرکانس قطع مود پایه در لولهٔ دایره‌ای	Hz
D_n	قطر داخلی Nozzle	m
pi	عدد پی	—

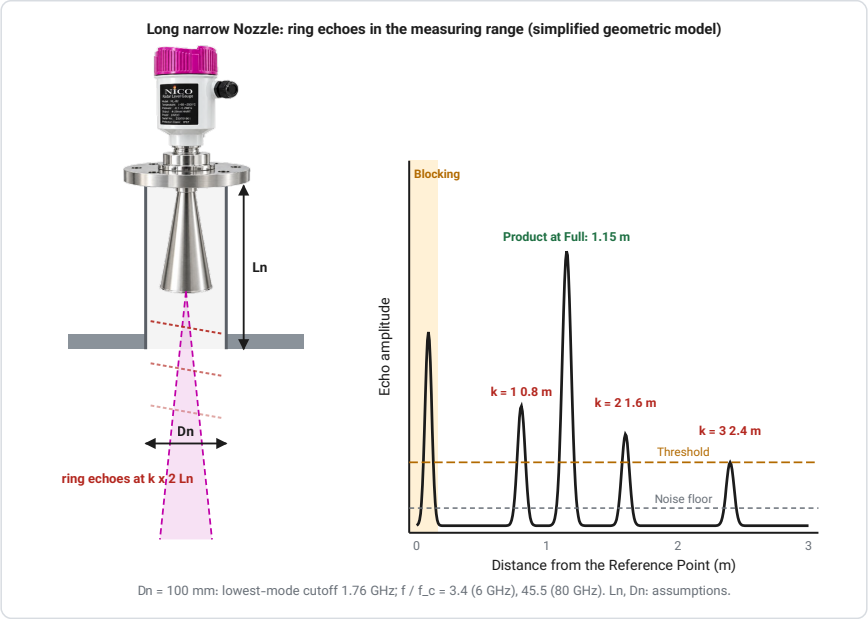
برای D_n = 100 mm مقدار f_c = 1.757 GHz است. نسبت فرکانس کاری به فرکانس قطع برای 6 GHz برابر 3.4، برای 26 GHz برابر 14.8 و برای 80 GHz برابر 45.5 است؛ یعنی در هر سه فرکانس موج می‌تواند در این لوله منتشر شود و Nozzle به‌عنوان یک موجبر عمل می‌کند، نه یک سوراخ ساده. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، مودهای بیشتری فعال‌اند و اثر Nozzle بر الگوی پرتو پیچیده‌تر است؛ به همین دلیل طراح Nozzle را از روی هندسه و دستورالعمل سازنده می‌بندد، نه از روی همین رابطه MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.

9.1 Echoهای حلقه‌ای (Ring Echo)

اگر Antenna داخل لولهٔ بلند و باریک قرار بگیرد یا انتهای شاخ در عمق Nozzle باشد، موج بین ابتدای Nozzle و دهانهٔ Antenna چندین بار رفت‌وبرگشت می‌کند. Echoهای ناشی از آن در مضرب دو برابر طول Nozzle دیده می‌شوند:

$$d_{ring,k} = k \times 2 \times L_n \quad (15)$$

$d_{ring,k}$	فاصلهٔ ظاهری Echo حلقه‌ای مرتبهٔ k از Reference Point	m
L_n	طول مؤثر Nozzle زیر دهانهٔ Antenna	m



شکل ۱۰ — Nozzle بلند و باریک و Echoهای حلقه‌ای در برد اندازه‌گیری؛ مدل هندسی ساده و Antenna مطابق عکس مرجع NICO

برای L_n = 0.40 m Echoهای حلقه‌ای در 0.8 m، 1.6 m و 2.4 m ظاهر می‌شوند. اگر Full Distance برابر F = 1.15 m باشد، فاصلهٔ سطح پر تا نزدیک‌ترین Echo حلقه‌ای فقط 0.35 و 0.45 متر است و سطح پر باید از این نظر با Blocking Distance و False Echo Mapping بررسی شود. راه‌حل مهندسی به ترتیب اولویت: کوتاه‌کردن یا گشادکردن Nozzle ، بیرون‌آوردن Antenna از Nozzle به‌اندازهٔ مجاز سازنده، انتخاب Antenna مناسب Nozzle، و در آخر نادیده‌گرفتن Echoها با Mapping.

ENGINEERING TIP — Nozzle را برای سطح پر هم بررسی کنید

طراحان معمولاً Nozzle را فقط برای سطح پایین بررسی می‌کنند. اما نزدیک‌ترین Echoهای ناخواسته به Antenna در سطح پر با محصول رقابت می‌کنند؛ بنابراین Full Distance و حاشیه تا Blocking Distance باید همراه با Echoهای حلقه‌ای کنترل شود.

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

10 Nozzle کج و تلفات انحراف از محور

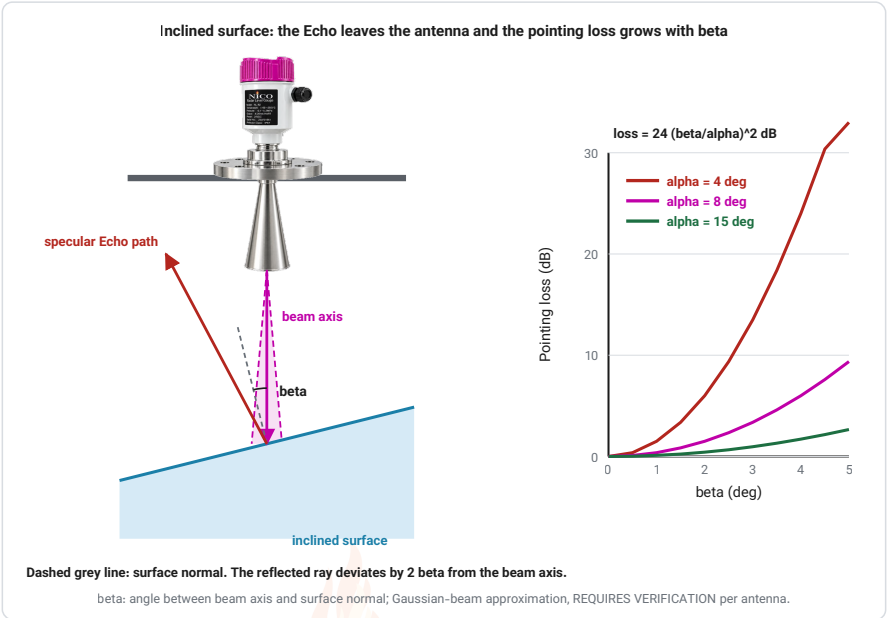
اگر محور Nozzle نسبت به عمود بر سطح به‌اندازهٔ beta کج باشد، Echo آینه‌ای سطح به‌جای بازگشت به Antenna در فاصلهٔ جانبی s از آن فرود می‌آید:

$$s \approx 2 \times d \times \sin(\text{beta}) \quad (16)$$

برای d = 10 m هر یک درجه کجی حدود 0.35 m انحراف جانبی می‌دهد و برای 3° و 5° به‌ترتیب 1.05 و 1.74 متر می‌شود. وقتی این انحراف از شعاع لکهٔ پرتو بیشتر شود، Echo از Antenna دور می‌ماند. مدل گاوسی برای تلفات ناشی از انحراف زاویه‌ای محور از جهت بازتاب، تقریبی به شکل زیر می‌دهد:

$$A_p \approx 24 \times (\text{beta} / \text{alpha})^2 \quad (17)$$

A_p	افت ناشی از انحراف (تقریب گاوسی)	dB
beta	زاویهٔ بین محور پرتو و عمود بر سطح	deg
alpha	زاویهٔ کامل پرتو	deg



شکل ۱۱ — سطح شیب‌دار و افت Echo؛ Antenna مطابق عکس مرجع، فقط سطح کج شده است

برای beta = 3° و alpha = 8° افت 3.4 dB است و برای alpha = 4° برابر 13.5 dB؛ یعنی پرتو باریک‌تر در برابر کجی حساس‌تر است. با beta = 6° افت برای 8° برابر 13.5 dB و برای 4° برابر 54.0 dB می‌شود. رابطه تقریبی است و در انحراف‌های بزرگ‌تر از چند درجه دقت ندارد REQUIRES VERIFICATION.

CAUTION — چرخاندن محفظه محور را درست نمی‌کند

چرخاندن محفظهٔ الکترونیک برای جهت‌دادن نمایشگر یا ورودی کابل محور Antenna را عوض نمی‌کند. کجی محور فقط با اصلاح مکانیکی (فلنج، صفحهٔ تنظیم، یا Antenna با قابلیت تنظیم زاویه) درست می‌شود و باید با خواندن دامنهٔ Echo پس از اصلاح راستی‌آزمایی شود.

11 هندسهٔ سطح محصول: مایع و جامد

سطح مایع آرام تقریباً آینه‌ای است و بازتاب را به سمت Antenna برمی‌گرداند. سطح مایع موج‌دار یا گردابی، سطح‌های کوچک متعدد با شیب‌های مختلف می‌سازد؛ فقط بخشی از آن‌ها بازتاب را به Antenna می‌رسانند و دامنهٔ Echo نوسان می‌کند. سطح جامد معمولاً خشن است و بازتاب پراکنده می‌دهد، اما شکل کلی آن (مخروط ریزش یا گودی تخلیه) مهم‌تر از زبری ریز است، زیرا شیب محلی سطح جهت بازتاب را تعیین می‌کند.

11.1 سیلو با زاویهٔ ریزش

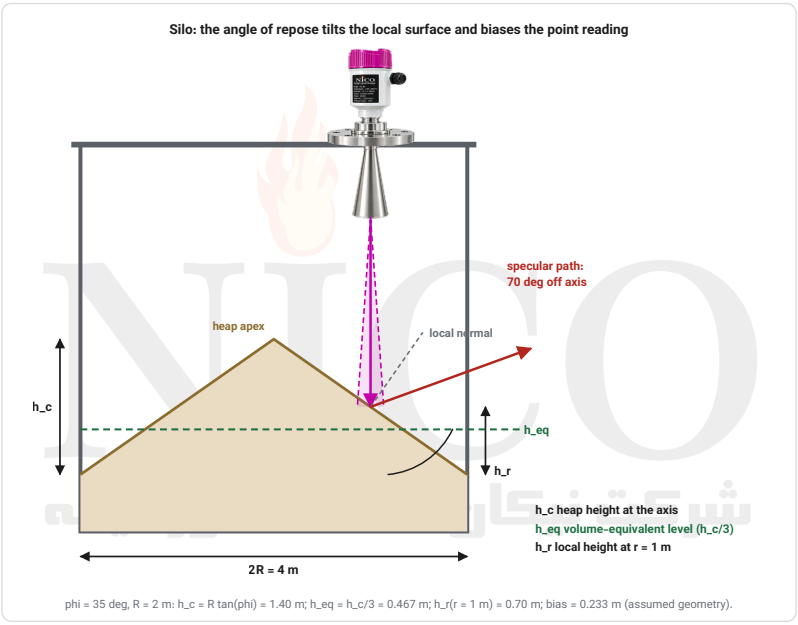
جامد پس از پرشدن در مرکز سیلو یک مخروط می‌سازد. اگر زاویهٔ ریزش phi و شعاع سیلو R باشد، ارتفاع مخروط در محور و ارتفاع معادل حجمی سطح (مخروط به‌جای استوانه با همان حجم) این‌ها هستند:

$$h_c = R \times \tan(phi) \; ; \; h_{eq} = h_c / 3 \quad (18)$$

h_c	ارتفاع مخروط در محور نسبت به سطح دیواره	m
h_{eq}	ارتفاع معادل حجمی مخروط (حجم مخروط تقسیم بر سطح مقطع)	m
R	شعاع سیلو	m
phi	زاویهٔ ریزش جامد (فرضی)	deg

در نقطهٔ نصب به فاصلهٔ r از محور، سطح محلی از رابطهٔ زیر بالاتر از دیواره است و خطای نمایندگی نسبت به ارتفاع معادل برابر اختلاف آن‌هاست:

$$h_r = h_c \times (1 - r / R) \; ; \; bias = h_r - h_{eq} \quad (19)$$

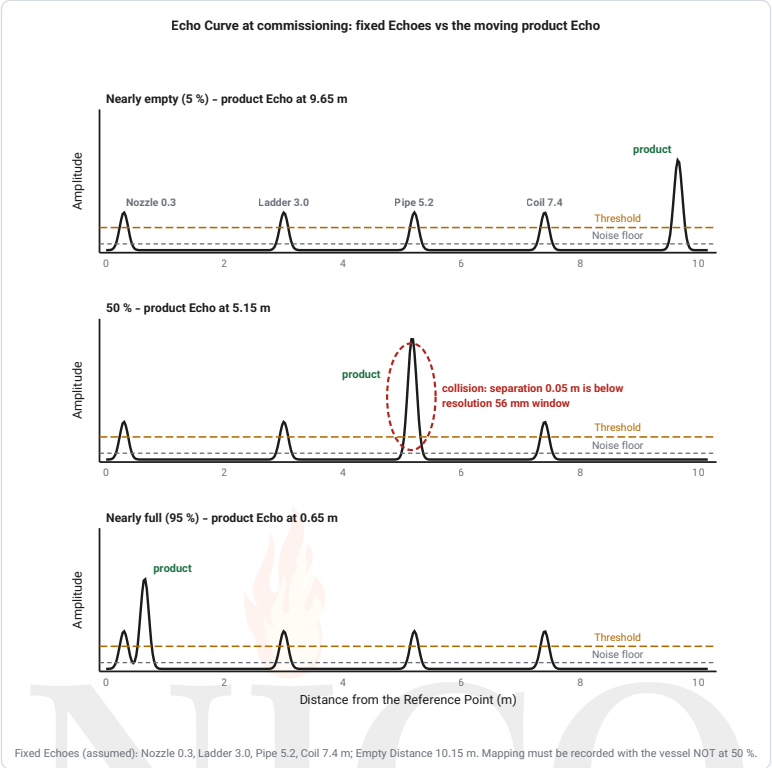


شکل ۱۲ — سیلو با زاویهٔ ریزش؛ شیب محلی سطح بازتاب را از محور خارج می‌کند و ارتفاع نقطه‌ای با ارتفاع معادل حجمی فرق دارد

با $R = 2$ m و $phi = 35°$ ارتفاع مخروط $h_c = 1.40$ m و ارتفاع معادل $h_{eq} = 0.467$ m است. اگر Antenna در $r = 1$ m باشد، سطح محلی $h_r = 0.70$ m و خطای نمایندگی 0.233 m است؛ یعنی حتی یک اندازه‌گیری فاصلهٔ بی‌نقص، ارتفاع نمایندهٔ حجم را تا این اندازه به خطا می‌دهد. هم‌زمان شیب محلی ۳۵ درجه است و بازتاب آینه‌ای $2\,phi = 70°$ از محور منحرف می‌شود؛ فقط بازتاب پراکندهٔ سطح خشن می‌تواند به Antenna برگردد و Echo بسیار ضعیف‌تر از مایع است. راه‌حل‌ها فقط مبتنی بر طراحی‌اند: نصب در شعاع مناسب با مشورت سازنده، Antenna با قابلیت جهت‌دهی به سمت محور مخروط، یا اندازه‌گیری حجم از روش دیگر. پس از جهت‌دهی، انحراف باقی‌مانده 5° افتی در حدود 9.4 dB و 3° افتی در حدود 3.4 dB با زاویهٔ 8° دارد (تقریب گاوسی، REQUIRES VERIFICATION).

12 راه‌اندازی با Echo Curve در سه سطح

Echo Curve ابزار اصلی تصمیم است، به شرط آنکه در چند سطح خوانده شود. شکل ۱۳ یک مخزن فرضی با E = 10.15 m و چهار Echo ثابت را در سه سطح نشان می‌دهد: Nozzle در 0.3 m، نردبان در 3.0 m، لوله در 5.2 m و کویل در 7.4 m (ASSUMPTION).



شکل ۱۳ — Echo Curve در سه سطح راه‌اندازی؛ در سطح میانی Echo محصول با Echo لوله یکی می‌شود

جدول ۵ — بررسی برخورد Echo محصول با Echoهای ثابت (وضوح عملی 56.2 mm)

سطح	سطح (m)	فاصلهٔ Echo محصول (m)	نزدیک‌ترین Echo ثابت	فاصله (m)	نتیجه
قریب خالی	0.50	9.65	Coil	2.25	جدا
۵۰ درصد	5.00	5.15	Pipe	0.05	برخورد: فاصله کمتر از وضوح
قریب پر	9.50	0.65	Nozzle	0.35	جدا

در سطح ۵۰ درصد فاصلهٔ محصول 5.15 m است و Echo لوله در 5.20 m قرار دارد؛ فاصله 0.05 m کمتر از وضوح عملی است و دو قله یکی دیده می‌شوند. همچنین اگر سطح به 7.15 m برسد، Echo محصول با Echo نردبان (در 3.0 m) هم‌مکان می‌شود. دو نتیجه برای راه‌اندازی می‌گیریم: ثبت False Echo Mapping باید وقتی انجام شود که محصول روی هیچ Echo ثابتی نیفتاده باشد (نه در ۵۰ درصد در این مثال)، و عبور سطح از ناحیه‌های برخورد باید به‌صورت آزمون پویا (پر و خالی‌کردن آهسته) در Echo Curve دنبال شود.

13 Foam، میعان و Build-up

13.1 Foam

Foam مخلوطی از حباب هوا و مایع است. ضریب دی‌الکتریک مؤثر آن بین هوا و مایع قرار دارد و با کسر حجمی مایع f تقریباً از رابطهٔ خطی ساده زیر برآورد می‌شود (مدل آموزشی):

$$\mathrm{eps}_{\mathrm{eff}} \approx 1 + (\mathrm{eps}_{\mathrm{r}} - 1) \times f \quad (20)$$

برای Foam بر پایهٔ آب با $\mathrm{eps}_{\mathrm{r}} = 80$ (فرضی) و $f = 1\ \%$ مقدار $\mathrm{eps}_{\mathrm{eff}} = 1.79$ و کسر توان بازتابیده 2.09 درصد؛ برای $f = 5\ \%$ مقدار 4.95 و 14.4 درصد؛ و برای $f = 10\ \%$ مقدار 8.9 و 24.8 درصد. دو پیامد وجود دارد: Foam چگال‌تر بازتاب قوی‌تر می‌دهد و می‌تواند Echo خود را به‌جای مایع بسازد؛ و Foam کم‌چگال با بازتاب ضعیف تقریباً شفاف است و موج از آن عبور می‌کند. هر دو حالت خطر خطای سطح دارند. علاوه بر بازتاب، Foam موج را تضعیف می‌کند: با ضخامت 0.30 m و تضعیف فرضی 5 dB/m افت دوطرفه 3.0 dB است که باید در A_f بودجهٔ Echo بیاید.

13.2 میعان و لایهٔ آب

لایهٔ نازک میعان روی Antenna یا دیوارهٔ Nozzle وقتی اثر دارد که ضخامت الکتریکی آن نسبت به طول موج قابل‌توجه باشد. برای لایهٔ آب فرضی 0.1 mm نسبت ضخامت به طول موج 0.0020 در 6 GHz، 0.0087 در 26 GHz و 0.0267 در 80 GHz است؛ یعنی همان لایه در فرکانس بالا حدود سیزده برابر اثرگذارتر از فرکانس پایین است. بنابراین حساسیت فرکانس بالا به میعان و قطره بیشتر است و Antenna با سطح صاف، شیب مناسب و در صورت نیاز پوشش آب‌گریز در طراحی در نظر گرفته می‌شود MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.

13.3 Build-up

رسوب چسبنده روی Antenna یا Nozzle مثل یک لایهٔ دی‌الکتریک اضافه عمل می‌کند. دو پیامد دارد: افزایش اتلاف دوطرفه (A_f در بودجهٔ Echo) و تغییر الگوی نزدیک‌میدان که Echo ثابت جدید ایجاد می‌کند. علامت تشخیص، کاهش تدریجی دامنهٔ Echo محصول و بالا رفتن سطح نویز نزدیک به Antenna است. اصلاح، بازرسی دوره‌ای، شست‌وشو، و در صورت تکرار، انتخاب Antenna با سطح صاف و بدون حفره یا استفاده از Purge است.

COMMON MISTAKE — Mapping روی رسوب

انجام False Echo Mapping وقتی Antenna رسوب دارد، Echoی را در آستانه ثبت می‌کند که پس از شست‌وشو وجود ندارد و حاشیهٔ آشکارسازی را بی‌دلیل کاهش می‌دهد. Antenna را پیش از Mapping تمیز کنید و در برنامهٔ نگهداری، تاریخ Mapping را ثبت کنید.

14 خطای محیط انتشار: فشار، دما و بخار

فاصله از زمان رفت‌وبرگشت یا فرکانس ضربان با فرض سرعت نور در خلأ حساب می‌شود. در گاز مخزن ضریب شکست n کمی بزرگ‌تر از یک است و سرعت موج c / n است؛ فاصلهٔ ظاهری بیش از فاصلهٔ واقعی می‌شود. برای گاز شبه‌هوا ضریب دی‌الکتریک گاز تقریباً با فشار خطی تغییر می‌کند و خطای فاصله از رابطهٔ زیر می‌آید:

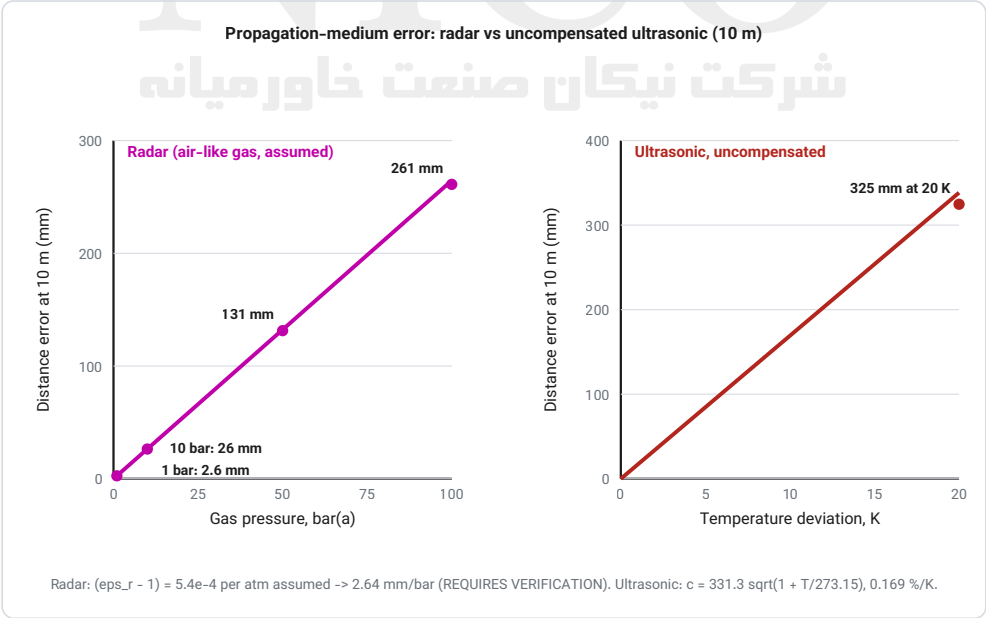
$$dd = d \times (\sqrt{eps_g} - 1) \approx d \times (eps_g - 1) / 2 \; ; \; eps_g - 1 = k_p \times p \tag{21}$$

dd	خطای فاصلهٔ ظاهری ناشی از گاز (مثبت = فاصلهٔ بیشتر)	m
eps_g	ضریب دی‌الکتریک گاز در فشار کاری	—
k_p	ضریب فشاری: 5.36×10^{-4} برای هوا در یک اتمسفر (فرضی)	1/atm
p	فشار مطلق گاز	atm

برای d = 10 m هر بار فشار مطلق حدود 2.64 mm خطا می‌دهد؛ در 10 bar(a) برابر 26.4 mm، در 50 bar(a) برابر 131 mm و در 100 bar(a) برابر 261 mm است (شکل ۱۴). ضریب k_p برای هوا آمده است و برای بخار، هیدروکربن سبک یا گاز مرطوب باید از مأخذ معتبر یا اندازه‌گیری به دست آید REQUIRES VERIFICATION؛ به‌ویژه بخار حلال در مخزن گرم می‌تواند ضریب را چند برابر کند. بسیاری از ترانسمیترها این خطا را جبران نمی‌کنند یا فقط با ورود فشار ثابت جبران می‌کنند؛ پس در مخزن فشار بالا باید در بودجه بیاید (جدول بودجه).

14.1 مقایسه با ترانسمیتر اولتراسونیک

سرعت صوت در گاز به دمای مطلق وابسته است: $c(T) = 331.3 \times \sqrt{1 + T / 273.15}$ متر بر ثانیه با T به درجهٔ سانتی‌گراد. اگر دما از 20 °C به 40 °C برود و جبران دما انجام نشود، سرعت از 343.2 به 354.7 متر بر ثانیه می‌رسد و در d = 10 m خطا 325 mm است، یعنی حدود 0.169 % برای هر کلوین. تفاوت اساسی این است: خطای اولتراسونیک بدون جبران دمای گاز در مرتبهٔ سانتی‌متر تا دسی‌متر است، اما خطای راداری ناشی از فشار در همان مخزن در مرتبهٔ میلی‌متر بر بار است. پس از نظر محیط انتشار، رادار برتری دارد؛ ولی این برتری جای بررسی ضعف دیگر (بازتاب، هندسه) را نمی‌گیرد.



شکل ۱۴ — خطای محیط انتشار در 10 m؛ رادار (فشار گاز) در برابر اولتراسونیک بدون جبران دما

15 مقایسهٔ فرکانس‌ها در یک نگاه

جمع‌بندی اثر فرکانس بر پرتو، میعان و Nozzle با همان فرض‌های قبلی در جدول زیر آمده است. اعداد فقط برای مقایسه‌اند و به هیچ مدل NICO نسبت داده نمی‌شوند.

جدول ۶ — مقایسهٔ فرکانس‌های مرجع (قطر دهانهٔ فرضی 75 mm)

فرکانس	پهنای پرتو (deg)	لکه در 10 m (m)	ضخامت الکتریکی لایهٔ 0.1 mm	نسبت f / f_c برای 100 mm
6 GHz	46.6	8.62	0.0020	3.4
26 GHz	10.8	1.88	0.0087	14.8
80 GHz	3.5	0.61	0.0267	45.5

قاعدهٔ تصمیم: فرکانس پایین‌تر وقتی ترجیح دارد که Foam، میعان سنگین یا Nozzle بلند مسئله باشد؛ فرکانس بالاتر وقتی که پرتو باریک، دهانهٔ کوچک یا مانع نزدیک اولویت دارد. هر تصمیم نهایی با برگهٔ فنی سازنده و مقررات رادیویی محل نصب راستی‌آزمایی می‌شود ENGINEERING RECOMMENDATION.

16 پردازش سیگنال: مفاهیم و حد اعتبار

الگوریتم‌های هر سازنده اختصاصی‌اند و در این سند توصیف نمی‌شوند؛ فقط مفاهیم مشترکی که روی نتیجه اثر مهندسی دارند آمده است.

16.1 پنجره، میانگین‌گیری و آستانه

پیش از تبدیل فوریه، سیگنال در یک پنجره ضرب می‌شود تا لوب‌های جانبی طیف کم شوند؛ هزینهٔ آن پهن‌شدن لوب اصلی و کاهش وضوح است (ضریب فرضی 1.5 در این سند). سپس چند جاروب متوالی میانگین‌گیری می‌شوند. اگر نوسان تصادفی با دامنهٔ 30 mm داشته باشیم و ثابت زمانی میرایی 10 s و دورهٔ نوسان 2 s باشد، تعداد نمونهٔ مستقل $N = \tau / T_{osc} = 5$ و کاهش نوسان با ضریب $\sqrt{N} = 2.236$ به باقی‌ماندهٔ 13.4 mm می‌رسد.

$$\sigma_{res} = \sigma_0 / \sqrt{N} \; ; \; lag = v \times \tau \tag{22}$$

σ_0	دامنهٔ نوسان اولیه	mm
σ_{res}	نوسان باقی‌مانده پس از میانگین‌گیری	mm
N	تعداد نمونهٔ مستقل در ثابت زمانی	—
v	سرعت تغییر سطح	m/s
τ	ثابت زمانی میرایی	s
lag	تأخیر مقدار نمایشی نسبت به سطح واقعی	m

بهای میرایی تأخیر است: برای سرعت پرشدن 1 m/min و tau = 10 s مقدار نمایشی 0.167 m عقب است؛ برای 0.5 و 2 m/min به‌ترتیب 0.083 و 0.333 متر می‌شود. میرایی در ترانسمیتر و در DCS اثر ضربی دارد؛ اعمال میرایی هم‌زمان در ترانسمیتر و در DCS یک اشتباه رایج است و تأخیر حلقه را بی‌دلیل افزایش می‌دهد.

16.2 انتخاب Echo و ردیابی پویا

ترانسمیتر معمولاً یکی از این معیارها را برای انتخاب قلهٔ محصول به کار می‌گیرد: قوی‌ترین قله، اولین قلهٔ بالاتر از آستانه یا قله‌ای با بزرگ‌ترین سطح زیر منحنی؛ انتخاب بستگی به کاربرد دارد. ردیابی پویا (Echo Tracking) پس از قفل‌شدن روی Echo محصول، جست‌وجو را به پنجرهٔ باریکی در اطراف آخرین موقعیت محدود می‌کند و حداکثر سرعت مجاز تغییر سطح را اعمال می‌کند. مزیت آن پایداری در برابر Echoهای گذرا و عیب آن «گیر کردن روی Echo اشتباه» است: اگر سطح از کنار یک Echo ثابت قوی عبور کند، رهگیر ممکن است روی آن بماند. این همان وضعیت برخورد در شکل ۱۳ است و راه تشخیص آن مقایسه مقدار نمایشی با یک مرجع مستقل در چند سطح است.

> **NOTE – حد اعتبار این بخش**
>
> پارامترهای واقعی (نوع پنجره، تعداد جاروب، معیار انتخاب Echo، سرعت مجاز ردیابی) داده سازنده‌اند MANUFACTURER-SPECIFIC DATA. آنچه در این سند آمده فقط اثر مهندسی هر مفهوم است و جای دستورالعمل دستگاه را نمی‌گیرد.

17 Blocking Distance و ناحیهٔ نزدیک

نزدیک به Antenna موج ارسالی و دریافتی هنوز جدا نشده‌اند و بازتاب‌های دهانه و Nozzle آشکارسازی را مختل می‌کنند. ناحیه‌ای که ترانسمیتر در آن اندازه‌گیری مطمئن ندارد Blocking Distance نام دارد. مقدار آن فقط از برگهٔ فنی همان مدل خوانده می‌شود MANUFACTURER-SPECIFIC DATA. شرط طراحی ساده است: F − BD > 0 با حاشیه، که در آن BD همان Blocking Distance است. اگر Echoهای حلقهٔ Nozzle (رابطهٔ $d_{ring,k}$) در فاصلهٔ کمتر از وضوح از Full Distance باشند، حاشیهٔ مؤثر از Blocking Distance نیز کوچک‌تر است. سطح پر نباید داخل این ناحیه قرار بگیرد و برای سرریز یا تلهٔ ایمنی از سنسور مستقل استفاده می‌شود، نه از Echo نزدیک.

18 کالیبراسیون، مبنای مرجع و خطای Datum

دو عدد Empty Distance و Full Distance مبنای تبدیل فاصله به سطح‌اند. هر دو از Reference Point ترانسمیتر اندازه‌گیری می‌شوند، که معمولاً سطح آب‌بندی فلنج یا نقطهٔ تعریف‌شدهٔ دستگاه است و در برگهٔ فنی آمده است MANUFACTURER-SPECIFIC DATA. خطای این دو عدد مستقیم به سطح منتقل می‌شود:

$$dP = dF / (E - F) \times 100 \; ; \; dI = 16 \times dP / 100 \tag{23}$$

dF	خطای تعیین Full Distance یا Empty Distance	m
dP	خطای درصد سطح	%
dI	خطای جریان خروجی	mA

برای محدودهٔ کالیبره E - F = 10 m خطای 20 mm در یکی از دو عدد، 0.20 % و 0.032 mA خطای خروجی می‌دهد. منابع رایج خطای Datum: اندازه‌گیری نادرست Empty Distance با متر نواری یا از روی نقشه، ضخامت واشر و ارتفاع فلنج که در Reference Point لحاظ نشده‌اند، انبساط حرارتی مخزن و Nozzle، تغییر شکل مکانیکی سقف تحت فشار، و استفاده از تراز نقشه به‌جای تراز ساخته‌شده. برای مخزن فولادی با ضریب انبساط 12×10^{-6} 1/K (فرضی) تغییر 10 K در ارتفاع 10 m حدود 1.2 mm جابه‌جایی می‌دهد.

ENGINEERING TIP — مرجع مستقل برای راستی‌آزمایی

برای راستی‌آزمایی در دو یا سه سطح از یک مرجع مستقل با عدم‌قطعیت معلوم (شیشهٔ نمایش، متر ردیاب، یا مرجع حجمی) استفاده کنید و عدم‌قطعیت همان مرجع را در معیار پذیرش لحاظ کنید؛ مرجعی که خودش دقت کمتری از ترانسمیتر دارد معیار معتبری نیست.

19 خطای حلقهٔ 4–20 mA و DCS

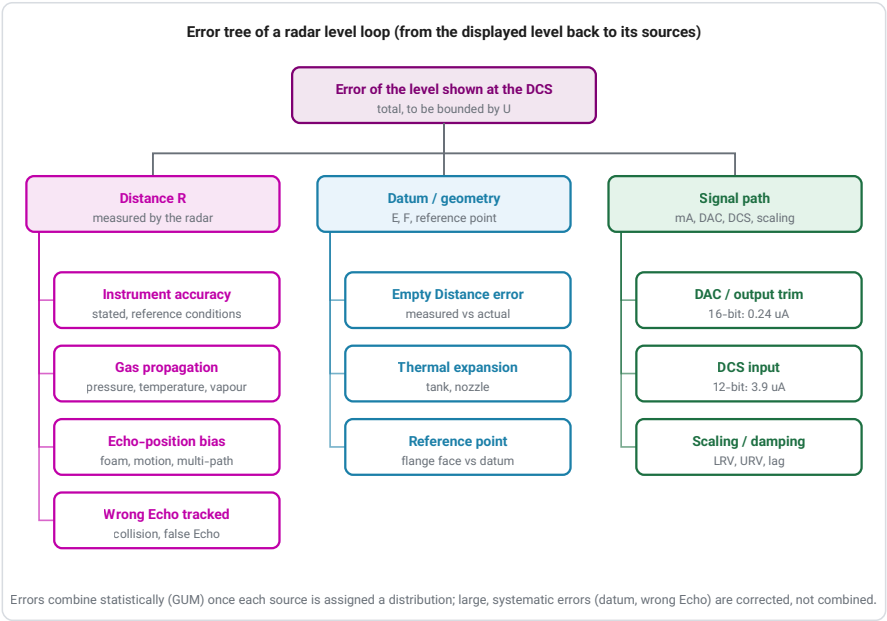
فاصلهٔ اندازه‌گیری‌شده پس از محاسبهٔ سطح به جریان تبدیل و در DCS دوباره به مقیاس مهندسی تبدیل می‌شود. هر تبدیل گسسته‌سازی دارد. مبدل دیجیتال به آنالوگ ۱۶ بیتی در ترانسمیتر پله‌ای برابر $16\ \text{mA} / (2^{16} - 1) = 0.244\ \mu\text{A}$ می‌دهد که روی محدودهٔ 10 m کمتر از 0.01 mm است و قابل‌چشم‌پوشی است. اما کارت ورودی DCS با ۱۲ بیت پله‌ای 3.91 µA دارد، یعنی 0.0244 % یا 2.44 mm روی همان محدوده (فرض 12 bit مؤثر برای کارت نمونه؛ REQUIRES VERIFICATION). اگر مشخصه‌های دقت کارت ورودی از برگهٔ DCS خوانده نشود، این ریز خطا در بودجه جا می‌افتد.

دو نکتهٔ دیگر: HART مقدار دیجیتال سطح را بدون گسسته‌سازی آنالوگ منتقل می‌کند و در صورت نیاز می‌توان آن را برای راستی‌آزمایی استفاده کرد؛ و سطح جریان خطا باید با توصیهٔ NAMUR NE 43 و با رفتار DCS سازگار باشد (ویرایش استاندارد REQUIRES VERIFICATION). عدم‌تطابق مقیاس بین ترانسمیتر و DCS (مثلاً LRV و URV متفاوت) خطای سیستماتیک ثابتی می‌سازد که با بازرسی حلقه حذف می‌شود، نه با بودجه.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

20 درخت خطا

برای محاسبهٔ بودجه ابتدا خطاهای ممکن دسته‌بندی می‌شوند. شکل ۱۵ سه شاخهٔ اصلی را نشان می‌دهد: فاصلهٔ اندازه‌گیری‌شده، هندسه و Datum، و مسیر سیگنال تا DCS. هر منبع یا «اصلاح می‌شود» (اگر سیستماتیک و قابل‌اندازه‌گیری است)، یا «در بودجه می‌آید» (اگر باقی‌ماندهٔ تصادفی یا حد معلوم دارد)، یا «با طراحی حذف می‌شود» (اگر مانند Echo اشتباه، ماهیت خطای جدی دارد).



شکل ۱۵ — درخت خطای حلقهٔ سطح‌سنج رادارى؛ منابع از سطح نمایشی در DCS تا ریشه‌های اندازه‌گیری

جدول ۷ — منابع خطا و روش برخورد با هر منبع

منبع	ماهیت	برخورد مهندسی
دقت ذکرشدهٔ ترانسمیتر	تصادفی با حد معلوم	در بودجه با توزیع مستطیلی؛ مقدار از برگهٔ فنی MANUFACTURER-SPECIFIC DATA
Empty Distance **و** Datum	سیستماتیک	با اندازه‌گیری دقیق اصلاح؛ خطای باقی‌مانده در بودجه
انبساط حرارتی مخزن	سیستماتیک وابسته به دما	اصلاح یا حد باقی‌مانده
فشار و ترکیب گاز	سیستماتیک وابسته به فرایند	جبران یا حد باقی‌مانده؛ برای فشار بالا اجباری است
انحراف موقعیت Echo **(موج،** Foam**، چندمسیره)**	تصادفی و سیستماتیک	حد در بودجه؛ شدیدتر با طراحی نصب کاهش می‌یابد
Echo **اشتباه (برخورد،** False Echo**)**	خطای جدی	با طراحی و راه‌اندازی حذف می‌شود؛ در بودجه جمع نمی‌شود
DAC**، ورودی** DCS **و مقیاس**	گسسته‌سازی و سیستماتیک	حد در بودجه؛ عدم‌تطابق مقیاس با بازرسی حذف می‌شود

21 بودجهٔ عدم‌قطعیت (GUM)

دقت یک مقدار تنها یک «درصد» نیست؛ ترکیب چند مؤلفهٔ مستقل است که هر کدام یک توزیع دارند. روش GUM (JCGM 100:2008) هر مؤلفه را به یک عدم‌قطعیت استاندارد تبدیل می‌کند. برای مؤلفه‌ای که فقط حد ±a دارد و توزیع آن مستطیلی فرض می‌شود:

$$u_i = a_i / \mathrm{sqrt}(3) \quad (24)$$

عدم‌قطعیت استاندارد ترکیبی از جمع مربعات به‌دست می‌آید و عدم‌قطعیت بسط‌یافته با ضریب پوشش k = 2 گزارش می‌شود (حدود 95 % برای توزیع تقریباً نرمال، فرض):

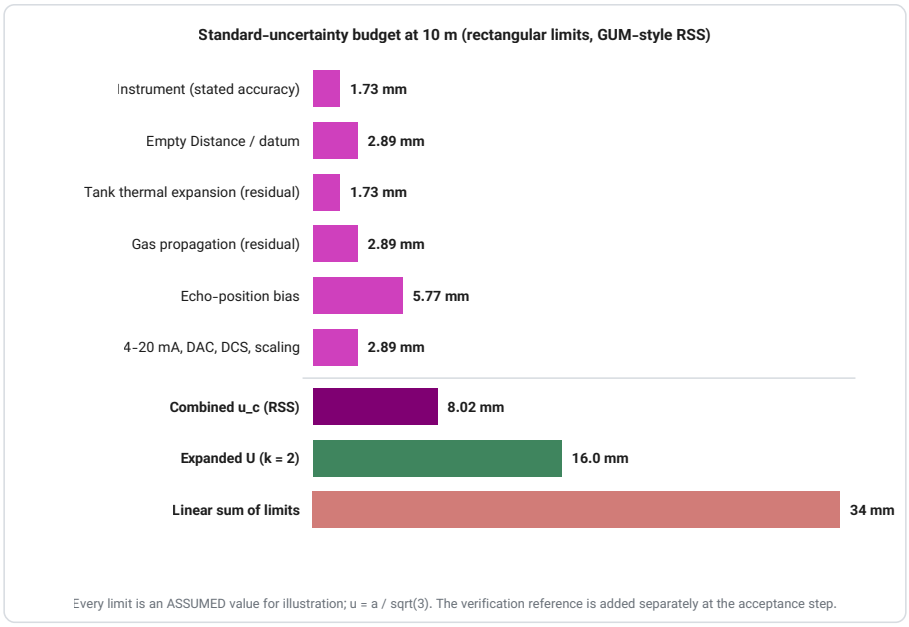
$$u_c = \mathrm{sqrt}(\mathrm{SUM}\ c_i^2\, u_i^2) \; ; \; U = k \times u_c \quad (25)$$

a_i	حد نیمهٔ مؤلفهٔ i	mm
u_i	عدم‌قطعیت استاندارد مؤلفه	mm
c_i	ضریب حساسیت مؤلفه به سطح (در این بودجه همه یک‌اند)	—
u_c	عدم‌قطعیت استاندارد ترکیبی	mm
k	ضریب پوشش	—
U	عدم‌قطعیت بسط‌یافته	mm

جدول ۸ — بودجهٔ عدم‌قطعیت در محدودهٔ 10 m (همهٔ حدود فرضی)

مؤلفه	حد a (mm)	توزیع	u (mm)
دقت ذکرشدهٔ ترانسمیتر (فرضی)	3	مستطیلی	1.73
Empty Distance **و اندازه‌گیری** Datum	5	مستطیلی	2.89
انبساط حرارتی مخزن (باقی‌مانده)	3	مستطیلی	1.73
انتشار در گاز (باقی‌مانده)	5	مستطیلی	2.89
انحراف موقعیت Echo **(موج،** Foam**، چندمسیره)**	10	مستطیلی	5.77
DAC**، ورودی** DCS **و مقیاس**	5	مستطیلی	2.89
مرجع راستی‌آزمایی (نرمال، k = 2)	3	نرمال	1.50

بدون مرجع راستی‌آزمایی: u_c = 8.02 mm و U = 16.0 mm با k = 2. اگر عدم‌قطعیت مرجع (±3 mm با توزیع نرمال و k = 2) هم افزوده شود u_c = 8.16 mm و U = 16.3 mm می‌شود. در مقابل، جمع خطی حدود برابر 34 mm است و بیش‌برآورد می‌شود، زیرا فرض می‌کند همهٔ منابع هم‌زمان در بدترین جهت باشند؛ جمع خطی فقط برای بدترین حالت سیستماتیک منطقی است. شکل ۱۶ مؤلفه‌ها و نتیجه را نشان می‌دهد؛ بزرگ‌ترین سهم از انحراف موقعیت Echo (5.77 mm) است، که یعنی بهبود نصب و Mapping بیش از ترانسمیتر پرهزینه‌تر کمک می‌کند.



شکل ۱۶ — مؤلفه‌های عدم‌قطعیت استاندارد، مقدار ترکیبی و جمع خطی حدود؛ مؤلفهٔ انحراف Echo بیشترین سهم را دارد

21.1 معیار پذیرش راستی‌آزمایی

وقتی خطای ترانسمیتر را با یک مرجع می‌سنجیم، عدم‌قطعیت هر دو باید لحاظ شود. اگر عدم‌قطعیت بسط‌یافتهٔ دستگاه U_{dev} و مرجع U_{ref} باشد، حد پذیرش برای قدر مطلق اختلاف e این است:

$$|e| \le \sqrt{U_{dev}^2 + U_{ref}^2} \quad (26)$$

با U_{dev} = 16.0 mm و U_{ref} = 3 mm حد پذیرش 16.3 mm است. اگر اختلاف اندازه‌گیری‌شده در هر سطح در این حد باشد، سازگاری با بودجه تأیید می‌شود؛ بیرون‌افتادن، نشانهٔ خطای سیستماتیک (Datum، Echo اشتباه) است و باید دنبال علت بگردیم، نه عدد را بپذیریم.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

22 ماتریس حساسیت

ماتریس حساسیت نشان می‌دهد هر ورودی طراحی چقدر روی سطح یا حاشیهٔ سیگنال اثر دارد؛ در طراحی، مؤلفه‌ای که بیشترین اثر را دارد اولویت بررسی است. ضریب حساسیت سطح نسبت به یک ورودی: $c_i = dL / dx_i$.

جدول ۹ — ماتریس حساسیت (مقادیر محاسبه‌شده با فرض‌های سند)

ورودی طراحی	تغییر	اثر	تفسیر
E Empty Distance	+1 mm	+1 mm سطح	ضریب ۱؛ هر خطای Datum کامل منتقل می‌شود
فشار مطلق گاز	+1 bar	+2.64 mm فاصله در 10 m	برای فشار بالا بزرگ؛ جبران یا حد در بودجه

ورودی طراحی	تغییر	اثر	تفسیر
دمای دیوارهٔ فولادی مخزن	+10 K	1.2 mm در 10 m	اثر کوچک ولی سیستماتیک؛ در Datum اصلاح می‌شود
ضریب دی‌الکتریک محصول	2.0 to 2.2	+1.09 dB	حساس در ناحیهٔ eps_r پایین
ضریب دی‌الکتریک محصول	2.0 to 1.8	-1.41 dB	کاهش دمای مایع یا ترکیب می‌تواند حاشیه را مصرف کند
فاصلهٔ سطح تا Antenna	10 to 12 m	-1.58 dB	افت قانون مجذور فاصله روی توان Echo
کجی محور (alpha = 8°)	3° to 4°	2.62 dB کمتر	هر درجهٔ اضافه در انحراف، اتلاف تند افزایش می‌یابد

دو نتیجه: حساسیت فاصلهٔ سطح به Empty Distance برابر یک است و تنها با اندازه‌گیری دقیق کاهش می‌یابد؛ و حاشیهٔ سیگنال بیشترین حساسیت را به eps_r و کجی محور دارد، یعنی دو چیزی که کاربر کمتر کنترل می‌کند. به همین دلیل مهندس طراح باید برای مایع با eps_r نزدیک مرز، دادهٔ واقعی دما-ضریب دی‌الکتریک بخواهد و کجی نصب را اندازه بگیرد.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

23 مورد الف: مخزن هیدروکربن با ضریب دی‌الکتریک پایین — محاسبهٔ کامل

مثال محاسباتی — بودجهٔ Echo و Echo کف WORKED EXAMPLE

داده‌ها (ASSUMPTION): مخزن استوانه‌ای با ارتفاع $H = 15.0\ m$ از سقف تا کف، Nozzle به طول $0.15\ m$، محصول با $eps_r = 2$، پایین‌ترین سطح مورد نیاز $L_{min} = 0.5\ m$؛ حاشیهٔ مرجع $M_0 = 50\ dB$ در $5\ m$ برای آب، اتلاف میعان $3\ dB$، حاشیهٔ لازم $10\ dB$؛ زاویه‌های $8°$ و $4°$.

گام ۱ — فاصله‌ها:

$$E = H + L_n = 15.0 + 0.15 = 15.15\ m$$

$$d_{max} = E - L_{min} = 15.15 - 0.5 = 14.65\ m$$

گام ۲ — لکهٔ پرتو (رابطهٔ (9)):

$$D_{fp}(8°) = 2 \times 14.65 \times \tan(4°) = 2.05\ m$$

$$D_{fp}(4°) = 2 \times 14.65 \times \tan(2°) = 1.02\ m$$

گام ۳ — افت بازتاب و فاصله (روابط (10) و (11)):

$$Gamma^2(2) = ((1 - 1.4142) / (1 + 1.4142))^2 = 0.0294$$

$$10 \log_{10}(Gamma^2 / Gamma_w^2) = -13.36\ dB$$

$$-20 \log_{10}(14.65 / 5) = -9.34\ dB$$

گام ۴ — حاشیه:

$$M(8°) = 50 - 13.36 - 9.34 - 3 = 24.3\ dB$$

$$M(4°) = 24.3 + 40 \log_{10}(2) = 36.3\ dB$$

گام ۵ — Echo کف (رابطهٔ (12)):

$$d_b = 14.65 + 1.4142 \times 0.5 = 15.36\ m$$

جدایی تا Echo سطح: $0.71\ m = 14.65 - 15.36$؛ قوی‌تر بودن Echo کف $15.1\ dB$.

در بیشینهٔ فاصلهٔ $14.65\ m$ حاشیه $24.3\ dB$ با $8°$ و $36.3\ dB$ با $4°$ است و از حاشیهٔ لازم $10\ dB$ بیشتر است؛ پس مسئلهٔ اصلی توان Echo نیست. مسئلهٔ اصلی Echo کف است که $15.1\ dB$ قوی‌تر از Echo سطح است و فقط $0.71\ m$ با آن فاصله دارد؛ در سطح پایین انتخاب Echo باید با منطق انتخاب (اولین Echo بالاتر از آستانه) و False Echo Mapping راستی‌آزمایی شود، و حداقل سطح کاری باید با آزمون واقعی تأیید شود. مقادیر فرضی‌اند.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

24 مورد ب: مخزن همزن‌دار

FIELD CASE B

سطح ناپایدار و کجی لحظه‌ای

«مخزن همزن‌دار؛ سطح در حال اختلاط تا 3° و گاهی 6° کج می‌شود، دامنهٔ موج 30 mm با دورهٔ 2 s ؛ پر و خالی‌شدن 1 m/min.» (ASSUMPTION)

تحلیل مهندسی: با رابطهٔ تلفات انحراف $A_p = 24\ (beta / alpha)^2$ برای alpha = 8° مقدار 3.4 dB در 3° و 13.5 dB در 6°؛ اما برای alpha = 4° این دو 13.5 و 54.0 dB می‌شوند. زاویهٔ باریک‌تر در مخزن همزن‌دار Echo را از دست می‌دهد، حتی اگر در مخزن آرام برتری داشت. برای میرایی: tau = 10 s نوسان 30 mm را با N = 5 نمونه به 13.4 mm می‌رساند و تأخیر 0.167 متر در 1 m/min دارد. **گزینه‌ها:** پرتو پهن‌تر یا Stilling Well، نصب خارج از گرداب و دور از شفت، میرایی متناسب با نرخ پر و خالی‌شدن، و تأیید سازنده برای سطح متلاطم. **موارد باز:** دامنهٔ واقعی شیب سطح در شرایط کار، سرعت همزن، وجود حباب یا Foam، و حد تأخیر مجاز حلقهٔ کنترل.

25 مورد پ: Nozzle بلند و باریک

FIELD CASE C

Echoهای حلقه‌ای نزدیک سطح پر

«Nozzle به قطر 100 mm و طول 0.40 m روی مخزن موجود؛ Full Distance برابر 1.15 m است و Echoهای متناوب نزدیک آن دیده می‌شوند.» (ASSUMPTION)

تحلیل مهندسی: فرکانس قطع $f_c = 1.757$ GHz است و نسبت فرکانس به قطع در سه فرکانس مرجع 3.4، 14.8 و 45.5 است؛ پس لوله در هر سه فرکانس موجبر چندمودی است. Echoهای حلقه‌ای در 0.8، 1.6 و 2.4 متر ظاهر می‌شوند و فاصلهٔ آن‌ها تا Full Distance به‌ترتیب 0.35، 0.45 و 1.25 متر است؛ نزدیک‌ترین Echo فقط 0.35 متر با سطح پر فاصله دارد، که چند برابر وضوح است ولی باید با Blocking Distance مدل مقایسه شود. اگر قطر 50 mm بود فرکانس قطع 3.51 GHz می‌شد و در 6 GHz نسبت فقط 1.7 بود؛ لوله‌های باریک‌تر مود کمتری دارند ولی Antenna باید داخل آن جا شود. **گزینه‌ها:** گشادکردن یا کوتاه‌کردن Nozzle، Antenna هم‌اندازه با Nozzle، بیرون‌آوردن Antenna تا حد مجاز سازنده، و Mapping فقط پس از اقدام‌های بالا. **موارد باز:** حداقل طول بیرون‌زدگی Antenna از Nozzle، Blocking Distance مدل و امکان اصلاح مکانیکی Nozzle.

26 مورد ت: سیلو با جامد

FIELD CASE D

زاویهٔ ریزش و ارتفاع نمایندهٔ حجم

«سیلو با شعاع 2 m، زاویهٔ ریزش 35°، Antenna در r = 1 m از محور، فاصلهٔ 10 m تا سطح و پرتو 8°؛ کاربر ارتفاع نمایندهٔ حجم را می‌خواهد.» (ASSUMPTION)

تحلیل مهندسی: ارتفاع مخروط 1.40 متر و ارتفاع معادل حجمی 0.467 متر است؛ در r = 1 m ارتفاع محلی 0.70 متر و خطای نمایندگی 0.233 متر می‌شود. لکهٔ پرتو در 10 m قطر 1.40 متر دارد و به‌خاطر شیب ۳۵ درجه ارتفاع سطح در عرض لکه 0.98 متر تغییر می‌کند؛ یعنی Echo در دامنه‌ای نزدیک یک متر پهن می‌شود و محل قله دقیق نیست. بازتاب آینه‌ای 70° منحرف می‌شود و فقط پراکندگی خشن سطح به Antenna برمی‌گردد. **گزینه‌ها:** نصب در نقطه‌ای که شیب موضعی کمتر است، Antenna قابل‌جهت‌دهی به محور سیلو، اندازه‌گیری با روشی مناسب سطح جامد و استفاده از حجم محاسبه‌شده با هندسهٔ واقعی. **موارد باز:** شکل واقعی سطح در پر و خالی‌شدن (مخروط یا قیف)، گردوغبار، و داده‌ای از سازنده برای جامد با این شیب.

27 FMEA سطح‌سنج راداری

تحلیل حالت‌ها و اثر خطا (FMEA) فهرستی از شیوه‌های واقعی خطا را با سازوکار فیزیکی و راه تشخیص جمع می‌کند. جدول زیر ۱۶ حالت را نشان می‌دهد؛ ستون «شواهد تشخیصی» چیزی است که در Echo Curve یا اندازه‌گیری مستقل دیده می‌شود. تمام شدت‌ها (Severity) به کاربرد و پیامد فرایند بستگی دارد و در این سند عدد نمی‌گیرند.

جدول ۱۰ — FMEA سطح‌سنج راداری FMCW

حالت خطا	سازوکار فیزیکی	اثر بر اندازه‌گیری	شواهد تشخیصی	اقدام اصلاحی
Echo **ثابت جدید**	مانع تازه در پرتو (نردبان، لوله)	قفل روی Echo اشتباه	قلهٔ ثابت در Echo Curve که با سطح حرکت نمی‌کند	اصلاح نصب؛ سپس False Echo Mapping
Echo **چندمسیره**	بازتاب مکرر بین سطح و سقف	سطح ظاهری در مضرب فاصله	قله در 2R و 3R	تنظیم آستانه و منطق انتخاب؛ بررسی هندسهٔ سقف
Echo **حلقه‌ای** Nozzle	موج چندمودی در لولهٔ بلند	Echo ناخواسته نزدیک سطح پر	قله‌ها در $2\,L_n$ و مضارب	تغییر Nozzle یا Antenna؛ سپس Mapping
Echo **ضعیف محصول**	eps_r پایین یا فاصله زیاد	قفل نشدن یا پرش سطح	حاشیهٔ سیگنال کمتر از حد لازم	Antenna با پرتو باریک‌تر؛ تأیید سازنده
کجی محور	Nozzle یا فلنج کج	افت Echo، سطح نادرست	دامنهٔ Echo پایین‌تر از مورد انتظار	اصلاح مکانیکی و بررسی دامنه
Build-up **روی** Antenna	رسوب چسبنده	کاهش تدریجی Echo	افت دامنه و بالا رفتن نویز نزدیک	بازرسی و شست‌وشو؛ طراحی Antenna مناسب

حالت خطا	سازوکار فیزیکی	اثر بر اندازه‌گیری	شواهد تشخیصی	اقدام اصلاحی
میعان	لایهٔ آب روی Antenna یا Nozzle	اتلاف دوطرفه، تغییر Echo ثابت	افت وابسته به دما و رطوبت	انتخاب فرکانس و Antenna مناسب؛ سطح صاف
Foam	حباب‌های سطح مایع	سطح کاذب یا ناپدیدشدن Echo	Echo ضعیف یا چندقله‌ای در ناحیه	Stilling Well یا فناوری دیگر
سطح موج‌دار	اختلاط یا ورودی	نوسان و افت Echo	تغییر سریع دامنه و موقعیت	میرایی مناسب؛ جابه‌جایی نصب
برخورد با Echo ثابت	فاصلهٔ محصول و مانع کمتر از وضوح	ردیاب گیر می‌کند	قفل روی فاصلهٔ ثابت در ناحیه	آزمون پویا؛ تغییر محل نصب یا Mapping درست
خطای Empty Distance	اندازه‌گیری یا مرجع نادرست	انحراف ثابت سطح	اختلاف ثابت با مرجع در همهٔ سطوح	اندازه‌گیری مجدد از Reference Point
تغییر ضریب دی‌الکتریک گاز	فشار یا بخار حلال	فاصلهٔ ظاهری بیشتر	خطای متناسب با فاصله و فشار	جبران یا حد در بودجه
عدم‌تطابق مقیاس	LRV و URV متفاوت یا میرایی مضاعف	خطای سطح و تأخیر	اختلاف نمایشگر و DCS	بازرسی حلقه و تنظیم یکنواخت
تداخل الکترومغناطیسی	نویز اتصال یا زمین	نوسان و نویز در Echo Curve	نویز وابسته به تجهیز نزدیک	زمین‌کردن و کابل‌کشی مطابق دستورالعمل
شیب محلی جامد	زاویهٔ ریزش	Echo ضعیف و پهن	قلهٔ پهن در Echo Curve	جهت‌دهی Antenna؛ نصب مناسب
Echo **کف در سطح پایین**	بازتاب قوی کف فلزی	انتخاب Echo اشتباه	قلهٔ قوی در فاصلهٔ ظاهری d_b	منطق انتخاب Echo؛ تعریف حداقل سطح
تغییر شکل مکانیکی	فشار یا حرارت روی سقف و Nozzle	تغییر Datum	رانش آهستهٔ اختلاف با مرجع	اصلاح Reference Point؛ بازبینی دوره‌ای

28 ماتریس راستی‌آزمایی طراحی

ماتریس زیر برای مخزن مورد الف و پ تنظیم شده است و به‌جای ادعای «تأیید شد»، وضعیت هر نیازمندی را با مبنا و مورد باز نشان می‌دهد. وضعیت «محاسبه‌شده» یعنی مبتنی بر فرض‌های این سند؛ وضعیت «باز» یعنی هنوز داده‌ای از سازنده یا اندازه‌گیری میدانی نیامده است.

جدول ۱۱ — ماتریس راستی‌آزمایی طراحی (نمونه)

نیازمندی	ورودی	محاسبه یا تنظیم	مبنای راستی‌آزمایی	وضعیت	مدرک	مورد باز
لکه داخل دیواره	alpha = 8°، d = 10 m	شعاع لکه 0.70 متر؛ حداقل فاصلهٔ دیواره 1.00 متر	ENGINEERING RECOMMENDATION	محاسبه‌شده	رابطهٔ (9)	زاویهٔ واقعی مدل
حاشیهٔ سیگنال	eps_r = 2	M = 24.3 dB	ASSUMPTION	محاسبه‌شده	رابطهٔ (11)	دادهٔ حداقل eps_r سازنده
Echo **کف**	h = 0.5 m	d_b = 15.36 m	ASSUMPTION	باز	رابطهٔ (12)	آزمون در سطح پایین
فاصلهٔ Full Distance **تا** Blocking Distance	F = 1.15 m	Echo حلقه‌ای در 0.35 متر از F	MANUFACTURER-SPECIFIC DATA	باز	رابطهٔ (15)	مقدار Blocking Distance
کجی محور	beta ≤ 3°	افت 3.4 dB	REQUIRES VERIFICATION	باز	رابطهٔ (17)	اندازه‌گیری کجی در نصب
خطای فشار گاز	10 bar(a)	26.4 mm	REQUIRES VERIFICATION	باز	رابطهٔ (21)	ضریب گاز واقعی
عدم‌قطعیت	بودجهٔ جدول ۸	U = 16.0 mm، k = 2	روش GUM	محاسبه‌شده	روابط (24) و (25)	حدود واقعی اجزا
پذیرش در محل	U_{ref} = 3 mm	حد 16.3 mm	رابطهٔ (26)	باز	گزارش آزمون سطح	اجرای آزمون در سه سطح

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

29 استانداردها و انضباط منابع

هیچ استاندارد بین‌المللی واحدی که عملکرد سطح‌سنج راداری را به‌عنوان یک دستهٔ فناوری تعریف کند در منابع بررسی‌شدهٔ این پروژه استناد نشده است؛ آنچه در عمل ارجاع می‌شود استانداردهای عمومی محصول، ایمنی، محافظت و عدم‌قطعیت و مقررات رادیویی است. هیچ‌کدام از این‌ها در اینجا الزام معتبر برای طراحی شما اعلام نمی‌شود؛ هر ارجاع با مبنای خود در جدول آمده است و ویرایش جاری باید تأیید شود.

جدول ۱۲ — استانداردها، موضوع و برچسب مبنا

مرجع	موضوع	برچسب مبنا	یادداشت
ETSI EN 302 372	مقررات رادیویی رادار کاوشگر سطح مخزن (Tank Level Probing Radar)	ENGINEERING RECOMMENDATION	مقررات رادیویی، نه عملکرد اندازه‌گیری؛ متن کامل خوانده نشده است REQUIRES VERIFICATION
47 CFR § 15.256	مقررات FCC برای رادار تحقیقی سطح	ENGINEERING RECOMMENDATION	فقط برای معرفی جنبهٔ رادیویی
IEC 60529	درجهٔ حفاظت IP	ENGINEERING RECOMMENDATION	ویرایش جاری REQUIRES VERIFICATION
IEC 60079-0 / -1 / -11	الزام‌های عمومی و انواع حفاظت انفجاری	ENGINEERING RECOMMENDATION	هیچ ادعای انطباق NICO نشده است REQUIRES VERIFICATION
IEC 61326-1	الزام‌های EMC تجهیز اندازه‌گیری	ENGINEERING RECOMMENDATION	ویرایش جاری REQUIRES VERIFICATION
NAMUR NE 43	سطح جریان خطا	ENGINEERING RECOMMENDATION	ویرایش جاری REQUIRES VERIFICATION
NAMUR NE 107	خودپایشی و تشخیص دستگاه	ENGINEERING RECOMMENDATION	ویرایش جاری REQUIRES VERIFICATION
IEC 61508 و IEC 61511-1	ایمنی عملکردی؛ مرجع عمومی برای کاربرد حفاظتی	ENGINEERING RECOMMENDATION	این سند رتبهٔ SIL برای هیچ محصول NICO ادعا نمی‌کند
JCGM 100:2008	راهنمای بیان عدم‌قطعیت (GUM)	ENGINEERING RECOMMENDATION	روش بودجه؛ متن کامل مطالعه نشده REQUIRES VERIFICATION

30 حدود اعتبار (Limits of Applicability)

نتایج این سند در چارچوب فرض‌های آن معتبرند. فهرست زیر مرز اعتبار را مشخص می‌کند تا از استفادهٔ خارج از دامنه جلوگیری شود:

- ☐ رابطهٔ بازتاب برای برخورد عمود، سطح تخت و محیط بدون اتلاف است؛ برای سطح خشن، موج‌دار یا جامد فقط حد بالاست.
- ☐ رابطهٔ زاویه‌ای theta ≈ 70 lambda / D و افت انحراف گاوسی تقریب‌اند و جای دادهٔ سازنده را نمی‌گیرند.

- [ ] ضریب فشاری گاز برای هواست؛ بخار حلال یا گاز غیرایده‌آل نیاز به داده دارد.
- [ ] بودجهٔ عدم‌قطعیت مؤلفه‌های مستقل و حدود فرضی دارد؛ حدود واقعی از برگهٔ دستگاه و اندازه‌گیری می‌آیند.
- [ ] رفتار الگوریتم انتخاب Echo هر سازنده اختصاصی است و در این سند مدل نشده است.
- [ ] هیچ مشخصهٔ عددی محصول NICO ادعا نشده است؛ هر تصمیم نصب نهایی باید با برگهٔ فنی تأییدشدهٔ مدل انتخابی و آزمون در محل راستی‌آزمایی شود.

31 ثبت معادلات

همهٔ رابطه‌های شمارهٔ این سند در یک جدول جمع شده‌اند تا بازرسی ابعادی و جای‌گیری نمادها ساده شود. ستون «بازرسی ابعادی» نتیجهٔ بررسی واحدها در محاسبات سند است.

جدول ۱۳ — ثبت معادلات و بازرسی ابعادی

شماره	رابطه	مفهوم	بازرسی ابعادی
(1)	lambda = c / f	طول موج	(m/s)/(1/s) = m — درست
(2)	S = B / T	شیب جاروب	Hz/s — درست
(3)	$f_b = 2RS/c$	Beat Frequency	m*(Hz/s)/(m/s) = Hz — درست
(4)	$R = c\, f_b / (2S)$	فاصله از فرکانس ضربان	(m/s)*Hz/(Hz/s) = m — درست
(5)	dR = c / (2B)	وضوح فاصله	(m/s)/Hz = m — درست
(6)	L = E - R	سطح از فاصله	m — درست
(7)	P، I	درصد و جریان خروجی	% and mA — درست
(8)	theta ≈ 70 lambda/D	زاویهٔ پرتو (تقریب)	theta in deg; lambda/D dimensionless — درست
(9)	$D_{fp} = 2\, d \tan(alpha/2)$	لکهٔ پرتو	m — درست
(10)	$Gamma^2 = ((1-sqrt(eps_r))/(1+sqrt(eps_r)))^2$	بازتاب دی‌الکتریک	dimensionless — درست
(11)	$M = M_0 + 10log(Gamma^2/Gamma_w^2) - 20log(d/d_{ref}) - A_f$	حاشیهٔ Echo	dB — درست
(12)	$d_b = (E-h) + sqrt(eps_r)\, h$	کف Echo	m — درست

شماره	رابطه	مفهوم	بازرسی ابعادی
(13)	$d_k = kR$	Echo چندمسیره	m — درست
(14)	$f_c = 1.8412\ c / (\pi D_n)$	قطع مود پایه	(m/s)/m = Hz — درست
(15)	$d_{ring,k} = k \cdot 2L_n$	Echo حلقه‌ای	m — درست
(16)	$s \approx 2\ d \sin \beta$	انحراف جانبی	m — درست
(17)	$A_p \approx 24\ (\beta/\alpha)^2$	افت انحراف (تقریب)	dB; beta/alpha dimensionless — درست
(18)	$h_c = R \tan \varphi\ ;\ h_{eq} = h_c/3$	هندسهٔ مخروط	m — درست
(19)	$h_r = h_c(1-r/R)$	ارتفاع محلی و خطای نمایندگی	m — درست
(20)	$\varepsilon_{eff} \approx 1 + (\varepsilon_r-1)\ f$	Foam	dimensionless — درست
(21)	$dd = d(\sqrt{\varepsilon_g}-1)$	خطای گاز	m — درست
(22)	$\sigma_{res} = \sigma_0/\sqrt{N}\ ;\ lag = v\ \tau$	میانگین‌گیری و تأخیر	mm and (m/s)*s = m — درست
(23)	$dP = dF/(E-F)\cdot 100$	خطای Datum	% and mA — درست
(24)	$u_i = a_i/\sqrt{3}$	عدم‌قطعیت مستطیلی	mm — درست
(25)	u_c، U	ترکیب و بسط	mm — درست
(26)	$\lvert e \rvert \le \sqrt{U_{dev}^2 + U_{ref}^2}$	حد پذیرش	mm — درست

32 ثبت اصطلاحات

اصطلاحات فنی کنترل‌شده‌اند: در جایی که معادل فارسی تثبیت‌شده نیست، اصطلاح انگلیسی بدون ترجمه به کار رفته است.

جدول ۱۴ — ثبت اصطلاحات این سند

اصطلاح	رده	تعریف و یادداشت کاربرد
سطح‌سنج رادار (Radar Level Transmitter)	دوزبانه	ترانسمیتر سطح بدون تماس مبتنی بر موج الکترومغناطیسی
FMCW	نگهداری انگلیسی	رادار موج پیوستهٔ مدوله‌شده در فرکانس
Beam Angle	نگهداری انگلیسی	زاویهٔ کامل لوب اصلی؛ تعریف دقیق از سازنده

اصطلاح	رده	تعریف و یادداشت کاربرد
Beam Footprint	نگهداری انگلیسی	ناحیهٔ روشن‌شده روی سطح؛ مقدار حاصل از d و alpha
Echo Curve	نگهداری انگلیسی	دامنهٔ Echo برحسب فاصله
False Echo Mapping	نگهداری انگلیسی	ثبت Echoهای ثابت برای تنظیم آستانه؛ اصلاح نصب نیست
Blocking Distance	نگهداری انگلیسی	ناحیهٔ نزدیک Antenna بدون اندازه‌گیری مطمئن
Reference Point	نگهداری انگلیسی	مبدأ اندازه‌گیری فاصله؛ از برگهٔ فنی
Empty Distance و Full Distance	نگهداری انگلیسی	فاصله از Reference Point تا کف و تا سطح پر
Signal Margin	نگهداری انگلیسی	فاصلهٔ Echo تا آستانه به dB
عدم‌قطعیت (Uncertainty)	دوزبانه	بازهٔ پراکندگی مقدار با ضریب پوشش؛ مترادف «خطا» نیست
خطا (Error)	فارسی	اختلاف مقدار اندازه‌گیری و مقدار مرجع؛ منبع آن سیستماتیک یا تصادفی است
راستی‌آزمایی (Verification)	دوزبانه	سنجش با معیار پذیرش؛ تنظیم (Adjustment) نیست

33 پرسش‌های متداول

› چرا وضوح FMCW به پهنای باند وابسته است و نه فرکانس حامل؟

چون وضوح فرکانسی تبدیل فوریه به زمان جاروب وابسته است و تبدیل فرکانس ضربان به فاصله با شیب جاروب انجام می‌شود؛ حاصل dR = c / (2B) است. فرکانس حامل فقط طول موج و پرتو را تعیین می‌کند.

› آیا Antenna با پرتو باریک‌تر همیشه بهتر است؟

نه. پرتو باریک‌تر Echo را در مایع کم‌بازتاب تقویت می‌کند (نیم‌شدن زاویه حدود 12 dB فرضی)، اما به کجی محور و شیب سطح حساس‌تر است؛ در مخزن همزن‌دار می‌تواند بدتر عمل کند.

› ضریب دی‌الکتریک آب را چه عددی بگیریم؟

مقدار وابسته به دما و فرکانس است و عدد ساده‌ای مثل 80 فقط مرجع مقایسه است. برای طراحی از مأخذ معتبر یا اندازه‌گیری استفاده شود REQUIRES VERIFICATION.

› Echo کف را می‌توان مرجع سطح پایین دانست؟

نه. فاصلهٔ ظاهری کف به eps_r و ارتفاع مایع وابسته است و Echo کف فلزی می‌تواند از Echo سطح قوی‌تر باشد؛ فقط با منطق انتخاب Echo و آزمون استفاده می‌شود.

› Mapping جایگزین اصلاح Nozzle است؟

خیر. Mapping آستانه را برای فاصله‌های ثابت بالا می‌برد؛ اگر Echo محصول با آن‌ها یکی شود یا حاشیه کم شود، سطح از دست می‌رود. ابتدا نصب اصلاح و سپس Mapping انجام می‌شود.

› چرخاندن محفظه می‌تواند کجی Nozzle را درست کند؟

نه. چرخش محفظه فقط جهت نمایشگر و کابل را عوض می‌کند و محور Antenna را تغییر نمی‌دهد.

› فشار بالای مخزن چقدر روی رادار اثر دارد؟

با فرض گاز شبه‌هوا حدود 2.64 mm بر بار در 10 m است؛ ضریب برای هر گاز باید راستی‌آزمایی شود REQUIRES VERIFICATION.

› چرا جمع خطی خطاها درست نیست؟

چون فرض می‌کند همهٔ منابع هم‌زمان در بدترین جهت باشند. روش GUM منابع مستقل را با جمع مربعات ترکیب می‌کند و با ضریب پوشش گزارش می‌دهد؛ جمع خطی فقط برای بدترین حالت سیستماتیک منطقی است.

› U با k = 2 دقیقاً چند درصد پوشش می‌دهد؟

برای توزیع تقریباً نرمال حدود 95 %؛ ولی وقتی چند مؤلفهٔ مستطیلی با سهم غالب وجود دارد پوشش واقعی با فرض نرمال متفاوت است و باید جداگانه بررسی شود.

› در سیلو چرا ارتفاع نقطه‌ای با حجم یکی نیست؟

چون سطح جامد مخروطی است. ارتفاع معادل حجمی یک‌سوم ارتفاع مخروط و ارتفاع محلی در شعاع r برابر $h_c\ (1 - r / R)$ است؛ تفاوت آن‌ها خطای نمایندگی می‌سازد.

› میرایی بیشتر همیشه نتیجهٔ بهتر می‌دهد؟

نه. میرایی نوسان را به‌اندازهٔ ریشهٔ تعداد نمونه کم می‌کند، ولی تأخیر $lag = v \times tau$ می‌سازد؛ مقدار باید با نرخ پر و خالی‌شدن و نیاز حلقه تنظیم شود.

› راستی‌آزمایی در محل با چه معیاری پذیرفته می‌شود؟

با معیار $|e| \le sqrt(U_{dev}^2 + U_{ref}^2)$ در چند سطح؛ عدم‌قطعیت مرجع نیز باید لحاظ شود.

NICO
شرکت دانش‌بنیان صنعت خاورمیانه

34 چک‌لیست طراحی و راستی‌آزمایی

- ☐ برگهٔ داده کاربردی کامل است و داده نامعلوم صراحتاً ثبت شده است.
- ☐ eps_r واقعی محصول در دمای کاری و بازهٔ تغییر آن تأیید شده است.
- ☐ Beam Footprint در بیشینهٔ فاصله از دیواره، نردبان و جریان ورودی فاصلهٔ ایمن دارد.
- ☐ Nozzle برای سطح پایین و سطح پر هر دو و با Echoهای حلقه‌ای بررسی شده است.
- ☐ کجی محور اندازه‌گیری و در حد مجاز سازنده است.
- ☐ Full Distance از Blocking Distance با حاشیه فاصله دارد.
- ☐ Echo Curve در حداقل سه سطح ثبت شده و برخورد با Echoهای ثابت بررسی شده است.
- ☐ False Echo Mapping پس از تمیزکاری و در شرایط پایدار ثبت و تاریخ آن در مدرک آمده است.

- ☐ Empty Distance و Datum با اندازه‌گیری دقیق از Reference Point تعیین شده‌اند.
- ☐ خطای فشار و بخار گاز در بودجه آمده یا جبران شده است.
- ☐ میرایی فقط یک بار و متناسب با نرخ تغییر سطح اعمال شده است.
- ☐ مقیاس ترانسمیتر و DCS و رفتار خطا یکسان و مطابق توصیهٔ NAMUR NE 43 است.
- ☐ بودجهٔ عدم‌قطعیت با k = 2 و معیار پذیرش با عدم‌قطعیت مرجع ثبت شده است.
- ☐ FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی تکمیل و مورد باز هر کدام صاحب و تاریخ دارند.

جمع‌بندی نکات کلیدی

- وضوح FMCW فقط از پهنای باند می‌آید؛ دقت نهایی از ترکیب فیزیک انتشار، بازتاب، هندسهٔ نصب و تبدیل خروجی می‌آید.
- در مایع کم‌بازتاب حاشیهٔ سیگنال به eps_r و کجی محور بیش از هر عامل دیگری حساس است.
- Nozzle یک موجبر است؛ Echoهای حلقه‌ای و Blocking Distance باید برای سطح پر هم بررسی شوند.
- سطح جامد مخروطی بازتاب را از محور خارج می‌کند و ارتفاع نقطه‌ای را از ارتفاع نمایندهٔ حجم جدا می‌کند.
- خطای انتشار ناشی از فشار گاز در رادار کوچک ولی در فشار بالا غیرقابل‌چشم‌پوشی است؛ اولتراسونیک بدون جبران دما بسیار بدتر است.
- بودجهٔ عدم‌قطعیت با GUM ترکیب مربعات است، نه جمع خطی؛ بزرگ‌ترین سهم معمولاً انحراف موقعیت Echo است.
- هیچ مشخصه یا گواهی NICO ادعا نشده است؛ هر تصمیم نهایی با برگهٔ فنی رسمی و آزمون در محل راستی‌آزمایی می‌شود.

35 استانداردها و منابع

1. ETSI EN 302 372 — Short Range Devices (SRD); Tank Level Probing Radar (TLPR) equipment operating in the frequency ranges 4,5 GHz to 7 GHz, 8,5 GHz to 10,6 GHz, 24,05 GHz to 27 GHz, 57 GHz to 64 GHz, 75 GHz to 85 GHz

   مقررات رادیویی؛ نه استاندارد عملکرد اندازه‌گیری. متن کامل در این سند خوانده نشده است REQUIRES VERIFICATION.

2. 47 CFR § 15.256 — Operation of level probing radars within the bands 5.925–7.250 GHz, 24.05–29.00 GHz, and 75–85 GHz

   مقررات FCC؛ فقط برای معرفی جنبهٔ رادیویی.

3. IEC 60529 — Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)

   ویرایش جاری باید تأیید شود REQUIRES VERIFICATION.

4. IEC 60079-0 — Explosive atmospheres — Part 0: Equipment — General requirements; IEC 60079-1 — Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures “d”; IEC 60079-11 — Part 11: Equipment protection by intrinsic safety “i”

   هیچ ادعای انطباق محصول NICO نشده است؛ ویرایش‌ها باید تأیید شوند REQUIRES VERIFICATION.

5. IEC 61326-1 — Electrical equipment for measurement, control and laboratory use — EMC requirements — Part 1: General requirements

ویرایش جاری باید تأیید شود REQUIRES VERIFICATION.

6. NAMUR NE 43 — Standardization of the Signal Level for the Failure Information of Digital Transmitters; NAMUR NE 107 — Self-monitoring and diagnosis of field devices

ویرایش جاری باید تأیید شود REQUIRES VERIFICATION.

7. IEC 61508 — Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems; IEC 61511-1 — Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector — Part 1

فقط برای ارجاع به چارچوب کاربرد حفاظتی؛ هیچ ادعای SIL برای محصول NICO نشده است REQUIRES VERIFICATION.

8. JCGM 100:2008 — Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)

مبنای روش بودجهٔ عدم‌قطعیت؛ متن کامل در این سند بازخوانی نشده است REQUIRES VERIFICATION.

9. مراجع درسی عمومی برای روابط فیزیکی: C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design؛ D. M. Pozar, Microwave Engineering؛ M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems

مرجع عمومی برای روابط آنتن، موجبر و FMCW؛ ویرایش و صفحه در این سند مشخص نشده و مطالب دوباره بازخوانی نشده‌اند REQUIRES VERIFICATION.

این سند سطح ۳ است و هیچ عدد مخزن، فرکانس، زاویه یا مشخصهٔ محصول آن مشخصهٔ محصول NICO نیست. همهٔ اعداد فرضی‌اند و برای نشان‌دادن روش آمده‌اند. هیچ استاندارد واحدی عملکرد سطح‌سنج راداری را به‌عنوان یک دستهٔ فناوری در منابع بررسی‌شدهٔ این پروژه تعریف نمی‌کند.

منابع مرتبط NICO

پیش‌نیاز

- سطح‌سنج راداری چیست و چگونه کار می‌کند؟ — NICO-EDU-LVL-L1-004-FA
- راهنمای مهندسی انتخاب، نصب و راه‌اندازی سطح‌سنج راداری — NICO-EDU-LVL-L2-005-FA

ابزارهای مرتبط NICO

- خانوادهٔ ترانسمیتر راداری سطح با پلتفرم 80 GHz — RLT40
- سطح‌سنج التراسونیک (برای مقایسه) — UFM20
- ترانسمیتر هیدرواستاتیک سطح — HLT40

نام مدل چاپ‌شده روی لیبل عکس مرجع با نام خانوادهٔ بالا مطابقت داده نشده است و باید از مدارک رسمی NICO تأیید شود؛ مشخصات، محدودهٔ کاربرد و تأییدیهٔ هر مدل فقط از برگهٔ فنی رسمی گرفته می‌شود.